

**T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**ALÜMİNYUM MIG KAYNAK UYGULAMALARINDA PULSE VE
DOUBLE-PULSE METOTLARININ ANALİZİ VE
KARŞILAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa Çağatay YILDIRIM

Enstitü Anabilim Dalı : OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Yusuf ÇAY

Şubat 2021

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ALÜMİNYUM MIG KAYNAK UYGULAMALARINDA PULSE VE
DOUBLE-PULSE METOTLARININ ANALİZİ VE
KARŞILAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa Çağatay YILDIRIM

Enstitü Anabilim Dalı : OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ

**Bu tez 01/02/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından
oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.**

JÜRİ	BAŞARI DURUMU
Jüri Başkanı: Prof. Dr. Yusuf ÇAY	Başarılı
Üye: Prof. Dr. Fatih ÇALIŞKAN	Başarılı
Üye: Prof. Dr. Ahmet ALP	Başarılı

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Mustafa Çağatay YILDIRIM

31/12/2020

TEŞEKKÜR

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. Yusuf ÇAY'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamda yönlendirme, bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım hocam Prof. Dr. Fatih ÇALIŞKAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Proje çalışması boyunca destek veren ve bütün imkanları sağlayan TIRSAN TREYLER A.Ş. Yönetim kuruluna teşekkür ederim.

İş hayatımda ve yüksek lisans eğitimimde bilgi ve deneyimlerini esirgemeyen, teşvik eden ve yönlendiren, maddi ve manevi olarak her türlü desteği sunan TIRSAN TREYLER A.Ş. Tanker Silo ve Lowbed Üretim Koordinatörü Çağatay Mehmet BOZKURT'a destekleri için teşekkürlerimi sunarım.

Proje çalışması boyunca bilgi ve deneyimlerini esirgemeyen TIRSAN TREYLER A.Ş. çalışma arkadaşlarım Kadir AYDEMİR'e, Gökhan ÖZCAN'a ve kaynak mühendisi Anıl ÇELİKEL'e teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, tüm eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyip motivasyonumu yukarıda tutmamı sağlayan, beni her konuda destekleyen değerli annem Öğretmen Serpil YILDIRIM'a, M.E.B. Müsteşar Yardımcısı babam Ferda YILDIRIM'a, Avukat ablam Melda YILDIRIM'a teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
TABLolar LİSTESİ.....	x
ÖZET.....	xi
SUMMARY	xii

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
1.1. Literatür Araştırması.....	3
1.2. Amaç.....	9

BÖLÜM 2.

ALÜMİNYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI.....	11
2.1. Alüminyumun Tarihçesi	11
2.2. Alüminyum Metali.....	12
2.3. Alüminyum ve Alaşımlarının Özellikleri	13
2.4. Alüminyum Alaşımları	14
2.4.1. Alaşım elementleri.....	14
2.4.2. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması.....	15
2.4.2.1. 5xxx serisi alüminyum alaşımları	17
2.4.2.2. 6xxx seri alüminyum alaşımları	18
2.4.3. Alüminyum alaşımlarının kullanım alanları.....	19

BÖLÜM 3.

KAYNAKLA BİRLEŞTİRME YÖNTEMLERİ	22
3.1. Kaynağın Tanımı	22
3.2. Kaynak Yöntemleri.....	22
3.2.1. Basınç kaynağı.....	22
3.2.2. Ergitme kaynağı.....	22
3.3. Gazaltı Kaynak Yöntemleri	24
3.3.1. TIG kaynağı	25

3.3.2. MIG/MAG kaynağı	27
3.3.2.1. Çalışma prensibi.....	28
3.3.2.2. Kaynak akım üreteçleri / Güç ünitesi.....	30
3.3.2.3. Koruyucu gaz ünitesi ve koruyucu gazlar	31
3.3.2.4. Elektrot ve besleme donanımı.....	36
3.3.2.5. Kaynak torçu ve kablo grubu	39
3.3.3. MIG kaynak parametreleri.....	42
3.3.3.1. Kaynak akımı	43
3.3.3.2. Ark gerilimi (Ark voltajı-Ark boyu)	44
3.3.3.3. Kaynak hızı	45
3.3.3.4. Serbest elektrot uzunluğu.....	46
3.3.3.5. Elektrot açısı.....	46
3.3.3.6. Elektrot (tel) çapı	47
3.3.3.7. Kaynak pozisyonu.....	47
3.3.4. Ark yoluyla metal iletim mekanizmaları.....	49
3.3.4.1. Kısa devre iletimi (kısa ark)	50
3.3.4.2. İri damla iletimi (uzun ark)	51
3.3.4.3. Sprey iletimi	52
3.3.4.4. Darbeli sprey iletimi (Palslı ark - Pulsed arc)	53
3.3.4.5. Çift darbeli sprey iletimi (Double Pulsed Arc)	55
3.3.4.6. Dönen sprey iletimi	57

BÖLÜM 4.

ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ KAYNAĞI.....	58
4.1. Alüminyum Alaşımlarının Kaynağında Kaynak Bölgeleri	59
4.2. Alüminyum Alaşımlarının MIG/GMAW Kaynağı	60
4.2.1. Akım ayarları ve sıvı metal transfer yöntemleri.....	60
4.2.2. Kaynak telleri	60
4.2.3. Kaynak öncesi işlemler.....	61
4.2.4. Koruyucu gazlar	61
4.2.5. Kaynağın uygulanması	61
4.3. Alüminyum Alaşımlarının Kaynağında Sorunlar.....	62
4.3.1. Gözeneklilik	63
4.3.2. Sıcak yırtılma.....	63

BÖLÜM 5.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	65
5.1. Malzemelerin Özellikleri	66
5.2. Kaynak Elektrodu ve Özellikleri	66
5.3. Kullanılan Kaynak Makinesi	67
5.4. Kaynak Hazırlıkları ve Kaynak Yöntemleri	68
5.5. Tahribatsız Deneyler.....	72
5.5.1. Kaynak sonrası sıcaklık testi	72
5.5.2. Kaynak sonrası distorsiyon ölçümü.....	73
5.5.3. Görsel test (VT -visual testing)	75
5.5.4. Radyografik test (RT- radiography testing).....	75

5.5.5. Sıvı penetrant metodu ile muayene (PT)	78
5.6. Tahribatlı Deneyler	80
5.6.1. Çekme deneyi	80
5.6.2. Eğme deneyi	82
5.6.3. Makro testi	84
5.6.4. Mikro yapı incelemesi	85
5.6.5. Sertlik testi	87

BÖLÜM 6.

DENEYSEL BULGULAR VE DEĞERLENDİRME	88
6.1. Kaynak Sonrası Sıcaklık İncelemeleri	88
6.2. Kaynak Sonrası Distorsiyon İncelemeleri	91
6.3. Görsel (VT -Visual Testing) Kaynak İncelemeleri	93
6.4. Radyografik Test (RT - Radiography Testing) İncelemeleri.....	98
6.5. Sıvı Penetrant (PT) Metodu İncelemeleri	102
6.6. Makro Test Sonuçları	104
6.7. Çekme Deneyi Sonuçları	108
6.8. Eğme-Basma Deneyi Sonuçları	113
6.9. Mikro Yapı Sonuçları	116
6.10. Sertlik Test Sonuçları	121

BÖLÜM 7.

TARTIŞMA VE ÖNERİLER	123
-----------------------------------	------------

KAYNAKLAR	127
ÖZGEÇMİŞ	134

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

(A)	: Isıl Genlik
°	: Derece
°C	: Celsius
A	: Akım
AA	: Alüminyum Alaşım
AC	: Alternatif Akım (Alternating current)
AWS	: Amerikan Kaynak Birliği (American Welding Society)
BM	: Ana Metal (Base Metal)
CEN	: Avrupa Standartlar Komitesi (European Committee For Standardization)
cm	: Santimetre
CTWD	: Temas Tüpünün İş Parçasına Uzaklığı (Contact Tube To Workpiece Distance)
d	: Kalınlık
DC	: Doğru Akım (Direct current)
DC-AW	: Doğru Akım Ark Kaynağı (Direct Current Arc Welding)
DCEP	: Doğru Akım Elektrot Pozitif (Direct Current Electrode Positive)
DIN	: Alman Standartlar Enstitüsü (Deutch Industrie Normen)
DP-GMAW	: Çift Darbeli Gaz Metal Ark Kaynağı (Double Pulsed-Gas Metal Arc Welding)
DP-MIG	: Çift Darbeli Metal İnert Gaz Kaynağı (Double Pulse-Metal Inert Gas)
EBW	: Elektron Işın Kaynağı (Electron Beam Welding)
EN	: Avrupa Standartları (European Standards)
FZ	: Ergime Bölgesi (Fusion Zone)
GMAW	: Gaz Metal Ark Kaynağı (Gas metal Arc Welding)
GTAW	: Gaz Tungsten Ark Kaynağı (Gas Tungsten Arc Welding)
h	: Uzunluk
HAZ	: Isıdan Etkilenen Bölge (Heat-Affected Zone)
Hz	: Hertz
ISO	: Uluslararası Standartlar Teşkilâtı (International Organization for Standardization)
ITAB	: Isının Tesiri Altındaki Bölge
Kg	: kilogram
KN	: Kilo Newton
l	: Çene Açıklığı
m	: metre
MAG-DP	: Çift Darbeli Aktif Gaz Kaynağı (Double Pulsed Metal Active Gas Welding)
MAG-P	: Darbeli Aktif Gaz Kaynağı (Pulsed Metal Active Gas Welding)

MIG	: Metal İnerit Gaz Kaynağı (Metal Inert Gas)
mm	: Milimetre
mm ²	: Milimetre Kare
MPa	: Megapaskal
ODPP	: Darbe Başına Bir Damlacık (One Drop Per Pulse)
PCGTAW	: Darbeli Akımlı Gaz Tungsten Ark Kaynağı (Pulse Current Gas Tungsten Arc Welding)
P-GMAW	: Darbeli Gaz Metal Ark Kaynağı (Pulsed-Gas Metal Arc Welding)
P-MIG	: Darbeli Metal İnerit Gaz Kaynağı (Pulsed-Metal Inert Gas)
PMZ	: Kısmen Ergimiş Bölge (Partially-Melted Zone)
PT	: Penetrant Testi (Penetrant Testing)
R	: Kalıp Yarıçapı
RSW	: Direnç Nokta Kaynağı (Resistance Spot Welding)
RT	: Radyografik Test (Radiographic Testing)
SIGMA	: İnerit Gaz Korumalı Metal Ark Kaynağı
sn	: Saniye
t	: Kaynak Akım Süresi
TB	: Isıl Temel (Thermal Base)
TF	: Isıl Frekans (Thermal Frequency)
TIG	: Tungsten İnerit Gaz Kaynağı (Tungsten Inert Gas)
TP	: Isıl Darbe (Thermal Pulse)
ts	: Malzeme Kalınlığı
TSE	: Türk Standartları
V	: Volt
VT	: Görsel Test (Visual Testing)
w	: Genişlik
WM	: Kaynak Metali (Weld Metal)
WPS	: Welding Procedure Specification
α	: Eğme Açısı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1: Kaynak yöntemleri Çimenoglu (t.y.)’ndan uyarlanmıştır.....	23
Şekil 3.2: Elektrik Ark Kaynağı.....	23
Şekil 3.3: TIG kaynağı.	26
Şekil 3.4: MIG/MAG kaynağının çalışma durumu.....	28
Şekil 3.5: MIG kaynağında bağlantılar ve arkın oluşumu	29
Şekil 3.6: MIG/MAG kaynak donanımı.....	29
Şekil 3.7: Çeşitli koruyucu gazlar için kaynak dikişi dış hattı ve nüfuziyet modelleri...	33
Şekil 3.8: İki makaralı bir tel besleyicinin şematik gösterimi.....	36
Şekil 3.9: GMAW torç kesiti	40
Şekil 3.10: Alaşımsız çelik elektrot ve alüminyum elektrot için elektrot besleme hızı ile kaynak akımı arasındaki ilişki.....	43
Şekil 3.11: GMAW kaynağında torçun detayı ve bazı kaynak terimleri.	45
Şekil 3.12: Kaynak açısının kaynak dikişine etkileri	46
Şekil 3.13: Temel kaynak pozisyonları.....	49
Şekil 3.14: MIG/MAG kaynağında iletim yöntemleri	50
Şekil 3.15: Kısa ark yöntemiyle metal iletimi.....	51
Şekil 3.16: İri damla iletim yöntemiyle ark kaynağı.....	52
Şekil 3.17: Eksenel sprej ark iletimi	53
Şekil 3.18: Darbeli sprej ark iletiminin akım karakteristiği	54
Şekil 3.19: Çift darbeli sprej ark iletiminin dalga karakteristiği	56
Şekil 3.20: Yüksek serbest tel uzunluğu nedeniyle dönen sprej iletimi	57
Şekil 4.1: Kaynaklı birleştirmede sıcaklığa bağlı olarak kaynak bölgelerinin değişimi, TWI, (n.d.)’den uyarlanmıştır.....	59
Şekil 4.2: Alüminyum alaşımlarının kaynağında gözenek oluşumu.....	63
Şekil 4.3: Alüminyum alaşımlarının kaynağında sıcak yırtılma örneği.....	64
Şekil 5.1: Kemppi WFX300 Kaynak Makinesi.	67
Şekil 5.2: Test01 kaynak yöntem spesifikasyonu PA.	68
Şekil 5.3: Test02 kaynak yöntem spesifikasyonu PB.	69
Şekil 5.4: PA pozisyonu yüzey hazırlık.	70
Şekil 5.5: PA pozisyonu yüzey hazırlık kaynak sonrası ters yön.	70
Şekil 5.6: PB pozisyonu yüzey hazırlık.	71
Şekil 5.7: GMAW, P-GMAW, DP-GMAW değişim durumu.	71
Şekil 5.8: İnfrared sıcaklık ölçüm cihazı.....	72
Şekil 5.9: Sıcaklık ölçüm metodu.	73
Şekil 5.10: PB pozisyonu distorsiyon ölçümü.	74
Şekil 5.11: PA pozisyonu distorsiyon ölçümü.	74
Şekil 5.12: Radyografik muayene düzeneği.....	76
Şekil 5.13: Röntgen test kabini.	77
Şekil 5.14: Röntgen filmi.	77

Şekil 5.15: Röntgen görüntüleme cihazı.	78
Şekil 5.16: Penetrant muayene işlem kademeleri	79
Şekil 5.17: Penetrant sıvısı ve geliştirici.	80
Şekil 5.18: Çekme deney parçası boyutları.	81
Şekil 5.19: Çekme test numuneleri.	81
Şekil 5.20: Çekme test cihazı.	82
Şekil 5.21: Eğme test parçası boyutları.	82
Şekil 5.22 : Eğme testi prensibi.	83
Şekil 5.23: Eğme deneyi test cihazı.	84
Şekil 5.24: Makro test numuneleri.	85
Şekil 5.25: Zımparalama cihazı.....	86
Şekil 5.26: Mikro yapı incelemeleri için kullanılan optik mikroskop.	86
Şekil 5.27: Vickers mikro sertlik ölçme cihazı.	87
Şekil 5.28: Mikro sertlik ölçümü yapılan noktalar.....	87
Şekil 6.1: PA pozisyonu kaynaklı numunelerin sıcaklık değişimleri.	89
Şekil 6.2: PB pozisyonu kaynaklı numunelerin sıcaklık değişimleri.....	90
Şekil 6.3: PA pozisyonu kaynaklı numunelerin distorsiyon açıları.	91
Şekil 6.4: PB pozisyonu kaynaklı numunelerin distorsiyon açıları.	92
Şekil 6.5: Kalınlığa göre distorsiyon değişimi.	93
Şekil 6.6: PA pozisyonu 10 mm VT sonuçları.....	94
Şekil 6.7: PA pozisyonu 8.1 mm VT sonuçları.....	94
Şekil 6.8: PA pozisyonu 4.5 mm VT sonuçları.....	95
Şekil 6.9: PA pozisyonu 4 mm VT sonuçları.....	95
Şekil 6.10: PB pozisyonu 10 mm VT sonuçları.....	96
Şekil 6.11: PB pozisyonu 8.1 mm VT sonuçları.....	96
Şekil 6.12: PB pozisyonu 4.5 mm VT sonuçları.....	97
Şekil 6.13: P B pozisyonu 4 mm VT sonuçları.....	97
Şekil 6.14: PA pozisyonu double pulse 10 mm RT sonucu.	98
Şekil 6.15: PA pozisyonu pulse 10 mm RT sonucu.....	99
Şekil 6.16: PA pozisyonu double pulse 8.1 mm RT sonucu.....	99
Şekil 6.17: PA pozisyonu pulse 8.1 mm RT sonucu.....	100
Şekil 6.18: PA pozisyonu double pulse 4.5 mm RT sonucu.....	100
Şekil 6.19: PA pozisyonu pulse 4.5 mm RT sonucu.....	100
Şekil 6.20: PA pozisyonu double pulse 4 mm RT sonucu.....	101
Şekil 6.21: PA pozisyonu pulse 4 mm RT sonucu.....	101
Şekil 6.22: PB pozisyonu 10 mm PT sonucu.....	102
Şekil 6.23: PB pozisyonu 8.1 mm PT sonucu.....	103
Şekil 6.24: PB pozisyonu 4.5 mm PT sonucu.....	103
Şekil 6.25: PB pozisyonu 4 mm PT sonucu.....	104
Şekil 6.26: PB 10 mm double pulse kaynak makro sonucu.....	105
Şekil 6.27: PB 10 mm pulse kaynak makro sonucu.....	105
Şekil 6.28: PB 8.1 mm double pulse kaynak makro sonucu.....	106
Şekil 6.29: PB 8.1 mm pulse kaynak makro sonucu.....	106
Şekil 6.30: PB 4.5 mm double pulse kaynak makro sonucu.....	106
Şekil 6.31: PB 4.5 mm pulse kaynak makro sonucu.....	107
Şekil 6.32: PB 4 mm double pulse kaynak makro sonucu.....	107
Şekil 6.33: PB 4 mm pulse kaynak makro sonucu.....	107
Şekil 6.34: Nüfuziyet değerlendirme kriteri.	108

Şekil 6.35: Çekme testi tamamlanmış numuneler.....	109
Şekil 6.36: 6061 serisi 4 mm çekme deneyi sonuçları.	110
Şekil 6.37: 5083 serisi 4.5 mm çekme deneyi sonuçları.	110
Şekil 6.38: 5083 serisi 8.1 mm çekme deneyi sonuçları.	111
Şekil 6.39: 5083 serisi 10 mm çekme deneyi sonuçları.	112
Şekil 6.40: Eğme testi tamamlanmış numuneler.....	113
Şekil 6.41: Eğme deneyinde eğme açısı gösterimi.....	114
Şekil 6.42: Eğme numunelerinin eğilme açıları.	115
Şekil 6.43: Test 9 mikro yapı görüntüleri.	117
Şekil 6.44: Test 10 mikro yapı görüntüleri.	118
Şekil 6.45: Test 11 mikro yapı görüntüleri.	119
Şekil 6.46: Test 12 mikro yapı görüntüleri.	120
Şekil 6.47: Bölgelere göre sertlik değerleri.....	122



TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1: Alüminyumun elementinin fiziksel durumu.	12
Tablo 2.2: Dövmel alüminyum alaşımlarının gösterimi.	16
Tablo 2.3: Döküm alüminyum alaşımlarının gösterimi.	17
Tablo 2.4: Alüminyum alaşımlarının ürün halleri ve kullanım alanları.	19
Tablo 3.1: GMAW için koruyucu gazlar ve gaz karışımları.....	35
Tablo 3.2: Kısa devre iletimi için koruyucu gazlar, özellikleri ve kullanım alanları.....	36
Tablo 3.3: GMAW için tavsiye edilen elektrotlar.....	39
Tablo 3.4 : Proses parametrelerindeki değişikliklerin kaynak özelliklerine etkileri.....	42
Tablo 4.1: Alüminyum alaşımlarında tipik kaynak problemleri ve çözüm önerileri	62
Tablo 5.1: 5083 ve 6061 alüminyum alaşımların kimyasal bileşimi	66
Tablo 5.2: 5083 ve 6061 Alüminyum alaşımların mekanik özellikleri	66
Tablo 5.3: AlMg5Mn kaynak telinin tipik Analizi (%).	66
Tablo 5.4: AlMg5Mn kaynak telinin mekanik özellikleri.	66
Tablo 5.5 : WFX 300 wire feeder kaynak makinesinin teknik özellikleri.	67
Tablo 5.6: Kullanılan malzemelerin metotları, ölçüleri, akım, volt ve elektrot besleme hız değerleri	69
Tablo 5.7: Basma deneyi teknik özellikleri.....	83
Tablo 6.1: Makro testi nüfuziyet sonuçları.	108
Tablo 6.2: Çekme deneyi özellikleri ve sonuçları.....	112
Tablo 6.3: Eğme deneyi sonuçları.....	116
Tablo 6.4: Ana metal, ITAB ve kaynak dikiş setlik değerleri.	121

ALÜMİNYUM MIG KAYNAK UYGULAMALARINDA PULSE VE DOUBLE-PULSE METOTLARININ ANALİZİ VE KARŞILAŞTIRILMASI

ÖZET

Kaynaklı birleştirme yöntemi günümüzde imalat sektörünün en önemli operasyonlarından biridir. Bu işlemler bir çok değişikene bağlı olarak farklılık göstermektedir.

