



T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**LAZER, MIG VE TIG KAYNAKLI API 5L X60 ÇELİĞİNİN MEKANİK VE
MİKROYAPISAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Burhan GÖK

Nisan – 2024
BATMAN

**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**LAZER, MIG VE TIG KAYNAKLI API 5L X60 ÇELİĞİNİN MEKANİK VE
MİKROYAPISAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Burhan GÖK

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Şükrü ADİN**

**Nisan – 2024
BATMAN**

TEZ KABUL VE ONAYI

Burhan GÖK tarafından hazırlanan “Lazer, MIG ve TIG kaynaklı API 5L X60 çeliğinin mekanik ve mikroyapısal özelliklerinin incelenmesi” adlı tez çalışması, 19/04/2024 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Hamit ADİN

.....

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Şükrü ADİN

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Hayri YILDIRIM

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdür V.

Bu tez çalışması Batman Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (BTÜBAP) tarafından BTÜBAP-2023-YL-03 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

.....

Burhan GÖK

Tarih: 19 / 04 / 2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

LAZER, MIG VE TIG KAYNAKLI API 5L X60 ÇELİĞİNİN MEKANİK VE MİKROYAPISAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Burhan GÖK

**Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Şükrü ADİN

2024, 90 Sayfa

Jüri

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Şükrü ADİN

Prof. Dr. Hamit ADİN

Dr. Öğr. Üyesi Hayri YILDIRIM

Petrol ve doğal gazın iletiminde kullanılan API 5L standardındaki borular genellikle kaynak yapılarak birleştirildiğinden yapılan kaynağın kalitesi büyük önem arz etmektedir. Bu yüzden, kullanılan kaynak teknolojilerinin uygunluğu çok önemlidir. Bu deneysel çalışmada, görece oldukça yeni bir teknoloji olan lazer kaynağının, kök kaynağı olarak kullanılmasının etkileri araştırılmıştır. Bu kapsamda, MIG, TIG ve Lazer kaynak teknolojileri kullanılarak API 5L X60 kalitesindeki çelik numuneler, farklı kaynak parametrelerinde kaynak edilmişlerdir. Çalışmanın maliyet-etkin olması amacıyla, kaynak parametreleri ve deney sayısı Taguchi optimizasyon yöntemine göre belirlenmiştir. MIG, TIG ve Lazer kaynak teknolojileri ile kaynak edilen numunelerin kaynak kalitelerinin belirlenmesi amacıyla, radyografi, çekme ve sertlik testleri yapılmıştır. Ayrıca, belirlenen kaynaklı numunelerin kırılma yüzeylerinin hem görüntülenmesi ve hem de analizi için Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağıtıcı X-ışını (EDX) ünitesi kullanılmıştır. Radyografi testleri sonucunda, MIG ve TIG kaynaklı bağlantılarda birçok kaynak kusurunun olduğu görülmüştür. Diğer yandan, MIG+Lazer ve TIG+Lazer kaynaklı bağlantıların kaynak kalitelerinin, Lazer kök kaynağının olumlu etkisiyle çok daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Çekme testleri sonucunda, MIG ve TIG kaynakları ile yapılan bağlantıların maksimum çekme kuvvetlerinin, lazer kök kaynaklı MIG+Lazer ve TIG+Lazer bağlantılarına göre daha düşük oldukları ortaya çıkmıştır. Taguchi optimizasyon yöntemine göre yapılan analizlerde, en yüksek SN oranına TIG+Lazer kaynağı ve en düşük SN oranına ise MIG kaynağı ile ulaşılmıştır. ANOVA analizi sonucunda, en yüksek yüzde katkı oranının (en önemli faktörün) %84,36 ile kaynak teknolojisi olduğu görülmüştür. MIG, TIG, MIG+Lazer ve TIG+Lazer kaynaklı bağlantıların kırılma yüzeylerinin çekilen SEM görüntüleri incelendiğinde, tüm görüntülerde, sünek kırılmanın olduğu anlaşılmıştır. MIG, TIG, MIG+Lazer ve TIG+Lazer kaynaklı bağlantıların ölçülen sertlik değerlerinin kaynak bölgelerine göre karşılaştırmaları yapıldığında, en yüksek sertlik değerlerinin genel olarak ITAB bölgesinde yoğunlaştığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: API 5L X60, Lazer kaynağı, Mekanik özellikler, MIG kaynağı, Mikroyapısal özellikler, Radyografik testler, TIG kaynağı

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF MECHANICAL AND MICROSTRUCTURAL PROPERTIES OF LASER, MIG AND TIG WELDED API 5L X60 STEEL

Burhan GÖK

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
BATMAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN MECHANICAL ENGINEERING**

Advisor: Assist. Prof. Dr. Mehmet Şükrü ADİN

2024, 90 Pages

Jury

Advisor: Asist. Prof. Dr. Mehmet Şükrü ADİN

Prof. Dr. Hamit ADİN

Asist. Prof. Dr. Hayri YILDIRIM

Since API 5L standard pipes used in the transmission of oil and natural gas are generally joined by welding, the quality of the weld is of great importance. For this reason, the suitability of the welding technologies used is very important. In this experimental study, the effects of using laser welding, which is a relatively new technology, as a root welding were investigated. In this context, API 5L X60 quality steel samples were welded at different welding parameters using MIG, TIG and Laser welding technologies. In order to make the study cost-effective, the welding parameters and number of experiments were determined according to the Taguchi optimization method. Radiography, tensile and hardness tests were carried out to determine the welding quality of the samples welded with MIG, TIG and Laser welding technologies. Additionally, Scanning Electron Microscope (SEM) and Energy Dispersive X-ray (EDX) unit were used for both imaging and analysis of the fracture surfaces of the determined welded samples. As a result of radiography tests, it was observed that there were many welding defects in MIG and TIG welded joints. On the other hand, it has been determined that the welding qualities of MIG+Laser and TIG+Laser welded joints are much better due to the positive effect of Laser root welding. As a result of the tensile tests, it was revealed that the maximum tensile forces of the joints made with MIG and TIG welding were lower than the laser root welded MIG+Laser and TIG+Laser connections. In the analyzes performed according to the Taguchi optimization method, the highest SN rate was achieved with TIG + Laser welding and the lowest SN rate was achieved with MIG welding. As a result of ANOVA analysis, it was seen that the highest percentage contribution (the most important factor) was welding technology with 84.36%. When the SEM images taken of the fracture surfaces of MIG, TIG, MIG+Laser and TIG+Laser welded joints were examined, it was understood that there were ductile fractures in all images. When the measured hardness values of MIG, TIG, MIG+Laser and TIG+Laser welded joints were compared according to the welding regions, it was seen that the highest hardness values were generally concentrated in the HAZ region.

Keywords: API 5L X60, Laser welding, Mechanical properties, MIG welding, Microstructural properties, Radiographic tests, TIG welding

ÖNSÖZ

Öncelikle, yüksek lisans hayatıma başladığım andan itibaren bana her türlü desteği sağlayan başta babam İsmail GÖK'e ve ailem olmak üzere,

BTÜBAP projesi kapsamında maddi destek sağlayan proje ofisi yetkilileri ile deneysel çalışmaların yapılması için her türlü kolaylığı sağlayan Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nın saygıdeğer başkanı Prof. Dr. Hamit ADİN hocama ve bu tez çalışmasının planlanmasında ve yürütülmesinde desteğini ve ilgisini esirgemeyen danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Şükrü ADİN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Burhan GÖK
BATMAN – 2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER	ix
ŞEKİLLER	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Çeliklerde Bulunan Temel Alaşım Elementleri	3
1.2. Doğal gaz	4
1.3. Kaynak	5
1.3.1. Kaynağı etkileyen parametreler	5
1.3.2. Ergitme kaynak yöntemleri	7
1.3.2.1. Gaz altı kaynak türleri	8
1.3.3. Katı hal kaynak yöntemleri	8
1.4. Lazer teknolojisi	9
1.4.1. Lazer kaynağı	9
1.4.1.1. Lazerin kullanım alanları nelerdir	10
1.4.1.2. Lazer kaynak yönteminin avantajları	10
1.4.1.3. Lazer kaynak yönteminin dezavantajları	11
1.4.2. Lazer kaynağa etki eden parametreler	12
1.4.2.1. Diğer kaynak parametreleri	13
1.4.3. Lazer kaynaklarında makro yapı ve mikro yapının incelenmesi	14
1.5. TIG Kaynağı	15
1.5.1. TIG kaynağında kullanılan koruyucu gazın nüfuziyete olan etkisi	16
1.5.2. Argon gazının avantajları	17
1.5.3. Helyum gazının avantajları	18
1.5.4. TIG kaynağında kullanılan argon ve helyum gazlarının karşılaştırılması	19
1.5.4.1. TIG kaynak yönteminin avantajları	19
1.5.4.2. TIG kaynak yönteminin dezavantajları	20
1.5.5. Kaynak dikişlerindeki hataların oluşumunu etkileyen parametreler	20
1.5.6. TIG kaynağında kullanılan ekipmanlar	21
1.5.7. TIG kaynağında kullanılan kaynak makinaları	22
1.5.7.1. Jeneratör ve alternatör tipi kaynak makinaları	22
1.5.7.2. Transformatör-redresör tipi kaynak makinaları	22
1.5.7.3. Üç fazlı redresör tipi kaynak makinaları	23
1.5.7.4. Transformatör tipi kaynak makinaları	23
1.6. MAG Kaynak –MIG Kaynak	23
1.6.1. Kaynak donanımlarının parametreleri	25
1.6.2. Kaynak ilave telleri	26

1.6.3.	Kaynak parametreleri.....	27
1.6.4.	Kaynak pozisyonları	28
1.6.5.	Mıg-mag kaynak yönteminin avantajları ve dezavantajları.....	29
1.6.6.	Mıg/mag kaynak yönteminde elektrotun seçimi.....	30
1.6.6.1.	Elektrot seçiminde dikkat edilmesi gereken hususlar	30
1.6.6.2.	Mıg/mag çelik kaynağında kullanılan elektrotların seçimi	31
1.7.	Radyografik Muayene Yöntemleri	32
1.7.1.	Radyografik muayene	32
1.7.2.	X-ray cihazı ile muayene	33
1.7.2.1.	X-ray cihazı ile radyografide boru hatları uygulamalarına genel bakış 33	
1.7.3.	Gama cihazı ile muayene	33
1.7.4.	Radyografik görüntünün kalite parametreleri.....	34
2.	LİTERATÜR TARAMASI.....	35
3.	MALZEME VE YÖNTEM.....	41
3.1.	Malzeme.....	41
3.2.	Deney malzemelerinin hazırlanması.....	43
3.3.	Deney malzemelerinin kaynak edilmesi	46
3.4.	Radyografi testi.....	53
3.5.	Çekme testi numunelerinin hazırlanması.....	55
3.6.	SEM-EDX cihazı ile görüntüleme ve analiz.....	58
3.7.	Sertlik ölçümleri	59
4.	ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	60
4.1.	Tahribatsız inceleme (Radyografi testi) sonuçları	60
4.2.	Çekme testi sonuçları.....	62
4.3.	SEM ile görüntüleme ve EDX analizi sonuçları.....	72
4.4.	Sertlik testi sonuçları	76
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	78
5.1.	Sonuçlar	78
5.2.	Öneriler	80
KAYNAKLAR	82	
ÖZGEÇMİŞ	91	

ÇİZELGELER

Çizelge 3.1. API 5L X60 çeliğinin yüzde ağırlıkça element dağılımı	41
Çizelge 3.2. API 5L X60 çeliğinin mekanik özellikleri	42
Çizelge 3.3. API 5L X60 çeliğinin darbe testi değerleri.....	42
Çizelge 3.4. Hidrolik doğrultma presi makinesinin teknik özellikleri.....	43
Çizelge 3.5. Ajan CNC plazma oxy kesme makinesinin teknik özellikleri.....	44
Çizelge 3.6. Jetco marka freze makinesinin teknik özellikleri	45
Çizelge 3.7. Lazer kaynak makinasının teknik özellikleri.....	47
Çizelge 3.8. Magmaweld RS 350 MK MIG kaynak makinesinin teknik özellikleri.....	49
Çizelge 3.9. Taguchi ortogonal deney düzeneği için parametre ve seviyeler.....	50
Çizelge 3.10. MIG ve MIG+Lazer kaynağının parametreleri	50
Çizelge 3.11. INV AC-DC TIG 320 AS kaynak makinesinin teknik bilgileri	52
Çizelge 3.12. TIG ve TIG+Lazer kaynağının parametreleri.....	52
Çizelge 3.13. Tahribatsız muayene cihazının teknik özellikleri	54
Çizelge 3.14. ABP-FM 3015 Fiber lazer kesim makinesinin teknik özellikleri.....	55

ŞEKİLLER

Şekil 1.1. API 5L standardına göre üretilen çeliklerin akma ve çekme mukavemeti değerleri	3
Şekil 1.2. Lazer kaynağı gösterimi	10
Şekil 1.3. TIG kaynağının şematik gösterimi	15
Şekil 1.4. (a) MIG kaynağı cihazının basit resmi ve (b) gerçek resmi.	24
Şekil 3.1. Kaynak edilecek malzemenin ilk halleri (a,b)	43
Şekil 3.2. (a) Doğrultma pres makinası, (b) malzemenin plaka haline getirilmesi....	44
Şekil 3.3.(a) Kesim öncesi boyutlandırma, (b) CNC plazma kesme makinası ile kesme işlemi	44
Şekil 3.4.(a) Kesim sonrası toplu görünüm (b) kesim sonrası bir numunenin görüntüsü	45
Şekil 3.5. (a) Freze cihazı görüntüsü, (b) kaynak ağzı açılması işlemi	46
Şekil 3.6. (a ve b) Kaynak ağzı açılan numunelerin görüntüleri ve (c) 3D ölçeklendirilmiş resmi.....	46
Şekil 3.7. (a) ve (b) lazer kaynak makinası gösterimi	47
Şekil 3.8. (a) Lazer kaynak cihazı ve (b) kaynak işlemi sırasındaki görüntüsü	48
Şekil 3.9. Lazer kaynak sonrası bazı numunelerin görüntüleri.....	48
Şekil 3.10. (a) MIG kaynak cihazı, (b) kaynak için kullanılan tel.....	49
Şekil 3.11. (a) MIG kaynak işlemi ve (b) kaynak işlemi sonrasındaki resimleri.....	51
Şekil 3.12. MIG kaynağı sonrası bağlantıların (a) arkadan ve (b) üstten resimleri	51
Şekil 3.13. TIG kaynak makinesinin resimleri	51
Şekil 3.14. (a) TIG kaynağı sırasında ölçülen sıcaklık değeri ve (b ve c) numunelerin görüntüleri.....	53
Şekil 3.15. (a) Radyografik test cihazı, (b) radyografik muayenenin şematik gösterimi (Sezgin, 2019).....	53
Şekil 3.16. (a) ve (b) Radyografik Muayene Cihazı	54
Şekil 3.17. Kaynaklı bağlantıların Muayene Filmleri.....	55
Şekil 3.18. (a) Lazer kesim makinesi, (b) kesim öncesi numune boyutlandırma çizimi	55
Şekil 3.19. (a) Lazer kesim işlemi, (b) kesim sonrası görüntü	56

Şekil 3.20. Lazer kesim sonrası kaynaklı bağlantının görüntüsü	56
Şekil 3.21. (a ve b) Çekme testi numunelerinin ve (c) teknik çiziminin resimleri	57
Şekil 3.22. Shimadzu marka çekme testi makinesi.....	58
Şekil 3.23. SEM-EDX cihazı	59
Şekil 3.24. Sertlik ölçümlerinin yapıldığı yerlerin gösterimi	59
Şekil 4.1. MIG, TIG, MIG+Lazer ve TIG+Lazer kaynaklı bağlantıların 3D gösterimi	60
Şekil 4.2. (a) MIG, (b) MIG+Lazer, (c) TIG+Lazer ve (d) TIG kaynaklı bağlantıların radyografik filmleri.....	60
Şekil 4.3. (a) MIG, (b) MIG+Lazer, (c) TIG+Lazer ve (d) TIG kaynaklı bağlantıların üstten ve alttan resimleri	62
Şekil 4.4. MIG, TIG, MIG+Lazer ve TIG+Lazer kaynaklı bağlantıların kuvvet-uzama diyagramları	63
Şekil 4.5. (a) maksimum çekme kuvvetleri ve (b) maksimum uzama değerleri.....	64
Şekil 4.6. Kaynaklı bağlantıların çekme testleri sonrası üstten çekilmiş resimler	67
Şekil 4.7. Kaynaklı bağlantılarda bölgeler.....	68
Şekil 4.8. MIG ve TIG kaynağı işlemleri sırasında ölçülen en yüksek sıcaklık değerleri	69
Şekil 4.9. Maksimum çekme kuvvetleri için ana etkiler grafiği	70
Şekil 4.10. Maksimum çekme kuvvetleri için ANOVA yüzde katkı analizi sonuçları	71
Şekil 4.11. Kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri.....	72
Şekil 4.12. Kırılma yüzeylerinin elementel analizleri	73
Şekil 4.13. Kırılma yüzeylerinin elementel dağılım haritalaması	75
Şekil 4.14. Mikrosertlik ölçümleri	76

SİMGELER VE KISALTMALAR

Kısaltmalar

ASTM	: American Society For Testing and Materials
API	: American Petroleum Institute
AWS	: American Welding Society
GMAW	: Gaz Metal Ark Kaynak
GTAW	: Gaz Tungsten Ark Kaynak
ITAB	: Isının Tesiri Altındaki Bölge
MAG	: Metal Aktif Gaz
MIG	: Metal Inert Gaz
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TIG	: Tungsten Inert Gaz
EDX	: Enerji Dağıtıcı X-ışını

1. GİRİŞ

Enerji ve petrol sektörlerinde, petrol ve doğal gaz üretimine ve tüketimine bağlı olarak bu enerji kaynaklarının iletimi ve nakliyesinin önemi gün geçtikçe önem kazanmaktadır (Turhan, Ş. Ö. 2020; Godefroid ve Ark., 2014). Dünya genelinde artış gösteren petrol ve doğalgaz tüketimi, arz ve taleplerin karşılaması amacıyla birden fazla taşıma şekilleri ile birbirine bağlanmaları kaçınılmaz bir durum haline gelmiştir. Boru hatları ile petrol ve doğal gaz taşımacılığı öncelikle hızlı taşımacılığın yanında diğer kara ve deniz yolu taşımacılığına göre başta ekonomik açıdan olmak üzere güvenilir kaliteli ve çevreci nedenlerden dolayı üstünlükleri mevcuttur (Ashari ve Ark., 2019; Abedi ve Ark., 2007). Ekonomik açıdan değerli olan doğal gaz ve petrol boru hatları 1859 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde ilk petrol kuyusunun açılmasıyla önem kazanmıştır. 1859 yılından itibaren gaz ve petrol ürünlerinin iletimindeki en ucuz ve kolay yöntemin boru hatları taşımak olduğunu herkesçe kabul edilmektedir. Buna bağlı olarak petrol ve doğalgaz pazarının büyüdüğü bölge şehir ve üretim istasyonlarına bağlı olarak her yıl kilometrelerce boru hatları döşenmektedir. Petrol ve doğal gazın rezervleri incelediğinde petrol rezervinin %67 ve doğalgaz rezervinin ise %40 oranında orta Asya ve orta doğu ülkelerinde olduğu bilinmektedir. Rezerv bölgelerinden talep merkezlerine nakliyesinde ise boru hatları en verimli ve güvenli yöntemdir (Sevim, 2012).

Petrol ve doğalgaz üretimi, gelişmekte olan toplumlar için refah ve ekonomik açıdan kalkınmak için son derece önem kazanmıştır. Hatta doğal gaz ve petrol dışında yer altı veya yer üstü kaynakları açıdan yeterince veya hiç kaynağı bulunmayan ülkelerde refah ve zenginlik elde etmiştir. Ülkemiz açısından da değerlendirme yapacak olursak yapılmış veya yapılması düşünülen boru hatları projeleri sayesinde bu ülkeler ve talep merkezleri arasında üstelenen köprü görevinden dolayı oldukça jeopolitik açıdan ülkemiz önemli bir merkez haline gelmiştir (Alsancak, 2010). Rusya İran ve Azerbaycan gibi ülkelere satın alınan doğal gazın boru hatları ile iletimi jeopolitik açıdan ülkemiz için önem arz etmektedir. Bunun yanı sıra orta Asya ve orta doğuda da büyük kapasiteli boru iletim hatları mevcuttur. Ancak boru hatlarının iletimi veya nakliyesinde petrol ve doğal gazın patlayıcı ve yanıcı özellikte olmaları sebebiyle birçok kaza veya patlama meydana gelebilmektedir. Bu kazalar özellikle petrol gaz sızıntısı veya mücbir sebeplerden dolayı ciddi bir şekilde çevre felaketlerine yol açabilmektedir.

Dünyada bu enerjiye olan ihtiyacın giderek önem kazanmasının sonucu yüksek basınca dayanıklı boru hatlarının üretimini gerektirmiştir. Bu konuda çeşitli araştırmalar yapıp ve buna bağlı olarak dayanımlı malzeme ve ince et kalınlığında büyük çaplı borular üretilmesine başlanmıştır. İleri kaynak teknolojileri sayesinde ilerlemeler kaydedilmiştir (Leifer ve Ark., 2012). Doğal gaz günümüzde hem stratejik hem de ekonomik olarak üretim istasyonlarından tüketiciye ulaşıncaya kadar titiz ve güvenilir bir şekilde yürütülmesi gerekmektedir. Ve bu taşıma işlemi çelik borularla ve boru çaplarında göz önünde bulundurularak genellikle de yüksek basınçlarda bu işlem yürütülmektedir (Aksöz ve Ark., 2017). Bu taşıma işlemi esnasında kullanılacak olan çelik boruların mekanik özelliklerin yüksek ve dış etkenlerden korunacak şekilde mukavemeti yüksek olmalıdır (Baek ve Ark., 2010; Baek ve Ark., 2012). Bu sebepten ötürü doğal gaz taşımacılığında kullanılan çelik borular genellikle API (American Petroleum Institute) 5L standardına uygun olarak üretimi sağlanmaktadır. API 5L standardında üretilen çelikler alaşım oranı düşük ve mukavemeti yüksek olan çelik boru dizinidir (Hashemi ve Ark., 2012; Rakhshkhorshid ve Ark., 2013). Bu standartta göre üretim yapmayı taahhüt eden üretici firmalar belirtilen test değerleri ve üretim şartlarına göre imal ettiğinde API sertifikasına sahip olabilirler (Leifer ve Ark., 2012). Petrol ve doğal gaz akışkan özelliği taşıyan maddeler yüksek basınca dayanıklı ve çelik borularla şehirlere bölgelere veya üretim tesislerine ulaştırılır. Bu dağıtım işlemlerinde çelik boruların tercih edilme nedeni ise yüksek mekanik özelliğin yanı sıra üretim kolaylığı ve yüksek basınca karşı göstermiş olduğu dirençtir. Ayrıca kullanılan çelik borular ise düşük alaşımlı ve yüksek mukavemete sahip çelik türünden üretilir (Sung ve Ark., 2011).

Petrol ve doğal gaz iletiminde tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de API 5L standardına göre çelik borular kullanmakta ve çekme ve akma mukavemetine göre sınıflandırılmakta olup Grade A25, A, B ile X42, X46, X52, X56, X60, X65... vs. şeklinde sınıflandırılmaktadır (API 5L, 1991). API standardına uygun boruların akma ve çekme dayanımlarının birimi MPa veya Psi olarak adlandırılmaktadır. Çelik testi deneylerinde düşük miktarda meydana gelen kalıcı hasarları meydana getiren çekme gerilmeleri ise akma mukavemetini gösterir. 1.sınıf malzeme için 30.00 PSİ 2.sınıf Malzeme için 35.000 PSİ akma mukavemeti değerini göstermektedir. Dikişli ve dikişsiz olmak üzere iki farklı şekilde doğal gaz boru üretimleri yapılabilmektedir. Tek şekilde üretilen borular dikişsiz borular kaynak dikilişin yapılışına göre üretilen ise dikişli olarak adlandırılır (Ada, 2006). Ülkemizde ise API 5L standardına göre çeliği üreten

fabrika ise Ereğli demir çelik olup ayrıca Tanap veya Nabucco gibi projelerde çelik boruların imal edilmesinde X80 e kadar üretimi yapabilmektedir (Uysal, 2010).

API 5L standardına göre üretilen çeliklerin akma ve çekme mukavemet değerleri MPa ve Psi olarak Şekil 1.1’de gösterilmiştir (API, 2015).

Çelik Sınıfı	Minimum akma mukavemeti		Minimum çekme mukavemeti	
	MPa	Psi	MPa	Psi
A 25	175	25400	310	45000
A	210	30500	335	48600
B	245	35500	415	60200
X 42	290	42100	415	60200
X 46	320	46400	435	63100
X 52	360	52200	460	66700
X 56	390	56600	490	71100
X 60	415	60200	520	75400
X 65	450	65300	535	77600
X 70	485	70300	570	82700

Şekil 1.1. API 5L standardına göre üretilen çeliklerin akma ve çekme mukavemeti değerleri (API, 2015)

1.1. Çeliklerde Bulunan Temel Alaşım Elementleri

Boru imalatında kullanılan çeliklerde bulunan temel alaşım elementleri aşağıda maddeler halinde sunulmuştur (Uysal, 2010);

a) Karbon (C): En temel alaşım olup içerisinde karbon sayısının artmasıyla alaşımsız çeliklerin sertliği ve mukavemeti büyük ölçüde artış gösterir. Karbon miktarına paralel olarak karbonun artmasıyla beraber perlit oranında artış göstermesi sonucu çeliğin akma sınırı ve çekme dayanımı veya mukavemeti artış gösterir. Ancak bu dayanım %0,79 ile 0,84 C den sonra çeliğin giderek kırılgan bir yapıya sahip olmasından dolayı daha fazla artış göstermez.

b) Mangan (Mn); Mangan ise çeliğin dayanımı etkilemesi hatta alaşım elementi olarak atırabilmesinden dolayı çeliğin içerişimde belirli bir oranda bulunması tercih edilmektedir. Manganın akma sınırı ve çekme mukavemeti birbirine benzemektedir. Ancak mangan çeliğin dayanımı artırdığını bunun yanı sıra sünekliğini de azalttığını unutmamak lazım.

c) Silisyum (Si); Çelik üretiminde olan temel elementlerden birisidir. Oksijen giderici olarak kullanılmaktadır. Silisyum miktarı üretim tarzına göre göre değişkenlik göstermektedir. Çeliğin tane büyüklüğüne paralel olarak tane büyüklüğü arttıkça silisyum miktarı da artış gösterir. Boru hatlarında kullanılan çelik üretiminde yaklaşık olarak %0,39 - %0,56 aralığında Si kullanılmaktadır.

d) Kükürt (S); Çelikte istenmeyen bir element olup ve çekme ve akma dayanımı çok azdır. Günümüzde yeni gelişen teknolojik çalışmalarla bugün %0,0029 S değerine kadar düşürülebilmektedir. Kükürt miktarı yükseldikçe malzemenin sünekliğinin önemli derecede azalmasından dolayı kaynak edilebilirliği kötüleşir.

e) Fosfor (P); Fosfor ise çeliğin çekme akma mukavemetini arttırmasına rağmen çelikte soğuk kırılabilirlik olmasına neden olmaktadır. Bu sebepten ötürü az miktarda bulunması halinde de çeliğin sertliğini ve dayanımını artmasından dolayı sünekliği ve darbe dayanımını azaltır. Bundan dolayı az miktarda bulunmasına dikkat edilir.

1.2. Doğal gaz

Doğal gaz dışarıda serbest halde bulunan kokusuz hafif ve renksiz Olan bir gaz türüdür. Fosil yakıt türünden hidrokarbon kökenli olup asırlar öncesinde yaşamını sürdürmekte olan bitli ve hayvan atıkları sonucunda meydana gelmektedir (Akpınar ve Ark., 2011). Doğal gaz Öncelikle Metan (CH_4) ve Etan (C_2H_6) olmak üzere hidrokarbon karbon karışımı sonucu meydana gelen yanıcı bir gaz karışımıdır. Doğal gaz da bulunan elementlerin yüzdelik dağılımı; Metan (CH_4) %93, Etan (C_2H_6) % 3, Propan (C_3H_8) % 1.2, Bütan (C_4H_{10}) % 0.8, Karbondioksit (CO_2) % 1, Azot (N_2) % 1 oranlarında bulunur. Taşımacılıkta kullanılan doğal gaz borularının kaynaklı bir şekilde birleştirme işlemini yapılacak olan kaynağın kalitesinden dolayı büyük önem taşımaktadır (Tülbentçi, 1990).

1.3. Kaynak

Farklı ya da aynı özellikleri taşıyan ve genellikle metallerin basınç ve uygun ısı şartları altında uygun bir birleşim ile malzemelerin ayrılmaz bir şekilde birleştirme işlemi olarak adlandırılır. Bu birleştirme yani kaynak işleminde birçok enerji kaynağı da kullanılmaktadır. Kaynak işlemi özellikle yoğun olarak metal sanayi tesislerinde kullanılan bir malzemelerin birleştirme işlemidir. Termoplastik veya özellikle metal malzemelerin birleştirmesinde kullanılır. Malzemelerin kaynak ile birleştirmesindeki temel amaç bir dış enerji kaynağı ile birleştirilecek iki parçanın da birleşim yeri yani kaynak yapılan bölgenin dolgu malzemesi eklenmeyerek veya dışarıdan eklenecek dolgu malzemesinin yüksek enerji ile ısı işlem yapılarak malzemelerin eriyip birbirine birleşmesinin sağlanmasıdır. Kısaca birleştirme yapılacak malzemenin kaynak yapılacak kısmı eritilir ve bu kısma dolgu malzemesi eklenilerek veya eklenmeyerek sonrasında kaynak yerinin soğutularak sertleşmesi sağlanır (Weston ve ark., 1998). Gaz alevi, lazer, elektron ışını, elektrik arkı, sürtünme ve ultra ses dalgaları vb. gibi birçok enerji kaynakları ile kaynak işlemi yapılabilmektedir (Karabulut, 2019). Kaynak işleminde sınıflandırma yapacak olursak öncelikle işlemin amacına ve uygulanacak yöntemlere göre gruplara ayrılabilir (Soykan, 2021). MIG-MAG (metal ark kaynağı) SMAW (örtülü elektrot kaynağı ise petrol ve doğal gaz iletiminde kullanılan boruların birleştirmesinde kullanılan temel kaynak yöntemleridir. Bunların yanı sıra toz altı ark kaynağı ve tungsten gaz ark kaynağı da kullanılmaktadır. Ancak çapı büyük borularda yeterli ergime olmadığı için günümüzde çokça tercih edilmemektedir (Kaba, 2009; Salma, 2011).

1.3.1. Kaynağı etkileyen parametreler

Kaynak işleminde dikkat edilmesi gereken parametreler seçilirken öncelikle ve özellikle kullanılan bazı parametreleri kaynak işlemi başlamadan önce seçilmelidir. Bunların başında elektrot türü, koruyucu gaz türü ve kaynak akım çeşidi gelmektedir (Demirci, 2010).

a) Kaynak Akım Şiddeti: En önemli parametrelerin başında gelmektedir. Çünkü akım şiddeti nüfuziyete derinliğine direk etkileyen parametre olup malzeme kalınlığına göre ayarlanmalıdır. Akım şiddeti artmasına bağlı olarak nüfuziyete de artış gösterir (Demirci, 2010). Akım şiddetinin yükselmesi sonucu kaynak bölgesinde çatlamlar ve

mukavemeti düşük bir kaynak dikişı olmasına sebep olabilmektedir (Anık ve Ark., 1991).

b) Ark Gerilimi (Ark Boyu): Kaynak yapılan elektrotun ucu kaynak banyosu yüzeyleri arasındaki mesafeyi ifade eder. Ark boyu parametresinin kaynak yöntemleri üzerindeki etkilerini aşağıdaki gibi sıralayabiliriz. Ark boyunun yükseltilmesi durumunda kaynağın dikiş genişliği de buna bağlı olarak paralel ve şekilde artış gösterir. Kaynak yöntemlerinden olan TIG kaynak işleminde olabildiğince ark gerilimi düşük olmalıdır. Kaynak dikişı incelendiğinde Yapılan kaynağın kalitesi ve dikiş formu açısından ark gerilimi önem arz eden bir faktördür. Ark gerilimi kaynağı yapan personel tarafından ayarlanmasından dolayı el becerisi oldukça önemlidir. Ayrıca gerilimin artması ark malzeme üzerinde kapladığı alan da artar buna bağlı olarak kaynak genişliğinin artmasına sebep olur (Demirci, 2010).

c) Kaynak Hızı: Kaynakta kullanılan elektrotun kaynak sırasında zamana bağlı olan hareketi anlamına gelir. Kaynak hızı otomatik manuel ve tam otomatik olarak ayarla bilmektedir (Cary, 1988). Hızın düşürülmesi sonucuna bağlı olarak dikiş genişlemesi ve yüksek seviyede ısı işleme neden olmakla beraber hızın artırılmasına bağlı olarak birleşme esnasında hataları meydana getirir (Demirci, 2010).

d) Serbest Tel Uzunluğu: Toz altı ve MIG-MAG kaynaklarında önemli bir parametredir. Burada elektrot direncin artması tel boyunun uzamasına bağlı olarak değişir ve bunun neticesinde sıcak yükselir ve akım şiddetinde düşüşe sebep olmaktadır (Tülbentçi, 1990).

e) Elektrot Açısı: Açı parametresi ise kaynak işlemindeki dikişin şeklini etkileyen unsurdur. Elektrot açısı özellikle MIG-MAG kaynaklarında elektrot ucu hareket açısı ile ters yönde olursa pozitif açı kaynak yönünde olur negatif açı olarak ifade edilir (Tülbentçi, 1990).

f) Elektrot Boyut ve Türü: Kaynak işleminde kullanılan elektrotların temel etkinliği akımın iş parçasına iletilmesi işlemidir. Elektrot seçiminde ise malzeme türüne ve şekline göre tercih edilir (Anık ve ark., 1991).

g) Koruyucu Gaz: Kaynak yöntemlerine göre kullanılan koruyucu gaz farklılık gösterir. Çünkü kullanılan her gazın nüfuziyet ve dikiş şekli aynı değildir. Argon helyum ve bunların karışımından oluşan asal gazlar genellikle TIG kaynaklarında tercih

edilir (Anık ve Ark., 1991). Karbondioksit oksijen ve argon kaynağı ise genellikle MIG –MAG kaynaklarında kullanılır (Tülbentçi, 1990).

