



TARSUS
ÜNİVERSİTESİ

TARSUS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

**TIG KAYNAK YÖNTEMİYLE BİRLEŞTİRİLEN INCONEL
625 ve AISI 316 L MALZEMELERİN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN ve KOROZYON DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ**

Fatih DÖKME

İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

TARSUS-2018

**TIG KAYNAK YÖNTEMİYLE BİRLEŞTİRİLEN INCONEL
625 ve AISI 316 L MALZEMELERİN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN ve KOROZYON DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

FATİH DÖKME

**TARSUS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**İMALAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**Danışman
Prof. Dr. Mustafa Kemal KÜLEKÇİ**

2018, Tarsus-MERSİN

ONAY

Fatih DÖKME tarafından Prof. Dr. Mustafa Kemal KÜLEKÇİ danışmanlığında hazırlanan "TIG Kaynak Yöntemiyle Birleştirilen Inconel 625 ve AISI 316 L Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin ve Korozyon Davranışlarının İncelenmesi" başlıklı çalışma aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından 10/12/2018 tarihinde yapılan Tez Savunma Sınavı sonucunda oy birliği ile Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Görevi	Ünvanı, Adı ve Soyadı	İmza
Başkan	Prof.Dr. Mustafa Kemal KÜLEKÇİ	
Üye	Prof.Dr. Uğur EŞME	
Üye	Prof.Dr. İbrahim SEVİM	
Üye	Prof.Dr. Abdul Kadir EKŞİ	
Üye	Doç.Dr. Funda KAHRAMAN	

Yukarıdaki jüri kararı Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 27/12/2018 tarih ve 2018/.../66 sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Doç. Dr. Osman Murat ÖZGENÇER
Lisansüstü Enstitü Müdürü



Bu tezde kullanılan özgün bilgiler, şekil, tablo ve fotoğraflardan kaynak göstermeden alıntı yapmak 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu hükümlerine tabidir.

ETİK BEYAN

Tarsus Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğinde belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlâk kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
 - Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak kullandığımı,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
 - Bu tezin herhangi bir bölümünü Tarsus Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı,
 - Tezin tüm telif haklarını Tarsus Üniversitesi'ne devrettiğimi
- beyan ederim.

ETHICAL DECLARATION

This thesis is prepared in accordance with the rules specified in Tarsus University Graduate Education Regulation and I declare to comply with the following conditions:

- I have obtained all the information and the documents of the thesis in accordance with the academic rules.
- I presented all the visual, auditory and written informations and results in accordance with scientific ethics.
- I refer in accordance with the norms of scientific works about the case of exploitation of others' works.
- I used all of the referred works as the references.
- I did not do any tampering in the used data.
- I did not present any part of this thesis as an another thesis at Tarsus University or another university.
- I transfer all copyrights of this thesis to the Tarsus University.

14 Aralık 2018 / 14 December 2018

İmza / Signature

Fatih DÖKME

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
TABLolar DİZİNİ	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
KISALTMALAR ve SİMGELER	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI	2
2.1. Süper Alaşım lar	2
2.1.1. Nikel Esaslı Süper Alaşım lar	2
2.1.2. Kobalt Esaslı Süper Alaşım lar	3
2.1.3. Demir Esaslı Süper Alaşım lar	4
2.2. Inconel 625 Malzemesinin Genel Özellikleri ve Kaynak Kabiliyeti	4
2.3. AISI 316L Malzemesinin Genel Özellikleri ve Kaynak Kabiliyeti	6
2.4. Farklı Metallerin Kaynaklarında Kullanılan Başlıca Kaynak Yöntemleri	7
2.4.1. TIG (Tungsten Inert Gas) Kaynağı	7
2.4.2. MIG (Metal Inert Gas) Kaynağı	8
2.4.3. Plazma Ark Kaynağı	9
2.4.4. Lazer Kaynağı	11
2.4.5. Elektron Işın Kaynağı	13
2.4.6. Direnç Kaynağı	14
2.4.6.1. Nokta Direnç Kaynağı	14
2.4.6.2. Dikiş Direnç Kaynağı	15
2.4.6.3. Direnç Kabartı Kaynağı	16
2.4.7. Sürtünme Kaynağı	17
2.4.7.1. Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynağı	18
2.4.7.2. Volan Tahrikli Sürtünme Kaynağı	18
2.5. Korozyon Çeşitleri	19
2.5.1. Homojen Dağılımlı Korozyon	20
2.5.2. Galvanik Korozyon	20
2.5.3. Çukurcuk Korozyonu	22
2.5.4. Taneler Arası Korozyon	23
2.5.5. Seçici Korozyon	24
2.5.6. Erozyonlu Korozyon	25
2.5.7. Sürtünme Korozyonu	26
2.5.8. Stres Korozyonu	27
2.5.9. Yorulmalı Korozyon	28
2.5.10. Yüksek Sıcaklık Korozyonu	28
2.5.11. Hidrojen Hasarları	29
2.6. Farklı Metallerin Kaynağı ile İlgili Yapılan Önceki Çalışmalar	30
3. MATERYAL ve YÖNTEM	37
3.1. Materyal	37
3.2. Yöntem	39
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	45
4.1. Sürekli Akım TIG Kaynağı Makro Yapı Sonuçları	45
4.2. Darbeli Akım TIG Kaynağı Makro Yapı Sonuçları	47
4.3. Mikro Yapı Sonuçları	48
4.3.1. Sürekli Akım TIG Kaynağı yöntemi ve ERNiCr-3 Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Mikro Yapı Sonuçları	48
4.3.2. Sürekli Akım TIG Kaynağı yöntemi ve TIG 316L Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Mikro Yapı Sonuçları	50

	Sayfa
4.3.3. Sürekli Akım TIG Kaynağı yöntemi ve Burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Mikro Yapı Sonuçları	51
4.3.4. Darbeli Akım TIG Kaynağı yöntemi ve ERNiCr-3 Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Mikro Yapı Sonuçları	53
4.3.5. Darbeli Akım TIG Kaynağı yöntemi ve TIG 316L Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Mikro Yapı Sonuçları	55
4.3.6. Darbeli Akım TIG Kaynağı yöntemi ve Burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Mikro Yapı Sonuçları	57
4.4. Çizgisel Haritalama Analizleri	60
4.4.1. Sürekli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve ERNiCr-3 Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Çizgisel Haritalama Analizleri	60
4.4.2. Sürekli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve TIG 316L Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Çizgisel Haritalama Analizleri	61
4.4.3. Sürekli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve Burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Çizgisel Haritalama Analizleri	62
4.4.4. Darbeli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve ERNiCr-3 Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Çizgisel Haritalama Analizleri	63
4.4.5. Darbeli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve TIG 316L Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Çizgisel Haritalama Analizleri	64
4.4.6. Darbeli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve Burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Çizgisel Haritalama Analizleri	65
4.5. SEM/EDAX Analizleri	66
4.5.1. Sürekli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve ERNiCr-3 Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki SEM/EDAX Analiz Sonuçları	66
4.5.2. Sürekli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve TIG 316L Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki SEM/EDAX Analiz Sonuçları	67
4.5.3. Sürekli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki SEM/EDAX Analiz Sonuçları	68
4.5.4. Darbeli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve ERNiCr-3 Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki SEM/EDAX Analiz Sonuçları	69
4.5.5. Darbeli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve TIG 316L Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki SEM/EDAX Analiz Sonuçları	70
4.5.6. Darbeli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki SEM/EDAX Analiz Sonuçları	71
4.6. Mikro Sertlik Test Sonuçları	73
4.6.1. Sürekli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve ERNiCr-3 Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Mikro Sertlik Sonuçları	73
4.6.2. Sürekli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve TIG 316L Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Mikro Sertlik Sonuçları	74
4.6.3. Sürekli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Mikro Sertlik Sonuçları	75
4.6.4. Darbeli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve ERNiCr-3 Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Mikro Sertlik Sonuçları	76
4.6.5. Darbeli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve TIG 316L Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Mikro Sertlik Sonuçları	77
4.6.6. Darbeli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Mikro Sertlik Sonuçları	78
4.7. Çekme Testi Sonuçları	79
4.7.1. Sürekli Akım TIG Kaynağı Çekme Testi Sonuçları	79
4.7.2. Darbeli Akım TIG Kaynağı Çekme Testi Sonuçları	81
4.8. Korozyon Testi Sonuçları	84
4.8.1. Sürekli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve ERNiCr-3 Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Korozyon Testi Sonuçları	84
	86

	Sayfa
4.8.2. Sürekli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve TIG 316L Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Korozyon Testi Sonuçları	89
4.8.3. Sürekli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve Burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Korozyon Testi Sonuçları	91
4.8.4. Darbeli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve ERNiCr-3 Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Korozyon Testi Sonuçları	94
4.8.5. Darbeli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve TIG 316L Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Korozyon Testi Sonuçları	96
4.8.6. Darbeli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve Burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Korozyon Testi Sonuçları	
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	100
KAYNAKLAR	103
EKLER (Var ise)	
ÖZGEÇMİŞ	109



ÖZET

TIG KAYNAK YÖNTEMİYLE BİRLEŞTİRİLEN INCONEL 625 ve AISI 316 L MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ve KOROZYON DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Bu tez çalışmasında nükleer, kimya ve petrokimya endüstrilerinde sık kullanılan nikel esaslı süper alaşım Inconel 625 ile östenitik paslanmaz çelik AISI 316L malzemelerinin birbirleri ile kaynağı konusunda çalışılmıştır. Kaynak tipi olarak sürekli akım ve darbeli akım olmak üzere iki farklı TIG (Tungsten Inert Gas) süreci kullanılmıştır. Her bir kaynak tipi için ERNiCr-3, TIG 316L ve burgu (ERNiCr-3) olmak üzere üç farklı dolgu metali kullanılmıştır. Toplam 6 deney düzeneği, makro yapı, mikro yapı, mekanik ve korozyon direnci konularında incelenmiştir. Çalışma sonucunda sürekli akım TIG kaynak yöntemi yerine darbeli akım TIG kaynak yöntemi kullanmanın zararlı ikincil faz oluşumunu azalttığı tespit edilmiştir. Inconel 625 malzemesinin ve ERNiCr-3 malzemenin içinde bulunan Nb elementinin ikincil faz oluşumunu artırdığı bilinmektedir. Bu sebeple dolgu tellerinden bir tanesi Nb elementinden yoksun TIG 316L teli olarak seçilmiştir. Fakat buna rağmen kaynak bölgesinde yüksek miktarda Nb elementi içeren ikincil fazlar tespit edilmiştir. Bu duruma kalın parçaları kaynatmak için gerekli çok paso uygulamasının fazla ısı girdisinin neden olduğu anlaşılmıştır. Kaynak neticesinde bazı numunelerin SEM/EDAX analiz sonuçlarında ana metal ve ya dolgu metali kimyasal kompozisyonunda bulunmayan elementler tespit edilmiştir. Bu durumu önlemek için kaynak ekipmanlarının kaynaktan önce mutlaka temizlenmesi ve kaynak işleminin çevrede bulunan tozlara karşı yalıtılmış bir bölgede yapılması gerekmektedir. Yapılan bütün mikro yapı, mekanik testlere göre en iyi sonuçlar, korozyon testine göre de en az malzeme kaybı burgu dolgu metalinin darbeli akım TIG ile kullanıldığı deneyde tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: TIG, Kaynak, Inconel 625, AISI 316 L, Mekanik, Korozyon.

Danışman: Prof. Dr. Mustafa Kemal KÜLEKÇİ, Tarsus Üniversitesi, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Tarsus-Mersin.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES AND CORROSION BEHAVIOR OF INCONEL 625 AND AISI 316 L MATERIALS COMBINED WITH TIG WELDING METHOD

In this thesis it was studied on dissimilar metal welding of nickel based super alloy Inconel 625 and austenitic stainless steel AISI 316L which are commonly used in nuclear, chemical and petrochemical industries. Two types of TIG (Tungsten Inert Gas) welding processes as continuous and pulsed current were used. Three filler types used for each welding processes as; ERNiCr-3, TIG 316L and twisted (ERNiCr-3 + TIG 316L). Totally 6 experimental setups were investigated as macro structural, micro structural, mechanical and corrosion behavioural properties. As a result of study it is detected that using pulsed current type instead of continuous type TIG is reduce formation of harmful secondary phases. It is known that Inconel 625 and ERNiCr-3 filler metal consist Nb element which cause formation of Nb based secondary phases. Therefore, TIG 316L selected as Nb free filler metal. But despite this it was determined Nb based secondary phases at the weld zone. It was convinced that excess heat input because of multipass welding process for thick plates caused this case. After the welding process several elements detected at the SEM/EDAX analys of some experiments which are not in chemical compositions of base and filler metals. Welding equipments are must be cleaned before welding and welding process should be carry out inside an insulated area. According to the all micro structural, mechanical and corrosion tests, twisted filler metal showed the best results.

Keywords: TIG, Welding, Inconel 625, AISI 316 L, Mechanical Properties, Corrosion Behavior

Advisor: Prof. Mustafa Kemal KÜLEKÇİ, Department of Manufacturing Engineering, Tarsus University, Tarsus-Mersin.

TEŞEKKÜR

Doktora çalıőmamda desteklerini benden esirgemeyen, akademik ve sosyal anlamda her türlü bilgisini paylaőan değerli Tez Danışman Hocam Prof. Dr. Mustafa Kemal KLEKCI'ye en içten teőekkürlerimi sunarım. Teknoloji Fakültesi ğretim üyelerine çalıőmaya sağladıkları katkılardan dolayı teşekkür ederim.

Çalıőmam esnasında bana maddi ve manevi destek sağlayan Şişecam Kimyasallar Grubu Soda Sanayii A.Ő. Kromsan Krom Bileşikleri Fabrikası'nın değerli yöneticilerine ve tez çalıőmasının saha çalışmalarında emek harcayan mekanik bakım onarım Őeflięi personeline teşekkür ederim.

Desteklerini her an yanımda hissettiğim değerli ailem; eőim Ferda SUNA DÖKME'ye, oğlum Yiğit Alaz DÖKME'ye ve kızım Cennet Lorin DÖKME'ye sonsuz teőekkürlerimi sunarım.



TABLolar DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Inconel 625 malzemesinin mekanik özellikleri	4
Tablo 2.2. Inconel 625 malzemesinin kimyasal bileşimi	5
Tablo 2.3. AISI 316L malzemesinin mekanik özellikleri	6
Tablo 2.4. AISI 316L malzemesinin kimyasal bileşimi	7
Tablo 2.5. Bazı nikel alaşımlarının katılaşma reaksiyonu sonucunda oluşan fazlar	31
Tablo 3.1. Ana metal ve dolgu metallerinin kimyasal özellikleri	38
Tablo 3.2. Deneysel parametreler	40
Tablo 3.3. Çekme deneyi numune ölçüleri	42
Tablo 4.1. Makro ve mikro yapı deney sonuçlarında belirlenen hataların özetleri	59
Tablo 4.2. SEM/EDAX analizleri özetleri	72
Tablo 4.3. SA/TIG kaynak yöntemi uygulanan numunelerin çekme deneyi sonuçları	80
Tablo 4.4. DA/TIG kaynak yöntemi uygulanan numunelerin çekme deneyi sonuçları	82
Tablo 4.5. Mikro sertlik ve çekme testlerinin karşılaştırma tablosu	83
Tablo 4.6. Korozyon testi sonuç özetleri	99

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Siemens SGT 750 model gaz türbini	2
Şekil 2.2. Kobalt esaslı süper alaşımların kullanım alanına göre sınıflandırılması	3
Şekil 2.3. TIG kaynağı yönteminin temel prensibi	8
Şekil 2.4. MIG kaynağı yönteminin temel prensibi	9
Şekil 2.5. Plazma Ark Kaynağı yönteminin temel prensibi	10
Şekil 2.6. Anahtar deliği yöntemi şeması	10
Şekil 2.7. Lazer kaynağı donanımı	11
Şekil 2.8. Derinlemesine nüfuz eden lazer kaynağı	12
Şekil 2.9. Elektron Işın Kaynağı düzeneği	13
Şekil 2.10. Nokta Direnç Kaynağı Uygulaması	15
Şekil 2.11. Dikiş Direnç Kaynağı Uygulaması	16
Şekil 2.12. Direnç Kabartı Kaynağı Uygulaması	17
Şekil 2.13. Sürtünme Kaynağı Proses Şeması	17
Şekil 2.14. Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynağı Proses Şeması	18
Şekil 2.15. Volan Tahrikli Sürtünme Kaynağı Proses Şeması	19
Şekil 2.16. Homojen dağılımlı korozyon	20
Şekil 2.17. Galvanik korozyon mekanizması	21
Şekil 2.18. Galvanik korozyonda katot/anot büyüklüğü etkisi	21
Şekil 2.19. Çukurcuk korozyonunun oluşum biçimleri	22
Şekil 2.20. Flanşlar arası aralık korozyonu örneği	24
Şekil 2.21. Seçimli korozyon mekanizması	24
Şekil 2.22. Erozyonlu korozyonun tipik görüntüsü	25
Şekil 2.23. Erozyonlu korozyonun başlama mekanizması	26
Şekil 2.24. Demir yolu rayı bağlantısındaki sürtünme aşınması	27
Şekil 2.25. Yüksek sıcaklık korozyonu mekanizması	29
Şekil 2.26. Metal içerisine hidrojen atomunun nüfuziyeti	30
Şekil 2.27. Inconel 718 alaşımı katılma eğrisi	34
Şekil 2.28. Birleştirilmiş kaynak dolgu metali örneği	35
Şekil 2.29. Mikro yapı incelemesinde tespit edilen bazı yapılar	36
Şekil 3.1. Standart “Çift V” kaynak ağzı uygulaması	37
Şekil 3.2. Yarı otomatik kaynak düzeneği	39
Şekil 3.3. Elektroliz düzeneği	41
Şekil 3.4. Mikro yapı inceleme noktaları	41
Şekil 3.5. TS EN ISO 6892-1 standardına göre çekme testi numune ölçüleri	42
Şekil 3.6. Çekme testi deney düzeneği	43
Şekil 3.7. Çekme testi kopma noktasına kadar olan grafik	44
Şekil 3.8. Kaynaklı parçaların üzerinden alınan test numuneleri şeması	44
Şekil 4.1. Kaynaklı parçalarda makro yapı incelemesinde kullanılan bileşenler	45
Şekil 4.2. SA/TIG kaynak yöntemi kullanılarak yapılan kaynak dikişleri	46
a) ERNiCr-3, b) TIG 316L, c) Burgu (ErNiCr-3 + TIG 316L)	
Şekil 4.3. SA/TIG kaynak yöntemi kullanılarak yapılan kaynak dikiş kesitleri	46
a) ERNiCr-3, b) TIG 316L, c) Burgu (ErNiCr-3 + TIG 316L)	
Şekil 4.4. SA/TIG kaynak yöntemi kullanılarak yapılan kaynak dikişleri	47
a) ERNiCr-3, b) TIG 316L, c) Burgu (ErNiCr-3 + TIG 316L)	
Şekil 4.5. SA/TIG kaynak yöntemi kullanılarak yapılan kaynak dikiş kesitleri	48
a) ERNiCr-3, b) TIG 316L, c) Burgu (ErNiCr-3 + TIG 316L)	
Şekil 4.6. SA/TIG kaynak yöntemi ve ERNiCr-3 dolgu metali kullanılan deneydeki	48
1 (AISI 316L ana metali) ve 5 (Inconel 625 ana metali) numaralı bölgenin optik	
mikroskop görüntüleri	
Şekil 4.7. SA/TIG kaynak yöntemi ve ERNiCr-3 dolgu metali kullanılan deneydeki	49
2 (AISI 316L ve kaynak bölgesinin kesiştiği alan) ve 4 (Inconel 625 ve kaynak	
bölgesinin kesiştiği alan) numaralı bölgenin optik mikroskop görüntüleri	

	Sayfa
Şekil 4.8. SA/TIG kaynak yöntemi ve TIG dolgu metali kullanılan deneydeki 1 (AISI 316L ana metali) ve 5 (Inconel 625 ana metali) numaralı bölgenin optik mikroskop görüntüleri	50
Şekil 4.9. SA/TIG kaynak yöntemi ve TIG 316L dolgu metali kullanılan deneydeki 2 (AISI 316L ve kaynak bölgesinin kesiştiği alan) ve 4 (Inconel 625 ve kaynak bölgesinin kesiştiği alan) numaralı bölgenin optik mikroskop görüntüleri	51
Şekil 4.10. SA/TIG kaynak yöntemi ve burğu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali kullanılan deneydeki 1 (AISI 316L ana metali) ve 5 (Inconel 625 ana metali) numaralı bölgenin optik mikroskop görüntüleri	52
Şekil 4.11. SA/TIG kaynak yöntemi ve burğu (ErNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali kullanılan deneydeki 2 (AISI 316L ve kaynak bölgesinin kesiştiği alan) ve 4 (Inconel 625 ve kaynak bölgesinin kesiştiği alan) numaralı bölgenin optik mikroskop görüntüleri	53
Şekil 4.12. DA/TIG kaynak yöntemi ve ERNiCr-3 dolgu metali kullanılan deneydeki 1 (AISI 316L ana metali) ve 5 (Inconel 625 ana metali) numaralı bölgenin optik mikroskop görüntüleri	54
Şekil 4.13. DA/TIG kaynak yöntemi ve ERNiCr-3 dolgu metali kullanılan deneydeki 2 (AISI 316L ve kaynak bölgesinin kesiştiği alan) ve 4 (Inconel 625 ve kaynak bölgesinin kesiştiği alan) numaralı bölgenin optik mikroskop görüntüleri	54
Şekil 4.14. DA/TIG kaynak yöntemi ve TIG 316L dolgu metali kullanılan deneydeki 1 (AISI 316L ana metali) ve 5 (Inconel 625 ana metali) numaralı bölgenin optik mikroskop görüntüleri	55
Şekil 4.15. DA/TIG kaynak yöntemi ve burğu TIG 316L dolgu metali kullanılan deneydeki 2 (AISI 316L ve kaynak bölgesinin kesiştiği alan) ve 4 (Inconel 625 ve kaynak bölgesinin kesiştiği alan) numaralı bölgenin optik mikroskop görüntüleri	56
Şekil 4.16. DA/TIG kaynak yöntemi ve burğu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali kullanılan deneydeki 1 (AISI 316L ana metali) ve 5 (Inconel 625 ana metali) numaralı bölgenin optik mikroskop görüntüleri	57
Şekil 4.17. DA/TIG kaynak yöntemi ve burğu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali kullanılan deneydeki 2 (AISI 316L ve kaynak bölgesinin kesiştiği alan) ve 4 (Inconel 625 ve kaynak bölgesinin kesiştiği alan) numaralı bölgenin optik mikroskop görüntüleri	58
Şekil 4.18. SA/TIG kaynak yöntemi ve ERNiCr-3 dolgu metali kullanılan deneydeki çizgisel haritalama analizi	60
Şekil 4.19. SA/TIG kaynak yöntemi ve TIG 316L dolgu metali kullanılan deneydeki çizgisel haritalama analizi	61
Şekil 4.20. SA/TIG kaynak yöntemi ve burğu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali kullanılan deneydeki çizgisel haritalama analizi	62
Şekil 4.21. DA/TIG kaynak yöntemi ve ERNiCr-3 dolgu metali kullanılan deneydeki çizgisel haritalama analizi	63
Şekil 4.22. DA/TIG kaynak yöntemi ve TIG 316L dolgu metali kullanılan deneydeki çizgisel haritalama analizi	64
Şekil 4.23. DA/TIG kaynak yöntemi ve burğu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali kullanılan deneydeki çizgisel haritalama analizi	65
Şekil 4.24. SA/TIG kaynak yöntemi ve ERNiCr-3 dolgu metali kullanılan deneydeki SEM/EDAX analiz sonuçları	66
Şekil 4.25. SA/TIG kaynak yöntemi ve TIG 316L dolgu metali kullanılan deneydeki SEM/EDAX analiz sonuçları	67
Şekil 4.26. SA/TIG kaynak yöntemi ve burğu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali kullanılan deneydeki SEM/EDAX analiz sonuçları	68
Şekil 4.27. DA/TIG kaynak yöntemi ve ERNiCr-3 dolgu metali kullanılan deneydeki SEM/EDAX analiz sonuçları	69
Şekil 4.28. DA/TIG kaynak yöntemi ve TIG 316L dolgu metali kullanılan deneydeki	70

	Sayfa
SEM/EDAX analiz sonuçları	
Şekil 4.29. DA/TIG kaynak yöntemi ve burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali kullanılan deneydeki SEM/EDAX analiz sonuçları	71
Şekil 4.30. SA/TIG kaynak yöntemi ve ERNiCr-3 dolgu metali kullanılan deneydeki mikro sertlik analiz sonuçları	73
Şekil 4.31. SA/TIG kaynak yöntemi ve TIG 316L dolgu metali kullanılan deneydeki mikro sertlik analiz sonuçları	74
Şekil 4.32. SA/TIG kaynak yöntemi ve burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali kullanılan deneydeki mikro sertlik analiz sonuçları	75
Şekil 4.33. DA/TIG kaynak yöntemi ve ERNiCr-3 dolgu metali kullanılan deneydeki mikro sertlik analiz sonuçları	76
Şekil 4.34. DA/TIG kaynak yöntemi ve TIG 316L dolgu metali kullanılan deneydeki mikro sertlik analiz sonuçları	77
Şekil 4.35. DA/TIG kaynak yöntemi ve burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali kullanılan deneydeki mikro sertlik analiz sonuçları	78
Şekil 4.36. SA/TIG kaynak yöntemi ile yapılan deneylerin çekme testi sonuçları a) ERNiCr-3 ile kaynatılmış, b) TIG 316L ile kaynatılmış ve c) Burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) ile kaynatılmış	79
Şekil 4.37. DA/TIG kaynak yöntemi ile yapılan deneylerin çekme testi sonuçları d) ERNiCr-3 ile kaynatılmış, e) TIG 316L ile kaynatılmış ve f) Burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) ile kaynatılmış	81
Şekil 4.38. SA/TIG kaynak yöntemi ve ERNiCr-3 dolgu metali ile kaynatılmış numunenin korozyon testi kütle değişimi grafiği	84
Şekil 4.39. SA/TIG kaynak yöntemi ve ERNiCr-3 dolgu metali ile kaynatılmış numunenin korozyon testi sonucundaki SEM görüntüsü	85
Şekil 4.40. SA/TIG kaynak yöntemi ve ERNiCr-3 dolgu metali ile kaynatılmış numunenin korozyon testi sonucundaki SEM/EDAX noktasal ve bölgesel analizleri	86
Şekil 4.41. SA/TIG kaynak yöntemi ve TIG 316L dolgu metali ile kaynatılmış numunenin korozyon testi kütle değişimi grafiği	87
Şekil 4.42. SA/TIG kaynak yöntemi ve TIG 316L dolgu metali ile kaynatılmış numunenin korozyon testi sonucundaki SEM görüntüsü	87
Şekil 4.43. SA/TIG kaynak yöntemi ve TIG 316L dolgu metali ile kaynatılmış numunenin korozyon testi sonucundaki SEM/EDAX noktasal ve bölgesel analizleri	88
Şekil 4.44. SA/TIG kaynak yöntemi ve burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali ile kaynatılmış numunenin korozyon testi kütle değişimi grafiği	90
Şekil 4.45. SA/TIG kaynak yöntemi ve burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali ile kaynatılmış numunenin korozyon testi sonucundaki SEM görüntüsü	90
Şekil 4.46. SA/TIG kaynak yöntemi ve burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali ile kaynatılmış numunenin korozyon testi sonucundaki SEM/EDAX noktasal ve bölgesel analizleri	91
Şekil 4.47. DA/TIG kaynak yöntemi ve ERNiCr-3 dolgu metali ile kaynatılmış numunenin korozyon testi kütle değişimi grafiği	92
Şekil 4.48. DA/TIG kaynak yöntemi ve ERNiCr-3 dolgu metali ile kaynatılmış numunenin korozyon testi sonucundaki SEM görüntüsü	92
Şekil 4.49. DA/TIG kaynak yöntemi ve ERNiCr-3 dolgu metali ile kaynatılmış numunenin korozyon testi sonucundaki SEM/EDAX noktasal ve bölgesel analizleri	93
Şekil 4.50. DA/TIG kaynak yöntemi ve TIG 316L dolgu metali ile kaynatılmış numunenin korozyon testi kütle değişimi grafiği	95
Şekil 4.51. DA/TIG kaynak yöntemi ve TIG 316L dolgu metali ile kaynatılmış numunenin korozyon testi sonucundaki SEM görüntüsü	95
Şekil 4.52. DA/TIG kaynak yöntemi ve TIG 316L dolgu metali ile kaynatılmış	96

	Sayfa
numunenin korozyon testi sonucundaki SEM/EDAX noktasal ve bölgesel analizleri	
Şekil 4.53. DA/TIG kaynak yöntemi ve burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali ile kaynatılmış numunenin korozyon testi kütle değişimi grafiği	97
Şekil 4.54. DA/TIG kaynak yöntemi ve burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali ile kaynatılmış numunenin korozyon testi sonucundaki SEM görüntüsü	97
Şekil 4.55. DA/TIG kaynak yöntemi ve TIG 316L dolgu metali ile kaynatılmış numunenin korozyon testi sonucundaki SEM/EDAX noktasal ve bölgesel analizleri	98



KISALTMALAR ve SİMGELER

Kısaltma/Simgesi	Tanım
TIG	Tungsten Inert Gas
SA/TIG	Sürekli Akım Tungsten Inert Gas
DA/TIG	Darbeli Akım Tungsten Inert Gas
MIG	Metal Inert Gas
Ni	Nikel
Cr	Krom
Fe	Demir
Nb	Niyobyum
Mo	Molibden
Ta	Tantalum
Si	Silisyum
Co	Kobalt
Mn	Mangan
C	Karbon
P	Fosfor
S	Kükürt
Ti	Titanyum
N	Azot
O	Oksijen
Eu	Evropiyum
AISI	Amerikan Çelik Enstitüsü
Gr	Gram
IR	Kızıl ötesi
UV	Mor ötesi
NaCl	Sodyum klorür
ITAB	Isı transferi altındaki bölge
H ₂ SO ₄	Sülfürik asit
NbC	Niyobyum karbür
SEM	Taramalı Elektron Mikroskopu-Scanning Electron Microscope
EDAX	Enerji Dağınımlı X-Işınları Görüngeölçeri-Energy Dispersive X-Ray Spectrometer
OM	Optik mikroskop
A	Voltaj
V	Amper

1. GİRİŞ

İki farklı metalin kaynak yöntemi ile birleştirilmesi işlemine alan yazında “Farklı Metal Kaynağı - Dissimilar Metal Welding” olarak tanımlanmaktadır. Bu yöntemde her iki metalin de kaynak edilebilirlik kabiliyetleri incelenerek; her iki metale de en uygun kaynak yöntemi belirlenir. Kaynak esnasında her iki metalin de azami ortak özelliklerine sahip dolgu metali kullanılır.

Farklı metallerin kaynağı iki durumda çok sık kullanılmaktadır. Birincisi, tasarımı esnekleştirme yani kaynak edilecek malzemelerin farklı koşullarda çalışması gerektiği durumlardır. İkincisi ise maliyetleri azaltmaktır [1-3]. Örneğin; termik santrallerde çok yüksek sıcaklıklarda çalışan kazan ısıtıcılarında, ısıtıcı tüplerinin oksidasyon direnci yüksek östenik çeliklerden yapılması gerekmektedir. Fakat bu tüplerin bağlantılarının ise yüksek kopma mukavemetine sahip P91/P92 malzemelerden yapılması ve bu iki malzemenin birbirlerine kaynatılması gerekmektedir [4]. Nükleer güç santrallerinde basınçlı reaktörlerde ağır su tahliye borularının reaktör içerisinde kalan kısmı nikel esaslı bir süper alaşım iken, reaktör dışındaki kaynaklı kısmı maliyeti düşürmek için paslanmaz çeliktir [5]. Hızla gelişen otomobil sektöründe de aracın ağırlığını azaltarak yakıt maliyetlerini düşürmek ve bununla birlikte yapısal dayanımı arttırmak için alüminyum ve çelik malzemelerin birbirlerine kaynağı uygulamaları geliştirilmektedir [6]. Bu çalışmalar malzemelerin kullandıkları endüstriyel alana bağlı olarak, daha farklı malzemelerin birbirlerine kaynağı uygulamaları ile çeşitlendirilebilmektedir.

Tasarımda esneklik yaratması ve maliyet düşürücü etkisi sayesinde endüstride hızlı yayılan bir uygulama alanı olan “Farklı Metallerin Kaynağı” nda, aynı tip iki metalin birbirlerine kaynağına kıyasla; kırılma fazlarının oluşması, çatlaklar, boşluklar, gerilmeler, malzemelerin korozyon direncinin azalması gibi çeşitli sorunlar oluşmaktadır. Bu sorunların temel sebebi; her iki metalin de farklı ısı genleşme katsayılarına, farklı ergime sıcaklıklarına, farklı kimyasal ve mekanik özelliklerine sahip olmasıdır [7, 8].

Inconel Special Metals firmasının tescilli nikel esaslı süper alaşım malzemesidir. Inconel ilk olarak 1940’lı yıllarda Whittle jet motoru geliştirme çalışmaları kapsamında şu anda Special Metals iştiraki olan Wiggin Alloys (Hereford, İngiltere) ekipleri tarafından bulunmuştur[9, 10]. Inconel alaşımları yapısındaki nikel ve krom içeriği sayesinde korozyona ve oksidasyona dirençli süper alaşım malzemelerdir. Bununla birlikte Nb, Ta, Ti gibi elementlerin de katkısı ile alaşımın direnci daha arttırılmaktadır. Inconel alaşımları genellikle korozif etkinin yoğun olduğu yüksek sıcaklık, yüksek basınç ve derişik ortamların bulunduğu; havacılık jet motorları, Formula 1 ve Nascar araçların egzozları, nükleer güç tesisleri reaktörleri, kimyasal proses ekipmanları, petrokimyasal tank ve pompaları, termik santral türbinleri, yanma odaları ve kazanları vb. üretiminde kullanılırlar [11-14]. Hatta bugüne kadar yapılmış en büyük tokamak* olan Birleşik Avrupa Torusu kazanı da Inconel malzemenin yapılmıştır [15].

* Plazmayı belirli bir alanda tutmak için manyetik alan üreten makinadır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI

2.1. Süper Alaşımalar

Süper alaşımalar malzemeler yüksek sıcaklıkta ve derişik ortamlarda yüksek korozyon direnci, yüksek mukavemet ve yüksek aşınma direnci sağlayan malzemelerdir. Bu malzemelerin günümüzde bu kadar geniş alanda kullanılmasının temel nedeni yüksek sıcaklıktaki kararlı yapısından dolayıdır. Süper alaşımların ilk icadı östenik paslanmaz çelik malzemelere element eklenmesi ile 1900'lü yılların başında gerçekleşmiştir. Günümüzde kullanılan birçok süper alaşım malzeme 2. Dünya Savaşı'ndan sonra 1950-1970 yılları arasında geliştirilmiştir [16-17]. Süper alaşımların kimyasal bileşiminde tungsten, molibden, tantal, niyobyum, alüminyum gibi elementlerin yanı sıra dört farklı ana element bulunur. Bu dört farklı ana elementler nikel, kobalt, demir ve titanyumdur. Süper alaşımlar içerdikleri ana elementin isimlerine göre nikel esaslı süper alaşımlar, kobalt esaslı süper alaşımlar ve demir esaslı süper alaşımlar olmak üzere üç farklı grupta incelenirler [18].

2.1.1. Nikel Esaslı Süper Alaşımlar

Nikel esaslı süper alaşımlar özellikle havacılık ve enerji üretim sektöründe kullanılırlar. Örneğin Şekil 2.1.'de Siemens firmasının SGT 750 model gaz türbinin diski ve yüksek basınç kısmı Inconel 718 malzemeden yapılmıştır [19].



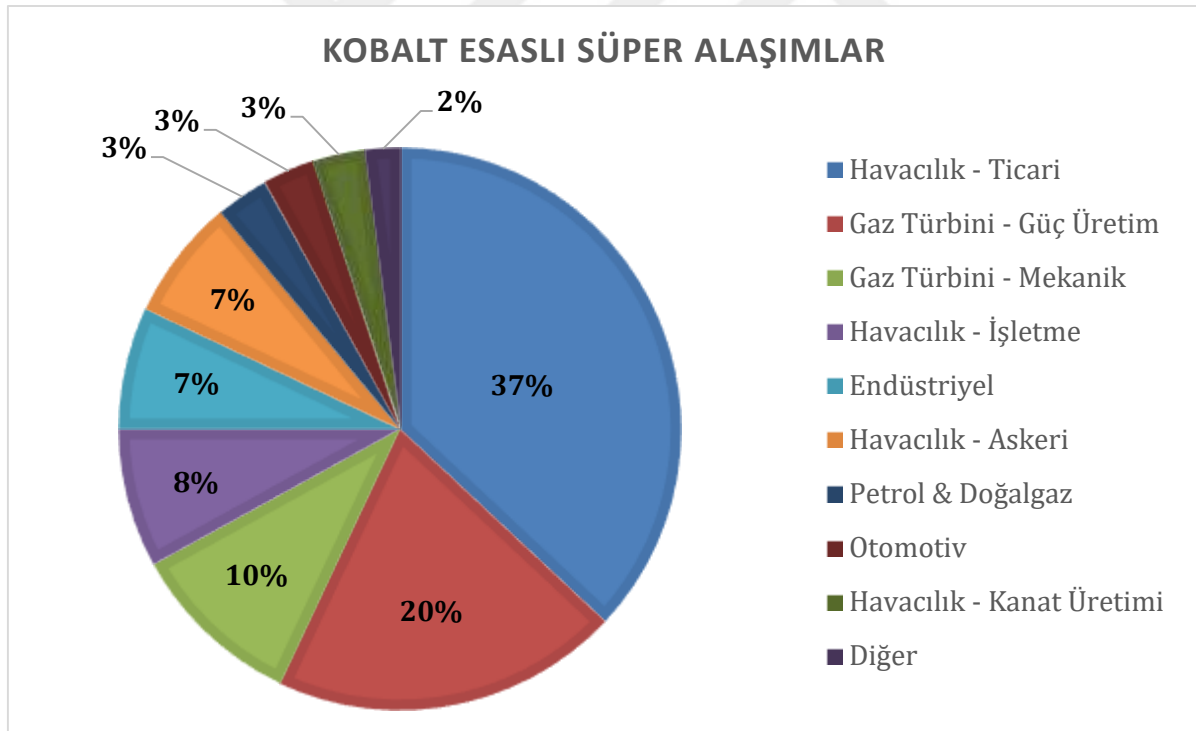
Şekil 2.1.Siemens SGT 750 model gaz türbini [19]

Dayanım-ağırlık oranına göre karşılaştırıldığında çeliklere göre daha avantajlı malzemelerdir. Bu sebeple havacılık sektöründe kullanılan süper alaşımların yaklaşık %50'si nikel esaslıdır [18,20-21]. Piyasada bulunan nikel esaslı süper alaşımlar % 38-76 Ni, en fazla % 27 Cr ve % 20 Co içerirler [22]. Kimyasal kompozisyonlarına göre değişik ticari isimleri vardır. Piyasada Inconel, Nimonic,

Nimocast, Udimet, Astroloy, Rene gibi birçok patentli ticari isimle satılmaktadır. Inconel piyasada en çok kullanılan nikel esaslı malzemedir. Inconel Special Metals firmasının patentli bir ürünüdür. Inconel kimyasal bileşimine göre 600, 601, 617, 625, 625 LCF, 686, 690, 693, 706, 718, 718 SPF, 725, 740, X-750, 751, 783, 22, C-276, G-3, HX, N06230 olarak temin edilebilmektedir [23].

2.1.2. Kobalt Esaslı Süper Alaşımlar

Nikel esaslı süper alaşımlar korozyon direnci yüksek ve yüksek sıcaklıklarda çalışmasına rağmen; sıcaklığın daha yüksek, 1100 °C civarına yükselmesi durumunda kobalt esaslı süper alaşımlar kullanılırlar [24,25]. Kobalt esaslı süper alaşımlar, nikel esaslı süper alaşımlar kadar iyi korozyon direnci gösteremezlerse de; yapılarındaki karbürler sayesinde yüksek sıcaklıklarda daha iyi mekanik özellik sergilerler. Bu sebeple sıcaklığın en yüksek düzeyde olduğu jet motorlarının, reaktörlerin yanma odaları, çıkış vanaları, sıcaklığın daha yüksek olduğu türbinlerin ilk aşaması gibi kısımlarında kullanılırlar [26]. Kobalt esaslı süper alaşımların kullanım alanlarına göre sınıflandırılması Şekil 2.2.'de verilmiştir.



Şekil 2.2. Kobalt esaslı süper alaşımların kullanım alanına göre sınıflandırılması [27].

Kobalt esaslı süper alaşımda malzeme alaşım elementleri olarak W, Ta, Mo, Nb, Ni, Cr kullanılırlar. Stellite, Ultimet, Alloy 6B, Alloy 25, Alloy 188, NS 163, X 40, X 45, FSX – 414, MP gibi ticari isimler ile piyasada satılmaktadır [24, 26].

2.1.3. Demir Esaslı Süper Alaşımlar

Demir esaslı süper alaşımların kimyasal kompozisyonunda ana bileşeni Fe oluşturur. İkinci ana bileşen olarak Ni ve Cr içermektedirler. Bunlara ek olarak Co, Mo, W, Nb içerirler. Yapılarındaki karbür ve intermetalik bağların çökmesi sonucu sertlik alırlar [17]. Nikel ve kobalt esaslı malzemelere kıyasla mekanik ve korozyon dayanımları düşüktür. Çalışma sıcaklığı en fazla 650 °C'dir [28]. Diğer süper alaşımlara göre fiyatı daha düşük olduğu için tercih uygun çalışma ortamları için maliyet azaltma amacıyla tercih edilirler. Türbin kanatlarında, disklerinde ve millerinde, otomotiv motor üretiminde, petrol-doğalgaz pompalarında gibi uygulamalarda kullanılırlar[26, 29]. Piyasada en çok kullanılan üretimi A 286 alaşım olmakla birlikte diğer ticari üretimleri Alloy 901, Discalloy, Haynes 556, Incoloy 800, 801, 802, 807, 903, 909, N-155 ve V57 şeklinde yapılmaktadır.

2.2. Inconel 625 Malzemesinin Genel Özellikleri ve Kaynak Kabiliyeti

Inconel 625 süper alaşımı 1950'li yıllarda güç üretim tesislerinde buhar hatlarındaki aşınma sorunu gidermek için yapılan çalışmalar neticesinde ortaya çıkarılmıştır. Inconel 625 kriyojenik ortamlardan, 1000°C üzerindeki sıcak ortamlara kadar geniş bir alanda kullanılmaktadır [30-33]. Ergime sıcaklığı 1290-1350°C'dir. Yoğunluğu ise 8,44 g/cm³'tür. Inconel 625 nikel-krom matrisli, ağırlıkça en az % 58 Ni, en fazla %5 Fe ile % 20-23 Cr elementlerine ilave olarak % 8-10 Mo, % 3,15-4,15 Nb+Ta refrakter elementlerin etkisi sayesinde katı çözeltili sertleşmesine sahip metaldir [31-34]. Tavlanmış Grade 1, solüsyona alınarak yaşlandırılmış Grade 2 olmak üzere iki farkı çeşidi vardır. Oda sıcaklığındaki haddelenmiş Inconel 625 plakanın mekanik ve kimyasal özellikleri Tablo 2.1. ve Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.1. Inconel 625 malzemesinin mekanik özellikleri [32]

Özellik	Değer
Çekme Mukavemeti	827-1103 MPa
Akma Mukavemeti (%2)	414-758 MPa
Uzama (%)	60-30
Sertlik	175-240 HB
Ergime Sıcaklığı	1290-1350 °C

Inconel 625 malzemesi nükleer santraller, kimya, petro-kimya, denizcilik, havacılık gibi birçok sektörde kullanılmaktadır. Bazı örnek uygulamalar:

- Yüksek sıcaklık derişik asidik ortamda çalışan ekipman imalatı
- Gemi üretiminde tuzlu su boruları imalatı

- Nükleer reaktör çekirdeği imalatı
- Radyoaktif atık depolama tankları
- Petrol ve doğal gaz pompaları
- Türbin kanat imalatı
- Çevresel kontrol sistemleri ısı değiştirici imalatı
- Yüksek hızlı araçlar egzoz imalatı
- Uçaklarda hava ve gaz kanallar sistemi imalatı
- Kompresör vanaları imalatı

olarak sıralanabilir [32, 35-37].

Tablo 2.2. Inconel 625 malzemesinin kimyasal bileşimi, % [32]

Element	Ağırlıkça Miktar (%)
Ni	58,0 (minimum)
Cr	20,0-23,0
Fe	5,0 (maksimum)
Mo	8,0-10,0
Nb + Ta	3,15-4,15
C	0,10 (maksimum)
Mn	0,50 (maksimum)
Si	0,50 (maksimum)
P	0,015 (maksimum)
S	0,015 (maksimum)
Al	0,40 (maksimum)
Ti	0,40 (maksimum)
Co	1,0 (maksimum)

Kaynaklı imalatlarda kaynak edilen parçaların metalürjik, kimyasal ve mekanik özelliklerini koruyabilmesi ölçüsü kaynak kabiliyeti olarak tanımlanır. Kaynak kabiliyetinin yetersiz olması, kaynakta çatlak, kırılma, boşluk, yetersiz ergime, nüfuziyet azlığı vb. gibi sorunlar ortaya çıkarabilir. Bu sebeple kaynak edilecek parçaların bütün mekanik, kimyasal ve fiziksel değerleri iyi bilinmeli ve analiz edilmelidir.

Inconel 625 malzemesi kaynak kabiliyeti yüksek bir metal olup, geleneksel birçok kaynak yöntemi ile kaynak edilebilirler [35]. Bununla birlikte özel uygulamalarda ise yeni teknoloji kaynak yöntemleri ile de birleştirilebilirler. Inconel 625 için kullanılan bazı kaynak yöntemleri aşağıdaki gibidir:

- TIG (Tungsten Inert Gas) kaynağı,
- MIG (Metal Inert Gas) kaynağı,

- Plazma ark kaynağı,
- Toz altı ark kaynağı,
- Lazer kaynağı,
- Elektron ışın kaynağı,
- Sürtünme-Karıştırma kaynağı.

Inconel 625 diğer nikel esaslı süper alaşımlarda da olduğu gibi östenik bir ana yapıya sahip olmakla birlikte geniş ikincil faza sahiptir. MC, M₆C karbürleri ve γ' (gama prime) intermetalik fazı bilinen ikincil fazlardır. Inconel 625 kimyasal bileşeninde niyobyum ve tantalum içerdiği için hacim merkezli γ'' (gama double prime) fazı ortaya çıkmaktadır. Fakat malzemenin kaynak esnasında yüksek sıcaklığa maruz kalması neticesinde istenmeyen δ (delta fazı), σ (sigma fazı), laves fazları, sıkı paket hegzagonal η (eta fazını) gibi fazlar oluşabilmektedir [38]. Bu fazlar malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz olarak etkilemektedir.

Inconel 625 malzemesi kaynağı için genellikle ön tavlama gerektirmez. Üretici tarafından aksi belirtilmedikçe pasolar arasındaki geçiş sıcaklığı 175 °C civarındadır. Inconel 625, katı eriyik nikel alaşımı olduğu için kaynak sonrası tavlama da ihtiyaç duymaz.

2.3. AISI 316L Malzemesinin Genel Özellikleri ve Kaynak Kabiliyeti

Amerikan standardında *AISI (American Iron and Steel Institute)* 316 L olarak nitelendirilen paslanmaz çelik malzemenin Avrupa standartlarında karşılığı EN 1.4404 ve X2CrNiMo17-12-2 olarak verilmektedir. AISI 316L malzemesi paslanmaz çeliklerin temel alaşım elementi krom ve nikel olan östenitik grubuna ait bir metaldir. Kaynak kabiliyetinin optimum olması için düşük karbonlu olarak üretilir ve bu durum “L” son eki ile gösterilir.

Tablo 2.3. AISI 316L malzemesinin mekanik özellikleri [39]

Özellik	Değer
Çekme Mukavemeti	520-670 MPa
Akma Mukavemeti(%2)	220 MPa
Uzama (%)	45-35
Sertlik	170 HB
Ergime Sıcaklığı	1375-1400 °C

Östenik paslanmaz çelikler korozyona karşı dirençli malzemeler olmasına karşın, 500-800 °C arası sıcaklıklara belirli bir süre maruz kalırlarsa taneler arası yapıda meydana gelen değişiklik korozyon kabiliyetini olumsuz yönde etkiler [40]. Özellikle tavlama ve kaynak işlemlerinde dikkat edilmesi gereken bir husustur. Malzemenin yüksek sıcaklığa maruziyeti malzemenin fiziksel

görünümüne herhangi bir etki göstermese de, taneler arası yapı bozukluğunun neden olacağı korozyon, sahada ciddi sorunlara sebep olacaktır.

Tablo 2.4. AISI 316L malzemesinin kimyasal bileşimi, % [39]

Element	Ağırlıkça Miktar (%)
C	0,03 (maksimum)
Cr	16,5-18,5
Ni	10,0-13,0
Mn	2,0 (maksimum)
Mo	2,0-2,5
N	0,10 (maksimum)
Mangan	0,50 (maksimum)
Diğer	-

2.4. Farklı Metallerin Kaynaklarında Kullanılan Başlıca Kaynak Yöntemleri

2.4.1. TIG (Tungsten Inert Gas) Kaynağı

Kaynak yöntemine adını veren Tungsten Inert Gaz kelimesidir. Kaynak, bu kelimelerinin baş harfleri ile anılır. Almancada tungsten metaline wolfram denildiğinden WIG olarak da anılmaktadır.

TIG kaynak yönteminde ergimeyen tungsten elektrot ile kaynak edilen parça arasında elektrik arkı oluşur. Kaynak bölgesi havanın olumsuz etkilerine karşın koruyucu bir gaz ile korunur. Koruyucu gaz olarak argon, helyum, karbondioksit veya karışım gazlar kullanılabilir [41]. TIG torcunun yapısında erimeyen, sıcaklığa dayanıklı tungsten elektrot bulunmaktadır. Bu elektrotun sağladığı ark malzemeyi ısıtır ve eritir. Özellikle ince metallerin birleştirilmesinde herhangi bir ilave metal kullanmadan da kaynak işlemi gerçekleştirilebilir. Bununla birlikte kalın metal birleştirilmelerinde ana metalin fiziksel ve kimyasal özellikleri ile benzerlik gösteren ilave metaller kullanılarak kaynak işlemi gerçekleştirilmektedir. Geleneksel bir TIG kaynak sürecinin bileşenleri Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Bununla birlikte TIG kaynağının avantajları ve dezavantajları aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

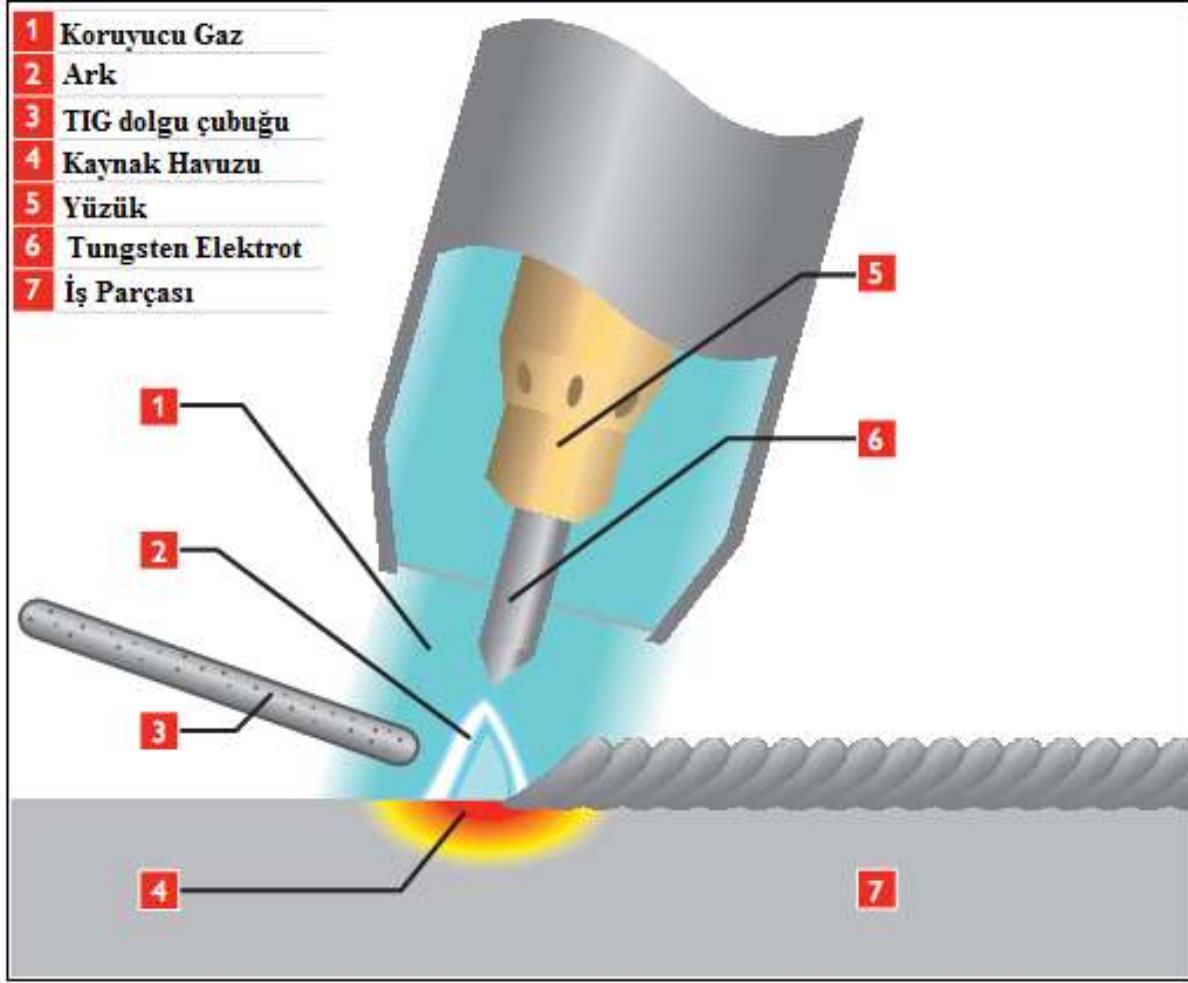
TIG kaynağının avantajları

- Manuel veya otomatik sistemlerde kaynak edilebilirlik
- Bütün kaynak pozisyonlarında çalışabilme
- Yüksek kalite kaynak elde edilebilirlik
- Kaynak cürufu olmaması

TIG kaynağının dezavantajları

- Düşük verimlilik

- Elektrotun kaynak havuzuna teması sonucunda metalin tungsten içermesi
- Fazla ısı girdisi neticesinde malzeme özelliklerindeki olumsuz değişiklikler [41]



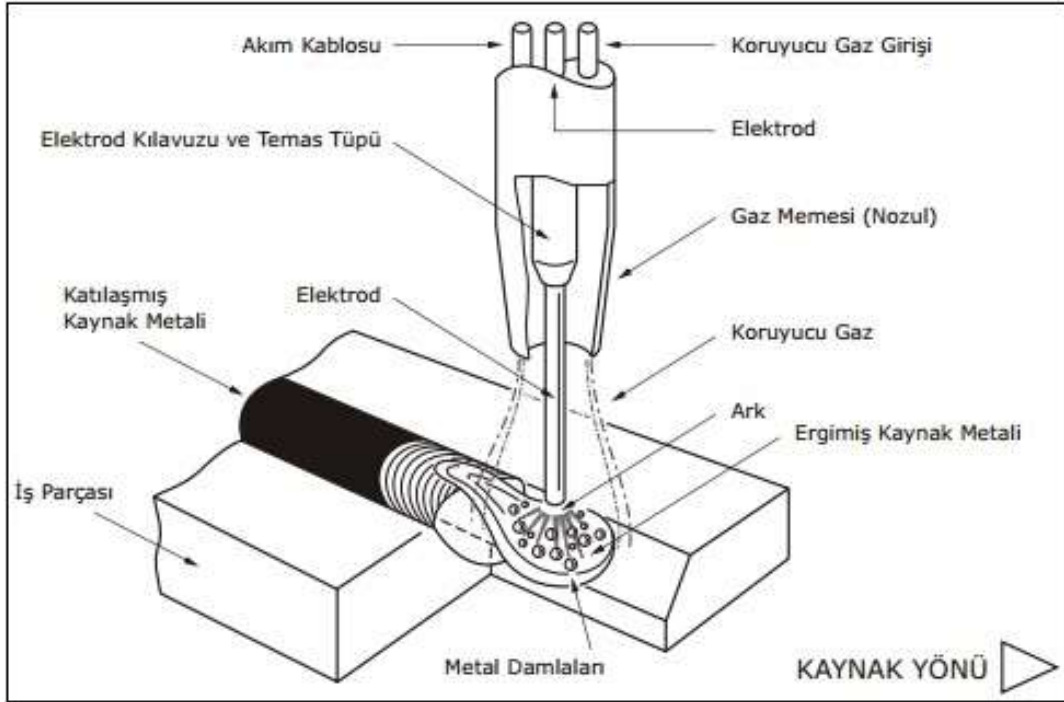
Şekil 2.3. TIG kaynağı yönteminin temel prensibi [42]

2.4.2. MIG (Metal Inert Gas) Kaynağı

Eriyen elektrotla yapılan gaz altı ark kaynağı devamlı beslenen kaynak teli ile iş parçası arasındaki yapılan bir elektrik ark kaynağıdır. Kullanılan koruyucu gaza göre MIG ve MAG ismini alırlar. MIG kelimesi “Metal Inert Gas” kelimelerinin, MAG kelimesi ise “Metal Active Gas” kelimelerinin baş harflerinden meydana gelmiştir. Burada “Inert” kelimesi soy, “Active” kelimesi ise aktif anlamına gelmektedir. Soy gaz olarak argon veya helyum, aktif gaz olarak karbondioksit gazı kullanılır.