Bu çalışmanın amacı üzerine az sayıda çalışma yapılan DP-GMAW metodunu otomotiv (yarı römork imalatı başta olmak üzere) ve benzeri sektörlerde sıkça kullanılan AA 5083 ve AA 6061 serisi alüminyum malzemeler üzerinde uygulamalarını yapmak ve çalışma sonucunda P-GMAW ve DP-GMAW metotlarının farklılıklarını ortaya koymaktır.

Bu iki birleştirme metodunu analiz ve karşılaştırma olarak çalışmak için; 4 mm, 4.5 mm, 8.1 mm ve 10 mm olmak üzere dört farklı kalınlık, AA 6061 ve AA 5083 olmak üzere iki farklı alüminyum malzeme cinsi, PA (yatay alın) ve PB (yatay köşe) olmak üzere iki farklı kaynak pozisyonu varyasyonları ile ele alınmıştır.

Kaynak yapılarını ve mekanik özelliklerini gözlemlemek için yapılan testler ve incelemelerde ise tahribatlı testler ve tahribatsız testler olmak üzere on farklı yöntemle analiz edilmiştir. Tahribatsız muayenelerde; kaynak sonrası sıcaklık ölçümü, kaynak sonrası distorsiyon ölçümü, görsel test (VT-visual testing), radyografik test (RT-radiography testing) ve sıvı penetrant muayeneleri (PT) olmak üzere beş farklı test uygulanmıştır. Tahribatlı muayeneler de ise; Makro testi, eğme testi, çekme testi, mikro yapı incelemesi ve mikro sertlik testi olmak üzere beş inceleme yapılmıştır.

Yapılan çalışmanın sonunda farklı koşullarda P-GMAW ve DP-GMAW metotlarına karşılaştırılmalı olarak bakılmış ve DP-GMAW metodunun hangi durumlarda avantajlı olduğu incelenmiştir.

Sonuç olarak iki metodun çekme ve RT test sonuçlarında benzer sonuçlar sergilediği görülmüştür. DP-GMAW metodunun P-GMAW metoduna göre her kalınlıkta düşük ısı girdisi olmakla birlikte buna paralel olarak kaynak distorsiyonlarının daha düşük seviyede kaldığı görülmüştür. Makro yapı incelemelerinde malzeme kalınlıkları azaldıkça çift darbeli MIG kaynağının nüfuziyet oranının arttığı incelenmiştir. Pulse metodu ile kaynatılan numunelerin eğme açılarının double pulse metoduna göre her kalınlıkta daha fazla olduğu da incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: P-GMAW, DP-GMAW, MIG kaynağı, AA 5083, AA 6061

ANALYSIS AND COMPARISON OF PULSE AND DOUBLE-PULSE METHODS IN MIG WELDING APPLICATIONS

SUMMARY

Welded joining method is one of the most important operations of the manufacturing sector today. These operations differ depending on many variables.

The aim of this study is to implement the DP-GMAW method -on which a small number of studies have been carried out until today - on AA 5083 and AA 6061 series aluminum materials frequently used in automotive (mainly semi trailer manufacturing) and similar sectors.

In order to analyze and compare these two merging methods; four different thicknesses as 4 mm, 4.5 mm, 8.1 mm and 10 mm, two different types of aluminum materials as AA 6061 and AA 5083, and two different PA (flat) and PB (horizontal vertical) welding position varieties were handled.

In tests and examinations to observe welding structures and mechanical properties, they were analyzed in eight different methods as destructive tests and non-destructive tests. In non-destructive examinations; five different tests were applied as follow; post-weld temperature measurement, post-weld distortion measurement, visual testing (VT-visual testing), radiographic testing (RT-radiography testing) and penetrant examinations (PT). In destructive examinations; five examinations were conducted as follow, macro test, tensile test, bend test, microstructural examination and micro hardness test.

At the end of this study, P-GMAW and DP-GMAW methods were analyzed comparatively under different conditions, and in which cases the DP-GMAW method would be advantageous was examined.

As a consequence, it was seen that these two methods gave similar results in tensile tests and RT tests. As well as DP-GMAW method had low heat input in every thickness comparing the P-GMAW, in paralel to this it was seen that weld shrinkages stayed in rather low level. It was viewed in macro structure analyses that as the material thickness decreased, the penetration ratio of the double pulsed MIG weld increased. It was also examined that the bend angle of samples that were welded with pulse method were more than it was in double pulse method in every thickness.

Keywords: P-GMAW, DP-GMAW, MIG welding, AA 5083, AA 6061

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Hafif mühendislik alaşımları havacılık, otomotiv ve denizcilik endüstrilerinde enerji tasarrufu ve esnek kullanım imkanları sayesinde önemli bir yer tutmaktadır. Bu uygulamalarda çelikler kademeli olarak hafif mühendislik alaşımları ile yer değiştirmektedir. Çeşitli hafif mühendislik alaşımları arasında, alüminyum alaşımları olağanüstü işlenebilirlikleri, yeterli mukavemetleri ve mükemmel korozyon önleyici özellikleri nedeniyle büyük ilgi çekmektedir (Wang ve Xue, 2017).

Al alaşımları otomobil endüstrisinde enerji tasarrufu ve emisyon azaltımı için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte alüminyum alaşımlarının kaynak tutumları, geleneksel ürün olan çeliklerden önemli ölçüde değişiktir. Alüminyum kaynağını etkileyen fiziksel özellikler: Yüksek ısı iletkenliği, yüksek katılaşma büzülmesi, güçlü oksitlenme kabiliyeti, yüksek termal genleşme katsayısı, ergimiş haldeyken yüksek hidrojen çözünürlüğü, nispeten geniş katılaşma sıcaklık aralıkları. Bu özellikler alüminyum alaşımlarının potansiyel kaynaklı uygulamalarını kısıtlayan kaynak derzinde eksik ergime, katılaşma çatlaması ve hidrojen kaynaklı gözeneklilik gibi sorunlara yol açmaktadır. Dahası, bir otomobilin gövde yapısında kullanılan Al alaşımları genelde, 2-3 mm kalınlığında ve ekstrüzyonlu levhalardır, bu da Al alaşımının kaynak işlemi sırasında stabiliteyi büyük ölçüde azaltır ve kaynak bağlantısının kalitesini kötüleştirir (Praveen ve Yarlagadda, 2005; Wang ve Xue, 2017; Yi ve diğ, 2015).

Kaynak ve birleştirme prosesleri, neredeyse üretilen her ürünün daha da geliştirilebilmesi için gerekli proseslerdir. Bununla birlikte, bu prosesler genellikle ürün maliyetinin önemli bir kısmını oluştururlar ve beklenenden daha fazla üretim zorlukları yaratırlar (Eagar, 1993).

Alüminyum ve alaşımlarının birleştirilmesinde birçok kaynak yöntemi kullanılabilir. Ancak koruyucu gaz veya gaz karışımlarının altında ergiyen elektrotla yapılan gazaltı kaynak tekniği (MIG/GMAW), her pozisyonda kaynak

edilebilmesi, hız, ısıl iletkenlik ve ergime gücünün daha iyi olması gibi sağladığı avantajlarla bu alaşımların birleştirilmesinde tercih edilmektedir. Bu yöntemle alüminyum alaşımlarının çoğu kaynak edilebilmektedir (Mercan, 2018).

Gaz metal ark kaynağı (GMAW) uzun bir geçmişi olan köklü bir kaynak işlemidir ve çok çeşitli metalik malzemeleri birleştirmek için kullanılmıştır. Geleneksel GMAW'da, yüksek kaynak kalitesi ve maksimum çalışma kolaylığı sağlayan spreysel metal iletimi sadece nispeten daha yüksek kaynak akımında kullanılabilmektedir. Geniş ısı ve kütle girdisi aralığında kontrollü bir spreysel iletim modu oluşturmak için, darbeli gaz metal ark kaynağı (P-GMAW) geliştirilmiştir (Yi ve diğ., 2015).

Ergimiş metal iletiminin ve ark kararlılığının kontrolü için darbeli akım ilk defa 1962'de Needham tarafından tanımlanmıştır. Bu yöntemde, düşük seviyeli temel akım ile yüksek seviyeli tepe akımı arasında akım değiştirilir. Darbeli GMAW işlemi sırasında, darbe akımının her bir döngüsünde elektrottan iş parçasına dolgu metalinden bir damla aktarılır. Bu işlem spreysel iletimli kaynak işleminden daha az sıçrama oluşturur ve daha yüksek kaynak hızları elde edilir. Darbeli GMAW tekniğinin alüminyum için kullanılması ayrıca daha iyi kontrol edilebilen ısı girişi, pozisyon dışı kaynaklarda kaynak metalinin daha kolay kontrolünü sağlar ve operatörün düşük tel besleme hızlarında ve akımlarda ince malzemeye kaynak yapmasına imkan tanır (Praveen ve Yarlağadda, 2005; Singh, 2012; Street, 1990).

Çift darbeli gaz metal ark kaynağı (DP-GMAW) yeni bir kaynak yöntemidir. Geleneksel darbeli GMAW (P-GMAW) ile karşılaştırıldığında, DP-GMAW, daha az gözeneklilik ve katılma çatlamasına duyarlılığın daha iyi olması gibi birçok avantaja sahiptir. Ayrıca DP-GMAW'de, kaynak metalinin hızla ergimesi ve katılması periyodik büzülme ve genişlemeye sebep olur, bu da alüminyum alaşımların kaynak bağlantılarında tane ve dendrit rafinasyonunu sağlar (Szłapa ve Marczak, 2020; Wang ve Xue, 2017).

DP-GMAW, P-GMAW farklı bir versiyonu olarak geliştirilmiştir. Bu yöntemde düşük frekanslı bir darbe, tek bir yüksek frekanslı darbe üzerine bindirilir. Kaynak akımı, düşük frekanslı darbe çevriminde ısı darbe ile temel darbe arasında değiştirilir, bu da kaynak havuzunun sıcaklığının ve geriliminin değişmesine yol açar. Sonuçta, kaynak banyosunda güçlü bir karıştırma etkisi ortaya çıkar. DP-GMAW işlemi ile ana metalin etkili bir

şekilde ergimesi ve düzenli dalgalanma yüzeyine sahip iyi bir kaynak bağlantısı elde edilebilir (Sen ve diğ, 2018; Yi ve diğ, 2015)

1.1. Literatür Araştırması

Kumar ve Raveendra (2016) tarafından darbeli ve darbeli olmayan akımlı TIG kaynağı kullanılarak AA6061 alüminyum alaşımı kaynağının özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu deneysel çalışmada, 3 mm kalınlığında levhalar, 6 Hz sabit frekansta darbeli ve darbesiz akım kullanılarak TIG/GTAW yöntemi ile kaynaklanmıştır. Çalışmada darbeli akımın kaynak özellikleri üzerindeki etkisini görmek amaçlanmıştır. Sonuçta, darbeli akım kaynak tekniğinin, ince sacların kaynağı için oldukça tercih edilen darbeli olmayan akım kaynağına kıyasla daha düşük maksimum sıcaklıklar ve daha düşük kalıntı gerilmeler verdiği bulunmuştur. Ayrıca darbeli akımda elde edilen kaynak dikişi, darbeli olmayan akımdakine kıyasla üstün gerilme özellikleri sergilemiştir. Gerilme ve sertlikteki artışın ana nedeni darbeli akımın neden olduğu daha ince tanelerin oluşumudur.

P-GMAW yönteminde genellikle her darbeye (pulsta) sadece bir damlacık ayrılması gerektiğine inanılır, bu da darbe başına bir damlacık (ODPP) olarak adlandırılır. P-GMAW'deki metal transfer davranışını araştırmak için çok fazla sayıda araştırma yapılmıştır. Bunlardan bir tanesi de Zhao ve diğ. (2019) tarafından darbeli gaz metal ark kaynağında darbe parametrelerinin damla transfer dinamiği ve ısı transfer davranışı üzerine etkisinin incelendiği araştırmadır. Bu çalışmada, faz alanı yöntemi çerçevesinde manyetohidrodinamik denklemlerin çözümüne dayanan sayısal bir model kullanılmıştır. Farklı tepe akımları ve süreleri (300 A-2,30 ms, 350 A-1,80 ms, 400 A-1,45 ms, 450 A-1,20 ms ve 500 A-1,00 ms) kullanılan çalışmada ortalama akım (170 A) aynen korunmuş ve buna göre elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, darbe parametrelerinin, damla transfer işleminin dinamiklerini güçlü bir şekilde etkilediğini, hatta transfer modunu darbe başına bir damlalıktan (ODPP) istenmeyen düzensiz bir desene değiştirdiğini göstermiştir. Daha yüksek akımlı ancak daha kısa süreli darbeler, askıdaki damlanın daha uzun bir şekil almasına, daha erken ayrılmasına ve ayrılan damlanın hızının çok daha yüksek olmasına neden olmuştur. Düşme hızının aksine, daha yüksek tepe akımı, ayrılan damlanın ortalama sıcaklığında hafif bir artışa neden olmuştur. Bu hafif artışın nedeni, tepe akımı ile sadece joule ısıtmanın artması, kabuk ısıtması ve ark

ısıtmasının ortalama akım tarafından idare edilmesidir ve bu akım farklı darbe parametreleri kullanılarak neredeyse sabit kalır (Zhao ve diğ, 2019).

AA7075 alüminyum alaşımasının (Al–Zn–Mg–Cu alaşımı) GTAW ve GMAW kaynağında, kaynak ergime bölgeleri, kaynak metalinin katılaşması sırasında hakim olan ısı koşulları nedeniyle tipik olarak kaba kolonik tane yapısı oluştururlar. Bu genellikle kaynağın mekanik özelliklerinin kötü olmasına ve sıcak çatlamaya karşı zayıf direnç göstermeye neden olur. Balasubramanian ve diğ, (2008) darbeli akım kaynağı ve kaynak sonrası yaşlandırma işleminin AA7075 alaşımındaki yorulma çatlağının büyüme davranışı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Ayrıca, ergime bölgesindeki taneler darbeli akım kaynak tekniği kullanılarak rafine edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla tek geçişli alın kaynağı uygulanacak 6 mm kalınlığında haddelenmiş plakalar kullanılmıştır. Dolgu metal AA5356 alüminyum alaşımıdır. Birleştirme için dört farklı kaynak tekniği kullanılmıştır: (i) sürekli akımlı GTAW (CCGTAW), (ii) darbeli akımlı GTAW (PCGTAW), (iii) sürekli akımlı GMAW (CCGMAW) ve (iv) darbeli akımlı GMAW (PCGMAW). Koruyucu gaz olarak saf argon kullanılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen verilere göre; darbeli akım, GTA kaynaklarında nispeten daha ince ve eş eksenli tane yapısına yol açmıştır. Tane rafinasyonu ile birlikte yorulma çatlak büyüme direncinde ve çatlak ömründe artış görülmüştür. Bağlantılara uygulanan kaynak sonrası yaşlandırma işleminin, yorulma çatlak büyüme direncini arttırmada faydalı olduğu bulunmuştur (Balasubramanian ve diğ, 2008).

Jaypuria ve diğ. (n.d.)'nin yaptığı çalışmada, ark uzunluğunun ve MIG proses parametrelerinin kaynak dikişi profili üzerindeki etkisi, darbeli MIG kaynağı (P-MIG) yapılan paslanmaz çelik levhada incelenmiştir. Bu çalışmada dikkate alınan parametreler, mukavemet ve kaynak bütünlüğünün belirlenmesinde önemli olduğu düşünülen nüfuziyet derinliği ve seyrelme yüzdesidir. Yapılan çalışmanın sonucuna göre, daha kısa ark uzunluğu, daha düşük kaynak hızı, temas tüpünün iş parçasına uzaklığının (CTWD) azalması ve daha yüksek tel besleme hızı, daha yüksek nüfuziyet derinliğini sonuç vermektedir.

Ti-6Al-4V alaşımasının darbeli ark kaynağında, ergimiş banyonun yüzey çökmesinin ve sıcaklığının incelendiği araştırmada bir modelleme çalışması yapılmış ve sonuçlar doğru akım ark kaynağı (DC-AW) ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre, darbeli ark basıncı aynı

akım seviyesinde daha büyük çöküntüler oluşturmuştur. Maksimum çöküntü, DC-AW'ye kıyasla 40 kHz'de %60 artmıştır. Derinlik yönünde büyük bir sıcaklık yayılması ortaya çıkmış ve darbeli ark daha fazla nüfuziyet sağlamıştır. Kenarlarda büyük sıcaklık gradyanı bulunurken ergimiş banyonun merkezinde daha düşük değerler elde edilmiştir.

Akımın çift darbeli MIG kaynak işleminde (DP-MIG) Al alaşımlı T-ekleminin morfolojisi üzerindeki etkisinin simülasyon ve deneylerle araştırıldığı çalışmada Yi ve diğ. (2015), geliştirdikleri simülasyon modelleri yardımıyla, farklı kaynak koşulları altında sıcaklık ve gerilim alanlarını simüle etmişlerdir. Deneylerde farklı kaynak akımlarındaki kaynaklı birleştirmelerin makro-morfolojisi ve mikro yapısı gözlenmiştir. Sonuçlar, en iyi durumun ortalama 90 A akımda ve 40 A akım farkında olduğunu göstermektedir. Bu durumda maksimum sıcaklık ergime noktalarından 200°C daha yüksek olmakta, yaklaşık 100°C sıcaklık farkı ve ısı darbe ve ısıl temel arasında 10 MPa'lık gerilim farkı ortaya çıkmaktadır. Uygun ergime ile birlikte bu koşullar altında, Al alaşımı, pürüzsüz balık pulu kaynak görünümüne ve daha ince mikro yapıya sahip olmaktadır (Yi ve diğ, 2015).

Çift darbeli gaz metal ark kaynağı (DP-GMAW) proses değişkenlerinin mikroyapısal bileşenler ve düşük karbonlu çelik kaynağının dikişinin sertliği üzerine etkisinin incelendiği araştırmada Sen ve diğ. (2018); ısı girişi, darbe frekansı ve ısıl darbe frekansındaki azalmanın kaynak metallerindeki inklüzyon hacmini ve iğnesel ferriti arttırdığını bulmuşlardır. İğnesel ferritin artması kaynak metallerinde daha yüksek sertliğe ve ince taneli mikroyapıya yol açmaktadır. Ayrıca daha düşük ısı girişi olduğunda ısıdan etkilenen bölgenin sertliği artmıştır.

4 mm kalınlığında dövme 6061-T6 ve dökme A356-T6 alüminyum alaşımlı levhaların darbeli MIG kaynağıyla yapılan farklı bağlantılarının mikroyapısının ve mekanik özelliklerinin araştırıldığı çalışmada (Nie ve diğ, 2018), birleşme bölgelerinin çekme mukavemeti, 6061 alüminyum alaşımının %83'ü olan 235 MPa'a ulaşmış ve daha sonra diğer kaynak parametreleri sabit tutulup hareket hızı arttırıldığında azalmıştır. 6061 alaşımı tarafında kısmen ergimiş bölgede (PMZ) tane sınırı sıvılaşması ve segregasyon meydana gelmişken, A356 alüminyum alaşımı tarafında kısmen ergimiş bölgede Fe bakımından zengin kırılğan fazlar gözlenmiştir. Mikro sertlik, A356 altlığın yakınındaki ısıdan etkilenen bölgede (HAZ) minimum olmuştur.