Kaynak çeşitleri genel olarak katı hal ve ergitme olarak iki şekilde incelenir (Liu ve ark., 2016; Essoussi ve ark., 2019; Şirvanlı, 2021).

1.3.2. Ergitme kaynak yöntemleri

Isıl işlem yardımıyla ısı etkisiyle beraber kaynak noktası ve kaynak bölgesi ergitebilerek yapılır. Kaynak çeşidine göre kaynağın mukavemetini dolgu malzemesi kullanılarak artırabilir. Ergitme kaynak yöntemleri Plazma Ark Kaynağı, Elektron Işın Kaynağı, Toz Altı Kaynağı, Gaz altı Kaynağı, Oksi-Gaz Kaynağı, Elektrik Direnç Kaynağı, Elektrik Ark Kaynağı ve Lazer Işın Kaynağı olmak üzere 8 grupta ele alınmaktadır (Liu ve ark., 2016; Essoussi ve ark., 2019; Şirvanlı, 2021).

a) Plazma Ark Kaynağı: Elektrik iletkenliğine sahip ve yüksek sıcaklıkta bir elektrik ark içinden geçen gaz sütununa plazma arkı adı verilir. Plazma ark kaynağı yönteminde sıcaklık 10000-30000 K 'i bulabilmektedir. Bu sıcaklıkta iş malzemelerinin kesilmesi veya kaynatılarak birleşmesinde kullanabilmektedir (Liu ve ark., 2016).

b) Elektron Işın Kaynağı: Yüksek hızlarda koruyucu akım atmosferi altında malzeme yüzeyine odaklanmasıyla elde edilen kaynak yöntemidir (Şirvanlı, 2021).

c) Toz Altı Kaynağı: Yüksek ısı ergiyen elektrot ile iki parçanın kaynak tozu altında elektrik arkı oluşan birleştirme işlemidir (Ghosh ve Ark., 2011; Li ve Ark., 2017).

d) Gaz altı Kaynağı: Koruyucu gaz atmosferi altında oluşan ark ile ergiyen elektrot ile yapılan birleştirme yöntemidir (İbrahim ve Ark., 2012; Şirvanlı, 2021).

e) Oksi-Gaz Kaynağı: Yakıcı ve yanıcı gazların kullanıldığı ve yüksek ısı sayesinde iki malzemenin birleştirilmesi işlemidir (Şirvanlı, 2021).

f) Elektrik Direnç Kaynağı: Kaynağı yapılacak parçalar üzerinden akım geçirmek şartıyla elde edilen yüksek basınç altında yapılan birleştirme işlemi olarak adlandırılır (Brassard ve Ark., 2019; Essoussi ve Ark., 2019).

g) Elektrik Ark Kaynağı: Elektrot ve basınç sayesinde iki parçanın ark oluşturmak neticesinde elektrotun ergimesi sonucu oluşan kaynak yöntemidir (Brassard ve Ark., 2019; Essoussi ve Ark., 2019).

h) Lazer ışın Kaynağı: Yüksek enerji seviyelerinden atomların uyarılması sonucunda foton yayan ve bu fotonları malzeme üzerine odaklayan koruyucu gaz atmosferi altında yüksek enerji ile birleştirmeyi sağlayan kaynak yöntemlerinden biridir (Katayama, 2013; Şirvanlı, 2021).

1.3.2.1. Gaz altı kaynak türleri

Gaz altı kaynak türleri, TIG, MIG ve MAG olmak üzere 3 grupta incelenmektedir (Singh ve Ark., 2017; Şirvanlı, 2021).

- TIG Kaynak: Koruyucu gaz olarak asal gaz atmosferi altında ve genellikle soy gaz grubundan olan argon gazıyla yapılan kaynaktır (Singh ve Ark., 2017).
- MIG Kaynak: Genellikle pasif gazların kullanıldığı kaynak türüdür (Şirvanlı, 2021).
- MAG Kaynak: MAG kaynak yönteminde koruyucu gaz olarak aktif gazlardan olan CO₂ gazının kullanıldığı kaynak yöntemidir (Şirvanlı, 2021).

1.3.3. Katı hal kaynak yöntemleri

Isı basınç veya ikisinde beraber kullanıldığı kaynak türüdür. Katı hal kaynak yöntemleri Difüzyon Kaynak Ultrasonik Kaynak ve Sürtünme Kaynak olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır (Wang ve Ark., 2004; Ghias ve Ark., 2019; Mohammed ve Ark., 2019).

- Difüzyon Kaynak: Malzemelerin özelliklerine zarar vermeden basınç altında ve ergime sıcaklığının altında bir sıcaklıkta iki parçanın birleştirmesinde kullanılan kaynak yöntemidir (Wang ve Ark., 2004).
- Ultrasonik Kaynak: Demir olmayan metallerin ve plastik malzemelerin birim zamanda çok fazla sayıda titreştirilmesi neticesinde ortaya çıkan ısı enerjisi ile malzemelerin kaynak yapıp birleştirmesi işlemidir (Wang ve Ark., 2019; Mohammed ve Ark., 2019).
- Sürtünme Kaynak: Mekanik dönme hareketleri sonucunda ortaya çıkan sürtünme neticesinde ortaya çıkan ısıyla beraber basınç altında iki parçanın birleştirilmesi ile yapılan kaynak yöntemidir (Ghias ve Ark., 2019).

1.4. Lazer teknolojisi

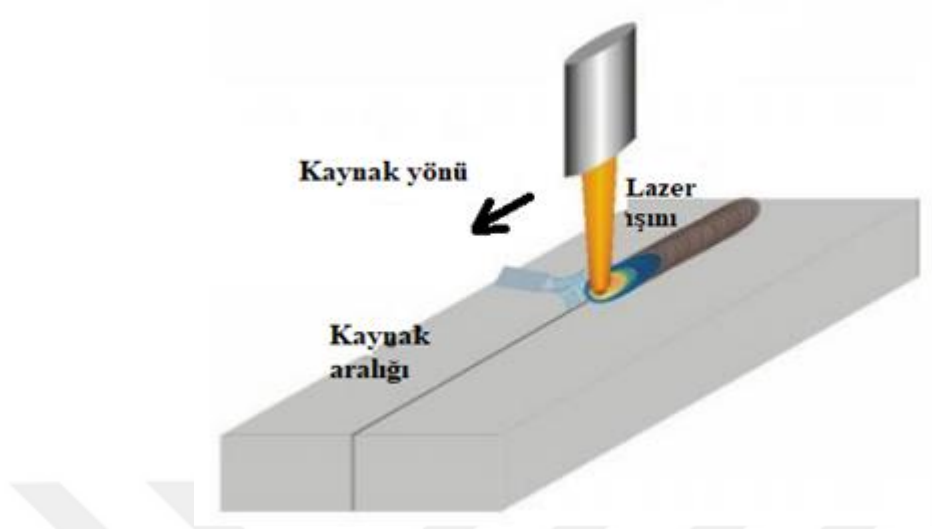
Lazer üretim tekniğinde temel parametre olan emisyon kelimesi 1917 yılında Albert Einstein tarafından icat edilmiştir. Lazer, özellikle negatif soğurmalı ortam oluşturması amacıyla ilk kez 1960 yılında üretimi gerçekleştirilmiştir (Candan, 2008). Lazer kelime anlamı olarak İngilizce dilinde; Light Amplification By Stimulated Emission of Radiation sözcüklerinin kısaltmasından oluşmaktadır (Arcan, 2011). Lazer ışınların diğer ışıklardan farklı özelliklerini ele aldığımızda:

- Monokromatiklik: Lazer ışınları tek renk olarak çıkar tek bir dalga boyuna sahiptir. Lazer ışınların dalga boyları aynı faz ve aynı frekansa sahiptir. Ancak lazer çeşidine göre farklı renklere sahip ışınlarda elde etmek mümkündür (Cebeci, 2021).
- Koherentlik: Bu parametrede fotonlar uyumlu bir şekilde yayılma gösterirler. Ve bunun sonucunda enerji değişimi ve foton neticesinde meydana gelen fotonun dalga boyları s-aynı fazdadırlar. Ayrıca lazer ışık dalgaları zamansal ve uzaysal boyutta uyumludurlar (Cebeci, 2021).
- Yönlenebilirlik: Lazer ışınlar yüksek genliğe sahip paralel dalgalardan oluşan ışık demetleridir. Meydana gelen bu ışınlar tek yönlü olup tek noktaya odaklanır. Lazer ışınları çok uzun mesafelerde bile sapma oranı yok denilecek kadar azdır (Cebeci, 2021).
- Güç: Lazer ışınları küçük çaplı olmasında dolayı enerji yoğunlukları yüksek orandadır. Lazer cihazlarıyla güçlü ışık elde edilmesiyle ışın darbeleri 1010 W'dan yüksek güçlere ulaşır (Cebeci, 2021).
- Hız: Çok hızlı süreler içerisinde üretim yapabilmektedir (Şahin, 2015).

1.4.1. Lazer kaynağı

Lazer kaynağı genellikle yüksek radyasyon yoğunluğu altında metalleri birleştirmede kullanılan bir ışın kaynağı işlemidir. Lazer ışınları tarafından parçalara ısı verilerek parçalar birbirlerine birleştirilerek kaynak işlemi yapılmaktadır. Endüstriyel projelerde hız ekonomi ve kalite bakımından diğer kaynak yöntemlerine göre kullanımı daha geniş bir çerçeveye ulaşmıştır. Malzemenin erime sıcaklığının yüksek olması

gerekmektedir (Çelen, 2006). Lazer kaynağına ait şematik gösterim Şekil 1.2’de verilmiştir (Fetita, 2023).



Şekil 1.2. Lazer kaynağı gösterimi (Fetita, 2023)

Lazer kaynağı genellikle termoplastik ve metal parçaları bileştirmek için kullanılan yaygın bir kaynak metodudur ve bu kaynak işleminde enerji malzemeye yalnızca ısı iletimiyle yoluyla gerçekleşir. Malzemeye verilen lazer ışınları sayesinde parça boyunca birleştirecek malzemeleri eritir ve sonrasında kaynak işlemi son bulur. Bilgisayar kontrolünde olan lazer kaynak ileri teknoloji sayesinde kaynak işleminde kullanılan birçok işlem parametreleri kontrol altına alınarak gözlemlenebilir (Çelen, 2006).

1.4.1.1. Lazerin kullanım alanları nelerdir

Tıbbi uygulamalar, Hazır giyim endüstrisi, Kaynak ve kesim işlemlerinde, Savunma sanayisinde, Otomotiv sektöründe, Görüntüleme ve holografide, Otomasyon sistemleri, İnce ve hassas kaynak işlemlerinde, Kuyumculuk sektörü vb. (Weston ve Ark., 1998).

1.4.1.2. Lazer kaynak yönteminin avantajları

Lazer kaynak yönteminin avantajları, aşağıda verilmiş olan maddeler şeklinde kısaca belirtilmektedir (Kern ve ark., (2000); Katayama, 2004; Demirtaş, 2013):

- İleri düzeyde hassasiyet sağlar. En ufak malzemeleri bile birbirine zarar vermeden kaynak işlemi yapılabilir manasına gelmektedir.

- Lazer kaynakta düşük ısı uygulaması ile kaynak yapılıyorsa elementlerin bozulmasını en az seviyeye indirgenir.
- Diğer kaynak yöntemlerine göre daha tutarlı ve tekrarlanabilir niteliktedir.
- Zaman açısından tasarruf sağlar hızlı bir kaynak yöntemidir. Ayrıca kaynak işlemi yanı sıra bununla beraber kesim delme ve işlemlerinde de kullanılır.
- Çok yönlü işlemlerde de kullanılır.
- Lazer kaynak yüksek mukavemetli kaynaklar sayesinde tercih edilir.
- Yapılan kaynağın yüksek kalite de olması sebebiyle özellikle medikal sektörde tercih edilen bir kaynak yöntemidir.
- Diğer kaynak yöntemlerine göre nüfuziyet daha derindir.
- Lazer ışınları ile çok daha küçük bölgeye odaklanıp kaynak işlemi yapılabilir.
- Otomasyonlu sistemlere elverişlidir.
- Ulaşılması zor bölgelere daha kolay bir şekilde ulaşp kaynak işlemi yapılabilir.
- Aşınmaya karşı dayanımı diğer kaynak yöntemlerine göre daha dayanıklıdır.
- Çok ince veya çok küçük malzemelerde bile birleştirme işlemi yapılabilir.
- Parça tasarım imkânları daha gelişmiştir.
- Diğer kaynak yöntemlerine göre daha Derin ve sınırlı (dar) kaynaklar yapılır.
- Temiz kaynak yüzeyi sağlar.
- Yüksek verimlilik elde edilir.
- Rahat ve basit kullanılabilmek için tekniğe sahiptir.

1.4.1.3. Lazer kaynak yönteminin dezavantajları

Lazer kaynak yönteminin dezavantajları ise aşağıda maddeler halinde özetlenebilmektedir (Kern ve ark., 2000; Katayama, 2004):

- Diğer kaynak yöntemlerine göre ekonomik olarak ucuz değildir.
- Lazer ışınlarının geniş olmamasından dolayı dolgu işlemi zordur.
- Derinlik/genişlik oranından dolayı ve bunun yanı sıra kaynak noktasının yüksekliğinden dolgu işlemin yapılması zordur.
- Metallerin yüksek yansıtma özelliğinden dolayı lazer ışınları ile kaynak işlemi yapmak zor bir işlem haline gelir.
- Ayrıca darbe gücü yüksek lazer cihazları kaynak işlemi olduğunda kırılabilirliğe neden olur.
- Lazer ışınlarının canlıya temas etmesi halinde sağlık sorunlarına neden olur.

1.4.2. Lazer kaynağa etki eden parametreler

Kaynak kalitesinde önemli parametreler lazer gücü basınç akış hızı kaynak hızı koruyucu gaz ve odak mesafesi olarak ifade edilebilir. Bu ana parametrelere ek olarak ışın açısı ışın dalga boyu veya frekansı kaynak yüzeyi malzemenin türü ve çalışma modu vb. parametrelerde kaynağın kalitesinde etkili olmaktadır (Akman, 2006).

Lazer Gücü: Kaynak işleminde kullanılan lazer cihazının gücü en temel parametredir. Cihazın gücü arttıkça yapılan kaynak derinliği de buna bağlı olarak artar. Buna bağlı olarak lazer cihazının gücü lazer kaynağının türünü belirtmede önemlidir. Ancak lazer gücü hiçbir zaman tek başına kaynağın türünü belirlemez genellikle lazer hızı ile birlikte değerlendirilmelidir. Yapılan kaynak işleminde lazer güç parametresini sabit olsa da lazer ışınlarının farklı hızlarda olması sebebiyle malzemeye olan nüfuziyet değişmekle beraber kaynağa olan etkisi de aynı değildir (Akman, 2006).

Kaynak Hızı: Kaynak kalitesinde önemli bir parametredir. Kaynak hızının düşük veya yavaş olması durumunda malzemeye daha fazla enerji geçişi olmasına sebep olmaktadır diğer parametrelerde değişiklik olmaması durumunda ise kaynak hızının düşürülmesi ile nüfuziyet ve bunun neticesinde ise genişlik derinlik oranı artış gösterir (Yüce, 2018). Kaynak hızı kaynak işlemi sonucunda metal malzemenin şekline de etki etmektedir. Lazer ışınlar neticesinde malzemeyi ergittiğinden dolayı ergimiş malzeme kaynak havuzuna yönelmekte olup ve o bölgeyi doldurarak soğuma işlemi sonrasında kaynakta bir tümsek meydana getirir. Ayrıca kaynaklı malzemede gözeneklerin artması da kaynak hızına paralel olarak artması sonucu oluşur (Güneş, 2012).

Koruyucu Gaz: Lazer kaynakları üzerinde önem arz eden bir parametredir. Öncelikle kaynak noktasında plazma oluşumunu en az seviyeye düşürerek nüfuziyet sağlar ve ayrıca özellikle ergimiş metal malzeme ile havadaki gazlarla etkileşime girmesini engelleyerek oksidasyonun meydana gelmesini engeller (Akman, 2006).

Kaynak işleminde ısı işlemin yapıldığı bölge yani kaynak bölgesinde yüksek sıcaklık neticesinde buharlaşma olur. Bu buharlaşma sonucunda metal malzeme lazer ışını emerek kaynak noktasında plazma oluşmasına neden olur. Plazma ise lazer ışınlarının malzemeye geçişini engelleyerek ergime işleminin verimsiz bir hal almasına ayrıca malzemenin tam olarak birleşmemesine sebep olur. Kullanılan koruyucu gaz faktörü ise oluşan buharı ve plazmayı kaynak noktasından uzaklaştırarak yapılacak olan kaynağının verimini artırır. Koruyucu gaz ayrıca daha önce de değindiğimiz oksidasyona karşı koruma sağladığından mikro yapı mekanizmasında istenmeyen mekanik farklılıklara karşıda koruma sağlar (Güneş, 2012). Bu faktörlerin dışında gazın geliş açısı çıkış hızı gibi parametrelere de kaynak kalitesine etki etmektedir. Ayrıca korucu gaz belli bir değer altında olması durumunda da tam koruma sağlamaz ve buna bağlı olarak metal malzemenin yüzeyinde oksitlenmeye neden olabilmektedir. Hız değerinin yüksek olması durumunda ise metal malzemede şekil bozukluğuna sebep olmaktadır (Akman, 2006). Helyum ve argon gazları genellikle lazer kaynağında koruyucu gaz olarak tercih edilmektedir. Bu koruyucu gaz çeşitleri dışında da CO₂ ve O₂ gazlarda veya belirli oranda karışımları kullanılabilir. Bunun yanı sıra helyum gazı iyonlaşma enerjisi fazla olduğundan metal malzeme ile reaksiyona girmeyen bir gaz türüdür. Ancak helyum gazı ekonomik açıdan pahalı olduğundan kullanımı diğer gazlara göre kısıtlıdır. Diğer bir koruyucu gaz olarak tercih edilen argon gazı ise helyum gazına oranla iyonlaşma enerjisi daha düşüktür. Yoğunluk oranının yüksek olması ve ekonomik açıdan helyuma göre daha ucuz olmasından daha çok tercih edilmektedir. Ayrıca argon gazı ile yapılan kaynaklarda yüzey daha pürüzsüz bir şekilde olabilmektedir (Akman, 2006; Güneş, 2012).

1.4.2.1. Diğer kaynak parametreleri

Temel parametrelerin dışında kaynak kalitesine etki etken kısaca diğer parametreleri de ele aldığımızda;

- Odak Uzaklığı: Lazer ışınlarının odaklandığı noktadan malzemeye olan mesafesini ifade eder (Akman, 2006; Çelen, 2006).

- Odak Noktası: Kaynak derinliği malzemenin odak noktasından uzaklaşmasına bağlı olarak azalır (Akman, 2006; Çelen, 2006).
- Lazer Işın Çapı: Enerji yoğunluğuna etki eder. Kullanılan lazerin çapı küçük oldukça lazer ışınlarının yoğunluğu buna bağlı olarak artar. Ayrıca çapın küçük olarak tercih edildiğinde daha fazla enerjiye maruz kalacağından kaynak dikişinde derinliğe neden olur. Ayrıca çapın küçük olması neticesinde kaynak bölgesinin boyutlarını azaltmakla beraber kaynak genişliğine yol açar (Alpar ve Ark., 2021).
- Atımın Tepe Gücü: Atım enerjisinin atım süresine oranıdır. Bu oran yükseldikçe kaynak işleminde nüfuziyet artar. Özellikle kaynak derinliğini sağlamak için önemli bir parametredir (Akman, 2006).
- Darbe Süresi: Kaynak işleminde lazer ışınlarının malzemeye temas ettiği süreyi ifade eder. Bu süre uzun tutulduğunda parçaya daha fazla enerji geçişi olmakla beraber kaynak bölgesindeki daha geniş bir bölge ısı işleme tabi olup ısıdan etkilenir (Akman, 2006).
- Atım Şekli ve Soğuma Süresi: Soğuma süresi ve atım şeklide kaynak kalitesine etki eden parametrelerdir. Soğumanın hızlı bir şekilde olması malzemede sertleşme çatlaklık ve yüzeyde gözenekliliğe sebep olmaktadır. Bu nedenle malzemelerde kaynak işleminden önce ön ısıtma yapılmalıdır. Yavaş bir soğuma ortamı sağlandığında kaynak hatalarının önüne geçilebilir (Akman, 2006; Güneş, 2012).

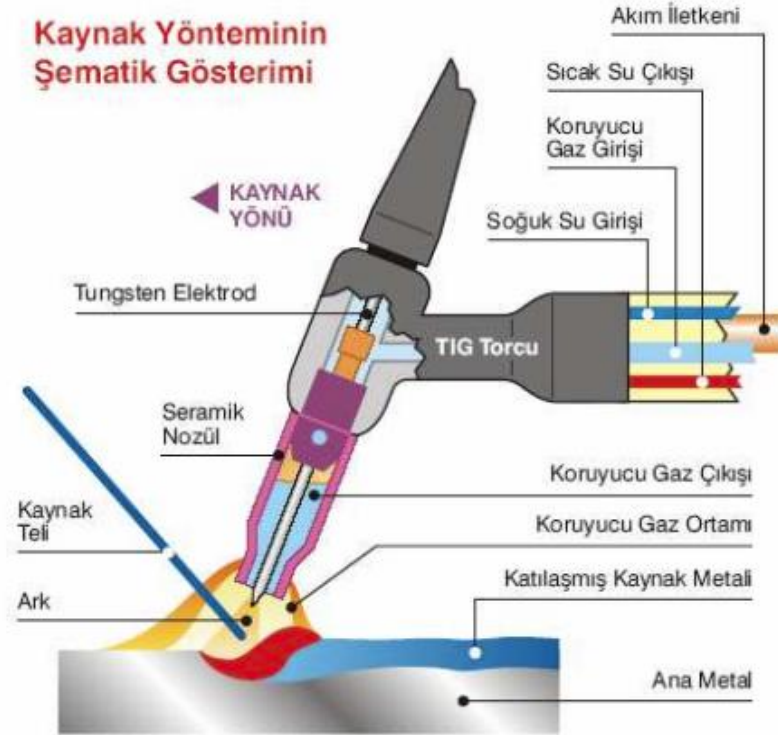
1.4.3. Lazer kaynaklarında makro yapı ve mikro yapının incelenmesi

Lazer kaynağı yöntemini kullanarak birleştirme olacak malzemelere çok kısa sürede ışınları göndererek yüksek ısı neticesinde ergime meydana getirmektedir. Ancak bu kısa sürede gönderilen ısı enerjisi kaynak yapılan malzemelerde mikro yapıyı bozarak malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerini etkiler. Ancak diğer kaynak yöntemlerine göre daha az bir alan ısıdan etkilenir ve buna bağlı olarak mikro yapısındaki değişim diğer kaynak yöntemlerine göre daha azdır (Akman, 2006; Güneş, 2012). Genellikle 3 bölge üzerinden mikro yapı incelemeleri yapılır. Bunlar ana metal ısı tesiri etkisinde kalan bölge ve kaynak metali bölgesi veya ergime noktası olarak sıralanır. Ayrıca ergime bölgesi EB ısı tesiri etkisinde kalan bölgede ITAB olarak ifade

edilir. ITAB ergime bölgesinde oluşan sıcaklık farkından etkilendiği için malzeme mikro yapısında değişiklikler gözlenir. Ancak ana metal bölgesi sıcaklıktan etkilendiğinden mikro yapısında herhangi bir değişim gözlenmez. Ancak ITAB yani ısı tesiri altında kalan bölge geniş olmaması kaynak işleminin sonucunda tercih edilen bir durumdur (Alpar ve ark., 2021).

1.5. TIG Kaynağı

Gaz Tungsten Ark Kaynağı (GTAW) olarak da bilinen Tungsten Inert Gaz (TIG) kaynağı, tükenmeyen bir tungsten elektrot kullanılarak yapılan bir ark kaynak işlemidir (Anık ve ark., 1991). İfade edilen TIG kaynağının şematik gösterimi Şekil 1.3'te gösterilmiştir (Kurt, 2006).



Şekil 1.3. TIG kaynağının şematik gösterimi (Kurt, 2006)

Genellikle ark kaynağı olarak adlandırılan TIG kaynak tungsten adıyla arka elektrik akımını sağlayan erimeyen elektrotu ve inert kelimesi ise diğer bileşenlerle yani elementlerle birleşmeyin bir gazı gaz kelimesi de arkı örten ve kaynak noktasını veya bölgesini çevreleyen havayı uzak tutan malzemeyi ifade eder (Anık ve ark., 1991). Bu kaynak yönteminde kaynak yapımında gerekli olan dolgu malzemesi yandan kaynak noktasına verildiğinden ayrıca kaynak akımı dolgu elektrotu üzerinden akmadığından

dolayı yapılan kaynağın banyosu diğer kaynak yöntemlerine göre daha basittir. Ayrıca TIG kaynağında dolgu metali kullanılmamasından dolayı sıçrama olayı yok denilecek kadar azdır. TIG kaynaklarında genellikle kullanılan gaz çeşitleri ise argon helyum yâda karışımlarıdır. TIG kaynağı alaşım ve metallerin büyük bir kısmında yüksek derecede kaliteli kaynak dikişi oluşturur. Ve bu kaynak pürüzsüze yakın bir şekilde sonuçlanır (Mercan, 2013; Cary, 1988). Birçok malzeme çeşidi ile yapılan TIG kaynağı özellikle gıda özel uygulamalar ve havacılık sektöründe tercih edilmektedir. Diğer kaynak yöntemlerinden ayrı olarak hafif metaller tercih edilmektedir. Bu metaller ise genellikle bakır alaşımı, Magnezyum pirinç ve alüminyum olarak sınıflandırılabilir (Demirci, 2010).

1.5.1. TIG kaynağında kullanılan koruyucu gazın nüfuziyete olan etkisi

TIG kaynak yöntemlerinden genellikle koruyucu gaz olarak asal gazlar sınıfından olan argon ve helyum gazı kullanılır. Bu koruyucu gazların asal gaz sınıfına ait olmasından dolayı diğer elementlerle birleşme olmaz. Helyum gazı havadan daha hafif olmasından dolayı kaynak yapılan bölgeyi tam olarak koruyamamakta olup, havadan ağır olan argon gazının kaynak yapılan bölgeyi diğer koruyucu gaz olan helyuma göre daha iyi korunmasına sebep olmaktadır. Ancak yüksek akım ve yüksek gerilim değerlerine ulaşılacak istenilirse koruyucu gaz olarak helyum gazı havadan hafif olması sebebiyle daha çok tercih edilmektedir (Tülbentçi, 1990; Cary, 1988).

Argon Gazı: Argon gazı inert yani bir soy gaz olması nedeniyle herhangi bir tepkimeye girmemekle beraber güçlü bir koruma ortamı sağlar. Fakat argon gazının havadan daha ağır bir gaz olması sebebiyle özellikle yatay pozisyonlarda kaynak yapılmalıdır. Ancak tavan kaynağı işlemi yapılacaksa havadan daha hafif olan helyum gazı tercih edilmelidir. Birleştirme yani kaynak işlemi koruyucu gaz ile ilk kez 2.dünya savaşı sırasında kullanılan bazı magnezyum alaşımları malzemelerin birleşmesiyle ortaya çıkmıştır. Bu kaynak yöntemi yapılan uygulamalarda malzeme ve eriyen elektrot arasında oluşan elektrik arkı kaynak için gerekli ısıyı sağlar. Ayrıca atmosferin kaynak bölgesine olumsuz etkilerine engel olabilmek için elektrot ve kaynak banyosu işlemi esnasında belli bir süre asal gaz akımı ile örtünme yapılmalıdır. Ayrıca TIG kaynak yöntemlerinde ek olarak ilave tel kullanıldığından bu yönüyle çalışma prensibi bakımından oksijen-gaz kaynak yöntemiyle benzerlik gösterir (Timaç, 2006). TIG kaynak yöntemi uygulaması kaynak edilebilen tüm metallere ve çeliklere yapılabilir. Bu

yöntemde gerekli kaynak uçları ise seryum lantan toryum ile alaşımlandıran tungstenden üretilmiştir. Bu elektrot türünün diğer saf elektrotlara göre en büyük avantajı daha kararlı bir arka sahip olmasıdır. Ayrıca daha yüksek kaynak akımları ile kullanılır özelliğe sahiptir. Argon gazı TIG kaynak uygulamasında en çok tercih edilen bir koruyucu gazdır. Ayrıca helyum gazına göre daha iyi bir temizleme alanı elde edilir. Helyum olarak kullanılan koruyucu gaz ise argona göre çok daha fazla yüksek ısı iletkenliği sayesinde daha derin ve daha geniş kaynak girimi sağlar. Bunların dışında hidrojen gazı da karışım şeklinde olup %2-5 oranında geri kalan oranda ise argon gazı kullanılabilir. Daha önce de belirttiğimiz gibi helyum gazının iletkenliği argon gazına göre çok daha yüksek olduğuna değinmiştik bu durum hidrojen gazının ısı iletkenliği argon gazından çok daha büyük olmakla beraber etkin gaz giderme ve derin kaynak girimi ile neticelendirilir. Kaynak yöntemlerinde kullanılan koruyucu gaz olarak argon helyum veya karışım gaz ile kaynak yapılabilir. Koruyucu gaz olarak argon kullanılan uygulamalarda düşük miktarda azot gazı da karıştırılabilir ve bunun sonucunda kök korumasının yanında ayrıca nüfuziyetin artmasına neden olur (Timaç, 2006).

1.5.2. Argon gazının avantajları

Koruyucu gaz olarak kullanılan Argon gazının avantajları aşağıda verilen beş madde ile özetlenmiştir (Timaç, 2006);

- Düşük ark gerilimi neticesinde ısı girdisinde azalma olması sebebiyle 1.5 mm den bile daha ince malzemelerin manuel yani elle kaynak işleminde avantaj sağlamaktadır.
- Burada arkın sakin ve daha stabil yanmasından dolayı ark işleminin tutuşmaya başlaması diğer koruyucu gazlara göre daha kolaydır.
- Korucu gaz olarak argon gazının tercih edilmesinde kullanılan gazın havadan ağır olması sebebiyle az miktarda gaz ile çok daha etkin bir koruma sağlamaktadır.
- Otomatik kaynak uygulaması işlemlerinde gözenek oluşması hızın yükselmesine bağlı olarak değişim gösterir.
- Farklı metal gruplara sahip malzemelerin birleştirilmesinde daha iyi sonuçlar alınabilmektedir.

1.5.3. Helyum gazının avantajları

Koruyucu gaz olarak kullanılan Helyum gazının avantajları ise aşağıdaki on madde ile belirtilmektedir (Timaç, 2006);

- Isı iletkenliği yüksek malzemeler ve genellikle kalın malzemelerin birleştirilmesinde daha iyi sonuçlar vermektedir.
- Yüksek kaynak ve yüksek ısı girdisi sayesinde daha dar bir ITAP alanı oluşturma beraber kaynaklı bağlantıda mekanik özelliklerin iyileşmesinde etkili olur. Bundan dolayı kendi çekmeler ve çarpılmalarda düşüş görülür.
- Gaz sarfiyatının fazla olması kullanılan helyum gazının havadan çok daha hafif olmasına bağlıdır.
- Özellikle otomatik kaynak uygulamalarında yüksek kaynak hızı neticesinde oluşan yanma çentikleri ve ortaya çıkan gözeneklere kontrol altına alınabilir.
- Ayrıca tavan kaynaklarında tercih edilme özelliği de helyum gazının havadan daha hafif olmasıdır bunun sonucunda tavan kaynaklarında daha iyi koruma sağlamaktadır.
- Ek kaynak metali miktarının ve ısı girdisinin bağımsız olmasından dolayı diğer gazlara oranla önemli üstünlüğü bulunur. Çünkü çok küçük veya ince parçalara uygulanabilmektedir.
- Kök pasoların yapılmasında ve kaynak sonrası ortaya çıkan tamir gerektiren kaynaklarda kolaylık sağlamaktadır.
- Helyum-argon gazı karışımı: yüksek karakteristik bakımından argon gazı ve helyum gazı da argon gazına oranla daha yüksek ısı girdiği olanağı sunmakla beraber argon ve helyum karışımı veya birleşimi yapılan kaynak dikişinde iyi sonuç elde edilmektedir.
- %25 Argon ve %75 Helyum gazı alternatif akım kullanıldığında kaynak hızının yüksek olmasına izin vermektedir.
- %10 Argon gazı %90 Helyum gazı doğru akım kullanıldığında ark başlama karakteristiği saf helyuma oranla daha iyi sonuçlar vermektedir.