MIG kaynak yöntemi özellikle kalın malzeme kaynağı uygulamaların TIG kaynağına göre daha verimli bir kaynak yöntemidir. Fakat şu sıralar bu kaynak yönteminin kaynak kalitesinin TIG kaynağına göre daha zayıf olması, MIG kaynağının kritik olmayan uygulamalarda kullanılmasına neden

olmaktadır. MIG kaynağının dezavantajlarından bir tanesi kaynak sonrası cüruf oluşmasıdır. Bu durum Argon ve Helyum gazı karışımı kullanılarak belirli bir noktaya kadar iyileştirilebilmektedir [43].



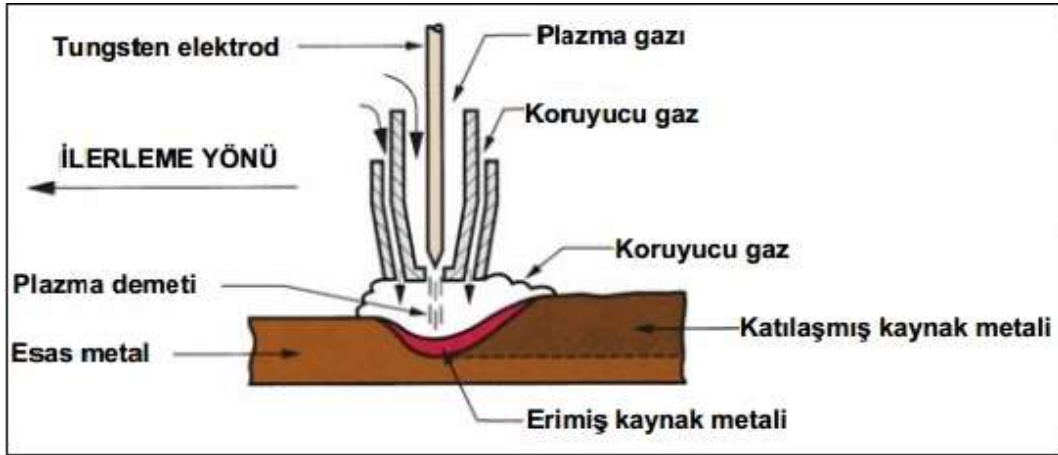
Şekil 2.4. MIG kaynağı yönteminin temel prensibi [44]

2.4.3. Plazma Ark Kaynağı

Plazma ark kaynağı, havacılık, gemcilik, uzay teknolojileri uygulamalarında tercih edilen bir kaynak yöntemidir. Plazma ark kaynağı genel olarak TIG yöntemine benzerdir ancak çok önemli avantajları bulunmaktadır. Özellikle 8 mm'ye kadar malzeme kalınlığı olan saclarda ve diğer bileşenlerde, yüksek kalite gereksinimleri için lazer kaynağına ilginç bir alternatif sunar. Plazma kaynağında soğutulmuş gaz nozulu arkı sınırlar. Arkın güçlü ışın demeti sayesinde V veya U biçimindeki ön hazırlık gibi ayrıntılı kaynak dikışı ön hazırlık çalışmalarına gerek kalmaz. Bu % 30'a varan dolgu malzemesi tasarrufu sağlar. Daha yüksek kaynak hızı diğer taraftan - yumuşak plazma kaynağında örnek olarak % 20 kadar daha fazladır - sadece zaman ve maliyet tasarrufu sağlamaz aynı zamanda derin bir kaynak girimini garanti eder. Ayrıca plazma gazı ile çevrelendiği için tungsten elektrotun çok daha yüksek hizmet ömrü vardır. Plazma ark kaynağı içindeki sıcaklıklar, küçük çaplı ve yüksek enerji yoğunluğuna sahip bir plazma jetinin oluşturduğu sınırlanmış ark sayesinde 28.000°C'ye ulaşır. Genellikle 3-10 mm kalınlığındaki malzemelerin kaynağında kullanılır. 6 mm kalınlığına kadar olan parçalarda plazma ark kaynağı ile tek pasoda kaynak yapılabilmesi maliyet ve zaman açısından önemli avantaj sağlamaktadır.

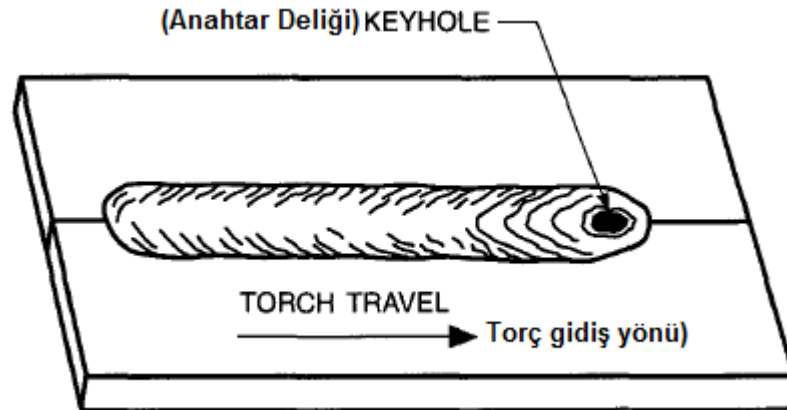
Plazma ark kaynağında koruyucu gaz olarak genelde argon gazı kullanılmaktadır. Bununla birlikte helyum gazı da tercih edilen bir gazdır. Helyum gazı uygulamalarda daha yüksek ark sıcaklığı

elde edilmesine karşın kaynak elemanlarının çok hızlı aşınmasından dolayı sürekli tercih edilmemektedir.



Şekil 2.5. Plazma Ark Kaynağı yönteminin temel prensibi [44]

Plazma Ark Kaynağı TIG kaynağında olduğu gibi ergitme yöntemi ile kullanılabilir gibi anahtar deliği denilen yöntemle de uygulanabilir.



Şekil 2.6. Anahtar deliği yöntemi şeması [45]

Plazma Ark Kaynağı uygulamasının avantajları;

- İyi ark kararlılığı
- Ark kaynağına göre daha iyi nüfuziyet kontrolü
- Yüksek ilerleme (kaynak) hızları
- Mükemmel dikiş kalitesi

Plazma Ark Kaynağı uygulamasının Dezavantajları;

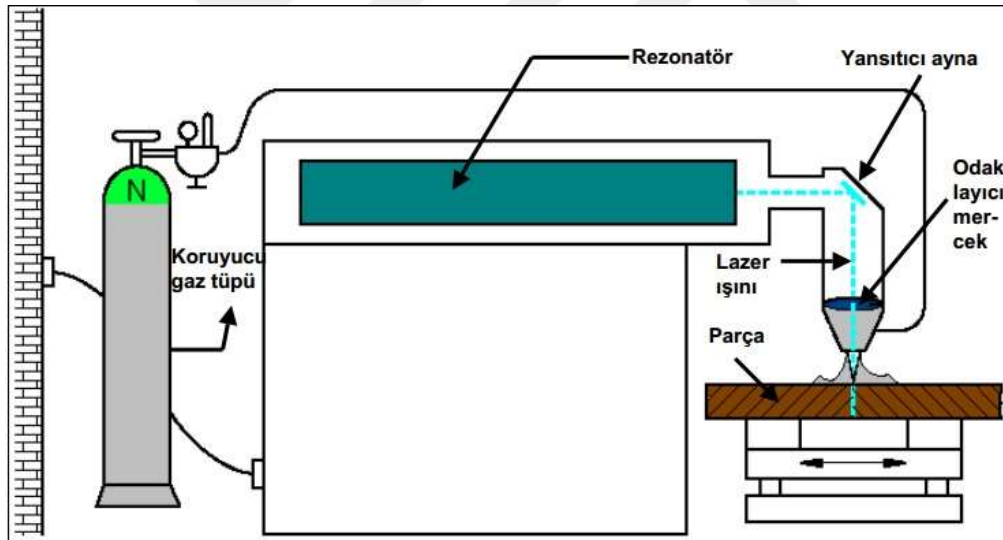
- Yüksek ekipman maliyeti
- Diğer ark kaynakları yöntemlerine göre daha büyük torç boyutu bazı durumlarda sıkıntı yaşatmaktadır.

- Kaynak pozisyonları kısıtlıdır [43].

2.4.4. Lazer Kaynağı

Lazer kelimesi İngilizce “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (Uyarılmış Işın Yöntemi ile Işık Kuvvetlendirilmesi)” cümlesindeki kelimelerin baş harflerinden oluşmaktadır. Lazerler ışını kızıl ötesi (IR) dalga boylardan, mor ötesi (UV) dalga boylara kadar uzanan ışık şiddeti artırılmış, tek frekansta ve eş fazlı ışınımlardan oluşan ışın demetleridir [46]. Yüksek miktarda enerjiyi, yol boyunca önemli kayıplar olmadan taşıyabilme özelliği lazerlerin çok geniş bir uygulama alanına sahip olmasını sağlamıştır [47].

Lazer kaynağında lazer ışını çok hassas olarak malzemelerin birleşme bölgelerine odaklanabilmektedir. Bu sayede hem kaynak için gerekli olan enerji miktarı azalmakta, dolayısıyla kaynak hızı yükselmekte, hem de malzemenin kaynakla birleştirilen bölgesi dışındaki bölgelere gereksiz ısı yüklemesi yapılmamış olur. Bu durum malzemenin mekanik özelliklerinin değişmemesini ve görsel açıdan yapısının korunmasını sağlamaktadır [48].



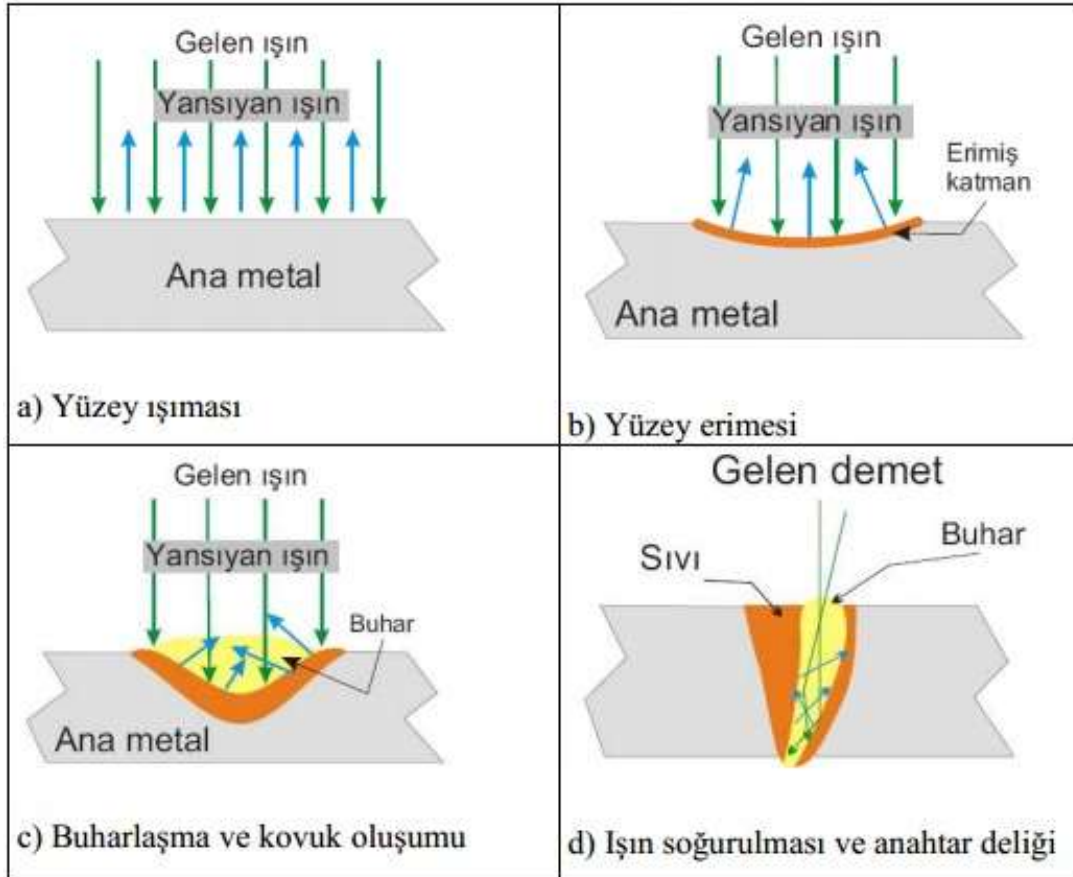
Şekil 2.7. Lazer kaynağı donanımı [49]

Lazer kaynağı iki tipte olabilmektedir. Bu tipler “Lazer Nüfuziyet Kaynağı” ve “Lazer Nokta Kaynağı”dır. Lazer nüfuziyet kaynağında lazer ışınının kaynak yapılması istenilen her iki malzemeyi de delerek geçmesi hedeflenmektedir. Bu tip kaynaklarda çok yüksek yoğunluktaki lazer ışını, metal malzemenin lokal ve ani olarak buharlaşarak anahtar deliği olarak adlandırılan, malzemeyi boydan boya geçen bir deliğin oluşmasını sağlamaktadır. Bu delik içerisinde buharlaşan metal malzemenin yarattığı plazma tarafından emilen lazer ışını malzeme üzerinde hareket ettirilerek, hareket yönünde eriyen metal malzemenin, delik etrafından dolaşarak lazer ışınının geçişinin ardından karışarak soğuması sağlanır. Soğuyarak donan metal malzeme karışımı iki malzemenin birleşmesini sağlar. Bu tip lazer

kaynaklarında lazer gücüne ve kullanılan ışın özelliklerine bağlı olarak çelik malzemelerde 50 mm kalınlığa kadar nüfuziyet sağlanabilmektedir [50].

Lazer kaynağının avantajları;

- Enerji şevkinin ve zamana bağlı kumandanın basitliği sebebiyle, hemen hemen bütün malzemeler birbirleriyle kaynak edilebilirler.
- İyi bir şekilde otomatikleştirilebilirler.
- İş parçasının üzerine, hiçbir kuvvetin tesiri yoktur
- Atmosferde çalışma imkanı vardır.
- Hiçbir takım aşınması yoktur.
- Büyük çalışma aralıkları imkanı vardır.
- Isının tesiri altındaki bölgeler dardır.
- Zor ulaşılan yerlerde kaynak yapma imkanı vardır [47].



Şekil 2.8. Derinlemesine nüfuz eden lazer kaynağı [43]

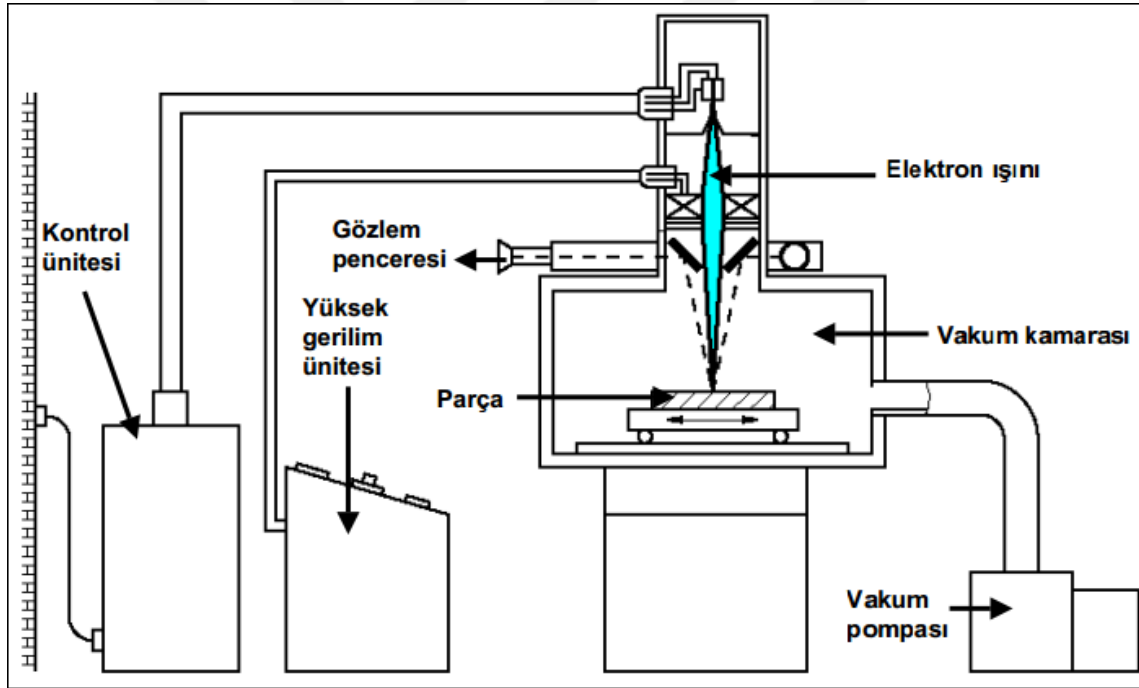
Lazer kaynağının dezavantajları

- Kaynak ekipmanları pahalıdır.
- Nd-YAG yönteminde kaynak edilebilme kalınlığı sınırlıdır.
- Kaynak sonrası cüruf oluşur [43].

2.4.5. Elektron Işın Kaynağı

Elektron bombardımanı ile kaynak olarak da bilinen elektron ışını ile kaynağın ilk uygulamaları; reaktör tekniği, roket ve uçak inşası gibi yeni ve önemli konularda olmuştur. Bu sahalarda kullanılan özel malzemelerin işlenmesi, şimdiye kadar alışılmış vasıtalarla tatmin edici bir şekilde yapılamamış ve parçaların şekillendirilmesinde genellikle zorluklarla karşılaşmıştır.

Elektron ışını ile yapılan kaynakta, birleştirilecek parçalar alın ağız formunda hazırlanır ve ilave metal kullanmadan kaynak yapılır. Derin nüfuziyet sebebiyle altlık kullanılmaz. Fakat akmayı veya yetersiz birleşmeyi önlemek için, kaynak karakteristikleri çok dikkatli olarak seçilir. Elektron ışınının birleşme yerlerini etkilemeden geçmemesi ve aralığın erimiş hacimle tamamen doldurulabilmesi için, kaynaklanacak iki parça arasındaki aralığın 1/100 mm'den fazla olmaması lazımdır. Bu dar tolerans, freze veya taşlama suretiyle ağızların itinalı bir şekilde hazırlanmasını gerektirir. Diğer kaynak usullerinde, bu kadar dar toleranslara gerek yoktur [47].



Şekil 2.9. Elektron Işın Kaynağı Düzenegi [49]

Elektron ışınlarının üretimi, 10-4 mbar'dan daha küçük bir yüksek vakum gerekir. Vakum olmaması durumunda, elektronlar gaz moleküllerine çarparak hem enerjilerini kaybederler hem de dağılırlar. Bu sebepten, elektron bombardımanı kaynağı vakum içerisinde yapılır. Bu durum ise; diğer kaynak usullerine göre bir dezavantaj teşkil eder. Aynı zamanda vakum kamarasının büyüklüğü, iş parçasının büyüklüğünü sınırlar [44].

Elektron ışın kaynağı ile titanyum kaynağında genellikle kritik uygulamalarda seçilir. Bu yöntemle yapılan titanyum ve alaşımlarının kaynağı kaliteli ve diğer kaynak yöntemlerine göre az

pürüzlü olmaktadır. Özellikle kalın malzemelerin kaynağının tek paso ile yapılabilmesi bu kaynak yöntemini cazip kılmaktadır.

Elektron ışın kaynağı yönteminin avantajları;

- Otomatik olarak kullanılması insan hatası riskini azaltmaktadır.
- Kalın malzemelerde bile tek paso ile kaynak yapılabilmesi.
- Dolgu malzemesi ve koruyucu gaz gerektirmemesi.
- İyi bir endüstriyel deneyim olması

Elektron ışın kaynağı yönteminin dezavantajları;

- Pahalı ekipmanlar ile yapılabilmesi
- Hassas ağız aralığı ve hizalamaya gereksinim duyulması
- Işınlarmın kullanımında güvenlik kurallarına önem verilmesi [43].

2.4.6. Direnç Kaynağı

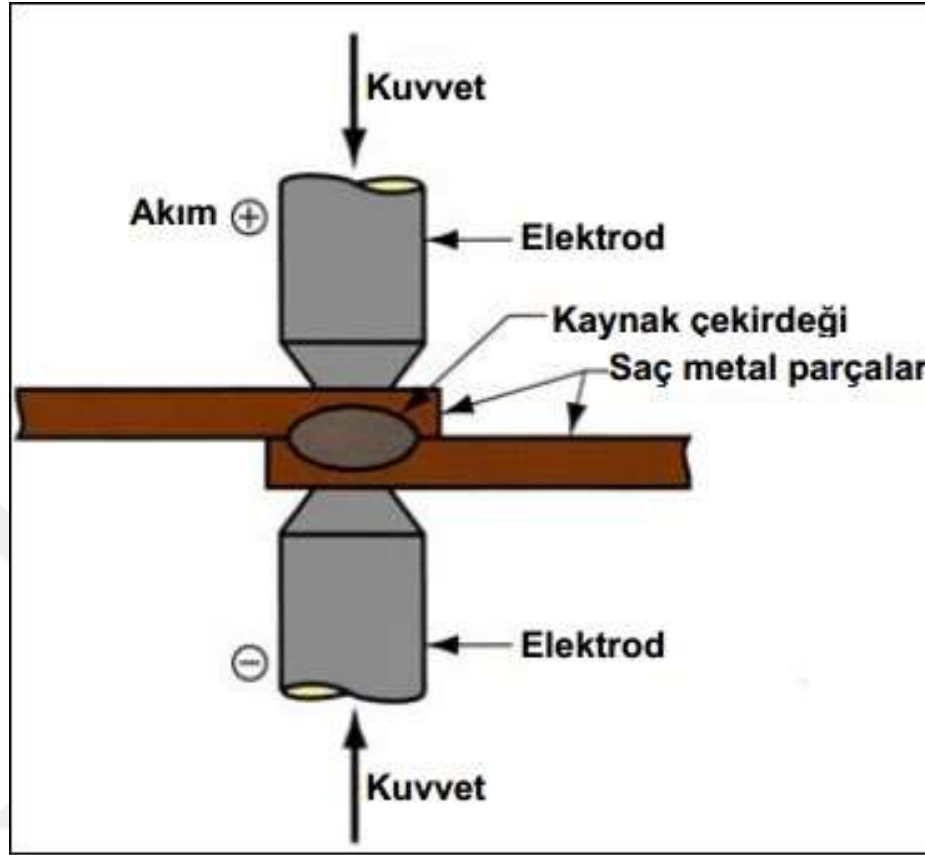
Farklı metallerin direnç kaynağı ile birleştirilmesi, metalin yüksek özdirenci ve ısı iletkenliği sayesinde elverişlidir. Direnç kaynağı iş parçalarından geçen elektrik akımına karşı iş parçalarının gösterdiği dirençten sağlanan ısı ve aynı zamanda, basıncın tatbikiyle yapılan bir kaynak usulüdür. Malzemeden geçen elektrik akımının meydana getirdiği ısının dışında, herhangi bir ısı tatbik edilmemektedir. Isı, kaynak edilecek kısımlarda meydana gelir ve basınç kaynak makinasındaki elektrotlar veya çeneler vasıtasıyla uygulanır [47].

Bütün direnç kaynağı usulleri, uygun bir akım şiddeti kaynak zamanı düzenlemesini gerektirir. Kaynak bölgesinin ısınma ve soğuma hızları, zaman ekonomisi bakımından mümkün olduğu kadar yüksek olmalıdır. Demir esaslı malzemelerde bu hız gevrek bir kaynak dikişi meydana getirecek kadar yüksek ise, ayrıca bir temperleme işlemi gerekir.

2.4.6.1. Nokta Direnç Kaynağı

Nokta kaynağı, direnç kaynağı türleri içerisinde en çok kullanılan türdür. Kaynatılacak parçalar iki bakır elektrot arasına alınır ve belirli bir baskı uygulanmasıyla elektrik akımının geçişi sağlanır. Makine üzerindeki şalter ve zaman sayacı ile belirlenen süre boyunca, akım bir elektrottan diğerine akarken (1mm sac için bu süre yaklaşık 0,2 saniyedir) bu akıma karşı direnç, iki sac arasındaki temas noktasında en yükseğe ulaşır ve malzeme bu noktada ergimeye başlar. Elektrik akımının otomatik olarak kesilmesinden sonra kaynak banyosu, uygulanan basınç altında soğuyarak katılaştır ve iki sac malzeme sökülemez bir şekilde birleştirilmiş olur. Standart bir nokta kaynak makinesinin temel bileşenleri, bakır elektrotlara yük uygulamak için kullanılan mekanik bir sistem, şebekeden gelen

gerilimi düşüren transformatör, bazı makinelerde akım kontrol cihazları ve bir zaman sayacından oluşur.

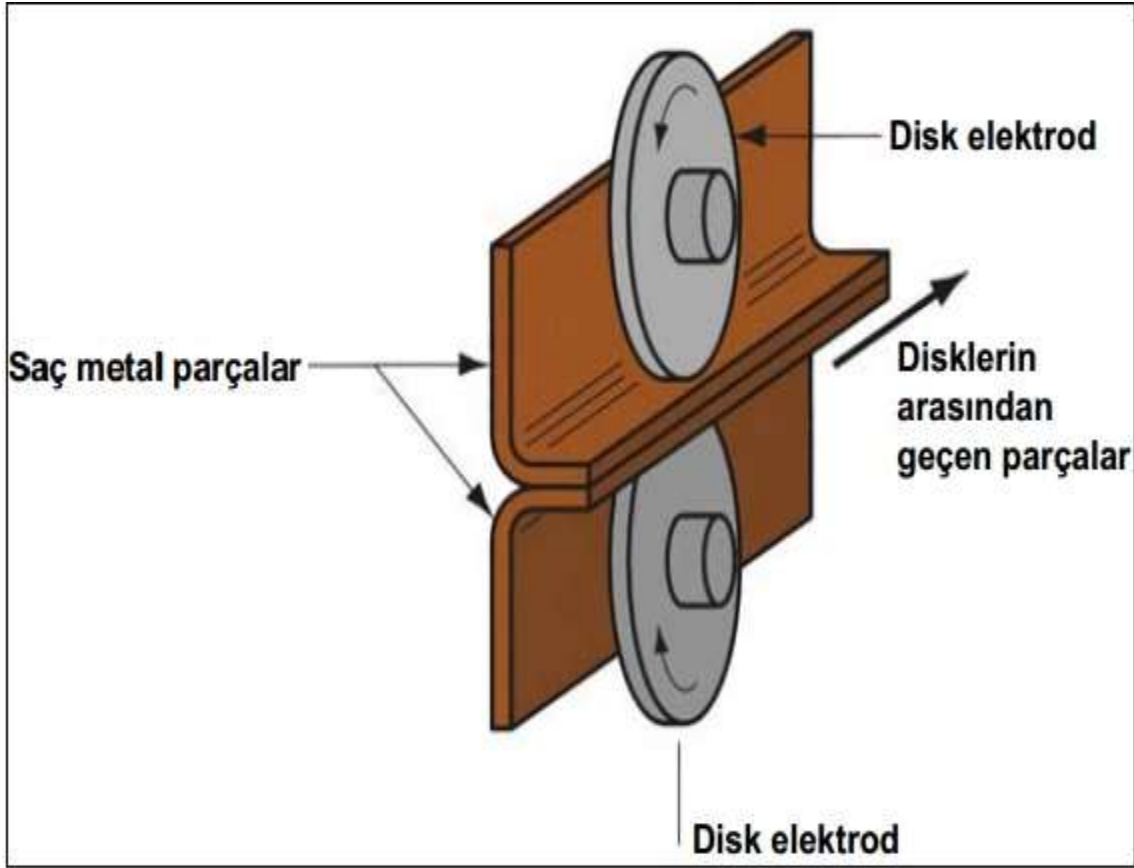


Şekil 2.10. Nokta Direnç Kaynağı Uygulaması [49]

2.4.6.2. Dikiş Direnç Kaynağı

Dikiş direnç kaynağı, yapım tekniği bakımından nokta kaynağına benzer. Nokta kaynağında ardışık olarak noktaların sıralanması dikiş direnç kaynağını oluşturur. Dikiş kaynağı, nokta kaynağındaki gibi birbiri üzerine bindirilen sac parçaların, temas yüzeylerinden geçen elektrik akımına gösterdiği direnç ile ergiyerek basınç altında birleştirilmesidir.

Kaynağı yapılacak olan sac malzemeler, bakır alaşımdan yapılmış disk biçimindeki iki elektrot arasına konularak pnömatik veya hidrolik bir sistemle sıkıştırılır. Bakır disk elektrotlar dönmeye başladığında elektrik akımı da verilerek kaynak işlemi gerçekleştirilir. Tekerleklerin dönmesi sırasında akım kesilerek dönme devam ederse aralıklı dikiş kaynağı yapılmış olur. Sürekli elektrik akımı kullanılırsa kesintisiz bir kaynak birleşimi sağlanır [48]. Bu tür kaynaklar sıvı ve gazlar ile çalışılan ortamlarda sızdırmazlık özelliğine sahiptir. Elektrotların soğutulması merkezi soğutma dolaşım sistemi ile veya elektrot üzerine su püskürtülerek yapılır. Bu soğutma sistemi içerisinde dolaşım yapan soğutma sıvısı olarak % 5 oranında bor yağı karışımı su kullanılır.

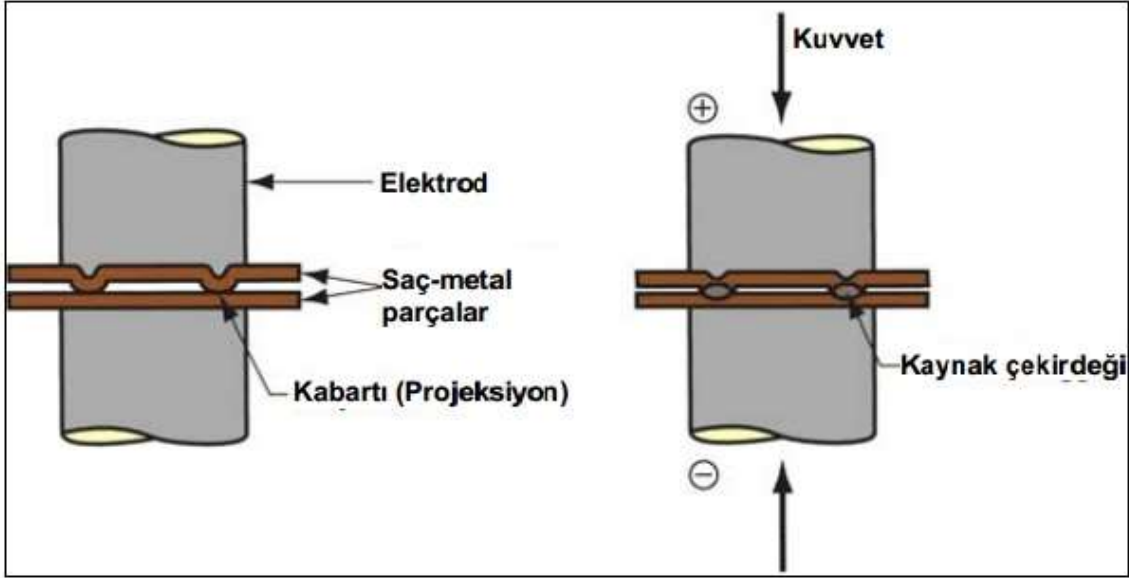


Şekil 2.11. Dikiş Direnç Kaynağı Uygulaması [49]

2.4.6.3. Direnç Kabartı Kaynağı

Kabartılı nokta kaynağı, süreç olarak nokta kaynağına benzemektedir. Nokta kaynağında kaynatılacak sac malzemeler üst üste bindirilip, elektrotlar arasında sıkıştırılmakta ve elektrik akımı geçirilmektedir. Bu yöntemle elektrot başlıklarının boyut ve şekilleri geçen akımı sınırlandırırken kabartılı nokta kaynağında akım kaynatılacak malzemelerin en az birinde bulunan kabartılarla sınırlıdır. Isı tesiri ile ergimiş bir bölge oluşur. Basıncın da etkisiyle ergimiş bölge her iki sacın yüzeyine dağılarak birleşmeyi gerçekleştirir.

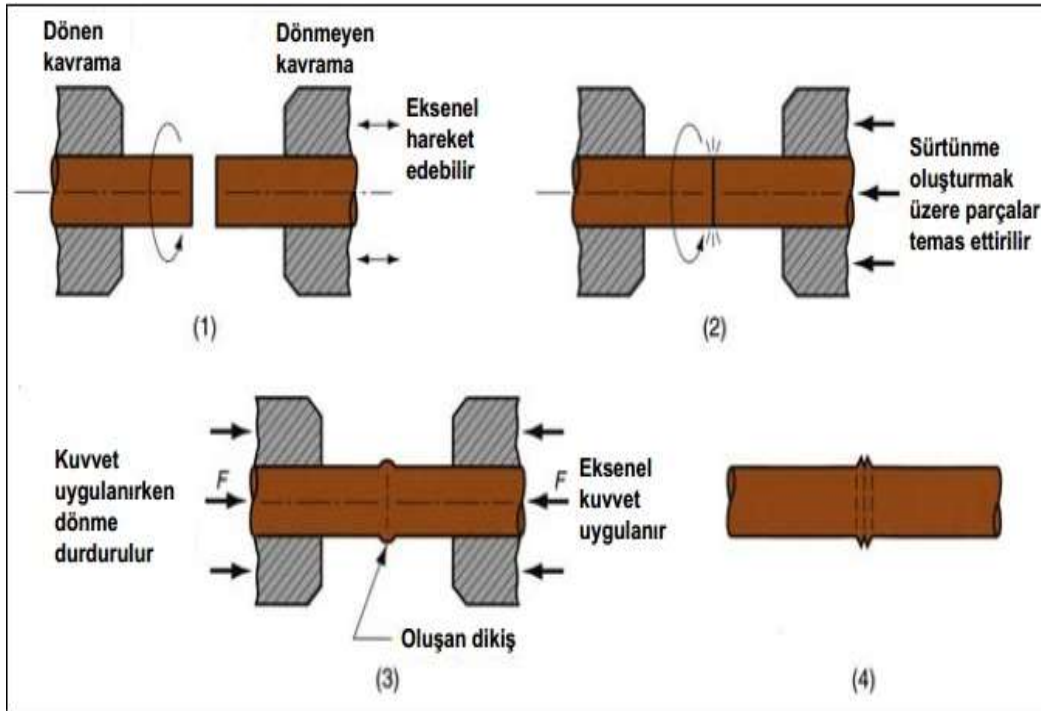
Kabartılı nokta kaynak makineleri, temelde nokta (punta) kaynak makineleri ile aynıdır. Ancak bu yöntemde nokta kaynağında kullanılan elektrot tipleri yerine eşit basınç uygulanabilen yassı elektrotlar kullanılır. Kabartılı nokta kaynağı, çeşitli imalat sektörlerinde sac yapıları küçük bağlantı parçalarının birleştirilmesinde kullanılır. Bu yöntem özellikle otomotiv sektöründe, sabit somunların araç şasisine bağlantılarında, ev aletlerinin vida bağlantılarında, mobilya imalatında iskelet parçalarını oluşturulurken malzemelerin birbirleri ile bağlantısında, çeşitli makine parçalarının imalatında, dişli saplamalarda vb. pek çok alanda kullanılmaktadır. Kabartılı kaynak yöntemi inşaat sektöründe takviyeli beton uygulamalarındaki çelik hasırların üretiminde de kullanılmaktadır [48].



Şekil 2.12. Direnç Kabartı Kaynağı Uygulaması [49]

2.4.7. Sürtünme Kaynağı

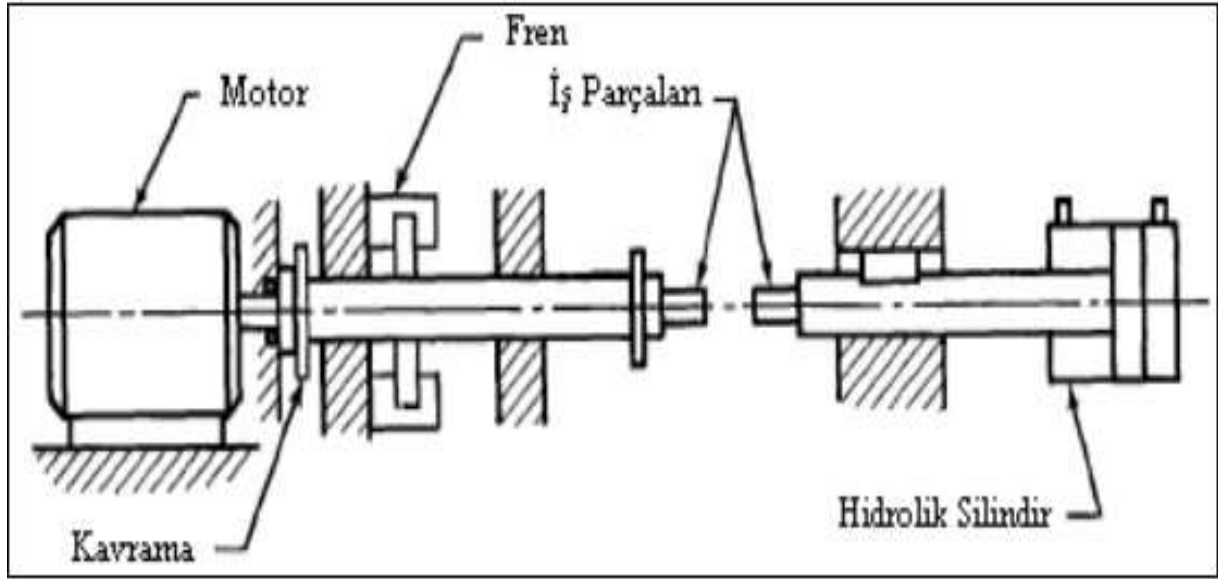
Sürtünme kaynağı, bir tür basınç kaynağıdır. Malzemenin ergitilmeden sürtünme ısı ile plastik deformasyona uğratılarak kaynaklandığı bir yöntemdir. Sürtünme ısısının meydana gelebilmesi için parçalardan en az birisinin hareket ettirilmesi gerekir. Bu hareket dönme şeklinde olabileceği gibi doğrusal veya orbital şeklinde de olabilir. Her iki hareket türünün meydana getirilmesinde kaynaklanacak parçalardan biri veya her ikisi hareketli olabilir [51].



Şekil 2.13. Sürtünme Kaynağı Proses Şeması [47]

2.4.7.1. Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynağı

Bu yöntem literatürde direkt sürtünme kaynağı olarak geçmektedir. Bu yöntemde parçalardan biri bir motor hareket ünitesine bağlıdır ve sabit bir hız altında döner, bu sırada da sabit bir eksenel kuvvet uygulanır. Çalışma parçaları önceden belirlenen bir kaynak süresince veya belirlenen bir eksenel kısalma oluşuncaya kadar sürtünür ve sonrasında frenlenerek durdurulur. Kaynak kuvveti yığılma amacıyla artırılır ve kaynak soğuyana kadar tutulur. Bu yöntemde temel parametreler; devir sayısı, yüzeye bağlı sürtünme kuvveti, sürtünme süresi, yüzeye bağlı yığılma basıncı ve yığılma süresidir [21].

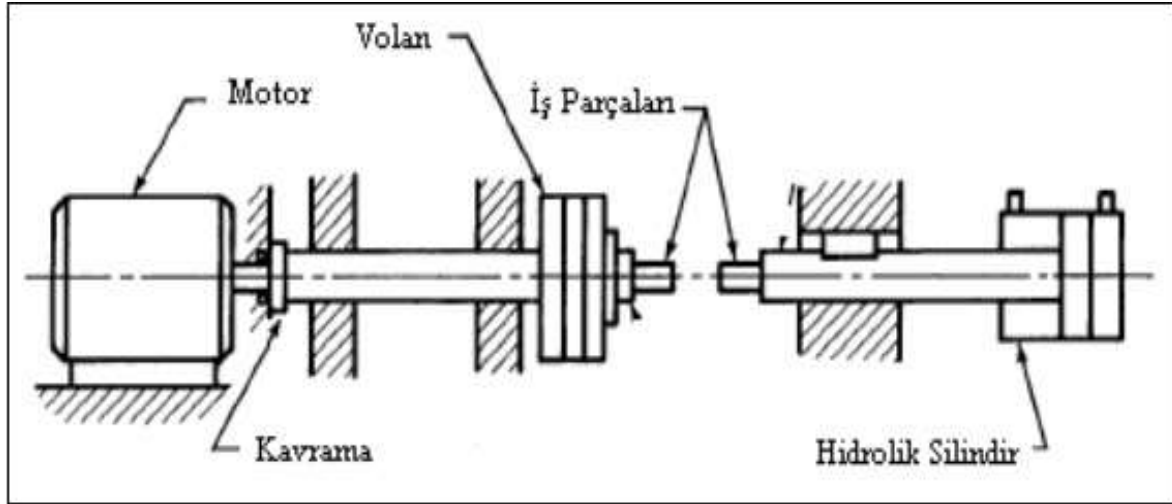


Şekil 2.14. Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynağı Proses Şeması [48]

2.4.7.2. Volan Tahrikli Sürtünme Kaynağı

Bu yöntemde bir volandaki kinetik enerjiden yararlanılır. Volan, işlemden önce belli bir devir sayısına getirilerek tahrik motoru devreden çıkarılır. Birleştirilecek parçaların birbirine bastırılmasıyla sürtünen yüzeyler ısınır ve kaynak edilir. Volan ise gittikçe artan bir şekilde yavaşlar ve durur. Ancak bundan sonra basınç ve sıcaklık azalmaya başlar ve moment ile devir sayısı birlikte sıfıra erişir. Boy kısalması ise eriştiği değerde kalır. Burada önceki proseste görülen yığılma zamanı yoktur. Bu nedenle volanlı sürtünme kaynağı işlemi daha kısa zamanda gerçekleşmektedir. Bu yöntemde temel parametreler; devir sayısı, yüzeye bağlı yığılma basıncı, yığılma süresi ve volan kütesidir [47]. Bu kaynak tipinin temel parametreleri;

- Devir sayısı
- Dönme momenti
- Yüzey merkezli yığılma momenti
- Eksenel kısalmadır.



Şekil 2.15. Volan Tahrikli Sürtünme Kaynağı Proses Şeması [48]

Sürtünme kaynağı ile malzeme birleştirmenin avantajları;

Farklı özellikteki titanyum alaşımların birleştirilmesinde kullanılabilmesi.

- Farklı malzemeleri birleştirilmede kullanılabilmesi
- Tamamen otomatik sistemle çalışması.
- Koruyucu gaz gereksiniminin olmaması.

Sürtünme kaynağı ile titanyum malzeme birleştirmenin dezavantajları;

- Ekipmanlarının pahalı olması.
- Kaynak sonrası muayenenin zor olması [43].

2.5. Korozyon Çeşitleri

Korozyon malzemelerin içinde buldukları ortamların fiziksel, çevresel, kimyasal ve elektrokimyasal etkileri sonucunda reaksiyona girerek kendi özelliklerinden kayıp vermeleridir [52]. Uzun yıllar boyunca sadece metal malzemelerin korozyona uğrayan malzemeler olduğu düşünülse de aslında metal olmayan seramik, plastik, taş, ahşap gibi özellikle ekonomik değeri olan malzemelerin de korozyona uğradığı anlaşılmıştır. Fakat bununla birlikte korozyon çalışmaları ekonomik etkisinden dolayı halen metaller üzerinde yoğunlaşmıştır. Bazı soy metaller hariç bütün metaller ve metal alaşımları su, atmosfer, kimyasal veya normal koşullarda korozyona uğrarlar [53]. Korozyon, başka bir tabir ile enerji vererek malzemeye form verdikten sonra tekrar enerji verilmesine gerek olmaksızın malzemenin doğal haline dönmesi olarak da nitelendirilebilir. Endüstride korozyon malzeme kaybına neden olduğu, verim kaybının yaşanması, üründe bozulmaların oluşması nedeniyle önlenmesi istenen bir durumdur. Korozyonun en çok bilinen tipleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

2.5.1. Homojen Dağılımlı Korozyon

Malzemenin bütün yüzeylerinde eşit hızda ve miktarda korozyonun meydana gelmesi olayıdır. En çok rastlanan korozyon çeşididir [54]. Genelde su, atmosfer gibi etkenler neticesinde meydana gelen bu korozyon çeşididir. Malzeme kullanım ömrü açısından daha önceden hesaplanan süre kadar kullanılabilir. Metal malzemenin atmosfer altında her noktasından paslanması veya tuzlu su içerisinde kalan deniz taşıtı parçalarının korozyona uğraması homojen dağılımlı korozyona örnek olarak verilebilir. Şekil 2.16.'da homojen dağılımlı korozyonun malzeme yüzeyinden kaldırdığı homojen yapı ve örnek görüntü olarak paslanmış malzemeler verilmiştir.

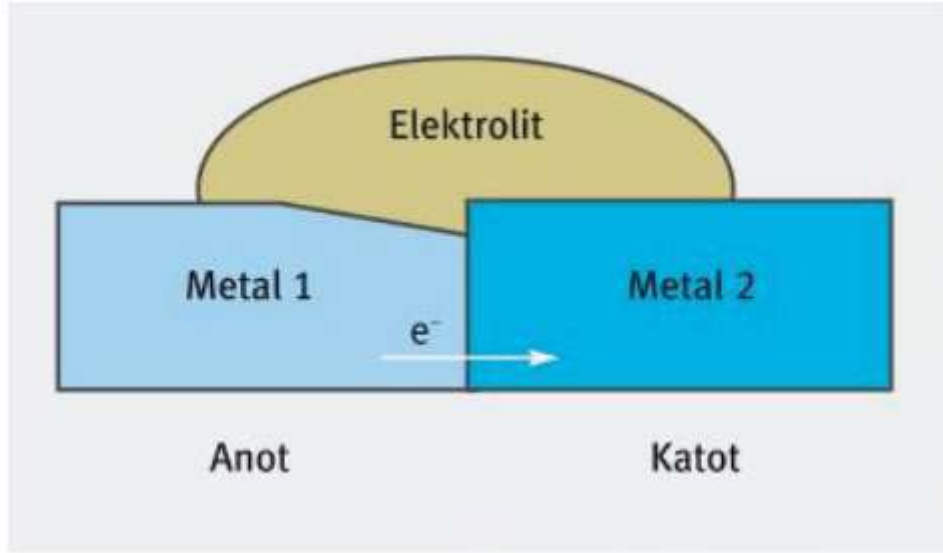


Şekil 2.16. Homojen dağılımlı korozyon

Ön görülebilen korozyon olduğu için tecrübe edilen yöntemler kullanılarak korozyon önlenabilir. Önlenilme ihtimali olmasından dolayı en az tehlikeli korozyon tipi olarak bilinmektedir.

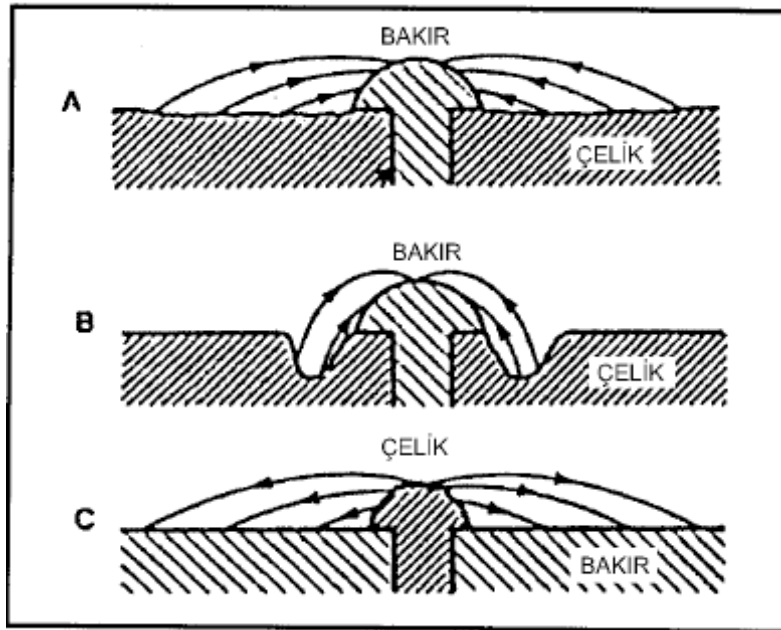
2.5.2. Galvanik Korozyon

İki farklı malzemenin aynı ortamda olması neticesindeki korozyondur. Galvanik korozyonu meydana getiren koşullar Şekil 2.17.'de gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere aynı ortam içerisinde bulunan iki metalin elektrokimyasal potansiyele sahip malzemeler olması ve bu malzemeleri birbirlerine bağlayan bir elektrolit bulunması galvanik korozyon için gereklidir. Metallerden en soy olanı katot, daha aktif olanı da anot olarak görev yapmaktadır. Galvanik seçimler genelde bir tasarım veya imalat gereksinimi olarak ortaya çıkar. Galvanik korozyon sürecinde anot durumundaki malzeme saldırıya maruz kalırken, katot durumundaki malzeme is korozyona karşı korunmaktadır[55]. Başka bir deyişle bir malzeme korozyona karşı korunması amacıyla, başka bir malzeme korozyon saldırısına maruz kalarak diğer malzemeye kurban olması durumudur.



Şekil 2.17. Galvanik korozyon mekanizması

Galvanik korozyon hızı katot ile anotun yüzey alanları oranı ile elektrolitin iletkenliğine bağlıdır [56]. Büyük katot yüzeyi ile küçük anot yüzeyi çalışıyorsa, anotta akım yoğunluğu artmakta ve dar alanda kuvvetli korozyon oluşumuna neden olmaktadır. Büyük anot ile küçük katotun çalıştığı durumlarda ise korozyon çok geniş alanda meydana geleceği için korozyonun etkisi az olacaktır. Küçük katot-büyük anot çalıştığında elektrolit iletkenliği de yüksekse, galvanik korozyon akımı geniş bir alanda kendini gösterir. İletkenliğin düşük olması durumunda, iki metalin temas ettiği kısımda dar bir alanda şiddetli olarak ortaya çıkar. Bunun en bilinen örneği, çelik plakaya yapılmış bakır perçin (küçük katot-büyük anot) ile bakır plaka üzerine yapılmış çelik perçinde (büyük katot-küçük anot) belli olur. Şekil 2.18'de katot/anot büyüklüğünün galvanik korozyona olan etkisini göstermektedir.



Şekil 2.18. Galvanik korozyonda katot/anot büyüklüğü etkisi [56]

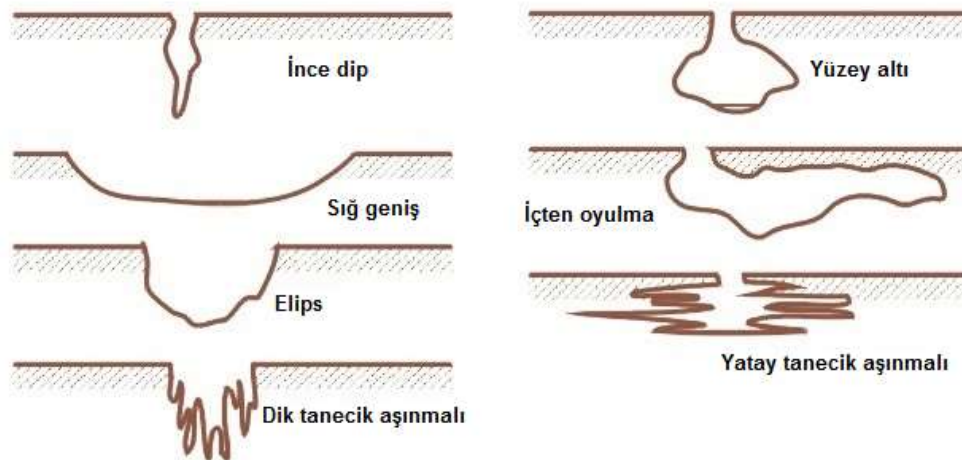
Şekil 2.18 a ve c'de elektrolit iletkenliğinin yüksek olduğu deniz suyu içerisine perçinler daldırılmıştır. Böyle bir durumda büyük katot alanı neticesinde perçinler hızlı bir biçimde korozyona uğramaktadır. Şekil 2.18b'de olduğu gibi sistem iletkenliği düşük bir ortam içerisinde çalışıyorsa yalnızca katot bölgesi yakınında kuvvetli korozyon etkisi görülür[56].

Galvanik korozyonu önlemenin yöntemlerinden biri tasarım aşamasından birbirleri ile uyumlu malzemeler seçmektir. Eğer tasarımda birbirleri arasında galvanik korozyona neden olabilecek malzemeler kullanılması zorunlu ise bazı önlemlerin alınması gerekmektedir.

- Galvanik korozyona neden olabilecek malzemelerin birbirlerinden uzaklaştırılarak izolasyonu sağlanabilir.
- Ortam içerisine anodik karakterde başka bir malzeme eklenerek bu malzemenin bilinçli korozyona uğraması yani başka bir deyişle katodik koruma yöntemi kullanılabilir.
- Sisteme korozyon yavaşlatıcı bir malzeme eklenebilir.
- Yüzeyler boya veya kaplama yapılarak korunabilir[57].

2.5.3. Çukurcuk Korozyonu

Korozyonun çok küçük ve dar bir bölgede meydana gelmesi halinde oluşan korozyon tipine çukurcuk korozyonu olarak nitelendirilir. Metal yüzeyinde çapı, derinliği, sıklığı değişen birçok çukurcuk meydana gelmektedir. Toplam metal kaybı oranı homojen dağılımlı korozyona göre çok daha küçük olmasına rağmen, korozyonun aynı noktada ilerlemesinden ötürü malzeme kullanılmaz duruma gelmektedir. Bununla birlikte korozyon çukurlarının en dip noktalarında gerilmeli ve yorulmalı korozyon neticesinde direnç kaybından dolayı çatlamlar meydana gelebilir. Malzemelerin kullanım sürelerinden çok daha erken zamanda kullanılmaz duruma gelebildiği için, çukurcuk korozyonu en korkulan korozyon tiplerinin başında gelmektedir [58].



Şekil 2.19. Çukurcuk korozyonunun oluşum biçimleri

Çukurcuk korozyonu anodik bir reaksiyon ile başlar. Malzeme ve içerisinde bulunduğu çevre koşulları uygunsa, anodik reaksiyonlar bir seri katodik reaksiyonlarla hızla devam eder ve bu durum çukur oluşmasına neden olur. Bu çukurların sayısı malzeme ile içinde bulunduğu ortama bağlı olarak değişmektedir. Çukurcuk korozyonu daha çok durağan sistemlerde meydana gelmektedir. Genellikle depolama tankları, boruların akış hızının azaldığı bölgelerinde kendini gösterir. Özellikle tuzlu ortamlar (NaCl gibi) oldukça tehlikelidir. Neredeyse her metalde meydana gelmesine rağmen, pasifleşme özelliği olan metal ve alaşımlarda daha sık görülür. Özellikle paslanmaz çelikler ve alüminyum alaşımları bu tip korozyona daha çok maruz kalmaktadır.

Çukurcuk korozyonunun etkisini azaltmak ve bu korozyonun etkilerini minimize etmek için alınması gereken bazı önlemler aşağıda belirtilmiştir.

- Çukurcuk korozyonuna maruz kalma ihtimali yüksek malzemelerin kullanılmasından kaçınılması gerekmektedir.
- Ortama inhibitör yani korozyon önleyici katkısı yapılabilir.
- Alaşımlara korozyonu önleyebilecek element ilavesi yapılabilir.
- Ortam pH'sı arttırılabilir.
- Borulardaki akışkanların hızı arttırılabilir.
- Katodik koruma yapılabilir.

2.5.4. Taneler Arası Korozyon

Taneler arası korozyonun bir diğer tabiri aralık korozyonudur. Aralık korozyonu, iki malzemesinin birleştirmelerden neticesinde oluşan veya kaplamaların altında kalan dar aralıkta oksijen farklılaşması nedeniyle oluşan bir korozyon türüdür. Bu tür dar aralıklar, içerisinde sabit halde çözelti bulduran bölgelerdir. Bu bölgelere oksijen girmesi zordur. Metaller üzerinde biriken kir ve artıkların altında da bu tür aralık korozyonuna rastlamak mümkündür. Bazı ekipman parçalarında montaj ve tasarım aşamasında yok edilemeyen dar bölgeler ve aralıklar vardır[58].

Aralık korozyonunun oluşması için iki malzeme arasına sıvı girmesi ve o bölgede sürekli olarak kalması gerekmektedir. Korozyonun oluşması için aralığın çok geniş olmaması gerekmektedir. Çünkü geniş aralık olduğu durumda sıvının hızlı bir şekilde buharlaşması ve ortamın kuruması gerçekleşmektedir. Aralık korozyonunu oluşması için her iki malzemenin de mutlaka metal olması gerekmektedir. Sanayide en sık rastlanan aralık korozyonu boru hattında flanş ve conta yüzeyi arasında kalan bölgedeki korozyondur. Bu bölgede aralık korozyonu gerçekleşmesi ihtimali yüksektir ve sahada karşılaşılan en sık korozyon sorunlarından birisidir. Şekil 2.20'de flanşlar arası ve flanş conta arası aralık korozyonu örnekleri verilmiştir. Bu korozyonu engellemek için conta yüzeylerinin belirli periyotlarda temizlenmesi gerekmektedir. Özellikle yüzey temizliği yapılmadan conta montajının yapılması bu korozyonun daha hızlı biçimde gerçekleşmesine neden olmaktadır.