Harinadh ve diğ. (2017), çökeltme sertleştirilmesi görmüş Ni bazlı süper alaşım Inconel 600 ve Inconel 600'ün darbeli akımlı gaz tungsten ark kaynağı (PCGTAW) ile çok katlı olarak kaynaklanabilirliğini ve ortaya çıkan mikro yapıyı ve mekanik özellikleri incelemiştir.

Tek darbeli ve çift darbeli gazaltı ergitme kaynaklarının farklı özelliklerinin karşılaştırılması hem çelikler hem de alüminyum alaşımları ele alınarak incelenmiştir.

AA5754 alüminyum alaşımının çift darbeli gaz metal ark kaynağını (DP-GMAW) inceleyen Liu ve diğ. (2013a), DP-GMAW'nin metal damlacık iletimine, kaynak banyosu profiline, kaynak dikişi geometrisine ve kaynak bölgesinin mekanik özellikleri üzerine etkisini araştırmışlardır. Metal iletim davranışını ve kaynak banyosu profilini ortaya çıkarmak için yüksek hızlı bir kamera, kaynak işlemi sırasındaki dalga formunu kaydetmek için kendi geliştirdikleri bir elektrik sinyali alma sistemini kullanmışlardır. Sonuçlar göstermiştir ki, DP-GMAW'daki metal iletimi, kaynak banyosu profili ve kaynak dikişi geometrisi P-GMAW'den önemli ölçüde farklıdır. Mikroyapı sonuçlarına göre, kaynak dikişinin tane boyutu termal darbe frekansının artmasıyla azalmış ve ötektik çökelti (Mg₂Si) ergime bölgesinde homojen olarak dağılmıştır. Kaynaklı bağlantının mekanik özellikleri geliştirilmiştir.

Alüminyumun gazaltı ark kaynağında çift darbenin gözeneklilik oluşumuna etkisi Da Silva ve Scotti (2006) tarafından incelenmiştir. Darbeli GMAW (P-GMAW), alüminyum kaynağında gözenekliliği en aza indirmek için etkili bir alternatif olarak kabul edilmiştir. GMAW tekniğinin bir varyasyonu olan çift darbeli GMAW (DP-GMAW) tekniğinin bazı avantajlarının gözeneklilik üzerinde de etkili olup olmayacağı bu çalışmada karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Gözeneklilik ölçümü gravimetrik ve radyografik yöntemlerle yapılırken, gözenekler makrografik analizlerle karakterize edilmiştir. Sonuçlara göre, çift darbeli GMAW tekniği teorik olarak gözenekliliği artırmak için yüksek potansiyele sahip olmasına rağmen, darbeli GMAW tekniği ile karşılaştırıldığında alüminyum kaynağında gözenek oluşumunu arttırmamıştır. DP-GMAW'nin sağladığı bu etkinin endüstriyel uygulamalarda daha iyi ortaya çıkacağı düşünülmektedir.

Wang ve diğ. (2018) üç boyutlu, geçici, sayısal bir DP-GMAW modeli geliştirmiş ve yapılan deneylerle bu modeli test etmişlerdir. Akım genliğinin değişimi; geometri, soğutma hızları, katılma parametreleri ve mikroyapı gibi kaynak özelliklerinin

ayarlanmasını sağladığından bu çalışmada akım genliği değişiminin AA1060 alüminyum alaşımının kaynağındaki rolü hem deneysel hem de teorik olarak incelenmiştir. Dolgu metali olarak ER1070 kullanılmıştır. İş parçası plaka şeklinde olup, koruyucu gaz saf argondur. Akım genliği 0, 30, 40, 50 olarak değiştirilmiş ve tek darbeli ve çift darbeli kaynak yöntemleri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, sabit bir ısı girdisi ile DP-GMAW kullanıldığında soğutma hızlarının arttırılabileceğini ve tane boyutunun küçültülebileceğini göstermiştir. DP-GMAW'ın mevcut genliği, ısı girişini değiştirmeden ortalama soğutma hızını ayarlamak için kullanılabileceği görülmüştür. Tek darbeli kaynağın aksine, çift darbeli kaynak ergime bölgesinin geometrisinin, bölgesel soğuma hızlarının ve katılma parametrelerinin zamana bağlı olarak önemli ölçüde değişimine neden olmuştur. Çift darbeli gaz metal ark kaynağında katılma sırasındaki büyüme hızı ve soğuma hızı, tek darbelilerden önemli ölçüde daha yüksek bulunmuştur. Alüminyum alaşımının ergime bölgesinin mikroyapı incelemeleri göstermiştir ki, çift darbeli gaz metal ark kaynağı sırasında daha hızlı soğutma hızı ile uyumlu olarak daha ince taneler ortaya çıkmıştır.

Benzer bir çalışmada, soğutma hızlarının zamana bağlı değişimleri, katılma sırasındaki büyüme hızı ve kaynak geometrisi, AA6061 alüminyum alaşımı hem tek hem de çift darbeli kaynak yapılarak incelenmiştir (Wang ve diğ., 2017). Çift darbeli kaynak sırasında ergiyik banyonun periyodik büzülmesi ve genişlemesi, kaynak metalinin olağandışı yeniden ergime ve yeniden katılma davranışı göstermesine yol açmıştır. Katılma hızları ve soğutma hızları, çift darbeli gaz metal ark kaynağı için, tek darbeli kaynağa göre önemli ölçüde daha yüksek olmuş ve bu farklılıklar, çift darbeli kaynak sırasında mikro yapının önemli ölçüde iyileşmesini sağlamıştır.

AISI: 310S östenitik paslanmaz çeliklerin P-GMAW ve DP-GMAW yöntemleri ile kaynaklanarak hazırlanan kaynak derzlerinin enine büzülmesi, mekanik ve metalurjik özellikleri Mathivanan ve diğ. (2015) tarafından araştırılmıştır. Deneyler sonucunda; DP-GMAW yöntemi ile hazırlanan kaynak derzlerinin enine büzülmesi, P-GMAW ile hazırlananlara nispeten daha düşük çıkmıştır. DP-GMAW işlemi AISI: 310S östenitik paslanmaz çeliklerin kaynak derzlerinin mekanik ve metalurjik özelliklerini iyileştirmiştir. DP-GMAW işlemi ile elde edilen kaynak derzlerinin geliştirilmiş kalitesi, öncelikle darbeli akım ve ısı darbenin (düşük frekanslı darbe) kombine etkisinden kaynaklanmaktadır. Isıl darbe süresi boyunca tel besleme hızında bir dalgalanma vardır

bu da kaynak akımında daha fazla artış ve ark voltajında azalma ile sonuçlanır. Düşük frekanslı darbe süresi boyunca kaynak akımı ve ark gerilimi arasındaki bu senkronizasyon nedeniyle, DP-GMAW birikintisi, P-GMAW birikintisine kıyasla nispeten daha fazla termal şok verir, böylece ısı girişi azalır ve kaynak bağlantılarının özellikleri gelişir.

Wu ve diğ. (2018), yüksek güçlü ve çift telli GMAW sırasında tek ve çift darbelerin kaynak bağlantılarının mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerine etkilerini araştırmışlardır. Deneylerde Q235 yumuşak çelik plakalar 1,6 mm çapında H08Mn2SiA dolgu telleri kullanılarak saf argon korumasında kaynak edilmiştir. Sonuçlar, yüksek güçlü çift telli tek ve çift darbeli GMAW yöntemiyle kararlı bir kaynak elde edilebileceğini göstermiştir. Ayrıca, yüksek kaliteli kaynak dikişleri hafif sıçramalarla, dikişaltı ergimesi veya tümsek olmadan elde edilebilmiştir. Çift telli çift darbeli MAW'nin çift telli tek darbeli GMAW ile karşılaştırıldığında daha kararlı olduğu, daha mükemmel kaynak şekli verdiği ve daha yüksek mikro sertlik sağladığı belirlenmiştir. Çift telli çift darbeli GMAW sırasında güçlü ve zayıf darbelerin kaynak havuzunu karıştırmasının, önemli ölçüde balık pulu şeklinde birikintiler üretebileceği ve taneleri rafine ederek daha yüksek sertlikte daha ince taneli mikroyapı elde edilebileceği bulunmuştur.

Subrammanian ve diğ. (2019)'nin yaptıkları çalışmada, AISI 409M ferritik paslanmaz çeliğin direnç nokta kaynağının (RSW) mekanik performansı üzerine çift darbe akımının etkisi araştırılmıştır. Kaynağın yük taşıma kapasitesi ve enerji absorblama kapasitesi ölçülmüş ve tek darbe akımı ile kaynaklanmış örneklerle karşılaştırılmıştır. Bulunan sonuçlara göre; ikinci bir darbe akımının eklenmesiyle, AISI 409M direnç nokta kaynaklı bağlantıların kırılma yükü ve enerji emme kapasitesi gibi mekanik özellikleri sırasıyla %20 ve %21 oranında iyileşmiştir. Ayrıca çift darbeli akımın kullanılmasıyla süneklik oranında iyileşme ancak ergime bölgesindeki sertlik değerlerinde hafif bir düşüş gözlenmiştir.

Lean ve diğ. (2003) tarafından takviye edilmemiş alüminyum alaşımı (AA6082) ile AA6092/SiC/25p kompoziti arasındaki kaynaklanabilirlik, dolgu metali olarak takviye edilmemiş Al-5Mg (ER5356) ve Al-5Si (ER4043) alaşımları kullanılarak incelenmiştir.

Farklı malzemelerin kaynağı ile ilgili benzer bir çalışmayı Hasanniah ve Movahedi (2018) yürütmüştür. Al-Mg alaşımlı levha, Al-Si dolgu metali kullanılarak darbeli gaz

tungsten ark kaynağı (P-GTAW) yöntemiyle alüminyum kaplı çelik levhaya kaynak edilmiş ve ısı girdisinin, kaynakların mikroyapısı ve kayma-gerilme mukavemeti üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Szłapa ve Marczak (2020), darbeli (MAG-P) ve çift darbeli MAG-DP) aktif gaz kaynağı sırasında ölçülen ultrason basıncı seviyelerinden ark kaynağı gürültü değerlendirmesi yapmışlardır.

Türkiye’de yapılan yüksek lisans tez çalışmaları ve doktora tez çalışmaları incelendiğinde, gazaltı ark kaynağı üzerine yapılmış çok fazla sayıda tez çalışmasının bulunduğu ancak darbeli kaynak üzerine oldukça az sayıda tez yapıldığı anlaşılmıştır.

Bunlardan ilki Muzafferoğlu (2008)’nun yaptığı yüksek lisans tezi olup, 1020 çeliğine, kaynak teli olarak SG2 kullanılarak, koruyucu gaz karışımı altında (%93 Ar + %5 CO₂ + %2 O₂) darbeli akımla MIG/MAG kaynağı uygulamıştır. Deneylerde pik akımı değişiminin, farklı damla büyüklüklerinin, tel besleme hızının ve serbest tel boyu farklılıklarının sinerjik kontrolü olan bir makinede kaynak dikişi yapısına etkisi incelenmiş ve geometride oluşan farklılıklar gözlemlenmiştir.

İkinci tez; Al-Helli (2013) tarafından, TIG tekniğinde kullanılan farklı darbe ve akımların Ti-6Al-4V alaşımının mikroyapısı üzerine olan etkilerini araştırmak üzere yapılan yüksek lisans çalışmasıdır.

Üçüncü tez çalışması ise, Arslan (2019) tarafından gerçekleştirilmiş olup, S690QL ve XAR 400 kalite çelik malzemeler, ER110SG kaynak teli kullanılarak sinerjik kontrollü darbeli MIG/MAG T-bağlantı kaynağı yapılmış ve tel besleme hızına bağlı olarak dikiş geometrisinin ve kaynak parametrelerinin nasıl değiştiği incelenmiştir.

1.2. Amaç

Bu çalışmanın amacı bir çok sektörle beraber otomotiv sektöründe; özellikle yarı römork imalatında kullanılan 4 mm AA6061, 4.5 mm AA5083, 8.1 mm AA5083 ve 10 mm AA5083 gibi iki farklı seride ve dört farklı kalınlıkta alüminyum alaşım levhalara aynı kalınlıktaki malzemelere parametreler ve şartlar değiştirilmeden aynı şartlar altında PA ve PB pozisyonlarında darbeli (pulsed) ve çift darbeli (double-pulsed) MIG kaynak yöntemleri uygulayarak farklarını karşılaştırmaktır.

Çalışmada temel olarak MIG kaynak yöntemlerinin ele alınmasının başlıca sebepleri; seri üretim şartlarında TIG kaynağına göre daha hızlı olması ve daha az maliyetlerle uygulanabilir olmasıdır.

İki metodun karşılaştırmanın yapılabilmesi için birtakım testler ve gözlemlerin yapılması hedeflenmiştir. Deneyler; tahribatlı muayeneler ve tahribatsız muayeneler olmak üzere iki ana başlıkta detaylandırılacaktır. Tahribatlı muayenelerde PA pozisyon kaynaklar için çekme dayanımlarına ve eğme açılarına, PB pozisyon kaynaklar için makro yapı incelemeleri yapılacaktır. Tahribatsız muayenelerde sıcaklık ve distorsiyon kontrolleri hem PA hem PB kaynakları için, radyografik test (RT) PA pozisyon kaynaklar için, görsel test (VT) hem PA hem PB pozisyonu kaynaklar için, sıvı penetrant metodu ise sadece PB pozisyonunda gerçekleştirilen kaynaklar için uygulanacaktır.

Tüm bu deneyler ve testler sonucunda elde edilen veriler değerlendirilecek olup P-GMAW ve DP-GMAW metodlarının birbirlerine karşı durumları yorumlanacaktır.

BÖLÜM 2. ALÜMİNYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI

2.1. Alüminyumun Tarihçesi

Alüminyum, yer kabuğunun %8'ini oluşturur, bu yüzden yer kabuğunda en sık rastlanan üçüncü element ve en bol miktarda bulunan metalik elementtir. Üretimi, 1965'ten itibaren bakır üretimini aşmış ve son elli yıldır sadece endüstriyel kullanımında demirden sonra ikinci sırada yer almaktadır. Alüminyum elementel halde bulunmaz, her zaman kimyasal bileşik halindedir. İngiltere'de 1808 yılında Sir Humphry Davy tarafından saf olmayan alümina formunu ilk kez tanımlanmıştır. Alüminyum üretimi için ilk ticari işlem 1854 yılında Henri Sainte - Claire Deville tarafından Wöhler prosesinin geliştirilmiş bir versiyonu kullanılarak oluşturulmuştur. Bununla birlikte, metal hala çok pahalıydı ve sonraki 30-40 yıl boyunca, maliyetlerin azaltılabileceği daha ekonomik süreçler geliştirmek için çok sayıda girişimde bulunuldu (Habashi, 2003; Lumley, 2011).

1886'da elektrik enerjisi üretmek için büyük ölçekli ekipman geliştirilmesinin ardından, Amerika Birleşik Devletleri'nden Charles Martin Hall ve Fransa'dan Paul L.T Héroult (yani Hall-Héroult prosesi) tarafından neredeyse aynı anda Al_2O_3 'ün doğrudan elektrolitik ayrışması için yeni bir yöntem geliştirildi. Elektrik akımı, 980-1000°C sıcaklıkta çözülmüş Al_2O_3 içeren erimiş kriyolitten geçirildiğinde katotta erimiş alüminyumun biriktiğini ve karbon anotla karbondioksitin serbest kaldığını keşfettiler. Bu, büyük bir ilerleme sağladı çünkü yaklaşık 1890'dan itibaren alüminyumun ekonomik olarak üretilmesini mümkün kıldı. Sürecin önemli bir aşaması, boksit cevherinden alümina (Al_2O_3) elde edilmesiydi, bunu yapmak için etkili bir yöntem 1888'de Karl Joseph Bayer tarafından geliştirildi. Bayer ve Hall-Héroult prosesleri, ticari miktarlarda alüminyum üretimi için en ekonomik yöntemler olmaya devam etmektedir ve birincil alüminyum endüstrisinin temelini oluştururlar (Habashi, 2003; Lumley, 2011).

Alüminyum üretimindeki bu gelişmelere paralel olarak 1890'lı yıllarda ilk içten yanmalı motorla çalışan araçlar ortaya çıktı ve alüminyum, otomotiv malzemesi olarak artan bir

mühendislik değeri haline gelmeye başladı. Ayrıca uzun mesafeli iletim ve enerji üretim alanlarından elektrik enerjisi sağlayan havai kablo ağını destekleyen kulelerin inşası için çok büyük miktarlarda hafif iletken metal gerekiyordu. Wright kardeşler birkaç on yıl içinde alüminyum endüstrisi ile ortaklaşa büyüyen tamamen yeni bir endüstrinin doğuşunu sağladı, bunlar; uçaklar, motorlar ve sonrasında füze gövdeleri, yakıt hücreleri ve uydu bileşenleri için yapısal olarak güvenilir, güçlü ve kırılmaya dayanıklı parçaların üretimi idi. Alüminyum endüstrisinin büyümesi bu gelişmelerle sınırlı kalmadı. Alüminyumun ilk ticari uygulamaları ayna çerçeveleri, ev numaraları ve servis tepsileri gibi yeni ürünlerdi. Mutfak aletleri de önemli bir erken pazardı. Zamanla, alüminyum, modern yaşamın hemen hemen her alanında doğrudan veya dolaylı kullanılarak uygulama çeşitliliğiyle sayesinde oldukça büyüdü (Rooy, 1990).

2.2. Alüminyum Metali

Alüminyum periyodik tablonun 3. grubunda yer alan kimyasal bir elementtir. Atom numarası 13, atom ağırlığı C^{12} 'ye göre 26,9812, O^{16} 'ya göre 26,98974'tür. Alüminyum gümüş-beyaz renge sahiptir. Doğal izotopları yoktur. Alüminyum oksijenle bir araya geldiğinde 4 ya da 6 koordinasyon numarasına sahip olur. İçeriğindeki safsızlıklara bağlı olarak alüminyum, Amerikan standardına göre 5 gruba ayrılır ve saflık derecesine göre de fiziksel özellikleri değişiklik gösterir (Tablo 2.1) (Sverdlin, 2003):

Tablo 2.1: Alüminyumun elementinin fiziksel durumu.

	Saflık				
Özellik	99,999	99,990	99,800	99,500	99,000
Ergime noktası, °C	-	660,2	-	-	657,0
Kaynama noktası, °C	-	2480	-	-	-
Ergime gizli ısı, cal/g	-	94,6	-	-	93,0
Özgül ısı 100°C'de, cal/g	-	0,2226	-	-	0,2297
Yoğunluk 20°C'de, g/cm ³	2,7	2,7	2,71	2,71	-
Elektrik direnci 20°C'de, $\mu\Omega$ -cm	2,63	2,68	2,74	2,8	2,87
Özdirenç sıcaklık katsayısı	-	0,0042	0,0042	0,0041	0,0040
Isıl genleşme katsayısı $\times 10^6$ (20-100°C)	-	23,86	23,5	23,5	23,5
Isıl iletkenlik ör. 100°C'de birimler	-	0,57	0,56	0,55	0,54
Yansıtma (toplam), %	-	90	89	86	-
Elastiklik modülü, lb/in ² $\times 10^{-6}$	-	9,9	-	-	10,0

2.3. Alüminyum ve Alaşımlarının Özellikleri

Alüminyumun en çarpıcı özellikleri arasında en önemlisi onun çok yönlü olmasıdır. Rafine edilmiş yüksek saflıkta alüminyumdan en karmaşık alaşımlara kadar alüminyumun her türünde çok çeşitli fiziksel ve mekanik özellikleri geliştirmek mümkündür. Üç yüzden fazla alaşım yaygın olarak bilinmektedir ve uluslararası ve tedarikçi/tüketici ilişkileriyle birçok ek varyasyon geliştirilmiştir. Birçok teknolojik alanda bu metali ve alaşımlarını ekonomik ve çekici yapan özellikler; görünüm, hafiflik, üretilebilirlik, fiziksel özellikler, mekanik özellikler ve korozyon direncidir.