1.5.4. TIG kaynağında kullanılan argon ve helyum gazlarının karşılaştırılması

Koruyucu gaz olarak kullanılan Argon ve Helyum gazlarının davranışlarının özetle karşılaştırılması aşağıda maddeler halinde verilmiştir (Timaç, 2006);

- Argon gazlarının kullanılması durumunda, düşük ark gerilimi nedeniyle ince kalınlıktaki parçaların birleştirilmesinde tercih edilir.
- Helyum gazlarının kullanılması durumunda ise yüksek ark geriliminin oluşması nedeniyle daha kalın malzemelerin birleşmesinde tercih edilir.
- Argon gazlarında arkın tutuşması daha basittir. Ayrıca, havadan daha ağır bir gaz olması sebebiyle koruyucu gaz olarak etkinliği daha fazladır.
- Helyum gazlarında ise gazın havadan daha hafif olması nedeniyle gaz sarfiyatı daha yüksektir.
- Argon gazlarının kullanılması ile farklı metallerin birleşmesinde daha iyi sonuçlar elde edilir.
- Helyum gazlarında ise genellikle otomatik kaynak uygulamalarında gözenek oluşumları kontrol altına alınabilmektedir.

1.5.4.1. TIG kaynak yönteminin avantajları

TIG kaynak yönteminin diğer kaynak yöntemlerine göre avantajları aşağıda maddeler halinde verilmiştir (Gözütok, 2009);

- Kaynak hızı yüksektir.
- Kaynak dikişleri daha temizdir.
- Uygulama olarak çok geniş bir alana sahiptir.
- Kaynak esnasında kaynakçıya kolaylıklar sağlar
- Mekanize edilmesi kolaydır.
- Birleştirmesi çok zor veya kaynağı kolay olan tüm metallerde kaynatılabilir.
- Birleşmelerde asal gaz kullanılmakla beraber kalite ve dayanım açısından mükemmel derecede dikişler elde edilir.
- Kaynakçı tarafından her pozisyonda kaynak işlemi yapılmaktadır.

- Farklı özellikteki ve farklı cins olan parçaların birleşmesinde kullanılır.
- TIG kaynağının temel uygulama alanı paslanmaz çeliklerdir.
- Kaynak torku hafif olması sebebiyle daha kolay bir çalışma imkânı sağlar.
- Kaynak sonrasında oluşan cüruf yok denilecek kadar azdır.

1.5.4.2. TIG kaynak yönteminin dezavantajları

TIG kaynak yönteminin diğer kaynak yöntemlerine göre dezavantajları ise beş maddede özetlenebilmektedir (Tehçi, 2011);

- Diğer kaynak yöntemlerine göre metal yığılma hızı daha düşüktür.
- Koruyucu gaza ihtiyaç duyulur.
- İnce olmayan kesitli parçaların kaynağında çok ekonomik bir kaynak yöntemi değildir.
- Kirliliğe hassas olmasından dolayı sürekli yüzey temizliği yapılmalıdır.
- Açık havada yapılması kolay bir işlem değildir.

1.5.5. Kaynak dikişlerindeki hataların oluşumunu etkileyen parametreler

Kaynak dikişlerindeki hataların oluşumunu etkileyen parametreler dört madde olarak belirtilebilmektedir (Tehçi, 2011);

- Dikiş öncesi hazırlık: kaynak noktasının temizliği ağız ölçüleri ve ağız formu
- Cihaz sistem ayarları: gerilim akım şiddeti cihazın karakteristik özelliği
- Kullanılan koruyucu gaz miktarı
- Kaynak hızı kaynak torku ayarları ve kullanılan elektrotlar vb. gibi parametreler

1.5.6. TIG kaynağında kullanılan ekipmanlar

TIG kaynağının yapılması amacıyla kullanılan ekipmanlar özetle (Tehçi, 2011):

- Torç
- Koruyucu Gaz Tüpü
- Basınç düşürme manometresi yani basınç regülatörü
- Debimetre (akış ölçer)
- Elektrik akım üretici
- Bazı cihazlarda soğutma su devresi, TIG kaynaklarında gerekli olan ekipmanlar olarak sıralanmaktadır.

TIG Torçu: Özel olarak tasarlanmış olan bir tür elektrot tutucusudur. Gaz memesi sayesinde koruyucu gazın akışını yönlendirip değiştirebilmektedir. Su soğutmalı torçlar hava soğutmalı olan torçlara göre daha tercih edilmektedir. Ayrıca kaynak torçlarına takılan gaz memeleri ise torçun şekline çeşidine kapasitesine su veya hava soğutmalı olması gaz debisine değişkenlik gösterir. Ancak genellikle sanayide kullanılan nozullarına malzeme cinsine göre Metal Saydam Seramik ve Çift akışlı gaz nozulları olarak 4 gruba ayrılabilir (Elektrikçi, 2007).

Gaz Nozulu: Görevi kullanılan koruma gazını kaynak bölgesine iletimini sağlayıp atmosferik havanın kaybolmasını sağlamaya yarar. TIG torkuna vida ile montajlandığından gerekli durumlarda değiştirilmesi kolaydır. Isıya dayanıklı olup genellikle seramik malzemeden imal edilmiştir. Gaz Lensi de bir tür gaz nozul türüdür. Akışının daha düzgün daha sabit ve uzun mesafe de gaz akışı sağlar. Koruma gaz sarfiyatı gaz dağıtıcı sayesinde azaltılabilir (Elektrikçi, 2007). Kaynak elektrotları: diğer kaynak yöntemleri uygulamalarına göre en belirgin farkı elektrotun sadece ark görevi üstlenmesidir. Tungsten çok güçlü bir elektron yayıcısı olmasından dolayı güçlü elektron akımı oluşturup yüksek erime sıcaklığında atomları iyonize ederek arkın kararlılığını sağlamaktadır (Tehçi, 2011). Ayrıca kaynak elektrotları farklı renk kodları adlandırılır. Kullanılan elektrot çapı ise maksimum akım kapasitesi de göz önünde bulundurarak çap seçilmelidir (Demirtaş, 2013).

1.5.7. TIG kaynağında kullanılan kaynak makinaları

Düşey statik karakteristikli akım üreteçleri TIG kaynaklarında kullanılabilir. Bu sebeple, prensip bakımından diğer kaynak yöntemi olan elektrik ark kaynaklarında kullanılan cihazlar da TIG kaynaklarında tercih edilebilir. Devrede kalma süresindeki kesiklikler elektrik ark kaynağına göre TIG kaynaklarında daha az sayıda olmasından dolayı akım üreteçlerin seçimi önemlidir. Ayrıca TIG kaynaklarında hem doğru akım hem de alternatif akım kullanılabildiğinden kaynak redresörleri veya kaynak transformatörleri kullanılır. TIG kaynak uygulamaları çok düşük akımlarla çalışabildiğinden kullanılan akım üreteçlerin titiz bir şekilde ayarlanması gerekir. Ayrıca hem alternatif akım hem de doğru akım veren makinalarda yani birleşik makineler de mevcuttur. Akım şiddeti yatay olmayan yani düşey karakteristikli kaynak cihazlarında cihaz üzerinde başka bir karakteristik eğrisi ayarlanabilmektedir. Buna bağlı olarak ark gerilimi az miktarda yükselebilmekle beraber kaynakçı elektrot ile malzeme arasındaki uzaklığı değiştirerek daha iyi bir şekilde etkileyebilir. Arkın karakteristik eğrisi ile makina karakteristik eğrisi kesişme noktasına çalışma noktası adı verilir. TIG Kaynağında Kullanılan Kaynak Makinaları Jeneratör ve Alternatör Tipi Kaynak Makinaları, Transformatör-Redresör Tipi Kaynak Makinaları, Üç Fazlı Redresör Tipi Kaynak Makinaları ve Transformatör Tipi Kaynak Makinaları olmak üzere 4 grupta ele alınır (Bulut, 2008; Tehçi,2011; Demirtaş, 2013).

1.5.7.1. Jeneratör ve alternatör tipi kaynak makinaları

Elektrik ark kaynak yöntemlerinde genellikle jeneratör tipi kaynak makinaları tercih edilir. Ancak TIG kaynaklarında koruyucu gaz veya yüksek frekans cihazları monte edilerek kullanılabilir. Jeneratör tipi kaynak cihazlarından ise genellikle doğru akım elde edilmektedir. Ancak yapılacak bazı değişikliklerle bu cihazlardan hem doğru akım hem de alternatif akım elde edilebilir (Bulut, 2008).

1.5.7.2. Transformatör-redresör tipi kaynak makinaları

Transformatör-Redresör Tipi Kaynak Makinaları motor-jeneratör tipi kaynak cihazlarına oranla TIG kaynak yöntemlerinde daha fazla kullanılan cihazlardır. Bu cihazlardan hem doğru akım hem de alternatif akım alınabilir. Bu tip kaynak cihazları sayesinde farklı cins metallerin kaynağı yapılabilmektedir. Ayrıca bu cihazların

programlanabilir özellikte olması nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Transformatör-redresör tipi kaynak cihazlarının çeşitli boyutlarda çeşitleri bulunur. Bu makinaların motor-jeneratör tipi kaynak cihazlarına göre bazı avantajları vardır. Bu avantajlar özetle aşağıda maddeler halinde verilmiştir (Bulut, 2008):

- Sessiz çalışabilmesi
- Boşta çalışma sarfiyatının çok az yani düşük olması
- Birleştirme yani kaynak işleminin maliyetinin düşüklüğü
- Bakım masraflarının ekonomik olması
- Döner parçaların bulunmamasıdır.

1.5.7.3. Üç fazlı redresör tipi kaynak makinaları

Bu kaynak cihazlarından genellikle doğru akım elde edilir. Ayrıca anahtar yardımıyla hem doğru kutuplama hem de ters kutuplama yapılabilir. Üç Fazlı Redresör Tipi Kaynak Makinalarının programlanabilir tipleri bulunur. En düzgün ve en kararlı ark işlemi bu cihazlarla yapılabilir (Bulut, 2008).

1.5.7.4. Transformatör tipi kaynak makinaları

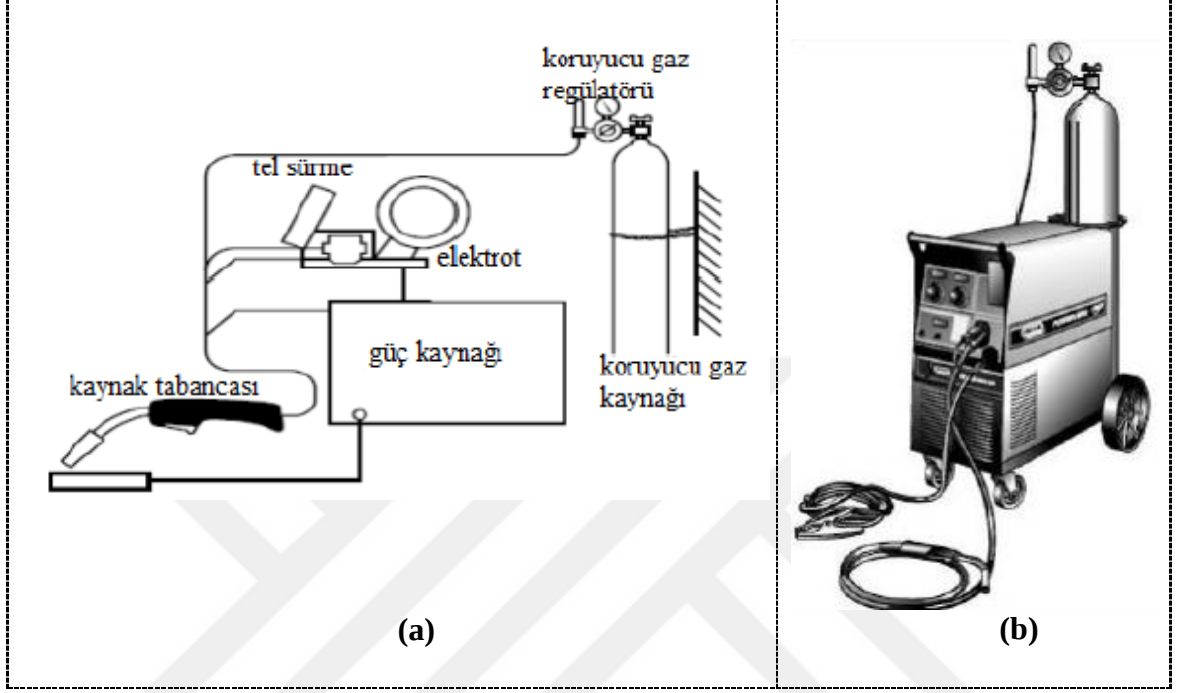
Bu tip kaynak cihazları küçük ve orta büyükte işyerlerinde TIG kaynağının çok az tercih edildiği yerlerde kullanılır. Ancak gerekli durumlarda yüksek frekans aygıtı monte ederek TIG kaynaklar da yapılabilir. Lakin yalnızca alternatif akım kullanabildiğinden genellikle Magnezyum ve alüminyum gibi malzemelerin birleşmesinde tercih edilebilir Kontrol Üniteleri, Genellikle kaynak akımın çalışılan bölgede veya kaynağın yapıldığı esnada değiştirilmesi gerekir. Gerek elle gerekse ayakla çalışan kumandalı cihazlarda bulunabilmektedir. Kaynak esnasında her fonksiyonun değiştirebilmesi sağlayan gerek cihazdan ayrı gerekse de cihazın içine yerleştirilmiş ünite şeklinde kontrol cihazları vardır (Bulut, 2008).

1.6. MAG Kaynak – MIG Kaynak

MAG –MIG kaynak gaz ortamı korunduğu için gaz altı kaynak yöntemi olarak adlandırılabilir. Kaynak işleminde koruyucu gaz olarak aktif gaz kullanılırsa MAG, koruyucu gaz olarak asal gaz kullanılırsa MIG kaynak olarak ifade edilir. Bu kaynak

yönteminde oluşan ark sayesinde ve kaynak akımının elektrotta oluşturduğu direncin ısıtma neticesinde üretilir (Gülenç ve ark., 2006).

MIG kaynağı cihazının basit resmi Şekil 1.4. (a) ve gerçek resmi (b) aşağıdaki gibi gösterilmiştir (Elgaddafi, 2019).



Şekil 1.4. (a) MIG kaynağı cihazının basit resmi ve (b) gerçek resmi (Elgaddafi, 2019)

Genellikle bakır karbonlu çelikler düşük alaşımla çelikler paslanmaz çelik titanyum malzemeler ve alüminyum malzemelerin birleştirmesinde kullanılır (Cirik, 2007). Birleştirme yani kaynak işlemi esnasından asal gaz olarak koruyucu gaz kullanılıyorsa MIG kaynak, aktif gaz kullanıyorsa MAG kaynak olarak isimlendirir (Mercan, 2018). Kullanılan parametreler gaz debisi tel türü tel beslenme hızı vb. doğru bir şekilde tercih edildiğinde uygulaması kolaydır (Taban, 2004). Arkın elektriksel karakteristiği kaynakçı tarafından ilk başlangıç ayarları yapıldıktan sonra kaynak makinası tarafından otomatik olarak sağlanır. Ancak bu durum yarı otomatik ile olan cihazlarda kaynakçı tarafından yapılan elle kontroller doğrultusunda kaynak hızı torçun pozisyonundan ibarettir. Ayarlar yapıp uygun donanım seçildiğinde akım şiddeti ve ark boyu otomatik olarak sabit değerde cihaz tarafından tutulmaktadır (Mercan, 2018).

1.6.1. Kaynak donanımlarının parametreleri

Kaynak donanımlarının parametreleri; güç ünitesi, kablo grubu ve kaynak torcu, koruyucu gazlar ve tel sürme tertibatı olmak üzere 4 grupta ele alınarak aşağıda maddeler halinde verilmiştir (Aydın, 2002; Kahraman ve Ark., 2004; Mercan, 2018; Yılmaz, R., 2021).

a) Güç ünitesi: Güç ünitelerinin görevi ark oluşturabilmek için elektrik gücünü iş numunesine veya elektroda göndermesidir. MAG-MIG kaynaklarında kullanılan üreteçler yatay karakteristikli özelliğe sahiptirler. Bu gaz altı kaynak yöntemlerinden olan MIG ve MAG kaynaklarından kullanılan akım üreteçlerinde içte ayar diye isimlendirilen ark boyu ayarı bulunur. Bu tür cihazlarda ark gerilimi tel ilerleme hızı ve bununla beraber akım şiddeti ayarlanabilmektedir. Tercih edilen devirde tel ilerleme motorunun hızı hızlı dönmelerinden dolayı tel ilerleme hızı sabit kalmaktadır. Herhangi bir sebepten kaynak esnasında ark boyu uzadığı zaman akım şiddetinde de azalma görülür. Bununla beraber ark boyunun artmasına bağlı olarak akım şiddetinin düşmesinden dolayı ergime miktarında azalma görülür. Bu sırada sabit hızla gelen sabit hızla gelen tel arkı normal haline döndürmektedir. Ark boyu kısaldığında ergime miktarı artık gösterir akım şiddeti artar sabit gelen tel hızı arkı normal boyuna döndürdüğünde ise gerilim ve akım değerleri uygun değerlere seyreder.

b) Kablo grubu ve kaynak torcu: Torcun fonksiyonu elektroda akımın yüklenmesi sonucunda koruyucu gazın ark bölgesine gönderilmesidir. Torç fonksiyonu devreye girdiğinde önceden ayarlanmış debide koruyucu gaz akışı sağlanmaya başlar. Kısa bir süre sonra ark işlemi veya ark oluşumu gerçekleşir ve ark oluşuktan sonra da tel sürme tertibatı devreye girmektedir. Standart bir torçta bulunan elemanlar: nozul, meme tutucu, kontak meme/temas tüpü, gaz difüzörü/gaz dağıtıcısı, spiraller ve akım kabloları olarak sınıflandırılmaktadır. Nozul: kaynak noktasında gazın koruma yapması için gazı bir arada tutan ve torcun uç tarafından saf malzemedir. Meme Tutucu: boyun ve kontak meme arasında iletimi sağlayan malzeme olarak adlandırılır. Kontak Meme/Temas Tüpü: MIG-MAG kaynak yöntemlerinde tel elektrot daima ilerleme hareketi yaptığı için tele elektrik iletimi kayar kontakla yapılmaktadır. Arkın düzgün oluşması ve arkın en son iletildiği malzeme kontak memesi adı verilir. Gaz Difüzörü/Gaz Dağıtıcısı: Gazın düzenli olarak kaynak bölgesine dağıtılması işlemi yapan sarf malzemedir. Karbon kompozit ve seramik olarak farklı özellikte

bulunabilmektedir. Spiraller: birleştirme yani kaynak işleminde kullanılan kaynak telinin düzenli bir şekilde kullanım yerine iletilmesi görevini yerine getirmektedir. Akım Kabloları: Burada kullanılan kaynak kabloları yüksek akım şiddetine maruz kaldığında bile ısınmayacak bir ebatta seçilmelidir.

c) Koruyucu gazlar: Kaynak yöntemlerinde kullanılan koruyucu gazların asıl görevi kalitesine etkiye bulunan zararlı gazların ergimiş kaynak metaline girmesine engel olarak birleştirme işleminde düzgün ve dayanıklı bir kaynak dikişi oluşturmaktır. Kaynak yöntemlerinde genellikle koruyucu gaz olarak tercih edilen gazlar ise Argon, Helyum veya Argon Helyum karışımı olan gazlardır. Argon gazı: Atmosferde %0,934 oranında bulunmasından dolayı havadan elde edilir. Alternatif akım ile alüminyum ve Magnezyum kaynağından çok üstün oksit temizleme etkisi göstermektedir. Koruyucu gaz olarak kullanılan argon gazı bakır nikel alüminyum vb. gibi kaynakları dışında genel de az tercih edilmektedir. Helyum gazı: Atmosferde çok sınırlı miktarda bulunan helyum gazı, günümüzde doğal gazdan ayrıştırılma işleminden sonra elde edilir. Helyum gazı argon gazına göre daha hafiftir. Hafif olmasından dolayı kaynak işlemi sırasında etkin korumanın oluşması için gerekli sarfiyatı attırır. Ayrıca helyum gazı yüksek ısı iletebilme özelliğine sahiptir. Bundan dolayı derin nüfuziyetli kaynak dikişleri elde edilir. Ayrıca ısıyı iyi derece de ileten ve kalın kesitli metallerin birleşmesinde kullanılır. Argon - Helyum gazı karışımı: Hem Argon hem de Helyum gazının avantajlarından faydalanmak amacıyla bunların karışımı ile elde edilen gaz karışımı da koruyucu gaz olarak kullanılabilir. Genellikle çelik ve demir dışı gibi malzemelerin birleştirmesinde tercih edilir. Helyum gazı Argon gazına nazaran daha yüksek oranda ark gerilimi oluşturmaktadır. %60-%90 Helyum oranına kadar farklı oranlarda karıştırılması neticesinde genellikle kısa devre geçişlerinde kullanılabilinmektedir.

d) Tel sürme tertibatı: Makaradan sağa ark eriyen miktarına ark noktasına gönderen aparat olarak ifade edilir. Tel besleyici yani elektrot besleme ünitesi elektrot motoru ile elektrot makaralar basınç ve elektrot doğrultusunu ayarlayan parçalardan oluşur. Ayrıca elektrot besleme motoru genellikle doğru akımla çalışmaktadır.

1.6.2. Kaynak ilave telleri

MIG MAG kaynak uygulamalarında tercih edilen elektrot çapların ince olması nedeniyle oluşan akım yoğunluğu diğer kaynak yöntemleri olan elektrik ark yöntemine

göre daha yüksektir. Bu sebeple akım yoğunluğunun yüksek olması kaynak hızını metal transfer formunu ve nüfuziyet üzerinde olumlu bir etkisi olmaktadır. MIG kaynak yöntemlerinde tercih edilen tel elektrotlarının hassas ve pürüzsüz olmasıdır. Kullanılan elektrot çapları 0.6, 0.8, 0.9, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 2.0, 2.4 ve 3.2 mm arasında tercihe göre değişmektedir (Mercan, 2018).

1.6.3. Kaynak parametreleri

Kaynak parametreleri birleştirme işlemi ile daha sonrasında yapılan kaynağın kalitesini önemli derecede etkileyen önemli unsurlardır. Kaynak parametreleri metal türü kaynak ağzı türü kaynaklanan metal türü kaynak pozisyonu ile kaynaklı bağlantıdan beklenen mekanik özelliklere göre tercih edilir. Ayrıca bu parametrelerin seçimi birleştirme işlemi yapan kaynakçının da çalışma olanaklarını kolaylaştırır. Ayrıca kaynak parametreleri seçilirken kaynak yani birleştirme önce belirlenmelidir. Birleştirme esnasında mümkün olmayan parametreler birinci derecede ayarlanır ikinci derecede ayarlanabilecek parametrelerde üç ayrı şekilde incelenir (Polat, 2016; Mercan, 2018). Birleştirme öncesi belirlenen yani İlk gruba giren parametreler elektrot çapı elektrot türünü ve koruyucu gaz türünü belirler. Akım şiddeti ark gerilimi ve kaynak hızı parametrelere ise ikinci gruba giren ve birinci derecede ayarlanabilen kaynak parametreleri arasında gösterilir. Bunların yanı sıra kaynak dikişini etkileyen diğer parametreler ise nozul mesafesi kaynak pozisyonu kaynak yönü koruyucu gaz miktarı torç eğimi ve serbest tel uzunluğu olarak sıralanabilmektedir (Mercan, 2018). Torç açısı: Kaynak yöntemlerinde kullanılan elektrotun ile kaynak sırasında hareketi kaynak dikişinin kalitesine etki eden etmendir (Polat, 2016). Ayrıca sola ve sağa kaynak yöntemi de yapılabilir. Torcun kaynak yapılacak noktaya dik olarak tutulması durumunda koruyucu gazı kaynak banyosu ve elektrot ucunu en iyi şekilde korunması sağlanır (Mercan, 2018). Sağa kaynak uygulamalarında daha derin nüfuziyetli daha dar dikişler elde edilir. Ark stabil olmasından dolayı sıçrama daha azdır. Sola kaynak yöntemleri ise metale intikal eden ısı miktarını azaltmak için genellikle alüminyum kaynaklarında kullanılır (Polat, 2016). Serbest tel uzunluğu: Elektrotun uç noktası ile torç içerisindeki kontak borusunun en uç kısmı arasındaki mesafe olarak ifade edilir (Lakshminarayanan ve Ark., 2009). Serbest tel uzunluğunun kısılması veya uzamasına bağlı olarak akım şiddeti ve buna bağlı olarak nüfuziyet derinliği de değişkenlik gösterir (Mercan, 2018). Nozul mesafesi: Kullanılan malzemeye mesafesi gaz çıkışını

engellemeyecek uzunlukta ve gaz korumasını sağlayacak kadar kısa değildir. Nozulun malzemeye mesafesi akış şiddetine bağlı olarak belirlenmektedir. Nozul mesafesinin artması genellikle akım şiddetinin artmasıyla artış gösterir. Nozul iş parçasına yakın mesafe de değilse yeterli derecede kaynak banyosu gaz koruması sağlayamaz. Ancak nozul iş malzemesini yakın olması durumunda da birleştirme işlemini yapan kaynakçının kaynak banyosunu görmesine engel olabilmektedir. Ve buna bağlı olarak nozul fazla oranda ısınır ve sıçramaların nozula yapışmasından artış gösterir (Mercan, 2018). Koruyucu gaz debisi: Koruyucu gaz debisi birleştirme yapılacak iş parçasına ark türlerine ergime gücüne tercih edilen koruyucu gazın yoğunluğuna kaynak pozisyonuna birleştirme şekline ve kaynak ağzının büyüklüğüne bağlıdır (Mercan, 2018). Kutuplama: Yatay karakteristikli kaynak akım üreteçleri genellikle gaz altı kaynak yöntemlerinde doğru akım ile kullanılmaktadır (Demirci, 2010). Kaynak ağzı açma: Birleştirme öncesinde yapılan kaynak ağzının şekillenmesinde kaynak yapılacak parçanın biçimi ve kullanılan malzemenin cinsi/türü ile ilgili hususlara dikkat edilmelidir. Kaynak ağzı hazırlık aşamasındaki temel kriter, gerekli dayanaklıkta ve yüksek kalitede kaynak dikişini gerçekleştirmektedir. Puntalama: Kaynak yöntemlerinden olan MIG-MAG kaynaklarda öncelikle birleştirme yapılacak malzemelerin puntalanması gerekmektedir. Birleştirme yani kaynak işlemi yapılmadan önce Puntalama noktaları taşlanıp temizlemezse yapılan Puntalama noktalarında kaynak hataları ortaya çıkabilir (Mercan, 2018).

1.6.4. Kaynak pozisyonları

Kaynak pozisyonları Yatay Oluk Pozisyonu, Yukarıdan Aşağıya ve Aşağıdan Yukarıya Kaynak ve Tavan ve Korniş Pozisyonunda Kaynağı olarak 3 grupta ele alınır. MIG-MAG kaynak yöntemlerinde kullanılan elektrot türleri ve akım üreteçlerinin teknolojik gelişmelerin artış göstermesinden dolayı her pozisyonda kaynak yapmaya imkân sağlamaktadır. Robot veya otomatik kaynağa uygun olmasından dolayı seri üretimlerde bir den çok direnç kaynağının yerine de tercih edilmektedir (Mercan, 2018).

Yatay Oluk Pozisyonu: Hafif geri adım metoduyla ve tek paso ile yapılan kaynak pozisyonudur. Birden fazla pasolu kaynaklarda ise kök pasolarında kök aralığını doldurmak için hafif sarkaç hareketi yaparak dolgu ve ara pasolarında da yine aynı hareket tekrarlanarak daha geniş bir şekilde uygulanır. Bundan dolayı kenarda olması gereken ergimeyi yapacak ve bunun yanı sıra bu bölgelerin iyi bir şekilde dolmasını

sağlayacak biçimde pozisyon alınır (Mercan, 2018). Yukarıdan aşağıya ve aşağıdan yukarıya kaynak: Genellikle ince sacların kaynaklarında dikey pozisyondan yapılan daima yukarıdan aşağıya doğru yapılan pozisyon türüdür. Dikey olarak yukarıdan aşağıya doğru birleştirme yapılırken ergiyik metal banyosunun arkın önüne geçmesi için torç kaynak ilerleme yönünde 70- 75 açı ile tutulur (Mercan, 2018). Tavan ve korniş pozisyonunda kaynak: Genellikle sacların tavan kaynağında kısa ark boyu ve yüksek hızlı kaynak işlemi salınım hareketi olmaksızın yapılmalı ve bu güç pozisyon için ise kaynak akımının mümkün olan en küçük yani en düşük ayarda olmalıdır. Boru birleştirmelerinde pozisyon kaynağı pozisyon kaynaklarında küçük çaplara sahip elektrotlar ve kısa devre ark tercih edilir. Çünkü kaynak banyosu yer çekimin etkisiyle bağlantının dışına doğru akmaya çalışır (Mercan, 2018).

1.6.5. MIG-MAG kaynak yönteminin avantajları ve dezavantajları

MIG-MAG kaynak yönteminin avantajları özetle aşağıda maddeler halinde verilmiştir (Mercan, 2018):

- Demir ve demir dışındaki tüm metal ile alaşımlara uygulanabilmesi
- Sınırlı sayıda elektrot kullanma ile ilgili sorun teşkil etmemesi
- Uygulamalarının kolay olması
- Kaynak işlemlerinin her pozisyonda yapılabilmesi
- Tercih edilen elektrotların daha ince olması nedeniyle dar bir kök aralığı bırakılmasında ise dar kaynak yapılmasına olanak vererek iş parçalarının birleşmesinde daha az elektrot kullanılmasının mümkün olması
- Derin nüfuziyet sağladığından köşe kaynaklarına uygunluğu
- Daha temiz kaynak dikişi elde edilebilmesi
- Oluşan cürufun az olması

MIG-MAG kaynak yönteminin dezavantajları ise özetle aşağıda maddeler halinde verilmiştir (Mercan, 2018):

- Elektrik Ark kaynağına nazaran kaynak donanımının daha karışık olması
- Yatırım maliyetlerinin daha yüksek olması

- Nakliyesinin yani taşınmasının zor olması
- Isı yayılmasının şiddetli olması ve arkın yoğunluğunun fazla olmasından dolayı gerekli güvenlik önlemlerinin alınması ihtiyacı
- Kaynak torçunun çapının büyük olması nedeniyle, karmaşık ve dip köşelerdeki kaynak kabiliyetinin düşüklüğü

1.6.6. MIG/MAG kaynak yönteminde elektrotun seçimi

Birleştirme işleminden sonra yapılan kaynaktan istenilen fiziksel ve mekanik özelliklerin karşılanabilmesi için elektrot ve koruyucu gaz parametreleri doğru tercih edilmelidir. Elektrot tercihi ergiyen elektrot gaz altı kaynak uygulamalarında önemli bir parametredir. Tercih edilen elektrot seçiminde öncelikle dikkat edilmesi gereken önemli husus ise malzemenin kimyasal mekanik ve fiziksel özellikleridir. Ancak uygulama kullanılacak iş parçası metalin kimyasal fiziksel ve mekanik özellikleri hakkında bilgi yok ise malzeme çeşitli testlerle analizi yapılmalıdır. Malzeme özelliklerini basit testlerden olan kırma ve kıvılcım testlerini uygulayarak malzeme hakkındaki özelliklere ulaşılabilir. Ancak kimyasal bileşimi ise mutlaka bir analiz ile saptanmalıdır (Ören, 2002; Mercan, 2018).

1.6.6.1. Elektrot seçiminde dikkat edilmesi gereken hususlar

Elektrot seçiminde, aşağıda maddeler halinde açıklandığı gibi, iş parçası metalinin mekanik özellikleri, iş parçası metalinin kimyasal özellikleri, koruyucu gazın cinsi ve özellikleri ve esas metalin kalınlığı ve geometrisine dikkat edilmelidir (Ören, 2002; Polat, 2016; Mercan, 2018).

a) İş parçası metalinin mekanik özellikleri: Mekanik özelliklerde öncelikle akma-çekme mukavemeti göz önünde bulundurulmalıdır. Malzeme metal ferritik iç yapılı çelik ise ayrıca malzeme tokluğu da dikkate alınmalıdır.

b) İş parçası metalin kimyasal özellikleri: Kaynak yani birleştirme yapılacak malzeme için sürtünme dayanımı renk uyumu korozyon direnci ısı iletkenlik ve elektriksel hususlardan söz ediliyorsa malzemenin kimyasal bileşimi hakkında bilgi sahibi olunmalıdır. Malzemenin ısıdan etkilenen noktada sertleşmenin olup olmayacağı

belirlenecek ise mutlaka kimyasal bileşenleri bilinmelidir. Bunların yanı sıra iş parçası basit karbonlu çelik ve düşük alaşımlı ise de kimyasal bileşenleri bilinmelidir.

c) Koruyucu gazın cinsi ve özellikleri: Kaynak yöntemi uygulamalarında asal gaz veya karışımları koruyucu gaz olarak tercih edilirse birleştirme işlemi yani kaynak esnasında yanma kaybı gerçekleşmez. Ancak karbondioksit gibi asal gaz ya da asal-aktif gaz karışımı kullanılırsa kaynak sırasında az miktarda da olsa yanma kayıpları meydana gelir. Kaynak işleminden kullanılan malzeme çelik iş parçası ise koruyucu gaz olarak ta aktif gaz tercih edilirse düşük oranda demir oksijen ile oksitlenmesi gerekir. Demir oksit redüklenmesi nedeniyle meydana gelen silisyum ve mangan kaybı engellenmelidir. Kullanılacak malzeme çelik olarak tercih edilirse MIG kaynak işleminde kullanılacak bir elektrot MAG kaynak yöntemi için uygun değildir.

d) Esas metalin kalınlığı ve geometrisi: Kullanılan malzemelerin karışık geometriye sahip olması durumunda çatlak oluşumlarının engellenmesi için tercih edilen kaynak metali sünek olmalıdır. Bundan dolayı elektrot seçimi yapılırken yüksek süneklik sağlayan elektrot seçilmez.