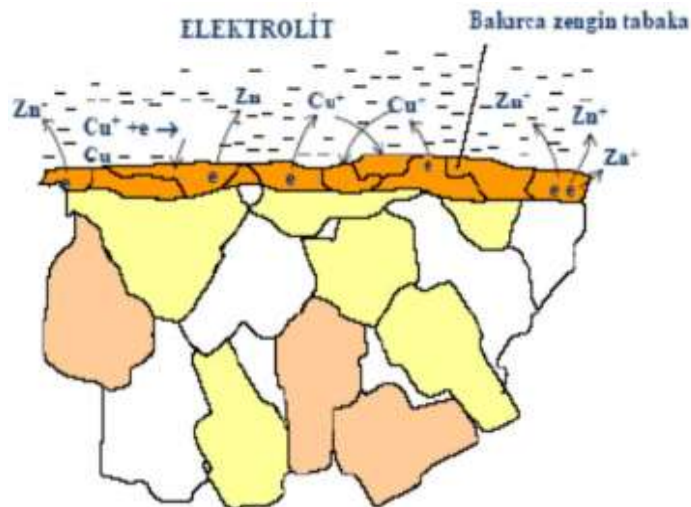


Şekil 2.20. Flanşlar arası aralık korozyonu örneği [59]

Aralık korozyonunu önlemek için tasarım esnasında çok gerekli değilse iki yüzey arasında bahsi geçen şekilde boşluk bırakmamak gerekmektedir. Ayrıca birleştirmelerde metal olmayan malzemelerin geçirgenlik ve soğutma yeteneklerinin sınırlı olması önemlidir. Bununla birlikte sıvı birikmesi muhtemel bölgelerde, birikintilerin sürekli olarak uzaklaştırılması da bu tip korozyonu önleyebilecek bir hareket olarak değerlendirilebilir.

2.5.5. Seçici Korozyon

Seçici korozyon başka adıyla seçimli veya tercihli çözünme korozyonu olarak bilinir. Bir alaşım metali içinde bulunan elementlerden birinin korozyona uğrayarak malzemeden ayrılması ile görülürler.



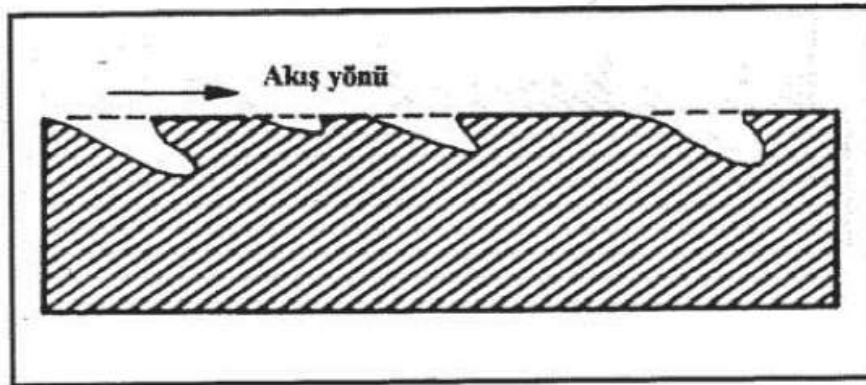
Şekil 2.21. Seçimli korozyon mekanizması

Seçimli korozyon en sık pirinç malzemelerde görülür. Bununla birlikte alaşımdaki çinko, bakırdan önce korozyona uğrayarak alaşım gözenekli bir şekil alır. Alaşım metali içerisinde çinko oranının fazla olması durumunda pirincin korozyonu uğraması oranı da bu ölçüde arttırmaktadır. Bu durumu engellemek için çinko oranı %15'in altına indirilmesi gerekmektedir. Alaşım içine % 1 kalay ile inhibitör olarak arsenik, fosfor ve antimon ilave edilir [59].

Seçimli korozyonun etkisi olumsuz etkisi malzemenin mukavemet kaybındaki değişimdir. Malzemenin bu tip korozyona uğrayan kısmında çekme mukavemetinin tamamen kaybolduğu kabul edilir. Bütün bu olumsuz etkilere ve mukavemet kaybına rağmen malzemenin görsel şekli çok değişmez ve çoğu zaman sadece malzemede renk değişikliği olarak belirir [60].

2.5.6. Erozyonlu Korozyon

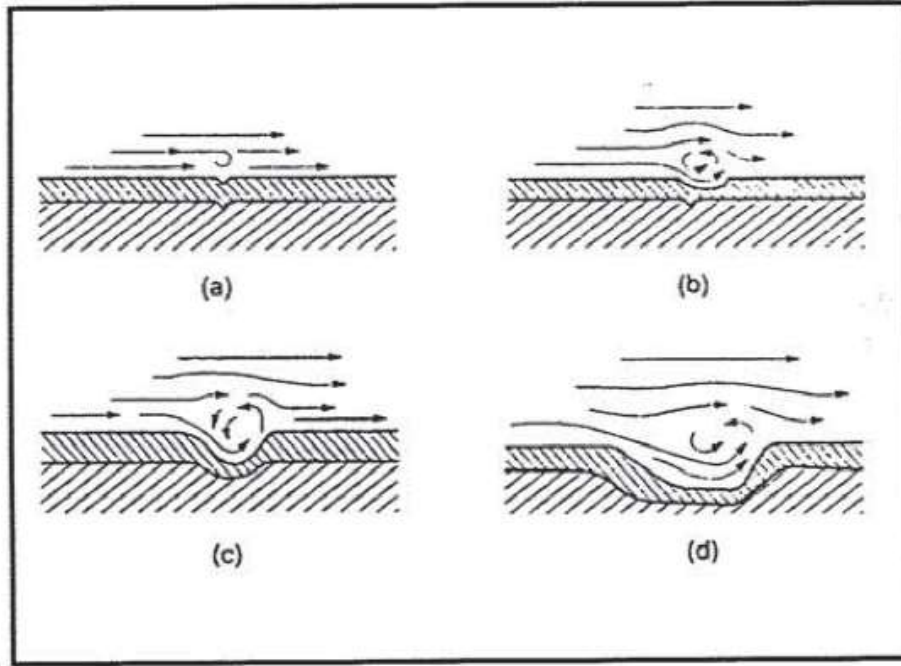
Erozyonlu korozyon malzeme üzerinden veya içerisinde geçen akışkanın etkisiyle malzemenin aşınması neticesinde oluşan korozyon türüdür. Eğer akışkanın içerisinde katı parçacıklarında bulunması durumunda korozyonunun etkisi çok daha ciddi boyutlara ulaşabilmektedir. Şekil 2.22'de erozyonlu korozyonun tipik görünüşü verilmiştir. Bu tip korozyonda malzeme üzerinde göz ile de görülebilen akış yönüne doğru oyuntular oluşmaktadır.



Şekil 2.22. Erozyonlu korozyonun tipik görüntüsü [57]

Malzemelerin birçoğu erozyon korozyonunu karşı duyarlıdır. Korozyona karşı duyarlılıkları yüzeylerinde oluşan filme yani pasiflik durumlarına bağlıdır. Örneğin alüminyum, kurşun ve paslanmaz çelikler bu hususta değerlendirilebilirler. Bu malzemeler üzerindeki filmler yıprandığı veya hasara uğradığı vakit malzemeler hızla korozyona uğrarlar[61].

Şekil 2.23.'te malzeme üzerinden veya içerisinde geçen akışın şekline göre korozyonun ne şekilde gerçekleştiği gösterilmektedir. Akış hızının artması korozyonu da arttırmaktadır. Korozyon neticesinde oluşan çukurcuklar akışın daha da akış burgacına girmesine neden olarak korozyonu hızlandırır.



Şekil 2.23. Erozyonlu korozyonun başlama mekanizması [57]

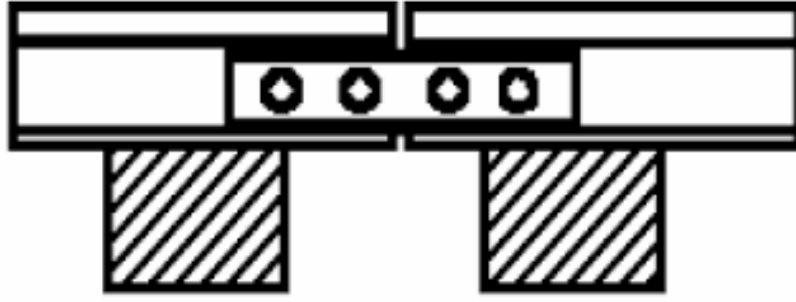
Erozyonlu korozyon sanayide akışkan ile çalışan ekipmanlarda sıkça görülmektedir. Pompalar, boru hatları üzerindeki boru, dirsek, redüksiyon gibi bağlantı elemanları, vanalar, kompresörler, türbinler bu tip korozyona maruz kalmaktadırlar. Bu sebeple alınması gereken bazı önlemler şu şekilde sıralanabilir:

- Ekipman imalatında korozyona dayanıklı bir malzeme seçilmelidir.
- Akışkan hızını düşürerek korozyona maruziyeti azaltmak için yüzey alanı artırılmalıdır.
- Katodik koruma ile korozyon önlenir.
- Akışkan içerisindeki parçacık etkisini azaltmak için filtreleme sistemi kullanılmalıdır.

2.5.7. Sürtünme Korozyon

Birbirleri ile temas halinde olan ve yük etkisinde olan iki malzeme arasında titreşim ve sürtünme neticesinde oluşan aşınmaya sürtünme korozyonu denilmektedir. Sürtünme korozyonu erozyonlu korozyonun özel bir hali olarak kabul edilmektedir. Fakat akışkanın genellikle gaz olduğu ortamlarda gerçekleşmektedir [62].

Sürtünme korozyonuna örnek olarak Şekil 2.24.'te gösterilen demir yollarında kullanılan rayların bağlantı noktalarındaki civatalar ile birleştirilmiş raylar örnek verilebilir. Rayların birleştiği temas yüzeyi arasında oluşan yük neticesinde sürtünme korozyonu ilerlemektedir. Trenin ray üzerinden ilerlemesi sırasında hem yük hem de titreşim arttığı için sürtünme korozyonu etkisi daha artmaktadır. Bu sebeple titreşimi ve bağlı hareketi azaltmak için rayları birbirine bağlayan bu civataların çok sık kontrol edilmesi ve sıkılması gerekmektedir.



Şekil 2.24. Demir yolu rayı bağlantısındaki sürtünme aşınması

Sürtünme korozyonunu önlemek için aşağıdaki yöntemler kullanılabilir.

- Sürtünme halinde olan yüzeyler arasındaki sürtünme kat sayısını minimum düzeye indirmek için uygun yağlayıcılar ile yağlamak. Yüzeyin çukurcuklar içermesi durumunda çukurcuklar yağ depolama görevi yapacağından, yağlama işleminden önce yüzeyde çukurcuklu bir yapı oluşturmak daha faydalı olabilir.
- Temas halinde çalışması gereken parça malzemelerinin sertlikleri artırılabilir. Sert malzemeler, yumuşak malzemelere göre sürtünme korozyonuna daha dirençli yapıya sahiptirler.

2.5.8. Stres Korozyonu

Korozif bir ortamda malzeme yüzeyinde bulunan herhangi bir çatlak veya çukur gerilim altında daha da etkinleşerek korozyonun başlaması için uygun bir ortam yaratır. Normal şartlar altında korozyon çıktısı olarak kabul oluşmaktadır fakat stres altında korozyon neticesinde kabuk oluşmaz. Bunun neticesinde korozyon hızla devam ederek malzemenin korozyon bölgesinde çatlamasına neden olmaktadır. Bu tip korozyona saf haldeki metallere ziyade alaşım metalleri maruz kalırlar. Bu durumda basınç gerilmesinin etkisi olmamasına karşın, çekme gerilmesi stres korozyonu üzerinde etkilidir.

Stres korozyonunun oluşumu bir dizi hareket neticesinde ortaya çıkar. Malzeme üzerindeki çatlaklar kopmaya yardımcı olur. Stresin kaynağı her zaman belirlenemeyebilir. Stres korozyonu her ortam ve her malzemeye has bir durum gösterir. Bir malzeme için çatlama yapan ortam diğer bir malzemeye için etki etmeyebilir [56]. Stres korozyonunun en sık rastlanan şekli, kazanlardaki kostik çatlamaşdır. Buhar kazanlarında kazan besleme sularının koroziif etkisini indirmek amacıyla suların alkali karakterde olması istenir. Bu sebeple kazan besi sularına belirli oranda kostik ve trisülfat dozajlanır. Bazı bölgelerde kostiğın konsantrasyonunun artması neticesinde kostik çatlamaş olayına gerçekteşebilir[56].

Malzemelerde stres korozyonunu engellemek için ya çekme gerilmesi kaynağı kaldırılmalıdır ya da koroziif ortam önlenmelidir. Bununla birlikte her ikisinin de yapılması esas istenen durumdur. Çekme gerilmesini önlemek için en uygun yöntem gerilme giderme işleminde kullanılan ısıf işlem uygulamasıdır.

2.5.9. Yorulmalı Korozyon

Yorulma belirli periyotlar halinde tekrar eden gerilim altında bir malzemenin kırılma eğilimi olarak nitelendirilir. Yorulma kırılması, genelde akma noktasındaki gerilimin malzeme üzerine defalarca uygulanmasının sonucu meydana gelir. Yorulmalı korozyon koroziif ortamda yorulma direncinin düşmesi olarak tanımlanır. Buradan da anlaşılacağı üzere mekanik özellikleri de içeren bir korozyon çeşididir.

Yorulmalı korozyona etki eden çevresel faktörler sistemin içinde bulunduğu ortamın sıcaklık, oksijen miktarı, pH ve çözelti cinsi olarak verilebilir. Örneğın paslanmaz çelik, alüminyum gibi malzemelerin sudaki yorulma korozyon dirençleri yüksektir. Fakat deniz suyu gibi tuz ihtiva eden ortamlar içerisinde bu malzemelerin yorulma dirençlerinin %70-80'ini koruyabilmektedirler [62].

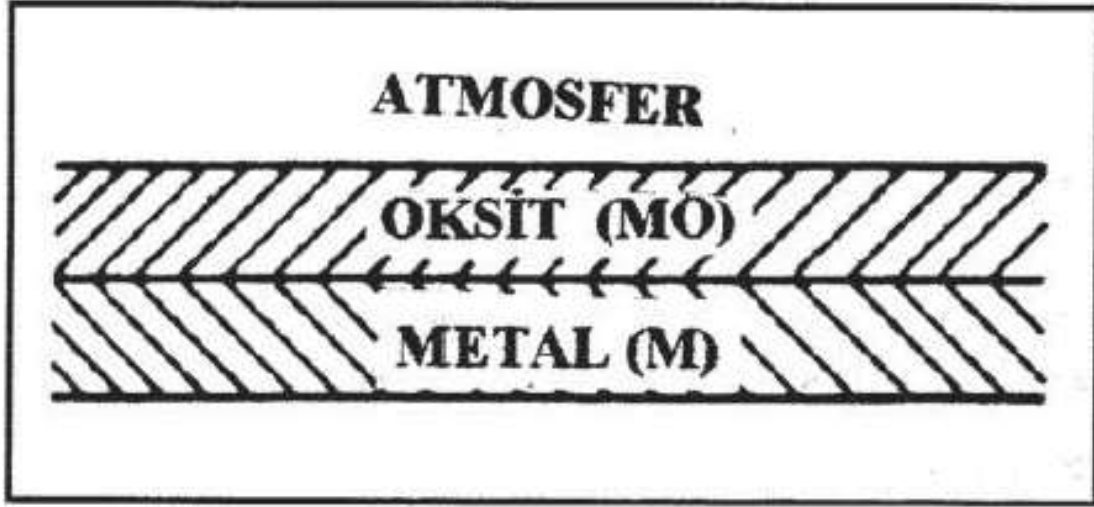
Sahada sırasında ortaya çıkan yorulma sorunları genelde sadece yorulma veya korozyondan yorulma etkileri arasında yer alır. Eğer soruna çatlama neden olmuş ise, bunun korozyondan ileri gelmediğı bilinebilir. Çatlak oluşması korozyon sonucu değil genellikle yorulmanın neden olduğu bir arıza çeşididir.

Yorulmalı korozyonu önlemek için malzeme üzerindeki gerilmeyi azaltmaktır. Katodik koruma ve inhibitör kullanımı da korozyona karşı direnci arttırabilir.

2.5.10. Yüksek Sıcaklık Korozyonu

Yüksek sıcaklıkta havadaki oksijen veya diğer zarar verici gazlar malzeme yüzeyinde oksit tabakası oluşturarak korozyon etkisi yaratmaktadır. Şekil 2.25.'te malzeme yüksek sıcaklıkta gerçekteşen korozyonun mekanizması gösterilmektedir. Bu oksit tabakası düşük sıcaklıklarda malzemeyi kimyasal

ortama karşı koruyabilecek form olarak karşımıza çıkabilir. Fakat yüksek sıcaklıklarda böyle bir etkisi yoktur.



Şekil 2.25. Yüksek sıcaklık korozyonu mekanizması [57]

Yüksek sıcaklık korozyonundan korunmak için sistemin çalışma sıcaklıklarına dayanıklı malzemeleri seçmek gerekmektedir. Özellikle kazan, fırın, türbin gibi yüksek sıcaklıklarda çalışan ekipmanlarda özel yüksek sıcaklık metallerinin kullanılması bu korozyonu önleyecek en temel yöntemin başında gelmektedir.

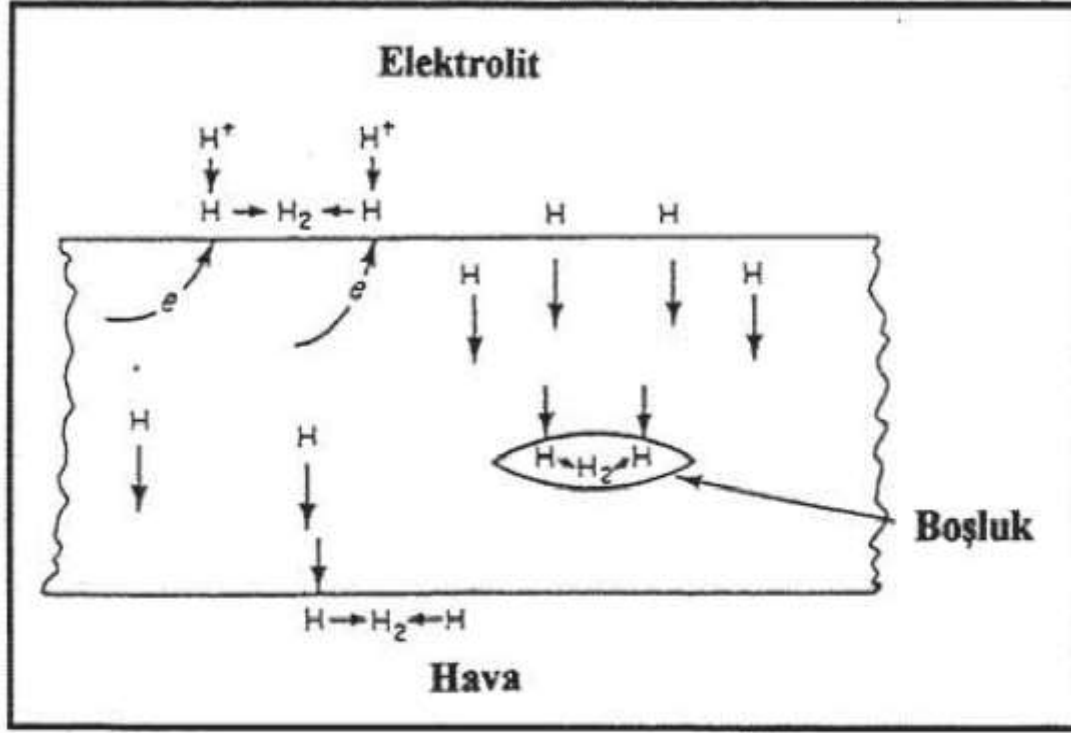
2.5.11. Hidrojen Hasarları

Bir malzemenin hidrojen elementinden kaynaklı hasara uğraması hidrojen hasarları adı altında incelenmektedir. Hidrojen hasarları dört farklı grupta incelenebilir. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilirler.

- Hidrojen kabarması
- Dekarbürizasyon (çelikten C elementinin uzaklaşması)
- Hidrojenden etkilenme
- Hidrojen kırılması

Hidrojen atomlarının metal içerisine girmesi ve metal içerisindeki boşluklarda birleşmesi sonucunda malzeme yüzeyinde kabarcıklar oluşur. Bu kabarcıklar basınç etkisiyle yüzeyde parçalanmalar meydana gelir. Çelikten karbonun uzaklaşması ise yüksek sıcaklıklarda nemli hidrojen tesiriyle çeliğin çekme dayancını azaltır. Bunlarla birlikte hidrojen hasarlarından en sık karşılaşılan hidrojen gevremesi ile kırılmadır. Hidrojen atomlarının birleşerek $H+H=H_2$ olarak molekül oluştururlar. Boşluklarda biriken bu moleküllerin metal yüzeyine doğru çıkarılarsa kabarma şeklindeki hata olarak tespit edilirler. Fakat basınç etkisiyle yüzeyde kabarma oluşmaz ise bölgesel çatlaklara neden olur. Hidrojen atomu farklı şekillerde malzemeye zarar verebilir. Uygun kurutma yapılmadan kullanılan elektrotla yapılan kaynakta ortaya çıkan hidrojen, korozyon sonucu ortaya çıkan hidrojen,

pikling sonucu ortaya çıkan hidrojen metal açısından sıkıntı yaratan durumlardır. Şekil 2.26'da metal içerisine hidrojen atomunun nüfuziyeti neticesinde hidrojen moleküllerinin oluşumu gösterilmiştir. Hidrojen hasarlarından korunmak için izlenmesi gereken noktalar aşağıda sıralanmıştır:



Şekil 2.26. Metal içerisine hidrojen atomunun nüfuziyeti [57]

- Metal 150°C civarına ısıtılarak nüfuz etmiş hidrojen atomları çıkarılabilir.
- Çelik içerisinde Ni ve Mo elementlerinin eklenmesi hidrojen kırılma dayanımını artırabilir.
- Nemli ve ıslak ortamda değil kuru ortamda kaynak işlemi yaparak ile hidrojen birikmesi engellenebilir.

2.6. Farklı Metallerin Kaynağı ile İlgili Yapılan Önceki Çalışmalar

Farklı metallerin kaynak edilmesi için iki ana neden, imalat maliyetlerini düşülmesi ve imalat tasarımının geliştirilmesi olarak sıralanabilir [63]. Farklı metallerin farklı fiziksel ve kimyasal özellikleri olması sebebiyle, birbirleriyle kaynak edilme işleminde bazı sorunların oluşacağı tahmin edilebilen bir gerçektir. Özellikle ergime noktalarındaki farklılıklar sebebiyle kaynak ark sıcaklığı öncelikle ergime sıcaklığı düşük olan malzemeyi ergitmektedir. Kaynak havuzunda homojen olmayan, belirsiz bir yapı oluşmaktadır. Aynı şekilde kaynak havuzunda önceden katılaşmanın da meydana gelmesi neticesinde uygun birleşme elde edilmemiş olur.

İmalat sektöründeki gelişmeler değerlendirildiğinde, son yıllarda farklı metallerin birbirleriyle kaynağı konusundaki çalışmalar hız kazanmıştır. Özellikle enerji, kimya ve petrokimya endüstrisindeki

İhtiyaçlardan dolayı nikel esaslı alaşımların paslanmaz çelikler ile kaynağı üzerine yapılan çalışmalar çeşitlendirilmektedir. Farklı metallerin kaynağı lazer, elektron ışın, sürtünme karıştırma vb. gibi modern kaynak yöntemleri ile yapılırsa da; yatırım maliyetinin düşük, işleme ve operasyon maliyetlerinin düşük olması sebebiyle, farklı metalleri birleştirmede en çok kullanılan kaynak yöntemi TIG kaynağıdır. TIG kaynak yöntemin bilinen en büyük dezavantajı birden fazla paso nedeniyle malzemelere fazla ısı girdisinin olmasıdır. Yüksek sıcaklıklarda nikel esaslı alaşımlar içinde bulunan niyobyum (Nb) ve molibden (Mo) elementlerinin çökmesi neticesinde Laves fazları oluşmaktadır. Laves ikincil fazları kaynağın hem ısı transfer atındaki bölge (ITAB) hem de kaynak bölgesinde oluşarak, malzemelerin kimyasal ve fiziksel özelliklerini değiştirerek, korozyon direncinin azalmasına neden olmaktadır [64]. Inconel 625 içindeki Nb ve Mo elementleri sebebiyle çökelti yığılması oluşumuna çok elverişlidir. Inconel 625 malzemesinin katılaşması 1368 °C’de başlar. Katılaşma süresinde 1250 °C’de NbC karbürleri ($LE \rightarrow \gamma + NbC$) ve 1150 °C’de kırılğan Laves fazları ($LE \rightarrow \gamma + \text{Laves phase}$) oluşmaktadır. Eğer malzeme yüksek silisyum (Si) ve düşük karbon (C) içeriğine de sahipse, farklı bir çökelti olarak M₆C karbürleri oluşmaktadır [65].

Tablo 2.5. Bazı nikel alaşımlarının katılaşma reaksiyonu sonucunda oluşan fazlar [54]

Alaşım	Katılaşma Reaksiyonu	Sıcaklık °C
B-2	$L \rightarrow L + \gamma + M_6C$	1277
W	$L \rightarrow L + \gamma + P$	1250
C-22	$L \rightarrow L + \gamma + \sigma$	1285
C-276	$L \rightarrow L + \gamma + P$	1285
242	$L \rightarrow L + \gamma + M_6C$	1260
625 (0,03 Si; 0,009 C)	$L \rightarrow L + \gamma + \text{Laves}$	1150
625 (0,03 Si; 0,009 C)	$L \rightarrow L + \gamma + NbC$	1246
625 (0,03 Si; 0,009 C)	$L \rightarrow L + \gamma + \text{Laves}$	1148
625 (0,03 Si; 0,009 C)	$L \rightarrow L + \gamma + \text{Laves}$	1158
HR-160	$L \rightarrow L + \gamma + (Ni, Co)_{16}(Ti, Cr)_6Si_7$	1162
C-4 Gd	$L \rightarrow L + \gamma + M_5Gd$	1258

Ramkumar, vd. çalışmalarında 4 mm kalınlığındaki Inconel 718 ile AISI 316L malzemeleri TIG kaynak yöntemi kullanarak birleştirmeyi denemişlerdir. Uygun penetrasyon için penetrasyon derinliği/penetrasyon genişliği oran verisini kullanmışlardır [66]. Çalışma kapsamında önce malzemeleri aynı malzemeler olacak şekilde (Inconel 718 + Inconel 718 ve AISI 316L + AISI 316L), ardından birbirleriyle (Inconel 718 + AISI 316L) kaynatmışlardır. Deney sonuçlarında çoklu paso kaynak işleminde tam penetrasyon sağlamışlardır. Numunelerin mikro yapı özelliklerini Taramalı Elektron Mikroskopi - Scanning Electron Microscope (SEM) – yardımıyla, mekanik özellikler için de bir dizi test ile incelemişlerdir. Deneyler sonucunda farklı metallerin kaynak sertliğinin, her iki aynı metal kaynak sertliğinden fazla olduğunu tespit etmişlerdir. Bu durumu kaynak esnasında ITAB’da

oluşan Cr ve Ni çökeltilerinin sebep olduğu kanaatine varmışlardır. Bununla birlikte parametrelerin malzemenin korozyon direncine olan etkilerini incelemişlerdir. Çalışma kapsamında yapılan korozyon testlerinde de en fazla kütle kaybı farklı metallerin kaynak testinde meydana gelmiştir. En az malzeme kaybı ise AISI 316 L malzemenin aynı malzeme ile kaynatılması deneyinde gerçekleşmiştir. Bu sonuçlara göre farklı malzemelerin birbirleri ile kaynatılması sonucunda oluşan ikincil fazların korozyon direncini azalttığı sonucuna varılmaktadır.

Farklı metallerin kaynağında dikkat edilmesi gereken parametreler, aynı metal kaynağına göre daha fazla önem arz etmektedir. Farklı metal kaynağında en çok dikkat edilmesi gereken husus uygun dolgu metalinin seçilmesidir. Seçilecek olan kaynak metalinin her iki metalin mümkün olduğunca farklı ortak özelliklerini sağlaması gereklidir. Farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip iki metale bir de kaynak dolgu metalinin eklenmesi ile kaynak havuzunda üç farklı ergimiş metalin bulunacağı göz önüne alınmalıdır. Prabu, vd. 5 mm kalınlığındaki Inconel 625 ve AISI 904L malzemeleri sürekli akım TIG kaynak yöntemiyle birleştirdikleri çalışmalarında, dolgu metali olarak ErNiCrMo-4 ve ERNiCrCoMo-1 malzemelerini kullanmışlardır [67]. Araştırmacılar yaptıkları deneylerde her iki dolgu metali de boşluksuz, gözeneksiz, çatlaksız ve tam penetrasyonlu kaynak parçaları elde etmişlerdir. ERNiCrCoMo-1 dolgu metali ile yapılan kaynaktaki çökeltilerin, ErNiCrMo-4 dolgu metali ile yapılan kaynağa göre daha geniş ve görünür olduğunu tespit etmişlerdir. Bu duruma ERNiCrCoMo-1 dolgu metali kimyasal yapısında bulunan C elementinin sebep olduğunu belirlemişlerdir. Bununla birlikte Ni esaslı dolgu metalleri ile AISI 904 L malzemesinin kimyasal özellikleri farklı olduğu için; AISI 904L tarafında kalan karışmamış bölgenin, Inconel 625 tarafına göre daha geniş olduğunu tespit etmişlerdir.

Naffakh vd. 12 mm kalınlığındaki Inconel 657 ile AISI 310 malzemenin manuel TIG kaynak yöntemiyle birleştirilmesinde dört farklı dolgu metali olarak Inconel 82, Inconel A, Inconel 617 ve TIG 310 malzemelerini kullanmışlardır [68]. Kaynak işlemleri sonucunda numuneler, gerilim giderme amaçlı 1000°C’de 100 saat boyunca ısı işleme maruz bırakılmışlardır. Çalışmalar neticesinde Inconel 617 dolgu metali Mo içeriği sebebiyle kırılğan fazların oluşumuna yol açmıştır. TIG 310 dolgu metali ile yapılan kaynakta ise mikro yapıda sürekli çökeltiler gözlemlenmiştir. Inconel 82 dolgu metali ise kaynakta NbC karbürlerinin oluşumuna sebep olurken Inconel A dolgu metalinde böyle bir durum tespit edilmemiştir. Inconel 657 tarafındaki karışmamış bölgeyi azaltmak için kaynak sonrası ısı işlem uygulaması yapılmış ve belirli oranda netice alınmıştır. Inconel 82 ve Inconel A metalleri için ısı işlem öncesi ve sonrası arasındaki mikro yapısal özellikler arasında farklılıklar gözlenmemiştir. Bu durum bu iki metal ile yapılan kaynakların yüksek sıcaklıklarda iyi bir ısı kararlılık gösterdiğinin kanıtıdır. Fakat bu durum Inconel 617 ve AISI 310 ile yapılan kaynaklar aynı kararlılığı gösterememişlerdir.

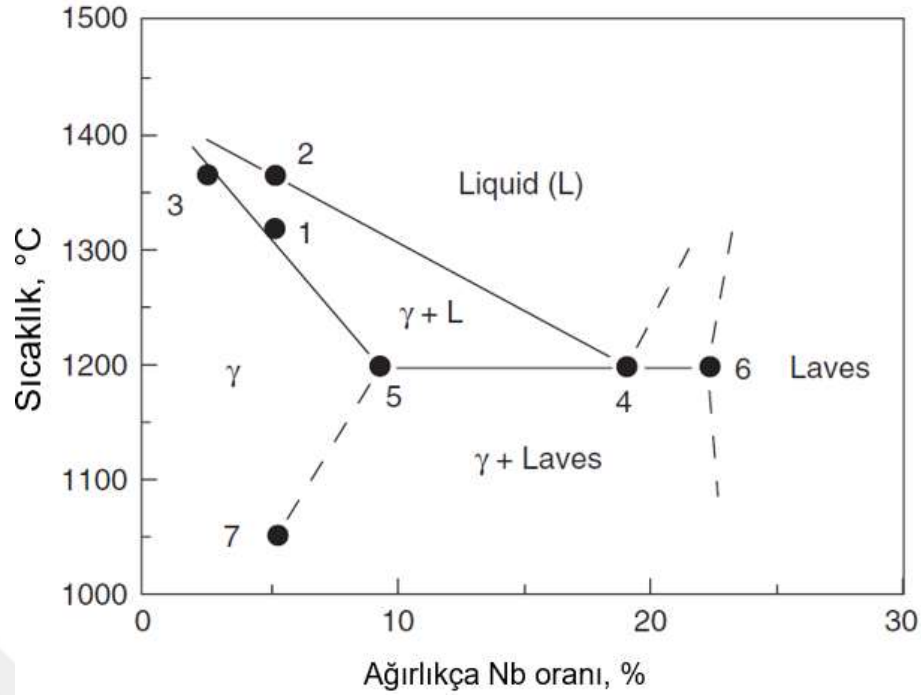
Mortezaie ve Shamanian ise 10 mm kalınlığındaki Inconel 718 ve AISI 310 malzemelerin manuel TIG kaynak yöntemiyle birleştirilmesinde, mikro yapı, mekanik özellikler ve korozyon dayanımını inceleyen bir çalışma yapmışlardır [1]. Inconel 625, Inconel 82 ve TIG 310 dolgu metallerini kullanmışlardır. Ni ve Mo elementlerinin tekrar dağılımı katılaşma esnasında, Inconel 625 kısmında kolonlu dentritik ve eş eksenli mikro yapı oluşumuna sebep olmuştur. Çekme testi sonuçlarına

göre her üç metal ile yapılan sonuçlarda uygun sonuçlar elde edilmiştir. Darbe testinde de Inconel 82 en yüksek direnci gösterirken TIG 310 en düşük direnci gösterilmiştir. Araştırmacılar TIG 310 kaynak telini Inconel 718 ve AISI 310 malzemelerinin birbirleri ile kaynağı için önermemektedir. Çalışma sonucunda Inconel 82 dolgu metali ile yapılan kaynağın korozyon direncinin en yüksek ve mekanik özelliklerinin en iyi olduğu sonuçlarına ulaşmışlardır.

Ramkumar, vd. Inconel 718 ve AISI 316L malzemelerinin kaynağında kaynak telinin ve kaynak çeşidinin malzemelerin yapısal etkileri olan etkilerini incelenmişlerdir [69]. 5 mm kalınlığındaki ana metalleri kullanarak yapmış oldukları çalışmalarında, ER2553 ve ERNiCu-7 olmak üzere iki farklı dolgu metali kullanmışlardır. Bununla birlikte kaynak yöntemi olarak da sürekli akım TIG ve darbeli akım TIG kaynak yöntemlerini kullanmışlardır. TIG kaynak yöntemi neticesinde, içeriğindeki yüksek Nb ve Mo elementleri sebebiyle Inconel 718 metali ITAB'ında ikincil fazların oluşumu beklendiği gibi gerçekleşmiştir. Çekme testleri sonuçlarında bütün kopmalar AISI 316 L tarafında oluşmuştur. ERNiCu-7 dolgu metali yapılan sürekli ve darbeli akım kaynaklarında en iyi çekme dayanımı sonuçları elde edilmiştir. Sonuç olarak darbeli akım ile çökelti oluşumunun engellenmesinde nispeten başarı sağlamışlardır. Nb elementi içermeyen ERNiCu-7 dolgu metali ile de NbC karbürlerinin oluşumunun önüne geçmiş ve mekanik özelliklerin de iyileştirmesini sağlamıştır. Çalışmanın ana fikirlerinden birisi olan Nb içermeyen dolgu metali kullanarak, Nb elementinin çökelti oluşumuna etkilerini incelemektedir. Neticeye göre Nb içermeyen dolgu metali çökelti oluşumunu engellemiştir.

Şekil 2.27.'de Inconel 718 alaşımının bir dizi deneyler ile yapılmış katılaşma eğrisi verilmiştir [54]. 1. ve 2. noktalar sırasıyla nominal katı haldeki ve sıvı haldeki sıcaklıkları göstermektedir. 3. nokta sıvı ve katı arasındaki bir sıcaklığı göstermektedir. 5. ve 6. Noktalar sırasıyla γ ve Laves bileşiklerinin oluşum noktalarını temsil etmektedir. 7. nokta ise alaşım içerisinde Nb elementinin çözünürlük limitini göstermektedir. Şekilde Nb elementinin gerek C elementi le birleşerek NbC karbürlerinin oluşturması, gerek Laves fazlarının oluşumu gösterilmektedir.

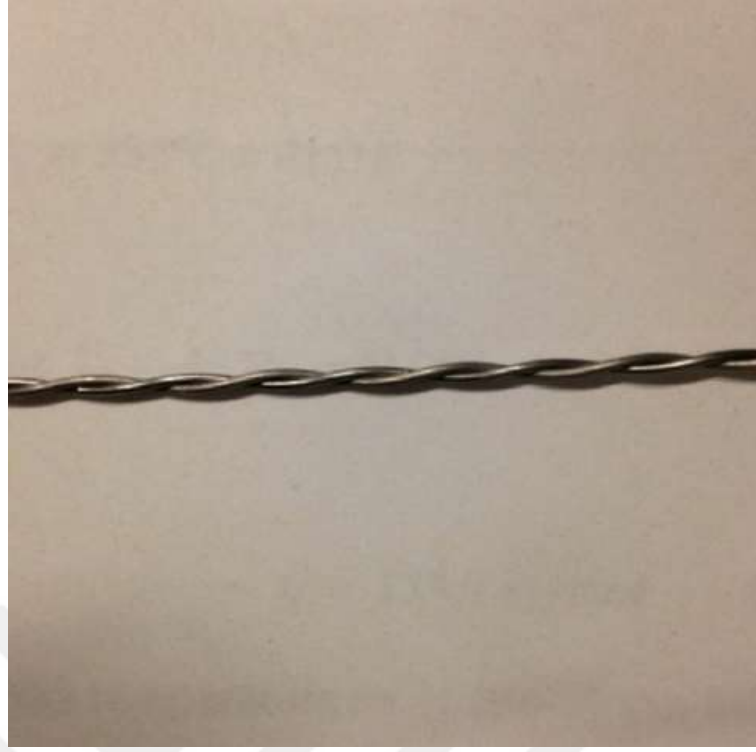
Hejripour ve Aidun, çalışmalarında 6,25 mm kalınlığındaki Inconel 718 ve AISI 410 malzemelerinin manuel TIG kaynak yöntemiyle birleştirilmesi üzerine deneyler yapmışlardır [70]. Şekil 2.28.'de gösterildiği gibi 718-410 ve 82-410 metallerin kombinasyonu olarak dolgu metali seçimi yapmışlardır. Mikro yapı incelemelerinde kaynak neticesinde oluşan ikincil fazlar karışmamış ergimiş bölge olarak Inconel 718 metalinin ITAB'ında ve AISI 410 metalinin interfaz bölgesinde tespit edilmiştir. İkincil fazların ve karışmamış ergimiş bölgelerin çekme testini olumsuz etkilediğini tespit edilmemiştir. Bununla birlikte yapılan eğme testlerinde ikincil fazların kaynak sünekliği üzerine olumsuz etkileri olduğu kanıtlanmıştır. Kaynak tellerini birleştirmelerindeki amaç her iki ana metale en yakın özellikteki dolgu metalini belirleyebilmektedir. 718-410 çifti ile yapılan kaynakta Nb elementinin varlığından dolayı ikincil fazların oluşumu meydana gelmiştir. Mikro yapı incelemeleri ve mekanik testler sonucuna 82-410 çifti ile yapılan kaynakların daha iyi mekanik özelliklerin oluşumu tespit edilmiştir.



Şekil 2.27. Inconel 718 alaşımı katılaşma eğrisi [65]

Kumar, vd. 5 mm kalınlığındaki Inconel 625 ile AISI 316L malzemelerin birbirleriyle kaynağı konusunda yapmış oldukları çalışmalarında ERNiCr-3 ve ER2209 dolgu tellerini kullanmışlardır [71]. Kaynak çeşidi olarak sürekli akım ve darbeli akım TIG kaynak metodunu kullanmışlar ve deney parçalarını mekanik ve mikro yapı özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan deneylerde her iki dolgu metali için de uygun kaynak parçaları elde ettiklerini belirtmişlerdir. Bütün çekme testlerinde kırılma bölgesinin AISI 316L malzemesinin ana metal bölümünde oluştuğu tespit edilmiştir. Çentik darbe deneyi sonuçlarına göre en iyi sonuç sürekli akım TIG kaynak yönteminde elde edilmiştir. Mikro yapı incelemelerinde ise ERNiCr-3 dolgu metali ile yapılan deneylerde Inconel 625 ITAB'da ikincil fazların oluştuğu tespit edilmiştir. Fakat darbeli akım kaynak yöntemi sayesinde bu ikincil fazların azaldığı gözlenmiştir. Kaynak bölgelerinde ise tanecik sınır göçleri tespit edilmiş fakat bunların kırılma sebep olmadığı kanaati getirilmiştir. Çalışma sonucuna göre darbeli akım TIG kaynak yöntemiyle ve ERNiCr-3 dolgu metali ile yapılan kaynakların mikro yapısal ve mekanik olarak en uygun sonuçları gösterdiği tespit edilmiştir.

Kourdani ve Haghghi de çalışmalarında yine Inconel 625 ve AISI 316L malzemelerinin farklı kaynak yöntemleri vasıtasıyla birbirleri ile kaynağını incelemişlerdir [72]. Metal Inert Gas (MIG) ve TIG kaynak yöntemlerini kullandıkları deneylerde ERNiCrMo-3 ve ERSS316L dolgu metallerini kullanmışlardır. Bununla birlikte bir başka birleştirici eleman olarak ENiCrMo-3 elektrodunu kullanmışlardır. Kaynak malzemesi olarak 6,02 mm kalınlığındaki boruları kullanmışlardır. ERNiCrMo-3 dolgu metalinin kullandığı her iki kaynak yönteminde de katılaşma esnasında Nb ve Mo elementleri dallantı yapıdan ayrılarak dallantılar arası yapıya geçmişlerdir.



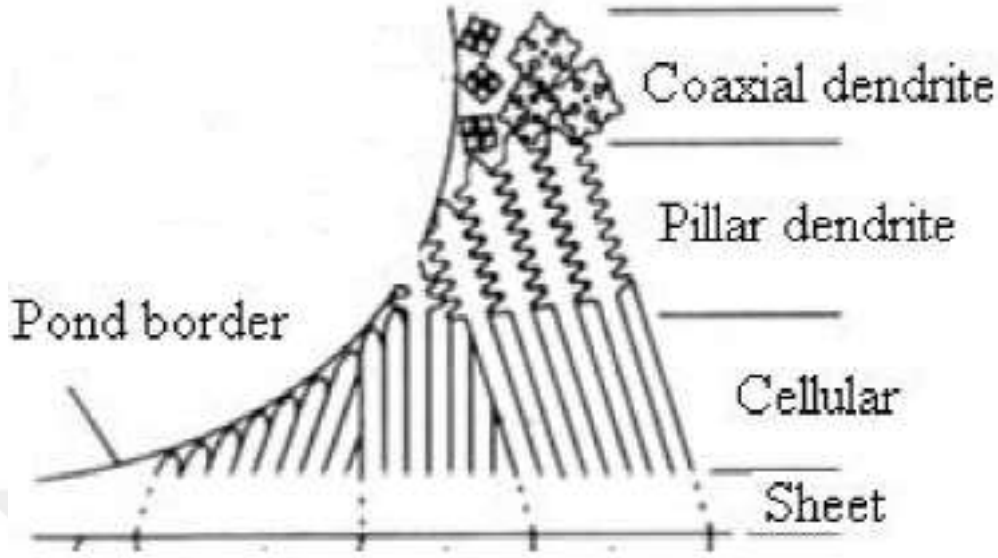
Şekil 2.28. Birleştirilmiş kaynak dolgu metali örneği [65]

Nb çökeltilerinin azalan soğuma oranı ile artmakta olduğu ve artan Nb çökeltilerinin darbe enerjisini azalttığı tespit edilmiştir. MIG kaynak yöntemiyle yapılan hem dolgu metalleri hem de elektrod kaynaklarının çekme testleri TIG kaynak yöntemi ile yapılan deneylere göre düşüktür. ERNiCrMo-3 dolgu metali ve TIG kaynak yöntemiyle yapılan kaynağın mikro yapı ve mekanik özelliklerinin en iyi sonucu verdiği tespit edilmiştir.

Zadeh, vd. Inconel 625 ve AISI 316L malzemelerin birbirleri ile kaynağı sürecinde ısıl girdinin mikro yapı üzerindeki etkileri incelemişlerdir [73]. 4,2 mm kalınlığındaki parçaların kaynağını TIG kaynak yöntemi kullanarak Inconel 625, Inconel 82 ve 309L dolgu tellerini ergiterek gerçekleştirmişlerdir. Bu kapsamda 1,5 kJ/mm, 1,9 kJ/mm ve 2,3 kJ/mm olmak üzere 3 farklı ısı girdisi uygulamışlardır. Şekil 2.29.'da mikro yapı incelemelerinde ortaya çıkan yapılar verilmiştir. Buna göre optimum ısı girdisi en düşük değer olan 1,5 kJ/mm olarak belirlenmiştir. Cellular yapılar 309L dolgu metalinin kullanıldığı kaynaklarda ortaya çıkmıştır. Inconel 82 ile yapılan kaynakların mikro yapılarında coaxial dentrit yapılarına görülmüştür.

Jeng, vd. nikel esaslı alaşım Alloy 690 ve AISI 304L paslanmaz çelik malzemelerin birbirleriyle kaynağı konusunda yapmış oldukları çalışmada TIG kaynak yöntemi ve Inconel 52 ile Inconel 82 olmak üzere iki farklı kaynak dolgu metali kullanmışlardır [74]. Mikro yapı incelemeleri kaynak bölgesinin tam ortasından kesilen parçalardan yapılmıştır. Inconel 52 ile yapılan kaynak bölgesinde ikincil faz olarak TiN, Inconel 82 ile yapılan kaynakların kaynak bölgesinde is Ti ve Nb açısından zengin ikincil fazların oluştuğu tespit edilmiştir. Kök pasolarda Inconel 52 yapılan kaynaklarda ciddi Cr karbürleri tespit edilirken, Inconel 82 ile yapılan kaynaklarda az miktarda Cr

karbürlerine rastlanmıştır. Sonuç olarak Inconel 52 ile yapılan kaynaklarda daha fazla çökelti, tanecik göçü tespit edilmiştir.



Şekil 2.29. Mikro yapı incelemesinde tespit edilen bazı yapılar [73]

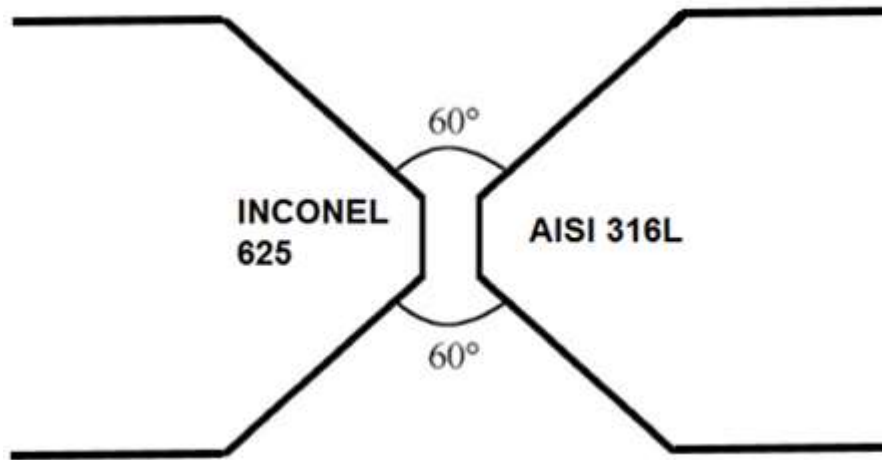
Ahmad, vd. Alloy 617 ve 12Cr malzemelerinin birbirleriyle kaynağının mekanik ve mikro yapı özelliklerini incelemiştir [75]. Dolgu metali olarak Thyssen 617 kaynak metodu olarak sürekli akım TIG kaynağını seçmişlerdir. Çekme testlerinde kırılma 12Cr malzemesini ana metali tarafında oluşmuştur. Sertlik testinde 12Cr malzemesinin ITAB'ının kaynak bölgesi ve Alloy 617 ana metali tarafına göre daha sert olduğu gözlemlenmiştir. Çok pasolu kaynaklar neticesinde malzemelerin mikro yapılarının ana metale göre değiştiği belirtilmiştir. Alloy 617 ana metali ve ITAB'ı östenitik tanecik yapıları gösterirken, 12Cr malzemesinin ana metali ve ITAB'ı martenitik yapı göstermiştir.

Yapılan çalışmalardan da anlaşıldığı üzere TIG kaynak işleminde kaynak kalitesine etki eden faktörler; kaynak hızı, koruyucu gaz cinsi ve akış hızı, dolgu teli, dolgu teli kalınlığı, kaynak akımı, akım cinsi, kaynak pozisyonları vb. olarak sıralanabilir. Bu etkenlerin kaynağa olan etkileri belirlenirse kaliteli kaynak birleştirilmesi yapmak mümkün olabilmektedir. Bu sebeple kaynak üzerine yapılan çalışmalar, bu etkenlerin deneysel olarak değiştirilerek optimum kaynak parametrelerinin belirlenmesi üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu faktörler için en uygun değer kaynak edilecek malzemelerin özellikleri göz önüne alınarak belirlenmelidir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

Çalışma kapsamında kaynakları yapılacak olan nikel esaslı süper alaşım Inconel 625 ve östenitik AISI 316L malzemelerinin ayrıca dolgu metali olarak kullanılan ERNiCr-3 ve TIG 316L dolgu tellerinin kimyasal özellikleri Tablo 3.1.'de verilmiştir. Inconel 625 malzemesi Specials Metals firmasından 20 mm x 1000 mm x 2000 mm ölçülerinde temin edilmiştir. AISI 316L malzemesi de Outokumpu firmasından 20 mm x 1000 mm x 2000 mm ölçülerinde temin edilerek deney ölçülerinde küçültülmüştür. Bununla birlikte ErNiCr-3 dolgu metali Special Metals firmasından tel olarak, TIG 316L dolgu metali de Askaynak firmasından tel olarak satın alınmıştır. Deneylerde kullanılan bütün ana metallerin kalınlıkları 20 mm olarak seçilmiştir. ERNiCr-3 ve TIG 316L dolgu tellerinin çap kalınlıkları ise 3,2 mm olarak belirlenmiştir. Bu iki dolgu metaline ek olarak he iki metalin burğu haline getirilerek kullanıldığı 3. Dolgu teli imalatı yapılmıştır. Deneylerde kullanılacak malzemeler 20 mm x 200 mm x 400 mm ölçülerinde testere ile kesilmiştir. Şekil 3.1.'de görüldüğü gibi kaynak öncesi bütün numunelerde standart "Çift V" kaynak ağızı, 1 mm kök, 2 mm açıklık ve 60° açı verilerek hazırlanmıştır.



Şekil 3.1. Standart "Çift V" kaynak ağızı uygulaması

Kaynak yöntemi olarak TIG kaynak yöntemi belirlenmiştir. Bununla birlikte TIG kaynak yönteminde önemli bir parametre olan akım tipi değişken olarak belirlenmiştir. Bunun neticesinde Sürekli Akım Tungsten Inert Gas Kaynağı (SA/TIG) ve Darbeli Akım Tungsten Inert Gas (DA/TIG) olmak üzere iki kaynak çeşidi ile çalışılmıştır.

Kaynakları Fronius marka Magicwave Synergic 2200 model makine vasıtasıyla yapılmıştır. Şekil 3.2.'de görüldüğü gibi söz konusu kaynak makinası kullanılarak kaynak hızının kontrolü için yarı otomatik bir düzenek kurulmuştur. Kaynak torcunun bağlandığı parça otomasyon sistemi ile 3 eksen de hareket edebilmektedir. "Z" eksen hareketi ile torç kaynak yapılacak olan parçaların üzerine ark

mesafesine kadar yaklaştırılabilmektedir. Kaynak başlangıcında torç mesafesi ayarlandıktan sonra “Z” eksenine hareketine kaynak dikişi süresi boyunca ihtiyaç duyulmayacağı için bu hareket sabitlenmektedir. Kaynak dikişi esnasında gerekli olan “X” ve “Y” eksenine hareketi için manyetik sensörden faydalanılmıştır. Torç “X” eksenine boyunca kaynak dikişi esnasında gerekli olan havuzu homojen olarak dağıtma hareketini “Y” eksenine boyunca bahsi geçen manyetik sensörler sağlamıştır. “X” eksenine boyunca ilerleme hızını sağlayan motorlu redüktöre hız kontrol (frenkans değiştirici) cihazı bağlanmıştır. Bu sayede deney kapsamında gerekli olan kaynak hızı otomatik olarak ayarlanabilmektedir. Bununla birlikte yapılan ön çalışmalarda kaynakta kullanılacak dolgu tellerinin beslenmesi için en uygun sonuçlar elle besleme vasıtasıyla olmuştur. Ayrıca 3. dolgu metali olarak belirlenen burğu tel için otomatik besleme sistemine uygun olmaması bütün deneylerin elle besleme ile yapılması zorunluluğunu ortaya çıkarmıştır. Kaynak süreci esnasında koruyucu gaz olarak yüksek saflıkta (% 99,9) argon gazı debisi 15 litre/dakika olacak şekilde belirlenmiştir.

Tablo 3.1. Ana metal ve dolgu metallerinin kimyasal özellikleri

Malzeme	C	Cr	Si	Ni	P	Mn	Nb + Ta	Mo	Fe	Diğer
Inconel 625	0.04	22.12	0.15	Rem.	0.012	0.09	3.38	8.32	4.48	Cu—0.05 Al—0.11 Ti—0.21 Co—0.3
AISI 316L	0.02	17.25	0.04	10.38	0.039	1.78	-	2.15	Rem.	S—0.004
ERNiCr-3	0.04	20.0	0.09	73.00	0.003	2.8	2.4	-	1.5	Ti—0.40 S—0.002 Cu—0.03 Other < 0.5
TIG316L	0.02	18	0.45	12	0.04	1.70	-	2.3	Rem.	Cu—0.75 S—0.03

Korozyon testleri için % 98 (H₂SO₄) derişimdeki sülfürik asit kullanılmıştır. Sülfürik asit yoğunluğu 1,84 gr/ml ve pH değeri 0,3'tür. Sülfürik asitin kaynama noktası 310 °C'dir. Korozyon testi için sülfürik asit havuzu hazırlanmıştır. AISI 316L malzemedan 200 mm derinliğinde ve 300 mm x 400 mm ölçülerinde hazırlanan havuz alttan ısıtmak için ısı kaynağı kullanılmıştır.

Kaynak malzemelerinin makro ve mikro yapıları incelemek için % 10'luk oksalik asit çözeltisinde 6 DC akım ile 20 saniye boyunca dağlama yapılmıştır. Mikro yapı incelemelerinde Carl Zeiss marka ve Axio Imager M2M model optik mikroskop (OM) ile Carl Zeiss marka Evo MA10 model Taramalı Elektron Mikroskopu-Scanning Electron Microscope (SEM) kullanılmıştır. SEM Enerji Dağınımlı X-Işınları Görüngeölçeri-Energy Dispersive X-Ray Spectrometer (EDAX) ile donanımlı

olup haritalama ve element analizleri bu cihaz ile yapılmıştır. Cihaz markası Ametek ve ApolloX modeldir.



Şekil 3.2. Yarı otomatik kaynak düzeneği

Mekanik test olarak numuneler çekme ve mikro sertlik deneylerine tabi tutulmuşlardır. Çekme testinde kullanılan test cihazı Baz Makina marka 20-60t modeldir. Mikro sertlik testi ise Mitutoyo marka HM 112 model cihazda yapılmıştır.