Alüminyumun yoğunluğu sadece 2,7 g/cm³ olup, çelik (7,83 g/cm³), bakır (8,93 g/cm³) veya pirinç (8,53 g/cm³)'in yaklaşık 1/3'ü kadardır. Atmosfer, su (tuzlu su dahil), petrokimya ve birçok kimyasal sistem dahil olmak üzere çoğu ortamda mükemmel korozyon direnci gösterebilir. Alüminyum yüzeyler yüksek oranda yansıtıcı olabilir. Işıma enerjisi, görünür ışık, ısıma ısı ve elektromanyetik dalgalar verimli bir şekilde yansıtılırken eloksal ve koyu eloksal yüzeyler yansıtıcı veya emici olabilir. Parlatılmış alüminyumun geniş bir dalga boyu aralığında yansıma yapması, çeşitli dekoratif ve fonksiyonel kullanımlar için tercih edilmesini sağlar.

Alüminyum tipik olarak mükemmel elektriksel ve termal iletkenlik gösterir, ancak yüksek derecede elektriksel dirence sahip spesifik alaşımlar da geliştirilmiştir. Alüminyum genellikle, eşdeğer ağırlık temelinde bakırın neredeyse iki katı olan elektrik iletkenliği için tercih edilir. Elektrik iletiminde yüksek iletkenlik ve mekanik mukavemet gereksinimleri, uzun hatlı, yüksek voltajlı, alüminyum çelik özlü takviyeli iletim kablosu kullanılarak karşılanabilir. Alüminyum alaşımlarının ısı iletkenliği bakırın yaklaşık %50 ila 60'ı kadardır ve ısı eşanjörleri, buharlaştırıcılar, elektrikle ısıtılan cihazlar, mutfak aletleri, otomotiv silindir kafaları ve radyatörler için avantajlıdır.

Alüminyum ferromanyetik değildir, bu da elektrik ve elektronik endüstrileri için önemli bir özelliktir. Yanıcı veya patlayıcı madde kullanımı veya maruziyeti içeren uygulamalarda önemli olan bir özellik olan kıvılcım almama (nonpiroforik) özelliğine sahiptir. Alüminyum ayrıca toksik değildir ve rutin olarak yiyecek ve içecek kaplarında kullanılır. Saf alüminyum ve bazı alüminyum alaşımları, son derece düşük mukavemet ve sertliğe sahipken, bazı alüminyum alaşımları mukavemet olarak yapı çeliklerinden üstündür (Rooy, 1990).

Çeliklerle bir karşılaştırma yapmak gerekirse alüminyum ve alaşımlarının iyi ve kötü yönleri şöyle sıralanabilir:

İyi özellikler: Hafiflik, paslanmazlık, ekstrüzyona uygunluk, kaynak edilebilirlik, işlenebilirliğin yüksek olması, yapışkanlı birleştirmeye uygunluk, kriyojenik işlemlere uygunluk.

Kötü özellikler: Fiyatı, bükülmesinin kolay olması, sıcaklık dayanımının düşük olması, bazı alaşımların kaynağında ısıdan etkilenen bölgede yumuşama, çatlak oluşma ihtimalinin yüksekliği, termal genleşmesinin fazla olması, elektrolitik korozyona yatkınlık, elastik sehim yapması (Dwight, 1999).

2.4. Alüminyum Alaşımları

Alüminyumun yapısal bir metal olarak kullanılabilmesi için uygun alaşımların geliştirilmesi zorunluydu çünkü saf metal oldukça dayanıksızdı. Alaşım geliştirmenin öncüsü, yaşlandırma sertleşmesini keşfeden Alman metalurjist Alfred Wilm'di. Bazı alüminyum alaşımları ısıtılma işleminden (su verme) hemen sonra hala dayanıksız olmasına rağmen, oda sıcaklığında birkaç gün kaldığında yavaşça sertleştiğini keşfetmişti. Bu davranışı ilk olarak 1903'te %4 Cu içeren bir alaşım ile kanıtladı. Daha fazla çalışma daha güçlü alaşımların bulunmasına yol açtı ve sonunda 1909'da hafif çelik kadar iyi özelliklere sahip bir alaşım üretti. Bu bir Al-CuMgMn bileşimiydi ve ona “duralumin” adını verdi. Bugün 2xxx serisi alaşım grubu dediğimiz alaşımların başlangıcıydı. 1939'a gelindiğinde, günümüzde bilinen bütün ana alaşımlar, bir tanesi yani kaynak edilebilir 7xxx serisi alaşım hariç geliştirilmişti. Bu da savaştan sonra etkin bir şekilde geliştirildi (Dwight, 1999).

2.4.1. Alaşım elementleri

Başlıca alaşım elementleri bakır, silikon, manganez, magnezyum, lityum ve çinkodur. Spesifik özelliklere ulaşmak için nikel, krom, titanyum, zirkonyum ve skandiyum gibi elementler az miktarda ilave edilebilir. Diğer elementler de istenmeyen safsızlıklar olarak küçük miktarlarda mevcut olabilir. İz veya kalıntı elementler olarak bilinen bu elementlerin mekanik özellikler üzerinde hiçbir yararlı etkisi yoktur ve alüminyum

üreticileri bunları ürünlerinden çıkarmaya çalışırlar. Alaşım elementlerinin ana etkileri aşağıdaki gibidir:

- Magnezyum (Mg): Katı çözeltili sertleşmesi ile mukavemeti artırır ve deformasyonla sertleşme kabiliyetini geliştirir.
- Manganez (Mn): Katı çözeltili sertleşmesi ile mukavemeti artırır ve deformasyonla sertleşme kabiliyetini geliştirir.
- Bakır (Cu): Mukavemette önemli artışlar sağlar, çökeltme sertleşmesine izin verir, korozyon dayanımını, sünekliği ve kaynaklanabilirliği azaltır.
- Silisyum (Si): Dayanıklılığı ve sünekliği artırır, magnezyumla birlikte çökeltme sertleşmesine imkân tanır.
- Çinko (Zn): Mukavemeti ciddi ölçüde artırır, çökeltme sertleşmesine izin verir, stres korozyonuna neden olabilir.
- Demir (Fe): Saf alüminyumun mukavemetini artırır, genellikle kalıntı element olarak bakılır.
- Krom (Cr): Stres korozyon dayanımını artırır.
- Nikel (Ni): Yüksek sıcaklık dayanımını artırır.
- Titanyum (Ti): Dolgu metallerinde tane inceltici element olarak kullanılır.
- Zirkonyum (Zr): Dolgu metallerinde tane inceltici element olarak kullanılır.
- Lityum (Li): Mukavemeti ve Young modülünü önemli ölçüde artırır, çökeltme sertleşmesi elde eder, yoğunluğu azaltır.
- Scandium (Sc): Yaşlandırma sertleşmesi ile dayanımı önemli ölçüde artırır, kaynak dolgusunda tane incelticidir.
- Kurşun (Pb) ve Bizmut (Bi): Serbest işleme alaşımlarında talaş oluşumuna yardımcı olur (Mathers, 2002).

2.4.2. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması

Alüminyum alaşımları döküm ve dövme ürünler olmak üzere iki ana sınıfa ayrılabilir. Bu iki sınıf, kimyasal bileşime ve temper işaretlerine göre alt gruplara ayrılabilir. Temper işaretleri, alaşımın durumunu, yani alaşımın geçirdiği soğuk işleme miktarını veya ısıtma işlem koşulunu tanımlamak için kullanılır. Bu işlemler; çözeltili ısıtma işlemi, su verme ve çökeltme veya yaşlandırma sertleşmesini içerir. Döküm ya da dövme olsun bu tip işlemlerden geçen alaşımlara ısıtma işlem görebilir alaşımlar denir. Çok sayıda diğer dövme

bileşimler, genellikle özelliklerinin geliştirilmesi için çeşitli tavlama işlemleriyle birlikte mekanik indirgeme yoluyla sertleşmeye uğratılır. Bu alaşımlara deformasyon sertleşmesi (pekleşme) gören alaşımlar denir. Bazı döküm alaşımları esasen ısıtılma işlemine tabi tutulamaz ve sadece döküldüğü haliyle kullanılır veya çözme veya çökeltme işlemleriyle ilgisi olmayan termal olarak modifiye edilmiş halde kullanılır (Mathers, 2002; Rooy, 1990).

Avrupa Standartlar Komitesi (CEN), Alüminyum Birliği ve ISO birbirine oldukça benzeyen tanımlama standartları kullanırlar. Bu çalışmada Alüminyum Birliği standardı kullanılmıştır. Buna göre, dövme alaşımlar için, aşağıda verildiği şekilde dört haneli bir sistem kullanılır. Isıl işlem durumlarıyla birlikte bu alaşımlar Tablo 2.2'deki gibi sınıflandırılır (Lincoln Electric, 2016; Rooy, 1990):

Tablo 2.2: Dövme alüminyum alaşımlarının gösterimi.

Alaşım Ailesi	Ana Alaşım Elementleri	Isıl İşlem Durumu
1xxx	Saf Alüminyum	Hayır
2xxx	Ana alaşım elementi Cu (bazen Mg la birlikte)	Evet
3xxx	Ana alaşım elementi Mn (bazen Mg la birlikte)	Hayır
4xxx	Ana alaşım elementi Si	Hayır
5xxx	Ana alaşım elementi Mg	Hayır
6xxx	Ana alaşım elementleri Mg ve Si	Evet
7xxx	Ana alaşım elementi Zn (bazen Cu, Mg, Cr ya da Zr la birlikte)	Evet
8xxx	Sn ve bazı Li bileşiklerini içeren diğer farklı alaşımlar	Normalde Evet
9xxx	İleride kullanılmak üzere ayrılmıştır	-
2XXX ; “2000 serisindeki tüm alaşımlar” anlamında kullanılan endüstriyel bir kısaltmadır.		

Döküm alaşımları için numaralandırma sistemi Tablo 2.3'te gösterilmektedir. Bu alaşımlar, üç basamaklı bir sistem ve ardından ondalık bir değer ile tanımlanır. Bu alaşımlar için ilk basamak alaşım ailesini gösterir. Sonraki iki basamak keyfi olarak atanır. Alaşım değişiklikleri bir harf önekiyle belirtilir: 356 bir alaşımın orijinal versiyonu, A356 ilk değişiklik, B356 ikinci değişiklik, vb. Ondalık noktayı izleyen sayı, alaşımın nihai bir döküm ya da yeniden ergitme için bir külçe olarak üretilip üretilmediğini gösterir (Lincoln Electric, 2016; Rooy, 1990).

Tablo 2.3: Döküm alüminyum alaşımlarının gösterimi.

Alaşım Ailesi	Ana Alaşım Elementleri	Isıl İşlem Durumu
1xx.x	Saf Alüminyum (özellikle rotor üretimi için)	Hayır
2xx.x	Ana alaşım elementi Cu (bazen diğer alaşım elementleri ile)	Evet
3xx.x	Ana alaşım elementi Si (bazen Cu ve Mg la birlikte)	Evet
4xx.x	Ana alaşım elementi Si	Evet
5xx.x	Ana alaşım elementi Mg	Hayır
6xx.x	Kullanılmadı	-
7xx.x	Ana alaşım elementi Zn (bazen Cu ve Mg la birlikte)	Evet
8xx.x	Ana alaşım elementi Sn	Hayır
9xx.x	Kullanılmadı	-

Bu çalışmada inceleme konusu olduğu için dövme alüminyum alaşımları içinde 5xxx ve 6xxx serisi alaşımların özellikleri daha detaylı olarak aşağıda verilmiştir.

2.4.2.1. 5xxx serisi alüminyum alaşımları

5xxx serisinin birincil alaşım elementi magnezyumdur ve alüminyum için en etkili ve yaygın olarak kullanılan alaşım elementlerinden biridir. Bu serideki alaşımlar orta ila yüksek mukavemet özelliklerine, iyi kaynaklanabilirlik ve deniz ortamında korozyona karşı dirence sahiptir. Ayrıca sıcak çatlamaya meyilli değildir. Aslında, 5xxx serisi, ısıtıl işlem görmeyen alüminyum alaşımları içinde en yüksek mukavemete sahiptir (Lincoln Electric, 2016; The Aluminum Association, n.d.).

Magnezyum, alüminyumda önemli bir çözünürlüğe sahiptir ve önemli ölçüde katı çözelti dayanımı sağlar, bu da deformasyon sertleştirilmesi özelliklerinin artırılmasına katkıda bulunabilir. %6'dan daha az Mg içeren 5xxx serisi alaşımlar yaşlandırma sertleştirilmesi yapılamaz. Tamamen işlenerek sertleştirilmiş AA5456 (Al-4.7Mg-0.7Mn-0.12Cr) alaşımı 380 MPa'dan daha yüksek çekme mukavemetine sahiptir. Standart alüminyum-magnezyum alaşımları, safsızlık olarak demir ve silisyum ve esas olarak dispersiyon sertleştirmeyle mukavemeti daha da arttırmak için yaklaşık %0,4-0,7 oranında kasıtlı ilave edilmiş mangan içerir. Aynı mukavemet artışını elde etmek için manganez yerine veya ona ek olarak krom ilave edilebilir; %0,2 krom, %0,4 mangana eşdeğerdir. Demir FeMnAl₆'yı oluşturur; silisyum ise magnezyum ile birleşerek çoğu çözünmez olan magnezyum silisiti Mg₂Si oluşturur (Mathers, 2002; Sukiman ve diğ., 2012).

Bu serinin yaygın kullanım alanları: elektronikte 5052, denizcilik uygulamalarında 5083, mimari uygulamalar için eloksallı 5005 levha ve alüminyum içecek kutusu kapağı yapmak için 5182. Ayrıca kimyasal depolama tankları, basınçlı kaplar, yapısal

uygulamalar (bina ve inşaat), demiryolu arabaları, damperli kamyonlar ve korozyon direnci nedeniyle köprülerin yapımında kullanılırlar (Lincoln Electric, 2016; Sukiman ve diğ, 2012; The Aluminum Associaton, n.d.).

2.4.2.2. 6xxx seri alüminyum alaşımları

Çok yönlü, ısıtılabilir, yüksek oranda şekillendirilebilir, kaynaklanabilir ve mükemmel korozyon direnci ile birlikte orta derecede yüksek mukavemete sahiptir (>300 MPa mukavemet mümkündür). Bu serideki alaşımlar, her biri %1'den az olmak üzere silisyum ve magnezyum içerir ve eşit miktarlarda az oranda manganez, bakır, çinko ve krom ile alaşımlandırılabilir. Sertleştirmeyi sağlayan bileşen magnezyum silisittir (Mg_2Si). Al- Mg_2Si alaşımlarını oluşturmak için magnezyum ve silisyum ilaveleri dengeli miktarlarda yapılır veya Mg_2Si 'yi oluşturmak için gereken seviyeden daha fazla silisyum ilave edilir. %1,4'ü aşan magnezyum ve silisyum içeren alaşımlar mukavemeti yaşlandırma işlemine ilaveten daha fazla geliştirirler (Mathers, 2002; Sukiman ve diğ, 2012; The Aluminum Associaton, n.d.).

Alaşımlar, özellikle kaynak metali, kaynağın kök geçişi gibi ana metal açısından zengin olduğu bölgelerde, kaynak metali çatlamasına karşı hassastır. Neyse ki, çatlama, 4043 gibi daha yüksek oranlarda silisyum içeren dolgu metallerinin kullanılmasıyla veya biraz daha yüksek sıcak çatlama riski olan 5356 gibi daha yüksek magnezyum içeren alaşımların kullanılmasıyla kolayca önlenir. 6xxx alaşımları çatlayacağından asla otojen olarak kaynak yapılmamalıdır (Lincoln Electric, 2016; Mathers, 2002).

Isıl işlem yapılabilir Al-Mg-Si alaşımları, ağırlıklı olarak yapı malzemeleridir. Bugüne kadar, artan miktarda tabaka halinde üretilmelerine rağmen, 6xxx serisi alaşımlar esas olarak ekstrüde formda kullanılmaktadırlar. 6xxx serisinin ekstrüzyon ürünleri mimari ve yapısal uygulamalar için ilk tercihtir. Alaşım 6061, bu serinin en yaygın kullanılan alaşımıdır ve genellikle kamyon ve gemi iskeletlerinde kullanılır. iPhone 6 kasası ekstrüze 6xxx serisi alaşımdan yapılmıştır. Bu alaşımlar, motor ve aktarma organları bileşenleri için otomotiv uygulamalarında giderek daha fazla önem kazanmaktadır (Lincoln Electric, 2016; Sukiman ve diğ, 2012; The Aluminum Associaton, n.d.).

2.4.3. Alüminyum alaşımlarının kullanım alanları

Alüminyum hem dövme hem de dökme halde bulunabilir. Dövme alaşımlar, sıcak ve soğuk haddelenmiş sac, levha, çubuk, tel ve folyodan oluşur. En yaygın kullanılan dört döküm yöntemi; kum döküm, kayıp mum dökümü, çelik kalıba döküm ve pres dökümdür. Bazı alaşımlar ve bu alaşımların ürün halleri ve uygulamaları Tablo 2.4'te listelenmiştir (Mathers, 2002).

Tablo 2.4: Alüminyum alaşımlarının ürün halleri ve kullanım alanları.

Alüminyum Alaşımı	Ürün Hali	Kullanım Alanı
Saf Alüminyum	Folyo, haddelenmiş levha, ekstrüzyon	Ambalaj ve folyo, çatı kaplama, kaplama, düşük mukavemetli korozyona dayanıklı kaplar ve tanklar
2xxx Serisi (Al-Cu)	Haddelenmiş levha ve plaka, ekstrüzyon, dövme	Yüksek gerilimli parçalar, havacılık ve uzay ürünleri, ağır iş dövme parçaları, ağır yük taşıt tekerlekleri, silindir kafaları, pistonlar
3xxx Serisi (Al-Mn)	Haddelenmiş levha ve plaka, ekstrüzyon, dövme	Paketleme, çatı kaplama ve kaplama, kimyasal variller ve tanklar, proses ve gıda işleme ekipmanları
4xxx Serisi (Al-Si)	Tel, döküm	Dolgu metalleri, silindir kafaları, motor blokları, valf gövdeleri, mimari amaçlar
5xxx Serisi (Al-Mg)	Haddelenmiş levha ve plaka, ekstrüzyon, dövme, tüp ve boru	Kaplama, gemi gövdeleri ve üst güvertesi, yapısal boru ve boru elemanları, gemiler ve tanklar, taşıtlar, vagonlar, mimari amaçlar
6xxx Serisi (Al-Si-Mg)	Haddelenmiş levha ve plaka, ekstrüzyon, dövme, tüp ve boru	Yüksek mukavemetli yapı elemanları, taşıtlar, vagonlar, denizcilikte boru ve boru uygulamaları, mimari uygulamalar.
7xxx Serisi (Al-Mg-Zn)	Haddelenmiş levha ve plaka, ekstrüzyon, dövme,	Yüksek mukavemetli yapısal elemanlar, ağır iş uçakları için dövme parçalar, askeri köprüler, zırh plakası, ağır yük taşıtı ve vagon

Alüminyumun yoğun kullanıldığı otomotiv endüstrisine detaylı bakmak faydalı olacaktır. Otomotiv endüstrisinin hızlı gelişmesine paralel olarak alüminyum alaşımlarının kullanımı da giderek artmaktadır. Bunun en önemli nedenleri; alüminyumun hafif olması yanında mukavemetinin fazla olması, şekil verilebilirliğinin kolay olması ve korozyon dayanımının yüksek olmasıdır. Otomotiv sektöründe en önemli konu olan yakıt tasarrufu için hafif malzeme seçiminin gerekliliği alüminyum alaşımlarını bu alan için ideal malzemeler yapmıştır. Çeliğe göre alüminyumun yaklaşık üç kat daha hafif olması, daha az yakıt tüketimine ve daha az çevre zararına yol açacaktır. Bir otomobilde kullanılan parçaların tamamının geri kazanılabildiği düşünüldüğünde, geri dönüşüm oranının diğer metallere göre çok yüksek olması ve yüksek hurda değeri ile alüminyum bir adım ne

çıkılmaktadır. Bunun yanında otomobillere uygulanan çok sayıdaki çarpışma testine göre, alüminyum kullanımıyla otomobilin enerji absorbe etme karakteristikleri iyileştirilebilmektedir. Alüminyumun otomobiller için sağladığı avantajlardan biri de araca kazandırdığı yapısal stablitedir. Bütün bu özelliklerinin yanında alüminyum malzeme, korozyona karşı dayanıklıdır ve boya veya yüzey kaplaması olmasa bile olsa sudan ve yol tuzlarından etkilenmez. Bazı plastik malzemelerde olduğu gibi çok sıcak, çok soğuk veya UV ışınlarının etkisiyle yapısal değişim göstermez (Başer, 2012; Yıldırım, 2006).