1.6.6.2. MIG/MAG çelik kaynağında kullanılan elektrotların seçimi

Kullanılan malzeme çelik iş parçası olması durumunda kullanılan elektrotlar aşağıda maddeler halinde açıklandığı gibi, alaşımsız tel, alaşımlı tel ve özlü tel olarak sıralanmaktadır (Durmuşoğlu, 2006; Polat, 2016; Okuroğulları, 2022).

a) Alaşımsız tel: Genellikle yumuşak malzemelerin kaynağında kullanılır. Bu malzemeleri alaşımsız çeliklerden ayıran önemli husu yapılarındaki silisyum ve mangan elementlerinin daha yüksek oranlı olmasıdır.

b) Alaşımlı tel: Telin malzemesi özel bileşimden oluşmakla beraber genellikle çelik malzemelerin kaynağında kullanılır.

c) Özlü tel: Özlü tel yumuşak ince şeridin alaşım tozlarıyla kaplanmasından sonra boru haline getirilmesiyle imal edilir. Boru şeklindeki özlü tellerin iç kısmı diğer formlakilerin ise ferro alaşım tozu mevcuttur. Bu alaşımdan dolayı kaynak dikişinde alaşımlanma ve deoksidasyon gerçekleşir. Elektrot seçimini kolaylaştırmak için öncelikle elektrotu oluşturan bileşiklerinin ve bunların kaynak dikişine etkilerini bilmek gerekir. Çelik iş parçalarının birleştirme işleminde kullanılan elektrotların alaşımlarında kullanılan elementler Karbon, Silisyum, Mangan, Alüminyum, Titanyum

ve Zirkonyum olmak üzere sıralanmıştır. Karbon (C): Elektrotların yapısında %0,05-0,12 oranlarında değişkenlik göstermektedir. Malzemelerde bulunan karbon miktarı çelik malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerini doğrudan etkiler. Karbon oranı yükseldikçe malzemenin dayanımını arttır ancak tokluk ve süneklik için aynı durum söz konusu değildir. Bu malzemelerin birleşmesinde yani kaynak işleminde karbondioksit gazı koruyucu gaz olarak kullanılırsa yüksek karbon oranına sahip malzemelerde kaynak banyosu esnasında CO meydana gelir ve karbon kaybına neden olmaktadır. Bu karbon kaybı sebebiyle kaynak noktasında gözenek meydana gelir. Silisyum (Si): %0,4-1,2 oranlarında değişken miktarlarda ve deoksidasyonu arttırmak için kullanılır. Silisyum kullanımı ile malzemenin dayanım değeri yükselirken sünekliğin azalmasına sebep olur. Yüksek oranda silisyum oranı kullanıldığında kaynak dikişlerinde çatlama gibi hatalar meydana gelebilmektedir. Mangan (Mn): Kullanım oranı %1-2 oranlarında değişkenlik göstermekle beraber deoksidasyonu ve dayanımı arttırmak için kullanılır ve mangan oranı aynı zamanda kaynak çalışma hassasiyeti ile paralel olarak artış gösterir. Alüminyum (Al), Titanyum (Ti), Zirkonyum (Zr): Kullanım Aralığı %0,1-0,2 oranlarında değişkenlik göstermekle beraber deoksidasyonu arttırmak için kullanılır. Ayrıca kaynak teline ekleme yaparak dayanımı artırıcı gibi özellikleri de bulunmaktadır.

1.7. Radyografik Muayene Yöntemleri

Radyasyon elektromanyetik dalgalar yayan bir kaynaktan ya da madde içinde ve boşlukta enerji salınımı ve aktarımı olarak ifade edilir. Parçacıklar veya elektromanyetik dalgalar tarafından yayılan enerji salınımı kaynağın yapısına göre değişebilmektedir. Radyasyonu tanımlayan parametreler; Enerji, Kaynak, Yayınım türü ve Aktivitesi'dir. Enerji parametresi düşük veya yüksek enerji yayınım türü olarak parçacık veya elektromanyetik kaynak ise doğal veya yapay olarak ifade edilebilmektedir (Yaşar, 2010).

1.7.1. Radyografik muayene

Wilhelm Conrad Roentgen tarafından 1900 yıllarda tahribatsız muayenenin temeli olan X ışınları keşfedilmiştir. 1930'lu yıllarda Amerikan donanmalarında kullanılan X ışınları, sanayi alanlarında da muayenenin temelini oluşturmuştur. Radyografik muayene yöntemlerinde Gama ve Nötron Işınlarnın kullanılmasıyla çeşitlilik artış göstermiştir. İyonlaştırıcı ışımanın nüfuziyet yeteneğinden faydalanarak

malzemenin iç kısmından geçirilen ve görüntü elde etmek için bir film (panel) üstüne aktarılması işlemidir. Günümüzde ise daha çok radyasyon cihazları ve x ışınlarını imal eden üreteçlerle yapılmaktadır. X ve Gama ışınlarının en belirgin özelliği malzemenin iç kısma nüfuz etmeleridir. Malzemelerin saydam ve katı özelliğe sahip olması gerekmektedir. İçerisinden geçen ışınlar malzemede yoğunluk süreksizlik kalınlık ve farklı malzeme yoğunluklarına göre absorbe edilir. Ancak bu ışınlardan bazılarının malzemenin diğer kısmına geçemediği durumlarda ortaya çıkabilmektedir. Malzemenin diğer tarafına geçen ışınlar bir panel veya film üzerine aktarılması sonucunda oluşan fotografik bize malzeme ait özellikleri hakkında bilgi vermektedir. Işınlar sayesinde oluşan fotografik görüntüde ise yoğunluğu az ve ince olanlar koyu, yoğunluğu fazla ve kalın olanlar ise açık olarak görünmektedir. Bunun neticesinde yoğunluk farkı hacimsel iç hataların tespit edilmesinde önem arz eden bir yöntemdir (Kaba, 2009; Yaşar, 2010).

1.7.2. X-ray cihazı ile muayene

X ışınları üreteçte imal edilen elektronların yüksek hızda bombardımanı neticesinde meydana gelmektedir. Odaklama kabı çıkan elektronları tel aracılığıyla yönlendirir. Meydana gelen çarpışma ile yüksek ısı ve X ışınları ortaya çıkmaktadır. Meydana gelen yüksek ısıyı uzaklaştırmak amacıyla yağ ve su soğutmalı sistemler kullanılmaktadır (Kaba, 2009; Yaşar, 2010).

1.7.2.1. X-ray cihazı ile radyografide boru hatları uygulamalarına genel bakış

Belli bir zaman diliminde birim alandan geçen ya da birim alana çarpan ışınların sayısı X ışınlarının şiddeti olarak adlandırılır. Işınların malzemeye olan giricilik yeteneği ise X ışınların enerjisi olarak ifade edilir. Ayrıca giricilik gücü x ışını üretecine uygulanan voltajla doğrudan bağlantılıdır (Salma, 2011; Seçim, 2011).

1.7.3. Gama cihazı ile muayene

Gama cihazları oluşturan mekanizmalar kumanda, radyoaktif kaynak, kumanda ve kaynak tutuculardır. Radyoaktif kaynak radyoaktif hale gelmeyen malzeme ve sağlam sızdırmaz malzemeden yapılmış bir kapsül içerisine yerleştirilir (Salma, 2011). Gama ışını cihazları içerinden fazla sayıda radyoaktif elemente sahip olmasından dolayı cihazın açık ve kapalı durumları sağlık ve çevre güvenliği açısından önem arz

etmektedir. Günümüzde kullanılan cihazlarının saklama tekniğinin öncesinde yaşanan iş kazaları neticesinde geliştirilen çoklu kilit özelliğine sahip uzaktan kumandalı kontrol sistemi bulunmaktadır. Ayrıca cihazların kapalı tutulduğu durumlarda da çekirdek ısımaya devam etmesinden dolayı iç kısmına yerleştirilen kapsül ile çekim esnasında ulaşması gerektiği noktayı kontrol eden bir mekanizmaya sahiptir. Bu Gama cihazlarının kullanımı esnasında küresel, konik ve radyal ışıma ortaya çıkmaktadır. Öncelikle cihaz çekim yapılacak olan malzemenin şekline uygun olarak ayarlanır. Sonrasında çekim yapılacak malzemenin et kalınlığı ve yarılanma ömründen kalan gücü gibi parametrelere göre uygun sürede bekletilip ışıma olayının gerçekleşmesi neticesinde işlem son bulmaktadır (Kaba, 2009; Salma, 2011).

1.7.4. Radyografik görüntünün kalite parametreleri

Radyografik görüntülemenin kalitesine etki eden parametreler ise, radyasyon kayağı, pozlama süresi, ekran faktörü, geometrik faktör ve film faktörleri olarak sıralanmaktadır (Salma, 2011; Seçim, 2011).

2. LİTERATÜR TARAMASI

Çelik ve ark., (1999), farklı metallerin kaynağı ile ilgili olarak yaptıkları çalışmada, St37 ve AISI 304 malzemelerinin GTA/TIG ile birleştirilmesini ele almışlardır. Benzer ve farklı malzeme çiftinin kaynaklanabilirliğini, SEM, eğme testini, mikro sertlik ölçümünü, çekme testini ve mikro yapı özelliklerini değerlendirdiklerinde, farklı malzeme çiftlerinin ITAB bölgelerinde yüksek sertlik artışının meydana geldiğini ve bunun yanı sıra çekme numunesinin St37 malzemesinden koptuğunu görmüşlerdir.

Khalifeh ve ark., (2013), ele aldıkları AISI 316L ve St37 çelik malzemelerini kaynak yöntemlerinden olan TIG kaynak yöntemi ile kaynak yaparak birleştirmişlerdir. Ayrıca, kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerini tespit etmek için darbe testi, mikro sertlik ve çekme testi analizlerini inceleyip değerlendirmişlerdir. Deneylerinde kullandıkları ER309L kaynak dolgu malzemesi ile AISI 316L/St37 çelik malzemelerin birleştirmesinde yani kaynağında daha iyi mekanik özelliklere ve sıcak çatlamaya karşı dirence sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Çekme testi analiz sonuçlarına göre kopmanın St37 tarafında gerçekleştiğini tespit etmişlerdir. Kaynak noktasında delta ferrit miktarının yükselmesine bağlı olarak darbe tokluğunun azalmasına neden olduğunu tespit etmişlerdir.

Kulkarni ve ark., (2020), yapmış oldukları çalışmada, AISI 316L ve Alloy 800 farklı metallerini aktif edilmiş TIG (A-TIG) kaynak yöntemi ile birleştirmişlerdir. Alloy 800 ısı tesiri altında kalan bölgesinde önemli ölçüde tane irileşmesi gözlemlemişlerdir.

Jahanzeb ve ark., (2017), 316L çeliği ile ilgili olarak daha önce ele aldıkları çalışmalarında östenitik paslanmaz çelik ve SS400 ferritik çelik çiftini TIG kaynak yöntemi ile birleştirmiş olup kaynak bölgesindeki gerinim dağılımlarının homojen olmadığını tespit etmişlerdir.

Yürük ve ark., (2016), yapmış oldukları çalışmada, S235 karbon çeliği ve AISI 430 ferritik paslanmaz çelik malzemelerini 1 mm çapındaki 309L'ye -Si ilave kaynak dolgu metali kullanarak üç farklı tel hızında kaynak yöntemlerinden olan MIG kaynak yöntemi ile birleştirmişlerdir. Yapılan çalışmada, çekme testleri neticesinde tüm kaynaklı numunelerde kopmanın ana malzeme olan S235 kısmında meydana geldiğini görmüşlerdir. Bunun neticesinde kaynaklı bağlantının kendisinden istenilen şartları sağladığı sonucuna varmışlardır. Mikrosertlik ölçümleri neticesinde ise en yüksek

sertlik değerini kaynak metalinde ölçölmekle beraber; en yüksek değerin 100 A kaynak akımı ve 3.5 m/sn tel hızında 313 HV sertlik değerinde olarak ölçmüşlerdir. Artan tel hızı ile tanelerde büyüme gözlemlemiş ve kaynak akımı ile artan ısı girdisinin neden olduğuna dayandırmışlardır.

Savaş (2021), yapmış olduğu çalışmada, Hardox-Hardox, Hardox-AISI 304L ve Hardox-St52 çelik çiftlerinin kaynak yöntemlerinden olan MIG kaynağı ile birleştirme neticesinde mekanik davranışlarını incelemek için darbe tokluk testi, çekme testi ve sertlik ölçümü testi yapmıştır. Kaynaklı parçalardan çekme ve darbe tokluk numunesi tel erezyon yöntemi ile çıkarılmıştır. ITAB sertlik ölçümü Hardox-Hardox kaynaklı bağlantısında ortalama 365 HV Hardox –AISI 304L kaynaklı bağlantısında ortalama 230 HV Hardox –St52 Kaynaklı bağlantısında ortalama 270 HV olduğunu tespit etmiştir. Bunun yanı sıra darbe tokluk ve çekme mukavemetine ait yüksek değerleri sırasıyla Hardox-AISI 304L, Hardox-Hardox ve Hardox-St52 kaynaklı bağlantısında tespit etmiştir.

Kumar ve ark., (2018), yapmış oldukları çalışmada, 1.4 mm et kalınlığında 304L ve St37 plakaları 25 Hz sabit darbe frekansı, 6mm/s tarama hızı, 17J darbe enerjisi ve 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5 ve 6 ms olmak üzere 6 farklı darbe genişliğindeki parametreleri darbeli Nd-YAG lazer kaynağı ile birleştirmişlerdir. Ortalama mikro sertlik değeri 3.5 ms darbe genişliğinde parametrede en yüksek ortalama değere sahip olup 364.5 HV olduğunu belirtmişlerdir. En düşük ortalama değer 6 ms genişliğinde olan parametrede ve 322.7 HV olarak tespit etmişlerdir. Çekme testleri neticesinde çekme dayanımı artan darbe genişliğine rağmen sabit olduğu gözlenmekle beraber, kopma pozisyonun St37 karbon çeliği kısmında gerçekleşmesi kaynaklı bağlantının ana metal olan St'ye eşdeğer dayanımda olduğunu belirtmişlerdir.

Jeraldnavinsavio ve Ark., (2019), dolgu metali olarak ER310 ve ER2594 kullanarak AISI 316L ve AISI 430 çeliklerini TIG kaynak yöntemi ile birleştirmişlerdir. ER2594 dolgu çubuğu kullanılarak yapılan kaynağın daha yüksek nihai çekme dayanımını gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Ramkumar ve ark., (2017), çalışmalarında, 4 mm kalınlığındaki Inconel 718 ve 316L çeliklerinin kaynak yöntemlerinden olan TIG kaynak yöntemiyle birleştirmişlerdir. Benzer olmayan kaynakların nihai çekme dayanımlarının benzer

kaynaklara oranla daha iyi olduğu ve tüm durumlar için ana metalde kırılma gözlemlendiği sonucuna varmışlardır.

Çınar ve ark., (2019), yapmış oldukları çalışmada, 4 mm kalınlığındaki AISI 316L, AISI 316L, AISI 321-AISI 321, AISI 316L-AISI 321 kombinasyonundaki malzemelerini kaynak yöntemlerinden olan TIG kaynak yöntemi ile birleştirmişlerdir. Mikro sertlik ölçümleri sonucunda kaynak bölgesinin homojen bir yapıya sahip olmasından dolayı standart sapma değerleri dahilinde birbiri ile uyumlu sonuçlar elde etmişlerdir.

Gözütok (2009), daha önce yapmış olduğu çalışmada, östenitik paslanmaz çeliklerin TIG kaynağı uygulaması ile birleştirilmesinde kullanılan koruyucu gazların, uygulama yapılan parçaların mekanik özelliklerini ve mikro yapılarını etkilediğini bildirmişlerdir.

Yılmaz ve ark., (2002), yapmış oldukları çalışmada, metal ark kaynağı ve TIG kaynağı ile birleştirilen paslanmaz çeliklerin mekanik özelliklerini incelediklerinde 304 ve 316 tip östenitik paslanmaz çeliğin çekme, akma, çentik darbe ve sertlik değerlerinin metal ark kaynağına oranla daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Yılmaz ve ark., (2012), yapmış oldukları araştırmada, östenitik paslanmaz çeliklerin kaynak yöntemlerinden olan TIG kaynak uygulamalarında, kaynak akımı ve kompozisyonun kaynak nüfuziyetine etkisini araştırdıklarında, kaynak akımı değerlerinin ve kimyasal kompozisyonun nüfuziyeti etkilediği ve attırdığı sonucuna varmışlardır.

Kahraman ve ark., (2004), çalışmalarında, 316L paslanmaz çeliğin kaynak yöntemlerinden olan TIG kaynak ile birleştirmesi neticesinde kaynak işleminde koruyucu argon gazına hidrojen gazı ilavesinin sonucunda, ilave edilen hidrojen gazının miktarının artmasıyla nüfuziyetin arttığını tespit etmişlerdir.

Uluocak (2008), yapmış olduğu yüksek lisans tezinde, 5mm kalınlığında Hardox 450 çeliği kaynak yöntemlerinden olan MAG kaynak ile birleştirip, kaynak bölgesinin mekanik özelliklerini ve mikro yapısını incelemiştir. Çekme testi sonuçlarına göre tüm numunelerin ITAB bölgesinde koptuğunu gözlemlemiştir.

Topçu (2019), yapmış olduğu araştırmada, TIG ve MIG kaynağı ile kaynak yapılan AISI 304 ve AISI 1040 çeliklerin ITAB bölgesindeki mekanik özelliklerin incelenmesi neticesinde MIG kaynak yöntemi ile yapılan bütün birleştirmelerin TIG kaynak yöntemine göre daha iyi mekanik sonuçlar verdiğini tespit etmiştir.

Kaya (2010), yaptığı çalışmada, AISI 304 ve AISI 430 paslanmaz çeliklerin TIG, MIG ve örtülü elektrot ark kaynağıyla birleştirme işlemi neticesinde çekme testi değerlerine göre en yüksek dayanımın TIG kaynak yöntemi ile yapılan bağlantıda olduğunu tespit etmiştir.

Kaya ve ark., (2020), yapmış oldukları çalışmalarında, paslanmaz çelik ile düşük karbonlu çelik malzemelerin MIG kaynak yöntemiyle birleştirmesi sonucunda yapılan sertlik ölçüm testlerinde en yüksek sertliğin kaynak metalinde ölçüldüğünü tespit etmişlerdir.

Kılınçer ve ark., (2008), daha önce yapmış oldukları çalışmada, AISI 409 ve Ç1010 çeliğini östenitik elektrot kullanarak MIG kaynak yöntemi ile birleştirilmesi ve mekanik özelliklerini ele aldıklarında, tane irileşmesinin ısının tesiri altında kalan bölgede meydana geldiğini tespit etmişlerdir.

Çevik (2013), daha yapmış olduğu örtülü elektrot ark kaynağı ve MIG kaynağında akım şiddetinin kaynak nüfuziyetine etkisinin incelenmesi çalışmasında düşük akım şiddetlerinde nüfuziyetin azaldığını tespit etmiştir.

Özşahin ve ark., (2023), yapmış oldukları çalışmalarında, paslanmaz çeliklerin lazer kaynak yöntemi ile birleştirmesi neticesinde lazer geliş açısı artmasına paralel olarak kaynak dikiş genişliği de arttığını tespit etmişlerdir.

Taşkın ve ark., (2009), daha önce ele alıp inceledikleri AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik levhaları kaynak yöntemlerinden olan lazer kaynağı ile birleştirip malzemenin mekanik ve mikro yapılarını incelediklerinde, dubleks paslanmaz çelik kaynak metali ve ısı tesiri altındaki bölgenin ferrit lehine değiştiğini tespit etmişlerdir.

Köse ve ark., (2016), genellikle otomotiv sektöründe kullanılan DP1000 malzemeleri RSW ve uzaktan lazer kaynağı ile birleştirme yaparak sertlik ve çekme mukavemetlerini değerlendirmişlerdir. Analiz sonuçlarına göre kaynaklı numunelerde %30'luk mukavemet kaybını tespit etmişlerdir.

Köse ve ark., (2019), yapmış oldukları çalışmalarında, Ti6Al4V titanyum alaşımlarının Nd: YAG kaynak yöntemlerinden olan lazer kaynağı ile birleştirmesi üzerine kaynak öncesi ve kaynak sonrası ısıtma işlem uygulaması neticesinde sertlik ve çekme mukavemetleri yaşlandırma uygulanmayan numunelerde artış gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Çakmakkaya ve ark., (2020), daha önce yapmış oldukları çalışmalarında, ST 622 ve DP600 lazer kaynağı ile birleştirmeleri neticesinde mekanik ve mikroyapılarını incelediklerinde, lazer gücünün artmasına paralel olarak kaynak mukavemetinin ve kaynak nüfuziyetinin de arttığını tespit etmişlerdir.

Zambon ve ark., (2006), daha önceki çalışmalarında, paslanmaz çelik malzemelerin lazer kaynağı ile birleştirilmesinden sonra mikro yapılarını incelediklerinde, ITAB bölgesinde sertlik değerlerinin azaldığını ve kaynak hızının artmasıyla sertlik değerlerinin azaldığını tespit etmişlerdir.

Shah ve ark., (2018), önceki çalışmalarında, AISI 304 paslanmaz çeliğin kaynak yöntemlerinden olan lazer kaynağı ile birleştirilmesi neticesinde kaynak bölgesindeki sıcaklık hız alanının genişliği ve yayılım hacmini incelemişlerdir. Katılma ilerledikçe yayılım bölgesi ara yüzündeki alanın sıcaklık gradyanının azaldığını tespit etmişlerdir.

Soltani ve ark., (2018), daha önceki çalışmalarında, AISI 304L –AISI 316L paslanmaz çelik malzemeleri lazer kaynağı ile birleştirip bağlantıları incelemişlerdir. Yapılan gözlem ve deneyler sonucunda, TIG kaynağında kaynak derinliğinin lazer kaynak yöntemine göre daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir.

Çelen (2006), yapmış olduğu çalışmada, 304 östenik paslanmaz çeliğin lazer kaynağı ile birleştirip kaynağın dayanım ve korozyon özelliklerini incelediğinde darbe süresi artıkça çekme dayanımının da arttığını tespit etmiştir.

Yapılan literatür taraması sonucunda, bu tez çalışması kapsamında yapılacak olan kaynak işlemleri için kullanılacak kaynak teknolojilerinin ve kaynak parametrelerinin oldukça önemli olduğu ve dikkatlice belirlenmesi gerektiği anlaşılmıştır. Ayrıca, görece oldukça yeni bir teknoloji olan Lazer kaynağının, doğalgaz borularının iç kısmına kök kaynağının taşmaması ve genellikle kök kısmında meydana gelen kaynak kusurlarının en aza indirilmesi amacıyla bu teknolojinin kullanılmasının olumlu etkilerinin olabileceği anlaşılmıştır. Bu kapsamda, bu tez çalışmasında, MIG, TIG ve Lazer kaynak teknolojileri kullanılarak API 5L X60 kalitesindeki çelik numuneler, maliyet-etkin çözümlerin elde edilmesi amacıyla günümüzde önemi daha da artan ve imalat endüstrilerinde kullanımı hızla artmakta olan optimizasyon yöntemlerinden de faydalanılarak birleştirilmişlerdir. Böylelikle, daha az deneyle istenilen sonuçlara ulaşılmış olup, çalışma kapsamında ayrıca, tahribatlı ve tahribatsız mekanik testler yapılmış ve kaynaklı bağlantılardan edinilen numunelerin

mikroyapılarının incelenmesi amacıyla farklı görüntüleme ve analiz cihazlarından faydalanılarak karşılaştırmalar ve elde edilen sonuçların sebepleri araştırılmıştır.



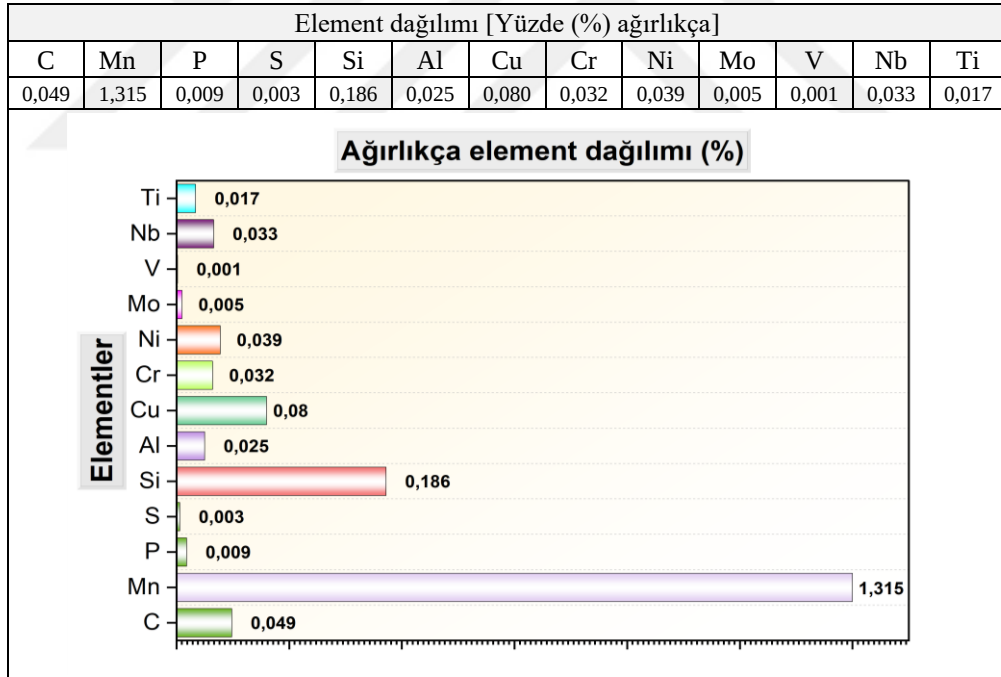
3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında, API 5L X60 kalitesindeki çelik plakalar, farklı kaynak parametrelerinde, Lazer, MIG ve TIG kaynak yöntemleriyle birleştirilmiştir. Yapılan kaynaklı birleştirmelerden sonra kaynaklı bağlantıların tahribatsız muayene sonuçları, mekanik test sonuçları, mikro yapıları ve kaynak işlemlerinin etkileri incelenmiştir.

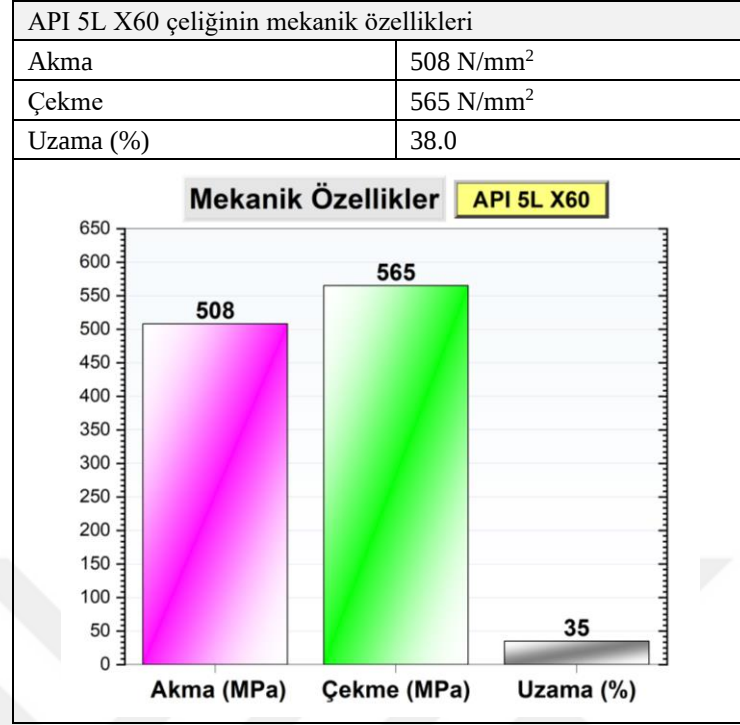
3.1. Malzeme

Bu deneysel çalışmada, doğal gaz boru hatlarında kullanılmak üzere üretilen API 5L X60 kalitesinde ve 6.25 mm kalınlığındaki çelik plakalar kullanılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan API 5L X60 kalitesine sahip çelik malzemeye ait yüzde ağırlıkça element dağılımı Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

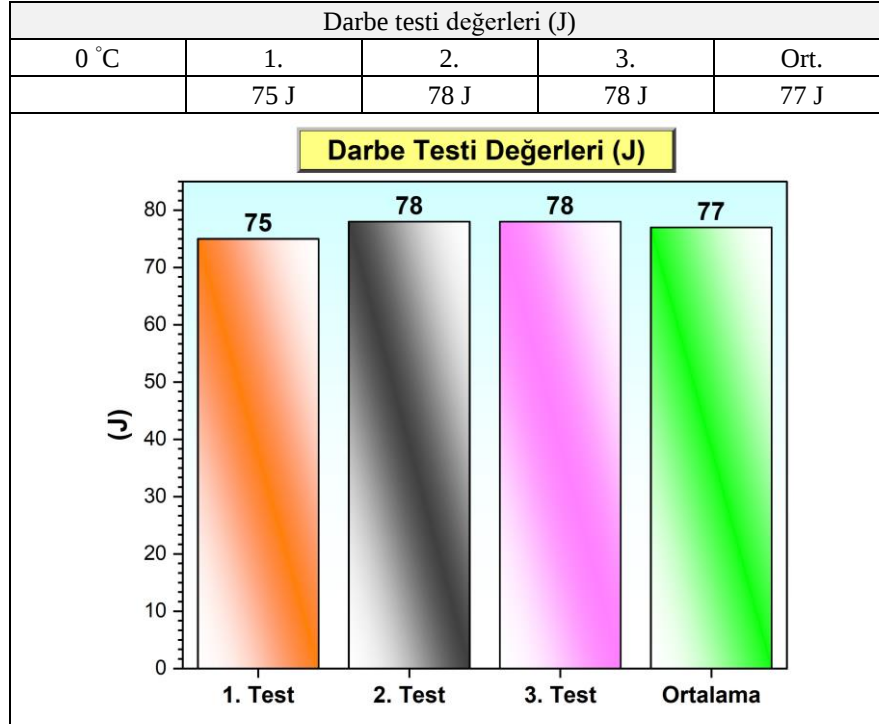
Çizelge 3.1. API 5L X60 çeliğinin yüzde ağırlıkça element dağılımı



Bu tez çalışmasında kullanılan API 5L X60 çeliğinin mekanik özellikleri ise Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. API 5L X60 çeliğinin mekanik özellikleri

Çalışmada kullanılan API 5L X60 çelik malzemeye ait darbe testi değerleri ise Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. API 5L X60 çeliğinin darbe testi değerleri

3.2. Deney malzemelerinin hazırlanması

Öncelikle, API 5L X60 kalitesindeki boruların imal edilmesi amacıyla rulo şeklinde temin edinilen malzemeden, Ajan marka CNC Plazma Oxy kesme makinesi yardımıyla 530 mm x 530 mm boyutlarında ana malzeme (çalışmada kullanılması için) kesilerek deney numunelerinin kesimi için hazır hale getirilmiştir. Deney malzemesi olarak kullanılacak olan rulo ve boru şeklindeki iş parçasının görüntüleri Şekil 3.1. a ve b’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Kaynak edilecek malzemenin ilk halleri (a,b)

530 mm x 530 mm boyutlarında kesilerek hazırlanan API 5L X60 kalitesindeki ana malzeme daha sonra Platine marka pres makinası ile düz bir plaka haline getirilmiştir. API 5L X60 malzemenin doğrultma işlemi için kullanılan Platine marka hidrolik doğrultma presi makinesine ait teknik bilgiler Çizelge 3.4’te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Hidrolik doğrultma presi makinesinin teknik özellikleri

Model	HSPS 100	HSPS 200	HSPS 300	HSPS 400
Kapasite (Ton)	100	200	300	400
Tabla Ölçüsü	1000x2000	1000x2500	1500x3000	1500x3500
Strok (mm)	400	400	400	400
İş Alma Boyu (mm)	600	600	600	600
Motor Gücü (Kw)	4	7,5	15	18
İniş Hızı (mm/s)	7	7	9	9
Dönüş Hızı (mm/s)	13	10	17	19

Platine marka hidrolik doğrultma presi makinası ve bu tez çalışmasında kullanılan malzemenin plaka haline getirilmesi Şekil 3.2 a ve b’de gösterilmiştir.