3.2. Yöntem

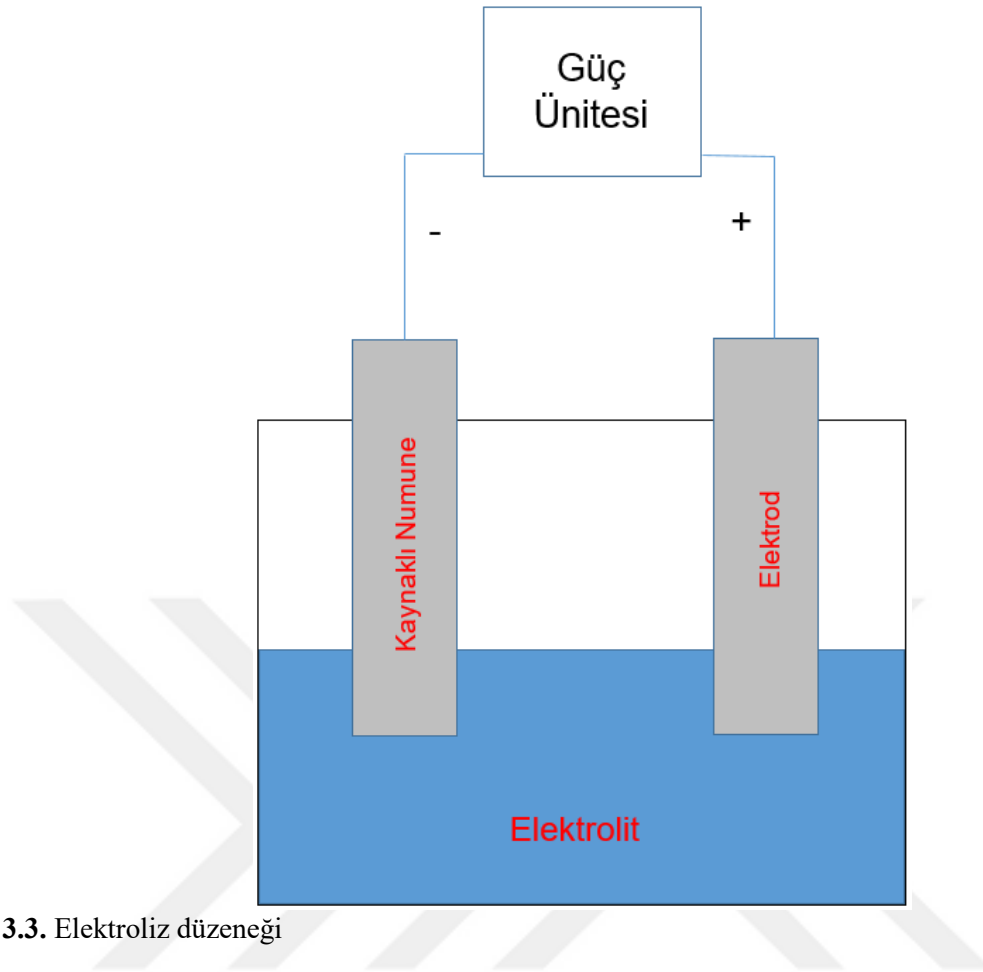
Kaynaklı deneylere başlamadan önce ön çalışmalar yapılmıştır. Ön çalışmalarda akım, voltaj ve kaynak hızı değerlerinin malzeme üzerindeki etkileri gözle muayene edilmiştir. Bununla Çalışma neticesinde en uygun akım, voltaj ve kaynak hızı değerleri belirlenerek kaynak parametreleri belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan kaynak parametrelerinin detayları Tablo 3.2.'de belirtilmiştir. Belirlenen parametrelere göre kaynak işlemlerine başlanmıştır. Bu kapsamda parçalar deney standına alınmıştır. “Çift V” kaynak ağzı için gerekli olan kaynak boşluğu ayarlanarak ilk sıra kök pasosu kaynatılmıştır. Kök pasosunun ardından bir sıra dolgu pasosu kaynağı yapılmıştır. Bunun ardından son sıra pasosu kapak pasosu olarak kaynatılmış ve böylece deney numunesinin bir yüzeyindeki kaynak işlemi tamamlanmıştır. Bunun ardından kaynak parçası ters yüzeyi çevrilerek, diğer yüzeydeki işlemlerin aynısı olacak şekilde; kök pasosu, dolgu pasosu ve kapak pasosu kaynağı tamamlanmıştır. Bu işlemin ardından ilgili numune için gerekli tüm kaynak işlemleri tamamlanmıştır.

Tablo 3.2. Deneysel parametreler

Kaynak	Dolgu Metali	Paso	Akım (A)		Voltaj (V)	Döngü	Frekans (Hz)	Kaynak Hızı (mm/s)
			Üst	Alt				
SA/TIG	ERNiCr3	Kök1	110	-	14	-	-	0.56
		Paso1	110	-	17	-	-	0.71
		Kapak1	110	-	18	-	-	0.95
		Kök2	110	-	15	-	-	0.65
		Paso2	110	-	17	-	-	0.82
		Kapak2	110	-	20	-	-	1.09
	TIG 316L	Kök1	110	-	15	-	-	0.62
		Paso1	110	-	17	-	-	0.79
		Kapak1	110	-	19	-	-	1.02
		Kök2	110	-	13	-	-	0.78
		Paso2	110	-	16	-	-	0.92
		Kapak2	110	-	18	-	-	1.18
	BURGU	Kök1	120	-	16	-	-	0.81
		Paso1	120	-	19	-	-	1.02
		Kapak1	120	-	20	-	-	1.15
		Kök2	120	-	14	-	-	0.95
		Paso2	120	-	16	-	-	1.13
		Kapak2	120	-	18	-	-	1.29
DA/TIG	ERNiCr3	Kök1	170	100	12	50%	6	0.56
		Paso1	170	100	15	50%	6	0.71
		Kapak1	170	100	16	50%	6	0.95
		Kök2	160	90	13	50%	6	0.65
		Paso2	150	85	14	50%	6	0.82
		Kapak2	150	85	16	50%	6	1.09
	TIG 316L	Kök1	170	100	11	50%	6	0.62
		Paso1	170	100	15	50%	6	0.79
		Kapak1	170	100	17	50%	6	1.02
		Kök2	160	90	10	50%	6	0.78
		Paso2	150	85	14	50%	6	0.92
		Kapak2	140	80	16	50%	6	1.18
	BURGU	Kök1	180	110	13	50%	6	0.81
		Paso1	170	100	15	50%	6	1.02
		Kapak1	170	100	17	50%	6	1.15
		Kök2	170	100	12	50%	6	0.95
		Paso2	160	90	14	50%	6	1.13
		Kapak2	150	85	15	50%	6	1.29

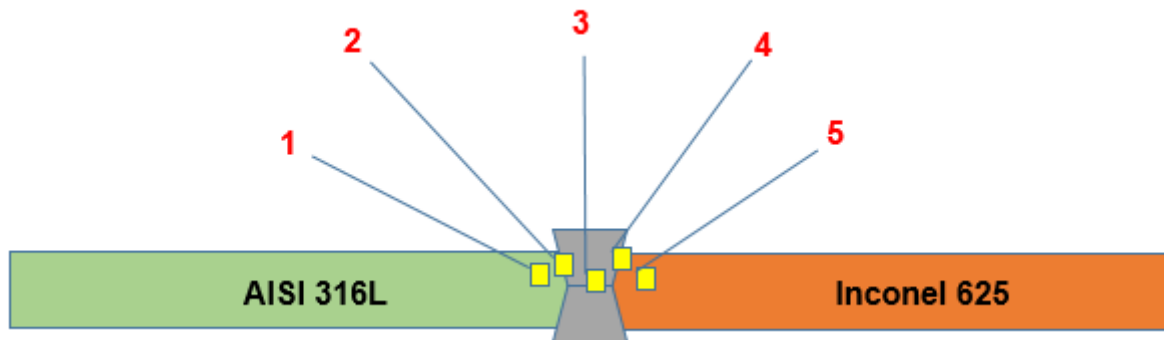
Söz konusu süreç diğer parçalar için de gerçekleştirildikten sonra çalışmanın kaynak işlemi tamamlanmış ve inceleme bölümüne geçilmiştir.

Çalışma sonucu elde edilen numuneler mikro yapı, çekme testi, mikro sertlik testi ve korozyon testi için parçalara ayrılmıştır. Her bir parça 150'den 1000' kadar olan ölçülerde silisyum karbür zımparalar ile zımparalanmıştır. Ardından son olarak 2 μ 'luk cila harcı ile parlatılmıştır. % 10 derişimde hazırlanan oksalik asit deneysel düzeneği Şekil 3.3'te verilmiştir. Kaynak bölgesinin görüntülenmesi amacıyla 6DC akım ile 30 saniye süreli dağlama işlemi yapılmıştır.



Şekil 3.3. Elektroliz düzeneği

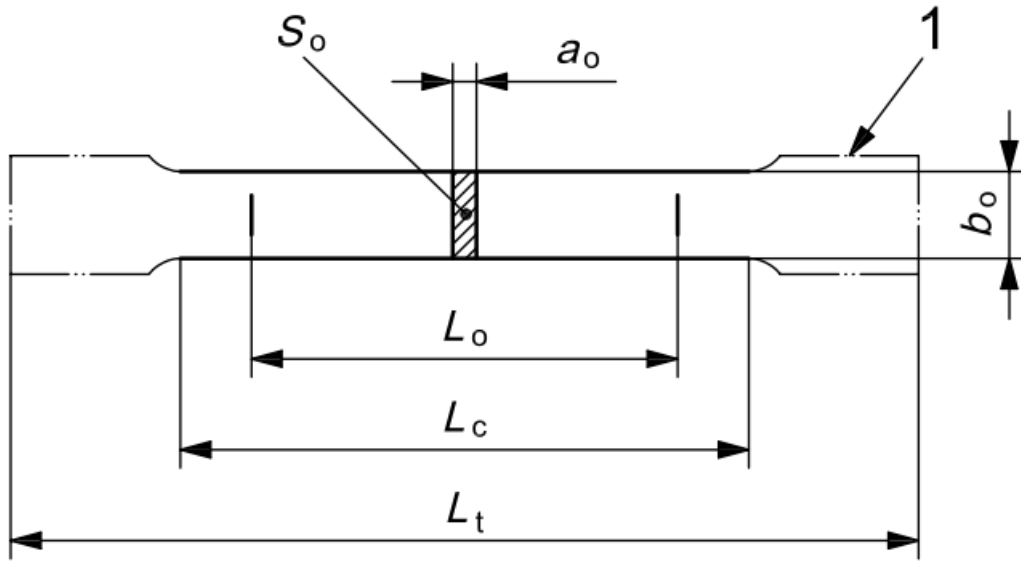
Mikro yapı incelemeleri detayları 3.1. bölümde verilen OM ve SEM/EDAX cihazları vasıtasıyla yapılmıştır. İnceme yapılacak olan noktalar Şekil 3.4.'te belirtilmiştir. Buna göre 1 numaralı nokta AISI 316L malzemesinin ana metalidir. 2 numaralı nokta AISI 316L ile kaynak bölgesinin kesiştiği yerdir. Bu bölgede, kaynak bölgesi ve AISI 316L malzemesinin ITAB'nı aynı anda görüntülenmiştir. 3 numaralı parça kaynak bölgesidir. 4 numaralı parça Inconel 625 malzemesi ile kaynak bölgesinin kesiştiği yerdir. Bu bölgede Inconel 625 malzemenin ITAB'ı ile kaynak bölgesi aynı anda görüntülenmiştir. 5 numaralı parça Inconel 625 malzemesinin ana metalidir.



Şekil 3.4. Mikro yapı inceleme noktaları

Mikro yapı incelemeleri kapsamında her numune için toplam beş bölgenin de optik yapıları OM ile görüntülenmiştir. Ardından bu bölgeler için SEM/EDAX analiz yapılmıştır. SEM/EDAX noktasal analizi kapsamında numuneler üzerinde belirlenen ikincil faz görsellerinden ikişer adet nokta element analizine tabii tutulmuştur. Bununla birlikte aynı bölgede daha kararlı olarak görülen bölgeden de bir kesit alınarak element analizi yapılmıştır. Bu deneyin ardından kaynak işlemi neticesinde gerçekleşen element göçünü özetlemek amacıyla çizgisel haritalama analizi yapılarak mikro yapı incelemeleri tamamlanmıştır.

Numunelere uygulanacak mekanik kontrol yöntemi olarak çekme testi ve mikro sertlik testleri belirlenmiştir. TS EN ISO 6892-1 standardına göre çekme testleri numuneleri Şekil 3.5.'te belirtildiği şekilde hazırlanmıştır. Deney ölçüleri ise Tablo 3.3.'te verilmiştir. Hazırlanan çekme testi numuneleri çekme deneyi tezgâhına bağlanarak ilgili standart uyarınca test edilmiştir. Test belirlenen akma ve çekme kuvvetleri ile uzamalar değerlendirilmiştir. Şekil 3.6'da çekme deneyi düzeneği verilmiştir. Çekme testine tabi tutmak istediğimiz numuneyi, tezgâhın sabit ve hareketli çene kısmına yerleştirilip sıkıştırılır.



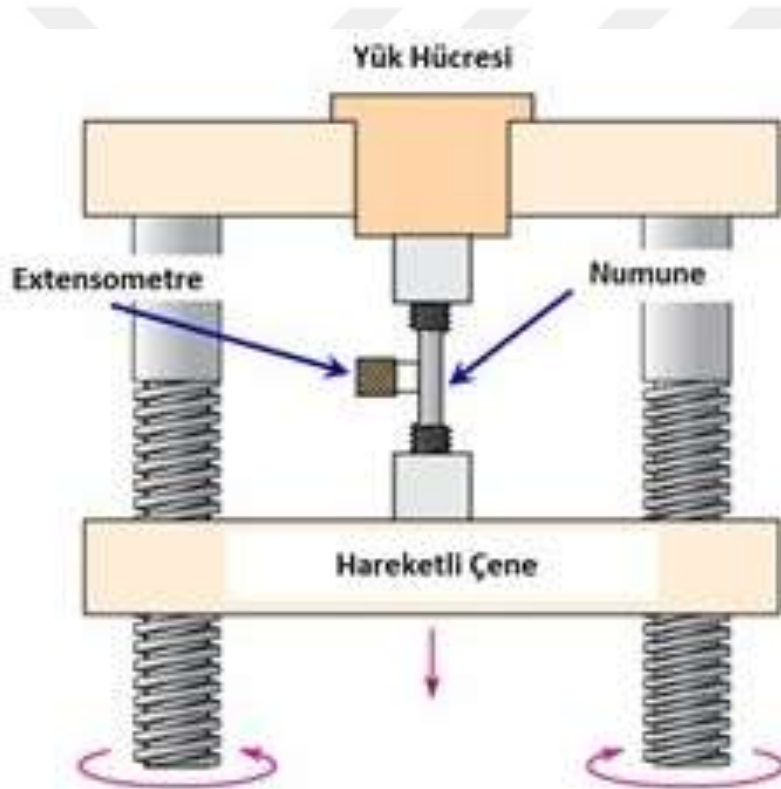
Şekil 3.5. TS EN ISO 6892-1 standardına göre çekme testi numune ölçüleri [76]

Çoğunlukla bilgisayar destekli olan bu sistem sayesinde uygulanan kuvvet ile uzama miktarı bir grafik ile belirlenmektedir. Malzemeyi çekerken, atomlar arasındaki bağlar esner ve malzeme uzar. Eğrinin elastik kısmı düz bir çizgidir. Yükün etkisi geçtiğinde malzemenin ilk şekline geri döner. Elastik bölgeden sonra yük devam ederse plastik bölgeye geçilir. Bu bölgede malzeme yükün kaldırılması durumunda dahi eski haline geri dönemeyiz. Plastik bölgedeki yükün etkisinin devam etmesi durumunda malzemeyi kopma noktasına kadar götürmektedir. Kopma noktasında kopmanın şekline göre yorum yapılabilir. Bununla birlikte kopma şekline göre malzemenin tokluğu hakkında bilgi elde edilebilir [77].

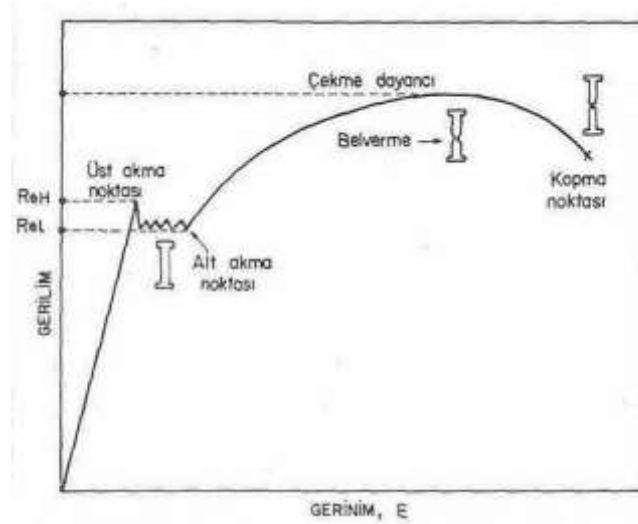
Tablo 3.3. Çekme deneyi numune ölçüleri

Genişlik (b ₀)	İlk Ölçü Uzunluğu (L ₀)	En Küçük Gövde Uzunluğu (L _c)	Yaklaşık Toplam Uzunluk (L _t)	Radius
20 mm	80 mm	90 mm	300 mm	14

Şekil 3.7’de örnek olarak karbon çelik malzemenin çekme deneyi esnasında malzemenin üst akma noktasından alt akma noktasına kadar elastik deformasyon bölgesi ile alt akma noktasından kopma noktasına kadar gerçekleşmesi ön görülen gerilim-gerinim grafiğinde malzemenin durumu resmedilmiştir. Şekil 3.8’de ise kaynaklı parçaların üzerinden çıkarılan test numuneleri gösterilmektedir.

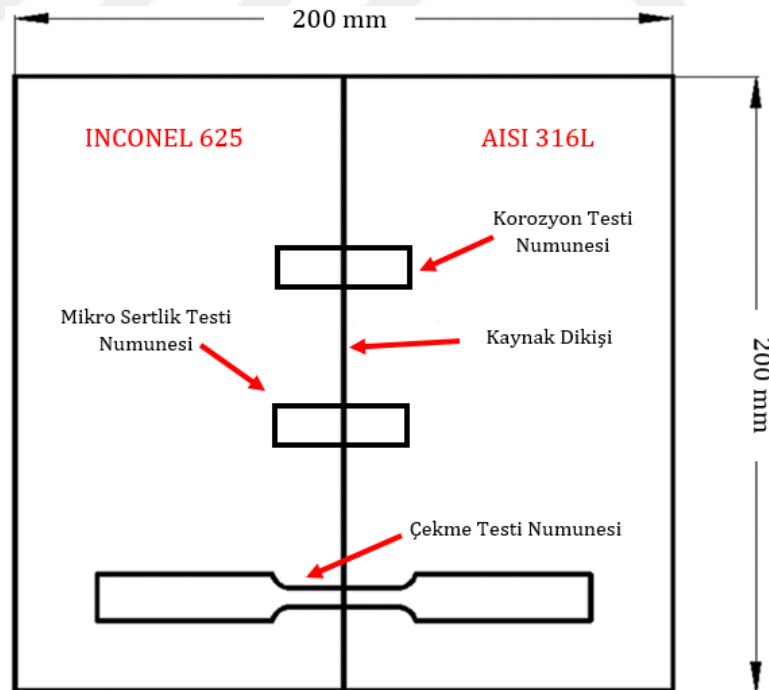
**Şekil 3.6.** Çekme testi deney düzeneği [78]

Korozyon testleri için 15 x 20 x 40 mm ölçülerinde numune hazırlanmış ve korozyon öncesi ağırlıkları belirlenmiştir. Daha sonra parçalar birer birer sülfürik asit havuzunun içerisine konulmuştur. Havuz altındaki ısı kaynağı ve havuz sıcaklığını ölçen ısı probu sayesinde asit 120°C’de 240 saat boyunca numune parçalara korozyon etkisi yaratmıştır. Her deneyin sonunda havuz içerisindeki sülfürik asit boşaltılmış ve havuz temizlenmiştir. Her bir deney için şartlar yenilenmiş ve korozyon testleri yapılmıştır. Deney sonucunda korozyona uğramış parçalar tekrar tartılmış ve korozyon miktarları hesaplanmıştır.



Şekil 3.7. Karbon çelik malzeme için çekme testi kopma noktasına kadar olan grafik

Diğer bir mekanik test olan mikro sertlik için de 15 x 20 x 40 mm ölçüsünde numuneler için EN ISO 6507-1 standardı kullanılmıştır. Numuneler ilgili standarda göre ölçülendirilmiş ve test edilmiştir. Mikro sertlik deneyine göre kaynağın bölgesinin tam ortası merkez olarak kabul edilmiş ve merkezden Inconel 625 tarafına doğru 14 mm, merkezden AISI 316L tarafına doğru 14 mm olmak üzere toplam 28 mm'lik bir alan sertlik testine tabii tutulmuştur. Her bir numune için kök pasosu, dolgu pasosu ve kapak pasosu ayrı ayrı incelenmiştir.

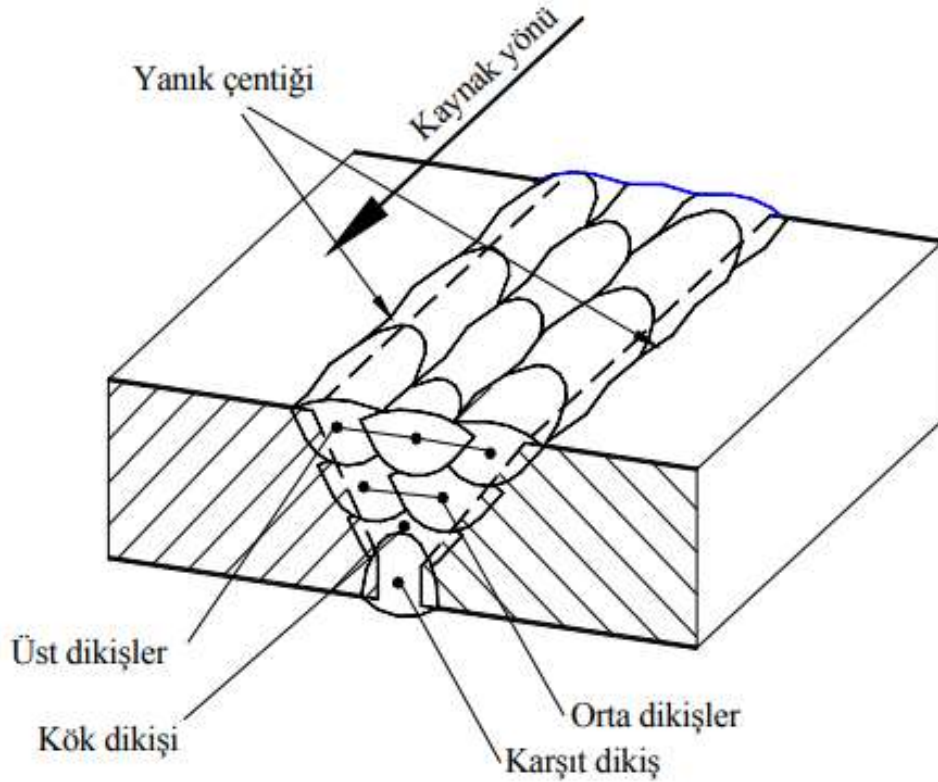


Şekil 3.8. Kaynaklı parçaların üzerinden alınan test numuneleri şeması [67]

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Sürekli Akım TIG Kaynağı Makro Yapı Sonuçları

Kaynaklı parçaların makro yapı incelemeleri Şekil 4.1.'de belirtilen parametrelere göre ve standartta belirtilen hususlara göre değerlendirilmiştir. Şekil 4.1'de standart V kaynak ağızlı bir parçada çoklu paso kaynağının bileşenleri verilmiştir. Kaynak işlemi sonrası bir kaynak hatası olarak yanık çentiklerinin oluşması muhtemel bir sonuçtur. İncelenen numunelerde yanık çentiğine rastlanmamıştır. Kök paso, dolgu pasosu ve en üst kısımda bulunan kapak pasosunun değerlendirmeleri için kaynak bölgesinden alınan kesit dağlama çözeltisinde dağlanmıştır. Elde edilen görüntülere göre değerlendirmeler yapılmıştır.



Şekil 4.1. Kaynaklı parçalarda makro yapı incelemesinde kullanılan bileşenler

Sürekli Akım TIG kaynağı ile yapılan deney sonuçlarından elde edilen kaynak dikişi görüntüleri Şekil 4.2'de verilmiştir. Yapılan kaynakların dikiş yüzeylerinde herhangi bir gözenek kanalı, gaz kabarcığı, cüruf kalıntısı, sıçrama, boşluk veya çatlak tespit edilmemiştir. Kaynak dikişleri geometri incelemeleri neticesinde numunelerin izin verilen sınırlar içerisinde olduğu tespit edilmiştir. Kaynak dikişlerinin bittiği kısımlardan itibaren Inconel 625 ve AISI 316L kısımları incelendiğinde AISI 316L kısmındaki renk değişim alanının Inconel 625 malzemesindeki renk değişim alanına göre daha geniş olduğu bütün deneyler sonucunda görülmüştür.



Şekil 4.2. SA/TIG kaynak yöntemi kullanılarak yapılan kaynak dikişleri a) ERNiCr-3, b) TIG 316L, c) Burgü (ErNiCr-3 + TIG 316L)

Şekil 4.2’de kaynaklı parçaların kesit görüntüleri verilmiştir. Kesitler incelendiğinde kaynak dikişinde nüfuziyet azlığı, kaynak kesitinde birleşme azlığı, çatlak, kabarcık veya gözenek tespit edilmemiştir. Tüm kaynaklarda tam nüfuziyet gözlemlenmiştir. Kök paso, dolgu pasosu ve kapak pasoları kaynakların her iki tarafı içinde uygun dağılımdadır. Elektroliz sonucunda oksalik asitin AISI 316L ana metali ve kaynak bölgesinde çukurcuklar oluşturduğu tespit edilmiştir. Bu durum beklenen bir durum olmak ile birlikte maruziyet süresini azaltarak geliştirilebilecek durumdadır.



Şekil 4.3. SA/TIG kaynak yöntemi kullanılarak yapılan kaynak dikiş kesitleri a) ERNiCr-3, b) TIG 316L, c) Burgü (ErNiCr-3 + TIG 316L)

4.2. Darbeli Akım TIG Kaynağı Makro Yapı Sonuçları

Sürekli Akım TIG kaynağı ile yapılan deney sonuçlarından elde edilen kaynak dikişi görüntüleri Şekil 4.4’de verilmiştir. SA/TIG’da olduğu gibi yapılan kaynakların dikiş yüzeylerinde herhangi cüruf kalıntısı, sıçrama, boşluk, gözenek kanalı, gaz kabarcığı veya çatlak tespit edilmemiştir. Kaynak dikişleri geometri incelemeleri neticesinde numunelerin izin verilen sınırlar içerisinde olduğu tespit edilmiştir. Kaynak dikişlerinin bittiği kısımlardan itibaren Inconel 625 ve AISI 316L kısımları incelendiğinde, SA/TIG’daki gibi AISI 316L kısmındaki renk değişim alanının Inconel 625 malzemesindeki renk değişim alanına göre daha geniş olduğu bütün deneyler sonucunda görülmüştür.



Şekil 4.4. DA/TIG kaynak yöntemi kullanılarak yapılan kaynak dikişleri d) ERNiCr-3, e) TIG 316L, f) Burgu (ErNiCr-3 + TIG 316L)

Şekil 4.5.’de DA/TIG ile kaynatılmış parçaların kesit görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.5e’de görüldüğü gibi TIG 316L ile yapılan kaynakta küçük bir kaynak boşluğu tespit edilmiştir. Bunun haricinde kaynaklarda boşluk, nüfuziyet azlığı, çatlak, kabarcık, gözenek gibi hatalara rastlanmamıştır. Elektrolizden kaynaklı çukurcuklar DA/TIG kaynak parçalarında da tespit edilmiştir. Her iki kaynak yöntemi ile yapılan numunelere uygulanan elektroliz işleminde çukurcuklar kaynak bölgesi ve AISI 316L ana metali tarafında belirginleşirken, nikel esaslı süper alaşım Inconel 625 metalinin ana



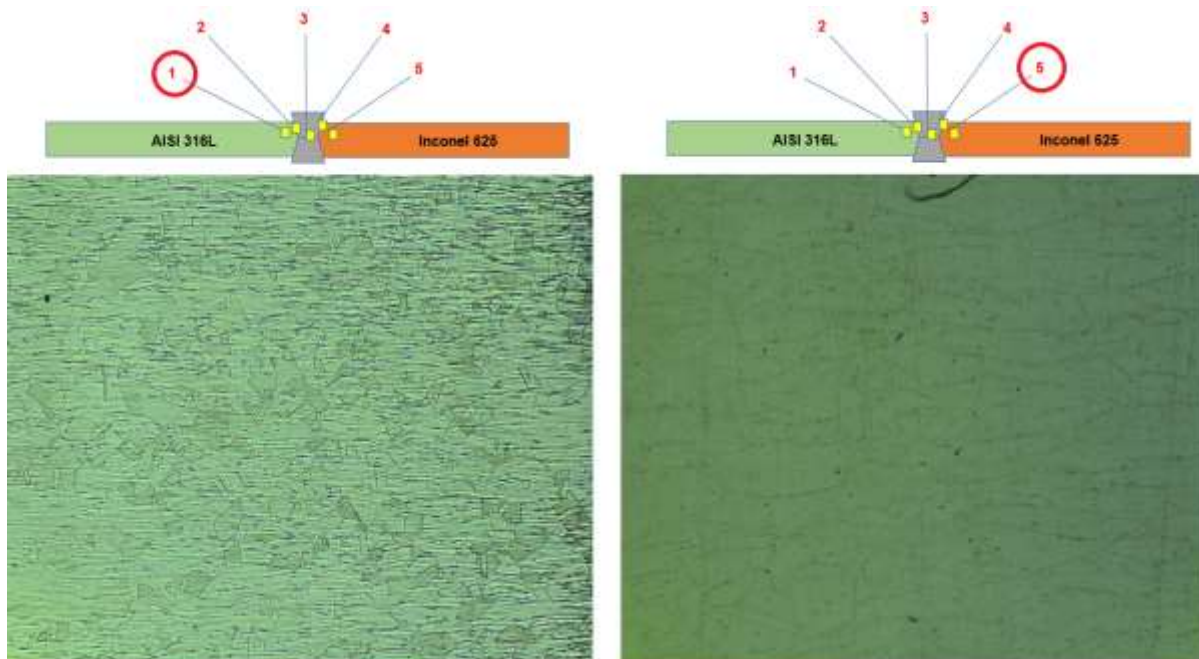
Şekil 4.5. DA/TIG kaynak yöntemi kullanılarak yapılan kaynak dikiş kesitleri d) ERNiCr-3, e) TIG 316L, f) Burgu (ErNiCr-3 + TIG 316L)

malzemesinin makro yapısında çukurcuk tespit edilmemiştir. Bu durum Inconel 625 malzemesinin korozyon direncinin AISI 316L malzemesinin korozyon direncine oranla daha yüksek olması ile açıklanabilir.

4.3. Mikro Yapı Sonuçları

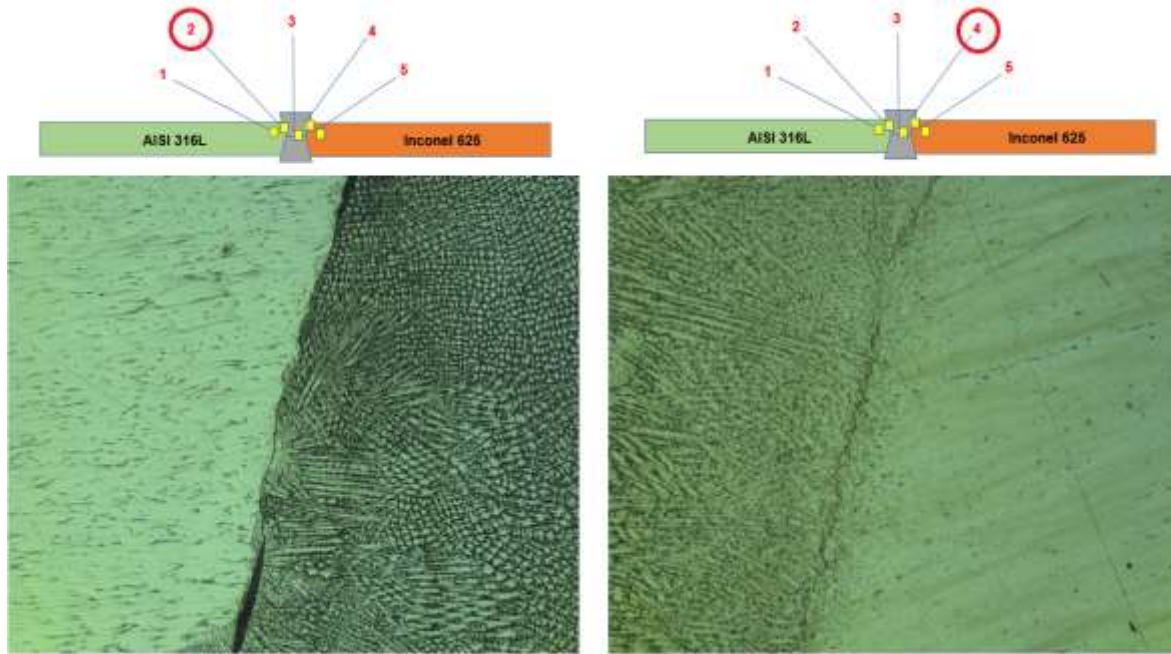
4.3.1. Sürekli Akım TIG Kaynağı yöntemi ve ERNiCr-3 Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Mikro Yapı Sonuçları

Inconel 625 malzemesi yüzey merkezli kübik metal yapıya sahiptir [79]. AISI 316L malzemesi de östenitik paslanmaz çelik sınıfında yüzey merkezli kübik metal bir yapıya sahiptir [80]. Şekil 4.6.'da ana metallerin mikro yapı görüntüleri verilmiştir. AISI 316L malzemesi daha küçük tane yapısına sahiptir.



Şekil 4.6. SA/TIG kaynak yöntemi ve ERNiCr-3 dolgu metali kullanılan deneydeki 1 (AISI 316L ana metali) ve 5 (Inconel 625 ana metali) numaralı bölgenin optik mikroskop görüntüleri

Tanecikler homojen dağılım sahip görüntü vermiştir. Aynı şekilde Inconel 625 malzemesinden de homojen tanecik görüntü elde edilmiştir. Bu durum analiz yapılan bu bölgede ısıl işlem olmadığını malzemenin literatürdeki tanecik yapısını gösterdiğini ortaya koymaktadır. Beklendiği üzere AISI 316L malzemesine göre daha iri taneli bir yapıya sahiptir. Malzemelerin yüzeylerinde parlatma işleminden kaynaklı siyah lekelenmeler görülmüştür.

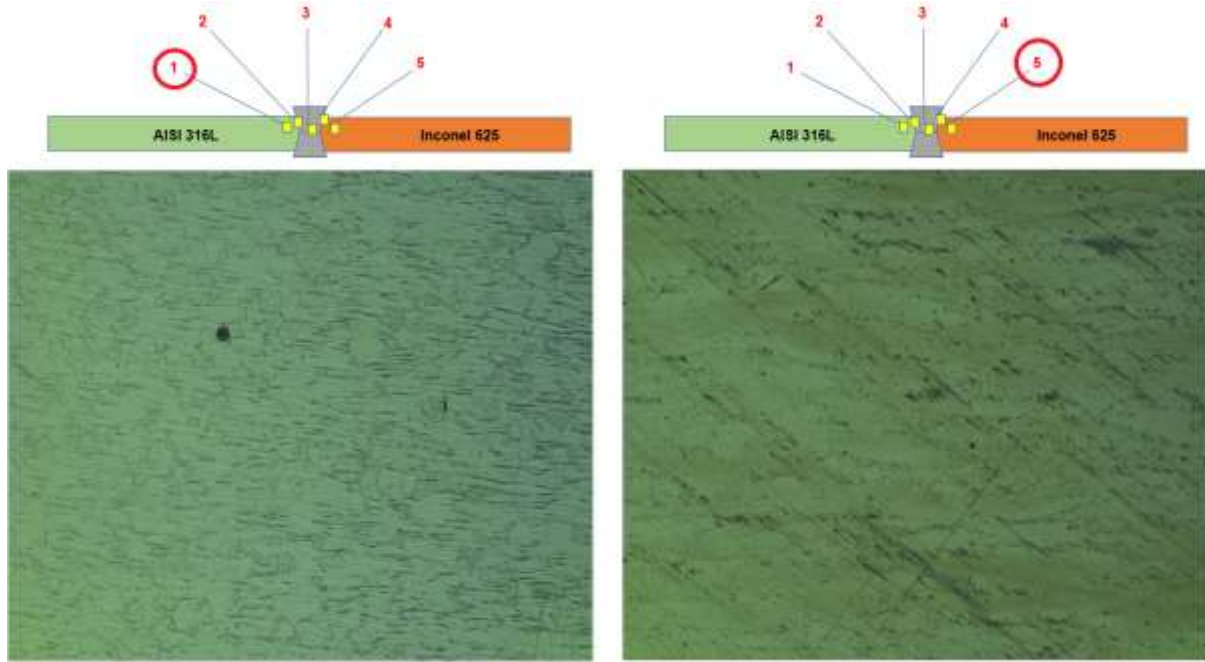


Şekil 4.7. SA/TIG kaynak yöntemi ve ERNiCr-3 dolgu metali kullanılan deneydeki 2 (AISI 316L ve kaynak bölgesinin kesiştiği alan) ve 4 (Inconel 625 ve kaynak bölgesinin kesiştiği alan) numaralı bölgenin optik mikroskop görüntüleri

Şekil 4.7.'de ise AISI 316L ITAB'ı ile kaynak bölgesinin kesiştiği bölge ve Inconel 625 ITAB'ı ile kaynak bölgesinin kesiştiği bölge gösterilmektedir. AISI 316L malzemesi ile kaynak bölgesi sınır çizgisinde mikro boşluk gözlenmiştir. Bu boşluk sürekli bir boşluk olmamakla birlikte kaynak dikişi boyunca belirli aralıklar ile gözlenmiştir. Kaynak bölgesinde ise kolonlu ve eş eksenli çok yönlü tanecik büyümeleri mevcuttur. Inconel 625 malzemesi ile kaynak bölgesinde ise karışmamış bölge tespit edilmiştir. Fakat bu karışmamış bölge silüet halinde gözlemlenmiştir. Bu bölgenin bütün kaynak dikişi boyunca olduğu tespit edilmiştir. Sanayide kullanılan ve araştırmacılar tarafından etkileri incelenen kaynak sonrası ısıl işlemdir. Kaynak işlemi sonrası ısıl işlemin gerilimleri gidermekte ve mikro yapıda silüet halinde karışmamış bölge oluşuma sebep olmaktadır [68]. Fakat bu deneyde herhangi bir ısıl işlem gerçekleşmeden silüet halinde karışmamış bölge tespit edilmiştir. Bu duruma ani ısıtma soğutmaların neden olduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte Inconel 625 tarafındaki kaynak bölgesinde tanecik büyümeleri gözlemlenmiştir. Fakat bu bölgedeki tanecik büyümeleri genelde kolonlu şekilde tespit edilmiştir. Malzemelerin ana metal yüzeylerinde dağlama işleminden kalan herhangi bir çukuru oluşumu gözlenmemiştir.

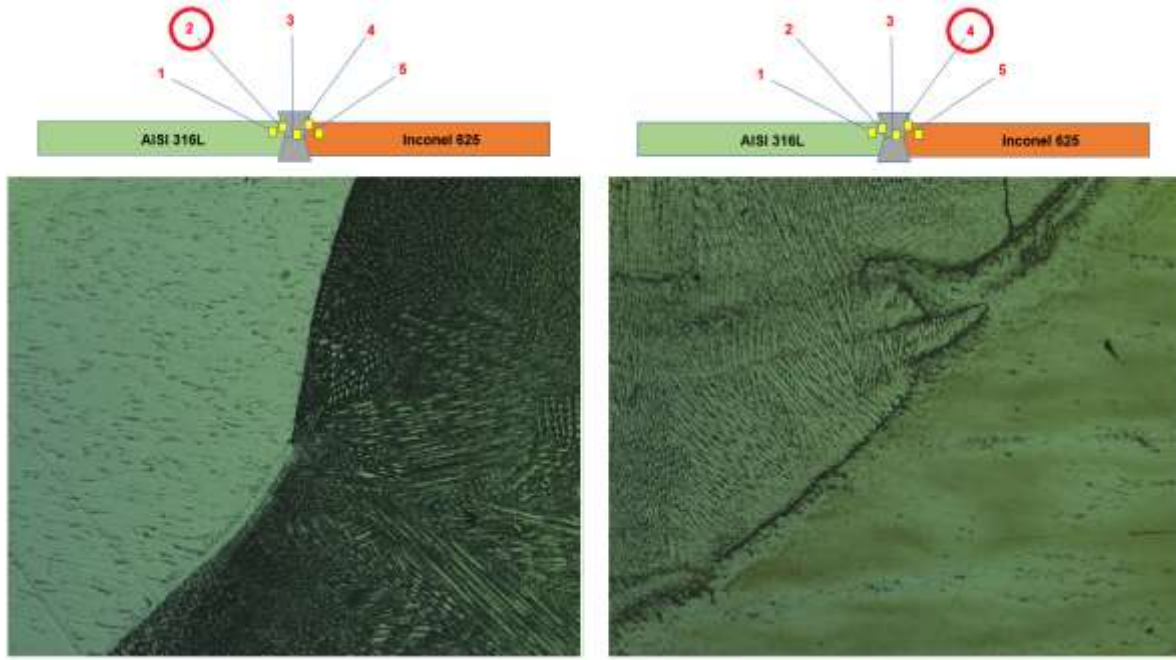
4.3.2. Sürekli Akım TIG Kaynağı yöntemi ve TIG 316L Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Mikro Yapı Sonuçları

Şekil 4.8’de SA/TIG ile TIG 316L dolgu teli kullanılarak yapılan deneydeki AISI 316L ve Inconel 625 malzemelerin mikro yapı görüntüleri verilmiştir. Her iki malzeme de homojen tanecik görüntüsü vermiştir. Parlatmadan kaynaklı lekeler AISI 316L malzemesinde daha az iken, Inconel 625 malzemesinde daha fazladır.



Şekil 4.8. SA/TIG kaynak yöntemi ve TIG dolgu metali kullanılan deneydeki 1 (AISI 316L ana metali) ve 5 (Inconel 625 ana metali) numaralı bölgenin optik mikroskop görüntüleri

Şekil 4.8.’de ise AISI 316L ITAB’ı ile kaynak bölgesinin kesiştiği bölge ve Inconel 625 ITAB’ı ile kaynak bölgesinin kesiştiği bölge gösterilmektedir. AISI 316L tarafındaki kaynak bölgesinde net bir biçimde kısmen ergimiş bölge görülmektedir. Kısmen ergimiş bölge mikro yapıda tespit edilen bir kaynak hatası olarak bilinmektedir. Genellikle kaynak bölgesinin hemen kenarında oluşur ve malzemenin çok hızlı bir şekilde ötektik sıcaklığa kadar ısıtılması neticesinde meydana gelir [70]. Kısmen ergimemiş bölge kırılma gibi istenmeyen durumlara neden olabilir. Kolonlu ve eş eksenli büyüme AISI 316L tarafındaki kaynak bölgesinde gözlemlenmiştir. Inconel 625 ile kaynak bölgesi arasında karışmamış bölge oluşumu gözlemlenmiştir. Bu bölge bütün kaynak boyunca bu bölge devam etmektedir. Karışmamış bölge de mikro yapıda bir kaynak hatası olarak bilinmektedir. Karışmamış bölge genelde ana metal ile dolgu metalinin ergime sıcaklıkları arasındaki fark yüksek olunca ortaya çıkan bir durumdur. Bu bağlamda kaynak ısı girdisi uygun bir kaynak havuzu oluşturamamaktadır. Bu durum homojen halini alamamış bir kaynak havuzu yapısına neden olmaktadır [66, 82].

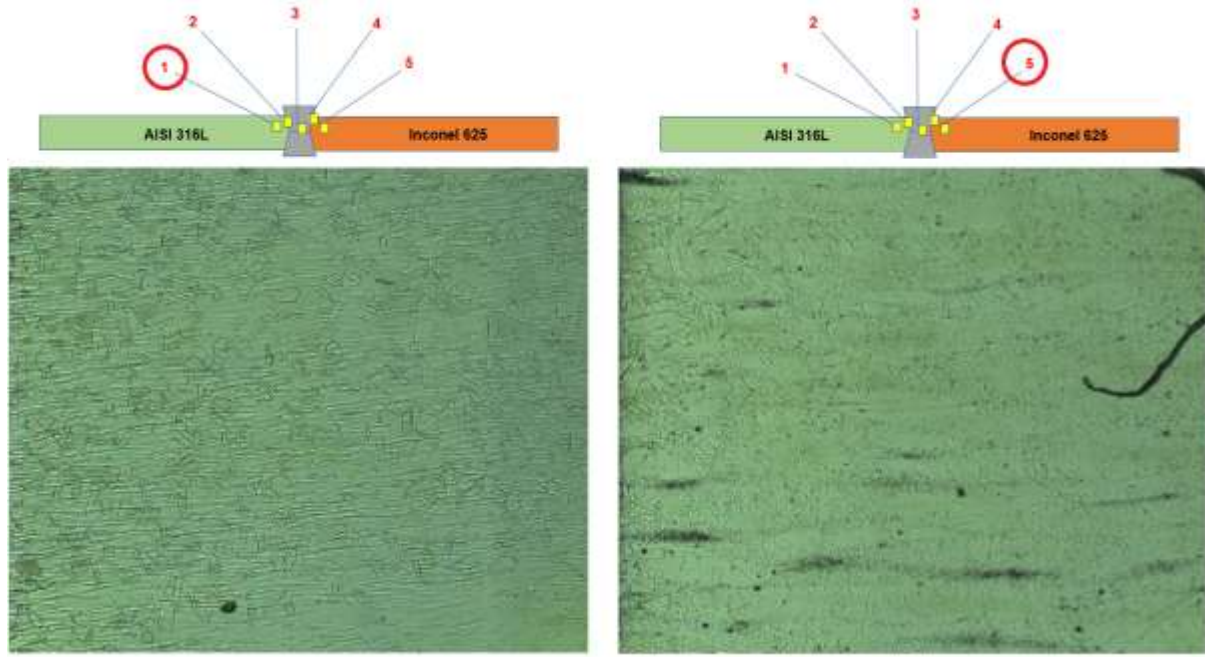


Şekil 4.9. SA/TIG kaynak yöntemi ve TIG 316L dolgu metali kullanılan deneydeki 2 (AISI 316L ve kaynak bölgesinin kesiştiği alan) ve 4 (Inconel 625 ve kaynak bölgesinin kesiştiği alan) numaralı bölgenin optik mikroskop görüntüleri

Kaynak esnasında oluşan ısı girdisi ergime sıcaklıklarının farklılığından veya operatör/makine hatalarından dolayı hem iki ana metalin hem de dolgu metalinin homojen olarak ergimesini sağlayamadığı durumlar oluşabilmektedir. Kaynak havuzunun bir kısmında tam ergimiş malzeme varken, bir kısmında tam erginmemiş malzeme bulunmaktadır. Bu durum malzemelerin de birbirlerinden farklı olması durumu ile birleşince kaynak bölgesinde sorunlu bölgelerin oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum katılaşma süreci esnasında mikro yapı bozukluğu olarak belirlemektedir. Bununla birlikte Inconel 625 tarafındaki kaynak bölgesinde mikro çatlak tespit edilmiştir. Çatlağın devam etmediği ve AISI 316L tarafına yaklaşmağı görülmüştür. Karışmamış bölge oluşumu esnasında farklı soğuma karakterine sahip malzemelerin katılaşma esnasında oluşturdukları gerilim kuvvetlerinin kaynak üzerine mikro çatlaklara sebep olduğu kanaatine varılmıştır.

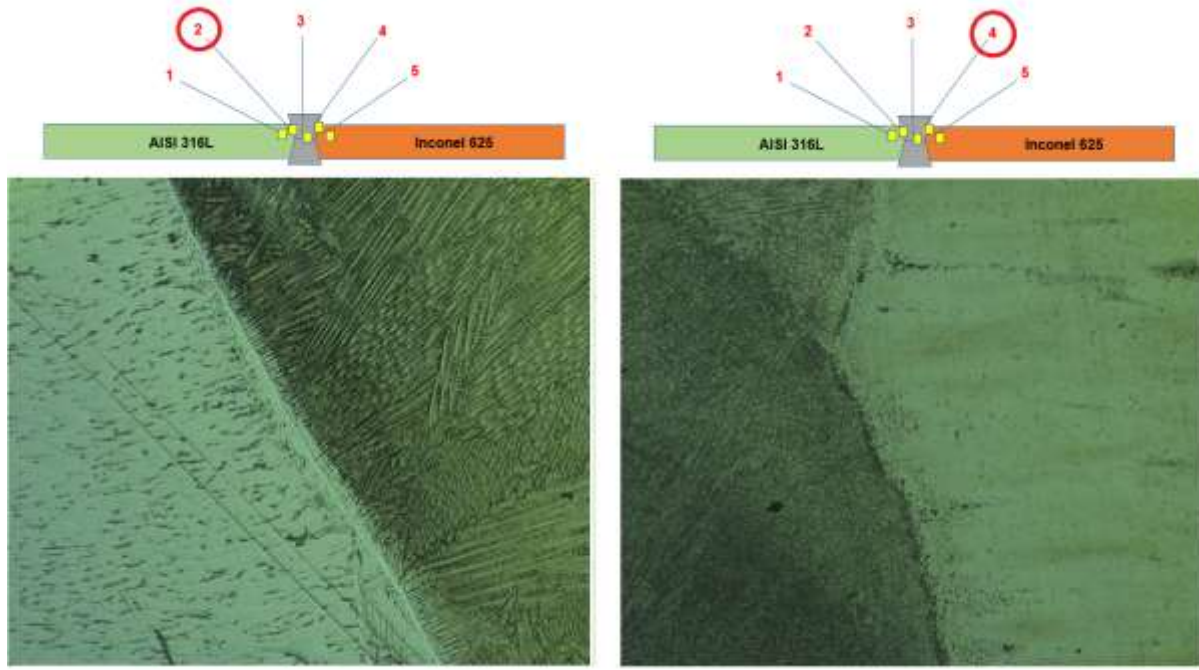
4.3.3. Sürekli Akım TIG Kaynağı yöntemi ve Burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Mikro Yapı Sonuçları

Şekil 4.10'da SA/TIG ile burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu teli kullanılarak yapılan deneydeki AISI 316L ve Inconel 625 malzemelerin mikro yapı görüntüleri verilmiştir. İnceleme kapsamında ana metalin bütün bölgelerinin optik mikropkop incelemesi yapılmıştır. AISI 316L malzemesi ana metal kısmı östenitik homojen tanecik görüntüsü vermiştir. Parlatmadan işleminden kaynaklı bazı lekeler AISI 316L malzemesinde daha az iken, Inconel 625 malzemesinde daha fazladır. Inconel 625 malzemesinin ana metalinin tanecik yapısı da homojen yapı sergilemiştir.



Şekil 4.10. SA/TIG kaynak yöntemi ve burğu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali kullanılan deneydeki 1 (AISI 316L ana metali) ve 5 (Inconel 625 ana metali) numaralı bölgenin optik mikroskop görüntüleri

Şekil 4.11.'de AISI 316L ITAB'ı ile kaynak bölgesinin kesiştiği bölge ve Inconel 625 ITAB'ı ile kaynak bölgesinin kesiştiği bölge gösterilmektedir. AISI 316L tarafında diğer deneylerdekinden daha geniş bir kesitte kısmen ergimemiş bölge kaynak hatası olarak belirlenmiştir. AISI 316L tarafındaki kaynak bölgesindeki tanecik büyümleri çok yönlü ve kolonlu eş eksenlidir. Kaynak sürecinde, özellikle de ısı girdisi yüksek kaynak yöntemlerinin kullanıldığı uygulamalarda, çoklu paso uygulamalarında mikro yapıda çok yönlü tanecik büyümleri beklenen bir durumdur [69]. Inconel 625 tarafında ise ergimemiş bölge tespiti yapılmıştır. Bu bölge kaynak dikişi boyunca devam etmektedir. SA/TIG ile yapılan kaynaklarda ergimemiş bölge Inconel 625 malzemesi tarafında daha geniş bir alanda tespit edilmiştir. Benzer bir durumda Dev, vd. Inconel 718 ve AISI 416 malzemelerini birbirleriyle kaynattıkları çalışmalarında da nikel esaslı süper alaşım Inconel 718 tarafındaki karışmamış bölge genişliğinin paslanmaz çelik tarafındakine göre daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir [82]. Malzemelerin özelliklerinin verildiği Tablo 2.1. ve Tablo 2.3.'te de belirtildiği gibi Inconel 625 ve AISI 316 L malzemelerinin ergime sıcaklık farklılıkları arasında bir miktar fark mevcuttur. Inconel 625 malzemesinin ergime sıcaklığının minimum değerinde dolgu metali ergime sıcaklığı arasındaki farktan dolayı ergimemiş bölge oluştuğu kanaatine varılmıştır. Bu yapının kaynağın mekanik özelliklerine olumsuz olarak yansıtacağı bilinmektedir. Karışmamış bölge yapısının geniş bir alanda oluşması durumunda, kaynak bölgesinde sert yapıların oluşmasına neden olarak kırılman bir yapı oluşmaktadır. Bu durum özellikle çekme testinde kırılmanın herhangi bir ana metali üzerinden ziyade, kaynak üzerinde meydana gelmesiyle sonuçlanabilir.

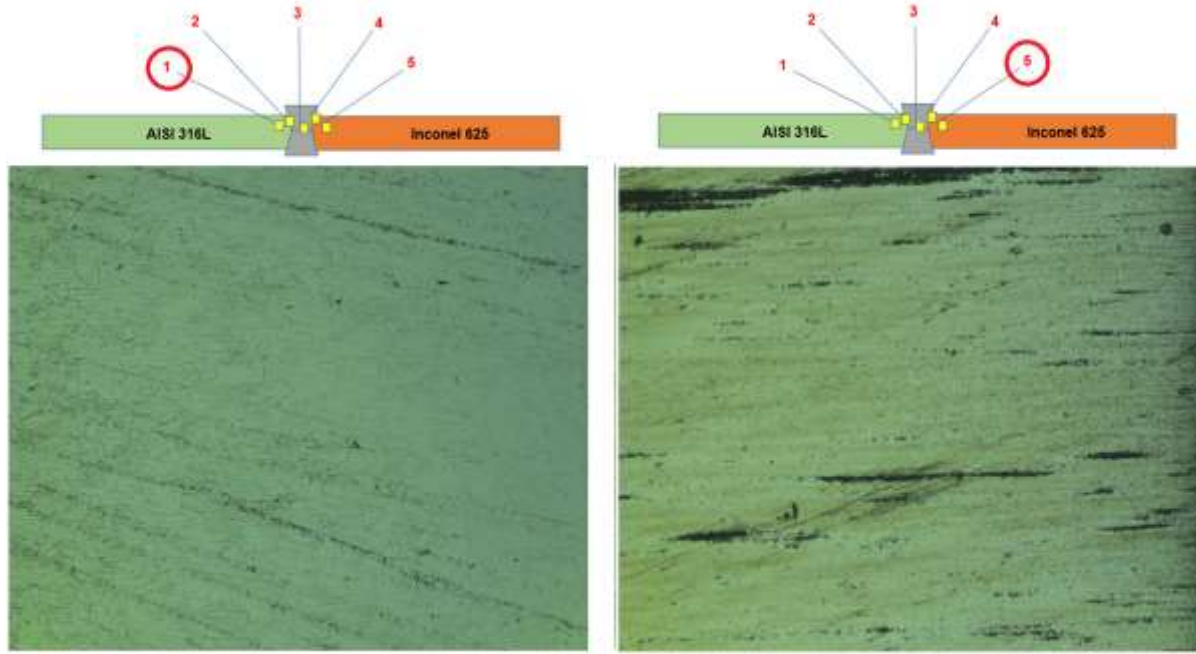


Şekil 4.11. SA/TIG kaynak yöntemi ve burğu (ErNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali kullanılan deneydeki 2 (AISI 316L ve kaynak bölgesinin kesiştiği alan) ve 4 (Inconel 625 ve kaynak bölgesinin kesiştiği alan) numaralı bölgenin optik mikroskop görüntüleri

4.3.4. Darbeli Akım TIG Kaynağı yöntemi ve ERNiCr-3 Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Mikro Yapı Sonuçları

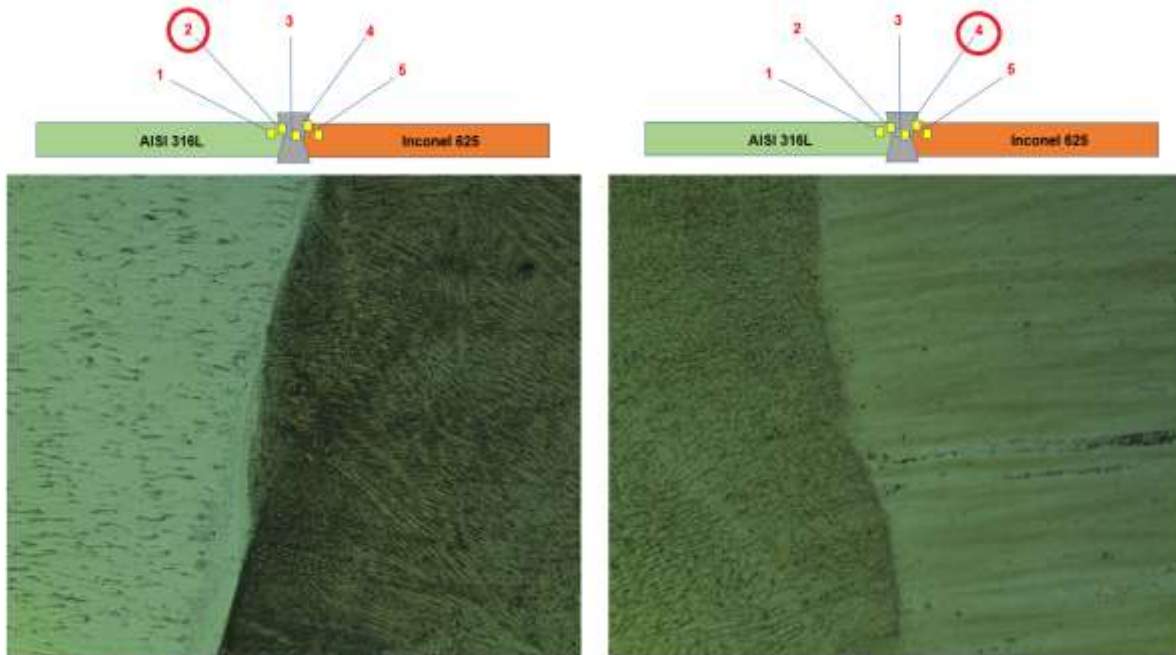
Şekil 4.12’de DA/TIG ile burğu ERNiCr-3 dolgu teli kullanılarak yapılan deneydeki AISI 316L ve Inconel 625 malzemelerin mikro yapı görüntüleri verilmiştir. Hem AISI 316L hem de Inconel 625 malzemesi homojen tanecik görüntüsü vermiştir. Parlatmadan kaynaklı lekeler her iki malzemede de vardır.