Günümüzde bir otomobil çok fazla ve çeşitli alüminyum parçalar içermektedir. Alüminyum kum, pres ve sabit kalıp dökümleri motor yapımında kritik öneme sahiptir; motor blokları, pistonlar, silindir kafaları, emme manifoldları, dişli kutuları, karterler, karbüratörler, şanzıman gövdeleri ve külbütör kolları kullanılan bileşenlerdir. Fren vanaları ve fren kaliperleri, otomobil tasarımı açısından önemli birçok diğer bileşenden bazılarıdır. Dökme alüminyum jantlar oldukça popülerdir. Alüminyum ekstrüze ve levha ürünlerden ürünleri; kaportalar, bagaj tabanları, parlak kaplamalar, hava girişleri, tamponlar, radyatörler, koltuk rayları, yan çarpma çubukları için kullanılır. Dövme alüminyum alaşımlı jantlar ise birinci sınıf bir seçenektir. Bu parçaların ortalama ağırlığı 100 kg'dır ve bir aracın toplam ağırlığının yaklaşık %10'unu karşılamaktadır. Bir otomobil her 100 kg'lık ağırlık azalmasıyla 100 km'de 0,6 litre yakıt tasarrufu sağlamaktadır (Başer, 2012; Rooy, 1990).

Otomotiv endüstrisinde en çok kullanılan alüminyum alaşımları 5xxx ve 6xxx serileridir. 5xxx ve 6xxx serisi sac alaşımları arasındaki arz dengesi, 6xxx alaşımlarına doğru gittikçe artmaktadır. Üretilen 6xxx alaşımlarının %80'ni, araba üreticileri tarafından satın alınmaktadır. 5xxx serisi alaşımlar mükemmel mukavemet/ağırlık oranına, şekillendirilebilirlik özelliklerine ve tam geri dönüşüm özelliğine sahipken, 6xxx serisi çok yönlü, ısıl işlem yapılabilir, yüksek oranda şekillendirilebilir ve iyi kaynaklanabilir oldukları için daha üstündürler.

6016A alaşımı, aşırı silisyum içeriğine sahiptir ve Avrupa'da ağırlıklı olarak araçlardaki dış paneller için kullanılmaktadır. Alaşım metali olarak bakır (ağırlıkça %0,5 ila 0,9) içeren 6111 alaşımı, 6016A'dan daha yüksek mukavemete sahiptir, ancak korozyona daha az dayanıklıdır. Jaguar ve Land Rover tarafından geliştirilen ve alüminyumun yoğun

olarak kullanıldığı modellerde tercih edilir (bu alaşım ABD'de daha yaygındır). 6016A'nın mukavemeti daha düşüktür ancak 6111'den daha şekillendirilebilir bir alaşımdır.

6451 alaşımı, hem 6111 hem de 6016A'nın özelliklerini birleştirir (ağırlıkça <%0,4 bakır). Bu alaşım hem dış kaplama hem de yapısal uygulamalar için yüksek mukavemet gereksinimlerine göre özel olarak tasarlanmış ve optimize edilmiş ısıl işlem yapılabilir, dengeli bir alaşımdır. T6 durumunda mükemmel mukavemete sahiptir, yaklaşık 350 MPa'lık mukavemet sağlar, bu da şasi ve çapraz eleman gibi yapısal uygulamalar için bu alaşımı ideal yapar.

Geri dönüşüm özellikleri sayesinde 6181A daha yakın zamanda otomotiv elemanı olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu alaşım çoğunlukla iyi şekillendirilebilirlik ve yüksek mukavemet gerektiren 0,9-1,0 mm ölçülerindeki dış paneller için kullanılır.

Alcoa'nın dış paneller için tercih ettiği alaşım, ilk olarak 1996'da 6111'in mukavemeti ve 6016A'nın şekillendirilebilirliğinin bir araya getirildiği 6022'dir. Bununla birlikte, 6022 az oranda bakır (ağırlıkça < %0,11) ve demir (ağırlıkça < %0,20) içeren alaşımdır, bu da hurda alüminyumdan üretilmesini zorlaştırır.

Araba direksiyon mafsallarında kullanılan 6061, 383 MPa'lık çekme gerilmesi ve %10,7'lik uzamaya sahiptir. Alaşım, az miktarda zirkonyum, çinko ve bakır eklenerek optimize edilmiştir.

Yüksek magnezyum içeriğine sahip bir başka alaşım olan AlMg5Mn (5182), korozyon direnci ve yüksek şekillendirilebilirlik sunar ve iç panellerde yüksek mukavemet ve karmaşık baskılara uygunluğu nedeniyle kullanılır. Bunun kardeş alaşımı 5754 üstün yüzey kalitesi sunar ve yapısal plaka uygulamalarında kullanılır (Djukanovic, 2019).

BÖLÜM 3. KAYNAKLA BİRLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

3.1. Kaynağın Tanımı

Kaynak, malzemelerin birleştirme tekniklerinden bir tanesi ve hatta en önemlisidir. Connor (1987), kaynak işlemini şöyle tarif etmektedir: Malzemeleri ergime sıcaklığına basınç uygulayarak veya uygulamadan ısıtarak veya sadece basınç kullanılarak ve dolgu metali ilaveli ya da ilavesiz olarak metallerin veya metal olmayan maddelerin lokal bir alanda birleştirilmesidir. Anık (1991), metalik malzemeler özelinde metal kaynağını; ısı, basınç ya da her ikisini kullanarak, aynı tür veya ergime aralığı aynı veya yakın metalik malzemeyi ilave bir malzeme kullanarak veya kullanmadan birleştirmek olarak ifade etmektedir.

3.2. Kaynak Yöntemleri

Kaynakla ilgili yapılan bu tanımlardan da anlaşılacağı üzere kaynakla birleştirme işlemi, kaynağın uygulandığı malzemeye, kaynağın amacına, kaynak usulüne, kaynak işleminin türüne göre birçok şekilde sınıflandırılmaktadır. Metal malzemeler için kaynak işlemi basınç kaynağı ve ergitme kaynağı olmak üzere ikiye ayrılır.

3.2.1. Basınç kaynağı

Kaynak yapılacak ana malzemeyi basınç altında bölgesel olarak ısıtıp birleştirmektir. Bu işlemde genel olarak ilave metal kullanılmaz (Anık, 1991). Dövme kaynağı, sürtünme kaynağı ve direnç kaynağı olmak üzere 3 gruba ayrılır (Şekil 3.1).

3.2.2. Ergitme kaynağı

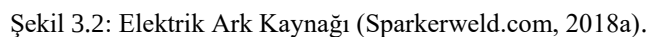
Sıcaklığın etkisiyle malzemeyi bölgesel olarak eritmek suretiyle yapılan kaynak işlemidir. Bu işlemde genellikle ilave bir metal kullanılır (Anık, 1991). Bu kaynak türü

Bu kaynak uygulamaları içinde yaygın kullanımı, uygulamasının kolay ve basit olması ve gelişen teknolojisiyle ark kaynağının önemli bir yeri vardır.

Ark kaynağı; kaynak yapılacak ana malzeme ile dolgu malzemesi (ilave malzeme-elektrot) arasında elektrik arkı oluşturarak yapılır. Katot anot arasında meydana gelen elektrik arkı sayesinde ısı ortaya çıkar ve bu ısı birleştirilecek olan malzemenin yüzeylerini bölgesel olarak ergitir. Bu işlem için doğru akım (DC) ya da alternatif akım (AC) kullanılabilir. Ayrıca farklı özelliklere sahip ergiyen ve ergimeyen tip elektrotlar kullanılır. Şekil 3.2’de ergiyen tip örtülü elektrotla yapılan elektrik ark kaynağının temsili resmi görülmektedir.



Ark kaynağı; kaynak yapılacak ana malzeme ile dolgu malzemesi (ilave malzeme-elektrot) arasında elektrik arkı oluşturarak yapılır. Katot anot arasında meydana gelen elektrik arkı sayesinde ısı ortaya çıkar ve bu ısı birleştirilecek olan malzemenin yüzeylerini bölgesel olarak ertirir. Bu işlem için doğru akım (DC) ya da alternatif akım (AC) kullanılabilir. Ayrıca farklı özelliklere sahip ertiren ve ertirmeyen tip elektrotlar kullanılır. Şekil 3.2’de ertiren tip örtülü elektrotla yapılan elektrik ark kaynağının temsili resmi görülmektedir.



Elektrik ark kaynağından daha sonra geliştirilen ve koruyucu gaz atmosferinde yapılan kaynak işlemleri oldukça yaygın kullanım alanlarıyla dikkati çekmektedir. Konumuzun odağını teşkil eden bu kaynak türleri aşağıdaki bölümlerde detaylı olarak açıklanmıştır.

3.3. Gazaltı Kaynak Yöntemleri

Örtülü elektrot kullanılarak elektrik ark kaynağı yapıldığında, yeterince güvenli ve kaliteli bir bağlantı sağlamada birtakım dezavantajlar söz konusudur:

1. Kaynak hızı sınırlıdır.
2. Kaynakçının iyi yetiştirilmiş olması gerekir.
3. Özellikle kalın parçalarda kaynak süresi çok uzamaktadır (belirli bir değerden sonra elektrot çapı arttırılamamaktadır.
4. Elektrod değiştirilmesi ve curufun temizlenmesi için harcanan süre kaynak işleminin süresinden daha fazla olmaktadır.
5. Kaynak sonrası elektrodun kullanılmadan kalan kısmı atılmakta, bu da maliyeti arttırmaktadır.
6. Ergime süresini kısaltmak için akım şiddetini yükseltmek istenen sonucu vermemektedir.
7. Kaynak hızı belli bir değerin üzerine çıkarıldığında kaynakçının kaynağa hakimiyeti zorlaşmaktadır (Tülbentçi, 1990).

Bu olumsuzlukların önüne geçmek, kaynak süresini kısaltmak, kaynakçı faktörünü en aza indirmek ve dolayısıyla maliyeti düşürmek için yeni yöntemler geliştirilmiştir. Bunların en önemlileri gazaltı kaynak yöntemleridir.

Gazaltı kaynak yöntemlerinde kaynak bölgesine belirli gazlar üflenerek kaynağın dış etmenlerden (özellikle havadaki oksijen ve azottan) korunması sağlanmaktadır. Bu işlemde kaynak edilecek metal ile tükenen ya da tükenmeyen bir kaynak elektrodu arasında elektrik arkı oluşturulmakta, bu ark sayesinde kaynak için gerekli ısı elde edilmekte ve ark bölgesine bir gaz üflecinden verilen gaz ya da gaz karışımları sayesinde koruma sağlanmaktadır (Eryürek, 2007; Sparkerweld.com, 2018b)

Kaynağın koruyucu bir gaz örtüsü altında uygulanması, “koruyucu gazla kaynak” olarak da bilinmektedir ve 1926 yılında metanol gazı kullanılarak uygulanan ilk işlem “Alexander” yöntemi olarak adlandırılmıştır. Daha sonra hidrojen ve oksijen-asetilen

kullanılan yöntemler geliştirilmiş, helyum ve argon gibi soy gazların kullanılması ilk defa 1930 yılında olmuştur. Kaynak dikişinin korunmasında karbondioksit gibi aktif bir gazın kullanılmasına 1952 yılında başlanmıştır. Bugün hem inert gaz hem aktif gaz hem de farklı gazların karışımlarının kullanıldığı gazaltı ark kaynak yöntemleri mevcuttur (Anık, 1991; Anık ve Vural, t.y.; Eryürek, 2007).

Gazaltı kaynak yöntemleri kullanılan elektrot malzemesi esas alınarak iki ana gruba ayrılır (Anık ve Vural, t.y.):

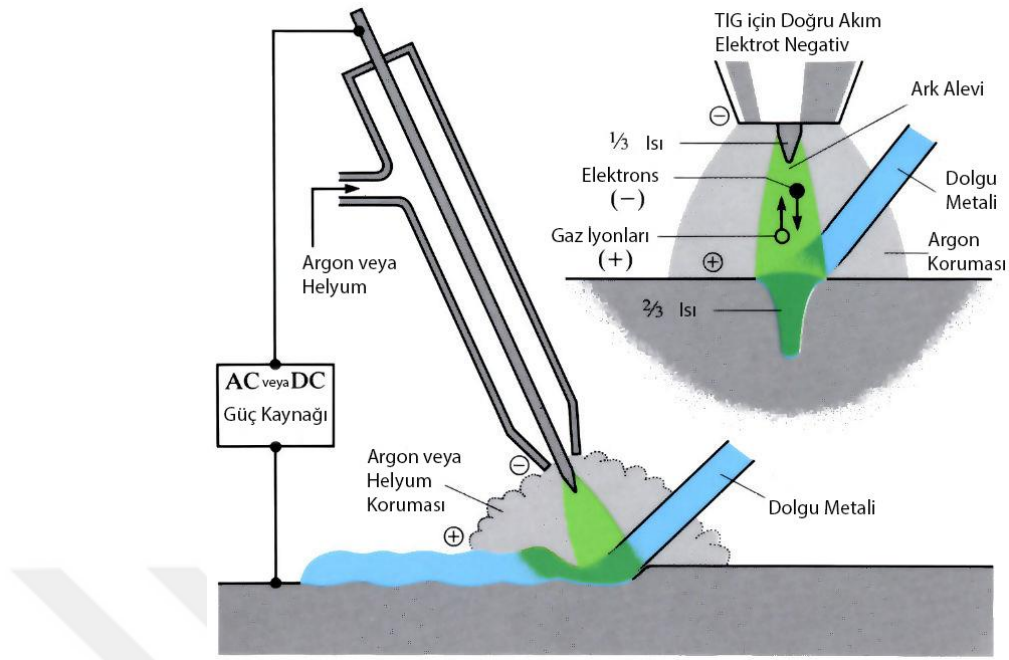
1. Ergimeyen elektrotla yapılan gazaltı kaynağı
 - TIG (Tungsten Inert Gas) (GTAW - Tungsten Inert Gas Welding)
2. Ergiyen elektrotla yapılan gazaltı kaynağı
 - MIG (Metal Inert Gas) (GMAW - Gas Metal Arc Welding)
 - MAG (Metal Active Gas)

3.3.1. TIG kaynağı

TIG (Tungsten Inert Gas) kaynağı, diğer ismiyle GTAW (Tungsten Inert Gas Welding) yöntem olarak elektrik ark kaynağını andırmakta, ancak koruyucu gaz altında kaynak dikişi oluşturulmaktadır.

Bu yöntemde ergimeyen Tungsten elektrot kullanılmakta ve bu elektrot ile malzeme arasında oluşturulan ark sayesinde kaynak için ihtiyaç olan ısı sağlanmaktadır. Kaynak bölgesini koruma amacıyla elektrodu tutan torçtan helyum ya da argon gazı gönderilmektedir. Kullanılan inert gazlar nedeniyle bu yöntem “Heliarc” ya da “Argonarc” olarak da isimlendirilmektedir (Anık ve Vural, t.y.; Tülbentçi, 1990).

Kaynak işleminde dolgu maddesi olarak ilâve metal kullanılabilir. Bu durumda ilave metal tel veya çubuk formunda haricen kaynak bölgesine verilir. Şekil 3.3, TIG kaynağının çalışma prensibini şematik olarak göstermektedir.



Şekil 3.3: TIG kaynağı (Open.edu, 2018).

TIG kaynağında kullanılan elektrotlar; tungsten, tungsten-toryum ya da tungsten-zirkonyum alaşımıdır (Anık, 1991).

TIG kaynağında kullanılan helyum ve argon gazları soy gazlar olup tek atomludurlar. Bu sayede diğer elementlerle reaksiyona girmez ve yanmazlar. Helyum gazı havadan daha hafif olduğundan koruma kabiliyeti azdır. Argon ise havadan daha ağırdır ergimiş metal havuzunu daha iyi korur. Yüksek akım şiddetleri kullanıldığında helyum gazı tercih edilir çünkü bu gazla daha yüksek ark gerilimi elde edilir (Anık, 1991).

TIG kaynağında, önceleri sadece doğru akım kullanılırken geliştirmeler sayesinde alternatif akım da kullanılabilir hale gelmiştir. Alüminyum ve magnezyum alaşımlarının kaynağında kullanılması gereken akım türü alternatif akımdır (Anık, 1991; Tülbentçi, 1990).

TIG kaynağı, özellikle basınçlı kaplar, boru hatları, gıda endüstrisi kapları ve havacılık gibi zorlu uygulama alanları için kaliteli kaynak elde edilmesini sağlar. TIG kaynağı özellikle kalınlığı 8-10 mm'ye kadar olan sac malzemeler için uygundur. 0,1 mm'ye kadar olan ince saclar için diğer ergitme kaynak yöntemlerinin kullanılması olanaksızdır. Akım şiddeti azaltılarak bu kaynak yöntemi sağlıklı bir şekilde uygulanabilir (Ertürk, t.y.; oerlikon-welding.com, n.d.).

TIG kaynağı, yüksek kaliteli ve görsel olarak iyi kaynaklar oluşturur, ark ilave metalle oluşturulmadığından sıçrama olmaz ve cüruf oluşmadığından temizleme gerektirmez. Ancak ergiyen elektrotlu ark kaynaklarına göre daha yavaş ve daha pahalıdır. Deneyimli kaynakçılar gerektirir.

3.3.2. MIG/MAG kaynağı

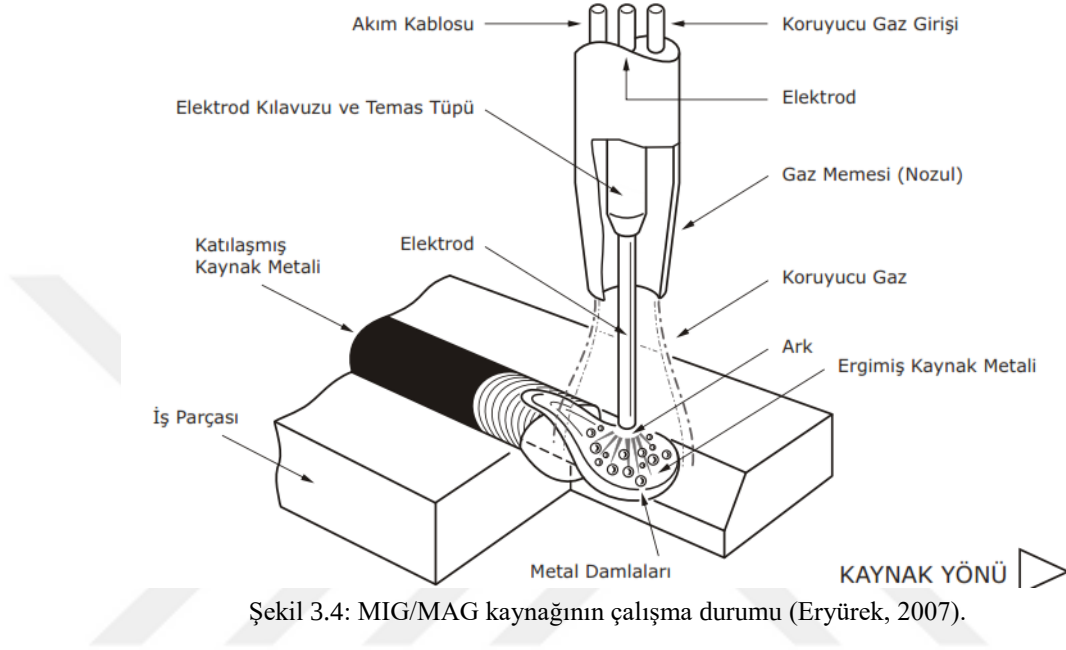
MIG (Metal Inert Gas), MAG (Metal Aktive Gas) ya da genel ifadeyle GMAW (Gas Metal Arc Welding) olarak adlandırılan bu kaynak yöntemlerinde bir ergiyen tel elektrot ile metal malzeme arasında ark oluşturulmakta ve oluşan bu arkın ısısı sayesinde ergime gerçekleşerek metal parçalar birleştirilmektedir. İşlem koruyucu bir gaz altında gerçekleştirilmektedir. Kaynak gazı olarak soy gaz (argon, helyum ya da iki gazın belirli oranlarda birleştiği karışım gazı) kullanıldığında yöntem MIG olarak adlandırılmakta, koruyucu gaz karbondioksit olduğunda yöntem MAG ismi verilmektedir. Bu iki yöntemde de kullanılan teçhizat tamamen aynıdır sadece koruyucu gaz türleri değişmektedir. Bu yöntemlerle TIG kaynak yöntemi arasındaki fark, elektrik arkının ergiyen bir elektrot ile iş parçası arasında oluşturulmasıdır.