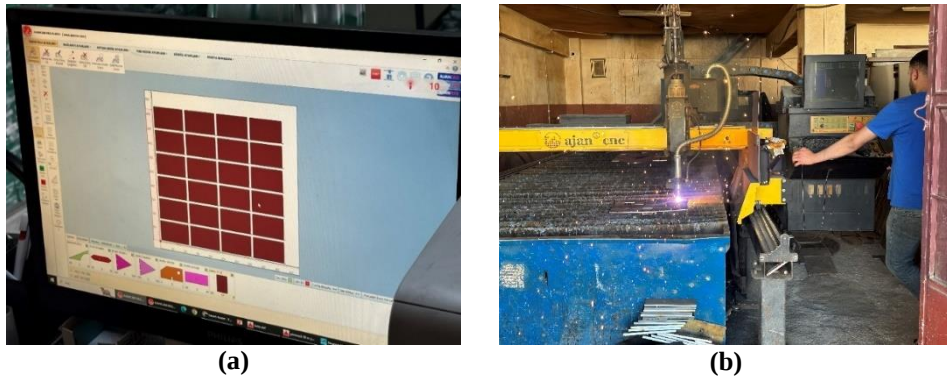
Şekil 3.2. (a) Doğrultma pres makinası, (b) malzemenin plaka haline getirilmesi

530 mm x 530 mm boyutlarında olan API 5L X60 kalitesindeki malzememiz 100 mm x 60 mm boyutlarında CNC plazma makinasıyla kesimi yapılmıştır. API 5L X60 kalitesindeki çelik plakanın kesilmesi işleminde kullanılan Ajan marka CNC plazma oxy kesme makinesine ait teknik bilgiler Çizelge 3.5’te verilmiştir.

Çizelge 3.5. Ajan CNC plazma oxy kesme makinesinin teknik özellikleri

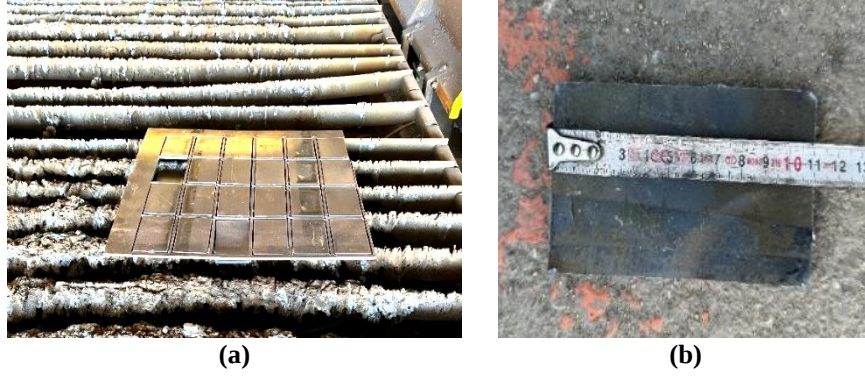
Makine Adı	CNC Plazma Oxy Kesme Makinası
Makine Modeli	2000*6000
Seri Numarası	PP13057 Otomatik
Üretim Yılı	2013
Güç	4 KW
Giriş Voltajı	AC 380/3PH/ HZ
Max. Giriş Akımı	6 AMP.
Ağırlık	500 KG

Kesim öncesi boyutlandırma çizimi ve Ajan CNC Plazma Oxy Kesme Makinası Şekil 3.3 a ve b’de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. (a) Kesim öncesi boyutlandırma, (b) CNC plazma kesme makinası ile kesme işlemi

Kesim sonrası malzemenin toplu görünümü ve kesim sonrası tekli görüntüsü ise Şekil 3.4 a ve b’de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. (a) Kesim sonrası toplu görünüm (b) kesim sonrası bir numunenin görüntüsü

100 mm x 60 mm boyutlarında API 5L X60 kalitesindeki malzememiz kaynak işlemi öncesinde her bir ağza 30° açıyla freze makinasıyla kaynak ağzı açılarak kaynak işlemi öncesi numune hazır hale getirilmiştir. API 5L X60 kalitesindeki numuneler için kaynak ağzı açılması işleminde kullanılan Jetco marka freze makinasına ait teknik bilgiler Çizelge 3.6’da gösterilmiştir.

Çizelge 3.6. Jetco marka freze makinesinin teknik özellikleri

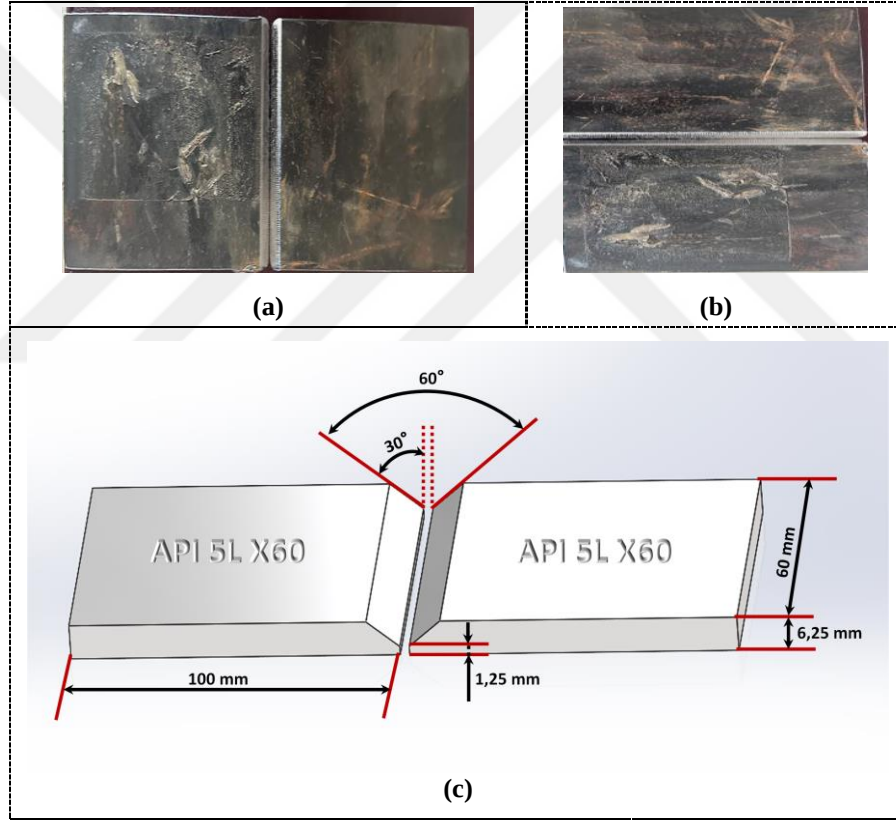
Kılavuz Çekme Kapasitesi	25/M12 mm
Alın Tarama Kapasitesi	16 mm
Yüzey Tarama Kapasitesi	50 mm
X Eksenli Doğrusal Hareketi	400 mm
Y Eksenli Enine Hareketi	145 mm
Sütun Genişliği	230 mm
Tabla Ölçüleri	550 x 160 mm
T-Kanal Ölçüsü	12 mm
Ana Motor Gücü	1000 Watt
Ölçüler	760 x 720 x 930 mm
Ağırlık	165 Kg

Çalışma kapsamında kullanılan freze cihazı ve kaynak ağzı açılması işlemi Şekil 3.5 a ve b’de gösterilmiştir.



Şekil 3.5. (a) Freze cihazı görüntüsü, (b) kaynak ağzı açılması işlemi

Çalışmada kullanılan numunelerin gerçek ve 3 boyutlu (3D) resimleri Şekil 3.6 a, b ve c 'de gösterilmiştir.



Şekil 3.6. (a ve b) Kaynak ağzı açılan numunelerin görüntüleri ve (c) 3D ölçeklendirilmiş resmi

3.3. Deney malzemelerinin kaynak edilmesi

Freze makinesi yardımıyla 100 mm x 60 mm boyutlarındaki API 5L X60 kalitesindeki malzemelerin kaynak ağızları açıldıktan sonra kaynak işlemleri safhasına geçilmiştir. Tüm kaynak işlemleri, kaynak bağlantılarının en yüksek kalitede olması amacıyla, API 1104 standartlı sertifikaya sahip uzman kaynakçı tarafından yapılmıştır.

Kaynak işlemlerinin yapılabilmesi için uygulanan parametreler yoğun literatür incelemesi sonucunda belirlenmiş olup literatürde bulunan değerlerden ise özgün bir çalışma olması için üst ve alt limitlerin arasında ve farklı değerlerde uygulanmıştır. Ayrıca, kaynak işlemlerinin sağlıklı bir şekilde yapılması amacıyla ise tüm yüzeyler kir ve benzeri olumsuzluklardan mümkün olduğunca temizlenmiştir.

Deneyisel çalışma kapsamında belirlenen numunelerin lazer kaynağı için Raycus marka fiber lazer kaynak cihazı kullanılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan lazer kaynak cihazı Şekil 3.7 a ve b’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. (a) ve (b) lazer kaynak makinası gösterimi

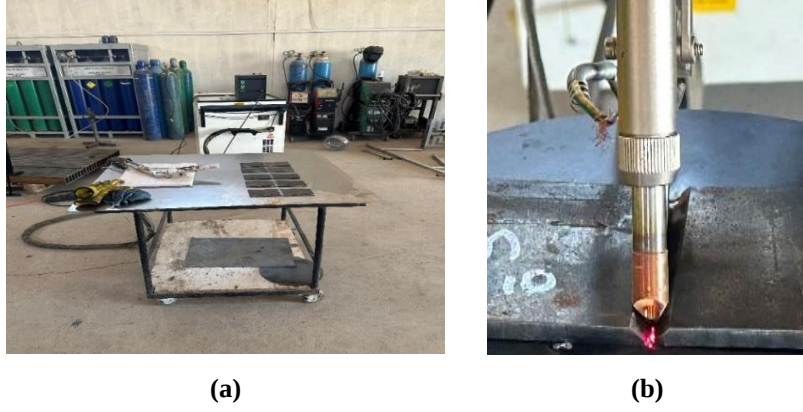
Çalışma kapsamında kullanılan Raycus marka fiber lazer kaynak cihazına ait teknik bilgiler Çizelge 3.7’de detaylı olarak verilmiştir.

Çizelge 3.7. Lazer kaynak makinasının teknik özellikleri

Lazer Ünite Markası	Raycus
Lazer Gücü	1500 W – 2000 W
Çıkış Gücü	10-100 (%)
Lazer Dalga Boyu	1080 nm
Torç Uzunluğu	8 m
Güç Ünitesi Çalışma Voltajı	1x230 V 50-60 hz Monofaze
Max. Güç tüketimi	1000W- 6000W
Ağırlık	220 Kg

Lazer kaynak makinesinin parametreleri; 2000W lazer gücü, 100 mm/dk kaynak hızı ve dikey konuma göre yaklaşık olarak 10-15° eğimli olarak belirlenmiştir. Çalışma

kapsamında kullanılan lazer kaynak cihazı ile işlem öncesi ve kaynak işlemi sırasındaki görüntüsü Şekil 3.8 a ve b’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. (a) Lazer kaynak cihazı ve (b) kaynak işlemi sırasındaki görüntüsü

Lazer kaynak işleminden sonra bazı numunelerin resimleri Şekil 3.9.’da verilmiştir.



Şekil 3.9. Lazer kaynak sonrası bazı numunelerin görüntüleri

Bazı numunelerin kök kaynakları lazer kaynağı ile birleştirme işlemleri tamamlandıktan sonra, lazer kaynak edilmiş ve edilmemiş bazı (belirlenen) numunelere MIG kaynak cihazı ile birleştirilmeye devam edilmiştir. Çalışma kapsamında, MIG kaynağı için kullanılan Magmaweld marka RS 350 MK MIG kaynak cihazı ve kaynak işlemi için kullanılan dolgu teli Şekil 3.10 a ve b’de gösterilmiştir. Çalışmada kullanılan MIG ve TIG kaynakları için ER70S-6 (AWS A5.18) dolgu telleri kullanılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 3.10. (a) MIG kaynak cihazı, (b) kaynak için kullanılan tel

Magmaweld marka RS 350 MK MIG kaynak makinesine ait teknik bilgiler Çizelge 3.8’de verilmiştir.

Çizelge 3.8. Magmaweld RS 350 MK MIG kaynak makinesinin teknik özellikleri

Şebeke Gerilimi(3Faz)	400V
Şebekeden Çekilen Güç	17.3 (%40) KVA
Kaynak Akım Ayarı	60-350 A
Boyutları	876*505*939 mm
Ağırlık	120 KG
Koruma Sınıfı	IP21
Kaynak Tel Çapı	0.60-1.20 mm
Tel Sürme Hızı	1-21.5 m/dk
Makara Kapasitesi	20 Kg

Kaynak bağlantıları için uygulanan kök lazer kaynağının, MIG ve TIG kaynaklı bağlantılar üzerindeki etkilerinin hassas bir şekilde belirlenmesi amacıyla Taguchi optimizasyon yönteminden faydalanılmıştır. Taguchi optimizasyon yöntemi, az sayıda deneyle maliyet-etkin sonuçların elde edilmesi için imalat endüstrilerinde sıklıkla kullanılan optimizasyon yöntemlerindendir (Taguchi, 1987). Bu çalışma kapsamında mekanik testlerde yapıldığından, kaynaklı bağlantıların dayanımının en yüksek olması amacıyla “En büyüğü en iyidir” yaklaşımı benimsenmiştir. Bu amaç doğrultusunda aşağıdaki eşitlikten (1) faydalanılmıştır (Taguchi, 1987; Montgomery, 2017).

“En büyüğü en iyidir”:

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (2.1)$$

Bu eşitlikte, n: gözlem sayısını, y_i : i'inci gözlem sayısını ve S/N: Sinyal gürültü oranını ifade etmektedir. Bu tez çalışmasında, en uygun Taguchi ortogonal deney tasarımı kullanılarak MIG, TIG, MIG+Lazer ve TIG+Lazer kaynaklarının parametreleri belirlenmiştir. Çalışma kapsamında, Taguchi ortogonal deney düzeneği için parametre ve seviyeler Çizelge 3.9’da verilmiştir.

Çizelge 3.9. Taguchi ortogonal deney düzeneği için parametre ve seviyeler

	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
Kaynak Teknolojisi	MIG	TIG	MIG+Lazer	TIG+Lazer
Akım (A)	110	120	-	-
Voltaj (V)	10	15	-	-

Belirlenen numunelere, MIG ve MIG+Lazer kaynak işlemlerinin yapılması için Taguchi ortogonal deney düzeneğine göre kaynak parametreleri Çizelge 3.10’da verilmiştir.

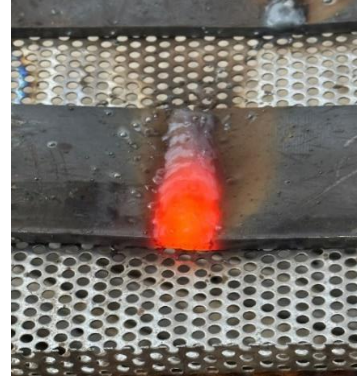
Çizelge 3.10. MIG ve MIG+Lazer kaynağının parametreleri

Deney no	Kaynak ağzı açısı (°)	Kaynak teknolojisi	Akım (A)	Voltaj (V)	Gaz akış hızı (kg/saat)
1	60	MIG	110	10	25
2	60	MIG	120	15	25
3	60	MIG+Lazer	110	15	25
4	60	MIG+Lazer	120	10	25

MIG kaynağı ile birleştirilen malzemelerin kaynak işlemi esnasındaki ve sonrasındaki resimleri Şekil 3.11 a ve b’de gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.11. (a) MIG kaynak işlemi ve (b) kaynak işlemi sonrasındaki resimleri

MIG kaynak işleminden sonra numunenin arka görüntüsü ve kaynak sonrası numunelerin üstten görüntüleri Şekil 3.12 a ve b’de gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.12. MIG kaynağı sonrası bağlantıların (a) arkadan ve (b) üstten resimleri

Bu tez çalışmasında ayrıca TIG kaynağı da kullanılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan TIG kaynak cihazının çekilen resimleri Şekil 3.13 a ve b’de gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.13. TIG kaynak makinesinin resimleri

TIG kaynağı için kullanılan INV AC-DC TIG 320 AS marka kaynak makinesine ait teknik bilgiler Çizelge 3.11’de verilmiştir.

Çizelge 3.11. INV AC-DC TIG 320 AS kaynak makinesinin teknik bilgileri

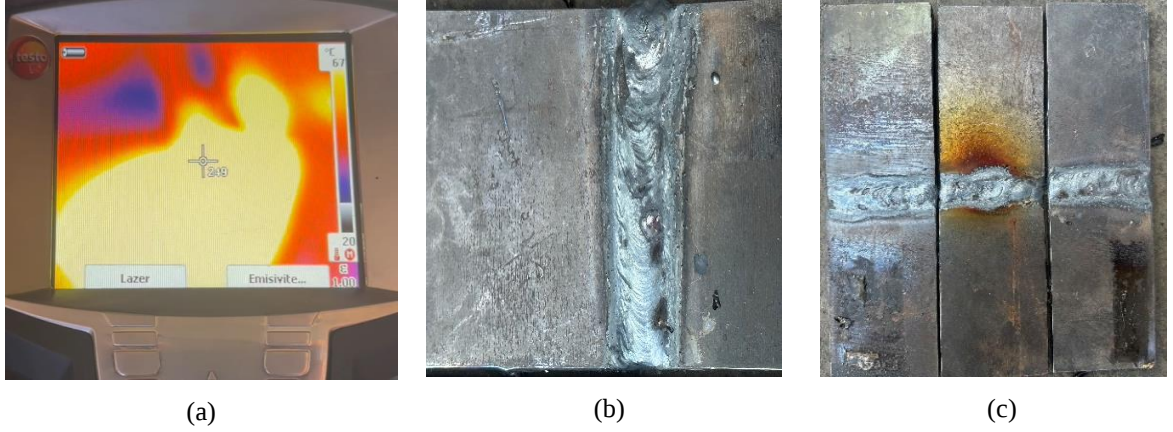
Şebeke Gerilimi	380V/50Hz
Max. Giriş Gücü	12 KVA
Açık Devre Voltajı	66 V
Akım Ayar Sahası	5-320A
Koruma Sınıfı	IP 21 S
Boyutlar	310x630x590mm
Ağırlık	45 Kg
Elektrot Çapı	1.6-5 mm
Torç Kablosu	4 mt

Taguchi ortogonal deney tasarımı kullanılarak belirlenen TIG ve TIG+Lazer kaynak parametreleri Çizelge 3.12’de verilmiştir.

Çizelge 3.12. TIG ve TIG+Lazer kaynağının parametreleri

Deney no	Kaynak ağız açısı (°)	Kaynak teknolojisi	Akım (A)	Voltaj (V)	Gaz akış hızı (kg/saat)
1	60	TIG	110	10	25
2	60	TIG	120	15	25
3	60	TIG+Lazer	110	15	25
4	60	TIG+Lazer	120	10	25

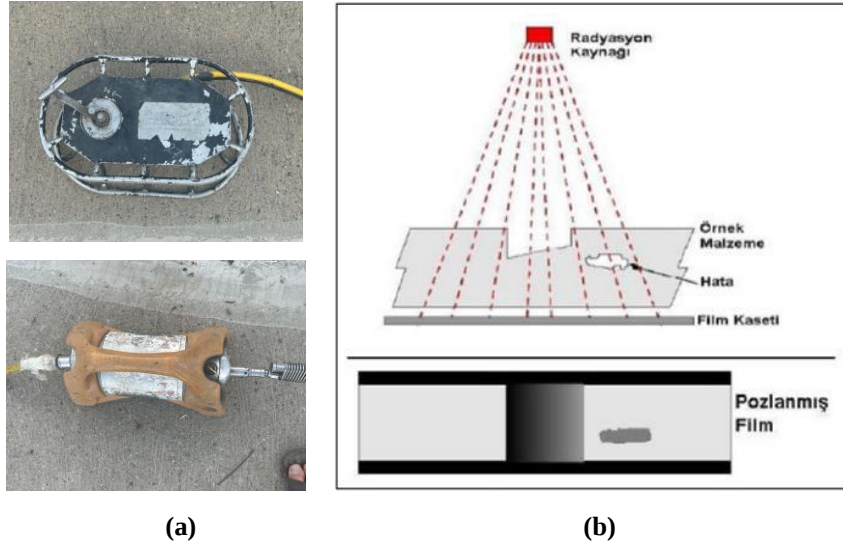
TIG ve MIG kaynak işlemleri esnasında, sıcaklık ölçümü için kullanılan Testo marka termal kamera ve kaynak işlemi sonrasındaki kaynaklı bağlantıların resimleri Şekil 3.14 a, b ve c’de verilmiştir.



Şekil 3.14. (a) TIG kaynağı sırasında ölçülen sıcaklık değeri ve (b ve c) numunelerin görüntüleri

3.4. Radyografi testi

Kaynak işlemleri gerçekleştirilen API 5L X60 malzemelerinden oluşan kaynaklı bağlantılara, tahribatlı mekanik testler öncesinde, kaynak bağlantılarının kalitesini belirlemek amacıyla, tahribatsız muayene yöntemlerinden olan radyografik testler uygulanmıştır. Yapılan Radyografi testleri, EN 473 standardına göre radyografik test seviye 2 sertifikasına sahip nitelikli bir personel tarafından yapılmıştır. Radyografik test cihazı ve X ışınıyla radyografik muayenenin şematik gösterimi Şekil 3.15 a ve b’de verilmiştir.

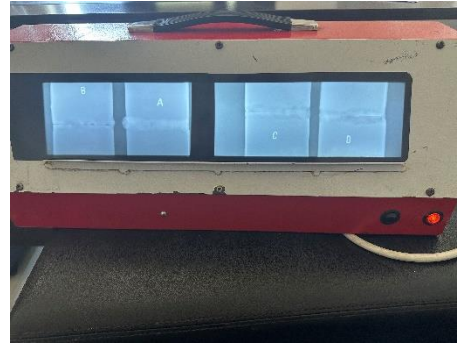


Şekil 3.15. (a) Radyografik test cihazı, (b) radyografik muayenenin şematik gösterimi (Sezgin, 2019)

Radyografik testlerden sonra, radyografik test cihazı ile çekilen kaynaklı bağlantıların filmlerinin görüntülenmesi amacıyla kullanılan Endüstriyel LED Film Viewer Ntd film görüntüleme cihazı Şekil 3.16 a ve b’de gösterilmiştir.



(a)



(b)

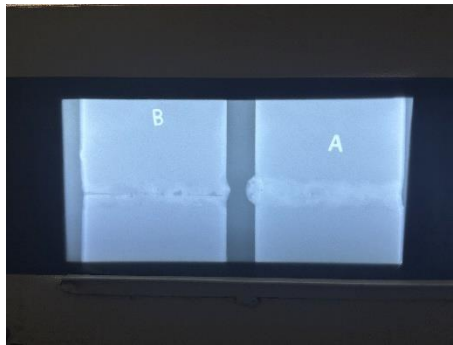
Şekil 3.16. (a) ve (b) Radyografik Muayene Cihazı

Tahribatsız muayene yöntemlerinden radyografik testlerin çekilen filmlerinin görüntülenmesi için kullanılan Endüstriyel LED Film Viewer Ntd cihazına ait teknik bilgiler Çizelge 3.13'te verilmiştir.

Çizelge 3.13. Tahribatsız muayene cihazının teknik özellikleri

Marka -Model	FV – 2010 Plus Led Viewer
Max. Işıma	>130,000 Cd/m ² (408,200) Lux
Difüzyon Faktörü	0.95
Görüntüleme Penceresi Boyutu	400x100 mm
Yüzey Sıcaklık Artışı	<18°
Boyutları	600x80x160 mm
Ağırlık	4 Kg

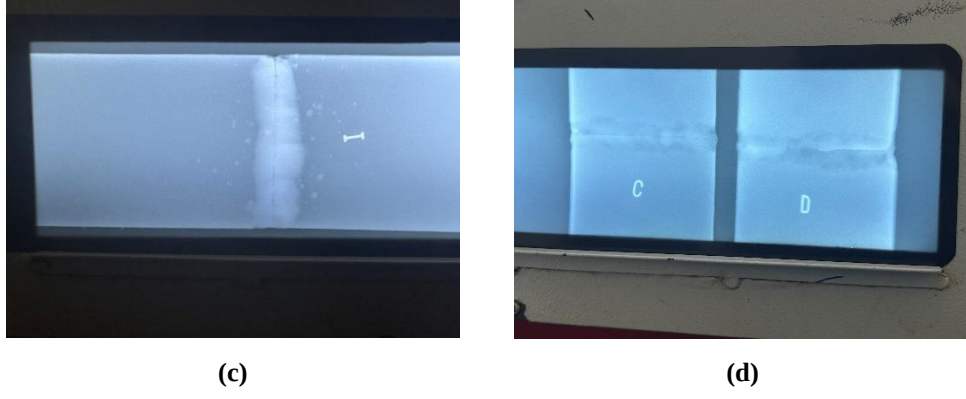
Kaynak işleminden sonra yapılan radyografik muayenelerin bazı sonuçları Şekil 3.17 a, b, c ve d' de filmler gösterilmiştir.



(a)



(b)



Şekil 3.17. Kaynaklı bağlantıların Muayene Filmleri

3.5. Çekme testi numunelerinin hazırlanması

Radyografik testlerden sonra kaynaklı numuneler, lazer kesim makinesi ile ASTM-E8/E8M standartlarına göre kesilerek çekme testleri için istenilen boyutlara getirilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan Lazer kesim cihazı ve kesim öncesi boyutlandırma çizimi Şekil 3.18 a ve b’de gösterilmiştir.



Şekil 3.18. (a) Lazer kesim makinesi, (b) kesim öncesi numune boyutlandırma çizimi

Bu tez çalışmasında ABP-FM 3015 marka Fiber Lazer Kesim Makinesi kullanılmıştır. Lazer kesim makinesine ait teknik bilgiler ise Çizelge 3.14’te verilmiştir.

Çizelge 3.14. ABP-FM 3015 Fiber lazer kesim makinesinin teknik özellikleri

Çalışma Alanı	3.000-1.500 mm
Yeniden Konumlandırma Doğruluk	+/-0.03 mm
Konumlandırma Hassaslığı	+/-0.02 mm
Maksimum Hareket Hızı	80 m/min
Lazer Gücü	500/1000/1500/2000W

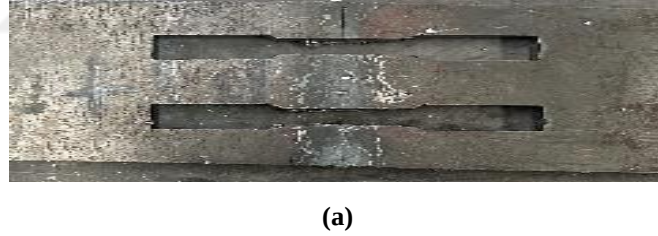
Çalışma Masası	Bıçak Masa
Maksimum Hızlanma	1 G

Lazer kesim işlemi ve malzemenin kesim sonrası görüntüleri Şekil 3.19 a ve b’de verilmiştir.



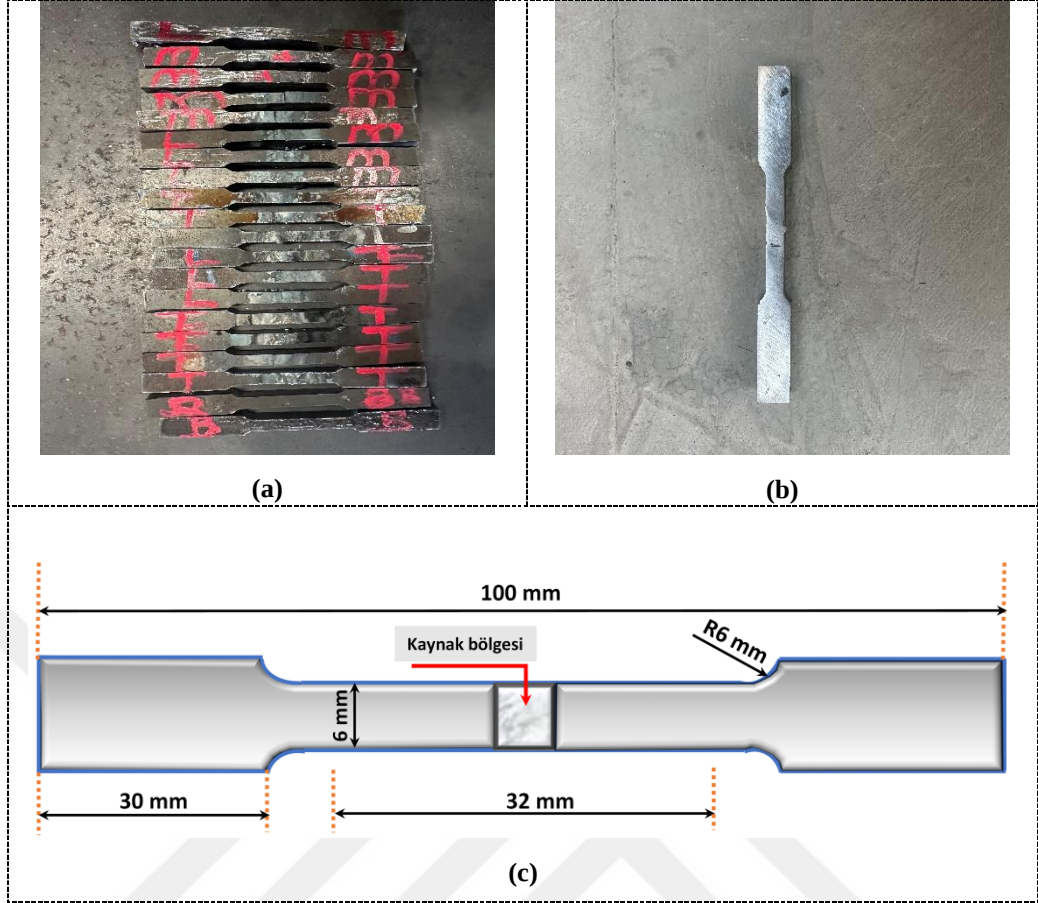
Şekil 3.19. (a) Lazer kesim işlemi, (b) kesim sonrası görüntü

Lazer cihazı ile kesim işlemi yapılan bir diğer farklı kaynak teknolojisi ile kaynaklı bağlantının görüntüsü Şekil 3.20’de gösterilmiştir.



Şekil 3.20. Lazer kesim sonrası kaynaklı bağlantının görüntüsü

ASTM standartlarına göre kesim işlemi yapılan kaynaklı bağlantıların her birinden ikişer adet numune çıkarılarak, ilgili numunenin çekme testlerinden elde edilen sonuçların ortalaması bulunmuştur. Lazer kesim işlemi sonucunda numunelerin toplu ve tekli resimleri ile çekme testi numunelerinin teknik resmi Şekil 3.21 a, b ve c’de verilmiştir.



Şekil 3.21. (a ve b) Çekme testi numunelerinin ve (c) teknik çiziminin resimleri

ASTM standartlarında hazırlanan çekme numuneleri, Batman Üniversitesi'nde bulunan Shimadzu marka çekme testi makinesi kullanılarak, %50 nem ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Çekme testleri, literatürdeki tavsiyeler dikkate alınarak 1 mm/dk hızlarında icra edilmiştir (Adin ve ark., 2022). Shimadzu marka test makinesi ve test esnasındaki resim Şekil 3.22'de verilmiştir.



Şekil 3.22. Shimadzu marka çekme testi makinesi

3.6. SEM-EDX cihazı ile görüntüleme ve analiz

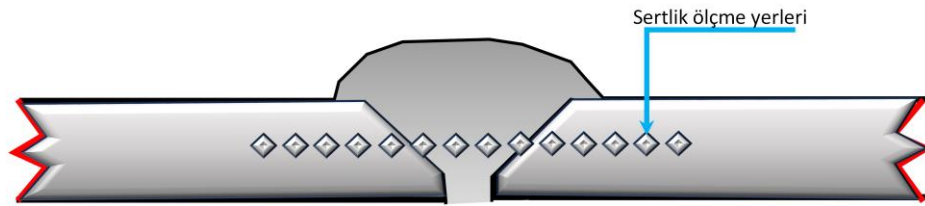
Bu tez çalışmasında, belirlenen kaynaklı numunelerin kırılma yüzeylerinin hem görüntülenmesi ve hem de analizi için Malatya İnönü Üniversitesinde bulunan Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağıtıcı X-ışını (EDX) işlemlerini yapma kapasitesine sahip olan cihaz kullanılmıştır. SEM-EDX ünitesinin markası/üretim yerleri: LEO-EVO 40/Cambridge-İngiltere ve EDX Ünitesi: Bruker-125 eV (Berlin-Almanya) olarak belirtilen bu cihazın resmi Şekil 3.23'te verilmiştir.