Şekil 4.13.’de AISI 316L ITAB’ı ile kaynak bölgesinin kesiştiği bölge ve Inconel 625 ITAB’ı ile kaynak bölgesinin kesiştiği bölge gösterilmektedir. AISI 316L tarafındaki kaynak bölgesindeki tanecik büyümeleri çok yönlü ve kolonlu olarak görülmüştür. Bu tanecik büyümeleri SA/TIG ile yapılan daha önce yapılan üç deney ile karşılaştırıldığında daha küçük ve ince boyutlarda olduğu tespit edilmiştir. Kaynak dikişi boyunca kısmen ergimiş bölge tespit edilmiştir. Bu bölge diğer deneylerde olduğu kadar genişliktedir. Inconel 625 bölgesi ile kaynak bölgesi arasında net bir mikro yapı hatasına rastlanmamıştır. Diğer deneylerde tespit edilen karışmamış bölgeler DA/TIG ve ERNiCr-3 dolgu metali ile yapılan kaynakta daha homojen kaynak havuzu oluşması neticesinde tespit edilmemiştir. Bununla birlikte Inconel 625 tarafındaki kaynak bölgesinde göç etmiş tanecikler sınırı tespit edilmiştir. Göç etmiş tanecikler sınırı kaynak sürecinde ortaya çıkabilen bir diğer mikro yapı hatalarından birisi olarak kabul edilir. Dupont, vd. [54]’e göre göç etmiş tanecikler sınırı Ni açısından zengin dolgu metali ile yapılan çok pasolu kaynaklarda, kaynak bölgesinde göç etmiş tanecikler sınırı oluşmasının muhtemel bir durum olduğu bildirilmektedir.



Şekil 4.12. DA/TIG kaynak yöntemi ve ERNiCr-3 dolgu metali kullanılan deneydeki 1 (AISI 316L ana metali) ve 5 (Inconel 625 ana metali) numaralı bölgenin optik mikroskop görüntüleri

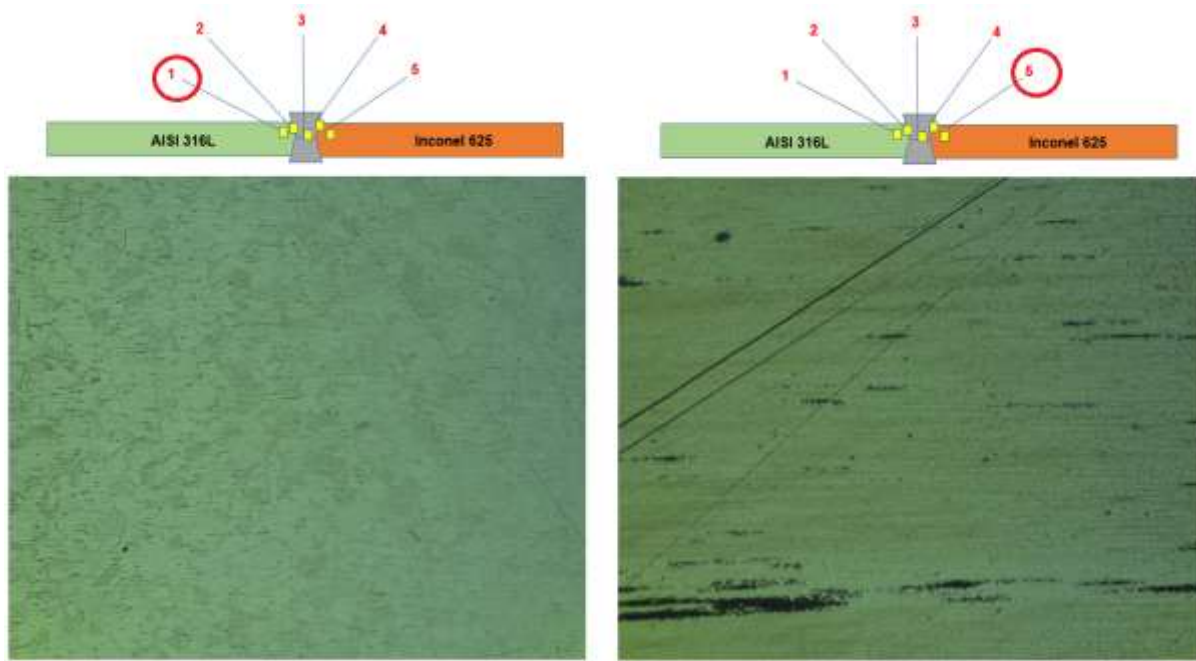
AISI 316L malzemesinin kaynak bölgesinde ile kesintiği bölgede karışmamış bölgelerin de varlığı gözlemlenmiştir. Özellikle kaynak dikişinin AISI 316L tarafına kaydığı bölgelerde karışmamış bölge daha net biçimde gözükmemektedir. Söz konusu bölgelerde kaynak hatası neticesinde kaynak torcunun normalden daha fazla nüfuz ettiği bilinmektedir.



Şekil 4.13. DA/TIG kaynak yöntemi ve ERNiCr-3 dolgu metali kullanılan deneydeki 2 (AISI 316L ve kaynak bölgesinin kesiştiği alan) ve 4 (Inconel 625 ve kaynak bölgesinin kesiştiği alan) numaralı bölgenin optik mikroskop görüntüleri

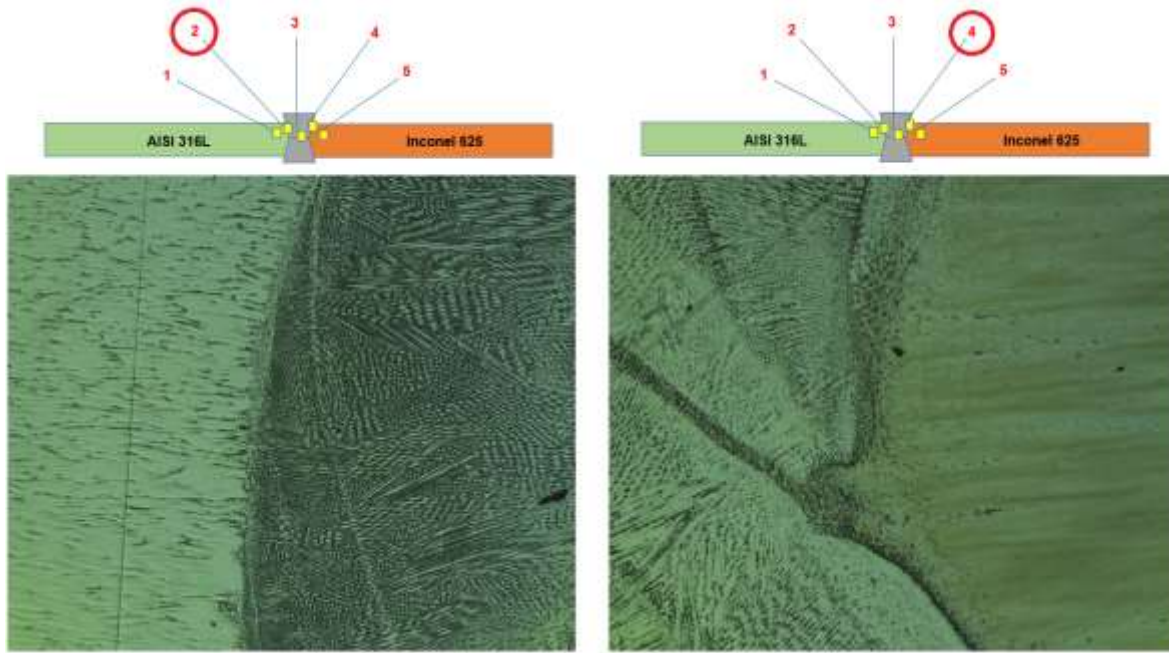
4.3.5. Darbeli Akım TIG Kaynağı yöntemi ve TIG 316L Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Mikro Yapı Sonuçları

Şekil 4.14'te DA/TIG ile TIG 316L dolgu teli kullanılarak yapılan deneydeki AISI 316L ve Inconel 625 malzemelerin mikro yapı görüntüleri verilmiştir. AISI 316L malzemesi ana metalinde östenitik homojen tanecik görüntüsü vermiştir. Parlatmadan kaynaklı lekeler AISI 316L malzemede çok net deformasyon görüntüleri elde edilmez iken, Inconel 625 malzemede fazla miktarda tespit edilmiştir. Inconel 625 malzemesinin ana metalinin tanecik yapıları da homojen dağılımlı olarak gözlemlenmiştir.



Şekil 4.14. DA/TIG kaynak yöntemi ve TIG 316L dolgu metali kullanılan deneydeki 1 (AISI 316L ana metali) ve 5 (Inconel 625 ana metali) numaralı bölgenin optik mikroskop görüntüleri

Şekil 4.15.'te AISI 316L ITAB'ı ile kaynak bölgesinin kesiştiği bölge ve Inconel 625 ITAB'ı ile kaynak bölgesinin kesiştiği bölge gösterilmektedir. Kaynak bölgesinin AISI 316L tarafı incelendiğinde daha önceki deneylerde de gözlemlendiği gibi çok yönlü tanecik büyümelerinin varlığı tespit edilmiştir. Bu tanecik boyutları SA/TIG ile yapılan deneylerdeki tanecik boyutlarına göre daha küçük olduğu görülmüştür. Bununla birlikte AISI 316L ile kaynak bölgesinin kesiştiği bölgede ince olmak kaydıyla karışmamış bölge tespit edilmiştir. Fakat bu bölge diğer kaynak bölgelerinde tespit edilenler ile birlikte karşılaştırıldığında kaynak dikişi boyunca sürekli olmadığı tespit edilmiştir. Karışmamış bölgenin sürekli olmaması hatanın oluşması için gerekli şartların tam olarak oluşmadığı anlamı taşımaktadır. Ayrıca diğer kaynakların AISI 316L tarafındaki kaynak sınırında tespit edilen kısmen ergimiş bölge bu deneyde tespit edilmemiştir. Bunların haricinde kaynak dikişi üzerinde herhangi bir hata tespit edilmemiştir.

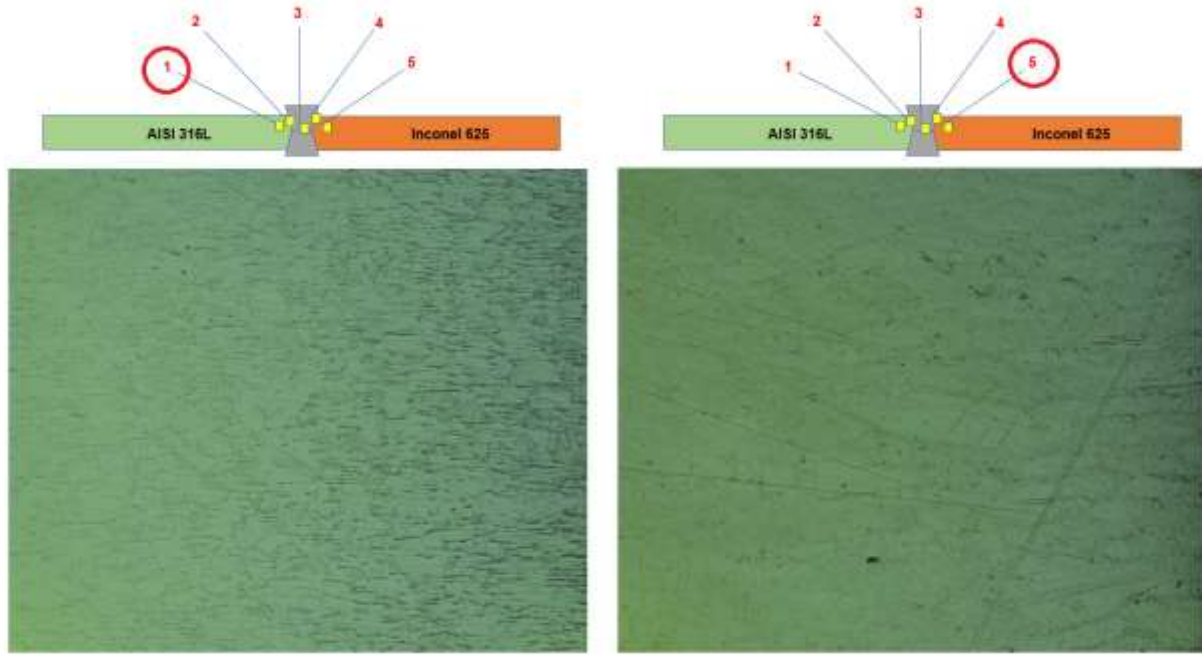


Şekil 4.15. DA/TIG kaynak yöntemi ve burğu TIG 316L dolgu metali kullanılan deneydeki 2 (AISI 316L ve kaynak bölgesinin kesiştiği alan) ve 4 (Inconel 625 ve kaynak bölgesinin kesiştiği alan) numaralı bölgenin optik mikroskop görüntüleri

Inconel 625 ve kaynak bölgesinin kesiştiği bölge incelendiğinde sınır bölgesinde bütün deneylere göre en geniş kısmen ergimemiş bölge tespit edilmiştir. Bu tespit Inconel 625 malzemesinin TIG 316 L tel ile kaynatılması neticesinde ve DA/TIG kaynağında ortaya çıkan ani ısı girdisinin sebep olduğu düşünülmektedir. Ayrıca bu karışmamış bölge diğer deneylerden farklı olarak kaynak dikişinin içerisine doğru ilerlemiştir. Herhangi bir boşluk, çatlak, kırık, vb. gibi hata tespit edilmemiştir. Kaynak bölgesinin Inconel 625 tarafında genelde kolonlu yapıda tanecik büyümleri oluşmuştur. Fakat bu tanecik büyümleri homojen değildir, bazı bölgelerde tanecik büyümesi tespit edilmemiştir. Bu durum yukarıda belirtilen diğer hataların aksine olumlu bir tespit olarak kayıt altına alınmıştır. Daha önceki bölümlerde anlatıldığı gibi Ni esaslı dolgu metalinin çoklu paso kullanılması gereken durumlarda mikro yapıda tanecik büyümesine neden olduğu belirtilmiştir. TIG 316L dolgu teli Ni açısından ERNiCr-3 veya her iki metalin burğu dolgu teline oranla daha düşük Ni oranına sahiptir. Bu deneyde mikro yapıda elde edilen görüntüler Ni elementinin tanecik büyümesine etkisini gösterir niteliktedir. Tanecik büyümesi mikro yapıda incelenmesi gereken kavramlardan birisi olmasına karşın, değerlendirmede tek başına yeterli değildir. TIG 316L teli bununla birlikte Nb elementi barındırmamaktadır. Nb elementinin kaynak esnasında NbC olarak ikincil faz, Laves fazı oluşumu arttırdığı biliniyor [65], TIG 316L dolgu telinin de Nb elementi barındırmadığı göz önüne alınırsa, TIG 316L teli kullanımının NbC ve Laves fazı oluşumunun önüne geçtiği ön görülebilir. Bu olumlu özellik ileriki bölümlerde mekanik ve SEM/EDAX test sonuçları ile birlikte değerlendirildiğinde, Nb elementinin mikro yapı ve mekanik özelliklere olumsuz etkisi olduğu kanıtlanmıştır.

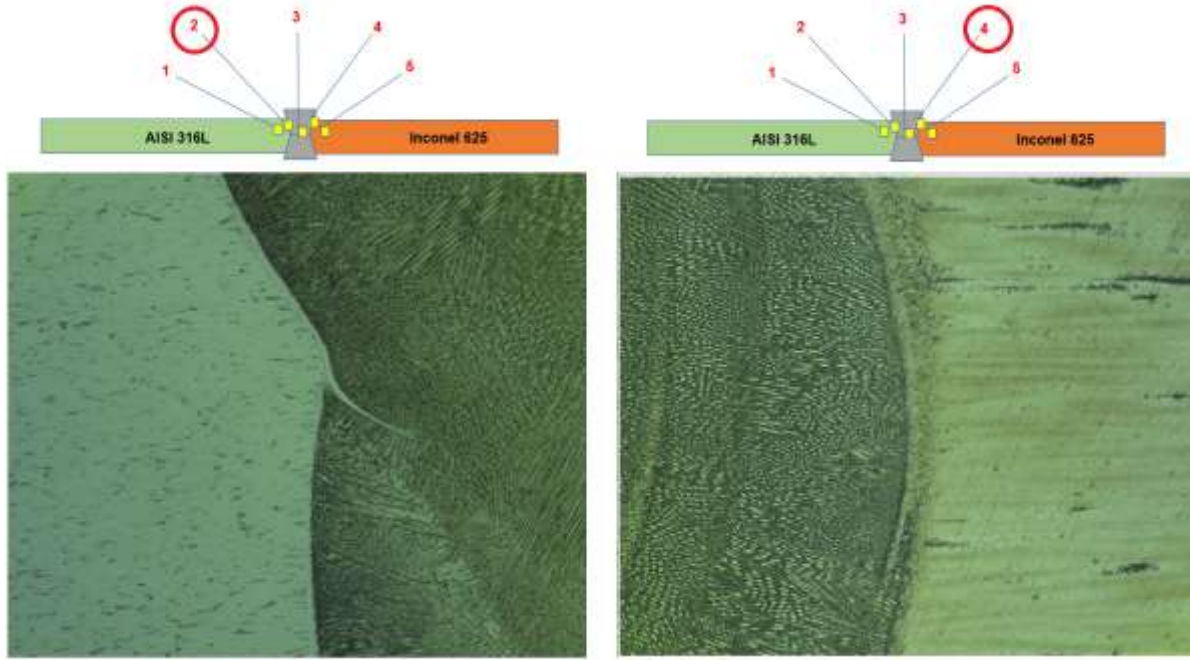
4.3.6. Darbeli Akım TIG Kaynağı yöntemi ve Burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Mikro Yapı Sonuçları

Şekil 4.16'da DA/TIG ile burgu dolgu teli (ERNiCr-3 + TIG 316L) kullanılarak yapılan deneydeki AISI 316L ve Inconel 625 malzemelerin mikro yapı görüntüleri verilmiştir. AISI 316L malzemesi homojen östenitik tanecik görüntüsü vermiştir. Malzeme yüzeylerinde çok büyük lekeler tespit edilmemiş olup, temiz bir görüntü elde edilmiştir.



Şekil 4.16. DA/TIG kaynak yöntemi ve burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali kullanılan deneydeki 1 (AISI 316L ana metali) ve 5 (Inconel 625 ana metali) numaralı bölgenin optik mikroskop görüntüleri

Şekil 4.17.'de AISI 316L ITAB'ı ile kaynak bölgesinin kesiştiği bölge ve Inconel 625 ITAB'ı ile kaynak bölgesinin kesiştiği bölge gösterilmektedir. Kaynak bölgesinin AISI 316L tarafı incelendiğinde yine çok yönlü tanecik büyümlerinin varlığı tespit edilmiştir. Söz konusu tanecik büyümleri de diğer darbeli akım TIG yöntemi ile yapılan kaynakları mikro yapılarında elde edilen mikro yapı görüntülerinde tespit edildiği gibi SA/TIG kaynakları mikro yapılarındaki tanecik büyümlerine göre daha küçüktür. Kaynak bölgesinin AISI 316L ile kesiştiği bölgede ince olmak kaydıyla karışmamış bölge tespit edilmiştir. Bu karışmamış bölge ince bir alanda devam etmiştir. Tüm kaynak dikişi boyunca bu alan belirmiştir. Bununla birlikte kaynak dikişinin bir bölgesinde kaynak bölgesinin içerisine doğru bu karışmamış bölge ilerlemiş ve kaynak bölgesini belirli bir oranda ikiye ayırmıştır. Söz konusu duruma çoklu paso neticesinde fazla ısı girdisinin neticesinde ikincil fazların oluşması ve katılma sürecinde homojen olmayan kaynak havuzunun neden olduğu kanaatine varılmıştır.



Şekil 4.17. DA/TIG kaynak yöntemi ve burğu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali kullanılan deneydeki 2 (AISI 316L ve kaynak bölgesinin kesiştiği alan) ve 4 (Inconel 625 ve kaynak bölgesinin kesiştiği alan) numaralı bölgenin optik mikroskop görüntüleri

Kaynak bölgesi ile Inconel 625 malzemesi ile kesiştiği bölgede nispeten geniş bir bölgede ergimemiş bölge tespit edilmiştir. Kaynak bölgesinde bütün deneylerde olduğu gibi tanecik büyümesi tespit edilmiştir. Bu tanecik büyümesi çok yönlü, kolonlu ve eş eksenli olarak görüntülenmiştir. Çok pasolu kaynak dikişlerinde tanecik büyümesinin beklenen bir durum olduğu daha önceki bölümlerde de belirtilmiştir. Fakat darbeli akım ile kaynak işleminin tanecik büyümesini azalttığı da bilinmektedir [69]. Darbeli akım ile kaynak sürecinde zirve akım ve dip akım değerleri belirlenmektedir. Bu zirve dip akım değerleri karşısında sıcaklıklar dalgalandırmayı ortaya çıkmaktadır. Sıcaklıklardaki bu dalgalanma kaynak havuzunun katılma süreci boyunca taneciklerin biçimlenmesini desteklemektedir. Bu sebeple darbeli akım kaynağının, sürekli akım kaynağına göre mikro yapıya olumlu etkileri ispatlanmıştır.

İncelenen mikro yapı görüntülerinde darbeli akım ile yapılan kaynaklardaki tanecik yapılarının sürekli akım ile yapılan kaynaklarda elde edilen numunelerinin mikro yapılarındaki tanecik büyümelerine göre daha küçük boyutta ve kontrol altına alındığı tespit edilmiştir. Daha önceki çalışmalarda elde edilen veriler bu çalışmada elde edilen verileri desteklemektedir. Dolgu metallerinin mikro yapı üzerinde net etkileri tespit edilememiştir. Bütün deneylerde AISI 316L tarafında ergimemiş bölge, Inconel 625 tarafında da karışmamış bölge tespit edilmiştir.

Tez çalışması kapsamında yapılan deneylerin makro ve mikro yapı incelemeleri neticelerinde tespit edilen hataların, hatalara neden olan sebeplerin deney sıralamasına göre listesi Tablo 4.1’de verilmiştir.

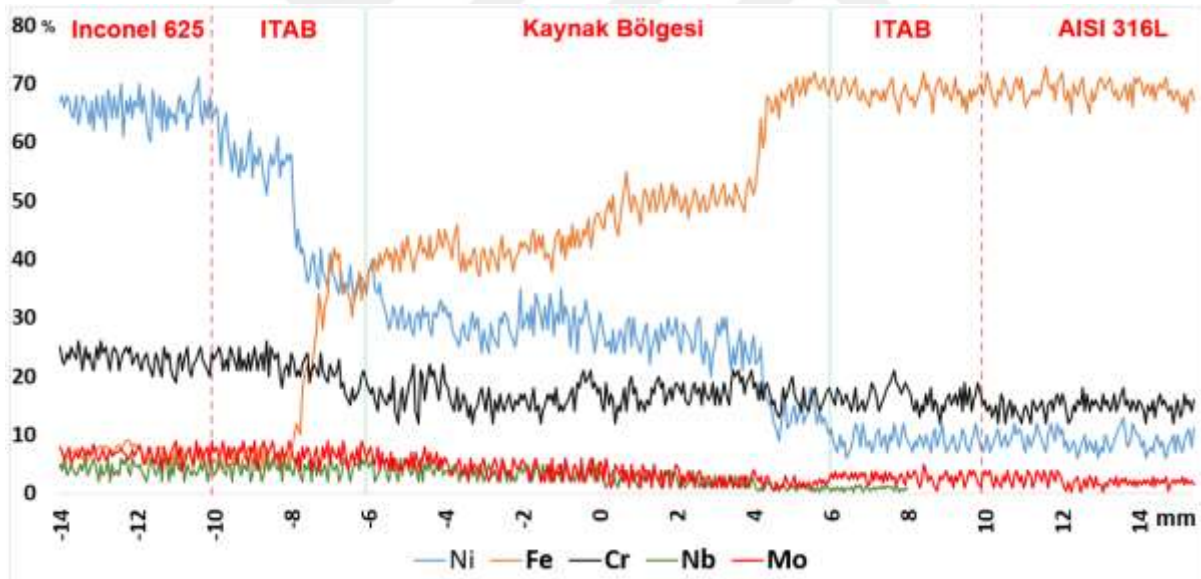
Tablo 4.1. Makro ve mikro yapı deney sonuçlarında belirlenen hataların özetleri

Deney	Makro yapı	Mikro yapı
1. SA/TIG – ERNiCr-3	Tam nüfuziyet, hata tespit edilmemiştir.	AISI 316L tarafında mikro boşluk gözlenmiştir. Inconel 625 tarafında silüet halinde karışmamış bölge tespit edilmiştir.
2. SA/TIG – TIG 316L	Tam nüfuziyet, hata tespit edilmemiştir.	AISI 316L tarafında kısmen ergimiş bölge tespit edilmiştir. Inconel 625 tarafında mikro çatlak tespit edilmiştir.
3. SA/TIG – ERNiCr-3 + TIG 316L	Tam nüfuziyet, hata tespit edilmemiştir.	AISI 316L tarafında geniş bir bantta kısmen ergimiş bölge tespit edilmiştir. Inconel 625 tarafında ergimemiş bölge tespit edilmiştir.
4. DA/TIG – ERNiCr-3	Tam nüfuziyet, hata tespit edilmemiştir.	Kaynak dikişi boyunca kısmen ergimiş bölge tespit edilmiştir. Inconel 625 tarafında göç etmiş tanecikleri sınırı belirlenmiştir.
5. DA/TIG – TIG 316L	Tam nüfuziyet, hata tespit edilmemiştir.	AISI 316L tarafında sürekli olmamak kaydıyla kısmen ergimiş bölge tespit edilmiştir. Inconel 625 tarafında bütün deneylere göre en geniş karışmamış bölge tespit edilmiştir.
6. DA/TIG – ERNiCr-3 + TIG 316L	Tam nüfuziyet, hata tespit edilmemiştir.	AISI 316L tarafında ince bir tabaka halinde ergimemiş bölge tespit edilmiştir. Inconel 625 tarafında karışmamış bölge tespit edilmiştir.

4.4. Çizgisel Haritalama Analizleri

4.4.1. Sürekli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve ERNiCr-3 Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Çizgisel Haritalama Analizleri

Sürekli akım TIG kaynak yöntemi ve ERNiCr-3 dolgu metali ile yapılan kaynakta yapılan çizgisel haritalama analizi Şekil 4.18’de verilmiştir. Grafikten de görüldüğü gibi Inconel 625 malzemesi tarafından AISI 316L malzemesi tarafına Ni elementi transferi gerçekleşmiştir. Aynı şekilde AISI 316L malzemesi tarafından da Inconel 625 malzemesi tarafına Fe elementi transferi gerçekleşmiştir. Bu durum Inconel 625 malzemesi içerisindeki yüksek Ni oranına karşın AISI 316L malzemesindeki Ni oranının daha düşük olması ve AISI 316L malzemesi içerisindeki yüksek Fe oranına karşın Inconel 625 malzemesi içerisindeki düşük Fe oranından dolayı beklenen transferlerdir. Cr element transferi çok büyük miktarda olmamakla birlikte Inconel 625 ve AISI 316L tarafından kaynak bölgesine doğru gerçekleşmiştir. Inconel 625 malzemesinin Nb içeriğinden dolayı az miktarda Nb elementi transferi kaynak bölgesine doğru gerçekleşmiştir.

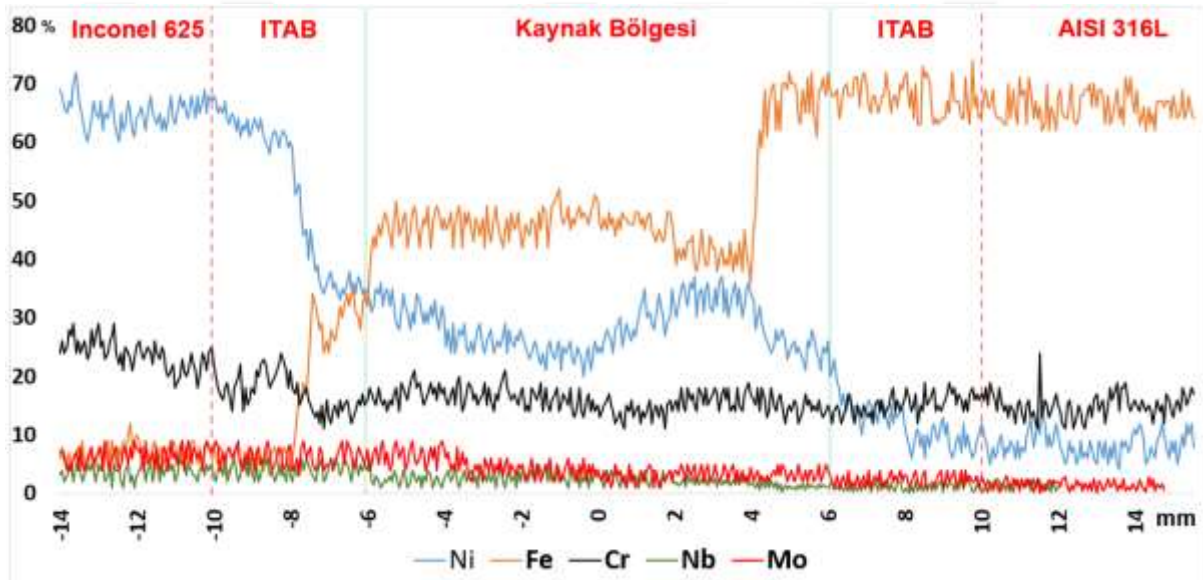


Şekil 4.18. SA/TIG kaynak yöntemi ve ERNiCr-3 dolgu metali kullanılan deneydeki çizgisel haritalama analizi

Mo elementi transferi Inconel 625 malzemesi tarafından kaynak bölgesine, az bir miktarda da olsa AISI 316L bölgesinden kaynak bölgesine doğru gerçekleşmiştir. Her iki malzemeyi kimyasal kompozisyonu göz önüne alındığında beklenen bir neticedir. Deney neticesinde en sert transfer hareketleri Inconel 625 ITAB’ında ve kaynak bölgesinin AISI 316L malzemesine yakın olan kısımda gerçekleşmiştir. Malzemelerin ana metal tarafındaki ihmal edilebilecek sonuçlardaki element hareketleri bu bölgede transfer gerçekleşmediği göstermektedir.

4.4.2. Sürekli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve TIG 316L Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Çizgisel Haritalama Analizleri

Sürekli akım TIG kaynak yöntemi ve TIG 316L dolgu metali ile yapılan kaynakta yapılan çizgisel haritalama analizi Şekil 4.19’da verilmiştir. Inconel 625 malzemesi içeriğindeki yüksek Ni oranından dolayı kaynak bölgesi ve AISI 316 L malzemesine doğru Ni transferi gerçekleşmiştir. Aynı şekilde AISI 316L malzemesi içeriğindeki yüksek Fe oranından dolayı, kaynak bölgesi ve Inconel 625 malzemesine doğru Fe transferi gerçekleşmiştir. Cr elementi transferi sadece Inconel 625 malzemesinden kaynak bölgesine doğru gerçekleşmiştir. Cr transferi Inconel 625 ana metalinden başlayarak devam etmiştir. Bu durum malzemelerin içerisindeki Cr element oranının çok yakın olmasından dolayıdır.

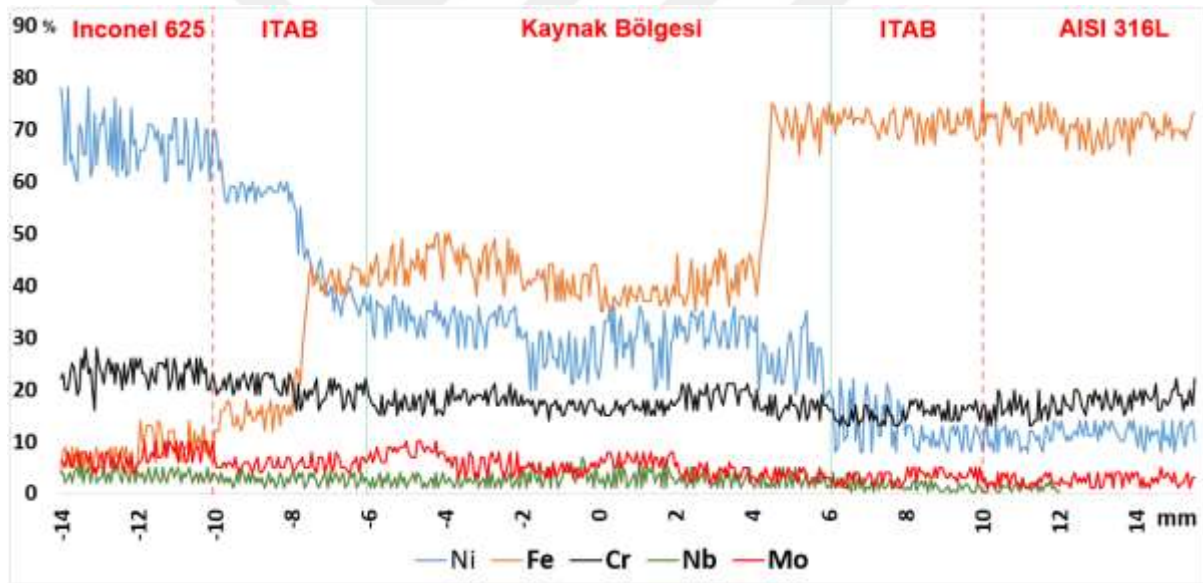


Şekil 4.19. SA/TIG kaynak yöntemi ve TIG 316L dolgu metali kullanılan deneydeki çizgisel haritalama analizi

Her iki malzemenin kimyasal özellikleri göz önüne alındığında düşük miktarda Mo elementi transferi Inconel 625 malzemesi tarafından kaynak bölgesine doğru gerçekleşmiştir. Inconel 625 malzemesi Nb içeriği ve buna karşın hem AISI 316L malzemesi içeriğinde hem de TIG 316L dolgu metali içerisinde Nb elementi bulunmadığı için, Nb elementi Inconel 625 malzemesi tarafından kaynak bölgesine ve AISI 316L malzemesi tarafına hareket etmiştir. Inconel 625 malzemesi içerisindeki Nb oranı % 4-5 civarı olduğu için bu hareket çizgisel haritada büyük çizgiler olarak görülmektedir. Fakat % 5’lik oran içerisinde değerlendirildiğinde büyük bir Nb elementi göçü gözlemlenmiştir. En sert element hareketleri Inconel 625 malzemesinin ITAB’ında gerçekleşmiştir. Bununla birlikte kaynak bölgesinin AISI 316L tarafı hariç diğer bölümlerinde elementlerin kararlı halde olduğu gözlemlenmiştir.

4.4.3. Sürekli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve Burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Çizgisel Haritalama Analizleri

Sürekli akım TIG kaynak yöntemi ve burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali ile yapılan kaynakta yapılan çizgisel haritalama analizi Şekil 4.20’de verilmiştir. Cr elementi transferi ihmal edilecek düzeyde olup, bu durumun malzemeler Cr içeriğinin çok yakın olmasından kaynaklı olacağı düşünülmektedir. Fe elementi transferi AISI 316L tarafından kaynak bölgesi ve Inconel 625 malzemesi tarafına doğru gerçekleşmiştir. Kaynak bölgesinin AISI 316L tarafında sert Fe transferi gerçekleşmiş ve bu bölgeden sonra kararlı olarak devam etmiştir. Inconel 625 ITAB’ında da sert Fe transferi gerçekleşerek Inconel 625 malzemesi ana metali boyunca da devam etmiştir. Bu duruma sadece burgu kaynak teli kullanımında rastlanması daha az homojen kaynak havuzunun olumsuz etkisi olarak yorumlanmıştır. Ana metal üzerinde gerçekleşen bu transferin Inconel 625 malzemesi mekanik özelliklerinin olumsuz olarak etkileyeceği ön görülmektedir. Inconel 625 malzemesi tarafından da Ni element göçü önce kaynak bölgesine ve ardından AISI 316L malzemesine doğru gerçekleşmiştir.

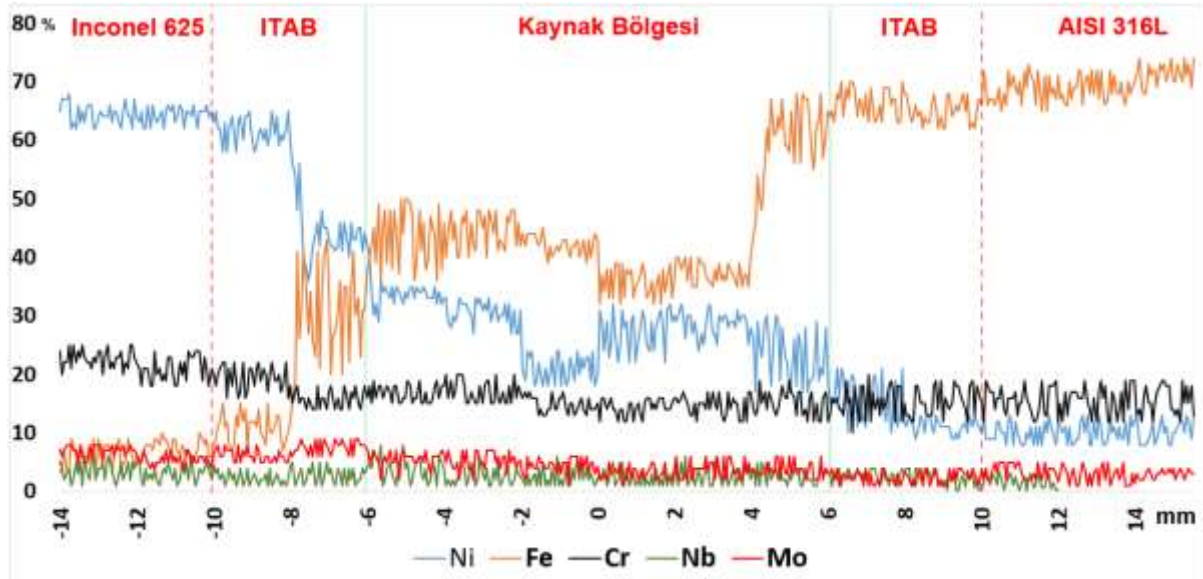


Şekil 4.20. SA/TIG kaynak yöntemi ve burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali kullanılan deneydeki çizgisel haritalama analizi

Inconel 625 malzemesi Nb içermektedir. Bununla birlikte dolgu metali içerisinde bulunan ERNiCr-3 dolgu metali de Nb içermektedir. Bu sebeple Nb transferi Inconel 625 ve kaynak bölgesi arasında gerçekleşmemiş, sadece kaynak bölgesinden AISI 316L tarafına doğru gerçekleşmiştir. Daha az homojen kaynak havuzunun olumsuz etkisi olarak Mo elementi bu kaynak deneyi boyunca özellikle kaynak bölgesinde kararsız bir hareket etmiştir. Inconel 625 malzemesini ITAB’ında Mo elementinde bir yükseltme eğilimi gözlemlenmiştir. Bu durum AISI 316L malzemesi ITAB’ında tersine dönerek düşüş eğilimi gözlemlenmiştir.

4.4.4. Darbeli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve ERNiCr-3 Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Çizgisel Haritalama Analizleri

Darbeli akım TIG kaynak yöntemi ve ERNiCr-3 dolgu metali ile yapılan kaynakta yapılan çizgisel haritalama analizi Şekil 4.21’de verilmiştir. Inconel 625 malzemesi içeriğindeki Cr içeriğinin nispeten fazla olmasından dolayı Inconel 625 malzemesinden kaynak bölgesine doğru Cr göçü gözlenmiştir. AISI 316L malzemesinde ise Cr göçü ihmal edilebilecek düzeyde gerçekleşmiştir.

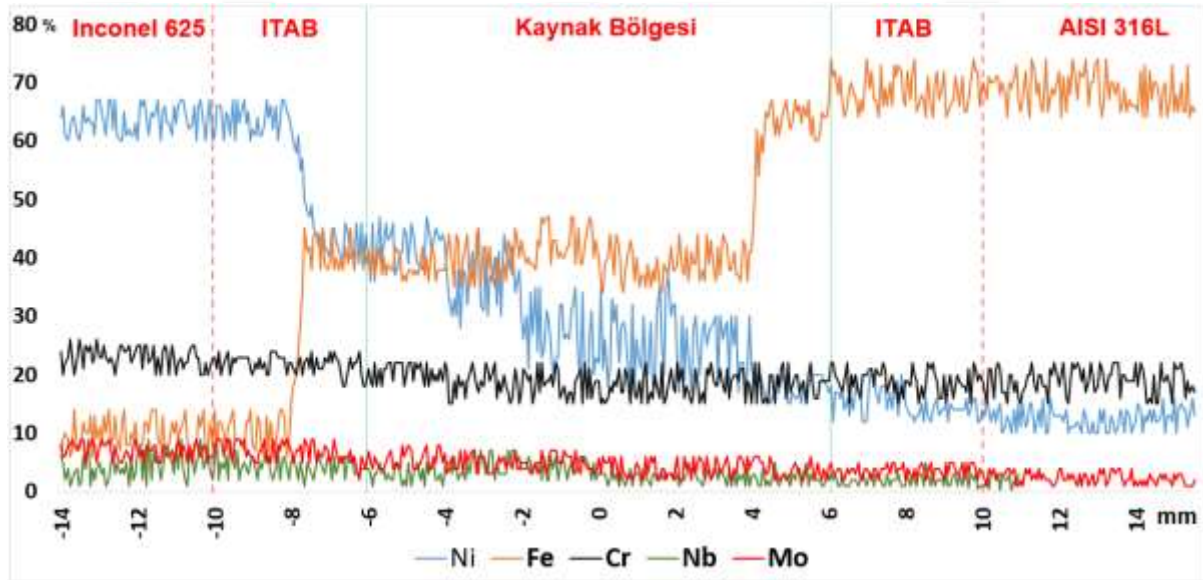


Şekil 4.21. DA/TIG kaynak yöntemi ve ERNiCr-3 dolgu metali kullanılan deneydeki çizgisel haritalama analizi

Inconel 625 malzemesinden kaynak bölgesine ve AISI 316L malzemesine doğru Ni element göçü gözlenmiştir. Bununla birlikte AISI 316L malzemesinden kaynak bölgesine ve Inconel 625 malzemesine doğru Fe elementi transferi gerçekleşmiştir. Ni elementi kararlı bir transfer gerçekleştirmiştir. Fakat bu durum Fe elementi için geçerli değildir. Özellikle Inconel 625 malzemesi ITAB’ında kararsız bir geçiş sağlanmıştır. Aynı zamanda kaynak bölgesinde kararsız element transferi gerçekleşmiştir. Bu kararsızlığa darbeli akımın olabileceği düşünülmektedir. ERNiCr-3 dolgu metali ve Inconel 625 malzemesi içeriğindeki Nb elementinin varlığı neticesinde önemli Nb transferi gerçekleşmemiştir. Bununla birlikte AISI 316L ana metalinde ilerledikçe Nb oranının azaldığı ve bir noktadan sonra hiç kalmadığı tespit edilmiştir. Kaynak bölgesinden AISI 316L malzemesine doğru Nb göçü gözlemlenmiştir. Mo element göçü Inconel 625 malzemesi bölgesinden kaynak bölgesine doğru gerçekleşmiştir. İncelenen kesit boyunca Inconel 625 malzemesinin ana metalinden başlamak üzere AISI 316L malzemesi için Mo göçü gözlenmemiştir. Malzemelerin kimyasal özelliklerine Mo elementinin miktarı birbirine çok yakın olmasına rağmen gözlenen bu hareketin darbeli akım neticesinde olduğu ön görülmektedir.

4.4.5. Darbeli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve TIG 316L Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Çizgisel Haritalama Analizleri

Darbeli akım TIG kaynak yöntemi ve TIG 316L dolgu metali ile yapılan kaynakta yapılan çizgisel haritalama analizi Şekil 4.22’de verilmiştir. Malzemelerdeki Cr elementi içeriğinden dolayı Cr element göçü ihmal edilebilecek düzeyde gerçekleşmiştir. TIG 316L dolgu metali ve AISI 316L malzemesi Nb ihtiva etmediği için Inconel 625 malzemesinden kaynak bölgesine ve AISI 316L malzemesine doğru Nb transferi gerçekleşmiştir. Fakat AISI 316L ana metal bölgesi başladıktan 1 mm sonrasındaki noktadan itibaren Nb elementinin varlığı tespit edilememiştir. Mo element göçü Inconel 625 malzemesinden kaynak bölgesine doğru ve AISI 316L malzemesine doğru gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

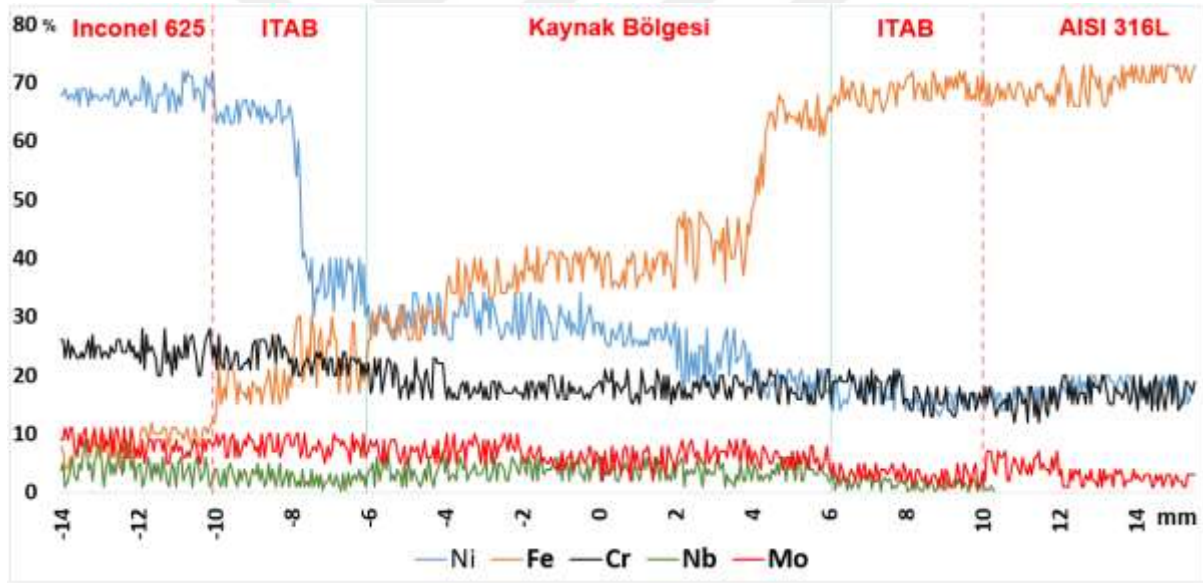


Şekil 4.22. DA/TIG kaynak yöntemi ve TIG 316L dolgu metali kullanılan deneydeki çizgisel haritalama analizi

Bununla birlikte Inconel 625 malzemesi tarafından AISI 316L malzemesine doğru Ni element göçü gerçekleşmiştir. Özellikle kaynak bölgesinde olmak kaydıyla kararsız bir transfer gerçekleşmiştir. Bunun sebebi TIG 316L dolgu metalinin Ni bakımından ERNiCr-3 malzemesine göre daha fakir olmasıyla açıklanabilir. Malzemenin kimyasal özelliklerin neticesinde de beklenildiği gibi AISI 316L malzemesinden Inconel 625 malzemesine doğru Fe göçü gerçekleşmiştir. Kaynak bölgesinin AISI 316L malzemesi tarafında ve Inconel 625 malzemesi ITAB’ında olmak üzere iki noktada sert transfer gerçekleşmiştir. En sert transferler Inconel 625 malzemesi ITAB’ında Fe ve Ni elementlerinin transferi ile kaynak bölgesinin AISI 316L malzemesine yakın olan bölgede gerçekleştiği görülmüştür. Her iki metalin ana metalinin de element transferi açısından beklenildiği gibi durağan hareketlerin olduğu tespit edilmiştir.

4.4.6. Darbeli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve Burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Çizgisel Haritalama Analizleri

Darbeli akım TIG kaynak yöntemi ve burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali ile yapılan kaynakta yapılan çizgisel haritalama analizi Şekil 4.23’de verilmiştir. Inconel 625 malzemesinden kaynak bölgesine doğru Ni transferi gerçekleşmiştir. Kaynak bölgesinden ise az miktarda Ni element göçü AISI 316L malzemesi bölgesine doğru gerçekleşmiştir. AISI 316L bölgesinden kaynak bölgesi ve Inconel 625 malzemesine doğru devamlı Fe transferi gerçekleşmiştir. Fakat bu transfer Inconel 625 malzemesi ana metalinde dahi devam etmiştir. Dolgu metalinden kaynaklı daha az homojen kaynak havuzunun bu duruma neden olduğu kanaati verilmiştir. Darbeli akım ile birlikte ERNiCr-3 dolgu metalinin daha kararlı Ni ve Fe göçünü sağladığı tespit edilmiştir. Inconel 625 ITAB’ı ve kaynak bölgesinin AISI 316L malzemesi tarafında iki noktada sert göç hareketi tespit edilmiştir. Bu durum hem sürekli akım hem de darbeli akım ile yapılan bütün deneylerde aynı sonucu verdiği için bu parametrelerin sert göçün gerçekleştirdiği noktalara etkisi olmadığı kanıtlanmıştır.



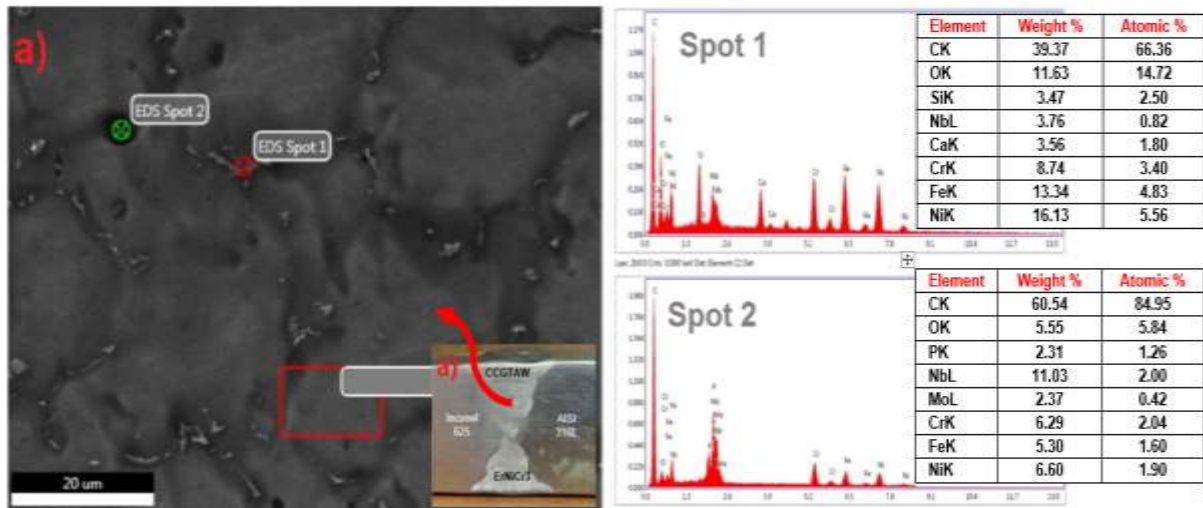
Şekil 4.23. DA/TIG kaynak yöntemi ve burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali kullanılan deneydeki çizgisel haritalama analizi

Burgu teli içerisinde bulunan ERNiCr-3 dolgu metali ve Inconel 625 malzemesi içerisinde bulunan Nb elementi bu element transferinin kaynak bölgesinden AISI 316L malzemesine doğru gerçekleşmesine sebep olmaktadır. Bununla birlikte Inconel 625 malzemesi tarafından kaynak bölgesine doğru Cr element göçü gerçekleşmiştir. Malzemelerin kimyasal özelliklerindeki değişiklikler neticesinde düşük miktarda Mo element göçü Inconel 625 malzemesi tarafından AISI 316L malzemesine doğru gerçekleşmiştir. Kimyasal kompozisyonundaki aralık değerlerinin minimum veya maksimum değerlere göre değişmesine göre element transferlerinde de bazı değişkenlikler gerçekleşmiştir.

4.5. SEM/EDAX Analizleri

4.5.1. Sürekli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve ERNiCr-3 Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki SEM/EDAX Analiz Sonuçları

Sürekli akım TIG kaynağı ve ERNiCr-3 dolgu metali ile yapıla kaynak deneyi sonuçlarına göre kaynak bölgesi incelemesinde alınan SEM görüntüleri ve EDAX analiz sonuçları Şekil 4.24'te gösterilmiştir. Kaynak bölgesi görüntülerinde beyaz renkli ikincil fazlar ve siyah çukurcuklar tespit edilmiştir. İkincil fazların malzemelerin korozyon direncini azalttığı bilinmektedir [70]. EDS Spot 1 noktası incelendiğinde ağırlıkça % 13,34 Fe ve % 16,13 Ni elementleri ile % 39,37 C elementinin birleşerek karbürler oluşturduğu görülmektedir. Bu yapıların içerisinde Laves fazları ve NbC karbürleri de bulunmaktadır. ERNiCr-3 malzemesinin içeriğindeki Nb ve Mo içeriğinden dolayı NbC oluşma ihtimali vardır [65]. EDS Spot 2'de ağırlıkça %11,03 Nb ve %60,54 C oranı tespit edilmiştir. Bu neticeye göre ESD Spot 1'deki sonuçlara göre daha net NbC tespit edilmiştir. Nb ihtiva eden Inconel 625 ve ERNiCr-3 dolgu metali kaynağında oluşan kaynak havuzunun, kaynak işlemi sonrasında katılaşma süresinde 1250 °C'de NbC karbürleri ($LE \rightarrow \gamma + NbC$) ve 1150 °C'de kırılğan Laves fazları ($LE \rightarrow \gamma + Laves\ phase$) oluşmaktadır [65]. Söz konusu durumda EDS Spot 1'de analiz edilen çökeltinin katılaşma sürecinde 1150°C civarında Laves fazı oluşturduğu, EDS Spot 2'de ise 1250 °C civarında NbC karbürleri oluşturduğu kanaatine varılmıştır.

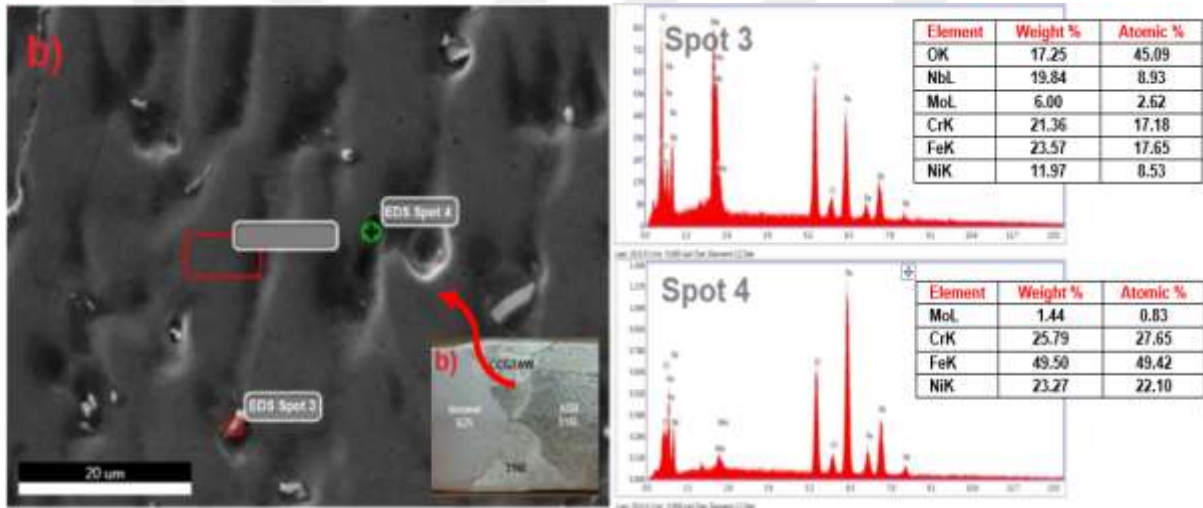


Şekil 4.24. SA/TIG kaynak yöntemi ve ERNiCr-3 dolgu metali kullanılan deneydeki SEM/EDAX analiz sonuçları

Görüntü genelinde periyodik sıklıklar ile beyaz parlak çökeltiler tespit edilmiştir. Çizgisel haritalama analizi ile sonuçlar karşılaştırıldığında da kaynak bölgesindeki Nb ve Ni elementlerinin transferi gerçekleştiği ve bu duruma katkı sağladığı söylenebilir.