1947 yılında ABD'de geliştirilen ve o tarihte SIGMA (Shielded Inert Gas Metal Arc) olarak isimlendirilen MIG kaynağı, İkinci Dünya Savaşı sırasında alüminyum ve magnezyumdan imal edilen uçakların kaynak edilmesi için kullanılmıştır. Aktif gazın (karbondioksit) koruyucu gaz olarak denenmesi ve MAG kaynağının başlaması ise ilk defa 1952 yılında Rusya'da gerçekleştirilmiştir. (Anık ve Vural, t.y.; Şık, 2002).

Yöntem önceleri yüksek akım yoğunlukları ve soy gaz koruması kullanılarak ince elektrotlarla gerçekleştirilmiş ve esas olarak alüminyumun kaynağında kullanılmıştır. Bugün ise ticari açıdan önemli tüm metaller (alüminyum, karbon çelikleri, bakır, titanyum, yüksek dayanımlı düşük alaşımlı ya da paslanmaz çelikler, magnezyum, nikel ve alaşımları) uygun gaz, elektrot ve kaynak parametreleri seçilerek, bu yöntemle kaynak edilebilmektedir (Eryürek, 2007).

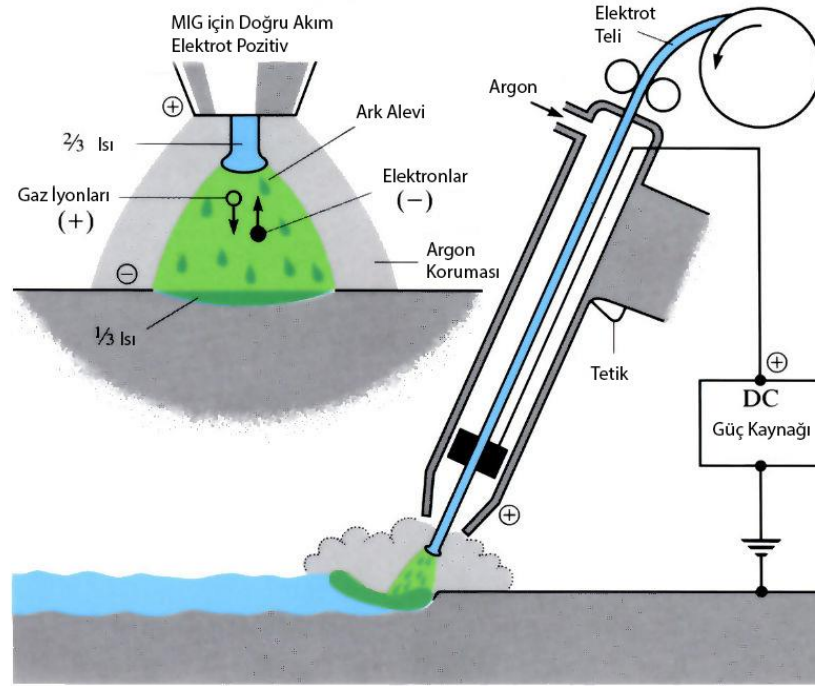
3.3.2.1. Çalışma prensibi

Bu yöntemde otomatik olarak sürekli beslenen ergiyen tip elektrot kaynaklanacak iş parçasıyla ark oluştururken dışarıdan verilen gazla kaynak bölgesi korunmaktadır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4: MIG/MAG kaynağının çalışma durumu (Eryürek, 2007).

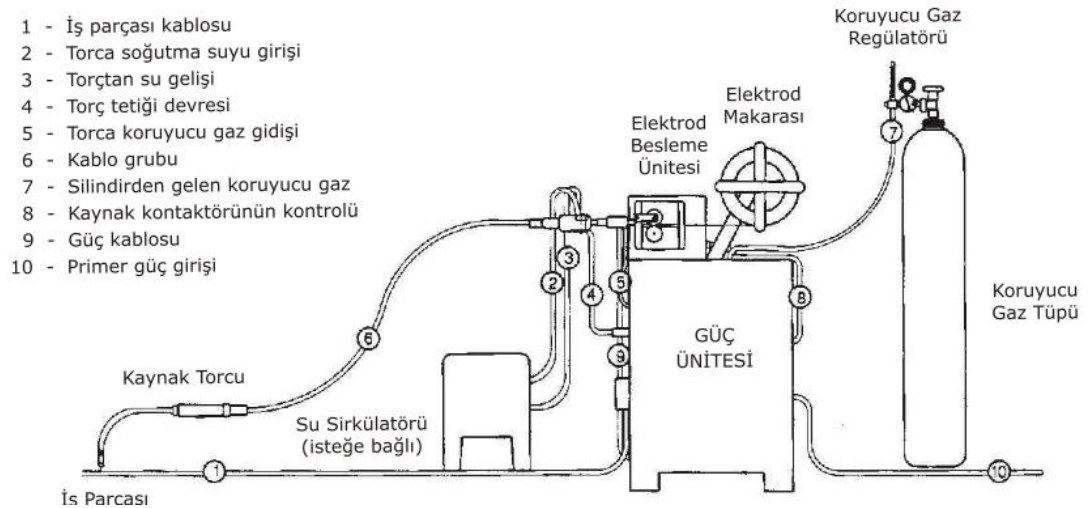
MIG kaynak yönteminde doğru akım kullanılır. Elektrot ile iş parçası arasında ark oluşturabilmek için kutuplardan biri elektroda diğeri de parçaya bağlanır (Şekil 3.5). Elektrik ark kaynağına göre daha yüksek akım yoğunluğu kullanılır, bu sayede elektrodun kolaylıkla eriyebilmesi mümkün olur. Kaynak metali ergidikçe ark boyunun sabit kalması için kaynak donanımı tarafından elektrot teli otomatik olarak sürekli ilerletilir. Kaynak teli tel ilerletme mekanizması yardımıyla bir tel makarasından kaynak torçuna gelir. Torçun ucundaki serbest tel nispeten kısadır, bu sayede ince elektrot kullanılmasına rağmen 100 A/mm^2 den daha yüksek akım şiddetler uygulamak mümkün olur. Elektrodun görevi hem enerji taşımak hem de ilave metal görevi görmektir. Koruyucu gaz torçun içinden ve elektrodun çevresinden akar, böylece ark, elektrottan gelen ergimiş damlalar ve ergimiş kaynak banyosu atmosferin etkisinden korunur (Anık ve Vural, t.y.; Ertürk, t.y.)



Şekil 3.5: MIG kaynağında bağlantılar ve arkın oluşumu (Open.edu, 2018).

İlk ayarlar yapıldıktan sonra arkın elektriksel karakteristiği kaynak makinası tarafından otomatik olarak ayarlanır. Ayrıca kaynak makinası ark boyu ve akım şiddetinin (elektrot besleme hızı) sabit değerde tutulmasını sağlar. Bu sayede kaynakçı sadece kaynak hızını, doğrultusunu ve torçun pozisyonunu elle kontrol eder (Eryürek, 2007).

Gazaltı kaynak işlemi için kullanılan yapı Şekil 3.6’da gösterilmiştir.



Şekil 3.6: MIG/MAG kaynak donanımı (Eryürek, 2007).

Kaynak donanımının dört temel bölümü vardır:

- Kaynak akım üreteçleri / Güç ünitesi
- Koruyucu gaz ünitesi
- Elektrot ve Besleme ünitesi
- Kaynak torçu ve kablo grubu

3.3.2.2. Kaynak akım üreteçleri / Güç ünitesi

Güç kaynağı ya da akım üretici, ark oluşması için elektroda ve iş parçasına elektrik gücü sağlar. MIG/MAG kaynak yöntemlerinde yatay karakteristikli akım üreteçleri kullanılır. Bu kaynak akım üreteçleri sabit gerilimli olarak ta adlandırılır ancak gerilimin tamamen sabit değerde seyretmesi mümkün değildir. Bu diğer bir yandan tehlikelidir çünkü bu gibi bir üreteçle çalışılırken elektrotla iş parçası temas ettirildiğinde gerilim düşer, akımın şiddeti sonsuz yükselir. Bu da temas noktasında ani patlamalara ve şiddeti yüksek sıçramalara sebebiyet verir. Bu nedenle bu tip akım üreteçlerinde her 100 A için en fazla 7 V gerilim düşüşüne izin verilir (Tülbentçi, 1990)

Bu tip kaynak akım üreteçlerinde ark boyu üreticinin yatay karakteristiği nedeniyle kendiliğinden ayarlanmaktadır. Buna iç ayar denir. Ark gerilimi, telin ilerleme hızı ve akım şiddeti ayarlanabilmektedir. Kaynak sırasında ark boyu uzarsa akım şiddeti büyük oranda azalır. Dolayısıyla ergiyen tel miktarı da azalır. Bu sayede ark boyu normal haline döner. Ters durumda, ark boyunun kısaldığında akım hızla artar, buna bağlı olarak ta ergiyen tel miktarı artar ve sonuçta ark boyu normal hale döner. Böylece ark boyunun ayarı kaynakçıya bırakılmamış olur (Eryürek, 2007; Tülbentçi, 1990).

MIG/MAG kaynağında genelde iki tür akım üretici kullanılmaktadır. Birincisi portatif olup, elektrik bulunmadığı yerlerde kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Bunlar dizel veya benzinli motorla çalışan jeneratörlerdir. Bunlar hem yatay hem de düşey karakteristikle çalışabilecek tarzda imal edilirler. İkinci tip akım üreteçleri ise atölyelerde kullanılan cihazlar olup, bir transformatör ve bir redresörden oluşmaktadırlar. Bunlar şehir şebekesine bağlanırlar ve monofaze ya da trifaze akım ile çalıştırılabilirler. Hem daha kararlı bir ark oluşturmaları hem de şebekeye dengeli bir şekilde yüklenmeleri nedeniyle trifaze akım ile çalışan üreteçler tercih edilirler (Tülbentçi, 1990).

MIG kaynağı için kullanılan yatay karakteristikli akım üreteçlerinde akım şiddeti ve gerilimi birbirlerinden bağımsız olarak ayarlanabilir. Kaynak akımında sabit gerilim ayarı

yapma olanağı ne kadar fazla olursa optimum çalışma koşullarının belirlenmesi de kadar kolay olur (Tülbentçi, 1990).

MIG/MAG kaynağında doğru akım kullanılır ve elektrot pozitif veya negatif kutba bağlanabilir ama genellikle pozitif kutba bağlama (ters kutuplama) tercih edilir. Bu sayede derin bir nüfuziyet sağlanır ve özellikle alüminyum ve alaşımlarının kaynağında oksit tabakasının parçalanması sağlanır. Diğer metal ve alaşımların (örneğin paslanmaz çelikler) kaynağında doğru kutuplama ile elektrot negatif kutba bağlanabilir. Ancak ters kutuplama ile çok daha derin bir nüfuziyet elde edildiğinden ters kutuplama tercih edilir (Anık, 1991; Tülbentçi, 1990).

İyi bir nüfuziyetin istendiği ancak iş parçasına ısı girdisinin sınırlı olması gereken hallerde, darbeli doğru akım (pulsed direct current) yöntemi kullanılır. Pulse doğru akım uygulandığında akım şiddeti belirlenen iki değer aralığında, belirli bir frekansta değiştirilmektedir (Tülbentçi, 1990).

3.3.2.3. Koruyucu gaz ünitesi ve koruyucu gazlar

Kaynak sırasında koruyucu gazın basıncını ve akış hızını sabit tutmak için bir sistem gereklidir. Koruyucu gaz regülatörü, tüp basıncındaki değişimlerden bağımsız olarak basıncı, sabit bir çalışma basıncına çeker. Tek kademeli regülatör veya çift kademeli regülatör olabilir. Çift kademeli regülatörler, tek kademeli regülatörlerden daha stabil bir basınç sağlar (LincolnElectric, 1997).

Koruyucu gazı veren bir yüksek basınçlı silindir, sıvı dolu bir silindir veya bir yığın sıvı sistemi olabilir. Karışım gazları tek bir silindirde bulunabilir. İki veya daha fazla gaz veya sıvı kullanıldığında doğru oranları elde etmek için karıştırıcılar/mikserler kullanılır (LincolnElectric, 1997).

Bir kaynak işleminde kullanılan koruyucu gaz, kaynak sisteminin genel performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Birincil işlevi, kaynak havuzu oluşturulurken ergimiş metali atmosferik azot ve oksijenden korumaktır. Koruyucu gaz ayrıca kararlı bir ark ve düzgün metal transferine katkı sağlar. Gaz metal ark kaynağında (GMAW) kullanılan gaz, kaynak sırasında metal transferi formu üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve kaynak dikişinin şeklini ve penetrasyon modelini de etkileyebilir (Eagar, 1993).

Metallerin birçoğunun oksijenle birleşerek metal oksitler ve azotla metal nitritler oluşturmaya eğilimleri oldukça fazladır. Ayrıca oksijen ergimiş çelikteki karbonla reaksiyona girerek karbon monoksit gazı oluşturur. Bu reaksiyonlar sonucunda birçok kaynak problemleri ortaya çıkar. Örneğin oksitlere bağlı ergime kusurları, oksitler, nitrürler ve gözenekler nedeniyle mukavemet kaybı ve çözünmüş oksitler ve nitrürler yüzünden kaynak metalinin gevrekleşmesi. Atmosferdeki azot ve oksijen nedeniyle bu reaksiyon ürünleri kolayca oluşur (Eryürek, 2007; LincolnElectric, 1997).

Gazaltı kaynak işlemlerinde kullanılacak gazların sınıflandırılması ve taşınması gereken özellikler TS EN ISO 14175 (Kaynak sarf malzemeleri - Ergitme kaynağı ve benzeri işlemler için gazlar ve gaz karışımları) standardında verilmiştir.

MIG/MAG kaynak yöntemlerinde kullanılan koruyucu gazlar 3 gruba ayrılmıştır:

1. Soy gazlar – Argon ve Helyum
2. Karışım gazları – Argon-oksijen, Argon-helyum gibi
3. Aktif gaz – Karbondioksit

Soy gazlar – Argon (Ar) ve Helyum (He): Demir dışı metallerin gaz metal ark kaynağı için en sık kullanılan argon ve helyum tamamen inerttir yani kimyasal bir reaksiyon oluşturmazlar. İki gaz eşit derecede inert olmasına rağmen, diğer özelliklerde farklılık gösterirler.

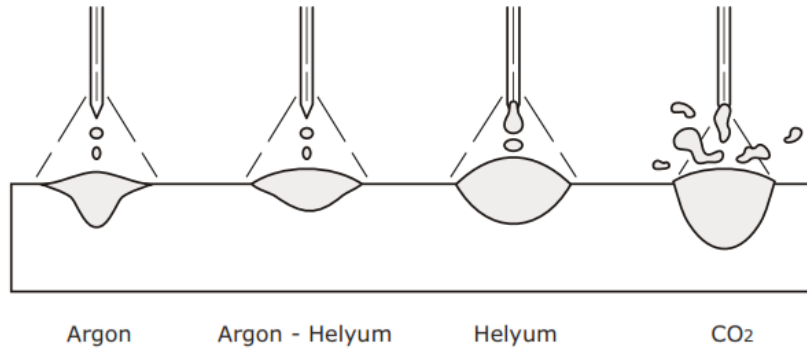
Argon, havadan damıtılarak üretilir. Havadan üretildiği için istenmeyen diğer gazları (oksijen, azot, su buharı vb.) da içermesine rağmen GMAW uygulamaları için en uygun gazdır. Argon, MAG kaynağı uygulamalarında yüksek ark kararlılığı sağlar. Argon'un ısı iletkenliği düşüktür, dolayısıyla oluşan ark sütunu daha geniş, ark merkezinin sıcaklığı da dış kısımlara göre daha yüksektir. Metal buharları ve metal damlacıklarının geçişi ark sütununun merkezinde olur ve daha akışkan geçiş gerçekleşir. Diğer koruyucu gazlara göre arkın gerilim düşümü daha azdır. Bu özellikler sayesinde kaynak dikişinin merkezinde nüfuziyet daha derin, kenarlarında daha azdır (Degemak, 2010; LincolnElectric, 1997; Tülbentçi, 1990).

Helyum yeraltından çıkarılan nadiren atmosferden elde edilen ve argona göre çok daha pahalı olan bir soy gazdır. Argona göre helyum gazı daha kararsız bir ark verir. Fakat helyumun ısı iletimi argona göre daha yüksek olduğundan arkın metale nüfuziyeti yüksek olur. Bu nedenle kalın ve ısıl iletkenliği yüksek malzemelerde (bakır, alüminyum vb.)

daha çok kullanılır. Helyum korumasındaki kaynak arkının enerjisi yüksektir çünkü ark gerilimi düşümü argona göre daha yüksektir. Bu sayede ısıl iletkenliği yüksek ve kalın kesitli metallerin kaynağında ön ısıtma gerektirmez (Degemak, 2010; Ertürk, t.y.; Tülbentçi, 1990).

Helyum havadan çok daha hafif bir gazdır. Argon, helyumdan yaklaşık 10 kat, havadan ise yaklaşık 1,3 kat daha ağırdır. Bir gaz ne kadar ağır olursa, herhangi bir akış hızında ark koruması o kadar etkilidir. Argon ağırlığı sayesinde kaynak memesinden ayrıldıktan sonra kaynak alanı üzerinde battaniye gibi bir örtü oluşturma eğilimindedir. Helyum ise türbülanslı bir şekilde yükselme ve kaynak bölgesinden dağılma eğilimindedir çünkü havadan daha hafiftir. Bu nedenle, kaynak banyosunun yeterince korunabilmesi için verilmesi gereken helyum miktarı argona göre daha yüksek olmaktadır (Eryürek, 2007; Kearns, 1978; LincolnElectric, 1997).

Helyumun ısıl iletkenliği argondan daha yüksek olduğundan arkın daha düzgün dağıldığı bir ark akışkanı üretir. Argon ile oluşan ark plazmasında ise, yüksek enerjili bir iç çekirdek ve daha az ısı enerjili bir dış manto oluşur. Bundan dolayı Şekil 3.7’de görüldüğü gibi helyum arkın da derin, geniş ve parabolik bir kesit ortaya çıkarır. Argonda ise, çoğunlukla papiller (şişe başı) tipi nüfuziyet kesitli bir dikiş profili üretir (Kearns, 1978; LincolnElectric, 1997).



Şekil 3.7: Çeşitli koruyucu gazlar için kaynak dikişi dış hattı ve nüfuziyet modelleri (Eryürek, 2007).

Helyum arkında metal iletimi iri damlalıdır. Bu nedenle helyumla çalışıldığında argona göre daha fazla sıçrama olur, daha kötü kaynak dikişi elde edilir. İyonize olması kolay olan argon arkın tutuşmasına yardımcı olur ve ters kutuplamalı kaynakta kusursuz yüzey temizliği sağlar (Eryürek, 2007).

Karışım gazları: Her bir gazın kendine has özelliğini ve avantajını bir araya getirebilmek amacıyla gazlar karışım halinde kullanılır. Soy gazlara aktif gazların karışımıyla daha kararlı yapıda bir ark elde edilebilir ve kaynak banyosuna metal geçişi daha kolay gerçekleşir (Degemak, 2010).

Demir dışı metallerin birçok uygulamasında koruyucu gaz olarak saf argon kullanılır. Saf helyum ark kararlılığının sınırlı olması nedeniyle çok özel alanlarda kullanılır. Buna karşın helyum arkıyla arzu edilen kaynak profili karakteristikleri (derin, geniş ve parabolik) elde edilebilir. Bu iki gazın oluşturduğu kaynak karakteristiklerini bir araya getirmek amacıyla argon-helyum gaz karışımı kullanılmaktadır. Sonuç, argon sayesinde eksenel spreysel metal transferi ve helyum sayesinde iyileştirilmiş bir kaynak dikişi profilidir (Şekil 3.7). Kısa devre iletimli kaynakta, ana metale daha yüksek ısı girdisi sağlamak ve daha iyi ergime özellikleri elde etmek için argona %60 ila %90 helyum karıştırılır (Eryürek, 2007; Kearns, 1978).