Şekil 3.23. SEM-EDX cihazı

3.7. Sertlik ölçümleri

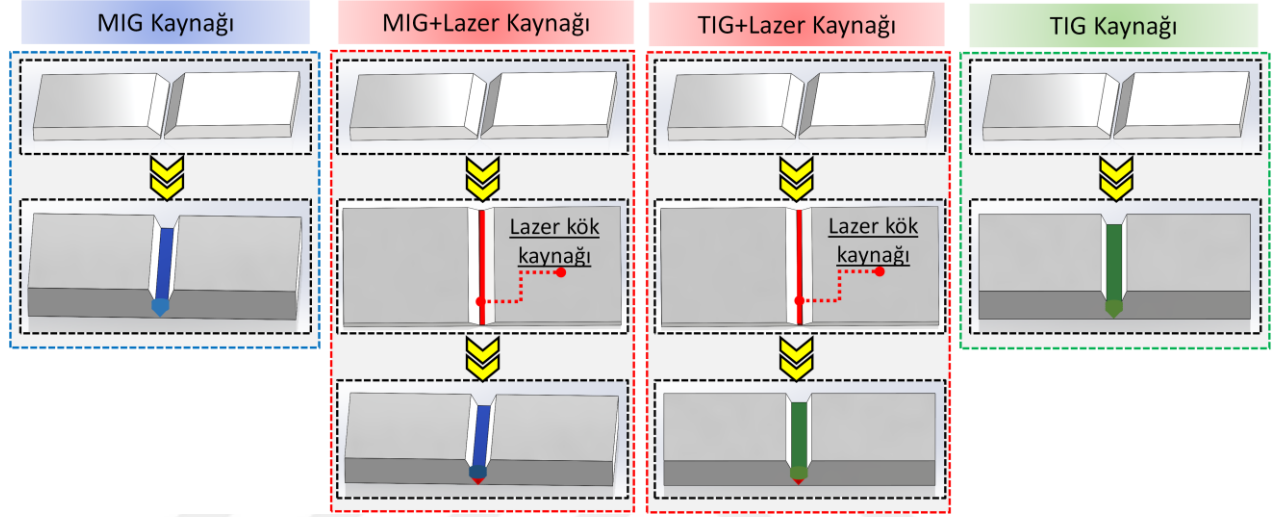
Çalışma kapsamında ayrıca, kaynaklı numunelerin bağlantı yerlerinin mikrosertlikleri Vickers sertlik yöntemi ile ölçüm yapabilen Zwick marka test cihazı kullanılarak ölçümler yapılmıştır. Kaynaklı bağlantılar üzerinde yapılan sertlik ölçümlerinin yapıldığı yerlerin gösterimi Şekil 3.24’te gösterilmiştir.



Şekil 3.24. Sertlik ölçümlerinin yapıldığı yerlerin gösterimi

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

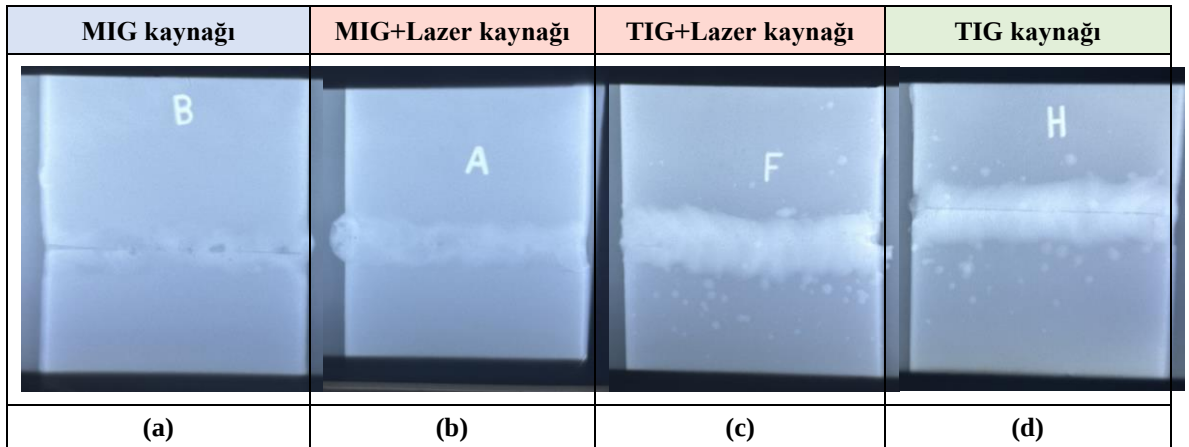
Bu tez çalışması kapsamında Şekil 4.1’de görüldüğü gibi, MIG kaynaklı, TIG kaynaklı, MIG+Lazer kaynaklı ve TIG+Lazer kaynaklı bağlantılar yukarıda belirtilen parametrelere göre kaynak edildikten sonra yapılan testlerin sonuçları ve değerlendirmeleri aşağıda alt bölümler halinde açıklanmıştır.



Şekil 4.1. MIG, TIG, MIG+Lazer ve TIG+Lazer kaynaklı bağlantıların 3D gösterimi

4.1. Tahribatsız inceleme (Radyografi testi) sonuçları

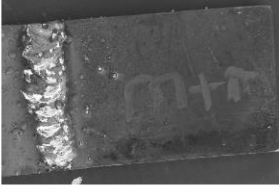
Bu çalışma kapsamında sertifikalı uzman personel tarafından radyografik görüntüleri çekilen MIG kaynaklı, TIG kaynaklı, MIG+Lazer kaynaklı ve TIG+Lazer kaynaklı bağlantıların bazı filmleri Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. (a) MIG, (b) MIG+Lazer, (c) TIG+Lazer ve (d) TIG kaynaklı bağlantıların radyografik filmleri

Bu tez çalışmasında, farklı kaynak teknolojileri ile kaynak yapılarak birleştirilen bağlantıların her birinin tek tek radyografik incelemeleri yapılarak API 1104 standartlarına uygunlukları tespit edilmeye çalışılmıştır. İncelemeler sonucunda ise; özellikle MIG ve TIG kaynaklı bağlantılarda, nüfuziyet eksikliği, gözenekli yapı ve alttan kesik kök gibi birçok yaygın kaynak bölgesi hatalarının olduğu görülmüştür (API, 2015). Bu hatalardan en belirgin olanı olan kök nüfuziyet eksiklikleri, Şekil 4.2 a ve d’de görüldüğü gibi MIG ve TIG kaynaklı bağlantılarda meydana gelmiştir. Ayrıca, Şekil 4.2’deki radyografi filmleri incelendiğinde, MIG+Lazer ve TIG+Lazer kaynaklı bağlantıların kaynak kalitelerinin çok daha iyi olduğu ve kök nüfuziyeti gibi hatalarının olmadığı görülebilmektedir. Ayrıca, farklı kaynak teknolojileri kullanılarak birleştirilen bağlantıların üstten ve alttan resimleri özellikle incelenmiştir. MIG, MIG+Lazer, TIG+Lazer ve TIG kaynaklı bağlantıların çekilen üstten ve alttan resimleri Şekil 4.3 a, b, c ve d’de verilmiştir. Üstten çekilen resimlere bakıldığında, TIG kaynaklı bağlantıların kaynak bölgesinin ve ısıdan etkilenen bölgenin daha geniş ve yüzey pürüzlülüğünün ise MIG kaynaklı bağlantılara göre daha iyi olduğu görülmüştür.

Altan çekilen resimlerin yapılan incelemeleri sonucunda, sadece MIG kaynaklı bağlantıların kaynak kalitesi ve çapaklarının sadece TIG kaynaklı bağlantılardan daha kötü olduğu görülmüştür. Diğer yandan, MIG+Lazer ve TIG+Lazer kaynaklı bağlantıların alttan resimleri incelendiğinde ise sadece MIG ve TIG kaynaklı bağlantılardan daha iyi olduğu anlaşılmıştır. İlaveten, MIG+Lazer ve TIG+Lazer kaynaklı bağlantıların alttan resimlerinde, kaynaklı bağlantıların daha kaliteli ve nüfuziyet eksiklerinin olmadıkları ve ayrıca kaynak yüzeyinin çapaklarının sadece MIG ve Sadece TIG kaynaklı bağlantılardan daha pürüzsüz oldukları görülmüştür.

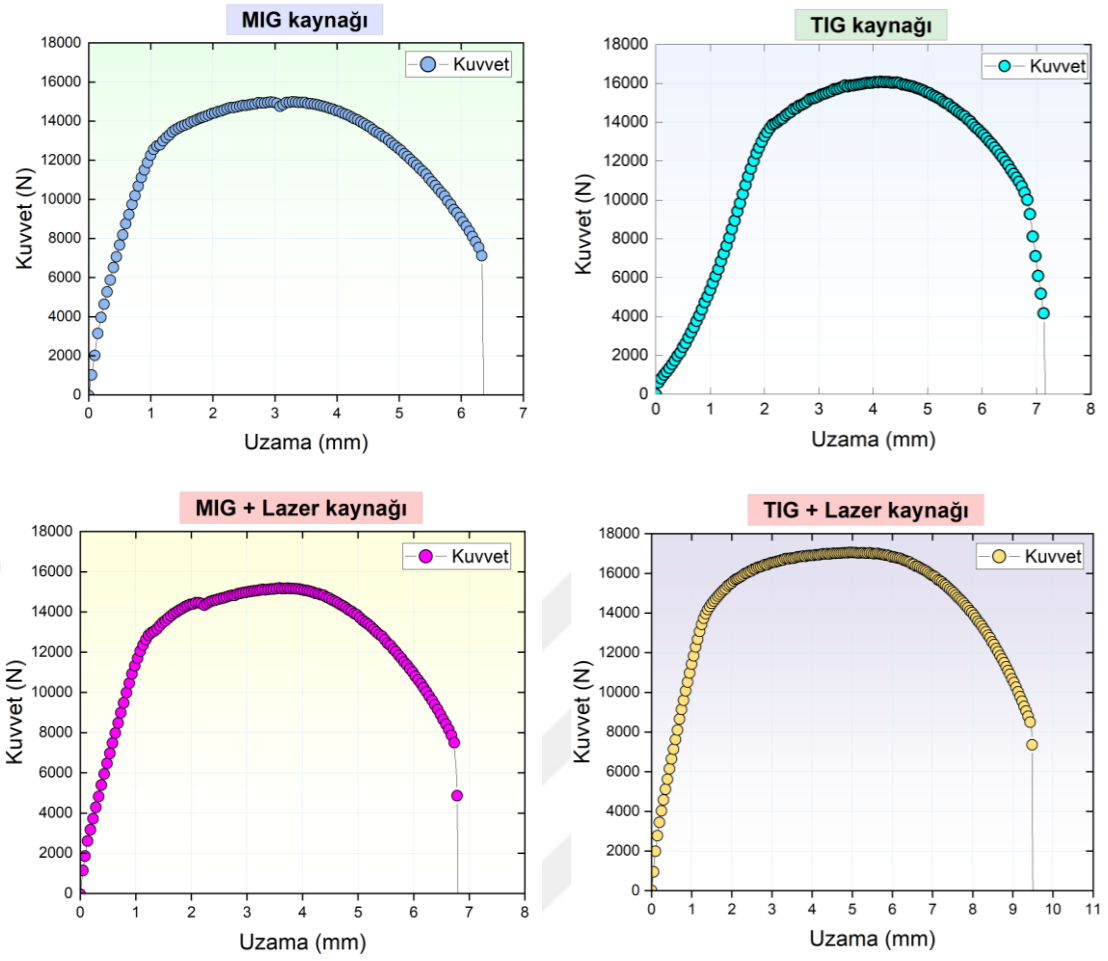
MIG kaynağı	MIG+Lazer kaynağı	TIG+Lazer kaynağı	TIG kaynağı
Üstten Görüntü	Üstten Görüntü	Üstten Görüntü	Üstten Görüntü
			
Altan görüntü	Altan görüntü	Altan görüntü	Altan görüntü
			
(a)	(b)	(c)	(d)

Şekil 4.3. (a) MIG, (b) MIG+Lazer, (c) TIG+Lazer ve (d) TIG kaynaklı bağlantıların üstten ve alttan resimleri

4.2. Çekme testi sonuçları

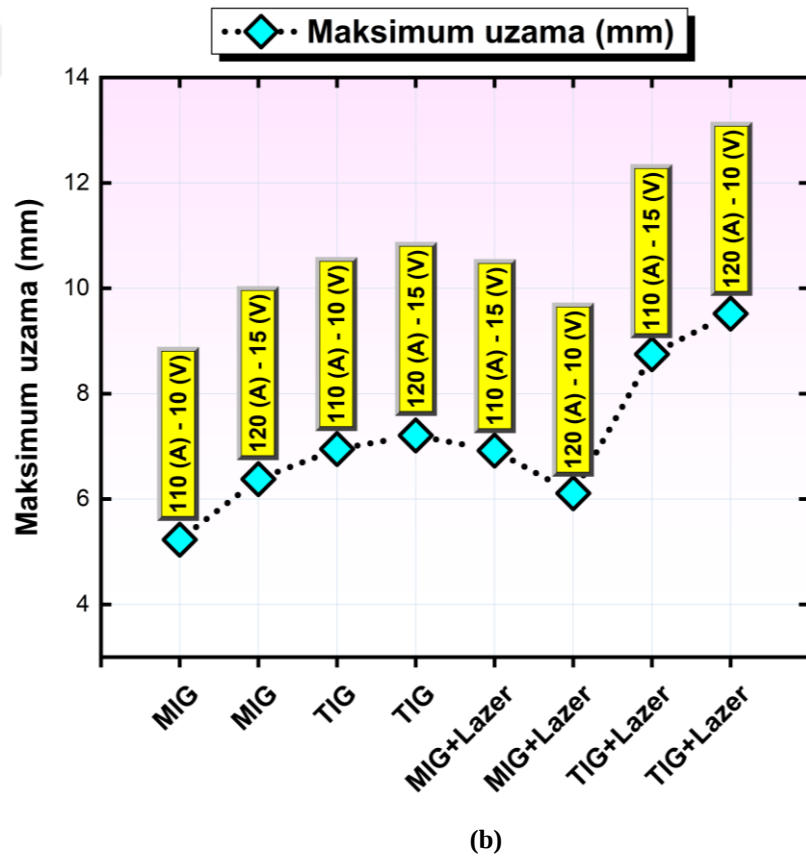
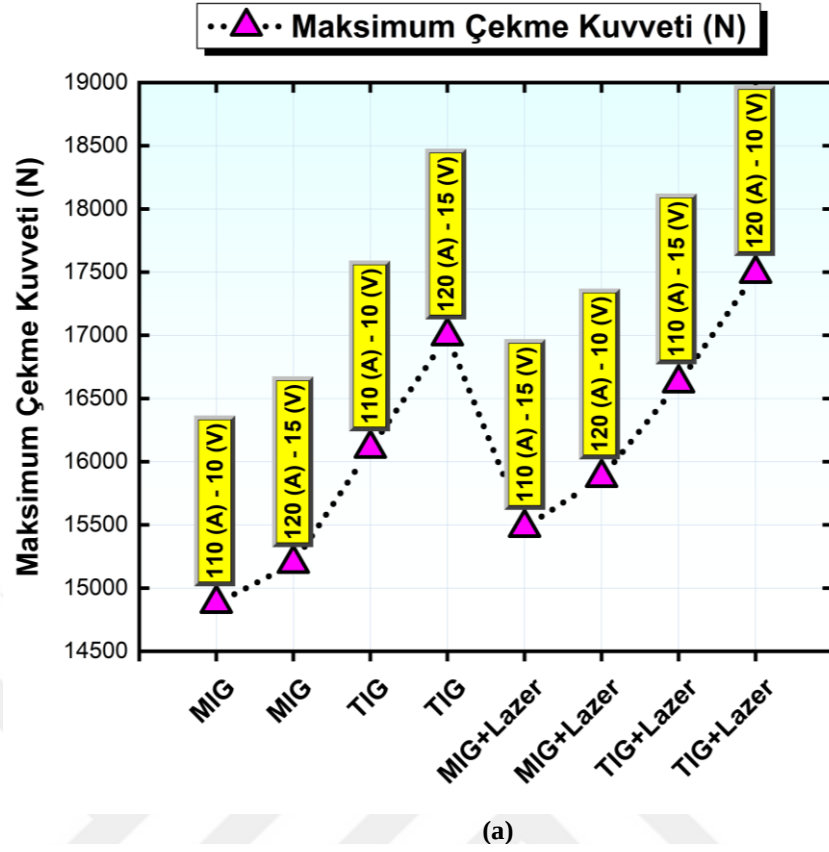
Çalışma kapsamında, radyografik ve kaynak yüzeyi incelemelerinden sonra kaynaklı numuneler, lazer kesim makinesi ile ASTM-E8/E8M standartlarına göre kesilerek çekme testleri için istenilen boyutlara getirilmiştir. ASTM standartlarına göre kesim işlemi yapılan kaynaklı bağlantıların her birinden ikişer adet numune çıkarılarak, ilgili numunenin çekme testlerinden elde edilen sonuçların ortalaması bulunmuştur.

Çekme testleri sonrasında, MIG, TIG, MIG+Lazer ve TIG+Lazer kaynaklı bağlantıların kuvvet-uzama diyagramlarının bazıları Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Şekil 4.4'te verilen grafikler incelendiğinde, kuvvet-uzama diyagramlarının oldukça benzer eğilimde olduğu anlaşılmaktadır. Bu grafikler arasındaki sonuç farklarının ise uygulanan farklı kaynak teknolojileri ve kaynak parametrelerinden kaynaklandığı görülebilmektedir.



Şekil 4.4. MIG, TIG, MIG+Lazer ve TIG+Lazer kaynaklı bağlantıların kuvvet-uzama diyagramları

Çalışma kapsamında, yapılan tüm çekme testleri sonucunda, kaynaklı bağlantıların maksimum çekme kuvvetleri ve maksimum uzama değerleri Şekil 4.5 a ve b’de verilmiştir.



Şekil 4.5. (a) maksimum çekme kuvvetleri ve (b) maksimum uzama değerleri

Şekil 4.5 a’da verilen maksimum çekme kuvvetleri incelendiğinde, MIG kaynağı ile kaynak yapılan bağlantıların maksimum çekme kuvvetlerinin TIG kaynağına göre daha düşük olduğu görülebilmektedir. Ayrıca, MIG ve TIG kaynakları ile yapılan bağlantıların maksimum çekme kuvvetlerinin, lazer kök kaynaklı bağlantıları göre daha düşük oldukları ve kaynak teknolojileri yönünden de MIG kaynaklı bağlantıların maksimum çekme kuvvetlerinin, MIG+Lazer kaynaklı bağlantılardan daha düşük olduğu ve ayrıca aynı durumun TIG ve TIG+Lazer kaynaklı bağlantılarda da benzer olduğu, test sonuçları kıyaslandığında da görülebilmektedir. İlâveten, farklı kaynak teknolojileri ile kaynaklı bağlantılardan elde edilen maksimum çekme kuvvetleri bir bütün olarak ele alındığında ise, kaynaklı bağlantıların dayanımı yönünden, küçükten büyüğe doğru sırasıyla, MIG kaynağı, TIG kaynağı, MIG+Lazer kaynağı ve TIG+Lazer kaynağı olduğu anlaşılmaktadır.

Çekme testleri sonucunda MIG ve MIG+Lazer kaynaklı bağlantılar karşılaştırıldığında, MIG kaynaklı bağlantılardan elde edilen maksimum çekme kuvvetinin 14878 N olduğu, MIG+Lazer kaynaklı bağlantılarda ise en yüksek maksimum çekme kuvvetinin 15875 N olduğu görülmüştür. MIG ve MIG+Lazer kaynaklı bağlantılardan elde edilen bu en yüksek sonuçlar karşılaştırıldığında, MIG+Lazer kaynaklı bağlantının maksimum çekme kuvvetinin MIG kaynaklı bağlantının maksimum çekme kuvvetinden %6,71 daha yüksek olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca, en düşük maksimum çekme kuvvetleri yönünden MIG ve MIG+Lazer kaynaklı bağlantılardan elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, yine, MIG+Lazer kaynaklı bağlantıdan elde edilen sonucun MIG kaynaklı bağlantıdan %4,03 daha yüksek olduğu görülmüştür.

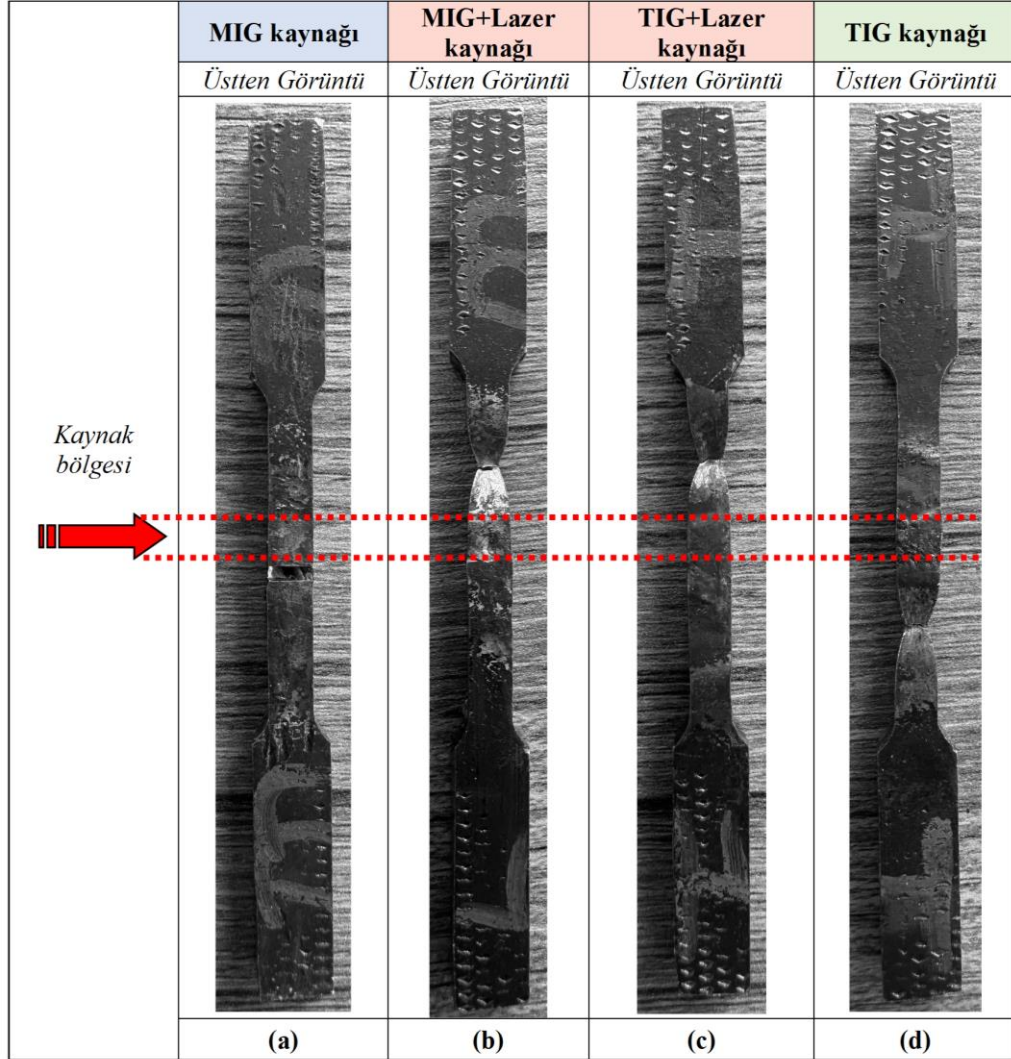
Çekme testleri sonucunda TIG ve TIG+Lazer kaynaklı bağlantılar karşılaştırıldığında, TIG kaynaklı bağlantılardan elde edilen en yüksek maksimum çekme kuvvetinin 16995N olduğu, TIG+Lazer kaynaklı bağlantılarda ise en yüksek maksimum çekme kuvvetinin 17489N olduğu görülmüştür. TIG ve TIG+Lazer kaynaklı bağlantılardan elde edilen bu en yüksek sonuçlar karşılaştırıldığında, TIG+Lazer kaynaklı bağlantının maksimum çekme kuvvetinin TIG kaynaklı bağlantının maksimum çekme kuvvetinden %2,91 daha yüksek olduğu anlaşılmıştır. İlâveten, en düşük maksimum çekme kuvvetleri yönünden TIG ve TIG+Lazer kaynaklı bağlantılardan elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, yine, TIG+Lazer kaynaklı bağlantıdan elde edilen sonucun TIG kaynaklı bağlantıdan %3,22 daha yüksek olduğu görülmüştür.

Diğer yandan, Şekil 4.5 b’de verilen maksimum uzama değerleri incelendiğinde, MIG kaynağı ile kaynak yapılan bağlantıların maksimum uzama değerlerinin TIG kaynağına göre daha düşük olduğu görülebilmektedir. Ayrıca, MIG ve TIG kaynakları ile yapılan bağlantıların maksimum uzama değerlerinin, lazer kök kaynaklı bağlantılara göre daha düşük oldukları ve kaynak teknolojileri yönünden de MIG kaynaklı bağlantıların maksimum uzama değerlerinin, MIG+Lazer kaynaklı bağlantılardan daha düşük olduğu ve ayrıca aynı durumun TIG ve TIG+Lazer kaynaklı bağlantılarda da benzer olduğu, testlerin sonuçları kıyaslandığında da görülebilmektedir. İlaveten, farklı kaynak teknolojileri ile kaynaklı bağlantılardan elde edilen maksimum uzama değerleri bir bütün olarak ele alındığında ise, kaynaklı bağlantıların uzaması yönünden, küçükten büyüğe doğru sırasıyla, MIG kaynağı, TIG kaynağı, MIG+Lazer kaynağı ve TIG+Lazer kaynağı olduğu anlaşılmaktadır.

Çekme testleri sonucunda MIG ve MIG+Lazer kaynaklı bağlantılar karşılaştırıldığında, MIG kaynaklı bağlantılardan elde edilen maksimum uzama değerinin 6,38 mm olduğu, MIG+Lazer kaynaklı bağlantılarda ise en yüksek maksimum uzama değerinin 6,92 mm olduğu görülmüştür. MIG ve MIG+Lazer kaynaklı bağlantılardan elde edilen bu en yüksek sonuçlar karşılaştırıldığında, MIG+Lazer kaynaklı bağlantının maksimum uzama değerinin MIG kaynaklı bağlantının maksimum uzama değerinden %8,47 daha yüksek olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca, en düşük maksimum uzama değeri yönünden MIG ve MIG+Lazer kaynaklı bağlantılardan elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, yine, MIG+Lazer kaynaklı bağlantıdan elde edilen sonucun MIG kaynaklı bağlantıdan %6,83 daha yüksek olduğu görülmüştür.

Çekme testleri sonucunda TIG ve TIG+Lazer kaynaklı bağlantılar karşılaştırıldığında ise, TIG kaynaklı bağlantılardan elde edilen en yüksek maksimum uzama değerinin 7,21 mm olduğu, TIG+Lazer kaynaklı bağlantılarda ise en yüksek maksimum uzama değerinin 9,52 mm olduğu görülmüştür. TIG ve TIG+Lazer kaynaklı bağlantılardan elde edilen bu en yüksek sonuçlar karşılaştırıldığında, TIG+Lazer kaynaklı bağlantının maksimum uzama değerinin TIG kaynaklı bağlantının maksimum uzama değerinden %32,03 daha yüksek olduğu anlaşılmıştır. İlaveten, en düşük maksimum uzama değerleri yönünden TIG ve TIG+Lazer kaynaklı bağlantılardan elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, yine, TIG+Lazer kaynaklı bağlantıdan elde edilen sonucun TIG kaynaklı bağlantıdan %25,89 daha yüksek olduğu görülmüştür.

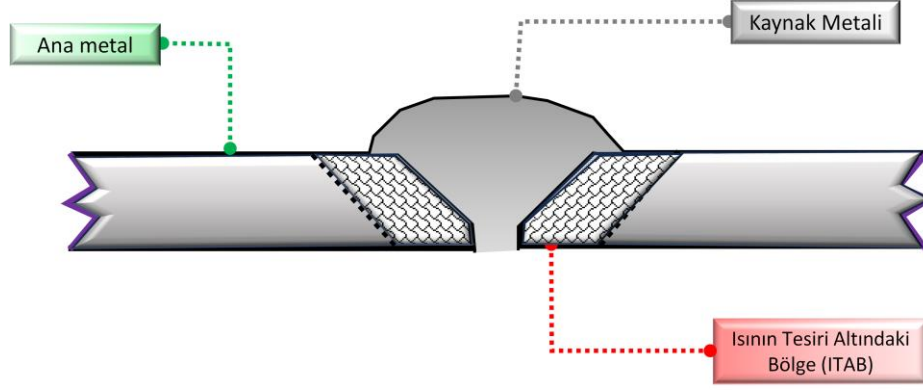
Elde edilen bu sonuçların daha iyi anlaşılması amacıyla Şekil 4.6'da, farklı kaynak teknolojileri ile kaynak yapılan bağlantıların bazılarının çekme testleri sonucundaki kopma görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.6. Kaynaklı bağlantıların çekme testleri sonrası üstten çekilmiş resimler

Şekil 4.5 a ve b'de verilen maksimum çekme kuvveti ve maksimum uzama değerleri ile Şekil 4.6'da verilen çekme testleri sonrasındaki kopma görüntülerinden anlaşıldığı gibi TIG, MIG+Lazer ve TIG+Lazer kaynaklı bağlantıların dayanımının daha iyi olduğu görülebilmektedir.

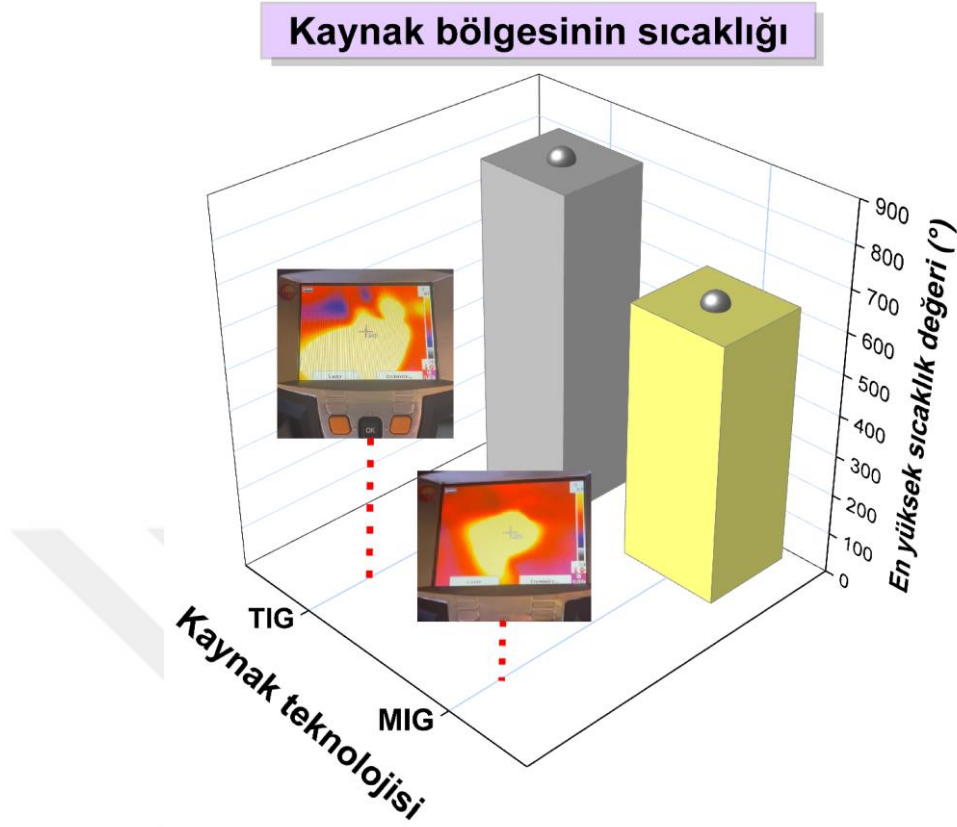
Farklı kaynak teknolojileri ile birleştirilen ana metallerin yapısı Şekil 4.7'de görüldüğü gibi 3 (üç) farklı bölgeden oluşmaktadır. Bu bölgeler sırasıyla ana metal, kaynak metal ve ısının tesiri altındaki bölge (ITAB) olarak ifade edilmektedir (Adin, 2024; Kalpakjian ve ark., 2013).



Şekil 4.7. Kaynaklı bağlantılarda bölgeler

Şekil 4.6’da verilen farklı kaynak teknolojileri ile kaynak yapılmış bağlantıların kopma bölgelerine bakıldığında, MIG kaynaklı bağlantının ITAB ile ana metal arasında ve TIG, MIG+Lazer ile TIG+Lazer kaynaklı bağlantıların ise kaynak bölgesi dışında meydana geldiği görülebilmektedir. Ayrıca, TIG, MIG+Lazer ve TIG+Lazer kaynaklı bağlantıların kırılmadan önce önemli miktarda uzama meydana geldikten sonra boyun verdiği ve daha sonra ise kopma olayının olduğu anlaşılmaktadır. Mühendislik uygulamalarında, malzemenin aniden kırılması yerine sünek kırılmanın meydana gelmesi istenmekte olup bu sünek kırılmanın en önemli belirtilerinden birisi ise boyun verme durumudur. Sünek kırılma, malzemenin kırılma öncesinde mekanik enerjisinin önemli ölçüde dağılmasını ihtiva eden büyük ölçekli bir deformasyon süreci olarak belirtilmektedir (Adin, 2024; Davim ve ark., 2021; Gour, 1995; Kalpakjian ve ark., 2013).