4.5.2. Sürekli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve TIG 316L Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki SEM/EDAX Analiz Sonuçları

Sürekli akım TIG kaynağı ve TIG 316L dolgu metali ile yapıla kaynak deneyi sonuçlarına göre kaynak bölgesi incelemesinde alınan SEM görüntüleri ve EDAX analiz sonuçları Şekil 4.25'te gösterilmiştir. Görüntü yüzeyinde fazla miktarda çukurcuklar belirlenmiştir. Bu çukurcukların elektroliz işlemi kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Ramkumar, vd. [69] çalışmalarında da elektroliz işleminden kaynaklı çukurcuk tespit edilmiştir. Ayrıca Şekil 4.3b'de gösterilen makro yapı fotoğraflarında da bu çukurcuklar makro olarak dahi görülebilmektedir. Bununla birlikte görüntüde homojen olarak dağılmış beyaz parlak çökeltiler olduğu tespit edilmiştir. Fakat bu parlak yapılar ERNiCr-3 dolgu metali ile yapılan kaynak deneyine göre çok daha seyrek oranda gözlemlenmiştir. Beyaz parlak çözeltiler genelde istenmeyen ikincil fazların varlığı anlamına gelmektedir.

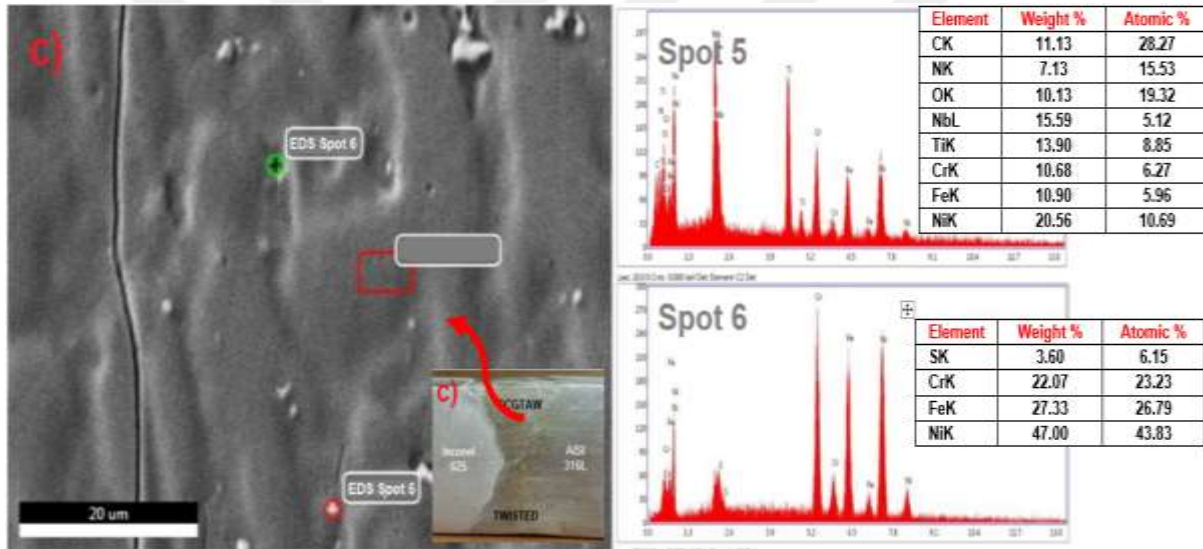


Şekil 4.25. SA/TIG kaynak yöntemi ve TIG 316L dolgu metali kullanılan deneydeki SEM/EDAX analiz sonuçları

TIG 316L dolgu metali içeriğinde Nb olmadığı daha önceki bölümlerde de aktarılmıştır. Fakat ESD Spot 3 incelendiğinde çok yüksek miktarda ağırlıkça % 19,84 oranında Nb içeren yapı tespit edilmiştir. Ağırlıkça en büyük elementler Cr, Fe ve Ni olarak tespit edilmiştir. Fakat analiz elementleri arasında C elementi bulunmamaktadır. Bu durumda NbC oluşumundan bahsedilemez. EDS Spot 4'te ciddi miktarda Fe elementi tespit edilmiştir. EDS Spot 4 yüzeyde görülen çukurcuklardan rastgele seçilenin analiz edilmesi amacıyla belirlenmiştir. Şekil 4.19'daki çizgisel haritalama analiz sonuçlarına göre de kaynak bölgesinde ağırlıkça ortalama % 45 civarında Fe elementi varlığı gösterilmiştir. Bu durum çukurcuk bölgesinde herhangi bir ikincil faz oluşturmadan sadece Mo, Cr, Fe ve Ni elementlerini içeren kararlı bir yapı olarak tespit edilmiştir.

4.5.3. Sürekli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki SEM/EDAX Analiz Sonuçları

Sürekli akım TIG kaynağı ve burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali ile yapıla kaynak deneyi sonuçlarına göre kaynak bölgesi incelemesinde alınan SEM görüntüleri ve EDAX analiz sonuçları Şekil 4.26'da gösterilmiştir. Malzeme yüzeyinde ERNiCr-3 ile yapılan kaynağa göre daha seyrek miktarda beyaz parlak yapılar tespit edilmiştir. Ayrıca çok nadir olmak kaydıyla elektroliz çukurcukları tespit edilmiştir. Bununla birlikte kaynak bölgesinin bir kısmında çatlak tespit edilmiştir. Çatlağın kaynak dikişinin % 40'lık bir bölümünde devam ettiği görülmüştür. İkincil fazlardan dolayı sert ve kırılğan yapıların oluşması bu çatlağın sebebi olacağı kanaatine varılmıştır. Mekanik testler ile karşılaştırıldığında daha net değerlendirme yapılacaktır. EDS Spot 5, kaynak üzerindeki beyaz parlak yapılardan rastgele şekilde belirlenmiştir.

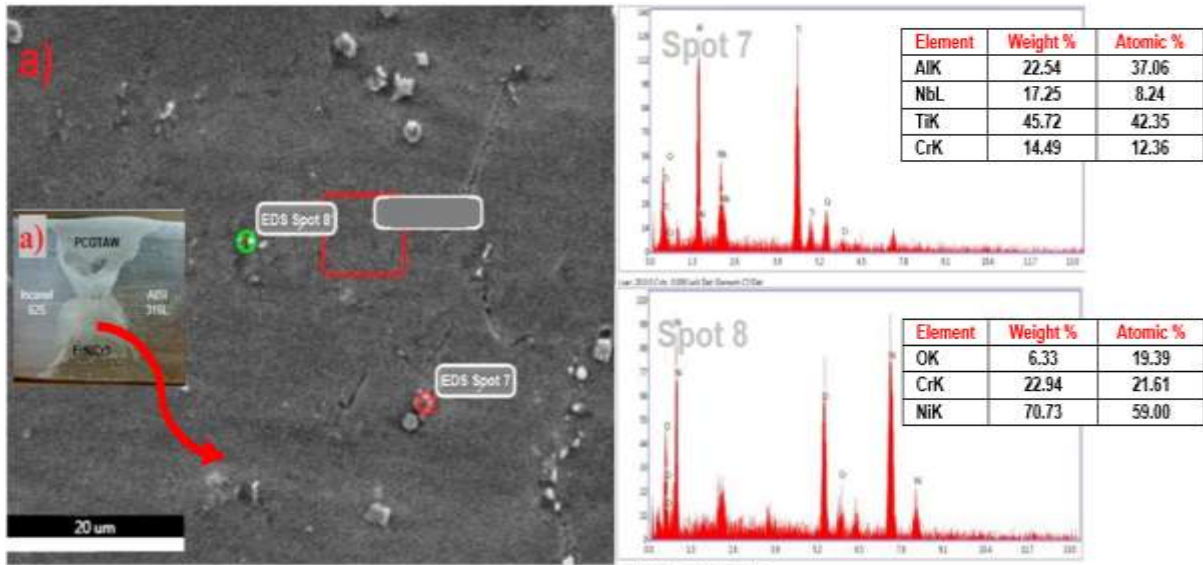


Şekil 4.26. SA/TIG kaynak yöntemi ve burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali kullanılan deneydeki SEM/EDAX analiz sonuçları

EDS Spot 5'te malzemelerin kimyasal analizlerinde verilen elementlerin yanı sıra Ti elementinin varlığı dikkat çekmektedir. Kaynak sürecindeki yüksek sıcaklıktan neticesinde Ti ve N elementlerinin aynı ortamda bulunması bu elementlerin TiN çökeltisi oluşturmasına neden olmaktadır [83]. Laves fazı oluştuğu zaman TiN çökeltisi etkisiz bir duruma gelmektedir. Yani malzemenin yapısına etkisi yansız hale gelir. ESD Spot5'te aynı zamanda ağırlıkça % 15,59 oranında Nb, % 10,68 oranında Cr, % 10,90 oranında Fe ve % 20,56 oranında Ni elementleri ikincil faz oluşumuna neden olmuştur. EDS Spot 6'da kaynak yüzeyinde belirlenen siyah çukurcuk analiz edilmiştir. Elementler incelendiğinde malzemelerin kimyasal yapılarında da bulunan ağırlıkça % 47,00 oranında Ni, % 27,33 oranında Fe, % 22,07 oranında Cr ve % 3,60 oranında S elementleri tespit edilmiştir. EDS Spot 6 analiz sonuçlarına göre bu noktanın kararlı bir kaynak yapısının olduğunu göstermektedir.

4.5.4. Darbeli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve ERNiCr-3 Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki SEM/EDAX Analiz Sonuçları

Darbeli akım TIG kaynağı ve ERNiCr-3 dolgu metali ile yapıla kaynak deneyi sonuçlarına göre kaynak bölgesi incelemesinde alınan SEM görüntüleri ve EDAX analiz sonuçları Şekil 4.27’de gösterilmiştir. Kaynak bölgesinde yoğun olarak beyaz parlak şekilde çökelti oluştuğu gözlemlenmiştir. Ayrıca kaynak bölgesinin bir bölümünde çatlak tespit edilmiştir. Bu çatlakların yoğun ikincil faz oluşumundan kaynaklandığı kanaatine varılmıştır. Elektroliz kaynaklı herhangi çukurcuk oluşumu tespit edilmemiş ve kaynak bölgesindeki oluşumlar net olarak gözlemlene bilinmiştir.

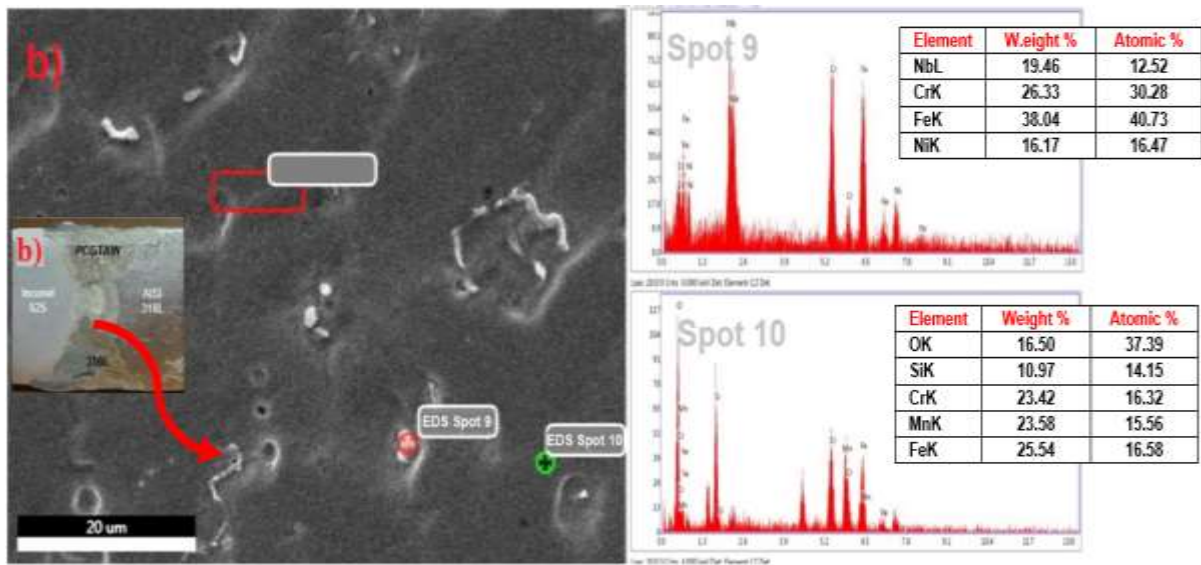


Şekil 4.27. DA/TIG kaynak yöntemi ve ERNiCr-3 dolgu metali kullanılan deneydeki SEM/EDAX analiz sonuçları

EDS Spot 7 oluşan çökeltilerden rastgele seçilmiştir. Nokta analizinde ağırlıkça % 45,72 Ti ve % 22,54 oranında Al tespit edilmiştir. Malzemelerin kimyasal analizde çok düşük miktarda olmasına rağmen kaynak bölgesinde çok yüksek oranda bu elementlerin tespit edilmesi kaynakta kullanılan torç, tezgâh gibi ekipmanların başka metal kaynağında da kullanılması neticesinde oluştuğu kanaatine varılmıştır. Bu durum bu tez çalışmasından çıkarılması gereken en önemli detaylardan biri olarak belirlenmiştir. Malzeme kaynak bölgesinin temizlenmesinin, kaynak mikro yapısına etkisini net bir şekilde ortaya koymuştur. Böyle bir durumda kaynak edilen parçaların özellikleri tamamen değişmekte ve zaten iki farklı metalin kaynağı esnasında homojen olmayan bir kaynak havuzuna daha farklı elementlerin dahil olması, kaynak bölgesinde bilinmez yapıların oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum kaynak bölgesinin mekanik özellikleri ile birlikte incelendiğinde daha detaylı değerlendirme yapılabilecektir. EDS Spot 8 incelendiğinde % 70,73 Ni ağırlıklı bir yapı olduğu tespit edilmiştir. Bu noktanın kararlı bir kaynak noktası olduğu belirlenmiştir.

4.5.5. Darbeli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve TIG 316L Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki SEM/EDAX Analiz Sonuçları

Darbeli akım TIG kaynağı ve TIG 316L dolgu metali ile yapıla kaynak deneyi sonuçlarına göre kaynak bölgesi incelemesinde alınan SEM görüntüleri ve EDAX analiz sonuçları Şekil 4.28'de gösterilmiştir. Kaynak bölgesi incelendiğinde çok fazla beyaz parlak ikincil faz oluşumu olduğu tespit edilmiştir. Bu parlak renkli ikincil fazlar kaynak bölgesi üzerinde genelde kümelenmiş şekilde görülmüştür. Bununla birlikte seyrek olmak kaydıyla siyah renkli noktalar halinde ikincil faz oluşumu da gözlemlenmiştir. Elektroliz kaynaklı herhangi bir çukurcuk tespit edilmemiştir. Yüzeyde herhangi bir çatlak tespit edilmemiştir.

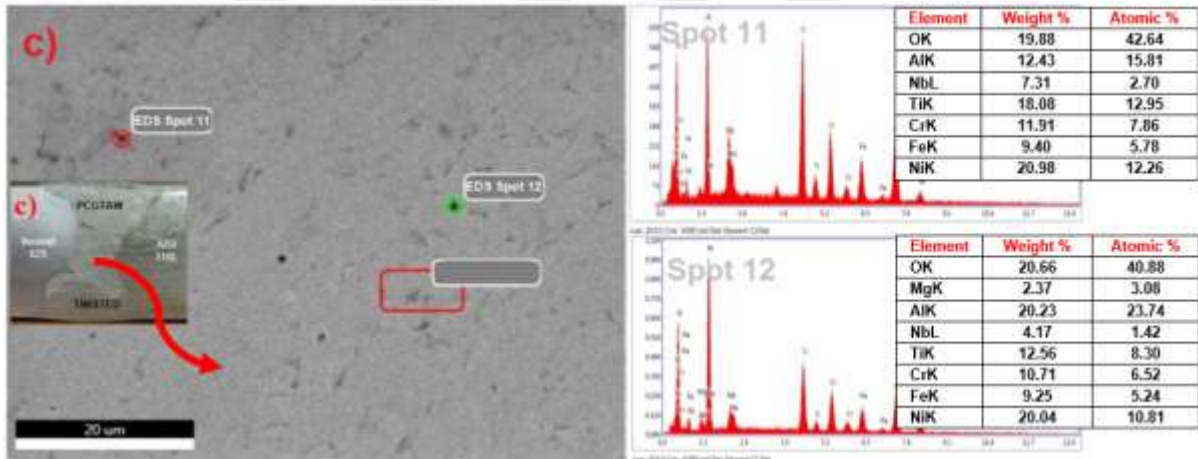


Şekil 4.28. DA/TIG kaynak yöntemi ve TIG 316L dolgu metali kullanılan deneydeki SEM/EDAX analiz sonuçları

EDS Spot 9 kaynak bölgesi üzerinde kümelenen beyaz parlak noktalardan rastgele seçilerek analiz edilmiştir. Element analiz sonuçlarına göre bu noktada ağırlıkça % 19,46 oranında Nb, % 26,33 oranında Cr, % 38,04 oranında Fe ve %16,17 oranında Ni elementinin varlığı tespit edilmiştir. TIG 316L dolgu teli içeriğinde Nb elementi içermemesine rağmen kaynak bölgesinde Nb elementi kaynaklı Laves fazlarının oluştuğu görülmüştür. Şekil 4.22.'de de görüldüğü gibi Inconel 625 malzemesinden kaynak bölgesine doğru Nb element transferi olduğu görülmüştür. Bu durumda Nb den yoksun dolgu metalinin kaynak üzerindeki olumsuz Laves fazı oluşumuna engel olmadığı görülmemiştir. EDS Spot 10 ise kaynak yüzeyinde bulunan siyah noktalardan birisi olarak seçilmiştir. Yapılan analizde ağırlıkça % 10,97 oranında yüksek miktarda Si tespit edilmiştir. Yüksek silisyum (Si) ve düşük karbon (C) içeriğine de sahipse, farklı bir çökelti olarak M_6C karbürleri oluşmaktadır [54]. Analiz sonuçlarına göre incelenen noktada M_6C karbürü tespit edilmiştir. Ayrıca ağırlıkça % 23,42 oranında Cr ve % 25,54 oranında Fe tabanlı ikincil fazlarında oluştuğu görülmüştür.

4.5.6. Darbeli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki SEM/EDAX Analiz Sonuçları

Darbeli akım TIG kaynağı ve burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali ile yapıla kaynak deneyi sonuçlarına göre kaynak bölgesi incelemesinde alınan SEM görüntüleri ve EDAX analiz sonuçları Şekil 4.29'da gösterilmiştir. Kaynak bölgesi görüntüsünde daha önceki testlerde görülen beyaz parlak çökeltilere rastlanmamıştır. Çökeltiler siyah renkli noktasal ve çizgisel olarak görünmektedir. Fakat bu siyah çökeltiler homojen ve sık haldedir. EDS Spot 11 Laves faz görüntüsü veren çökelti grubunun içinden seçilmiştir. Burgu dolgu metalinin her iki malzemenin elementlerini içerdiği için bu bölgedeki çökeltiler element çeşitliliği açısından zengindir. EDS Spot 1'de dikkat çeken detaylardan birisi darbeli akım TIG kaynağı ve ERNiCr-3 dolgu metali yapılan kaynakta tespit edilen Al ve Ti elementlerinin bu noktada da tespit edilmesidir. Nb elementinin C elementinden bağımsız bir şekilde Laves fazı oluşturduğu görülmektedir. Aynı zamanda Ni ve Ti elementleri açısından zengin bir çökeltidir.



Şekil 4.29. DA/TIG kaynak yöntemi ve burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali kullanılan deneydeki SEM/EDAX analiz sonuçları

EDS Spot 12 incelendiğinde de element açısından kaynak bölgesinde olması beklenmeyen Al ve Ti elementlerinin varlığı tespit edilmiştir. Bu elementlerin varlığı daha önce de bahsedildiği gibi kaynak teçhizatın bu elementleri içeren başka malzemelerin kaynağında kullanılması ile açıklanmaktadır. Bu durum kaynak sürecinde kullanılacak olan teçhizatın sadece kaynak yapılacak malzeme için kullanılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Eğer kaynak edilecek malzemeler değiştirilecekse teçhizatın mutlaka temizlenmesi gerekmektedir. Söz konusunu farklı elementler kaynak bölgesinin yapısını olumsuz etkileyebilmektedir. Bağımsız çökeltilerden rastgele seçilen EDS Spot 12'de de Ni ve Cr elementleri açısından zengin çökeltiler tespit edilmiştir.

SEM/EDAX analizlerinden elde edilen neticelerin özet hali deney sıralamasına göre Tablo 4.2.'de verilmiştir.

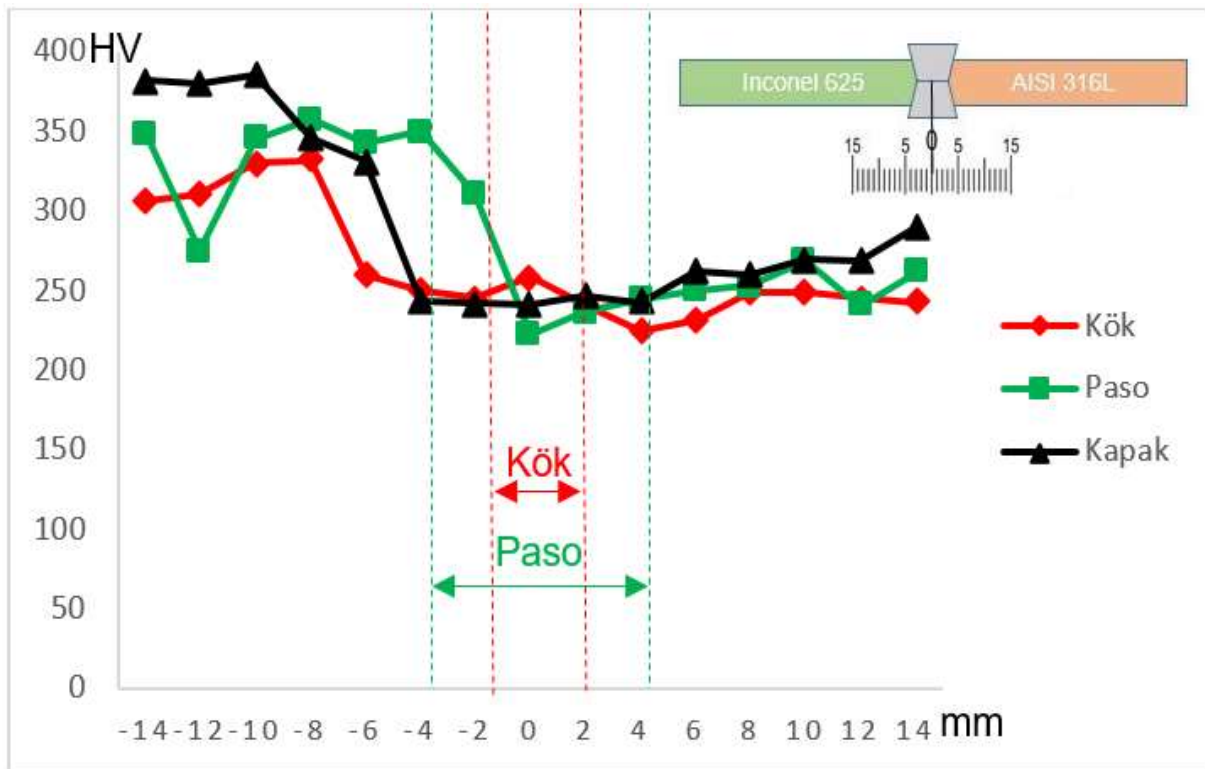
Tablo 4.2. SEM/EDAX analizleri özetleri

Deney	SEM/EDAX sonuçları
1. SA/TIG – ERNiCr-3	Zararlı Laves fazları ve NbC karbürleri tespit edilmiştir. Buna rağmen ikincil fazların yoğunluğu az olup diğer bölgelerin kararlı yapı oluşturduğu tespit edilmiştir.
2. SA/TIG – TIG 316L	Nb bazlı ikincil fazlar tespit edilmesinin haricinde genel anlamda kararlı yapı sergilemiştir.
3. SA/TIG – ERNiCr-3 + TIG 316L	Yoğunluğu az olmakla birlikte zararlı Laves fazları tespit edilmiştir. Bununla birlikte Ti ve N elementlerinin bileşiği sonucu TiN ikincil fazı oluşmuştur. Kaynak bölgesine dışarıdan malzeme bulaşığı olduğu tespit edilmiştir.
4. DA/TIG – ERNiCr-3	Al ve Ti elementi içeren çok kararsız yapı tespit edilmiştir. Tüm SEM/EDAX testleri içerisinde en kötü sonuçlar bu testte elde edilmiştir. Kaynak ortamına dışarıdan malzeme bulaşığı olduğu tespit edilmiştir. Darbeli akımın ikicil faz ve çökelti oluşumunu azalttığı tespit edilmiştir.
5. DA/TIG – TIG 316L	Zararlı Laves fazları tespiti yapılmıştır. Diğer elementlerin yanı sıra yüksek Si ve düşük C varlıkları neticesinde M_6C karbürü oluşmuştur. Darbeli akımın ikicil faz ve çökelti oluşumunu azalttığı tespit edilmiştir.
6. DA/TIG – ERNiCr-3 + TIG 316L	Al ve Ti elementlerine rastlanmıştır. Yüzeyde çok yoğun çökelti oluşumu gözlenmemiştir. Bütün SEM/EDAX analizleri içerisinde en iyi sonuçların alındığı deney olmuştur. Darbeli akımın ikicil faz ve çökelti oluşumunu azalttığı tespit edilmiştir.

4.6. Sertlik Test Sonuçları

4.6.1. Sürekli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve ERNiCr-3 Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Mikro Sertlik Sonuçları

Sürekli akım TIG kaynağı yöntemi ve ERNiCr-3 dolgu metali kullanılarak yapılan kaynak neticesinde yapılan Vicker's mikro sertlik analiz sonuçları Şekil 4.30'da verilmiştir. Kaynak bölgesinin ortası merkez kabul edilmiş ve her iki metal yönüne doğru 14'er mm'lik alanda sertlik taraması yapılmıştır. Bu sertlik taraması kök, paso olmak üzere toplam iki bölümde incelenmiştir.

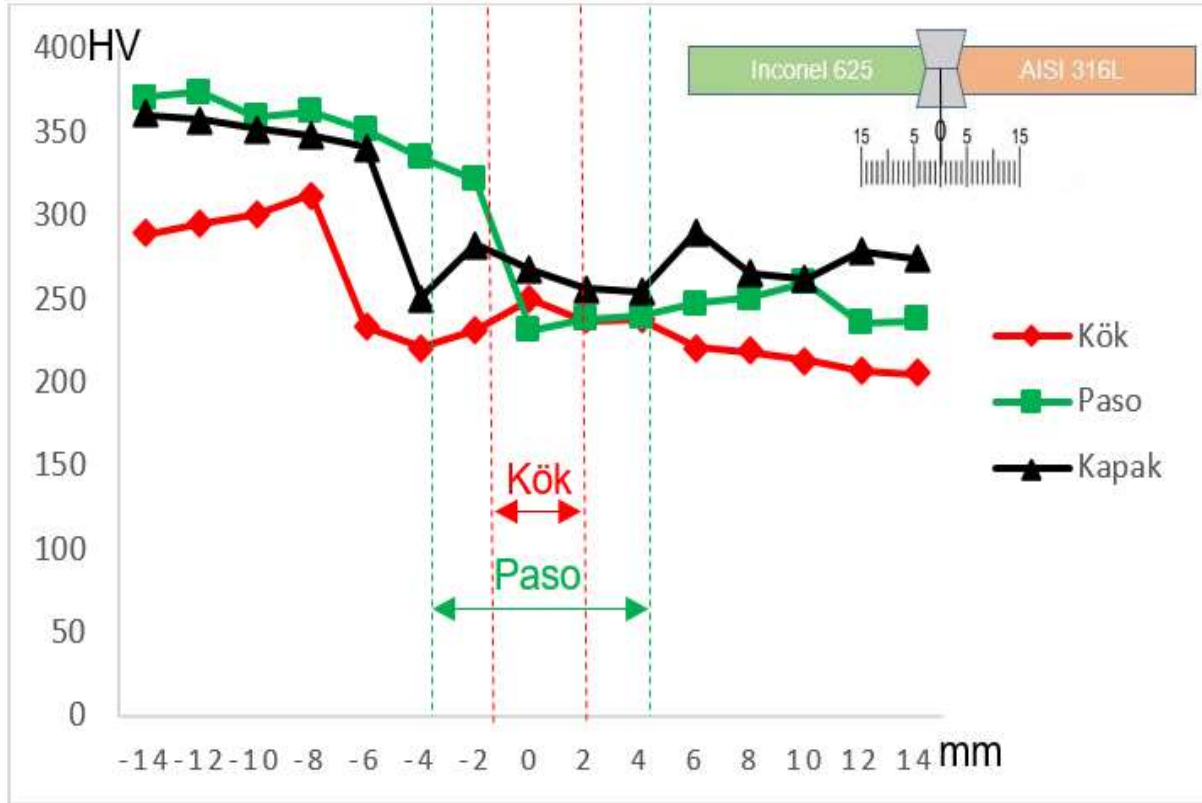


Şekil 4.30. SA/TIG kaynak yöntemi ve ERNiCr-3 dolgu metali kullanılan deneydeki mikro sertlik analiz sonuçları

Minimum sertlik değeri 223,1 HV ile pasoda tespit edilmiştir. Maksimum sertlik değeri ise 385,3 HV ile kapak pasosunda tespit edilmiştir. Alınan bütün sertlik değerlerinin ortalaması 281,1 HV olarak hesaplanmıştır. Kök pasosunun sertlik değeri ortalaması 265,2 HV, paso kısmının sertlik değeri ortalaması 287,2 HV ve kapak pasosunun sertlik değeri ortalaması 292,77 HV olarak hesaplanmıştır. Sertlik değerleri kök pasodan kapak pasoya gittikçe sertlik değerlerinin arttığını göstermektedir. Kök pasosun üzerine yapılan dolgu ve kapak pasolarında tekrar aynı ısı girdisi neticesinde kaynak havuzundaki elementlerin karbür yapılar oluşturmasının etkileri olarak her pasonun sertliği artırması olarak yorumlanmaktadır.

4.6.2. Sürekli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve TIG 316L Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Mikro Sertlik Sonuçları

Sürekli akım TIG kaynağı yöntemi ve TIG 316L dolgu metali kullanılarak yapılan kaynak neticesinde yapılan Vicker's mikro sertlik analiz sonuçları Şekil 4.31'de verilmiştir. Kaynak bölgesinin ortası merkez kabul edilmiş ve her iki metal yönüne doğru 14'er mm'lik alanda sertlik taraması yapılmıştır. Bu sertlik taraması kökve paso olmak üzere toplam iki bölümde incelenmiştir.

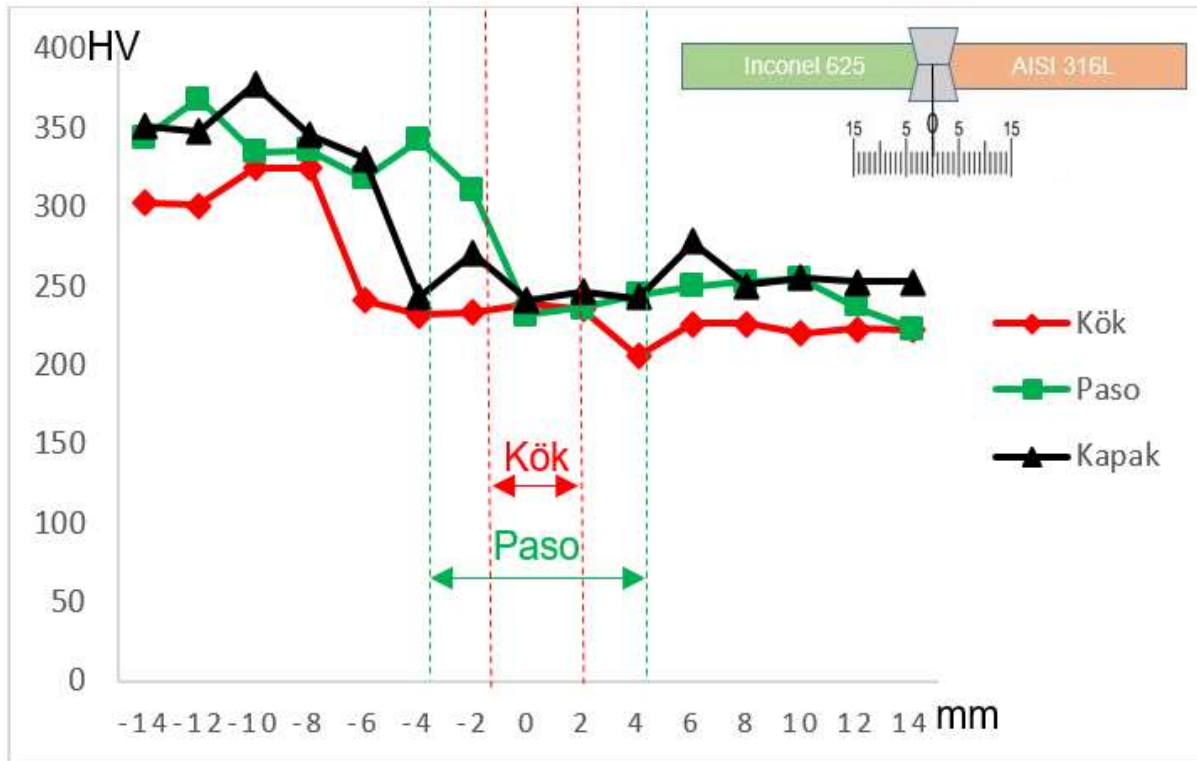


Şekil 4.31. SA/TIG kaynak yöntemi ve TIG 316L dolgu metali kullanılan deneydeki mikro sertlik analiz sonuçları

Minimum sertlik değeri 205,35 HV ile kök pasosunda tespit edilmiştir. Maksimum sertlik değeri ise 374,25 HV ile dolgu pasosunda tespit edilmiştir. Alınan bütün sertlik değerlerinin ortalaması 278,56 HV olarak hesaplanmıştır. Kök pasosu incelendiğinde ortalama sertlik değeri 245,1 HV, dolgu pasosu ortalama sertlik değeri 294,39 HV ve kapak pasosu ortalama sertlik değeri 296,20 HV olarak hesaplanmıştır. Sertlik değerleri kök pasodan kapak pasoya gittikçe sertlik değerlerinin arttığını göstermektedir. Pasolardaki sertlik değerleri SEM/EDAX analizinde oluşan ikincil fazların sertliği olarak yorumlanmaktadır. Sürekli akım ve TIG 316L dolgu metali ile elde edilen kök pasosu sertliği daha kırılğan yapılar oluşturan ERNiCR-3 dolgu metaline göre daha düşüktür.

4.6.3. Sürekli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Mikro Sertlik Sonuçları

Sürekli akım TIG kaynağı yöntemi ve burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali kullanılarak yapılan kaynak neticesinde yapılan Vicker's mikro sertlik analiz sonuçları Şekil 4.32'de verilmiştir. Kaynak bölgesinin ortası merkez kabul edilmiş ve her iki metal yönüne doğru 14'er mm'lik alanda sertlik taraması yapılmıştır. Bu sertlik taraması kök ve paso olmak üzere toplam üç bölüme incelenmiştir.

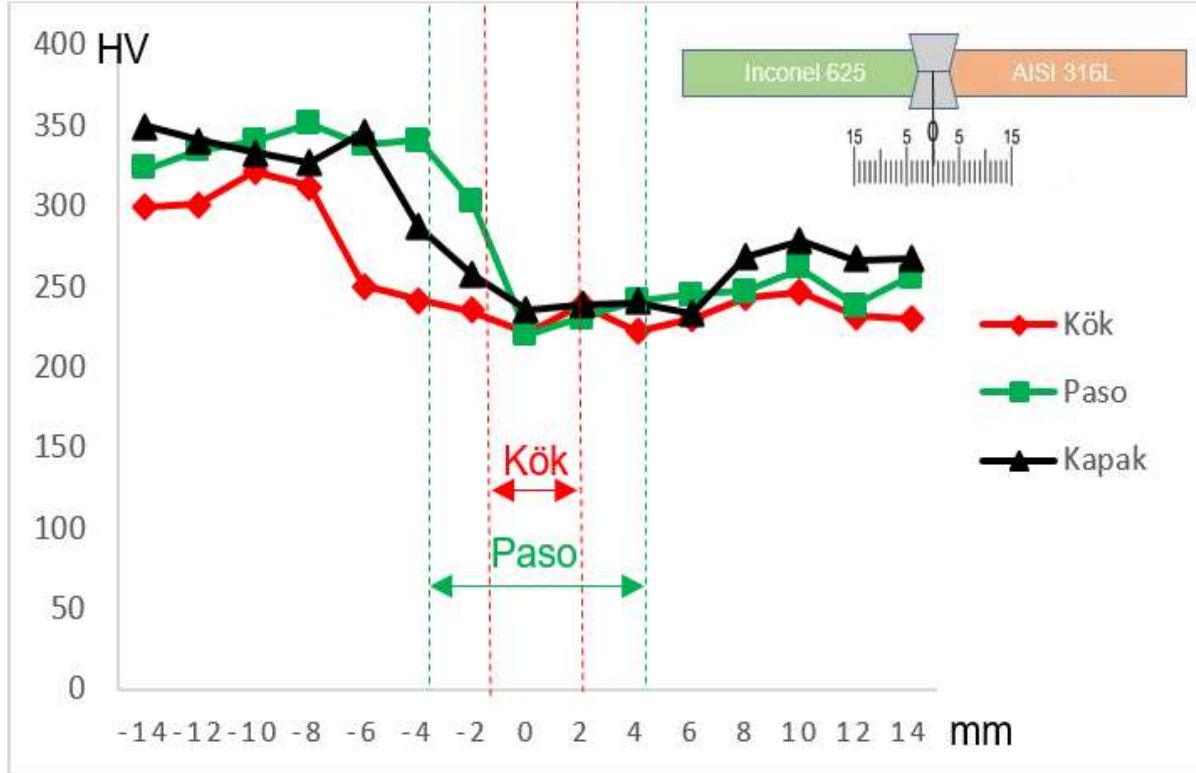


Şekil 4.32. SA/TIG kaynak yöntemi ve burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali kullanılan deneydeki mikro sertlik analiz sonuçları

Bütün sertlik ölçümleri sonucunda elde edilen ortalama değer 274,27 HV olarak hesaplanmıştır. Minimum sertlik değeri 205,73 HV ile kök pasosunda tespit edilmiştir. Maksimum sertlik değeri ise 378,4 HV ile kapak pasosunda tespit edilmiştir. Pasolardaki ortalama sertlik değerleri incelendiğinde kök pasosunda 250,85 HV, dolgu pasosunda 285,86 HV ve kapak pasosunda 286,10 HV değerleri hesaplanmıştır. Sertlik değerleri kök pasodan kapak pasoya gittikçe sertlik değerlerinin arttığını göstermektedir. ERNiCr-3 dolgu metali kullanılarak yapılan kaynak ile karşılaştırıldığında kök pasosu sertlik değeri daha azdır ve kırılgan değildir. Dolgu telinin burgu olarak kullanılması ERNiCr-3'ün sertlik ve kırılganlığına olumsuz etkilerini azalttığı gözlemlenmiştir.

4.6.4. Darbeli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve ERNiCr-3 Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Mikro Sertlik Sonuçları

Darbeli akım TIG kaynağı yöntemi ve ERNiCr-3 dolgu metali kullanılarak yapılan kaynak neticesinde yapılan Vicker's mikro sertlik analiz sonuçları Şekil 4.33'de verilmiştir. Kaynak bölgesinin ortası merkez kabul edilmiş ve her iki metal yönüne doğru 14'er mm'lik alanda sertlik taraması yapılmıştır. Bu sertlik taraması kök ve paso olmak üzere toplam üç bölümde incelenmiştir.

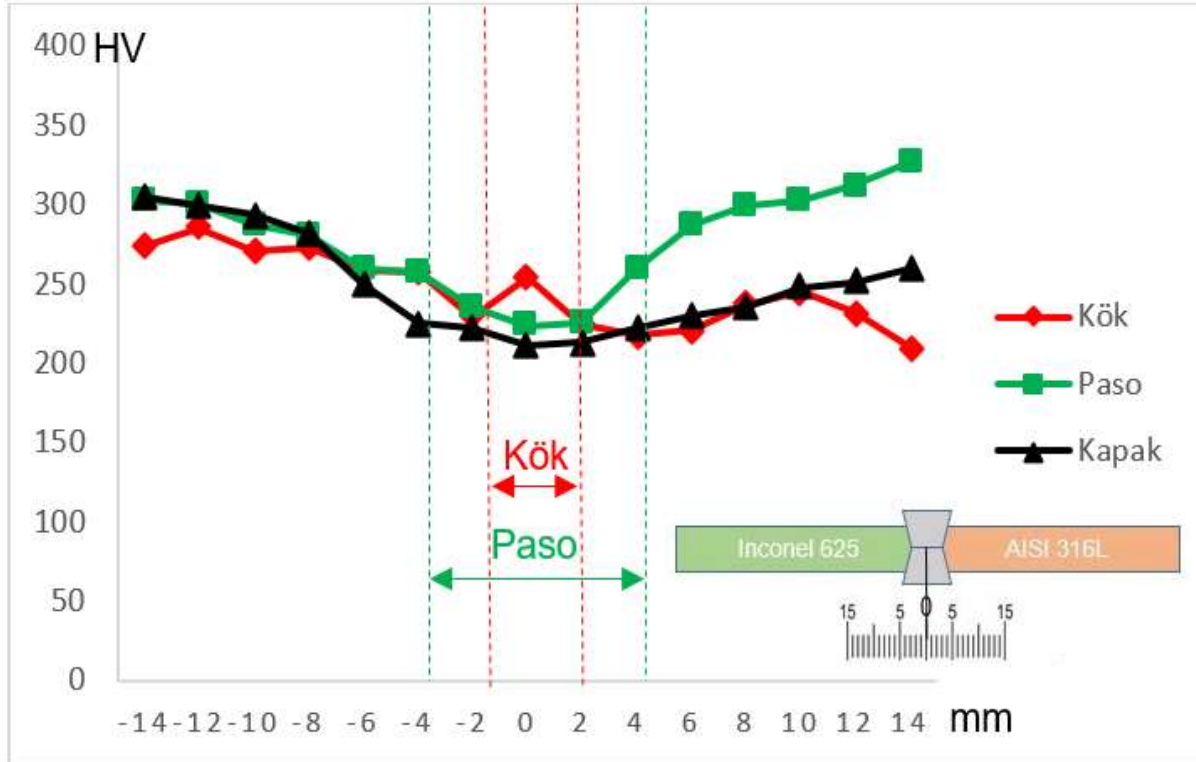


Şekil 4.33. DA/TIG kaynak yöntemi ve ERNiCr-3 dolgu metali kullanılan deneydeki mikro sertlik analiz sonuçları

Minimum sertlik değeri 220,86 HV ile dolgu pasosunda tespit edilmiştir. Maksimum sertlik değeri ise 351,47 HV ile yine dolgu pasosunda tespit edilmiştir. Bütün sertlik değerlerinin ortalaması 275,08 HV olarak hesaplanmıştır. Kök pasosunda ortalama sertlik değeri 255,34 HV, dolgu pasosunda ortalama sertlik değeri 284,97 HV ve kapak pasosundaki ortalama sertlik değeri 284,93 olarak tespit edilmiştir. Sertlik değerleri sürekli akım kaynaklarında görüldüğü gibi kökten pasoya doğru gittikçe artmamıştır. Dolgu pasosu ile kapak pasosu sertlik değerleri ortalaması aynı değer olarak hesaplanmıştır. Sürekli akım ve darbeli akımın sertlik ve kırılmalık üzerine etkisi incelendiğinde, darbeli akımın ikincil fazların oluşumunu belirli oranda önlediği ve ikincil fazlar nedeniyle tespit edilen sertlik değerlerinin azaldığı belirtilebilir.

4.6.5. Darbeli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve TIG 316L Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Mikro Sertlik Sonuçları

Darbeli akım TIG kaynağı yöntemi ve TIG 316L dolgu metali kullanılarak yapılan kaynak neticesinde yapılan Vicker's mikro sertlik analiz sonuçları Şekil 4.34'de verilmiştir. Kaynak bölgesinin ortası merkez kabul edilmiş ve her iki metal yönüne doğru 14'er mm'lik alanda sertlik taraması yapılmıştır. Bu sertlik taraması kök, paso ve kapak olmak üzere toplam üç bölümde incelenmiştir.

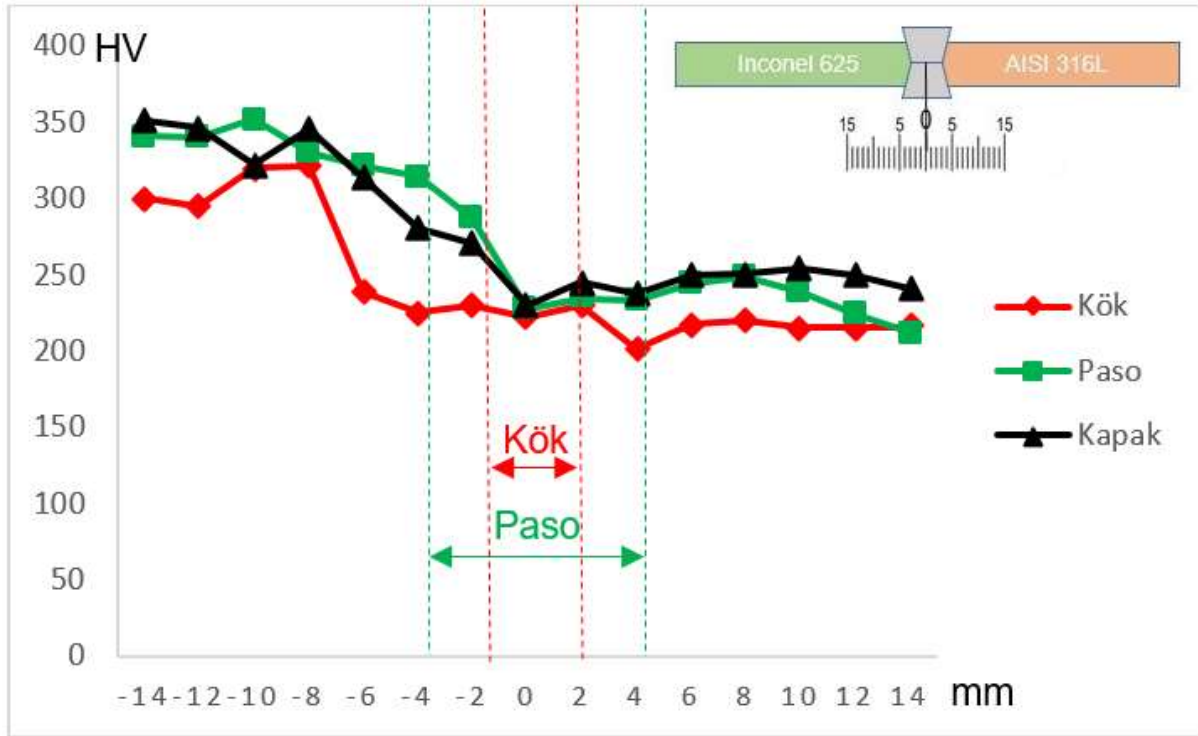


Şekil 4.34. DA/TIG kaynak yöntemi ve TIG 316L dolgu metali kullanılan deneydeki mikro sertlik analiz sonuçları

Minimum kaynak sertlik değeri 210,25 HV ile kök pasosunda görülmüştür. Maksimum kaynak sertlik değeri ise 326,78 HV ile dolgu pasosunda görülmüştür. Bütün sertlik ölçümleri ortalaması ise 258,02 HV olarak hesap edilmiştir. Kök pasosu incelendiğinde ortalama sertlik değeri 246,33 HV, dolgu pasosunda ortalama sertlik değeri 277,57 HV ve kapak pasosu ortalama sertlik değeri 250,17 HV olarak ölçülmüştür. Kök ve kapak paso sertlik değerleri birbirlerine çok yakın iken, dolgu pasosunun sert olduğu görülmüştür. Aynı dolgu metalinin sürekli akım ile kullanılması ile oluşan sertlik değerleri darbeli akıma göre çok daha yüksektir. Bu numunede darbeli akımın ikincil fazlar üzerinde olumlu etkisi kanıtlanmıştır. Dolgu pasosunda en yüksek sertlik değerinin tespit edilmesi ilerleme hızı-akım oranının doğru olmadığı ile açıklanabilir.

4.6.6. Darbeli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Mikro Sertlik Sonuçları

Darbeli akım TIG kaynağı yöntemi ve burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali kullanılarak yapılan kaynak neticesinde yapılan Vicker's mikro sertlik analiz sonuçları Şekil 4.35'de verilmiştir. Kaynak bölgesinin ortası merkez kabul edilmiş ve her iki metal yönüne doğru 14'er mm'lik alanda sertlik taraması yapılmıştır. Bu sertlik taraması kök ve paso olmak üzere toplam iki bölümde incelenmiştir.



Şekil 4.35. DA/TIG kaynak yöntemi ve burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali kullanılan deneydeki mikro sertlik analiz sonuçları

Minimum kaynak sertlik değeri 201,57 HV ile kök pasoda tespit edilmiştir. Maksimum sertlik değeri ise 352,3 HV ile dolgu pasosunda tespit edilmiştir. Bütün kaynak sertlik ölçümleri ortalaması 267,14 HV olarak hesaplanmıştır. Pasoların ortalama sertlik değerleri incelendiğinde; kök pasosunda 244,78 HV olarak, dolgu pasosunda 276,95 HV olarak ve kapak pasosunda 279,70 HV olarak hesaplanmıştır. Bu deney sonucunda da kök pasosundan kapak pasosuna doğru sertlik değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Aynı dolgu metalinin sürekli akım TIG kaynak yöntemi ile yapılan deney sonuçları ile karşılaştırıldığında da sertlik değerlerinin ikincil fazlardan kaynaklı düştüğü gözlemlenmiştir. Bununla birlikte kaynak sertliğinin kök pasondan kapak pasosuna doğru arttığı tespit edilmiştir.

4.7. Çekme Testi Sonuçları

4.7.1. Sürekli Akım TIG Kaynağı Çekme Testi Sonuçları

Sürekli akım TIG kaynak yöntemi ve a)ERNiCr-3, b) TIG 316L, c) Burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metalleri ile yapılan kaynaklı parçaların çekme testi görüntüleri Şekil 4.36'da gösterilmiştir. Testlerden elde edilen akma ve kopma mukavemetleri ile birlikte % uzama ve kopma bölgesi bilgilerini içeren bilgiler Tablo 4.3'de verilmiştir. Bütün numuneler Zwick-Z050 marka üniversal çekme test cihazında oda sıcaklığında test edilmiştir. ERNiCr-3 dolgu metali ile yapılan çekme testi sonuçlarına göre kopma AISI 316L malzemesinin ana metal bölgesinde meydana gelmiştir. Akma mukavemeti 442 MPa olarak ve kopma mukavemeti ise 674 MPa olarak tespit edilmiştir. Kopma sonrası uzama % 34 olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.36. SA/TIG kaynak yöntemi ile yapılan deneylerin çekme testi sonuçları a) ERNiCr-3 ile kaynatılmış, b) TIG 316L ile kaynatılmış ve c) Burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) ile kaynatılmış

TIG 316L dolgu metali ile yapılan kaynağın test sonuçlarında kopma kaynak dikişinin üzerinde kaynak merkezinde gerçekleşmiştir. Akma mukavemeti 389 MPa olarak ve kopma mukavemeti ise 529 MPa olarak hesaplanmıştır. Test sonucundaki uzama ise % 13 olarak ölçülmüştür. Burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali yapılan kaynakta ise akma mukavemeti 437 MPa olarak, kopma mukavemeti ise 567 MPa olarak ölçülmüştür. Burgu dolgu metali ile yapılan kaynak numunesinin çekme testi sonucu kopma kaynak merkezinde gerçekleşmiştir. Burgu kaynak metali ile yapılan kaynağın çekme testi sonuçlarında akma ve kopma mukavemetleri ile uzama değerleri, TIG 316L dolgu metali ile yapılan kaynağın değerlerine göre daha yüksektir. En yüksek çekme testi sonuçları ERNiCr-3 dolgu metali yapılan kaynakta tespit edilmiştir. Burgu dolgu metali de ağırlıkça %50 ERNiCr-3 içermesi ve sadece TIG 316L dolgu metali kaynak sonuçlarına göre daha yüksek mekanik özelliklere sahip olması ERNiCr-3 dolgu metalinin etkisi olarak yorumlanmıştır.

Tablo 4.3. SA/TIG kaynak yöntemi uygulanan numunelerin çekme deneyi sonuçları

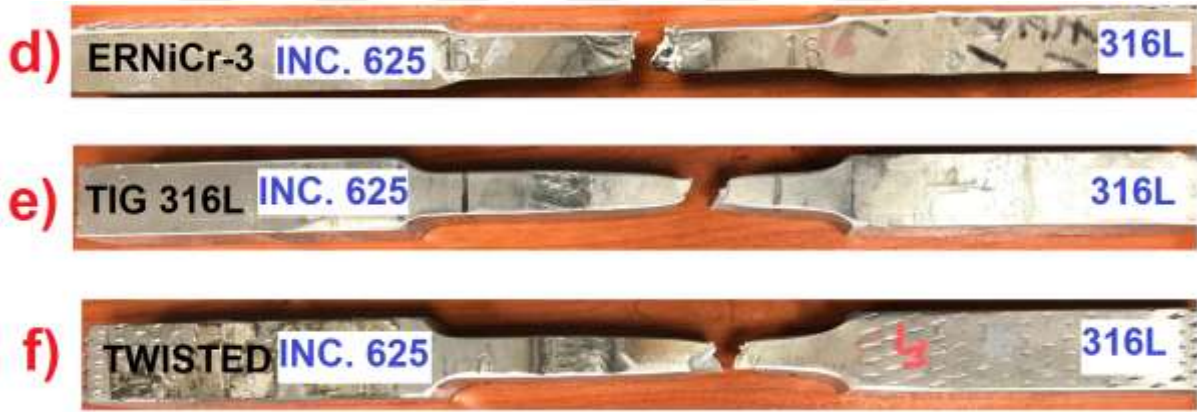
Kaynak Parçası	Akma Mukavemeti (MPa)	Kopma Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)	Kırılma Bölgesi
ERNiCr-3	442	674	34	AISI 316L
TIG 316L	389	529	13	KB
Burgu	437	567	19	KB

Bununla birlikte Inconel 625 malzemesinin kopma mukavemeti değer aralığının 827-1030 MPa [32], AISI 316L malzemesinin kopma mukavemeti değer aralığının ise 520-670 MPa [39] olduğu Tablo 2.1 ve Tablo 2.3'te verilmiştir. Verilen bu değerler bilgisi dahilinde Inconel 625 malzemesinin mekanik özelliklerinin AISI 316L malzemesine göre daha üstün olduğu anlaşılmaktadır. Bu durumda kaynak bölgesinde kopma gerçekleşmemesi durumunda AISI 316L malzemesinin ana metalinde kopma oluşacağı ön görülen bir durumdur. Nitekim ERNiCr-3 dolgu metali ile yapılan kaynak numunesinin çekme testi sonucunda kopma AISI 316L malzemesi ana metalinde gerçekleşmiştir. Test sonucunda tespit edilen kopma mukavemetinin 674 MPa olduğu göz önüne alınınca AISI 316L malzemesinin maksimum kopma direncinden daha yüksek olması sonucu destekleyen bir bilgidir. Bir diğer taraftan burgu dolgu metali ile yapılan kaynak sonucunda kopma kaynak bölgesinde meydana gelmesine rağmen % 19 değerinde uzama, TIG 316L dolgu malzemesi ile yapılan kaynak sonucunda uzama % 13 olarak tespit edilmiştir. Bu değerler kaynak bölgesinde meydana gelen kopmalar açısından yüksek değer olarak kabul edilebilir. AISI 316L malzemesinin maksimum kopma değerinin 670 MPa olarak bilinmesi ve kopma sonucunda elde edilen değerlerin 567 MPa ve 529 MPa olarak tespit edilmesi, AISI 316L malzemesinin kopma mukavemetinin bu değerlerden daha yüksek olduğunu göstermektedir. ERNiCr-3 dolgu metali ile SEM/EDAX analizinde tespit edilen ikincil fazların mekanik özelliklere olumsuz etkisi tespit edilmemiştir.

Çekme testi sonrası kaynak bölgesinde gerçekleşen kopma yüzeylerinin makro yapı incelemelerinde; hem TIG 316L dolgu metali hem de burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali kullanılan numunedeki kırılma yüzeyinde herhangi bir boşluk veya kabarcık tespit edilmemiştir. TIG 316L dolgu metali numunesinde kaynak bölgesinin AISI 316L tarafına daha yakın bir nokta kırılma gerçekleşirken, burgu dolgu metalindeki kaynak bölgesi kırılması merkezden gerçekleşmiştir. Malzemenin mekanik özelliklerinden dolayı uzama AISI 316L malzemesi tarafında daha fazla olmak üzere homojen plastik deformasyon gözlemlenmiştir. ERNiCr-3 dolgu metali kullanılarak yapılan testteki kırılma bölgesi incelendiğinde malzemenin sünek şekilde koptuğu ve kopan yüzeyin her türlü deformasyondan uzak olduğu tespit edilmiştir.