Demir esaslı malzemelerin kaynağında saf argon ve helyum tatmin edici çalışma özellikleri sağlayamazlar. Ark düzensiz olma eğilimindedir, helyum koruması sıçramalara neden olur ve saf argon koruması "yanma oluğu" oluşma eğilimi gösterir. Argon gazına, %1-5 O₂ veya %3-10 CO₂ (%25'e kadar çıkabilir) ilave edilmesi ciddi iyileştirmeler sağlar (LincolnElectric, 1997).

İnert gaza eklenecek optimum oksijen veya CO₂ miktarı, ana metalin yüzey durumunun (hadde tufalı), bağlantı geometrisinin, kaynak pozisyonunun veya tekniğinin ve ana metal bileşiminin bir fonksiyonu olmakla birlikte %3 O₂ veya %9 CO₂ ilavesi genel olarak, bu değişkenlerin etkisini kapsayacak kabul edilebilir oranlardır (Anık, 1991; Eryürek, 2007).

Karbon dioksit (CO₂): Karbon dioksit, karbon çelikleri ve düşük alaşımlı çeliklerin gaz metal ark kaynağı için saf haliyle yaygın olarak kullanılan aktif bir gazdır. GMAW işleminde koruyucu gaz olarak tek başına kullanılmaya uygun tek aktif gazdır. Daha yüksek hızlı kaynak, daha fazla nüfuziyet ve daha düşük maliyet, CO₂ in yaygın kullanımını teşvik eden genel özelliklerdir (Degemak, 2010; LincolnElectric, 1997).

CO₂ koruması ile metal transferi kısa devre veya iri damla tipindedir. İri damla tip iletimde ark oldukça şiddetlidir ve fazlaca sıçramaya yol açar. Bu sıçramayı en aza indirmek için kaynak koşullarının nispeten düşük voltaja ayarlanması ve gömülü ark yada kısa arkla çalışılması gerekir (Kearns, 1978; LincolnElectric, 1997).

CO₂ korumalı ark, argonca zengin korumalı ark ile karşılaştırıldığında, daha pürüzlü bir yüzey profili ile mükemmel nüfuz eden kaynak dikişi ve gömülü ark sebebiyle kaynak dikişinin çeperlerinde çok daha az "yıkama" etkisi oluşturur. Çok sağlam kaynak dikişleri elde edilir, ancak arkın oksitleyici doğasından dolayı mekanik özellikler olumsuz etkilenebilir (Eryürek, 2007).

MIG/MAG için koruyucu gazlar ve gaz karışımları, bunların özellikleri ve kullanıldıkları alanlar Tablo 3.1’de, kısa devre iletimi için kullanılan koruyucu gazlar ve üstünlükleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.1: GMAW için koruyucu gazlar ve gaz karışımları (LincolnElectric, 1997).

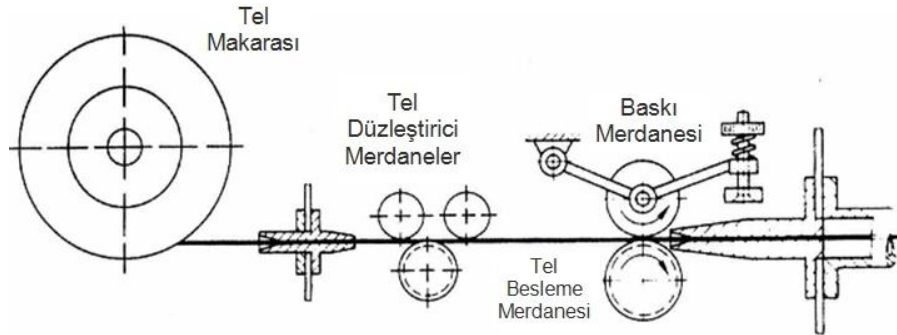
Koruyucu gaz	Kimyasal özellik	Uygulamalar
Argon	İnert	Çelik hariç neredeyse tüm metaller.
Helyum	İnert	Daha fazla ısı girişi ve gözenekliliği en aza indirmek için alüminyum, magnezyum ve bakır alaşımları.
Ar + %20-80 He	İnert	Daha fazla ısı girişi ve gözenekliliği en aza indirmek için alüminyum, magnezyum ve bakır alaşımları (%100 helyumdan daha iyi ark hareketi).
Azot		Bakırda daha fazla ısı girişi (Avrupa).
Ar + %25-30 N		Bakırda daha fazla ısı girişi (Avrupa); %100 azottan daha iyi ark hareketi.
Ar + %1-2 O ₂	Hafif oksitleyici	Paslanmaz ve alaşımlı çelikler; bazı oksijeni giderilmiş bakır alaşımları.
Ar + %3-5 O ₂	Oksitleyici	Alaşımsız ve bazı düşük alaşımlı çelikler.
CO ₂	Oksitleyici	Alaşımsız ve bazı düşük alaşımlı çelikler
Ar + %20-50 CO ₂	Oksitleyici	Çeşitli çelikler (en çok olarak kısa devre modu).
Ar + %10 CO ₂ + %5 O ₂	Oksitleyici	Çeşitli çelikler (Avrupa)
CO ₂ + %20 O ₂	Oksitleyici	Çeşitli çelikler (Japonya)
%90 He + %7,5 Ar + %2,5 CO ₂	Hafif oksitleyici	İyi korozyon direnci için paslanmaz çelikler (kısa devre modu).
%60 - %70 He + %25 - 35 Ar + %4 - 5 CO ₂	Oksitleyici	Tokluk için düşük alaşımlı çelikler (kısa devre modu).

Tablo 3.2: Kısa devre iletimi için koruyucu gazlar, özellikleri ve kullanım alanları (Eryürek, 2007).

Ana Metal	Koruyucu Gaz	Üstünlükleri
Alaşımsız Çelikler	% 75 Ar + % 25 CO ₂	3 mm kalınlıklara kadar yüksek kaynak hızları ve en az distorsiyon ve az sıçrama sağlar.
	% 75 Ar + % 25 CO ₂	3 mm'den kalın parçalarda en az sıçrama ve temiz kaynak görüntüsü sağlar. Düşey ve tavan pozisyonlarında iyi bir banyo kontrolü elde edilir.
	CO ₂	Daha derin nüfuziyet ve daha yüksek kaynak hızı elde edilir.
Paslanmaz Çelikler	% 90 He + % 7.5 Ar + % 2.5 CO ₂	Korozyon direnci üzerinde kötü bir etkisi yoktur. Isı tesiri altındaki bölge dar olup yanma oluşu oluşmaz. En az distorsiyon sağlar.
Düşük Alaşımlı Çelikler	% 60-70 He + % 25-35 Ar + % 4.5 CO ₂	En az reaktivite, mükemmel tokluk, mükemmel ark kararlılığı, ısıtma özelliği ve dikiş profili sağlar. Çok az sıçrama oluşur.
	% 75 Ar + % 25 CO ₂	Orta derecede tokluk, mükemmel ark kararlılığı, ısıtma özelliği ve dikiş profili sağlar. Çok az sıçrama oluşur.
Alüminyum Magnezyum, Nikel ve Bunların Alaşımları	Argon Argon + Helyum	Sac parçalarda Argon başarılı bir şekilde kullanılır. 3 mm'den büyük kalınlıklarda ise Argon + Helyum karışımı tercih edilir.

3.3.2.4. Elektrot ve besleme donanımı

Elektrot besleme donanımı veya tel besleyici, elektrik motoru, çıkış mili, tahrik silindirleri ve elektrot hizalamasını ve basıncını korumak için gerekli diğer parçalardan oluşur (Şekil 3.8) (Holliday, 1993). Gaz metal ark kaynağında tel elektrotlar sürekli beslenerek kullanılır. Elektrodun tüketim hızı yüksektir. Yüksek hızda sürekli beslemeyi sağlayabilmek için elektrot besleme ünitesinin torça yüksek hacimde elektrot verebilmesi gerekir. Elektrot besleme ünitelerinde, elektrodun bükülmeden beslenmesini sağlayan makaralar vardır. Bazı durumlarda makara sistemi torçun içinde yer alır ve ağırlığı 0,45 - 0.9 kg arasında olan küçük makaralar kullanılır (Eryürek, 2007).



Şekil 3.8: İki makaralı bir tel besleyicinin şematik gösterimi (wwsgroup, n.d.).

Elektrot besleme ünitesi hız kontrolünden ayrı veya ona entegre edilebilir şekildedir. Elektrot besleme motoru büyük çoğunlukla doğru akımlıdır ve elektrotu torç vasıtasıyla iş parçasına itmek için mekanik enerji sağlar. Besleme ünitesi ya tabancaya entegredir veya biri tabancada diğeri ayrı bir besleyicide olmak üzere çift besleme üniteleri bir "itme-çekme" sistemi sağlamak için elektriksel olarak birbirine bağlanabilir (Holliday, 1993).

El tipi (yarı otomatik) tabancalarda bulunan tel elektrot tahrik mekanizmaları küçük motorlardan ve tahrik makaralarından oluşur. Bu motorlar genellikle ayarlanabilir hızda elektrikli veya basınçlı havayla çalışır. Tel besleme, GMAW uygulamalarının çoğunda sabit tutulur. Bazen, sabit bir akım tipi güç kaynağı kullanılıyorsa, değişken hızlı bir motor gerekli olacaktır. Sabit ark uzunluğunu (voltaj) korumak için kontrol ünitesi tel besleme hızını arttırdıkça veya azalttıkça motor hızı değişecektir (Kearns, 1978).

GMAW'de kullanılan tel sürücüler, 0,6-1,6 mm'lik çok çeşitli katı veya metal özlü elektrotların kullanılmasını sağlarlar. Doğru bir tel hızı sağlama, iyi bir kaynak işlemi için önemlidir. Etkin tel besleme hızı aralığı önemlidir ve çoğu tel sürücüsü 2-20 m/dk. aralığında bir tel besleme hızı sağlar. 30 m/dk'ya kadar tel besleme hızı sağlayan sürücüler de mevcuttur (Nadzan, 2014).

Kaynakla birleştirme işlemlerinde elektrot seçimi esas olarak kaynak yapılan metalin bileşimine dayanır. Tüm ticari elektrotlar, oksijen gözenekliliğini önlemek için silikon, manganez, titanyum ve alüminyum gibi küçük yüzdelerde oksijeni giderici metaller içerir. Bazıları azot gözenekliliğini önlemek için titanyum ve zirkonyum gibi başka metaller içerir. Ayrıca temizleme etkisine sahip diğer elementler de ilave edilebilir. Bu ilaveler iyi mekanik özellikler sağlamak amacıyla da kullanılabilir. Az oranda katılan ilaveler ana metalin bileşimine göre çok az bir farklılaşma gösterir. Ancak bazı uygulamalarda, ana metalden tamamen farklı bileşime sahip elektrotlar kullanmak gerekebilir (Eryürek, 2007; Primo, 2014).

GMAW kaynağında kullanılan elektrotlar diğer ark kaynaklarında (tozaltı ark veya özlü elektrotla ark kaynağı) kullanılanlara göre daha incedir. Proses değişkenlerine ve ana malzemelere bağlı olarak, elektrotların çapları tipik olarak 0,7 ila 2,4 mm arasında değişir, ancak 0,5 mm ve 4 mm arası kalınlıkları değişebilir. Genellikle 1,14 mm'ye kadar olan

ince elektrotlar, kısa devre metal iletimli kaynakta kullanılırken, en yaygın sprey iletimli kaynakta kullanılan elektrotlar genellikle en az 0,9 mm'dir (Kearns, 1978; Primo, 2014).

Elektrot çapları küçük ve akım şiddeti nispi olarak yüksek olduğundan elektrot besleme hızları da yüksek olmalıdır. Besleme hızı çoğu metal için 40-340 mm/s arasında değişir. Magnezyum için hız 590 mm/s'ye kadar çıkabilir. Elektrotlar uygun şekilde temperlenerek ve uzun ve sürekli tel haline getirilerek bu yüksek hızlara uygun hale getirilirler ve kaynak bölgesine sürekli ve yumuşak bir şekilde beslenirler (Eryürek, 2007).

MIG/MAG kaynağında elektrot seçimini etkileyen altı faktör vardır (Primo, 2014; Tülbentçi, 1990):

1. Ana metalin kimyasal bileşimi.
2. Ana metalin mekanik zellikleri.
3. Ana metalin kalınlığı ve geometrisi.
4. Kullanılan koruyucu gazın türü.
5. Kaynağın birleşim tipi.
6. Uygulanacak řartnamedeki gereksinimler.

Günümüzde, elektrot seçimi hazırlanan çeşitli standartlar sayesinde kolaylaşmıştır. Tablo 3.3'te çeşitli metaller için kullanılabilecek standart elektrot malzemeleri verilmektedir.

Tablo 3.3: GMAW için tavsiye edilen elektrotlar (LincolnElectric, 1997).

Base metal type	Recommended electrode		AWS filler metal specification (use latest edition)	Electrode diameter		Current range Amperes
	Material type	Electrode classification		in.	mm	
Aluminum and aluminum alloys	1100 3003, 3004 5052, 5454 5083, 5086, 5456 6061, 6063	ER1100 or ER4043 ER1100 or ER5356 ER5554, ER5356, or ER5183 ER5556 or ER5356 ER4043 or ER5356	A5.10	0.030 $\frac{3}{64}$ $\frac{1}{16}$ $\frac{3}{32}$ $\frac{1}{8}$	0.8 1.2 1.6 2.4 3.2	50-175 90-250 160-350 225-400 350-475
Magnesium alloys	AZ10A AZ31B, AZ61A, AZ80A ZE10A ZK21A AZ63A, AZ81A AZ91C AZ92A, AM100A HK31A, HM21A HM31A LA141A	ERAZ61A, ERAZ92A ERAZ61A, ERAZ92A ERAZ61A, ERAZ92A ERAZ61A, ERAZ92A ERAZ92A ERAZ92A EREZ33A EREZ33A	A5.19	0.040 $\frac{3}{64}$ $\frac{1}{16}$ $\frac{3}{32}$ $\frac{1}{8}$	1.0 1.2 1.6 2.4 3.2	150-300 ² 160-320 ² 210-400 ² 320-510 ² 400-600 ²
Copper and copper alloys	Silicon Bronze Deoxidized copper Cu-Ni alloys Aluminum bronze Phosphor bronze	ERCuSi-A ERCu ERCuNi ERCuAl-A1, A2 or A3 ERCuSn-A	A5.7	0.035 0.045 $\frac{1}{16}$ $\frac{3}{32}$	0.9 1.2 1.6 2.4	150-300 200-400 250-450 350-550
Nickel and nickel alloys	Monel ¹ Alloy 400 Inconel ¹ Alloy 600	ERNiCu-7 ERNiCrFe-5	A5.14	0.020 0.030 0.035 0.045 $\frac{1}{16}$	0.5 0.8 0.9 1.2 1.6	— — 100-160 150-260 100-400
Titanium and titanium alloys	Commercially pure Ti-0.15 Pd Ti-5Al-2.5Sn	Use a filler metal one or two grades lower ERTi-0.2 Pd ERTi-5Al-2.5Sn or comm. pure	A5.16	0.030 0.035 0.045	0.8 0.9 1.2	— — —
Austenitic stainless steels	Type 201 Types 301, 302, 304, & 308 Type 304L Type 310 Type 316 Type 321 Type 347	ER308 ER 308 ER308L ER310 ER316 ER321 ER347	A5.9	0.020 0.025 0.030 0.035 0.045 $\frac{1}{16}$ $\frac{5}{64}$ $\frac{3}{32}$ $\frac{7}{64}$ $\frac{1}{8}$	0.5 0.6 0.8 0.9 1.2 1.6 2.0 2.4 2.8 3.2	— — 75-150 100-160 140-310 280-450 — — — —
Steel	Hot rolled or cold-drawn plain carbon steels	ER70S-3 or ER70S-1 ER70S-2, ER70S-4 ER70S-5, ER70S-6	A5.18	0.020 0.025 0.030 0.035 0.045 0.052 $\frac{1}{16}$ $\frac{5}{64}$ $\frac{3}{32}$ $\frac{1}{8}$	0.5 0.6 0.8 0.9 1.2 1.3 1.6 2.0 2.4 3.2	— — 40-220 60-280 125-380 260-460 275-450 — — —
Steel	Higher strength carbon steels and some low alloy steels	ER80S-D2 ER80S-Ni1 ER100S-G	A5.28	0.035 0.045 $\frac{1}{16}$ $\frac{5}{64}$ $\frac{3}{32}$ $\frac{1}{8}$ $\frac{5}{32}$	0.9 1.2 1.6 2.0 2.4 3.2 4.0	60-280 125-380 275-450 — — — —

3.3.2.5. Kaynak torçu ve kablo grubu

MIG-MAG kaynağında torç ve kablo grubu çalışma güvenliği açısından tamamen izole edilmiş olup, bunların üç görevi vardır:

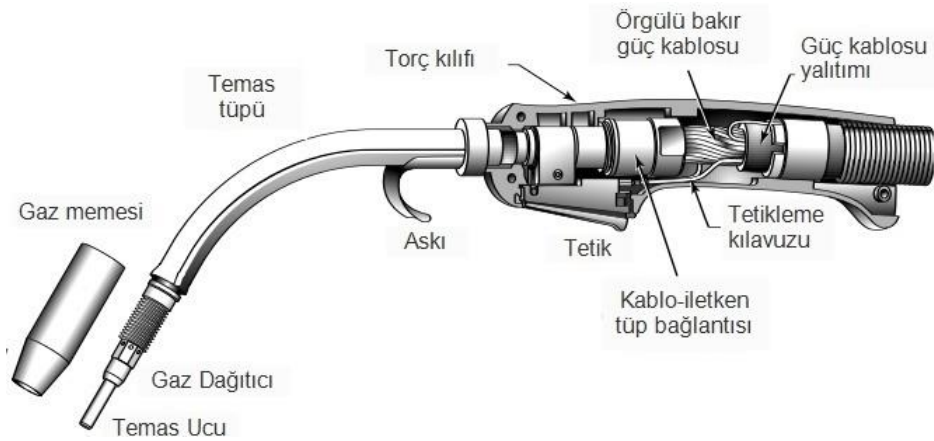
- Koruyucu gazı kaynak bölgesine taşır,

- Kaynak metalini (elektrotu) iletir ve
- Güç ünitesinden beslenen ve akım taşıyan kabloyu temas tüpüne iletir.

Torçunun tetiği çalıştığı zaman, kaynak bölgesine ve parçaya aynı anda koruyucu gaz, güç ve elektrot iletimi sağlanır ve bu sayede bir ark oluşur (Eryürek, 2007; Tülbentçi, 1990).

Yüksek akımla çalışan ve yüksek hacimli üretim işleri için kullanılan ağır hizmet tipi torçlardan, düşük akımlı veya zor pozisyon kaynağında kullanılacak hafif torçlara kadar çok çeşitli uygulamalar için farklı tipte torçlar geliştirilmiştir. Torç içinde üretilen ısıyı ve ayrıca kaynak arkından ve ergimiş kaynak metalinden yayılan ısıyı uzaklaştırmak için soğutma gereklidir. Koruyucu gaz veya dahili dolaşım suyu veya her ikisi de soğutma için kullanılır. En yaygın kullanılan torçlar koruyucu gaz ile soğutulacak şekilde tasarlanmıştır ve 300 A'den daha düşük kaynak akımlarında kullanılırlar. Bununla birlikte, yüksek amperlerde (>300 A) veya darbeli akım kullanıldığında su soğutmalı torçlar kullanılır (Degemak, 2010; Holliday, 1993).