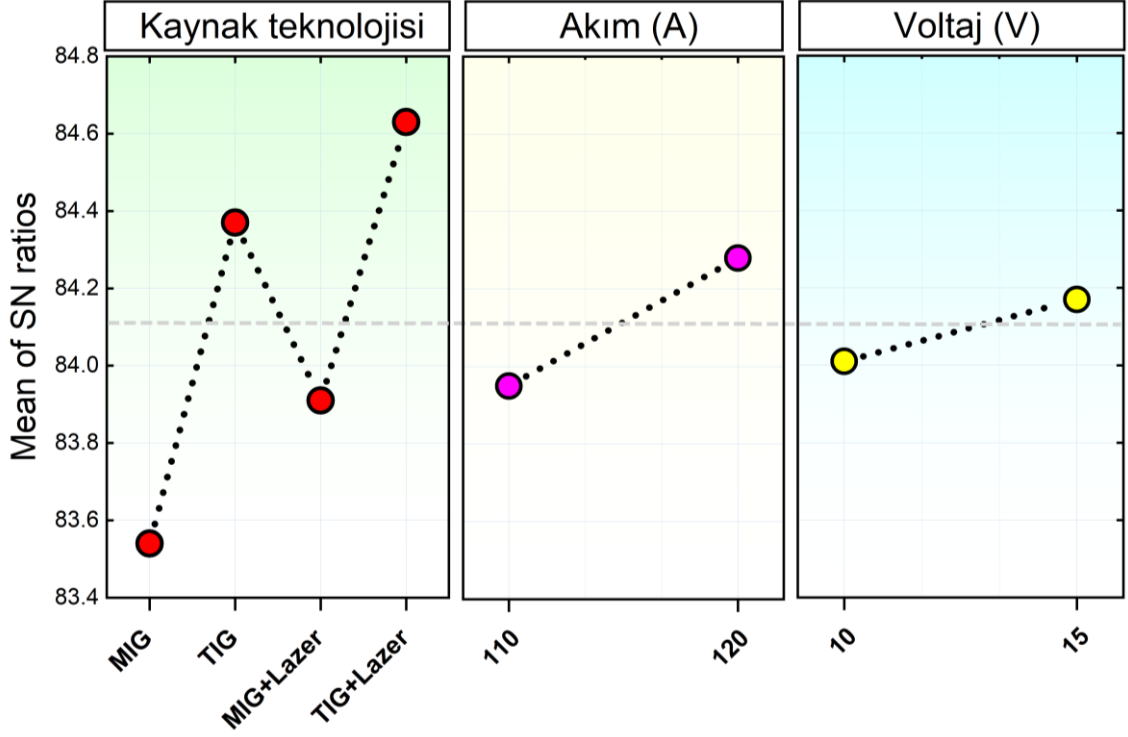
Bu çalışmada, farklı kaynak teknolojileri kullanılarak birleştirilen bağlantıların maksimum çekme ve uzama değerleri arasındaki farklılıkların en önemli sebebi, MIG ve TIG kaynak teknolojilerine bağlı olarak, numunelerin kaynak edilmesi sırasında farklı ısı girdilerinin oluşmasından kaynaklanmaktadır. Bu işlem sırasında, özellikle ITAB bölgesinde önemli değişimler meydana gelmekte ve bu da tane boyutunun farklılaşmasına neden olmaktadır. Literatürdeki çalışmalardan ise, iri taneli mikroyapıların mukavemet değerlerinin, ince taneli mikroyapıların mukavemet değerlerine göre daha düşük olduğu bilinmektedir (Adin, 2024; Kalpakjian ve ark., 2013; MillerWelds, 2014; Gour, 1995; Toyoda ve ark., 1994). Nitekim, çalışma kapsamında, kaynak işlemleri sırasında termal kamera ile yapılan ve Şekil 4.8’de verilen MIG ve TIG kaynağı işlemleri sırasında ölçülen en yüksek sıcaklık değerleri de bu sonuçları destekleyecek şekilde elde edilmiştir.



Şekil 4.8. MIG ve TIG kaynağı işlemleri sırasında ölçülen en yüksek sıcaklık değerleri

Şekil 4.8’de görüldüğü gibi, termal kamera ile TIG ve MIG kaynak cihazları ile yapılan kaynak işlemleri sırasında ölçülen sıcaklıklar incelendiğinde, MIG kaynağı ile kaynak işlemi sırasında ölçülen en yüksek sıcaklık değerinin 633 °C olduğu, TIG kaynağı ile kaynak işlemi sırasında ölçülen en yüksek sıcaklık değerinin ise 809 °C olduğu görülmektedir. Sıcaklık değerleri yönünden, MIG kaynağı ile kaynak işlemi sırasında elde edilen en yüksek sıcaklık değeri ile TIG kaynağı sırasında elde edilen en yüksek sıcaklık değeri karşılaştırıldığında, TIG kaynağı ile elde edilen en yüksek sıcaklık değerinin MIG kaynağı ile elde edilen en yüksek sıcaklık değerinden %27,81 daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Nitekim, literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, elde edilen bu ölçümleri doğrular şekilde, TIG kaynağı sırasındaki ısı oluşumunun MIG kaynağı sırasındaki ısı oluşumundan daha yüksek olduğu ifade edilmektedir (Kalpakjian ve ark., 2013; MillerWelds, 2014).

Bu tez çalışması kapsamında, çekme testleri sonrasında elde edilen maksimum çekme kuvvetleri baz alınarak, Taguchi optimizasyon yöntemine göre elde edilen analiz sonuçlarının ana etkiler grafiği Şekil 4.9’da verilmiştir.

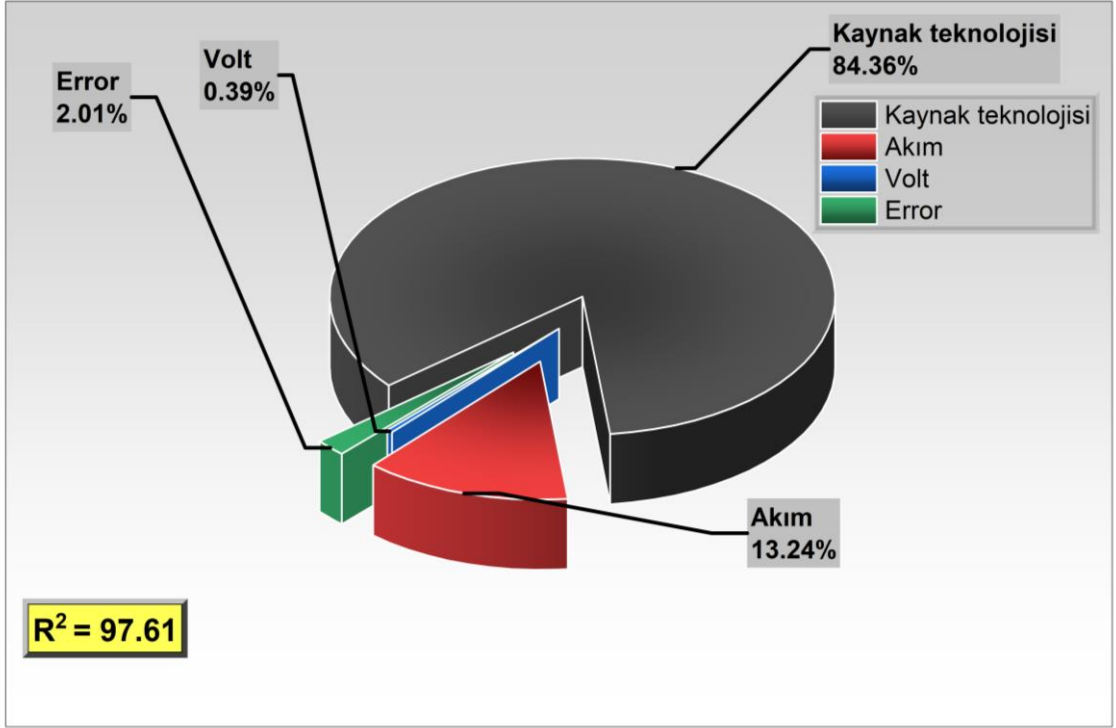


Şekil 4.9. Maksimum çekme kuvvetleri için ana etkiler grafiği

Şekil 4.9’da görülebildiği gibi, SN oranlarının ortalamalarına bakıldığında, en yüksek değer en iyi şartı göz önünde bulundurulduğundan, kaynak teknolojilerine göre, en düşükten en yükseğe göre sırasıyla MIG kaynağı, MIG+Lazer kaynağı, TIG kaynağı ve TIG+Lazer kaynağının olduğu anlaşılmaktadır. Yine, Şekil 4.9’daki sonuçlardan, Akım ve Voltaj değerlerinin yükseltilmesi durumunda, kaynak bağlantılarının dayanımlarının daha da yükseldiği, yani, bu çalışma kapsamında uygulanan her iki kaynak parametresinin de önemli etkilerinin olduğu anlaşılmaktadır. Nitekim, literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlarla paralel olarak, TIG kaynaklı bağlantıların dayanımının MIG kaynaklı bağlantılardan daha yüksek dayanıma sahip oldukları ve ayrıca akım ve voltaj parametrelerinin yükseltilmesinin sonuçlara olumlu etkilerinin olduğu anlaşılmaktadır (Adin, 2024; Ramakrishnan ve ark., 2021; Pal, 2015; Naveenkumar ve ark., 2014).

Çalışma kapsamında ayrıca, Taguchi deneysel dizaynının parametrelerinin etkilerinin daha iyi anlaşılması için %95 güven ve %5 önem baz alınarak ANOVA

analizi gerçekleştirilmiştir. ANOVA analizi sonucunda elde edilen yüzde katkı oranları Şekil 4.10’da verilmiştir.



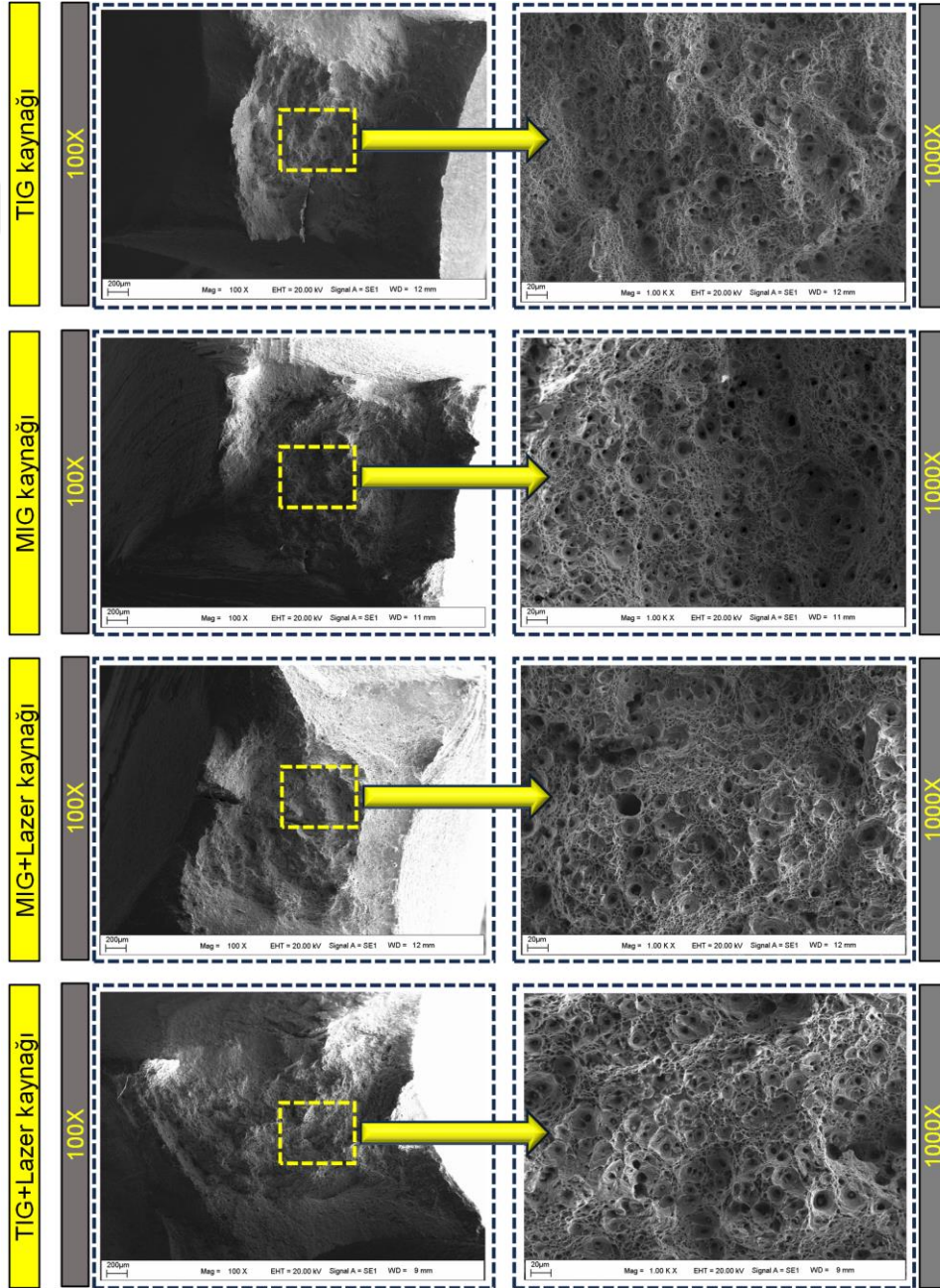
Şekil 4.10. Maksimum çekme kuvvetleri için ANOVA yüzde katkı analizi sonuçları

Şekil 4.10’da da görüldüğü gibi, en yüksek yüzde katkı oranının (en önemli faktörün) %84,36 ile kaynak teknolojisi olduğu ve ayrıca sırasıyla diğer katkı oranlarının ise %13,24 ile Akım, %0,39 ile Volt parametrelerinin olduğu görülebilmektedir. Nitekim, Şekil 37’de verildiği gibi, yapılan ANOVA analizinin model özetinde R^2 değerinin %97,61 ile oldukça yüksek, yani başarılı bir sonuç elde edildiğini göstermektedir. Bilindiği gibi, ANOVA analizindeki R^2 değeri regresyon kat sayısını göstermekte olup, %85 ve üzerindeki değerler, yapılan analiz sonuçlarının oldukça yüksek doğrulukta olduğunu ifade etmektedir (Adin, 2022; Montgomery, 2017; Taguchi, 1987).

Kaynak teknolojileri ve lazer kök kaynağının etkileri bir bütün olarak ele alındığında ise, TIG kaynağının MIG kaynağına göre daha iyi sonuçlar verdiği, ayrıca, lazer kök kaynağının ise kaynaklı bağlantılara olumlu etkilerinin olduğu anlaşılmaktadır.

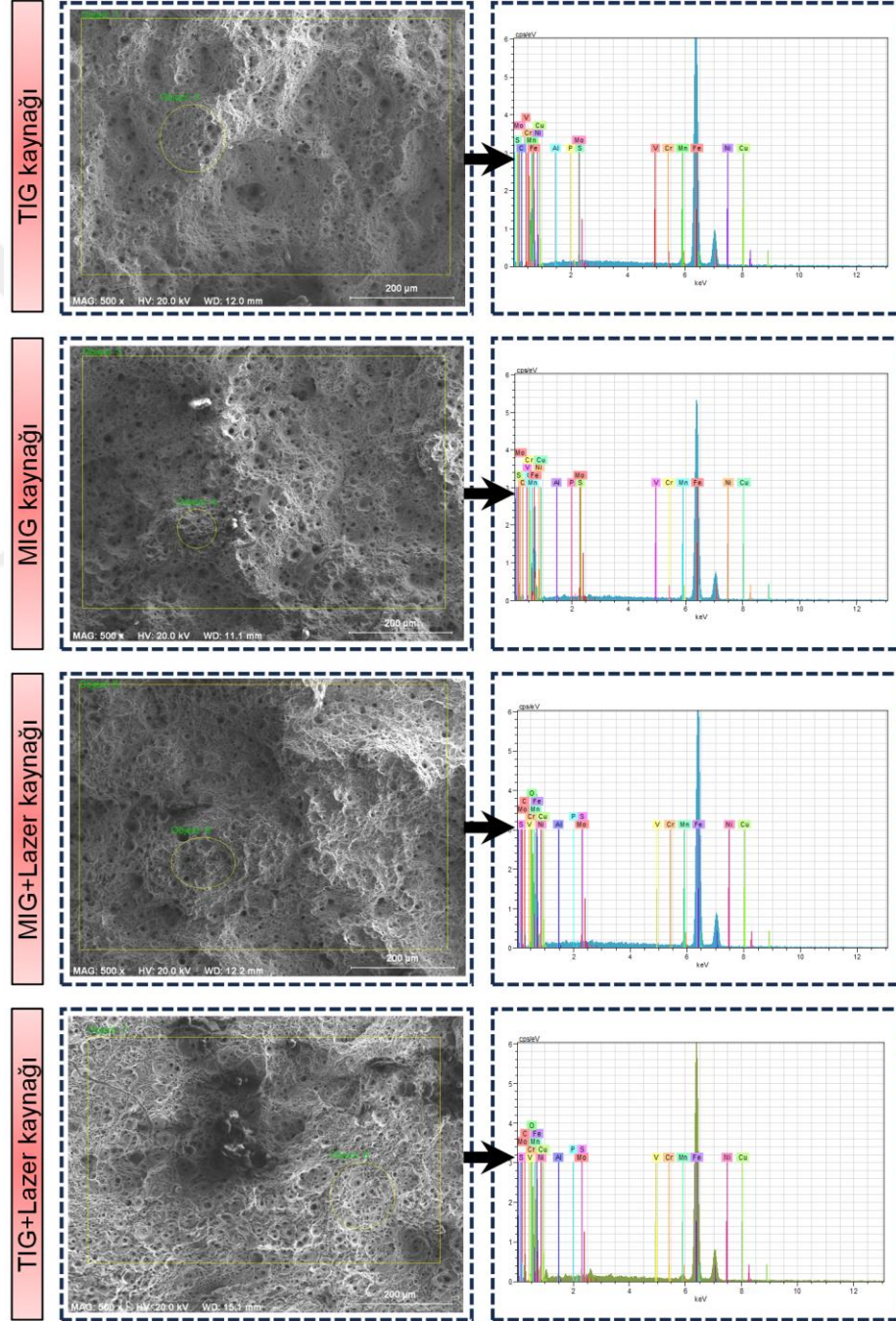
4.3. SEM ile görüntüleme ve EDX analizi sonuçları

Bu tez çalışması kapsamında, farklı kaynak teknolojileri ile kaynak yapılan bağlantıların, çekme testleri sonrasında, numunelerin kopma bölgelerinin SEM görüntüleri ve EDX analizleri incelenerek kırılma yüzeyleri arasındaki farklılıklar ve sebepleri araştırılmıştır. Şekil 4.11’de, MIG, TIG, MIG+Lazer ve TIG+Lazer kaynaklı bağlantıların kırılma yüzeylerinin farklı büyütme oranlarında çekilen SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.11. Kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri

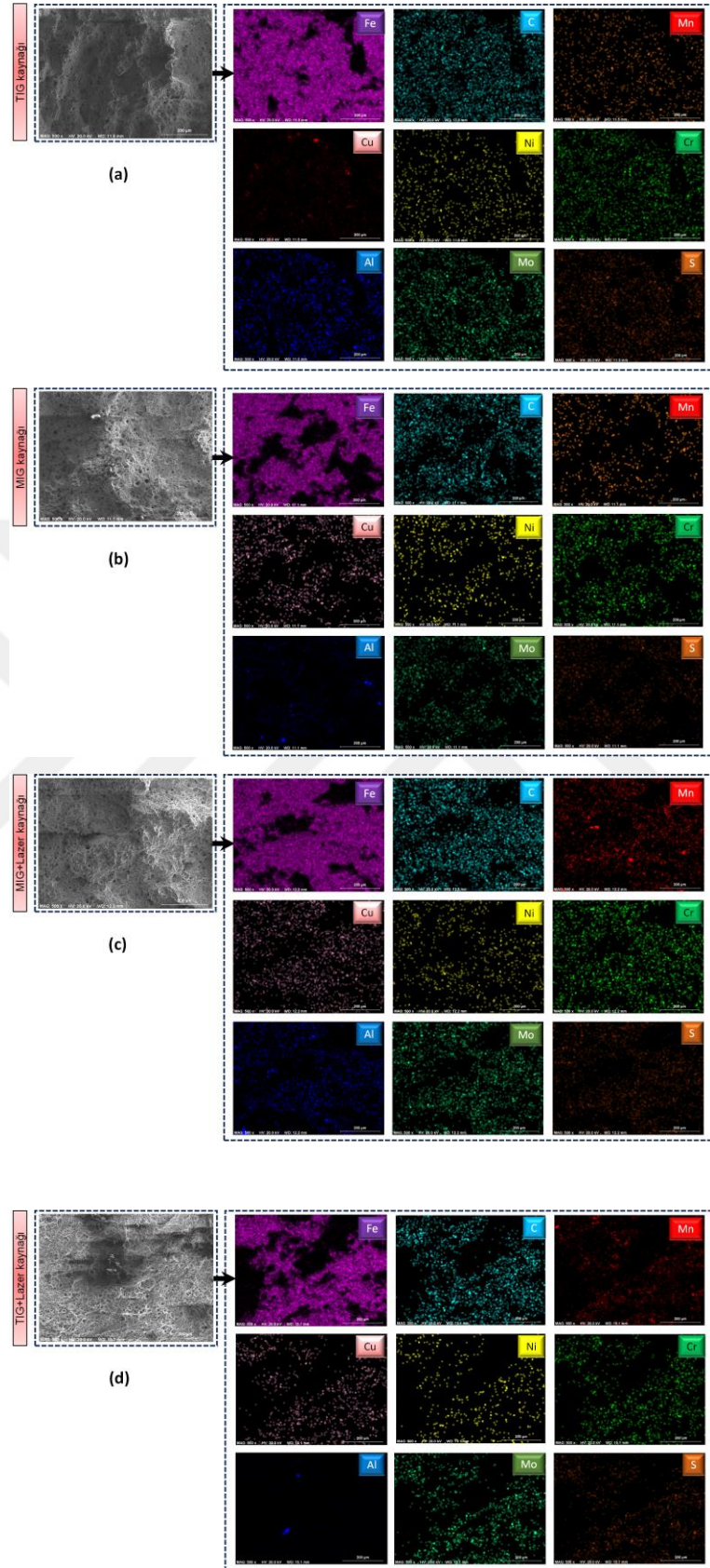
Şekil 4.11’de verilen, farklı kaynak teknolojisi kullanılarak kaynak edilen bağlantıların kırılma yüzeyleri incelendiğinde, tüm SEM görüntülerinde çok sayıda çukur ve boşlukların olduğu net olarak görülebilmektedir. Nitekim bu çukur ve boşluklar, mühendislik kırılmalarında talep edilen sünek kırılmanın en önemli karakteristik özellikleridir. Ayrıca, kırılma yüzeyleri dikkatlice incelendiğinde, sünek kırılmanın bir diğer karakteristik özelliği olan tek parçalı kırılmanın gerçekleştiği görülebilmektedir (Zandinava, 2022; Mohtadi-Bonab ve ark., 2021).



Şekil 4.12. Kırılma yüzeylerinin elementel analizleri

Çalışma kapsamında ayrıca, Şekil 4.12’de görülebildiği gibi, kırılma yüzeylerinin belirli bölgelerinde elementel analizler yapılarak hem SEM ve hem de grafiksel (görüntü alınan yerdeki) olarak verilmiştir. Bu analizlerin sonuçları karşılaştırıldığında, ağırlıkça en yüksek elementin %94,27 ile Fe olduğu, ayrıca ikinci en yüksek element oranının ise %4,11 ile C elementi olduğu görülmüştür. Diğer yandan, MIG, MIG+Lazer, TIG+Lazer ve TIG kaynaklı bağlantıların kırılma yüzeylerindeki elementler yönünden karşılaştırıldığında ise, ortalama olarak TIG ve TIG+Lazer kaynaklı bağlantıların MIG ve MIG+Lazer kaynaklı bağlantılara göre sırasıyla Fe ve C elementleri yönünden ortalama %8,49 ve %139 daha yüksek oranlarda oldukları görülmüştür. Bu çalışma kapsamında yapılan elementel analizler sonucunda, farklı kaynak teknolojileri kullanılmasına rağmen Fe elementinin ağırlıkça yüksek oranlarda çıkması ise literatürde bulunan çalışmaların sonuçları ile uyumlu olarak sünek kırılmanın gerçekleştiğinin destekleyici bir sonucu olmaktadır (Zandinava, 2022).

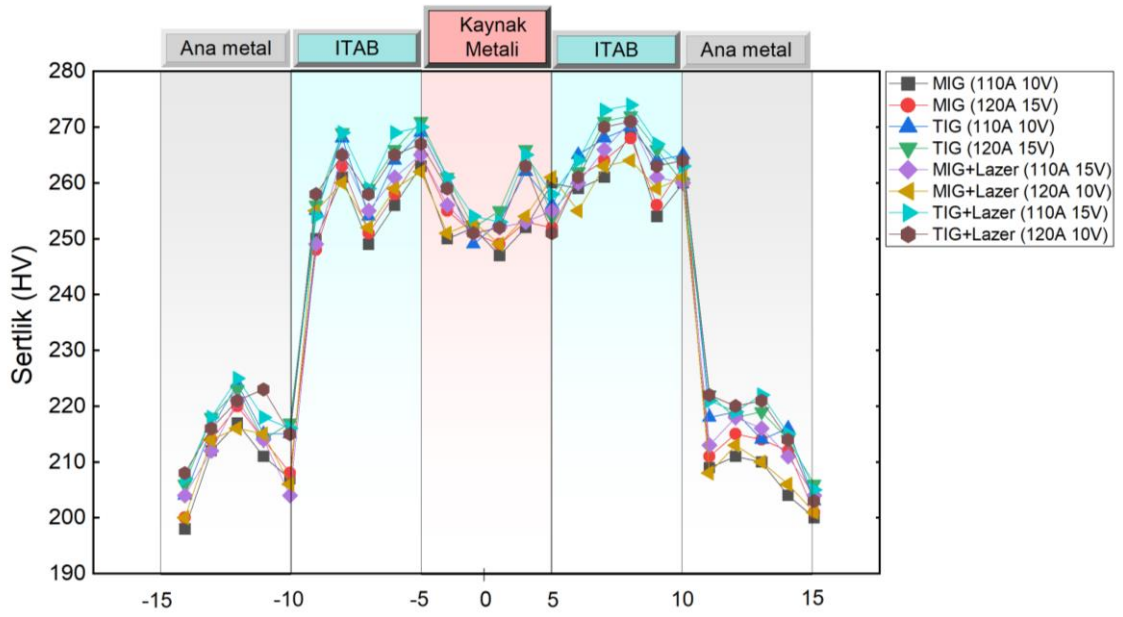
SEM-EDX cihazının yeteneklerinden birisi olan elementel analizlerin haritalama yapılarak her bir element için ayrı ayrı haritalandırma yapabilmesi sayesinde ise sayısal veriler olarak bulunan sonuçların kırılma yüzeylerinde görsel olarak dağılımlarının görülebilmesine imkân verebilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında farklı kaynak teknolojileri kullanılması nedeniyle ise her bir kaynak teknolojisi ile kaynak yapılan bağlantıların kırılma yüzeylerinin elementel haritalandırmaları ayrı ayrı yapılmış ve böylelikle aralarındaki farklılıklar daha net bir şekilde görülebilmektedir. MIG, TIG, MIG+Lazer ve TIG+Lazer kaynak teknolojileri ile kaynak yapılan bağlantıların kırılma yüzeyleri Şekil 4.13 a, b, c ve d’de görüldüğü gibi, her bir yüzeyden çekilen SEM görüntülerinin alana göre elementel dağılımlarının haritalandırmaları (haritalama) gösterilmiştir. Şekil 4.13 a, b, c ve d incelendiğinde, Şekil 40’da verilen sayısal analiz sonuçları ile her bir elementin dağılım haritalandırmalarının uyumlu olduğu görülebilmektedir. Ayrıca, Şekil 4.13 a, b, c ve d’de görülebileceği gibi, farklı kaynak teknolojileri uygulanarak yapılan kaynak işlemlerinin numunelere farklı etkileri nedeniyle, yüzde ağırlıkça element dağılımlarında değişkenlikler olmasına rağmen, dağılım eğilimlerinin benzerlik göstererek heterojen yapıda oldukları fark edilebilmektedir.



Şekil 4.13. Kırılma yüzeylerinin elementel dağılım haritalaması

4.4. Sertlik testi sonuçları

Bu tez çalışması kapsamında ayrıca Şekil 4.14'te verilen resimde görüldüğü gibi TS EN ISO 9015-1 standardına uygun olarak ve Şekil 4.7'de belirtilen kaynaklı bölgeleri (ana metal, ITAB ve kaynak metali) kapsayacak şekilde enine olarak ölçümler alınarak aritmetik ortalamaları hesaplanmıştır. Test işlemleri sırasında ortam sıcaklığının normal oda sıcaklığında ve nem değerinin ise %50 olduğu ölçüm cihazında görülmüştür. MIG, TIG, MIG+Lazer ve TIG+Lazer kaynak teknolojileri ile kaynak yapılan bağlantıların yapılan tüm sertlik testleri sonuçları Şekil 4.14'de verilmiştir.



Şekil 4.14. Mikrosertlik ölçümleri

Şekil 4.14'te verilen sertlik sonuçları incelendiğinde, MIG, TIG, MIG+Lazer ve TIG+Lazer kaynak teknolojileri ile kaynak yapılan bağlantıların benzer sertlik davranışları gösterdikleri görülebilmektedir. Ayrıca, ölçülen sertlik değerlerinin kaynak bölgelerine göre karşılaştırmaları yapıldığında ise en yüksek sertlik değerlerinin genel olarak ITAB bölgesinde yoğunlaştığı grafiksel olarak da anlaşılmaktadır. Diğer kaynak bölgeleri sertlik değerlerine göre kıyaslandığında ise ikinci sırada kaynak metali ve son olarak ana metal olduğu anlaşılmaktadır. Bu sertlik değerlerinin kaynak bölgelerine göre dağılımı ile ilgili olarak literatür çalışmalarına bakıldığında ise elde edilen sonuçlarla benzer eğilimde oldukları anlaşılmaktadır (Hanea ve ark., 2014). Yapılan sertlik ölçümleri sonucunda farklı değerlerin elde edilmesinin en önemli sebeplerinden birisi ise, daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi, farklı kaynak teknolojilerine bağlı

olarak kaynak işleminin sırasındaki ısı girdilerinin farklılıkları gösterilebilmektedir. Nitekim, çekme testi kısmında ifade edildiği gibi, ısı girdilerinin farklılıklarına bağlı olarak ITAB bölgesi ve bu bölgedeki mikroyapıda tane yapısının değişimine bağlı olarak çekme numunelerinin hem mukavemetleri hem de sertlik davranışları doğrudan bu durumdan etkilenmektedir. Bu durumun doğal sonucu olarak elde edilen değerler de kaynak parametrelerine ve kaynak teknolojilerine göre değişkenlik göstermektedir (Kalpakjian ve ark., 2013; Gour, 1995).

Diğer yandan, Şekil 42'deki sertlik değerleri incelendiğinde, en yüksek sertlik değerinin TIG+Lazer kaynağında, Vickers sertlik değerine göre 274 HV ve 110A ile 15V kaynak parametrelerinde elde edildiği görülebilmektedir. Ayrıca, en düşük sertlik değeri incelendiğinde ise, MIG kaynağı ile Vickers sertlik değerine göre 198 HV ve 110A ile 10V kaynak parametrelerinde elde edildiği görülebilmektedir. Elde edilen bu en yüksek ile en düşük sertlik değerleri karşılaştırıldığında ise TIG+Lazer kaynağı ile kaynak yapılan numunenin sertlik değerinin MIG kaynağı ile kaynak yapılan numunenin sertlik değerinden %38,3 oranında daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. İlaveten, MIG ve TIG kaynaklı numuneler en yüksek sertlik değerleri yönünden karşılaştırıldığında ise TIG kaynaklı bağlantının sertlik değerinin (272 HV Vickers sertlik değeri ile 120A ve 15V kaynak parametrelerinde) MIG kaynaklı bağlantının sertlik değerinden (263 HV Vickers sertlik değeri ile 120A ve 15V kaynak parametrelerinde) %3,45 oranında daha yüksek olduğu görülmektedir.