4.7.2. Darbeli Akım TIG Kaynağı Çekme Testi Sonuçları

Darbeli akım TIG kaynak yöntemi ve a)ERNiCr-3, b) TIG 316L, c) Burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metalleri ile yapılan kaynaklı parçaların çekme testi görüntüleri Şekil 4.37’de gösterilmiştir. ERNiCr-3 dolgu metali ile yapılan kaynak sonucundaki çekme testi kopması kaynak bölgesinde gerçekleşmiştir. Kaynak bölgesindeki kopma AISI 316L tarafına daha yakın olduğu tespit edilmiştir. Bu testteki akma mukavemeti 401 MPa, kopma mukavemeti 532 MPa olarak ölçülmüştür. Uzama değeri ise %17 olarak tespit edilmiştir. TIG 316L dolgu metali ile yapılan kaynakta ise kopma bölgesi AISI 316L malzemesinin ana metalinde gerçekleşmiştir. Akma mukavemeti 446 MPa, kopma mukavemeti 661 MPa olarak tespit edilmiştir. Bu deneydeki uzama değeri %32’dir. Burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali ile yapılan kaynak sonucunda da kopma yine AISI 316L malzemesinin ana metalinde gerçekleşmiştir. Akma mukavemeti 451 MPa, kopma mukavemeti ise 687 MPa olarak tespit edilmiştir. Uzama değeri % 36 olarak tespit edilmiştir. Testlerden sonuçları Tablo 4.4’de verilmiştir.



Şekil 4.37. DA/TIG kaynak yöntemi ile yapılan deneylerin çekme testi sonuçları d) ERNiCr-3 ile kaynatılmış, e) TIG 316L ile kaynatılmış ve f) Burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) ile kaynatılmış

Durum değerlendirmesinde; sürekli akım TIG kaynak yöntemi ile yapılan deneyler ile darbeli akım TIG kaynak yöntemiyle yapılan deney sonuçlarının tamamen farklı olduğu görülmüştür. Başka bir deyişle ERNiCr-3 dolgu metali, sürekli akım TIG kaynak yöntemi ile kullanıldığında kopma AISI 316L ana metalinde gerçekleşirken, darbeli akım TIG kaynak yöntemi kullanıldığında kopmanın kaynak bölgesinde olduğu görülmüştür. Aynı şekilde TIG 316L ve burgu (ERNiCr-3) dolgu metalleri, sürekli akım TIG kaynak yöntemi ile kullanıldığında kopmalar kaynak bölgesinde gerçekleşirken, darbeli akım TIG kaynak yöntemi kullanıldığında kopmalar AISI 316L malzemesinin ana metal bölgesinde gerçekleşmiştir. Buna ek olarak darbeli akım kaynak yöntemi kullanılarak tespit edilen mekanik özellik değerleri, sürekli akım kaynak yöntemi kullanılarak tespit edilen mekanik özelliklere daha gelişmiş değerlere sahiptir.

TIG 316L ve burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) teli ile yapılan kaynaklarda gerçekleşen kopma mukavemetleri AISI 316L malzemesinin maksimum kopma sınırına yakın değerler içerisinde

gerçekleştiği görülmüştür. Hem sürekli akım hem de darbeli akım TIG kaynak yöntemi ile yapılan bütün kaynak deneylerinde maksimum uzama % 36 değeri ile darbeli akım TIG kaynak yöntemi ve burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali kullanılan deneyde tespit edilmiştir. Bununla birlikte diğer ana metal kopmalarının olduğu deneylerde ise uzamalar da % 32 ve % 34 ile maksimum uzama değerine yakın oranda gerçekleşmiştir. Her üç deney için de kopma bölgelerinin makro incelemesinde; ERNiCr-3 dolgu metali kaynağında kopma bölgesinde köpürme şeklinde çok küçük boşluklar tespit edilmiştir. Daha önceki incelemelerde net olarak ortaya çıkmamasına rağmen kaynak bölgesindeki kopma sonucu tespit edilmiştir. TIG 316L ve burgu dolgu metallere ise herhangi bir boşluk veya hata tespit edilmemiştir.

Tablo 4.4. SA/TIG kaynak yöntemi uygulanan numunelerin çekme deneyi sonuçları

Kaynak Parçası	Akma Mukavemeti (MPa)	Kopma Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)	Kırılma Bölgesi
ERNiCr-3	401	532	17	KB
TIG 316L	446	661	32	AISI 316L
Burgu	451	687	36	AISI 316L

Darbeli akımın ikincil fazların oluşumunu azaltması neticesinde sertlik ve kırılma durumu önüne geçmesi ve buna bağlı olarak mekanik özelliklerin iyileştirilmesi beklenen bir neticedir. AISI 316L tarafından kopmaların ortak özelliği TIG 316L ve burgu dolgu metalinde TIG 316L dolgu metalinin ortak olmasıdır. TIG 316L Nb elementi içermeyen dolgu metali olmasından dolayı da NbC ve Laves fazlarının oluşmasını önlemek amacıyla kullanılabilen malzemedir. Bu çalışmada Nb içeren ERNiCr-3 dolgu metali le kullanıldığında daha kuvvetli mekanik özelliklerin oluştuğu tespit edilmiştir. Benzer bir çalışmada Hejripour ve Aidun [59] da burgu dolgu metali kullanarak farklı tellerin olumlu özelliklerini birleştirmeyi amaçlamış ve Inconel 718 ile AISI 316L malzemelerinin kaynağında Inconel 82 – TIG 410 burgulu dolgu metalinin mekanik özellikleri geliştirdiğini belirtmişlerdir. Fakat burgu dolgu metalleri iki dolgu metalinin olumlu özelliklerini aldığı gibi olumsuz özelliklerini de birleştirmektedir. Burgu dolgu metalinin bir dezavantajı da zaten homojen olmayan bir kaynak havuzuna daha fazla farklı ergimiş metal girişine müsaade ederek daha da belirsiz bir metalik yapı oluşmasına sebep olmaktır. Burgu dolgu metalinin birleşmesi ile ortaya çıkan avantajların dezavantajlarından daha fazla olması durumunda kullanılması tavsiye edilir.

Tablo 4.5'te mikro sertlik ve çekme testlerinin deney sıralamasına göre karşılaştırmalı tablosu verilmiştir.

Tablo 4.5. Mikro sertlik ve çekme testlerinin karşılaştırma tablosu

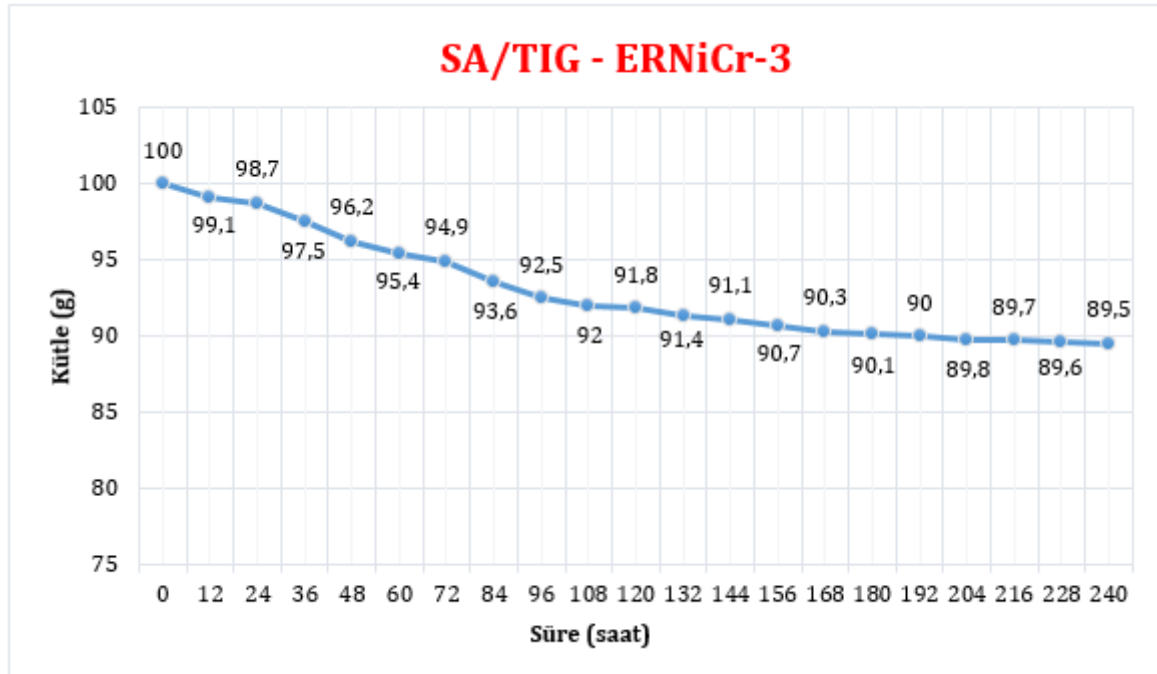
Deney	Mikro Sertlik	Çekme Testi
1. SA/TIG – ERNiCr-3	Kaynak bölgesinin sünek yapıda olduğu tespit edilmiştir.	Kırılma AISI 316L ana malzemesi bölgesinde gerçekleşmiştir.
2. SA/TIG – TIG 316L	Kaynak bölgesinin kırılğan yapıda olduğu tespit edilmiştir.	Kırılma kaynak bölgesinde gerçekleşmiştir. En az uzama ve en az kopma mukavemeti bu deneyde tespit edilmiştir.
3. SA/TIG – ERNiCr-3 + TIG 316L	Kaynak bölgesinin kırılğan yapıda olduğu tespit edilmiştir.	Kırılma kaynak bölgesinde gerçekleşmiştir.
4. DA/TIG – ERNiCr-3	Kaynak bölgesinin kırılğan yapıda olduğu tespit edilmiştir.	Kırılma kaynak bölgesinde gerçekleşmiştir.
5. DA/TIG – TIG 316L	Kaynak bölgesinin sünek yapıda olduğu tespit edilmiştir.	Kırılma AISI 316L ana malzemesi bölgesinde gerçekleşmiştir.
6. DA/TIG – ERNiCr-3 + TIG 316L	Kaynak bölgesinin sünek yapıda olduğu tespit edilmiştir.	Kırılma AISI 316L ana malzemesi bölgesinde gerçekleşmiştir. En fazla kopma muakavemet değers ve en fazla uzama bu deneyde tespit edilmiştir.

4.8. Korozyon Testi Sonuçları

Korozyon testleri için kaynak numuneleri üzerinden 12 mm x 20 mm x 42 mm ölçülerinde parçalar kesilmiştir. Kesilen parçalar ayrı ayrı olmak üzere 100 ml sülfürik asit havuzunun içerisine daldırılmıştır. Havuz içerisinde sıcaklık 120°C'de tutulmuştur. Numuneler toplamda 240 saat boyunca asit banyosunun içerisinde bekletilmiştir. Her bir numune deneyi sonucunda asit banyosu içerisindeki sülfürik asit çözeltisi komple boşaltılarak sistem temizlenmiştir. Korozyon testi esnasında sülfürik asit banyosuna daldırılan her numuneden 12 saatte bir havuzdan çıkarılarak kütle ölçümü yapılmıştır. 240 saatin sonunda havuzdan çıkarılan malzemeler temizlenerek kaynak bölgesi SEM ile görüntülenmiştir.

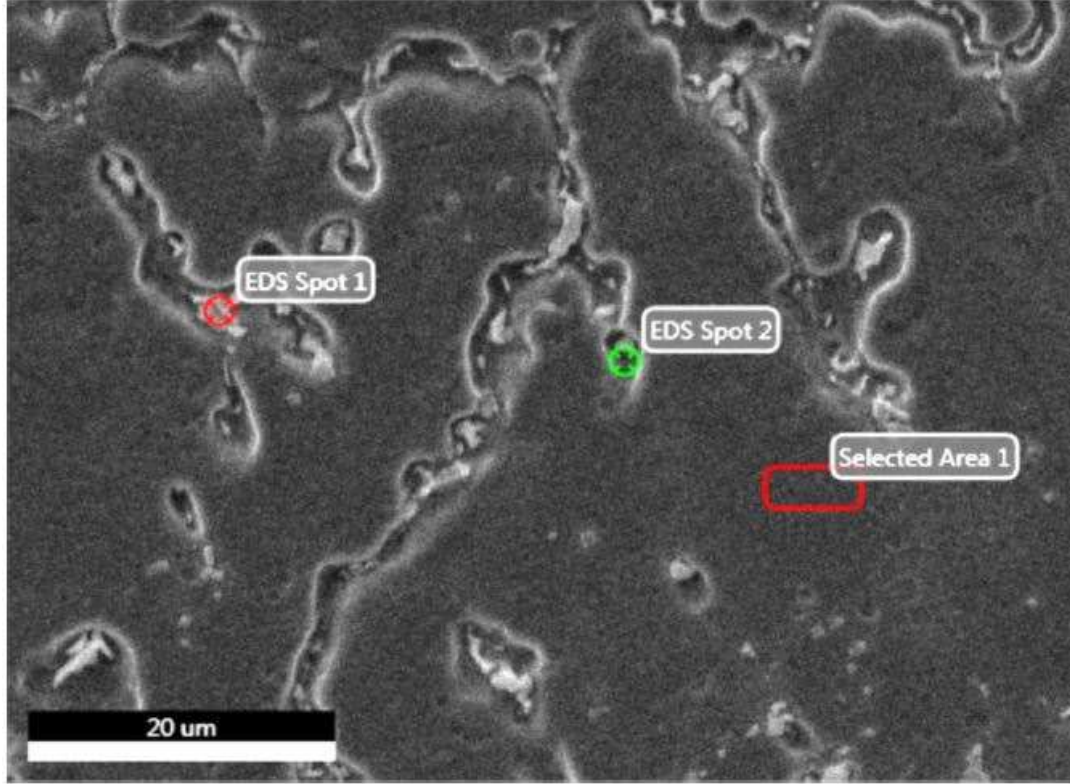
4.8.1. Sürekli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve ERNiCr-3 Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Korozyon Testi Sonuçları

Sürekli akım TIG kaynağı yöntemi ve ERNiCr-3 dolgu metali kullanılarak yapılan kaynak numunesinin korozyon testi kütle değişimi grafiği Şekil4.38.'de gösterilmiştir. İlk 12 saat sonucunda 0,9 gr malzeme kaybı olmakla birlikte, deney sonucunda malzemede 11,5 gr kütle kaybı meydana gelmiştir. Malzeme kaybı lineer şekilde gözlenmiştir. Bununla birlikte 168. saatten itibaren kayıp oranı azalmıştır.



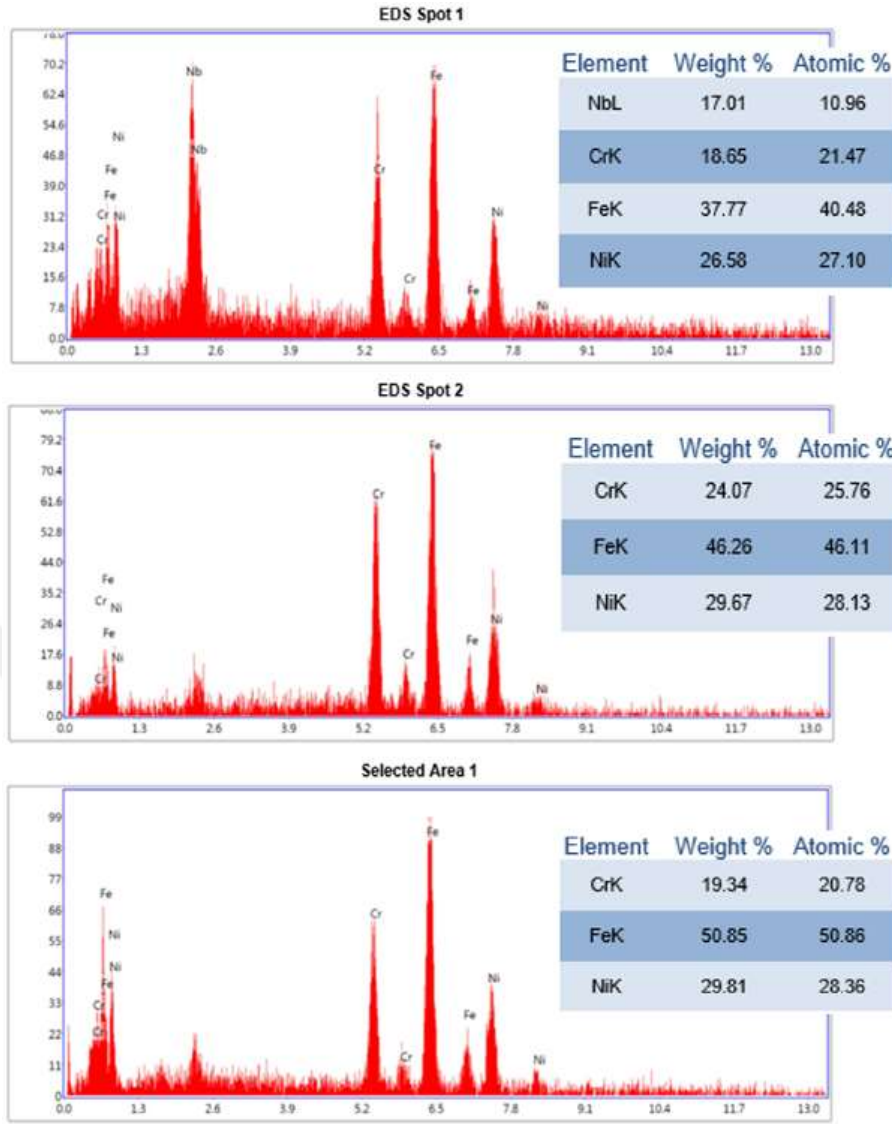
Şekil 4.38. SA/TIG kaynak yöntemi ve ERNiCr-3 dolgu metali ile kaynatılmış numunenin korozyon testi kütle değişimi grafiği

Korozyon testi sonucunda elde edilen SEM görüntüsü ile Şekil 4.39.'da verilmiştir. Görüntüden de tespit edildiği gibi asit maruziyeti neticesinde yüzeyde aşınmalar kanal şeklini almıştır. Söz konusu kanallar boyunca beyaz parlak çökelti görülür. Oyuklar ve kanalların dışında kalan bölgede herhangi bir ikincil faz gözlenmemiştir. İkincil fazların korozyon dayanımını düşürmesinden dolayı, korozyon testi neticesinde korozyon bu ikincil fazların etrafında yoğunlaşmış ve oluşan oyuklar birleşerek kanal halini almıştır.



Şekil 4.39. SA/TIG kaynak yöntemi ve ERNiCr-3 dolgu metali ile kaynatılmış numunenin korozyon testi sonucundaki SEM görüntüsü

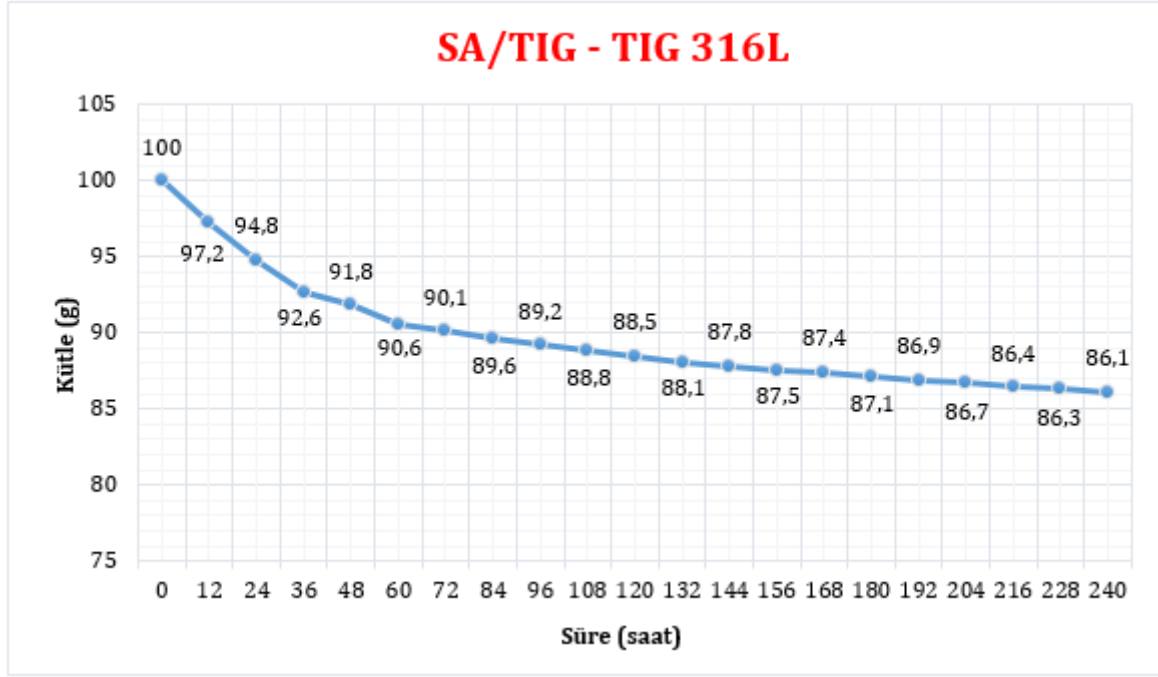
Kanal bölgeleri içinde görülen yapı analizi SEM/EDAX noktasal analizleri 4.40'da verilmiştir. Buna göre EDS Spot 1 noktasının Laves fazı olarak belirlendiği söylenebilir. ERNiCr-3 dolgu metalinin içerisindeki Nb elementinin varlığından dolayı oluşması muhtemel Laves fazının korozyon direncini de azaltan ikincil faz olduğu bilinmektedir [38]. Kanal içerisinde beyaz parlak noktaların dibindeki bir nokta olarak seçilen EDS Spot2 incelendiğinde ise, noktanın ana metallerin özelliğini taşıyan ve sadece Cr, Fe ve Ni elementlerini içeren yapının olduğu görülmektedir. Bununla birlikte SEM görüntüsünde elde edilen görüntünün içinden homojen ve herhangi bir yapının bulunmadığı Selected Area 1 olarak bir bölge seçilmiştir. Bu bölgenin element analizi incelendiğinde ise EDS Spot 2 gibi ana metallerin özelliklerini taşıyan ve sadece Cr, Fe ve Ni elementleri içeren bir bölge olduğu tespit edilmiştir. Korozyonun sadece ikincil fazlar etrafında olması, bu bölgelerin daha fazla maruziyet süresi neticesinde daha da derinleşeceğini ve bir süre sonra malzemenin delineceği görüntüsü vermektedir.



Şekil 4.40. SA/TIG kaynak yöntemi ve ERNiCr-3 dolgu metali ile kaynatılmış numunenin korozyon testi sonucundaki SEM/EDAX noktasal ve bölgesel analizleri

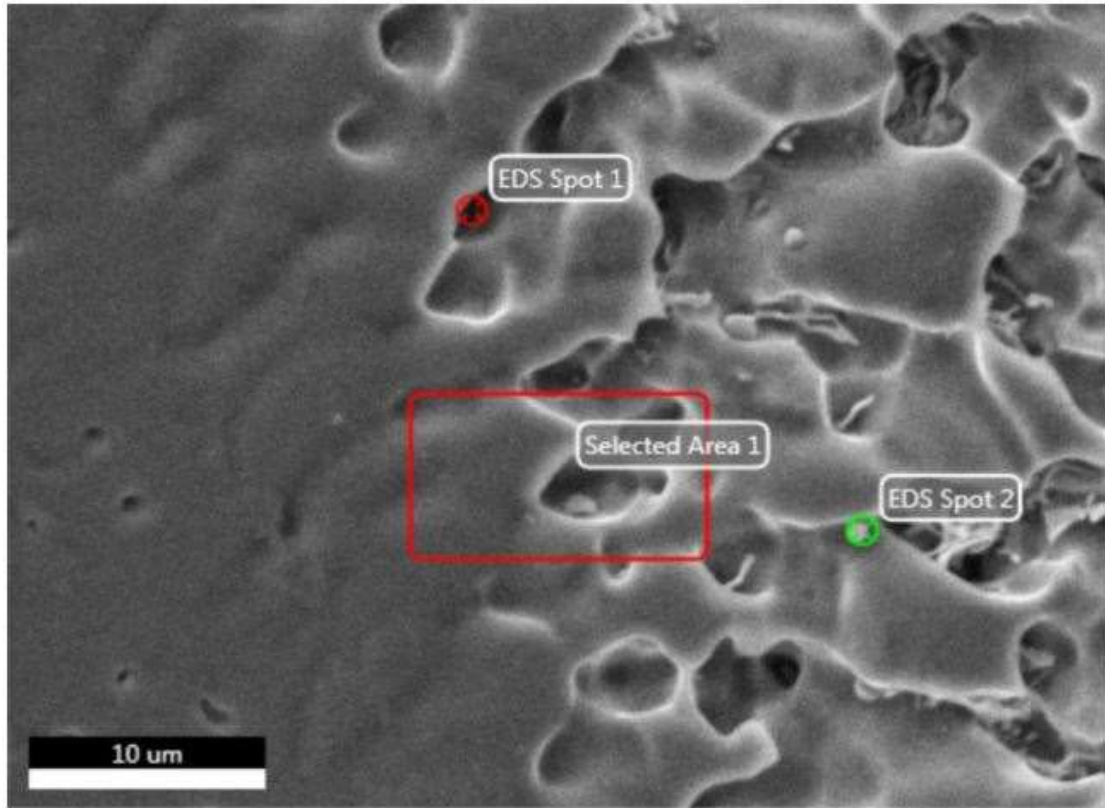
4.8.2. Sürekli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve TIG 316L Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Korozyon Testi Sonuçları

Sürekli akım TIG kaynağı yöntemi ve TIG 316L dolgu metali kullanılarak yapılan kaynak numunesinin korozyon testi kütle değişimi grafiği Şekil 4.41.'de gösterilmiştir. İlk 12 saat sonucunda 2,9 gr malzeme kaybı olmuştur. Bu sonuç ERNiCr-3 dolgu metali yapılan kaynak neticesine göre üç kattan daha fazladır. Deney sonucunda malzemede 13,9 gr kütle kaybı meydana gelmiştir. Malzeme kaybı grafiği parabolik bir görüntüdedir. 240 saat sonucunda meydana gelen %13,9'luk malzeme kaybının % 9,9'u ilk 72 saat neticesinde gerçekleşmiştir. Kalan % 4'lük malzeme kaybı ise 72. saatten sonra lineer bir şekilde gerçekleşmiştir. ERNiCr-3 testine göre toplamda 2,4 gr daha fazla malzeme kaybı gerçekleşmiştir.



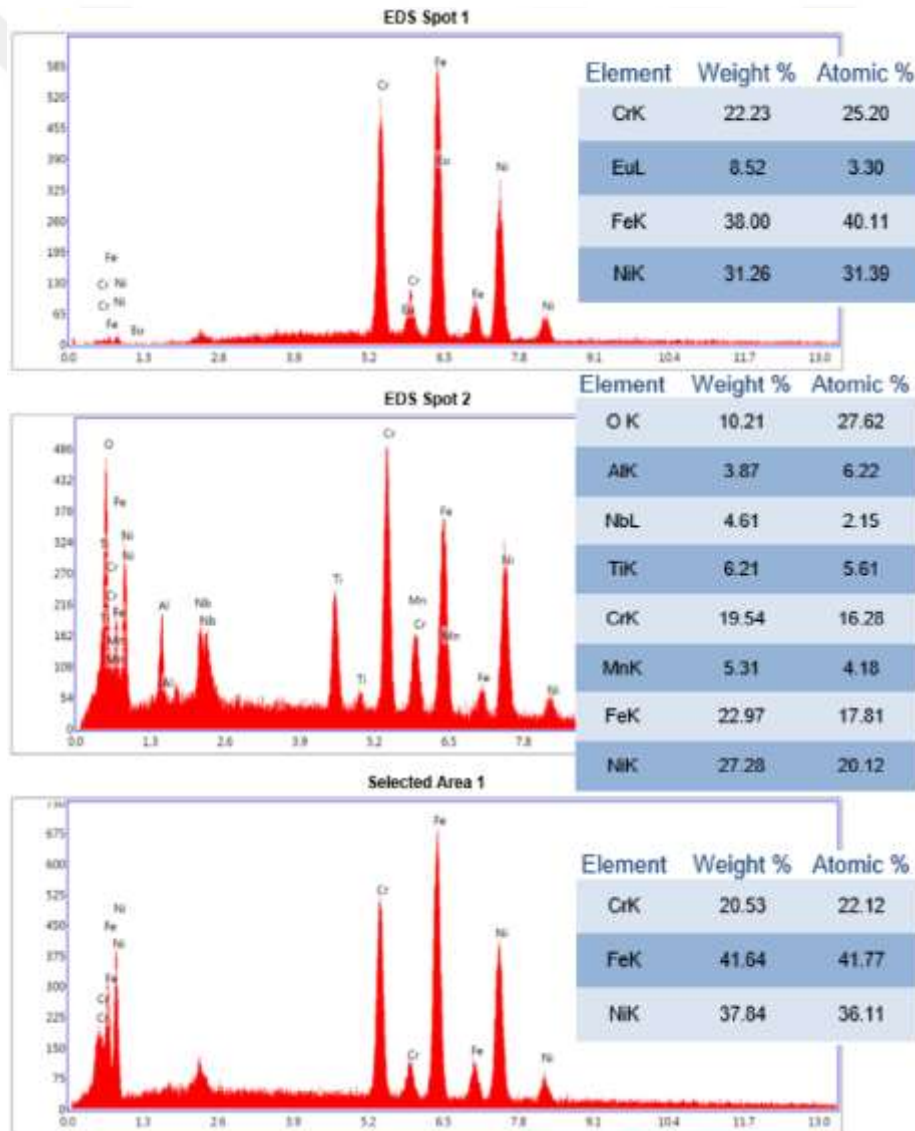
Şekil 4.41. SA/TIG kaynak yöntemi ve TIG dolgu metali ile kaynatılmış numunenin korozyon testi kütle değişimi grafiği

Korozyon bölgesinin SEM görüntüsü Şekil 4.42’de verilmiştir. Malzeme yüzeyinde çok ciddi derinlikte korozyon çukurları oluşmuştur.



Şekil 4.42. SA/TIG kaynak yöntemi ve TIG dolgu metali ile kaynatılmış numunenin korozyon testi sonucundaki SEM görüntüsü

Şekil 4.43'de SA/TIG kaynak yöntemi ve TIG 316L dolgu metali ile kaynatılmış numunenin korozyon testi sonucundaki SEM/EDAX noktasal ve bölgesel analizleri gösterilmiştir. EDS Spot 1 noktası rastgele seçilen bir çukurcuğun dip noktasıdır. Bu noktada ana metal elementleri ile olan Cr, Fe ve Ni elementleri tespit edilmiştir. Bu elementler ile birlikte element analizinde Evropiyum (Eu) elementi tespit edilmiştir. Evropiyum, 1901 yılında Eugène-Anatole Demarçay tarafından keşfedilen ve atom numarası 63 olan bir elementtir. Ergime sıcaklığı 822 °C'dir. Lazerler, nükleer reaktörlerdeki denetim çubukları, bazı elektronik parçalar gibi alanlarda kullanılan bir elementtir [84,85]. Doğada saf olarak bulunmadıkları için ve ana metallerin kimyasal kompozisyonlarında bulunmadığı için, korozyon esnasındaki bir reaksiyon sonucu oluştuğu tahmin edilmektedir. Çok kıymetli bir element olduğu için bu deneyde kullanılan bütün parametreler incelenerek, elementin oluşumu hakkında daha detaylı bilgi elde edilebilir.



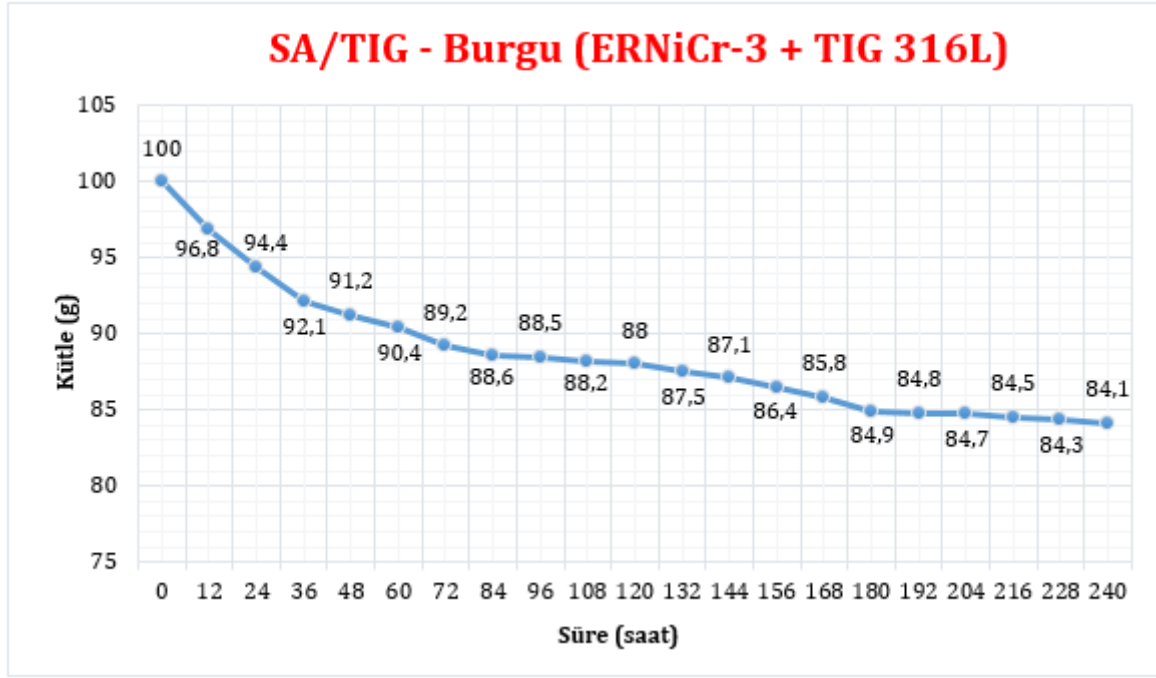
Şekil 4.43. SA/TIG kaynak yöntemi ve TIG 316L dolgu metali ile kaynatılmış numunenin korozyon testi sonucundaki SEM/EDAX noktasal ve bölgesel analizleri

EDS Spot 2 ise çukurcukların tepe noktalarında beyaz parlak oluşum noktalarından rastgele seçilmiştir. Ana metal elementleri olan Ni, Nb, Fe, Mn, Cr gibi elementler ile birlikte ana metallerde bulunmayan Al ve Ti elementlerinin varlığı tespit edilmiştir. Korozyon öncesi SEM/EDAX analiz sonuçlarında da bahsedildiği gibi bu elementler, deneyler esnasında kullanılan kaynak ekipmanları ile bu elementleri ihtiva eden metallerin kaynatılması sonucunda oluştuğu kanaatine varılmıştır. Bununla birlikte kaynak ortamında veya çevresinde bu elementleri içeren malzemelerin talaşlı imalatı sonucunda oluşan tozların, kaynak bölgesi üzerine gelerek bu elementlerin varlığına sebep oldukları da ihtimal dâhilindedir. Bununla birlikte Selected Area 1 bölgesinin analizinde sadece ana metal elementleri olan Cr, Fe ve Ni elementleri tespit edilmiştir.

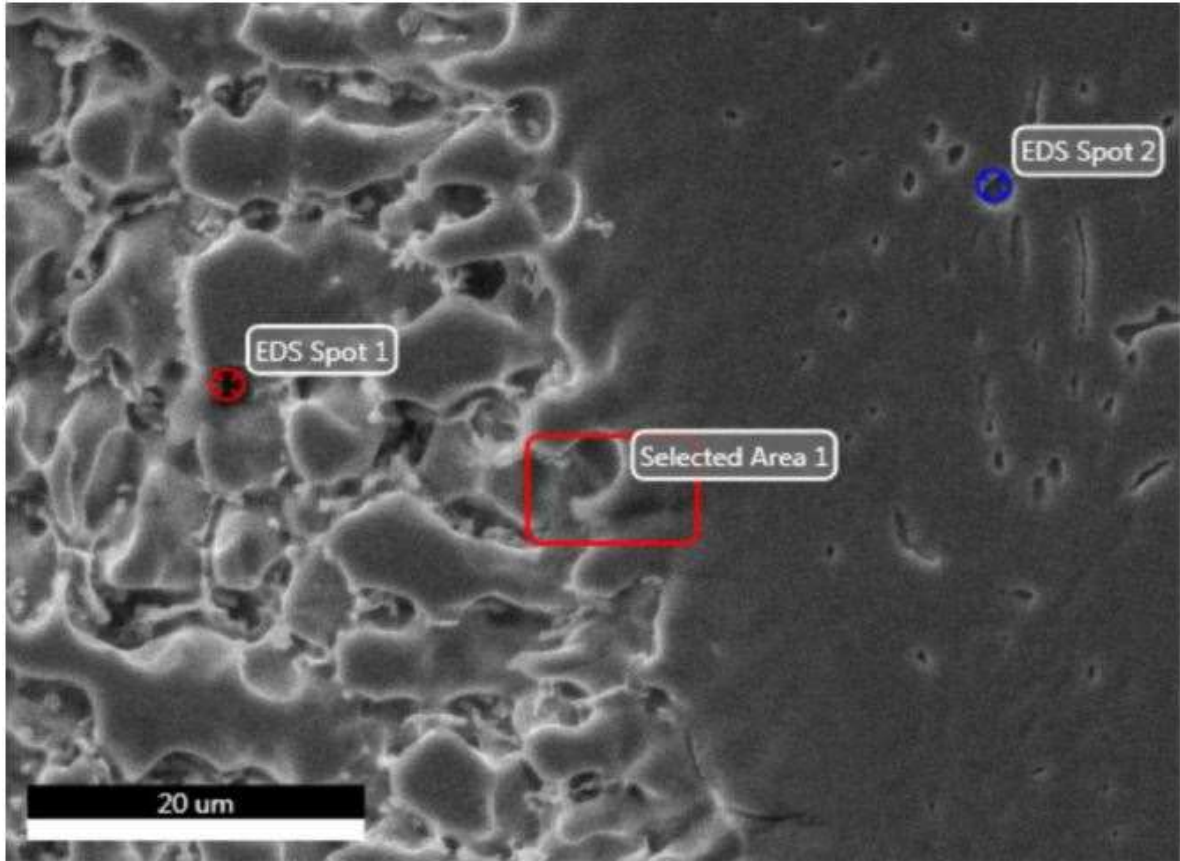
4.8.3. Sürekli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve Burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Korozyon Testi Sonuçları

Sürekli akım TIG kaynağı yöntemi ve burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali kullanılarak yapılan kaynak numunesinin korozyon testi kütle değişimi grafiği Şekil 4.44.'de gösterilmiştir. İlk 12 saat sonucunda 3,2 gr malzeme kaybı olmuştur. Bu sonuç sürekli akım TIG kaynak yöntemi ile yapılan deney sonuçları arasında en yüksek değere sahiptir. Deney sonucunda malzemede 15,9 gr kütle kaybı meydana gelmiştir. Bu sonuç da sürekli akım TIG kaynak yöntemi ile yapılan kaynaklar arasında en fazla malzeme kaybının olduğu değerdir. Malzeme kaybı TIG 316L dolgu metali ile yapılan kaynaktaki gibi parabolik grafiktedir. 240 saat sonucunda meydana gelen % 15,9'luk malzeme kaybının % 10,8'i ilk 72 saat neticesinde gerçekleşmiştir. Kalan % 5,1 'lik malzeme kaybı ise 72. saatten sonra lineer bir şekilde gerçekleşmiştir. ERNiCr-3 testine göre toplamda 4,4 gr, TIG 316L testine göre 2 gr daha fazla malzeme kaybı gerçekleşmiştir.

Şekil 4.45.'de korozyon testi sonucundaki SEM görüntüleri verilmiştir. Korozyon neticesinde malzeme yüzeyinde ciddi derin oyukların oluştuğu tespit edilmiştir. Şekil 4.46'da ise noktasan analizler verilmiştir. EDS Spot 1'de beyaz parlak yapıların oluştuğu kısımdaki oyuklar içerisinden bir nokta seçilerek incelenmiştir. Sadece ana metal malzemelerinden Cr, Fe ve Ni elementlerinin varlığı tespit edilmiştir. EDS Spot 2 için ise çukurcuk korozyonu izlenimi veren bir oyuk seçilmiştir. Bu noktanın da element analizi incelendiğinde sadece Fe, Ni ve Cr elementlerinin varlığından söz edilebilmektedir. Selected Area 1 bölgesi ise derin oyukların başladığı bölge olarak seçilmiştir. Bu bölgedeki analizde de diğer iki noktadaki gibi sadece Fe, Ni ve Cr elementleri tespit edilmiştir. Bu neticelere göre özellikle beyaz parlak bölgede oluşan ve korozyon öncesi tespit edilen ikincil fazların, korozyon testi neticesinde ciddi oranda korozyona uğraması ve dolayısı ile bu korozyondan ötürü malzemede en yüksek kütle kaybının gerçekleşmesi olarak yorumlanabilir. Mikro yapı incelemeleri ile çekme ve mikro sertlik testlerinde de ortaya çıkan sonuçlar en çok ikincil faz oluşumunun bu dolgu metali kullanılması neticesinde ortaya çıktığını göstermiş ve yapılan deneyler ile kanıtlanmıştır.

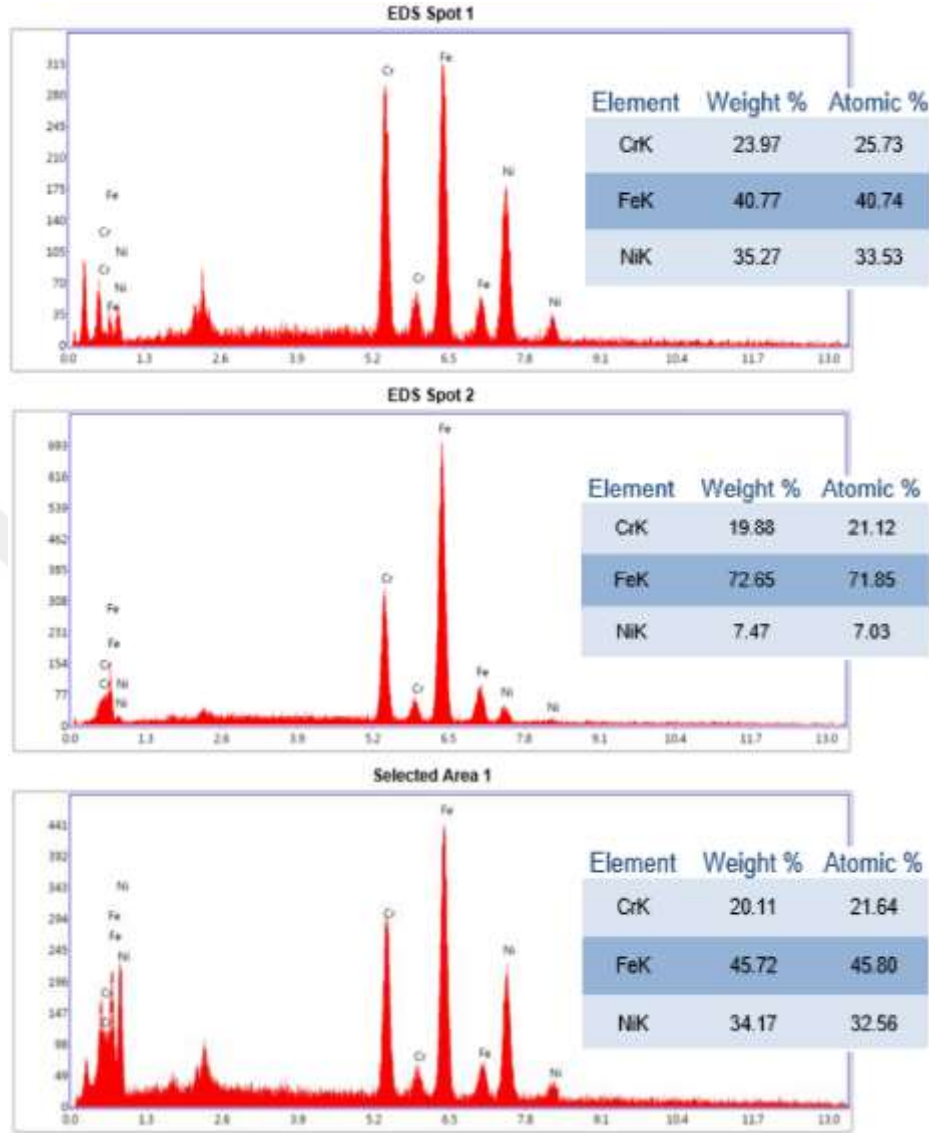


Şekil 4.44. SA/TIG kaynak yöntemi ve burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali ile kaynatılmış numunenin korozyon testi kütle değişimi grafiği



Şekil 4.45. SA/TIG kaynak yöntemi ve burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali ile kaynatılmış numunenin korozyon testi sonucundaki SEM görüntüsü

Sürekli akım TIG kaynak yönteminin ikincil fazların oluşumunu engellemek hususunda herhangi bir katkısı olmadığı için bu bölümdeki malzeme kaybı yüksek oranda gerçekleşmiştir.

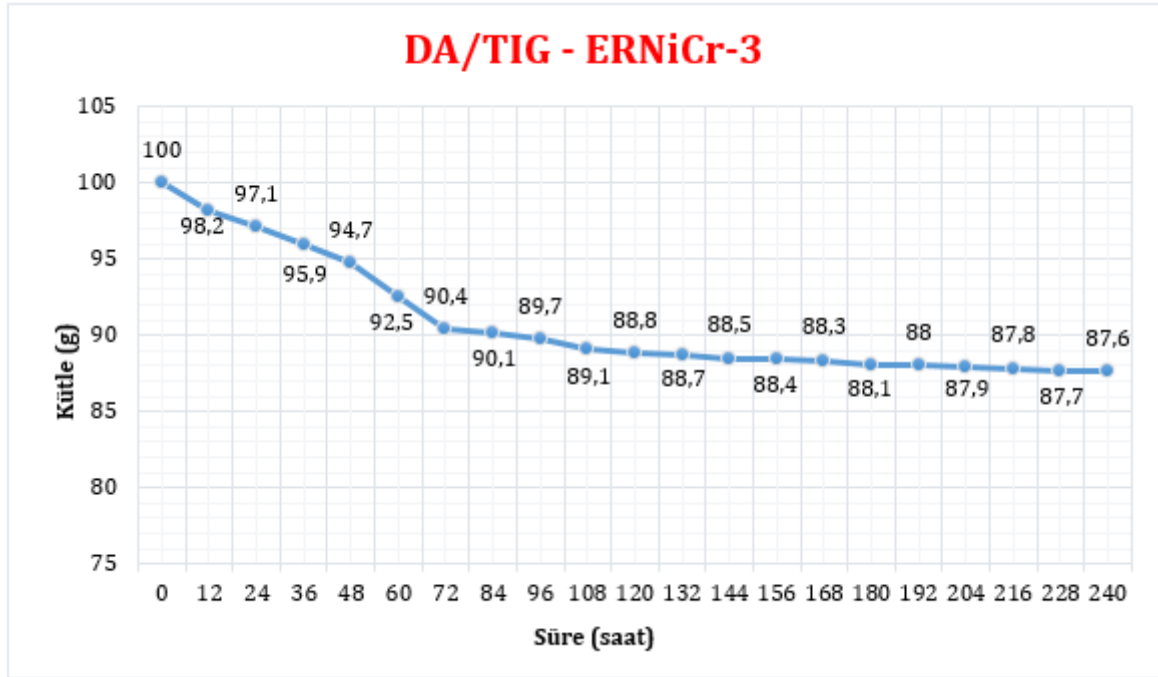


Şekil 4.46. SA/TIG kaynak yöntemi ve burğu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali ile kaynatılmış numunenin korozyon testi sonucundaki SEM/EDAX noktasal ve bölgesel analizleri

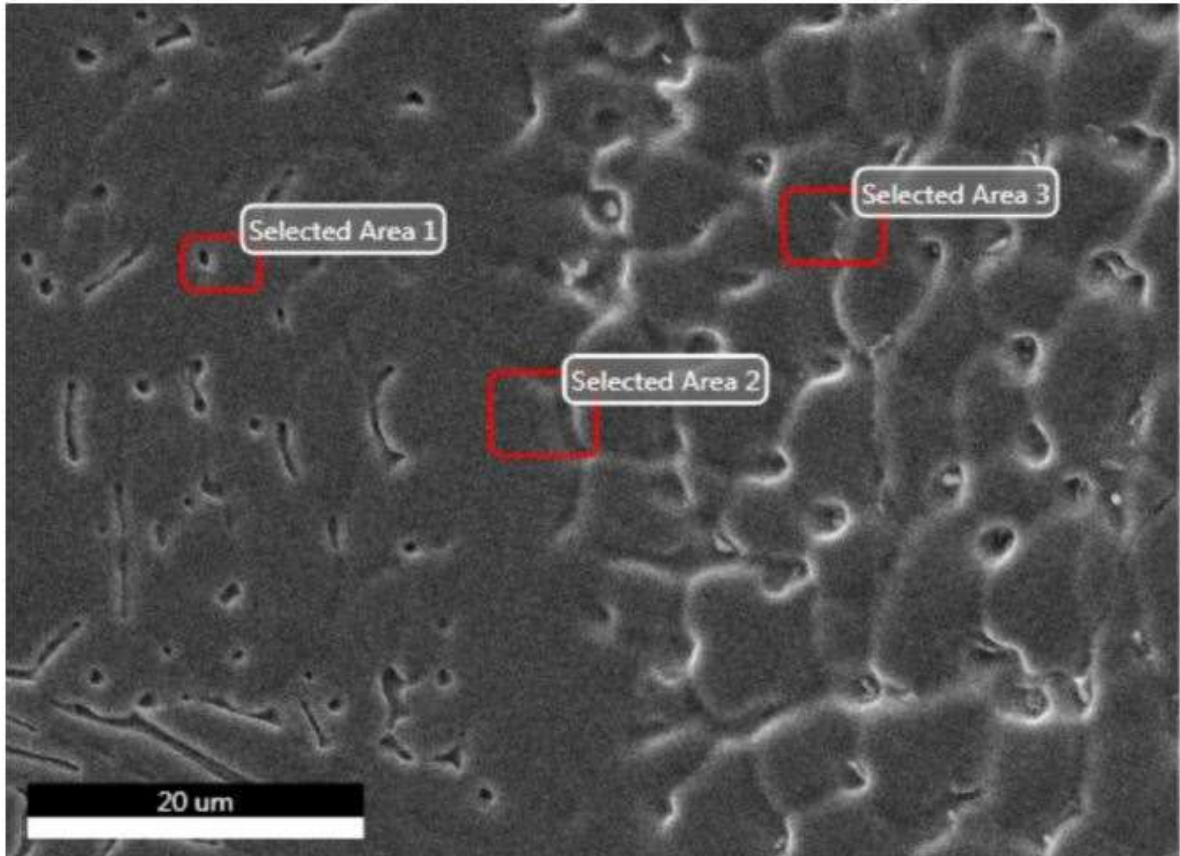
4.8.4. Darbeli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve ERNiCr-3 Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Korozyon Testi Sonuçları

Darbeli akım TIG kaynağı yöntemi ve ERNiCr-3 dolgu metali kullanılarak yapılan kaynak numunesinin korozyon testi kütle değişimi grafiği Şekil 4.47.'de gösterilmiştir. İlk 12 saat sonucunda 1,8 gr malzeme kaybı olmuştur. Bu sonuç sürekli akım TIG kaynak yöntemi ile ve ERNiCr-3 dolgu metali yapılan deney sonuçlarına göre yüksektir. Deney sonucunda malzemede 12,4 gr kütle kaybı meydana gelmiştir. Malzeme kaybı grafiği parabolik eğri olarak belirlemiştir. 240 saat sonucunda meydana gelen %12,4'lük malzeme kaybının % 9,6'sı ilk 72 saat neticesinde gerçekleşmiştir. Kalan %

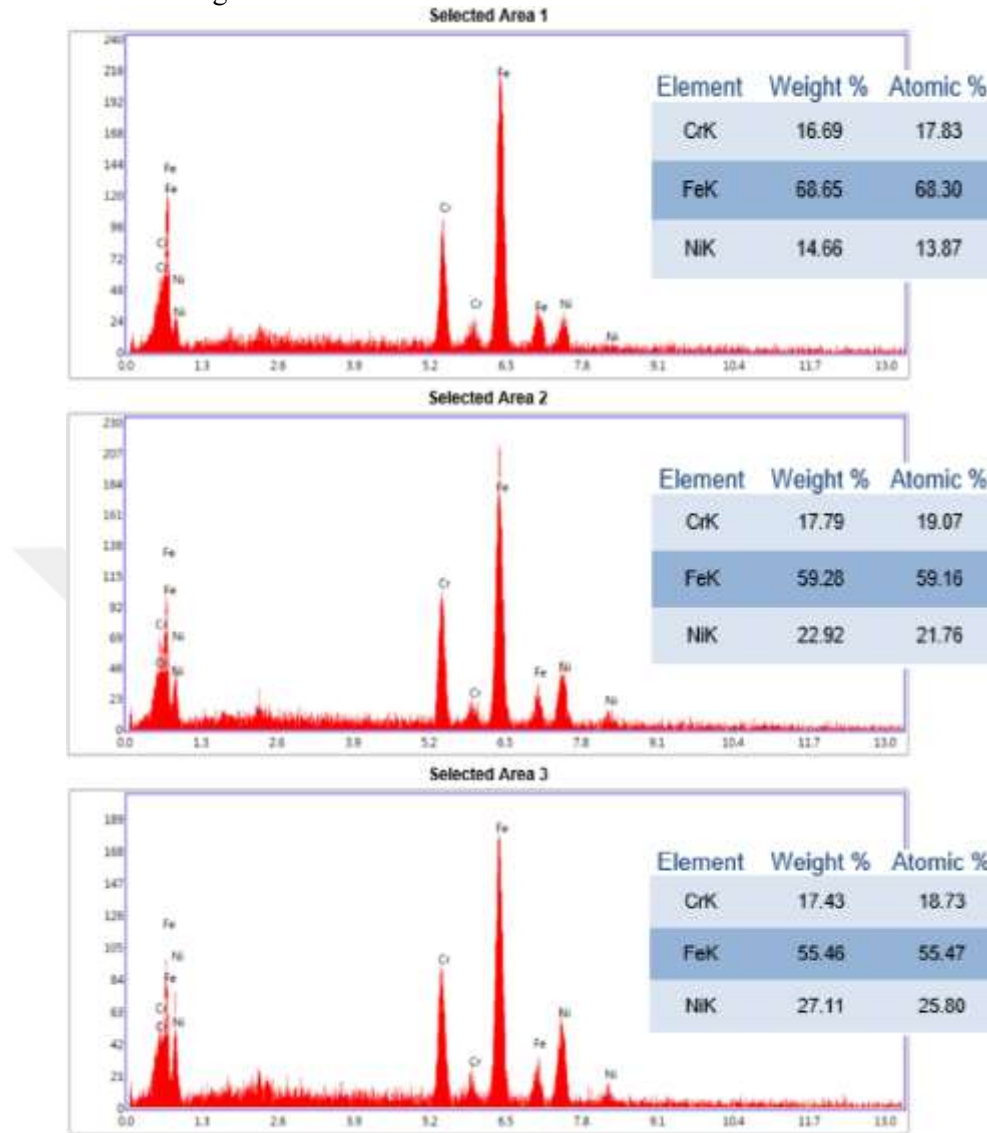
2,8'lik malzeme kaybı ise 72. saatten sonra linear bir şekilde gerçekleşmiştir. İlk 72 saatte gerçekleşen korozyon yüzdesi diğer deneyler arasındaki en yüksek değere sahiptir.



Şekil 4.47. DA/TIG kaynak yöntemi ve ERNiCr-3 dolgu metali ile kaynatılmış numunenin korozyon testi kütle değişimi grafiği



Şekil 4.48. DA/TIG kaynak yöntemi ve ERNiCr-3 dolgu metali ile kaynatılmış numunenin korozyon testi sonucundaki SEM görüntüsü



Şekil 4.49. DA/TIG kaynak yöntemi ve ERNiCr-3 dolgu metali ile kaynatılmış numunenin korozyon testi sonucundaki SEM/EDAX noktasal ve bölgesel analizleri

Şekil 4.48 ve 4.49’da sırasıyla deneyin SEM/EDAX görüntüleri ile noktasal ve bölgesel analizleri verilmiştir. SEM görüntüsü incelendiğinde malzeme yüzeyinde çok fazla miktarda ve homojen dağılımlı korozyon çukurlarının oluştuğu tespit edilmiştir. ERNiCr-3 dolgu metali içerisindeki ikincil fazların korozyon direncini düşürmesi neticesinde yüzeyde oyuklar oluşmuştur. Selected Area 1 bölgesi küçük, derin ve siyah çukurdan örnek olarak seçilmiştir. Element olarak Cr, Fe ve Ni varlığı tespit edilmiştir. Selected Area 2 ise geniş ve sığ oyukların başlangıç bölgesi olarak belirlenmiştir. Bu bölgede de sadece Fe, Ni ve Cr varlığından söz edilmektedir. Selected Area 3 bölgesi sığ oyukların ortasından bir bölge olarak belirlenmiştir. Bu bölgede de yine Fe, Ni ve Cr elementleri tespit edilmiştir. Bu deney sonucunda oluşan ikincil fazların kısa süre içerisinde korozyona uğraması neticesinde hızlı malzeme kaybı gerçekleşmiş, daha sonrasında kalan ana metallerdeki korozyon lineer ve yavaş bir şekilde gerçekleşmiştir.