Farklı kaynak teknolojileri ile kaynak yapılan API 5L X60 kalitesindeki numunelerin sertlik değerleri bir bütün olarak ele alındığında ise, kaynak parametrelerinin artışının sertlik değerlerini artırdığı, ITAB bölgesinin en yüksek sertlik değerine sahip olduğu ve TIG kaynağı ile kaynak yapılan numunelerin sertlik değerlerinin, genel olarak MIG kaynağı ile kaynak yapılan numunelerin sertlik değerlerine göre daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, sıklıkla petrol ve doğal gaz taşımada kullanılan API 5L X60 kalitesindeki çelik borudan kesilerek elde edilen numuneler, farklı kaynak teknolojilerinden olan Lazer, MIG ve TIG kaynak cihazları ile kaynak edilmişlerdir. Kaynak edilen numunelere tahribatlı ve tahribatsız mekanik testler uygulanmış ve kaynaklı bağlantılardan edinilen numunelerin mikroyapıları hem görüntüleme hem de analiz cihazları ile analiz edilmiştir. Tüm bu deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler şeklinde sunulmuştur;

- Radyografi testleri sonucunda, MIG ve TIG kaynaklı bağlantılarda, nüfuziyet eksikliği, gözenekli yapı ve alttan kesik kök gibi birçok yaygın kaynak bölgesi hatalarının olduğu görülmüştür. Ayrıca, MIG+Lazer ve TIG+Lazer kaynaklı bağlantıların kaynak kalitelerinin, Lazer kök kaynağının olumlu etkisiyle çok daha iyi olduğu ve kök nüfuziyeti gibi hatalarının olmadığı anlaşılmıştır.
- MIG+Lazer ve TIG+Lazer kaynaklı bağlantıların alttan resimlerinde, kaynaklı bağlantıların daha kaliteli ve ayrıca kaynak yüzeyindeki çapakların MIG ve TIG kaynaklı bağlantılardan daha pürüzsüz oldukları görülmüştür.
- ASTM standartlarına göre, MIG, TIG, MIG+Lazer ve TIG+Lazer kaynaklı bağlantılardan elde edilen numunelerin yapılan çekme testleri sonucunda, MIG ve TIG kaynakları ile yapılan bağlantıların maksimum çekme kuvvetlerinin, lazer kök kaynaklı MIG+Lazer ve TIG+Lazer bağlantılarına göre daha düşük oldukları ortaya çıkmıştır.
- Farklı kaynak teknolojileri ile kaynaklı bağlantıların dayanımları yönünden karşılaştırıldıklarında, küçükten büyüğe doğru sırasıyla, MIG kaynağı, TIG kaynağı, MIG+Lazer kaynağı ve TIG+Lazer kaynağı olduğu anlaşılmıştır.
- MIG ve MIG+Lazer kaynaklı bağlantılardan elde edilen en yüksek maksimum çekme kuvvetleri karşılaştırıldığında, MIG+Lazer kaynaklı bağlantıdan elde edilen sonucun MIG kaynaklı bağlantıdan %4,03 daha yüksek olduğu görülmüştür.

- TIG ve TIG+Lazer kaynaklı bağlantılardan elde edilen en yüksek maksimum çekme kuvvetleri karşılaştırıldığında, TIG+Lazer kaynaklı bağlantının maksimum çekme kuvvetinin, TIG kaynaklı bağlantının maksimum çekme kuvvetinden %2,91 daha yüksek olduğu anlaşılmıştır.
- Çekme testleri sonucunda, MIG ve MIG+Lazer kaynaklı bağlantılardan elde edilen en yüksek maksimum uzama değerleri karşılaştırıldığında, MIG+Lazer kaynaklı bağlantının maksimum uzama değerinin (6,92 mm) MIG kaynaklı bağlantının maksimum uzama değerinden (6,38 mm) %8,47 oranında daha yüksek olduğu görülmüştür.
- Çekme testleri sonucunda, TIG+Lazer kaynaklı bağlantının maksimum uzama değerinin (9,52 mm) TIG kaynaklı bağlantının maksimum uzama değerinden (7,21 mm) %32,03 oranında daha yüksek olduğu anlaşılmıştır.
- Çekme testleri sonrasında yapılan incelemelerde, kaynaklı bağlantıların kırılmadan önce önemli miktarda uzama meydana geldikten sonra boyun vererek sünek bir kırılma gösterdikleri anlaşılmıştır.
- Kaynak işlemi sırasında termal kamera ile yapılan ölçümlerde, TIG kaynağı sırasında elde edilen en yüksek sıcaklık değerinin, MIG kaynağı sırasında elde edilen en yüksek sıcaklık değerinden %27,81 daha yüksek olduğu görülmüştür.
- Taguchi optimizasyon yöntemi uygulanarak yapılan bu çalışmada, elde edilen sonuçlara göre yapılan analizlerde, SN oranlarına göre, en düşükten en yükseğe doğru sırasıyla MIG kaynağı, MIG+Lazer kaynağı, TIG kaynağı ve TIG+Lazer kaynağı olduğu, ayrıca, akım ve voltaj parametrelerinin yükseltilmesinin sonuçlara olumlu etkilerinin olduğu anlaşılmıştır.
- ANOVA analizi sonucunda, en yüksek yüzde katkı oranının (en önemli faktörün) %84,36 ile kaynak teknolojisi olduğu ve ayrıca sırasıyla diğer katkı oranlarının ise %13,24 ile Akım, %0,39 ile Volt parametrelerinin geldiği görülmüştür.
- Bu çalışma kapsamında elde edilen regresyon kat sayısının (R^2) %97,61 gibi yüksek bir değer olması, yapılan analiz sonuçlarının oldukça yüksek doğrulukta olduğunu göstermiştir.

- MIG, TIG, MIG+Lazer ve TIG+Lazer kaynaklı bağlantıların kırılma yüzeylerinin çekilen SEM görüntüleri incelendiğinde, tüm görüntülerde, sünek kırılmanın en önemli karakteristik özellikleri olan çok sayıdaki çukur ve boşluklar ile beraber tek parçalı kırılmanın olduğu anlaşılmıştır.
- MIG, TIG, MIG+Lazer ve TIG+Lazer kaynaklı bağlantıların kırılma yüzeylerinin yapılan SEM-EDX analizlerinin sonuçları karşılaştırıldığında, ağırlıkça en yüksek elementin %94,27 ile Fe olduğu görülmüştür.
- Yapılan sertlik testleri sonucunda, MIG, TIG, MIG+Lazer ve TIG+Lazer kaynak teknolojileri ile kaynak yapılan bağlantıların farklı değerlerde olmalarına rağmen benzer sertlik davranışları göstermişlerdir.
- MIG, TIG, MIG+Lazer ve TIG+Lazer kaynak teknolojileri ile kaynak yapılan bağlantıların ölçülen sertlik değerlerinin kaynak bölgelerine göre karşılaştırmaları yapıldığında, en yüksek sertlik değerlerinin genel olarak ITAB bölgesinde yoğunlaştığı anlaşılmıştır.
- Elde edilen bu en yüksek ile en düşük sertlik değerleri karşılaştırıldığında, TIG+Lazer kaynağı ile kaynak yapılan numunenin sertlik değerinin, MIG kaynağı ile kaynak yapılan numunenin sertlik değerinden %38,3 oranında daha yüksek olduğu görülmüştür.

5.2. Öneriler

Bu tez çalışması kapsamında yapılan deneysel araştırma sonucunda, farklı kaynak teknolojilerinden olan Lazer, MIG ve TIG kaynak cihazları ile yapılacak gelecekteki çalışmalar için aşağıda belirtilen önerilerde bulunulabilir;

- Bu çalışmada kullanılan çelik malzemeden elde edilen numunelerin, Lazer, MIG ve TIG kaynak teknolojili cihazlar kullanılarak, bu çalışmadaki parametrelere göre daha yüksek ve daha düşük akım ve voltaj parametrelerinde, daha az ve daha çok sayıdaki pasolarla kaynak edilmelerinin etkileri incelenebilir.
- Bu çalışmada kullanılan çelik malzemenin tamamıyla lazer kaynak ile kaynak edilmesi ve elde edilen bağlantıların sadece MIG ve sadece TIG kaynaklı bağlantılarla karşılaştırılması yapılabilir.

- Bu çalışmada kullanılan çelik malzemenin, Lazer, MIG ve TIG kaynak teknolojili cihazlar kullanılarak, daha kaliteli kaynak yapabilen robot kolla kaynak edilmesinin bağlantı kalitesine etkileri incelenebilir.
- Bu tez çalışması kapsamında farklı kaynak teknolojilerinden olan Lazer, MIG ve TIG kaynak cihazları kullanılarak kaynak edilen çelik malzemedeki bağlantıların deneysel sonuçları, ANSYS programında, aynı şartlardaki simülasyonlarıyla karşılaştırmaları yapılabilir.



KAYNAKLAR

- Abedi, S. S., Abdolmaleki, A., ve Adibi, N., 2007, Failure Analysis Of SCC And SRB İnduced Cracking Of A Transmission Oil Products Pipeline, *Engineering Failure Analysis*, 14 (1), 250-261.
- Ada, H., 2006, Petrol ve Doğalgaz Boru Hatları İçin Üretilen Boruların Toz altı ve Spiral Kaynak Yöntemiyle Kaynaklanabilirliği ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Gazi Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 1-179.
- Adin, M. Ş., 2022, Lazer kaynağı ile kaynak yapılan alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerinin araştırılması ve kaynak parametrelerinin Taguchi ve Anova yöntemleri kullanılarak optimizasyonu. *Journal of Science, Technology and Engineering Research*, 3(2), 50-59.
- Adin, M. Ş., 2024, A parametric study on the mechanical properties of MIG and TIG welded dissimilar steel joints. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 38(1), 115-138.
- Adin, M. Ş., ve Okumuş, M., 2022, InvesTIGation of microstructural and mechanical properties of dissimilar metal weld between AISI 420 and AISI 1018 STEELS. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(7), 8341-8350.
- Akman, E., 2006, Ti6Al4V Titanyum Alaşımlarının Atımlı Nd: YAG Lazeri Kullanılarak Kaynak Edilmesi ve Kaynak Parametrelerinin Belirlenmesi, Kocaeli Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 1-97.
- Akpınar, E., ve Başibüyük, A., 2011, Jeoekonomik Önemi Giderek Artan Bir Enerji Kaynağı: Doğalgaz, *Electronic Turkish Studies*, 6 (3), 1-18.
- Aksöz, S., Ada, H., ve Özer, A., 2017, Toz Altı Kaynak Yöntemiyle Üretilen API 51 X70 Kalite Çelik Boruların Mikroyapı ve Mekanik Özellikleri, *Gazi University Journal Of Science Part C: Design And Technology*, 5 (1), 55-64.
- Alpar, T., Çelenk, O., ve Çavdar, K., 2021, Yüksek Mukavemetli Çeliklerde Lazer Kaynağı Uygulamaları, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 26 (3), 1139-1158.
- Alsancak, H., 2010, The Role Of Turkey İn Global Energy: Bolstering Energy İnfrastructure Security, *Journal Of Energy Security*, 18.
- American Petroleum Institute. Production Department., 1991, Specification For Line Pipe. American Petroleum Institute, 1-10
- Anık, S. ve Vural, M., 1991, Gaz Altı Ark Kaynağı, İstanbul: Gedik Eğitim Vakfı 1-308.
- Anık, S., Tülbentçi, K., ve Kaluç, E., 1991, Örtülü Elektrod ile Elektrik Ark Kaynağı, Gedik Holding 1-296.
- API, 2015, Welding of Pipelines and Related Facilities: Pipeline Segment, API Standard 1104. American Petroleum Institute (API)

- API, 2015, API Specifications 5L: Specifications For Line Pipe. American Petroleum Institute (API) 2015, 1-10
- Arcan, A., 2011, Lazer Işını İle Metallerin Kesilmesine Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 1-83.
- Ashari, R., Eslami, A., Shamanian, M., ve Asghari, S., 2020, Effect Of Weld Heat Input On Corrosion Of Dissimilar Welded Pipeline Steels Under Simulated Coating Disbondment Protected By Cathodic Protection, Journal Of Materials Research And Technology, 9 (2), 2136-2145.
- Aydın, T., 2002, Paslanmaz Çeliklerin MIG Kaynağında Kullanılan Gazlar ve Etkileri, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 1-139.
- Baek, J. H., Kim, Y. P., Kim, C. M., Kim, W. S., ve Seok, C. S., 2010, Effects Of Pre-Strain On The Mechanical Properties Of API 5L X65 Pipe, Materials Science And Engineering: A, 527 (6), 1473-1479.
- Baek, J. H., Kim, Y. P., Kim, W. S., Koo, J. M., ve Seok, C. S., 2012, Load Bearing Capacity Of API X65 Pipe With Dent Defect Under Internal Pressure And In-Plane Bending, Materials Science And Engineering: A, 540, 70-82.
- Brassard, D., Dubé, M., ve Tavares, J. R., 2019, Resistance Welding Of Thermoplastic Composites With A Nanocomposite Heating Element, Composites Part B: Engineering, 165, 779-784.
- Bulut, E. B., 2008, Bakır (Cu) ve Çelik (St-37) Plakalarının (Tungsten Inert Gas) Kaynağı Yöntemiyle Kaynaklanabilirliği, Ege Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi 1-172.
- Candan, L., 2008, Karbon-Fiber Takviyeli Kompozitler Ve Polikarbonat Malzemelerin Lazerle Delme Parametrelerinin Belirlenmesi, Kocaeli Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi 1-98.
- Cary, H. B., 1988, Modern Welding Technology Second Edition, Prentice-Hall, Inc. USA.
- Cebeci, İ., 2021, Lazerle Kesme İşlenmesinde Kesme Parametrelerinin Kerf Genişliği, Çapak Yüksekliği ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin Araştırılması, Karabük Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 1-104.
- Celik, A., ve Alsaran, A., 1999, Mechanical And Structural Properties Of Similar And Dissimilar Steel Joints, Materials Characterization, 43 (5), 311-318.
- Ceyhun, K. Ö. S. E., ve Karaca, E., 2019, Nd: YAG Lazer Kaynağı ile Birleştirilen Ti6Al4V Alaşımının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Isıl İşlemlerin Etkileri, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 21 (1), 232-243.
- Cirik, E., 2007, Anodik Oksidasyon İşleminin 7075-T6 Alüminyum Alaşımının Yorulma Davranışına Olan Etkisinin İncelenmesi, Sakarya Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 1-90.
- Çakmakkaya, M., Çolak, F., Rıza, K. A. R. A., ve Karaağaçlı, A., 2020, Lazer Kaynak Yöntemiyle Birleştirilen Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Farklı Tür Çeliklerin Kaynak

- Dikiş Geometrisi ve Nüfuziyetine Kaynak Parametrelerinin Etkisi, *Journal Of Materials And Mechatronics: A*, 1 (1), 1-11.
- Çelen, S., 2006, Paslanmaz Çeliklerin Lazer Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Bağlantı Dayanımı ve Korozyon Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 1-170.
- Çevik, B., 2013, Örtülü Elektrot Ark Kaynağı ve MIG Kaynağında Akım Şiddetinin Kaynak Nüfuziyetine Etkisinin İncelenmesi, *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 2 (2), 22-29.
- Çınar, Ö., Yaralı, M. C., Erdemir, E., Çetiner, B. N., Mergen, A., ve Güllüoğlu, A. N., 2019, The Similar And Dissimilar Webdin Of 316l And 321 Austenitic Stainless Steels, *Alkü Fen Bilimleri Dergisi*, 1 (3), 148-155.
- Davim, J. P., ve Gupta, K., 2021, *Advanced Welding and Deforming* (pp. 67-104, Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
- Demirci, D., 2010, Muhtelif Kaynak Yöntemlerinde Doğru Akımlı Kaynakta Kutuplamanın Kaynak Dikiş Formuna Etkilerinin Araştırılması, Dokuz Eylül Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 1-131.
- Demirtaş, M. T., 2013, Hafif Metallerde A- Uygulamaları, Marmara Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi 1-77.
- Durmuşoğlu, Ş., 2006, Gaz altı Kaynağında Kaynak Kalitesine Tesir Eden Parametrelerin Mekanik Özelliklere Etkisi, Kocaeli Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 1-177.
- Elektrikçi, O., 2007, Kaynağı ile Birleştirilmiş Demir Esaslı T/M Malzemelerin Kaynak Bölgesinin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi, Celal Bayar Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 1-131.
- Elgaddafi, K. A. B., 2019, Design And Optimizations Of Metal Inert Gas Welding Process On Different Carbon Steel Alloys, Karabük Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 1-151.
- Essoussi, H., Elmouhri, S., Ettaqi, S., ve Essadiqi, E., 2019, Microstructure And Mechanical Performance Of Resistance Spot Welding Of AISI 304 Stainless Steel And AISI 1000 Series Steel, *Procedia Manufacturing*, 32, 872-876.
- Fetita, H. F. Z. Absorption Of CO2 Laser Beam By Metallic Alloy Dur İng Welding. Doctoral Dissertation, Université Kasdi-Merbah Ouargla. People's Democratic Republic Of Algeria, 1-80
- Ghias, S. A., 2019, Analysis Of The Friction Welding Mechanism Of Low Carbon Steel–Stainless Steel And Aluminium–Copper, *Materials Today: Proceedings*, 16, 766-775.
- Ghosh, A., Chattopadhyaya, S., ve Das, R. K., 2011, Effect Of Heat Input On Submerged Arc Welded Plates. *Procedia Engineering*, 10, 2791-2796.
- Godefroid, L. B., Cândido, L. C., Toffolo, R. V. B., ve Barbosa, L. H. S., 2014, Microstructure And Mechanical Properties Of Two API Steels For Iron Ore Pipelines, *Materials Research*, 17, 114-120.

- Gourd, L. M., 1995, Principles of welding technology. 3rd ed. London, UK. British Library Cataloguing in Publication Data.
- Gözütok, E., 2009, Paslanmaz Çeliklerin Kaynağında Argon-Hidrojen Gaz Karışımının Birleştirmelerin Mekanik ve Mikro Yapı Özelliklerine Etkisi, Karabük Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 1-117.
- Gülenç, B., Candan, İ., ve Kahraman, N., 2006, MIG-MAG Kaynağı ile Birleştirilen Boruların Tahribatlı ve Tahribatsız Muayenesi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 21 (4), 631-637.
- Güneş, C., 2012, Benzinli Enjektörlerin Lazer Kaynağı ve Lazer Kaynak Parametreleri, Yıldız Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 1-77.
- Hanea, C. M., Iovanas, R., Roată, I. C., ve Pascu, A., 2014, Experimental research on modern methods of welding pipelines using base materials X60 and X70. Solid State Phenomena, 216, 298-303.
- Hashemi, S. H., ve Mohammadyani, D., 2012, Characterisation Of Weldment Hardness, Impact Energy And Microstructure İn API X65 Steel, International Journal Of Pressure Vessels And Piping, 98, 8-15.
- Ibrahim, I. A., Mohamat, S. A., Amir, A., ve Ghalib, A., 2012, The Effect Of Gas Metal Arc Welding (GMAW) Processes On Different Welding Parameters, Procedia Engineering, 41, 1502-1506.
- Jahanzeb, N., Shin, J. H., Singh, J., Heo, Y. U., ve Choi, S. H., 2017, Effect Of Microstructure On The Hardness Heterogeneity Of Dissimilar Metal Joints Between 316L Stainless Steel And SS400 Steel, Materials Science And Engineering: A, 700, 338-350.
- Jeraldnavinsavio, D., Farid, A. M., Ramanamurthy, E. V. V., Porchilamban, S., ve Ravikumar, S., 2019, Evaluation Of Mechanical Properties And Micro Structural Charecterization Of Dissimilar Welded AISI 316L And AISI 430 Plates Using ER310 And ER2594 Filler, Materials Today: Proceedings, 16, 1212-1218.
- Kaba, S., 2009, Doğalgaz Boru Hatlarındaki Kaynaklı Birleştirmelerin Radyografik Muayenesi, Gazi Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 1-190
- Kahraman, N., Durgutlu, A. ve Gülenç, B., 2004, 316l Paslanmaz Çeliğin Kaynağında Koruyucu Argon Gazına Hidrojen İlavesinin Kaynak Bölgesi Tane Morfolojisine Etkilerinin Araştırılması, Politeknik Dergisi, 7 (3), 223-228.
- Kalpajian S. ve Schmid SR., 2013, Manufacturing engineering and technology. 7th ed. Hoboken (NJ): Pearson Prentice-Hall.
- Karabulut, T. Y., 2019, AA5005 Alüminyum Alaşımının Lazer ve Kaynak Yöntemi Kullanılarak Kaynaklanabilirliğinin Araştırılması, On Dokuz Mayıs Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi 1-89.

- Katayama, S., 2004, Laser Welding Of Aluminium Alloys And Dissimilar Metals, *Welding International*, 18 (8), 618-625.
- Katayama, S., Ed., (2013, *Handbook Of Laser Welding Technologies*, Elsevier 1-562.
- Kaya, Y., 2010, AISI 304 Ve AISI 430 Paslanmaz Çeliklerin, MIG Ve Örtülü Elektrod Ark Kaynağıyla Birleştirilebilirliğinin Araştırılması, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25 (3), 549-557.
- Kern, M., Berger, P., ve Hugel, H., 2000, Magneto-Fluid Dynamic Control Of Seam Quality İn CO~ 2 Laser Beam Welding, *Welding Journal-New York*, 79 (3), 72-S.
- Khalifeh, A. R., Dehghan, A., ve Hajjari, E., 2013, Dissimilar Joining Of AISI 304L/St37 Steels By Welding Process, *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 26, 721-727.
- Kılınçer, S., ve Kahraman, N., 2009, AISI 409 ve Ç1010 Çeliğin Östenitik Elektrod Kullanarak MIG Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmesi ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 24 (1), 1-9
- Köse, C., ve Kaçar, R., 2016, Lazer Kaynağı ile Birleştirilen Aisi 2205 Dubleks Paslanmaz Çeliğin Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerinin İncelenmesi, *Technological Applied Sciences*, 11 (4), 98-109.
- Kulkarni, A., Dwivedi, D. K., ve Vasudevan, M., 2020, Microstructure And Mechanical Properties Of A- Welded AISI 316L SS-Alloy 800 Dissimilar Metal Joint, *Materials Science And Engineering: A*, 790, 139685.
- Kumar, P., ve Sinha, A. N., 2018, Effect Of Pulse Width İn Pulsed Nd: YAG Dissimilar Laser Welding Of Austenitic Stainless Steel (304 L) And Carbon Steel (St37), *Lasers İn Manufacturing And Materials Processing*, 5, 317-334.
- Kurt, H. İ., 2006, Kaynak Yöntemiyle Birleştirilen Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, *Marmara Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi* 1-196.
- Lakshminarayanan, A. K., Balasubramanian, V., ve Elangovan, K., 2009, Effect Of Welding Processes On Tensile Properties Of AA6061 Aluminium Alloy Joints, *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 40, 286-296.
- Leifer, I., Lehr, W. J., Simecek-Beatty, D., Bradley, E., Clark, R., Dennison, P., ... ve Wozencraft, J., 2012, State Of The Art Satellite And Airborne Marine Oil Spill Remote Sensing: Application To The BP Deepwater Horizon Oil Spill, *Remote Sensing Of Environment*, 124, 185-209.
- Li, K., Wu, Z., Zhu, Y., ve Liu, C., 2017, Metal Transfer İn Submerged Arc Welding. *Journal Of Materials Processing Technology*, 244, 314-319.
- Liu, Z. M., Cui, S., Luo, Z., Zhang, C., Wang, Z., ve Zhang, Y., 2016, Plasma Arc Welding: Process Variants And İts Recent Developments Of Sensing, Controlling And Modeling, *Journal Of Manufacturing Processes*, 23, 315-327.

- Mercan, E., 2018, 5XXX-6XXX Alüminyum Alaşımlarının Otomatik MIG Kaynak Yöntemi İle Birleştirilebilirliğinin Araştırılması, Karabük Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 1-118.
- Mercan, S., 2013, Sürtünme Kaynağı ile Birleştirilmiş AISI 2205/AISI 1020 Malzeme Çiftinin Mikroyapı ve Yorulma Davranışının Araştırılması, Fırat Üniversitesi, Doktora Tezi, 1-228.
- MillerWelds (2014, Welding process training series: introduction to welding. Appleton (WI): Miller Electric Mfg. Co.
- Mohammed, S. M. A. K., Dash, S. S., Jiang, X. Q., Li, D. Y., ve Chen, D. L., 2019, Ultrasonic Spot Welding Of 5182 Aluminum Alloy: Evolution Of Microstructure And Mechanical Properties, Materials Science And Engineering: A, 756, 417-429.
- Mohtadi-Bonab, M. A., Masoumi, M., ve Szpunar, J. A., 2021, A comparative fracture analysis on as-received and electrochemically hydrogen charged API X60 and API X60SS pipeline steels subjected to tensile testing. Engineering Failure Analysis, 129, 105721.
- Montgomery, D.C., 2017, Design and analysis of experiments, Ninth ed. John Wiley ve Sons.
- Naveenkumar, S., SooryaPrakash, D. K., Gokilakrishnan, G., ve Kamalesh, N., 2014, Parametric optimization Of welding process of low carbon steel (AISI 1019) By using taguchi's approach. International Journal For Technological Research In Engineering, 1, 415-425.
- Okuroğulları, Y., 2022, Gazaltı Kaynağı İle Birleştirilen Farklı Özellikteki Çeliklerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Uludağ Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 1-109.
- Ören, E., 2002, MAG Kaynağında Kaynak Parametrelerinin İçköşe Dikiş Geometrisine Etkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi 1-85.
- Özşahin, S., ve Çavdar, K., 2023, Paslanmaz Çeliklerin Lazer Kaynağı Yöntemi Kullanılarak Birleştirilmesi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 25 (1), 354-372.
- Pal, A., 2015, MIG welding parametric optimisation using taguchi's orthogonal array and analysis of variance. International Journal of Research Review in Engineering Science and Technology, 4(1), 211-217.
- Polat, İ., 2016, Geleneksel Gaz Altı Kaynak Yöntemleriyle Robotik Kaynağın Kaynak Özelliklerine Etkilerinin Araştırılması, Gazi Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 1-141.
- Rakhshkhorshid, M., ve Hashemi, S. H., 2013, Experimental Study Of Hot Deformation Behavior İn API X65 Steel, Materials Science And Engineering: A, 573, 37-44.
- Ramakrishnan, A., Rameshkumar, T., Rajamurugan, G., Sundaraju, G., ve Selvamuthukumaran, D., 2021, Experimental invesTIGATION on mechanical properties of TIG welded dissimilar AISI 304 and AISI 316 stainless steel using 308 filler rod. Materials Today: Proceedings, 45, 8207-8211.
- Ramkumar, T., Selvakumar, M., Narayanasamy, P., Begam, A. A., Mathavan, P., ve Raj, A. A., 2017, Studies On The Structural Property, Mechanical Relationships And Corrosion

- Behaviour Of Inconel 718 And SS 316L Dissimilar Joints By Welding Without Using Activated Flux, Journal Of Manufacturing Processes, 30, 290-298.
- Salma, A., 2011, Tahribatsız Muayene Metotları ve Doğalgaz Boru Hatlarındaki Kaynaklı Bağlantıların Radyografik Araştırılması, Erciyes Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 1-161.
- Savaş, A., 2021, MIG Kaynak Yöntemiyle Birleştirilen Hardox 400, AISI 304L ve ST52 Kalite Çeliklerin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Karabük Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 1-67.
- Seçim, C., 2011, Tahribatsız Muayene Yöntemleri ve Uygulama Alanları. Mustafa Kemal Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 1-65.
- Sevim, C., 2012, Küresel Enerji Jeopolitiği ve Enerji Güvenliği, Yaşar Üniversitesi E-Dergisi, 7 (26), 4378-4391.
- Sezgin, M., 2019, API Borularının Gazaltı Kaynak Yöntemiyle Kaynaklanabilirliği ve Mikroyapı-Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Gazi Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 1-121
- Shah, A., Kumar, A., ve Ramkumar, J., 2018, Analysis Of Transient Thermo-Fluidic Behavior Of Melt Pool During Spot Laser Welding Of 304 Stainless-Steel, Journal Of Materials Processing Technology, 256, 109-120.
- Singh, A. K., Dey, V., ve Rai, R. N., 2017, Techniques To Improveweld Penetration İn Welding (A Review), Materials Today: Proceedings, 4 (2), 1252-1259.
- Soltani, H. M., ve Tayebi, M., 2018, Comparative Study Of AISI 304L To AISI 316L Stainless Steels Joints By And Nd: YAG Laser Welding, Journal Of Alloys And Compounds, 767, 112-121.
- Soykan, C., 2021, Kaynak Teknolojisi ve Uygulamaları El Kitabı, İzmit 1-331
- Sung, H. K., Shin, S. Y., Cha, W., Oh, K., Lee, S., ve Kim, N. J., 2011, Effects Of Acicular Ferrite On Charpy Impact Properties İn Heat Affected Zones Of Oxide-Containing API X80 Linepipe Steels, Materials Science And Engineering: A, 528 (9), 3350-3357.
- Şahin, E., 2015, He-Ne/I2 (633 Nm) Lazer Frekans Kararlılığı ve Mutlak Frekans Ölçümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 1-78.
- Şirvanlı, A., 2021, AISI 304 Kalite Çelik Borularda Çoklu Helisel MIG Kaynaklarının Mikro Yapıya Olan Etkileri ve Mekanik Davranışlarının İncelenmesi, Erciyes Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 1-97.
- Taban, E., 2004, 5xxx Serisi Alüminyum Alaşımlarının, MIG ve Sürtünen Eleman ile Birleştirme Kaynaklı Bağlantılarının Mekanik ve Mikro yapısal Özelliklerinin İncelenmesi, Kocaeli Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 1-241.
- Taguchi, G., (1987, System of experimental design, quality resources, New York, USA.

- Taşkin, M., ve Çalgılı, U., 2009, AISI 430/1010 Çelik Çiftinin Lazer Kaynağında Kaynak Gücünün Birleşmeye Etkisi, Fırat University Journal Of Engineering Science, 21 (1), 1-13
- Tehçi, T., 2011, AISI 316 Serisi Ostenitik Paslanmaz Çeliklerde Kaynak Parametrelerinin Nufuziyete ve Mekanik Özelliklere Etkisi, Sakarya Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 1-202.
- Tımaç, G., 2006, Uçak Endüstrisinde Kullanılan Alüminyum Alaşımlarının Kaynak Yöntemi ile Kaynaklanabilirliğinin İncelenmesi, Marmara Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 1-179.
- Topçu, İ., 2019, MIG Kaynağı ile İşlem Gören 304 Ve 1040 Çeliklerin ITAB Bölgesindeki Mekanik Özelliklerin İncelenmesi, Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 34 (3), 171-182.
- Toyoda, M., Thaulow, J. G., ve Blauel, J. G., 1994, Strength mismatching and its influence on the performance of welded structures, Mismatching of Welds, ESIS 17. Mec. Eng. Publ., London, 335-350.
- Turhan, Ş. Ö., 2020, Faue Behavior Of Welded API 5L X70 Pipeline Steel, Middle East Technical University, Master's Thesis, 1-94.
- Tülbentçi, K., 1990, MIG-MAG Eriyen Elektrod ile Gazaltı Kaynağı, Gedik Holding, 1-208.
- Tülbentçi, K., 1993, Gazaltı Kaynağı MIG-MAG Kaynağı, Kaynak Tekniği Anonim Şirketi Yayınları.
- Uluocak, M. E., 2008, Hardox 450 Çeliklerinin MAG Kaynak Bölgesi Mikro yapı Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Marmara Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi 1-113.
- Uysal, A., 2010, Petrol ve Doğalgaz Boru Hattı Çeliklerinin Hidrojen Nedenli Çatlama Davranışı, Yıldız Teknik Üniversitesi, Doktora Tezi 1-154.
- Wang, J., Li, Y., Liu, P., ve Wu, H., 2004, Microstructure And Performance İn Diffusion-Welded Joints Of Fe3Al/Q235 Carbon Steel, Journal Of Materials Processing Technology, 145 (3), 294-298.
- Wang, S., ve Lin, S., 2019, Optimization On Ultrasonic Plastic Welding Systems Based On Two-Dimensional Phononic Crystal, Ultrasonics, 99, 105954.
- Weston, J., Jones, I. A., ve Wallach, E. R., 1998, June, Laser Welding Of Aluminium Alloys Using Different Laser Sources, In Proceedings Of The 6th International Conference On Laser And Power Beam Welding 15-20.
- Kaya, Y., Çayırhan, G., Bökü, M. ve Kahraman, N., 2020, Paslanmaz Çelik ile Düşük Karbonlu Çelik Malzemelerin MIG Kaynak Yöntemiyle Birleştirilebilirliğinin İncelenmesi, Engineering Sciences, 15 (2), 89-99.
- Yaşar, T., 2010, Radyografi Yöntemi ile Kaynak Dikişlerinde Hata Tespiti, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 1-102.

- Yılmaz, R., ve Tehçi, T., 2012, Ostenitik Paslanmaz Çeliklerin Kaynağında Kaynak Akımı ve Kompozisyonun Nufuziyete Etkisi, Sakarya University Journal Of Science, 16 (1), 53-61.
- Yılmaz, R., ve Usun, H., 2002, Mechanical Properties Of Austenitic Stainless Steels Welded By GMAW And GTAW, Journal Of Marmara Of Pure And Applied Sciences, 18 (3), 97-113.
- Yüce, C., 2018, Yüksek Mukavemetli Çelikler ile Alüminyum Alaşımlarının Lazer Kaynağı ile Birleştirilmesinde Kaynak Parametrelerinin Bağlantı Üzerine Etkilerinin İncelenmesi, Uludağ Üniversitesi, Doktora Tezi, 1-166.
- Yürük, A., Bozkurt, B., ve Kahraman, N., 2017, S235JR Karbon Çeliği ile AISI 430 Ferritik Paslanmaz Çeliğin MIG Kaynak Yöntemi ile Kaynak Edilebilirliğinin İncelenmesi, Sakarya University Journal Of Science (SAUJS)/Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 21 (2), 1-9
- Zambon, A., Ferro, P., ve Bonollo, F., 2006, Microstructural, Compositional And Residual Stress Evaluation Of CO2 Laser Welded Superaustenitic AISI 904L Stainless Steel, Materials Science And Engineering: A, 424 (1-2), 117-127.
- Zandinava, B., Bakhtiari, R., ve Vukelic, G., 2022, Failure analysis of a gas transport pipe made of API 5L X60 steel. Engineering Failure Analysis, 131, 105881.