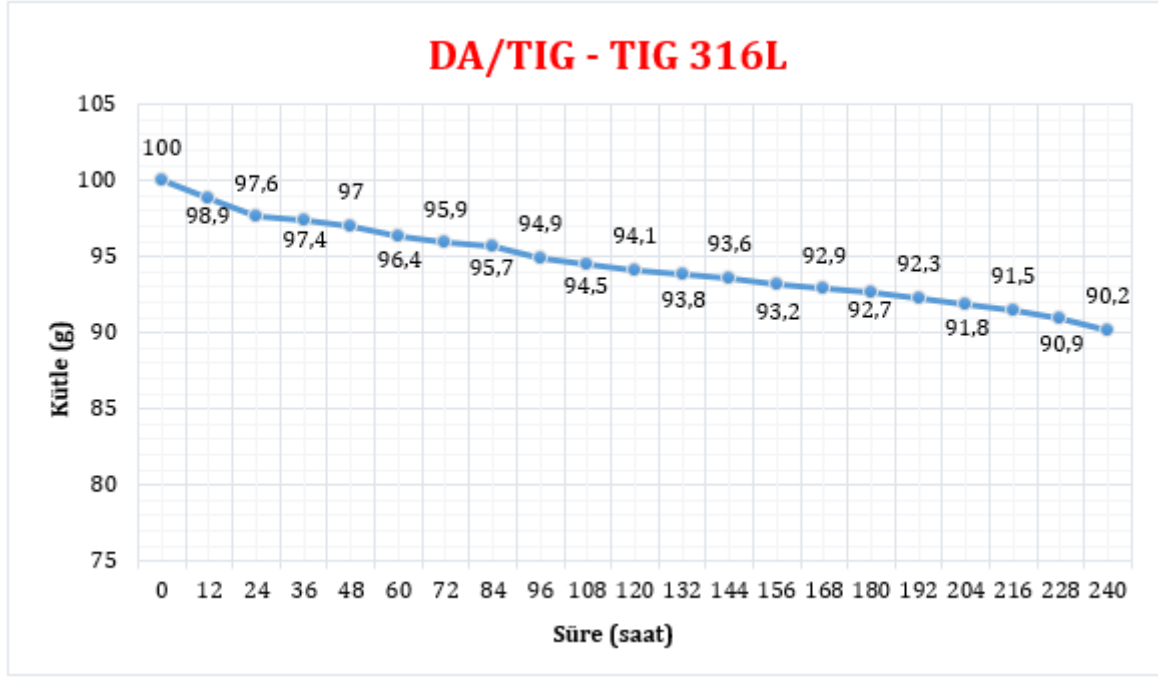
4.8.5. Darbeli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve TIG 316L Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Korozyon Testi Sonuçları

Darbeli akım TIG kaynağı yöntemi ve TIG 316L dolgu metali kullanılarak yapılan kaynak numunesinin korozyon testi kütle değişimi grafiği Şekil 4.50.'de verilmiştir. İlk 12 saat sonucunda 1,1 gr malzeme kaybı olmuştur. Deney sonucunda malzemede 9,8 gr kütle kaybı meydana gelmiştir. Malzeme kaybı grafiği lineer olarak devam etmiştir. 240 saat boyunca yapılan ölçümlerde herhangi ardışık korozyon ivmesi tespiti yapılmamıştır. Sürekli akım TIG kaynak yöntemi ve TIG 316L dolgu metali ile yapılan kaynak ile karşılaştırıldığında malzeme kaybı çok daha azdır. Bu durum darbeli akımın ikincil fazların oluşmasını engelleyen bir parametre olduğunun kanıtı olarak değerlendirilebilir.

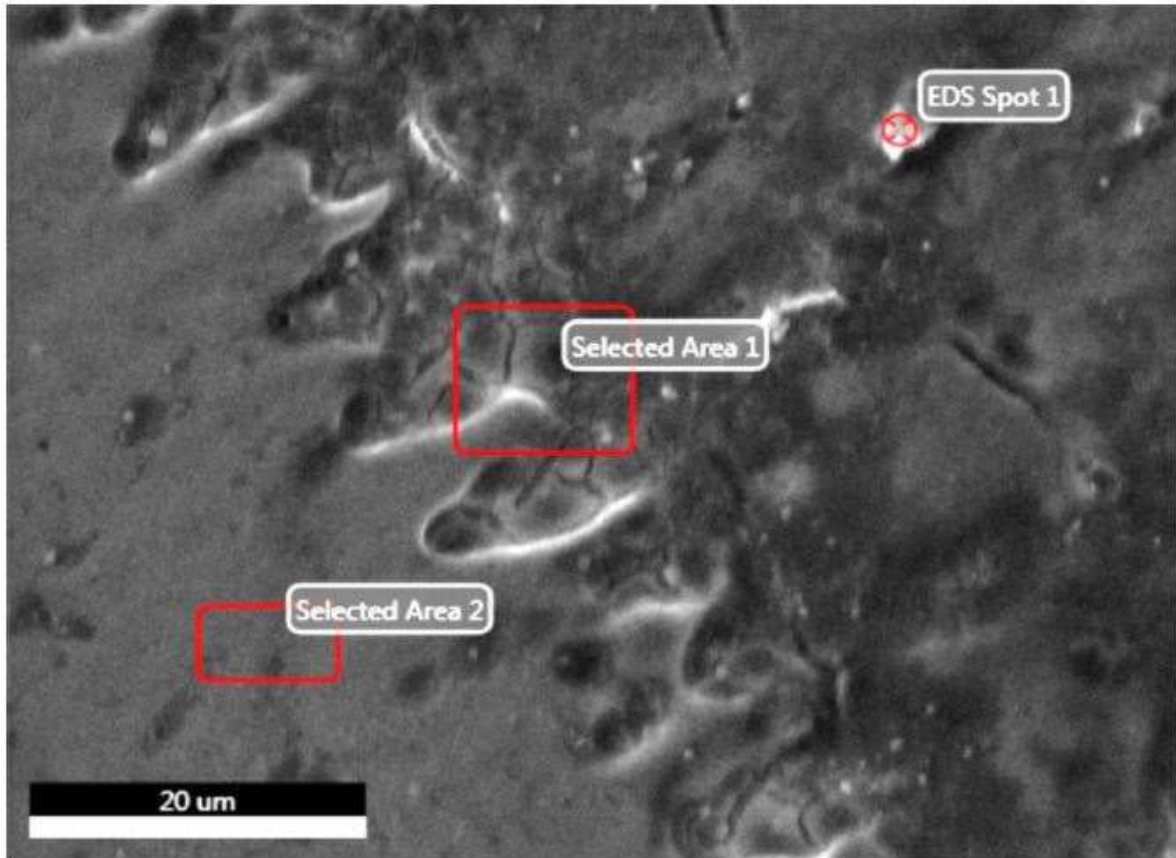
Şekil 4.51.'de darbeli akım TIG kaynağı yöntemi ve TIG 316L dolgu metali kullanılarak yapılan kaynağın korozyon testi sonucundaki yüzeydeki SEM görüntüsü verilmektedir. Malzeme yüzeyinde sığ fakat geniş oyukların oluşumu gözlemlenmiştir. Bu sığ ve geniş oyuklar girintili çıkıntılı olmak üzere kaynak bölgesinden ana metale doğru ilerlemiştir.

Şekil 4.52.'de SEM/EDAX analizinde belirlenen noktasal ve bölgesel element analizi sonuçları gösterilmiştir. EDS Spot 1 olarak malzeme yüzeyinde en geniş ve parlak beyaz nokta seçilmiştir. Element analizinde bu bölgede çok yüksek miktarda Nb ve Mo elementlerini varlığı tespit edilmiştir. Tespit edilen yüksek miktardaki Nb ve Mo elementi bu bölgede güçlü Laves fazlarının oluşumunu işaret etmektedir. Fakat görüntü incelendiğinde bu beyaz parlak noktaların miktarının çok az olduğu görülmektedir. Selected Area 1 olarak girintili çıkıntılı sığ ve geniş korozyon bölgelerinin kesişimi seçilmiştir. Bu bölgede de düşük miktarda Nb ve Mo elementleri tespit edilmiştir. Selected Area 2 olarak ise malzeme yüzeyinde nispeten hasar almamış bir bölge belirlenmiştir. Yapılan element analizi neticesinde bu bölgede sadece O, Cr, Fe ve Ni elementlerinin tespiti, bölgenin ana metale yakın özelliklerde olduğunu göstermektedir.

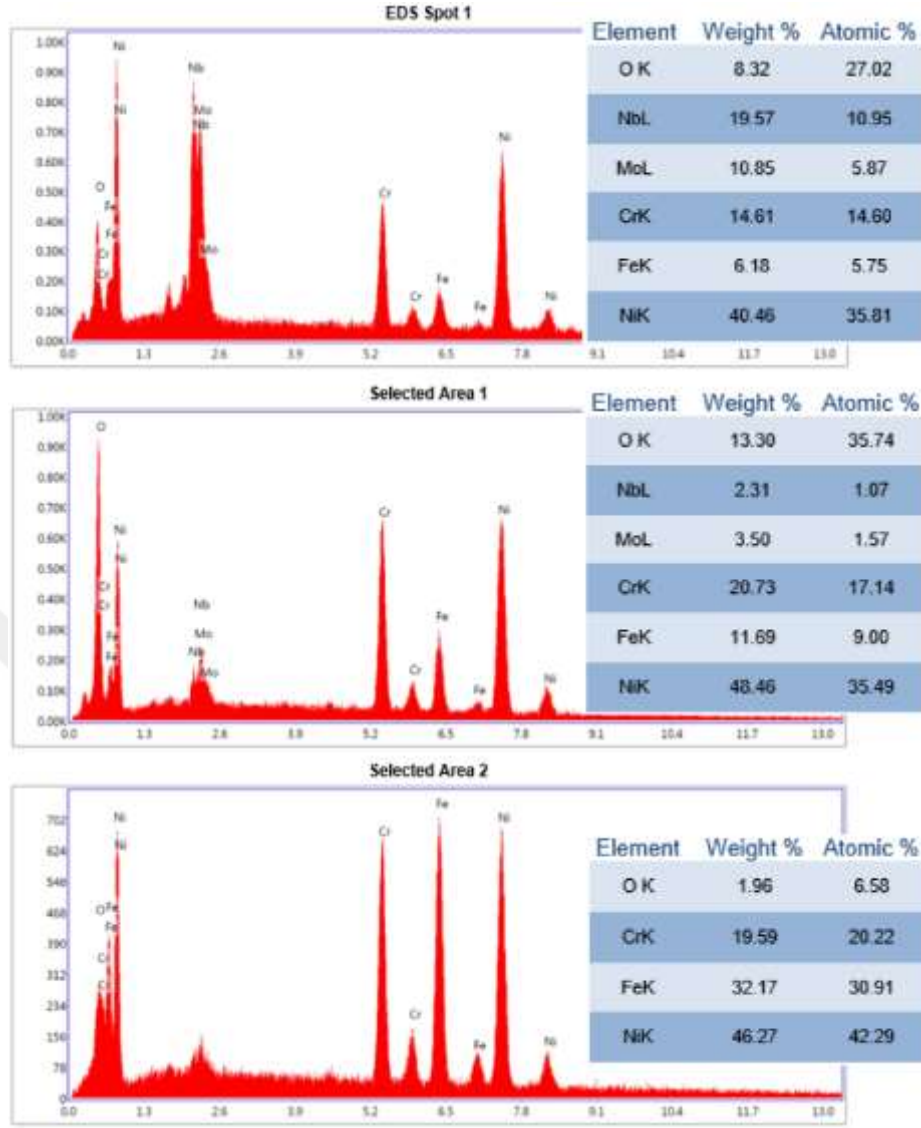
Deney sonucunda elde edilen veriler korozyon öncesi mikro yapı görüntüleri ile karşılaştırıldığında benzer sonuçların ortaya çıktığını göstermektedir. Her ne kadar TIG 316L metali Nb elementi içermese de Inconel 625 malzemesinden kaynak bölgesine element transferi gerçekleşmekte ve Nb çökeltileri oluşmasına neden olmaktadır. Fakat aynı dolgu metalinin sürekli akım TIG kaynak yöntemi ile yapılan deney sonucu ile karşılaştırıldığında; darbeli akımın ikincil faz oluşumunu yavaşlattığı tespit edilmektedir. Korozyon sonuçları çekme ve mikro sertlik deneyleri ile karşılaştırıldığında da birbirlerini destekleyen sonuçların ortaya çıktığı anlaşılmaktadır. Çekme testi sonucuna göre kaynak bölgesinden değil de ana metalden kopma gerçekleşen testler içinde bu deneyin de olduğu göz önüne alınmaktadır. Ayrıca mikro sertlik deneylerinde de daha sünek bir yapıya sahip kaynak bölgesi olduğu bilinmektedir. Diğer testlere göre daha düşük miktarda korozyon kaynaklı malzeme kaybı gerçekleşmesi de bütün diğer test sonuçları ile örtüşmektedir.



Şekil 4.50. DA/TIG kaynak yöntemi ve TIG 316L dolgu metali ile kaynatılmış numunenin korozyon testi kütle değişimi grafiği



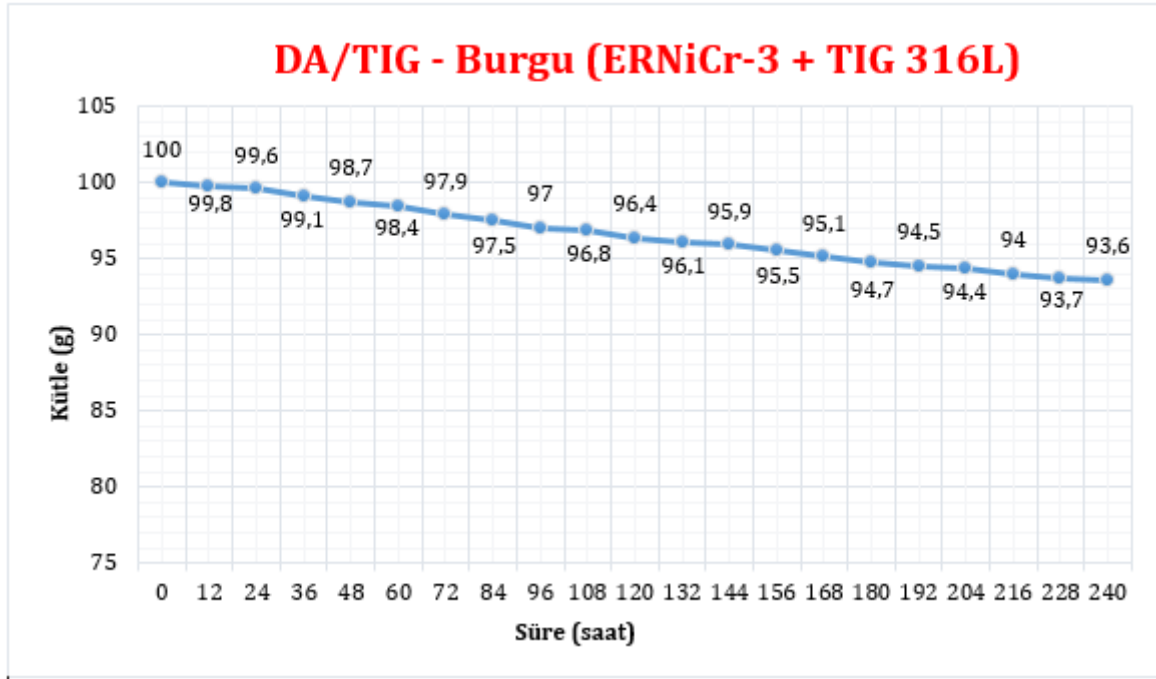
Şekil 4.51. DA/TIG kaynak yöntemi ve TIG 316L dolgu metali ile kaynatılmış numunenin korozyon testi sonucundaki SEM görüntüsü



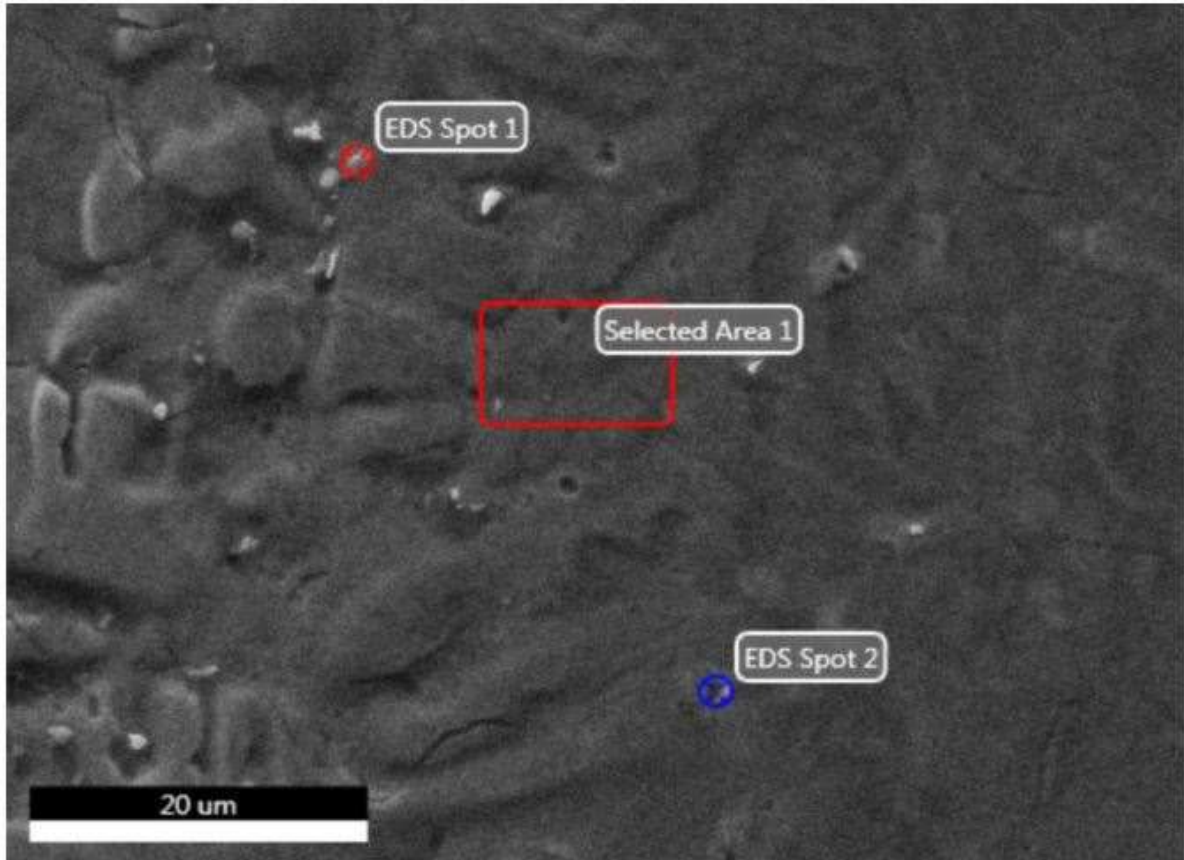
Şekil 4.52. DA/TIG kaynak yöntemi ve TIG 316L dolgu metali ile kaynatılmış numunenin korozyon testi sonucundaki SEM/EDAX noktasal ve bölgesel analizleri

4.8.6. Darbeli Akım TIG Kaynağı Yöntemi ve Burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) Dolgu Metali Kullanılan Deneydeki Korozyon Testi Sonuçları

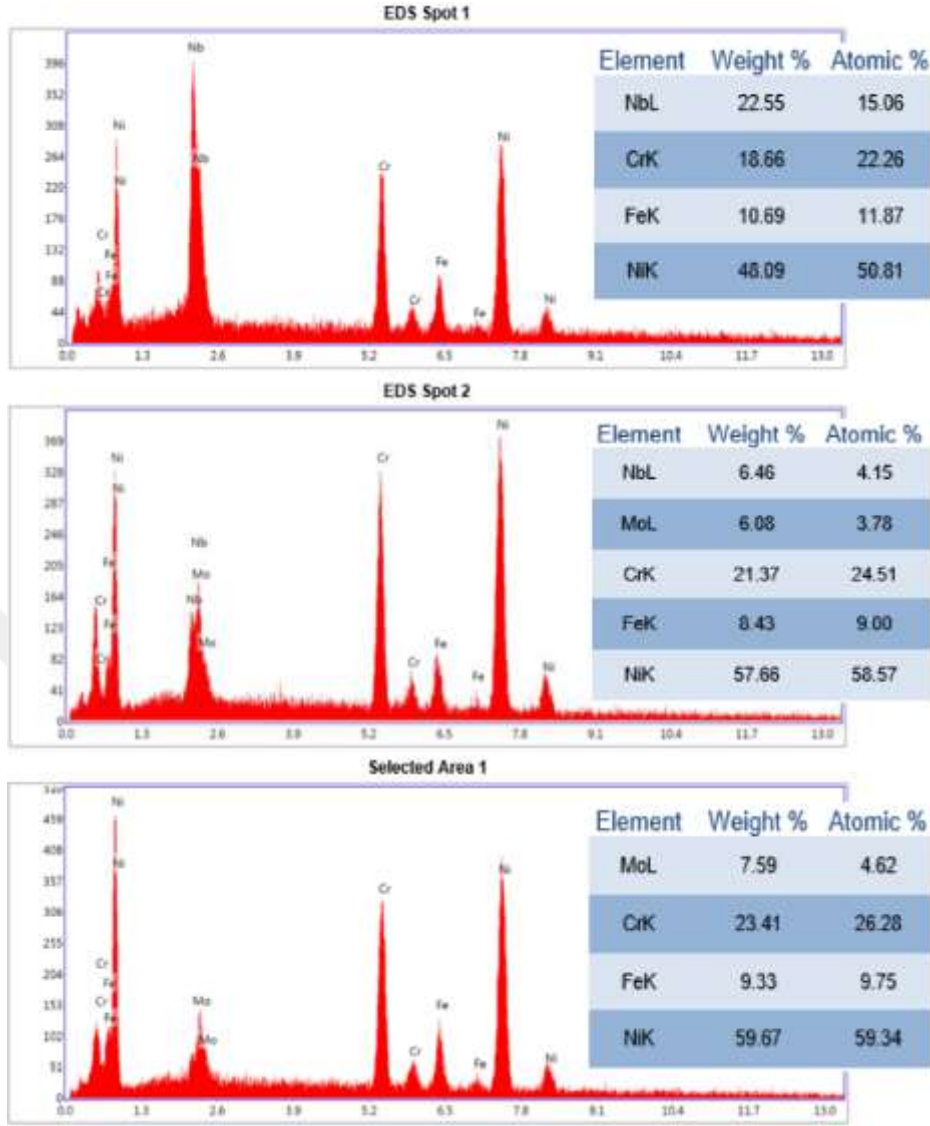
Darbeli akım TIG kaynağı yöntemi ve burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali kullanılarak yapılan kaynak numunesinin korozyon testi kütle değişimi grafiği Şekil 4.53.'de gösterilmiştir. İlk 12 saat sonucunda 0,2 gr malzeme kaybı olmuştur. Bu sonuç bütün yapılan deneyler arasındaki en düşük değerdir. Deney sonucunda malzemede 6,4 gr kütle kaybı meydana gelmiştir. Bu sonuç da yapılan bütün deneylere göre en düşük neticedir. Malzeme kaybı grafiği lineer olarak devam etmiştir. 240 saat boyunca yapılan ölçümlerde herhangi ardışık korozyon ivmesi tespiti yapılmamıştır. Sürekli akım TIG kaynak yöntemi ve TIG 316L dolgu metali ile yapılan kaynak ile karşılaştırıldığında malzeme kaybı çok daha azdır. Bu durum darbeli akımın ikincil fazların oluşmasını engelleyen bir parametre olduğunun kanıtı olarak değerlendirilebilir.



Şekil 4.53. DA/TIG kaynak yöntemi ve burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali ile kaynatılmış numunenin korozyon testi kütle değişimi grafiği



Şekil 4.54. DA/TIG kaynak yöntemi ve burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali ile kaynatılmış numunenin korozyon testi sonucundaki SEM görüntüsü



Şekil 4.55. DA/TIG kaynak yöntemi ve TIG 316L dolgu metali ile kaynatılmış numunenin korozyon testi sonucundaki SEM/EDAX noktasal ve bölgesel analizleri

Şekil 4.54 ve 4.55.'de korozyon bölgesinin SEM görüntüsü ve EDAX analiz sonuçları gösterilmektedir. SEM görüntüsünde malzeme yüzeyinde küçük çukurlar ve geniş sığ çukurlar tespit edilmiştir. Fakat diğer deneyler ile karşılaştırıldığında yüzeyin daha düzgün olduğu anlaşılmaktadır. EDS Spot 1 olarak az sayıdaki beyaz parlak noktadan birisi seçilmiştir. Nb yoğunluklu bir çökelti olarak kayda alınmıştır. EDS Spot 2 ise küçük ve derin olan siyah renkli çukurculardan birisi olarak seçilmiştir. Bu yapı da düşük miktarda Nb ve Mo elementi içeren bir Laves fazı olarak tespit edilmiştir. Selected Area 1 bölgesinde ise Mo, Fe, Ni, Cr elementlerini içeren homojen bir yapı tespit edilmiştir. Daha önce mikro yapı ve mekanik test sonuçlarında olduğu gibi, korozyon testi sonuçlarına göre de en az korozyonun olduğu deney darbeli akım TIG kaynak yöntemi ve burgu (ERNiCr-3 + TIG 316) dolgu metalinin kullanıldığı çalışma olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.6.'da korozyon testlerinin sonuç özetleri deney sıralamasına göre verilmektedir.

Tablo 4.6. Korozyon testi sonuç özetleri

Deney	Toplam kütle kaybı (gr)	Özet
1. SA/TIG – ERNiCr-3	11,5	Lineer grafik göstermiştir. Korozyonun Laves fazları etrasında oluştuğu ve korozyon neticesinde oyuklar oluştuğu, bu oyukların birleşerek kanal halini aldığı görülmüştür.
2. SA/TIG – TIG 316L	13,9	Parabolik grafik göstermiştir. Malzeme yüzeyinde derin çukurların varlığı tespit edilmiştir. Kimyasal bazı reaksiyonlar sonucu olduğu tahmin edilen Eu elementi tespit edilmiştir.
3. SA/TIG – ERNiCr-3 + TIG 316L	15,9	En fazla malzeme kaybı bu deney sonucunda gerçekleşmiştir. Parabolik grafik göstermiştir. Malzeme yüzeyinde derin çukurların oluştuğu gözlenmiştir.
4. DA/TIG – ERNiCr-3	12,4	Parabolik grafik göstermiştir. Malzeme yüzeyinde çeşitli ebatlarda çok fazla küçük çaplı ve derin çukurla ile büyük çaplı sığ çukurların oluştuğu tespit edilmiştir.
5. DA/TIG – TIG 316L	9,8	Lineer grafik göstermiştir. Kaynak bölgesinde çok büyük çaplı fakat sığ çukurların oluştuğu tespit edilmiştir.
6. DA/TIG – ERNiCr-3 + TIG 316L	6,4	En az malzeme kaybı bu deney sonucunda gerçekleşmiştir. Lineer grafik göstermiştir. Malzeme yüzeyinde homojen şekilde malzeme kaybı olduğu tespit edilmiştir.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında nikel esaslı bir süper alaşım olan Inconel 625 malzemesi ile östenitik paslanmaz çelik olan AISI 316L malzemelerinin birbirleriyle ile kaynağının mekanik ve mikro yapı özellikleri ile korozyon direnci incelenmiştir. Çalışma kapsamında TIG kaynak yöntemi iki farklı kaynak akım tipi ile kullanılmıştır. Sürekli akım ve darbeli akım kaynak makinasının sağladığı özellikler ile kullanılmıştır. Her iki kaynak çeşidi için de üçer farklı dolgu metali kullanılarak toplam 6 deney düzeneği üzerinde çalışılmıştır. Bunlar ERNiCr-3, TIG 316L ve burğu (ERNiCr-3 + TIG 316L) şeklindeki dolgu metalidir. Kaynakları yapılan malzemelerden alınan numuneler makro, mikro yapı, mekanik ve korozyon testleri için parçalara ayrılmış ve her test sonuçları değerlendirilmiştir.

Makro yapı incelemelerinde sürekli akım ve darbeli akım TIG kaynak yöntemleri ile yapılan kaynaklar neticesinde kaynak bölgelerinin boşluk, gözenek, kabarcık, çukur, çatlak, kırık, nüfuziyet yetersizliği gibi hataları barındırmadığı tespit edilmiştir. Mikro yapı incelemelerinde kaynak bölgelerinde ITAB'da kolonlu ve eş eksenli tanecik büyümeleri görülmüştür. Her deney sonucunda mikro yapı hatası tespit edilmiştir. Bu hatalar malzemenin mekanik özelliklerini ve korozyon direncini azaltacak niteliktedir. Çizgisel element haritalama analizine göre bütün deneylerde Inconel 625 tarafından kaynak bölgesi ve AISI 316L tarafına Ni ve Nb göçü gerçekleşmiştir. Aynı şekilde bütün deneylerde AISI 316L tarafından kaynak bölgesine ve Inconel 625 tarafına Fe element göçü gerçekleşmiştir. Cr elementi transferi sınırlı kalmıştır. Tüm bu element analizleri ana metallerin ve dolgu metallerinin kimyasal kompozisyonlarından ötürü beklenen hareketlerdir.

SEM/EDAX incelemelerinde neticesinde bütün testlerde zararlı Laves fazları ve ikincil diğer fazların oluşumu tespit edilmiştir. Sürekli akım ve ERNiCr-3 dolgu metali ile yapılan kaynakta NbC karbüleri tespit edilmiştir. TIG 316L dolgu metali ve sürekli akım ile yapılan kaynakta da Nb bazlı ikincil fazların oluştuğu tespit edilmiştir. Burada TIG 316L dolgu metali Nb elementi içermediği için Nb'nin olumsuz etkilerinin azaltmak için seçilmiştir. Fakat Buna rağmen kaynak sonrası kaynak bölgesinde önemli miktarda Nb içeren ikincil faz yapılarının olduğu görülmüştür. Bunun sebebinin çok pasolu kaynak süreci neticesinde ortaya çıkan ısınma-soğuma hareketinin olduğu tespit edilmiştir. Bu deneyde kullanılan malzemeler 20 mm kalınlığında olduğu için toplamda altı adet paso ile kaynak yapılmıştır. Altı kaynak pasosunun malzeme içerisindeki element transferine olumsuz etkisi olduğu belirlenmiştir. Burğu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali ile yapılan kaynakta TiN ikincil fazı oluşumu tespit edilmiştir. ERNiCr-3 ve darbeli akımın kullanıldığı kaynak neticesinde kaynak yüzeyinde AL ve Ti elementlerinin olduğu çok kararsız bir yapı tespit edilmiştir. Al ve Ti elementleri ana metal veya dolgu metalinde bulunmamaktadır. Bu duruma sebep olan etkenin kaynak malzemelerinin birden farklı malzemenin kaynağı için kullanıldığı gerçeğidir. Bununla birlikte atölye ortamında birçok malzemenin talaşlı imalatı da yapılmaktadır. Bu durumda ortaya çıkan metal tozlarının kaynak parçaları üzerinde birikerek SEM/EDAX analizi sonucunda ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Bu çalışmada belirlenen en net sonuçlarından bir tanesi kaynak ekipmanlarının kaynak

işleminde sonra çok iyi temizlenmesi gerektiğidir. Ayrıca imalat ortamında farklı malzeme işlemlerinin ayrılmış bölümlerde yapılması gerekmektedir. TIG 316L ve darbeli akım ile yapılan kaynakta da zararlı M_6C karbürleri tespit edilmiştir. Burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali ve darbeli akım ile yapılan kaynakta da az oranda yabancı madde bulaşığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte kaynak yüzeyinin ve SEM/EDAX sonuçlarının en iyi olduğu durum bu deneydedir.

Mekanik testler incelendiğinde, mikro sertlik sonuçlarına göre sürekli akım ve TIG 316L dolgu metali, sürekli akım ve burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali, darbeli akım ve ERNiCr-3 dolgu metali ile yapılan kaynakların gevrek olduğu tespit edilmiştir. Sürekli akım ve ERNiCr-3 dolgu metali, darbeli akım ve TIG 316L dolgu metali, sürekli akım ve burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali ile yapılan kaynakların sünek olduğu belirlenmiştir. Bu durum çekme deneyleri neticesinde de kanıtlanmıştır. Gevrek olarak tespit edilen numunelerde kopma kaynak bölgesinde gerçekleşirken, sünek olarak tespit edilen numunelerde kopma mukavemetin daha az olduğu AISI 316L ana metali üzerinde gerçekleşmiştir. Çekme testi sonucunda en düşük kopma mukavemeti ve en az uzama sürekli akımın ve TIG 316L dolgu metalinin kullanıldığı deneyde gerçekleştiği tespit edilmiştir. En fazla uzama ve en yüksek kopma mukavemeti ise burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metali ile darbeli akımın kullanıldığı deneyde meydana gelmiştir. SEM/EDAX analizi sonuçları ve mekanik testler karşılaştırıldığında, her iki durumda da darbeli akım ve burgu dolgu metalinin kullanıldığı deneyde en iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Korozyon testleri sonuçlarına göre en fazla kütle kaybı % 15,9 ile sürekli akım ve burgu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metalinin kullanıldığı deney sonucunda yaşanmıştır. En az korozyona uğrayan numune ise burgu dolgu metalinin darbeli akım ile kullanıldığı deney neticesinde gerçekleşmiştir. Bu deney sonucunda % 6,4'lük malzeme kaybı yaşanmıştır. Bu durum burgu dolgu metali kullanmanın avantajı ve dezavantajının belirlenmesi için en iyi örneği ortaya çıkarmaktadır. Burgu dolgu metalinin kullanılması kaynak tipine göre her iki metalin de iyi özelliklerini göstermek veya her iki tarafın da kötü özelliklerini sergilemek gibi durumları ortaya çıkarabilmektedir. Bu çalışmada olduğu gibi burgu metalini sürekli akım TIG ile kullanmak neticesinde % 15,9'luk korozyon sebepli malzeme kaybı oluşurken; sadece akım tipini değiştirerek yarısından daha da az korozyon kaybının oluşması sağlanabilmektedir. Mikro yapı ve mekanik testler sonucunda en iyi değerleri veren burgu dolgu metalinin darbeli akım yöntemi ile kullanılması deneyi, korozyon testi için de en uygun sonuçları vermiştir.

Bununla birlikte TIG 316L dolgu metalinin sürekli akım kaynak yöntemi ile kullanılması sonucu elde edilen numunede korozyon testi sonrası bazı yapılar ortaya çıkmıştır. Bu yapılardan birisinin Evropiyum elementi içerdiği tespit edilmiştir. Eu toprak metalleri dizisinden nadir bulunan bir elementtir. Ana malzeme veya dolgu metalleri kimyasal bileşiklerinde bulunmadığı gibi üretim alanında da bu elementi içeren herhangi bir malzemenin bulunmadığı bilinmektedir. Bu sebeple bu elementi içeren yapının korozyon testi öncesinde oluşan ikincil fazların, asit korozyon testi esnasında kimyasal

bir reaksiyon sonucu ortaya çıktığı tahmin edilmektedir. Bu durumun detaylı olarak çalışılması tavsiye edilmektedir.

Tez çalışması neticesinde elde edilen sonuçlar ana maddeler halinde aşağıda verilmiştir:

- Nb elementinin kaynak esnasında zararlı faz oluşturma kabiliyetinin fazla olmasından dolayı Nb elementinden yoksun olan TIG 316L dolgu metalinin kullanılmasının, Nb bazlı faz oluşumunu engellemediği tespit edilmiştir. Bunun sebebinin kalın olan malzemelerin kaynağı için çoklu paso yapılması neticesinde ısı girdisinden kaynaklandığı tespit edilmiştir. Bu durumu engellemek için başka kaynak yöntemleri test edilebilir.
- Sürekli akım yerine darbeli akım yönteminin kullanılmasının ikincil faz oluşumunu azaltarak kaynak bölgesinin mikro yapı, mekanik ve korozyon direnci özelliklerinin arttırdığı tespit edilmiştir.
- Kaynak işlemi için en önemli parametrelerden bir tanesinin, kaynak ekipmanlarının temizliği olduğu ve üretim ortamının diğer metaller ile olası etkileşimini kesmek amacıyla yalıtılması gerektiği tespit edilmiştir.
- Mikro yapı, mekanik ve korozyon testleri sonuçlarına göre Inconel 625 ile AISI 316L metalinin kaynatılmasında en iyi sonuçlar darbeli akım TIG kaynak yöntemi ile burğu (ERNiCr-3 + TIG 316L) dolgu metalinin kullanılması olduğu tespit edilmiştir.

Bu tez çalışmasından elde edilen bulgular ve veriler, Orijinal Ekipman Üreticileri (Original Equipment Manufacturers – OEM) tarafından farklı metallerin kaynağı ile imalatı yapılan ürünler için kullanılabilir niteliktedir.

KAYNAKLAR

- [1]. Mortezaie, A., Shamanian, M. (2014). An assessment of microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of dissimilar welds between Inconel 718 and 310S austenitic stainless steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 116, 37-46. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpvp.2014.01.002>
- [2]. Chen, H.C., Pinkerton, A.J., Li, L. (2010). Fibre laser welding of dissimilar alloys of Ti-6Al-4V and Inconel 718 for aerospace applications. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 52(9-12), 977-987. doi: 10.1007/s00170-010-2791-3
- [3]. Ma, H., Qin, G., Geng, P., Li, F., Fu, B., Meng, X. (2015). Microstructure characterization and properties of carbon steel to stainless steel dissimilar metal joint made by friction welding. *Materials and Design*, 86, 587-597. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.068>
- [4]. Akram, J., Kalvala, P.R., Misra, M., Charit, I. (2017). Creep behavior of dissimilar metal weld joints between P91 and AISI 304. *Materials Science & Engineering A*, 688, 396-406. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2017.02.026>
- [5]. Knapp, S., Weck, A. *Dissimilar Metal Welds: Inconel to Carbon Steel*. (Report No.1). Ottawa: Ottawa University
- [6]. Schubert, E., Kalssen, M., Zerner, I., Walz, C., Sepold, G. (2001). Light-weight structures produced by laser beam joining for future applications in automobile and aerospace industry. *Journal of Material Processing Technology*, 115, 2-8.
- [7]. Avery, R.E., *Pay attention to dissimilar metal welds*. (Report No.14 018). Brussels: Nickel Institute
- [8]. Donachie, M.J., S.J. (2002). *Superalloys: A technical guide*. Ohio: ASM International Materials Information Society
- [9]. Amin, M.A., Bagoury, N.E., Saracoglu, M., Ramadan, M. (2014). Electrochemical and Corrosion Behavior of cast Re-containing Inconel 718 Alloys in Sulphuric Acid Solutions and the Effect of Cl-. *International Journal of Electrochemical Science*, 9, 5352-5374.
- [10]. Special Metals. (2018). *Nimonic Alloy 75*. 8 Kasım 2018 tarihinde <http://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/alloys/nimonic/nimonic-alloy-75.pdf> adresinden erişildi.
- [11]. Wang, L., Li, H., Liu, Q., Xu, L., Lin, S., Zheng, K. (2017). Effect of sodium chloride on the electrochemical corrosion of Inconel 625 at high temperature and pressure. *Journal of Alloys and Compounds*, 703, 523-529. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.01.320>
- [12]. Thomas, A., Wahabi, M.E., Cabrera, J.M., Prado, J.M. (2006). High temperature deformation of Inconel 718. *Journal of Materials Processing Technology*, 177, 469-472. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.04.072
- [13]. Zahrani, E.M., Alfantazi, A.M. (2014). High temperature corrosion and electrochemical behavior of INCONEL 625 weld overlay in PbSO₄-Pb₃O₄-PbCl₂-CdO-ZnO molten salt medium. *Corrosion Science*, 85, 60-76. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2014.03.034>
- [14]. Bunsch., A., Kowalska, J., Witkowska, M. (2012). Influence of die forging parameters on the microstructure and phase composition of Inconel 718 Alloy. *Archives of Metallurgy and Materials*, 57(4), 929-935. doi: 10.2478/v10172-012-0102-8

- [15]. Joint European Torus. (1991). *JET*. 8 Kasım 2018 tarihinde <http://newenergytimes.com/v2/sr/iter/Holloway-jet-140320111547-phpapp02.pdf>
- [16]. Uzunonat, Y. (2012). *TIG Kaynağı Uygulanmış Inconel 718 Malzemenin Darbe Dayanımının İncelenmesi*. Yayınlanmış doktora tezi, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.
- [17]. Yıldırım, Ç.V. (2016). Süper alaşımların talaşlı imalat yöntemiyle işlenmesinde minimum miktarda yağlama uygulamaları. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 5 (3), 86-105.
- [18]. Kale, A., Khanna, N. (2017). A review on cryogenic machining of super alloys used in aerospace industry. *Procedia Manufacturing*, 7, 191-197.
- [19]. Siemens. (2018). *SGT-750 Gas Turbine Proven technology. Verified results..* 6 Kasım 2018 tarihinde https://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-generation/gas-turbines/sgt-750/SGT-750_brochure.pdf
- [20]. Ezugwu, E.O., Bonney, J., Yamane, Y. (2003). An overview of the machinability of aeroengine alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 134, 233-253.
- [21]. Thakur, A. Gangopadhyay. (2016). State-of-the-art in surface integrity in machining of nickel-based super alloys. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 100, 25-54. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.10.001>
- [22]. Kaplajiyani, S., Shmid, S.R.. (2016). *Manufacturing Process for Engineering Materials*. ABD, Pearson Higher Ed
- [23]. Special Metals. *Product Handbook of High-Performance Alloys*. (Report No. SMC 035). New York: Special Metals Corp.
- [24]. Ramirez, A.L., Calderon, J.P., Mazur, Z., Bravo, V.M.S., Gomez, L.M. (2016). Microstructural changes during high temperature service of a cobalt-based superalloy first stage nozzle. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, 1-7. doi: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/1745839>
- [25]. Cui, C., Ping, D., Gu, Y., Harada, H. (2006). A New co-base superalloy strengthened by gamma phase. *Materials Transactions*, 47 (8), 2099-2102. doi: 10.2320/matertrans.47.2099]
- [26]. Losertova, M.. (2014). *Advanced Materials*. Ostrava: Ostrava Teknik Üniversitesi
- [27]. Geddes, B., Leon, H., Huang, X. (2010). *Superalloys: Alloying and Performance*. Ohio: ASM International Materials Information Society
- [28]. Basmacı, G. (2002). *Nikel esaslı süper alaşım malzemelerinin CNC freze tezgâhlarında işlenmesinde kesme parametrelerinin incelenmesi*. Yayınlanmış doktora tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul.
- [29]. Çay, V.V., Ozan, S. (2005). Süper alaşımlar ve uygulama alanları. *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*, 2005, 178-188.
- [30]. Dinda, G.P., Dasgupta, A.K., Mazumder, J. (2009). Laser aided direct metal deposition of Inconel 625 superalloy: Microstructural evolution and thermal stability. *Materials Science and Engineering A*, 509, 98-104. doi: 10.1016/j.msea.2009.01.009
- [31]. Shankar, V., Rao, K.B.S., Mannan, S.L. (2001). Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 alloy. *Journal of Nuclear Materials*, 288, 222-232.

- [32]. Special Metals. *Inconel 625 Alloy*. (Report No. 2013:13). New York: Special Metals Corp.
- [33]. Abioye, T.E.A., (2014). *Laser deposition of Inconel 625/tungsten carbide composite coatings by powder and wire feedstock*. Yayınlanmış doktora tezi, Nottingham Üniversitesi, İngiltere.
- [34]. Li, Q.G.D., Guo, S., Peng, H., Hu, J. (2011). The effect of deformation temperature on the microstructure evolution of Inconel 625 superalloy. *Journal of Nuclear Materials*, 414, 440-450. doi: 10.1016/j.jnucmat.2011.05.029
- [34]. Li, Q.G.D., Guo, S., Peng, H., Hu, J. (2011). The effect of deformation temperature on the microstructure evolution of Inconel 625 superalloy. *Journal of Nuclear Materials*, 414, 440-450. doi: 10.1016/j.jnucmat.2011.05.029
- [35]. VDM Metals. *Nicofer 6020 hMo*, (Report No. 4118). Werdohl: VDM Metals GmbH
- [36]. Huebner, J., Kata, D., Kusinski, J., Rutkowski, P., Lis, J. (2017). The effect of deformation temperature on the microstructure evolution of Inconel 625 superalloy. *Ceramics International*, 43(12), 8677-8684. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.03.194>
- [37]. Park, I.C., Kim, S.J. (2017). Corrosion behavior in seawater of arc thermal sprayed Inconel 625 coatings with sealing treatment. *Surface & Coatings Technology*, 325, 729-737. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.03.009>
- [38]. Özdoğan, E.F. (2002). *CrCoNi süper alaşımının yüksek sıcaklık oksidasyon ve karbürizasyon davranışı*. Yayınlanmış yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [39]. Outokumpu. *Forta 316L/4404*, (Report No. 4404). Helsinki: Outokumpu
- [40]. Aydoğdu G.H., Aydınol, M.K. (2017). AISI 316L Tipi Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Tanelerarası Korozyona Duyarlılığının Elektrokimyasal Polarizasyon Yöntemiyle Belirlenmesi. *Metalurji*, 23(121), 50-61.
- [41]. Smith, L.S., Thereadgill, P., Gittos, M. (1999). *Welding Titanium*, Cambridge, TWI
- [42]. Komaç, E. (2009). *Teknik Eğitim El Kitabı*, Kocaeli, Askaynak
- [43]. Smith, L.S., Thereadgill, P., Gittos, M. (1999). *Titanium: Designers and Users Handbook*, Cambridge, TWI
- [44]. Eryürek, İ.B., Sevük, A., Odabaş, C. (2007). *Kaynak Teknolojisi*, Kocaeli, Askaynak
- [45]. Weldcor (2018). *Plasma arc welding*,. 5 Kasım 2018 tarihinde http://www.weldcor.ca/encyclopedia.html?alpha=&per_page=61 adresinden erişildi.
- [46]. Csele, M. (2004). *Fundamentals of Light Sources and Lasers*, New Jersey, John Wiley & Sons
- [47]. Dahotre, N.B., Harimkar, S. (2008). *Laser Fabrication and Machining of Materials*, İsviçre, Springer US
- [48]. Rykalin, N., Uglov, A., Kokora, A. (1978). *Laser Welding and Machining*, İsveç, Mil Publishers
- [49]. Dikicioğlu, A. (2018). *Kaynak*. 5 Ekim 2018 tarihinde akademi1.itu.edu.tr/dikicioglu/DosyaGetir/135838/Ch30-Kaynak-2.pdf adresinden erişildi.
- [50]. Anık, S. (1991). *Kaynak Tekniği El Kitabı*, İstanbul, Gedik Yayınları

- [51]. Özcan, A. (2013). *Titanyum alüminatların sürtünme kaynağı ile birleştirilebilirliklerinin araştırılması*. Yayımlanmış yüksek lisans tezi, Osman Gazi Üniversitesi, Eskişehir.
- [52]. Özdemir, Ö. (2017). *Korozyon* (Ders Notu: 11). Sakarya: Sakarya Üniversitesi
- [53]. Milli Eğitim Bakanlığı (2013). *Gemilerde korozyonu önleme* (Denizcilik). Ankara: MEB
- [54]. DEÜ. (2012). *Korozyon ve Bozunma*. 12 Ekim 2018 tarihinde <http://web.deu.edu.tr/metalurjimalzeme/pdf/mmm2002Malzeme2/KOROZYON-KiSA.pdf> adresinden erişildi.
- [55]. Eken, A.E., Yılmaz, C., Tan, E. (2016). *18. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi bildiriler kitabı* içinde (ss. 832-835). İstanbul: Metalurji ve Malzeme Mühendisleri Odası
- [56]. Balbaşı, M. (2012). *Korozyon*. 16 Ekim 2018 tarihinde <http://w3.gazi.edu.tr/~balbasi/BOLUM-6.pdf> adresinden erişildi.
- [57]. Yalçın, H., Koç, T. (1997). *Mühendisler için korozyon*, Ankara: Metalurji ve Malzeme Mühendisleri Odası
- [58]. Muratoğlu, S. (2008). *Pirincin sulu çözeltilerdeki korozyonu*. Yayımlanmış yüksek lisans tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara.
- [59]. Amarine. (2017). *Why Stainless steel rust/corrosion?* 19 Ekim 2018 tarihinde <https://amarineblog.wordpress.com/2017/10/05/why-stainless-steel-rust-corrosion-part-2/> adresinden erişildi.
- [60]. Özakın, B. (2014). *Alüminyum alaşımların farklı ortamlardaki gerilmeli korozyon davranışının incelenmesi*. Yayımlanmış yüksek lisans tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- [61]. Altun, H. (2044). *Magnezyum alaşımlarının korozyonu ve FFB kaplamalarının korozyon davranışlarına etkisi*. Yayımlanmış doktora tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- [62]. Üneri, S. (2000). *Korozyon ve önlenmesi*, Ankara: Korozyon Derneği
- [63]. Kim, J.S., Park, Y., Lee, H.W. (2015). Effects of Heat Input on the Pitting Resistance of Inconel 625 Welds by Overlay Welding. *Metals and Materials International*, 21(2), 350-355. doi: 10.1007/s12540-015-4245-9
- [64]. Badiger, R.I., Narendranath, S., Srinath, M.S. (2017). Microstructure and mechanical properties of Inconel-625 welded joint developed through microwave hybrid heating. *Journal of Engineering Manufacture*, B, 1-16. doi: 10.1177/0954405417697350
- [65]. Dupont, J.N., Lippold, J.C., Kiser, S.D. (2009). *Weldability metallurgy and weldability of nickel-based alloys*, New Jersey: John Wiley & Sons
- [66]. Ramkumar, T., Selvakumar, M., Narayanasamy, P., Begam, A.A., Mathavan, P., Raj, A.A. (2017). Studies on the structural property, mechanical relationships and corrosion behaviour of Inconel 718 and SS 316L dissimilar joints by TIG welding without using activated flux. *Journal of Manufacturing Processes*, 30, 290-298. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.09.028>
- [67]. Prabu, S.S., Ramkumar, K.D., Arivazhagan, N. (2017). Microstructural evolution and precipitation behavior in heat affected zone of Inconel 625 and AISI 904L dissimilar welds. *Materials Science and Engineering*, 263, 1-11. doi: 10.1088/1757-899X/263/6/062073

- [68]. Naffakh, H., Shamanian, M., Ashrafizadeh, F. (2010). Microstructural evolutions in dissimilar welds between AISI 310 austenitic stainless steel and Inconel 657. *Journal of Materials Science*, 45, 2564-2573. doi: 10.1007/s10853-010-4227-8
- [69]. Ramkumar, K.D., Patel, S.D., Praveen, S.S., Choudhury, D.J., Prabakaran, P., Arivazhagan, N., Xavier, M.A. (2014). Influence of filler metals and welding techniques on the structure–property relationships of Inconel 718 and AISI 316L dissimilar weldments. *Materials and Design*, 62, 175-188. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.05.019>
- [70]. Hejripour, F., Aidun, D.K. (2017). Consumable selection for arc welding between Stainless Steel 410 and Inconel 718. *Journal of Materials Processing Technology*, 245, 287-299. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.02.013>
- [71]. Kumar, K., Ramkumar, K.D., Arivazhagan, N. (2015). Characterization of metallurgical and mechanical properties on the multi-pass welding of Inconel 625 and AISI 316L. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29(3), 1039-1047. doi: 10.1007/s12206-014-1112-4
- [72]. Kourdani, A., Haghighi, R.D. (2018). Evaluating the Properties of Dissimilar Metal Welding Between Inconel 625 and 316L Stainless Steel by Applying Different Welding Methods and Consumables. *Metallurgical and Materials Transaction A*, 49(A), 1231-1243. doi: <https://doi.org/10.1007/s11661-018-4469-7>
- [73]. Zadeh, E.A., Masaeli, M., Demmolaye, D. (2016). Effect of welding heat input on the microstructure of dissimilar metals: Inconel 625 and 316L stainless. *Journal of Basic and Applied Advances in Sciences*, 4(2), 1-17.
- [74]. Jeng, S.L., Lee, H.T., Weirich, T.E., Rebach, W.P. (2007). Microstructural Study of the Dissimilar Joints of Alloy 690 and SUS 304L Stainless Steel. *Materials Transaction*, 48(3), 481-489. doi: 10.2320/matertrans.48.481
- [75]. Ahmad, H.W., Hwang, J.H., Lee, J.H., Bae, D.H. (2016). An Assessment of the Mechanical Properties and Microstructural Analysis of Dissimilar Material Welded Joint between Alloy 617 and 12Cr Steel. *Metals*, 6(242), 1-11. doi: 10.3390/met6100242
- [76]. Türk Standartlar Enstitüsü. (2010). *TS EN ISO 6892-1*, Ankara: TSE.
- [77]. Malzeme Bilimi. (2017). *Çekme Testi*, 12 Ekim 2018 tarihinde <https://malzemebilimi.net/cekme-testi-nedir-neden-uygulanir-nasil-yapilir.html> adresinden erişildi.
- [78]. Aran, A. (2008). *Malzeme Bilgisi* (Ders Notu: 201). İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi
- [79]. Sims, C.T., Stoloff, L.S., Hagel, W.C. (1987). *Superalloys 2*, New York: Wiley Interscience
- [80]. McGuire, M.F. (2008). *Stainless Steels for Design Engineers*, Ohio: ASM International
- [81]. Kou, S. (2003). *Welding Metallurgy*, New Jersey, John Wiley & Sons
- [82]. Dev, S., Ramkumar, K.D., Arivazhagan, N., Rajendran, R. (2018). Investigations on the microstructure and mechanical properties of dissimilar welds of inconel 718 and sulphur rich martensitic stainless steel, AISI 416. *Journal of Manufacturing Processes*, 32, 685-698. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.03.035>
- [83]. Ramkumar, K.D., Sai, R.J., Reddy, V.S., Gundla, S., Mohan, T.H., Saxena, V., Arivazhagan, N. (2015). Effect of filler wires and direct ageing on the microstructure and mechanical properties in the

multi-pass welding of Inconel 718. *Journal of Manufacturing Processes*, 18, 23-45. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.01.001>

[84]. Şahiner, M., Akgök, Y.Z., Arslan, M., Ergin, M.H. (2017). *Dünya'da ve Türkiye'de nadir toprak elementleri* (Maden Serisi:5). Ankara: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü

[85]. Kimya Kulübü. (2018). *Evropiyum*, 9 Kasım 2018 tarihinde <http://www.kimyakulubu.com/evropiyum-eu/> adresinden erişildi.



ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Fatih DÖKME

Doğum Tarihi : 02.05.1984

E-mail : fdokme@gmail.com

Öğrenim Durumu :

Derece	Bölüm/Program	Üniversite	Yıl
Lisans	Makine Mühendisliği	Mersin Üniversitesi	2002-2007
Yüksek Lisans	Makine Mühendisliği	Mersin Üniversitesi	2009-2013
Doktora	İmalat Mühendisliği	Tarsus Üniversitesi	2014-

Görevler :

Görev Ünvanı	Görev Yeri	Yıl
Mekanik Bakım Onarım Şefi	Şişecam Kimyasallar Grubu Soda Sanayi A.Ş. Kromsan Krom Bileşikleri Fabrikası	2017- ...
İç Eğitmen	Şişecam Akademi	2017- ...
Mekanik Bakım Onarım Mühendisi	Şişecam Kimyasallar Grubu Soda Sanayi A.Ş. Kromsan Krom Bileşikleri Fabrikası	2008-2017

ESERLER (Makaleler ve Bildiriler)

1. Dokme, F., Kulekci, M.K., Esmе, U. (2018). Microstructural and Mechanical Characterization of Dissimilar Metal Welding of Inconel 625 and AISI 316L. *Metals*, 8(10), 797, 1-18. Doi: 10.3390/met8100797
2. Dokme, F., Guven, O., Kulekci, M.K., Esmе, U., Ocalir, S. (2017). Influence of Geometric Design Variables in the Efficiency of the High Energy Horizontal Chromite Type Ball Milling Process. *Materials Testing*, 59(7-8), 689-695. Doi: 0.3139/120.111058
3. Dokme, F., Turan, M. (2016). Effects of Using Pure Eco-Friendly Lubricants in Pump Bearings Instead of Traditional Mineral Lubricants, *2.th International Conference on Environmental Science and Technology bildiriler kitabı* içinde (ss. 70-78), Belgrad: ICOEST.
4. Dokme, F. (2015). Mühendislik Eğitimine İş Sağlığı ve Güvenliği Kültürünün Entegrasyonu ve Çözüm Önerileri, *8. Uluslararası İş Sağlığı ve Güvenliği Konferansı bildiriler kitabı* içinde (ss. PP46), İstanbul: T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı.
5. Dokme, F. (2015). Bilyalı Değirменlerde Hız-Dolum Optimizasyonu ve Boru Hattı Ekipmanları Yalıtımı ile Enerji Verimliliği Uygulaması, *5. Ulusal Verimlilik Kongresi bildiriler kitabı* içinde (ss. 253-268), Ankara: T.C. Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı.
6. Dokme, F., Guven, O. (2014). Bilyalı Değirменlerde Hızın Performansa Olan Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi. *Mühendis ve Makina*, 55(657), 38