Günümüzde en yaygın olarak kullanılan torçlar, kuğu boynu tabir edilen ve oksii-asetilen üflecini andıran torçlardır (Şekil 3.9); tel elektrotun spiral içinde ilerletilmesinin zor olduğu alaşımlar için tabanca şeklinde torçlar yapılmıştır. Tel ilerletme tertibatı ve ufak bir tel kangalı bu torçların üzerinde bulunur. Kuğu boynu torçlar gaz ile soğutulurlar ve düşük amperli kaynak uygulamaları için kullanılırlar. Torçlarda ayrıca kendi entegre elektrot besleme üniteleri de bulunabilir (Degemak 2010; Tülbentçi, 1990).



Şekil 3.9: GMAW torç kesiti (Nadzam, 2014).

Genellikle bakır veya bakır alaşımından yapılan temas tüpü (Şekil 3.9), kaynak akımını elektroda göndermek ve elektrotu kaynaklanacak metale yönlentmek için kullanılır. Temas tüpü, elektrik kablosu ile güç ünitesine elektriksel bağlanır. Temas tüpünün iç yüzeyi çok önemlidir, çünkü elektrot bu tüple iyi bir elektrik teması yapmalı ve tüp içinde kolayca hareket edebilmelidir. Genel olarak, temas tüpündeki delik kullanılan telden 0,13-0,25 mm daha büyük olur, ancak alüminyum gibi malzemeler için daha büyük boyutlar gerekebilir. Gaz memesi ve temas tüpü, arkın sıcaklığından en fazla etkilenen parçalardır. Temas tüpü, akımı hareket halindeki tele kısa bir mesafede ilettiğinden sıcaklığın yanı sıra hem yüksek akım şiddetine hem de kaynak banyosundan sıçrayan metal damlacıklarına maruz kalmaktadır. Yüksek sıcaklık yüzünden aşınma artar ve telin geçtiği delik büyür ve dolayısıyla tele elektrik iletimi zorlaşır. Bu nedenle delik periyodik olarak kontrol edilmeli ve aşınma nedeniyle genişlemişse değiştirilmelidir (Eryürek, 2007; Holliday, 1993; Tülbentçi, 1990).

Gaz memesi (enjektör/nozul), torçtan çıkan koruyucu gaz sütununu kaynak bölgesine doğru yönlendirir (Şekil 3.9). Ergimiş kaynak metalini atmosferik kirlenmeye karşı yeterince korumak için düzgün bir akış sağlamak son derece önemlidir. Farklı boyutlu gaz memeleri mevcuttur ve uygulamaya göre seçilmelidir, yani, ergimiş metal banyosunun büyük olduğu yüksek akım çalışmaları için daha büyük memeler ve düşük akım ve kısa devre iletimli kaynak için daha küçük memeler kullanılır (Eryürek, 2007; LincolnElectric, 1997).

Elektrot kanalı ve gömleği, elektrotu besleme donanımından torça ve oradan temas tüpüne yönlendirir ve elektrodu korur. İyi bir ark stabilitesi elde edebilmek için durmaksızın elektrot beslemesi gereklidir. Sert elektrot malzemeleri (çelik ve bakır gibi) seçildiğinde çelik gömlek tavsiye edilirken, magnezyum ve alüminyum gibi yumuşak elektrot malzemeleri için plastik astarlar kullanılmalıdır (Holliday, 1993; Primo, 2014).

Torç sisteminin diğer aksesuarları; koruyucu gazı ileten gaz hortumu, varsa soğutma suyunu ileten su hortumu, elektrik akımını iletmek için kullanılan elektrik kablosu ve tel sürme kılavuzudur (Eryürek, 2007).

3.3.3. MIG kaynak parametreleri

Manuel kaynak işlemi sırasında kaynağın nüfuziyeti, dikiş şeklini ve genel kaynak kalitesini etkileyen farklı kaynak parametreleri üzerinde kontrol sağlanmalıdır. Kaynak değişkenlerinin uygun bir şekilde seçilmesi, yeterli kalitede kaynak yapma imkanını artıracaktır. Bununla birlikte, bu değişkenler tamamen bağımsız değildir ve bir değişkeni değiştirmek genellikle istenen sonucu elde etmek için diğer bazılarının da değiştirilmesini gerektirir. Tüm bu değişkenler uygun dengede olduğunda, kaynakçı daha kaliteli ve sağlam kaynaklar üretebilir (Kearns, 1978; wwsgroup, n.d.).

Kaynak değişkenlerinin seçimi ana metal, elektrot (dolgu) metal, derz tasarımı ve kaynak kalitesi ile ilgili istekler belirlendikten sonra yapılmalıdır. Bu değişkenler aşağıdaki gibidir:

- Kaynak akımı
- Ark gerilimi (ark voltajı - ark boyu)
- Kaynak hızı
- Elektrot uzunluğu
- Elektrot açısı
- Elektrot (tel) çapı
- Kaynak pozisyonu
- Koruyucu gaz

Bu değişkenlerin kaynak özellikleri üzerindeki etkileri Tablo 3.4'te gösterilmiştir.

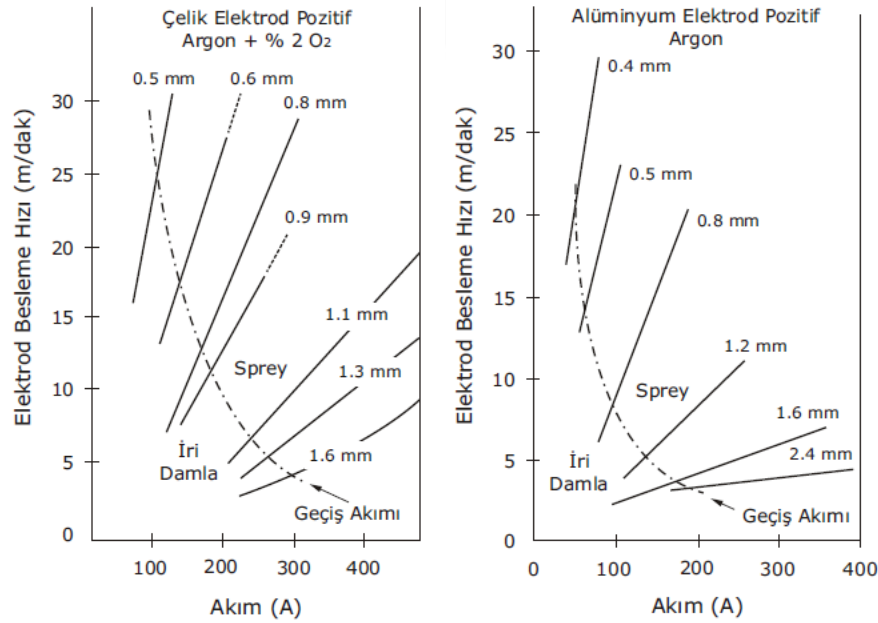
Tablo 3.4 : Proses parametrelerindeki değişikliklerin kaynak özelliklerine etkileri (Holliday, 1993).

Kaynak Parametreleri	Beklenen Değişiklikler							
	Nüfuziyet		Birikme Hızı		Dikiş Boyutu		Dikiş Genişliği	
	Artar	Azalır	Artar	Azalır	Artar	Azalır	Artar	Azalır
Akım Ve Tel Besleme Hızı	Artar	Azalır	Artar	Azalır	Artar	Azalır	Az Etki	Az Etki
Voltaj	Etkisi Yok	Etkisi Yok	Az Etki	Az Etki	Az Etki	Az Etki	Artar	Azalır
Ark Hızı	Etkisi Yok	Etkisi Yok	Az Etki	Az Etki	Azalır	Artar	Azalır	Artar
Serbest Tel Uzunluğu	Azalır	Artar	Artar	Azalır	Artar	Azalır	Artar	Azalır
Tel Çapı	Artar	Azalır	Artar	Azalır	Az Etki	Az Etki	Az Etki	Az Etki
Koruyucu Gaz %	Artar	Azalır	Az Etki	Az Etki	Az Etki	Az Etki	Artar	Azalır
Torç Açısı	Çekme	İtme	Az Etki	Az Etki	Az Etki	Az Etki	İtme	Çekme

3.3.3.1. Kaynak akımı

MIG'de kullanılan kaynak akımı; birikme hızı, kaynak dikişinin boyutu, şekli ve nüfuziyeti üzerinde en büyük etkiye sahiptir. MIG kaynağında, metaller genellikle doğru akımda elektrot pozitif kutba bağlanarak (DCEP) kaynaklanır, bu sayede iş parçasına maksimum ısı girişi sağlanır ve nispeten derin bir nüfuziyet elde edilebilir. Alüminyum ve magnezyum alaşımlarının kaynağında çok önemli olan DCEP'nin oksit giderme etkisi, kaynak tortusunun temizlenmesine katkıda bulunur (wwsgroup, n.d.).

Diğer tüm kaynak parametreleri sabit tutulduğunda, akımın artırılması kaynak nüfuziyetinin derinliğini ve genişliğini ve kaynak dikişinin boyutunu artıracaktır. Sabit voltajlı bir sistemde, tel besleme hızı ve kaynak akımı aynı düğme tarafından kumanda edilir. Tel hızı arttıkça kaynak akımı da artar, bu da tel ergime hızı ve birikme hızında artışa neden olur. Elektrot besleme hızı ile kaynak akımı arasındaki ilişki alaşımsız çelik ve alüminyum elektrotlar için Şekil 3.10'da verilmiştir (Eryürek, 2007; wwsgroup, n.d.).



Şekil 3.10: Alaşımsız çelik elektrot ve alüminyum elektrot için elektrot besleme hızı ile kaynak akımı arasındaki ilişki (Eryürek, 2007).

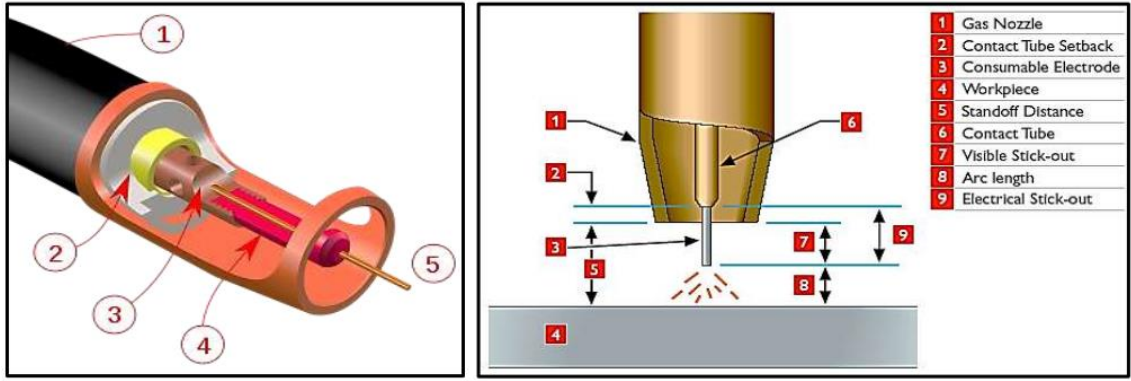
Her bir elektrot telinin boyutu ve tipi, en iyi sonuçları vermek için minimum ve maksimum akım aralığına sahiptir. Belirli bir elektrot boyutu için aşırı düşük bir kaynak akımı zayıf bir nüfuziyet verir ve kaynak metalinin birikmesi yavaş gerçekleşir, dikiş kabadır. Akım çok yüksek olursa, kaynak dikişinin boyutu büyük olur ve dolgu metalini

boşa harcayan aşırı derin nüfuziyet, yanma ve derin kesime neden olur. Çok yüksek veya çok düşük kaynak akımı, kaynak metalinin mekanik özelliklerini ve çekme mukavemetini de etkiler. Süneklik azalır ve kaynak metalinde gözeneklilik, aşırı oksitler ve katışkılar görülebilir (wwsgroup, n.d.).

3.3.3.2. Ark gerilimi (Ark voltajı-Ark boyu)

Genellikle ark gerilimi terimi ve ark boyu terimleri birbirlerinin yerine kullanılırlar. Ancak ark boyu bağımsız bir değişkenken ark gerilimi diğer değişkenlere ve ark boyuna bağlıdır. Ark boyu (Şekil 3.11), MIG kaynağında kontrol altında tutulması gereken en önemli değişkenlerden biridir. Elektrot bileşimi ve boyutları, koruyucu gaz türü ve kaynak tekniği gibi tüm değişkenler sabit tutulduğunda, ark uzunluğu doğrudan ark voltajıyla ilişkilidir. Örneğin, karbondioksit ve helyumdaki normal ark voltajı, argonda elde edilenlerden çok daha yüksektir. Ark boyunun uzun olması gaz kalkanını bozar, ark dolaşmaya eğilimli olur ve bu nedenle kaynak dikişinin yüzeyini ve nüfuziyetini etkiler. Ark voltajı arttırılarak kaynak dikişi daha düz ve geniş hale gelir, nüfuziyet voltaj optimum değere ulaşana kadar artar, bundan sonra azalmaya başlar (Eryürek, 2007; wwsgroup, n.d.).

Yüksek ve düşük voltajlar dengesiz bir ark oluşturur. Aşırı voltaj, aşırı sıçrama ve gözeneklilik oluşumuna neden olur, dolgu kaynaklarında alttan kesme artar ve çatlamaya neden olan içbükey dolgu kaynakları üretir. Düşük voltaj, daha fazla dışbükeyliğe (yüksek taç) sahip daha dar dikişler üretir, ancak aşırı düşük voltaj, kaynak dikişinin kenarlarında gözenekliliğe ve üst üste binmeye neden olabilir (Holliday, 1993; wwsgroup, n.d.).



1) Torç sapı, 2) Kalıplanmış fenolik dielektrik (beyaz renkte gösterilmiştir) ve dişli metal somun eki (sarı), 3) Koruyucu gaz difüzörü, 4) Temas ucu, 5) Meme çıkış alını.

1) Gaz memesi, 2) Temas tüpü sınırı, 3) Tükendir elektrot, 4) İş parçası, 5) Emniyet mesafesi, 6) Temas tüpü, 7) Telin görünen ucu, 8) Ark boyu, 9) Serbest elektrot uzunluğu

Şekil 3.11: GMAW kaynağında torçun detayı ve bazı kaynak terimleri (Primo, 2014).

3.3.3.3. Kaynak hızı

Arkın iş parçası boyunca hareket etme hızıdır. Ayrıca kaynak dikişinin birim zamandaki boyu olarak da tanımlanır. Yarı otomatik kaynakta kaynakçı ve otomatik kaynakta makine tarafından kontrol edilir. İlerletme hızının etkileri, hemen hemen ark voltajının etkilerine benzer. Belirli bir optimum hız değerinde nüfuziyet maksimumdur ve ark hızı arttıkça ya da azaldıkça nüfuziyet azalır (Tülbentçi, 1990; wwsgroup, n.d.).

Sabit bir akım değeri için, daha yavaş ark hızları, daha uzun ısıtma süresi nedeniyle ana metale daha yüksek ısı girişi sağlar, bu da daha geniş ve büyük kaynak dikişinin oluşumuna yol açar. Ark ilerleme hızı çok yavaş olduğunda, zayıf ergime, daha düşük nüfuziyet, gözeneklilik, cüruf inklüzyonları ve kaba kaynak dikişine neden olan olağandışı bir kaynak oluşumu meydana gelir (Kearns, 1978; Tülbentçi, 1990; wwsgroup, n.d.).

Sürüş hızının artırılması zıt etkiler gösterir; daha düşük ısı girdisiyle birlikte daha az kaynak metali birikir ve daha az nüfuziyet ile daha dar bir kaynak dikişi ortaya çıkar. Aşırı yüksek hızlar yüksek sıçrama ve alttan kesmeye neden olur ve kaynak uzunluğu başına çok az kaynak metali birikintisi nedeniyle kaynak dikişi düzensiz bir yapı gösterir (Kearns, 1978; wwsgroup, n.d.).

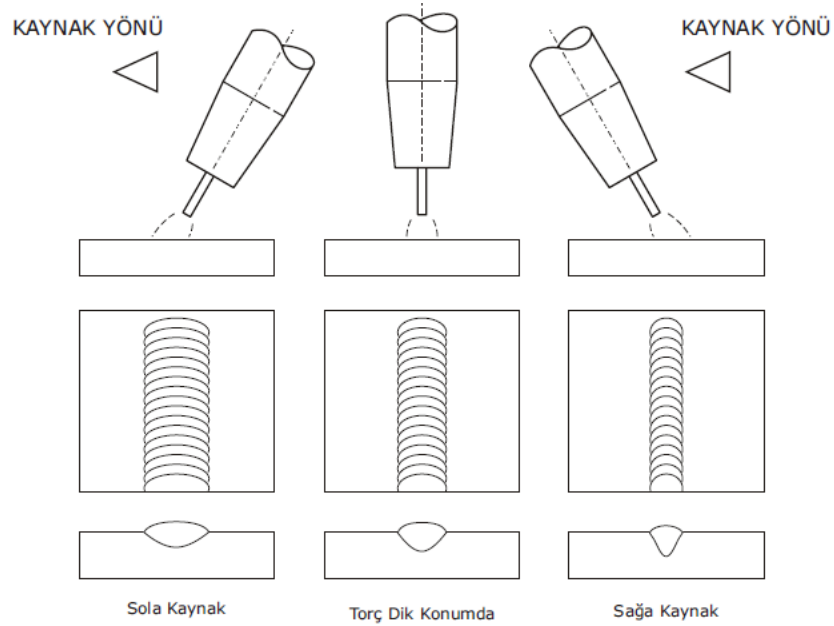
Tel hızı (akım) ve ark voltajı gibi MIG kaynağında önemli bir değişken olan ark ilerletme hızı, operatör tarafından kaynak yapılan metalin kalınlığına, derz tasarımına, derz montajına ve kaynaklamaya göre seçilir (wwsgroup, n.d.).

3.3.3.4. Serbest elektrot uzunluğu

Şekil 3.11'de görüldüğü üzere, serbest elektrot uzunluğu temas tüpünün ucu ile elektrot ucunun arasındaki mesafedir. Serbest elektrot uzunluğu arttıkça elektrik direnci de artar. Direncin arttığında direnç doğan ısı artar, bu da elektrotun sıcaklığını yükseltir. Bu da ergime hızında az da olsa bir artışa sebep olur. Daha da mühimi, elektrik direncinin artmasıyla, temas tüpü ile parça arasında daha fazla gerilim düşüşü meydana gelir. Bu durum, otomatik olarak akımın azaltılmasıyla dengelenir. Bunun sonucunda elektrot ergime hızı azaltılır ve ark boyunun kısalması sağlanır. Böylece, voltaj arttırılmadıkça, kaynak metali dar ve tepeli bir kaynak geometrisi biriktirir. İstenilen serbest elektrot uzunluğu, çoğunlukla kısa devre metal iletimlerinde 6-13 mm, diğer tür metal iletimlerinde ise 13-25 mm arasındadır (Eryürek, 2007).

3.3.3.5. Elektrot açısı

Torçun hareket yönüne göre açısıdır ve genellikle yaklaşık olarak dikey kalmalıdır. Elektrotun ucu kaynak yapılan yönün tersine doğruysa, bu tekniğe "sağa kaynak" denir. Elektrotun ucu kaynak yapılan yöne doğruysa buna da "sola kaynak" denir. Şekil 3.12'de bu teknikler ve bunların dikiş şekline ve nüfuziyete etkileri gösterilmiştir (Eryürek, 2007; Primo, 2014).



Şekil 3.12: Kaynak açısının kaynak dikişine etkileri (Eryürek, 2007).

Tüm konumlar için, 5 ila 15° (dikeyden) arasında değişen bir hareket açısı, maksimum nüfuz eden bir kaynak ve dar, dışbükey bir yüzey konfigürasyonu sağlar. Ayrıca erimiş kaynak havuzunun en üst seviyede korunmasını sağlar. Alüminyum gibi bazı malzemeler için, ergiyik kaynak metalinin önünde hem ıslanmayı desteklediği hem de ana malzemenin oksidasyonunu azaltarak bir "temizleme etkisi" sağladığı için bir sola kaynak tercih edilir (Holliday, 1993).

Nüfuziyetin artması ve geniş ve düz bir kaynak dikişi istenirse hareket açısı sola kaynak tekniğine doğru arttırılmalıdır. Hareket açısı 25° seçilip sağa kaynak tekniği uygulanırsa maksimum nüfuziyet meydana gelir. Ayrıca kaynak dikişi daha dar ve daha dışbükey olur. Ark kararlıdır ve daha az sıçrama meydana gelir (Kearns, 1978).

3.3.3.6. Elektrot (tel) çapı

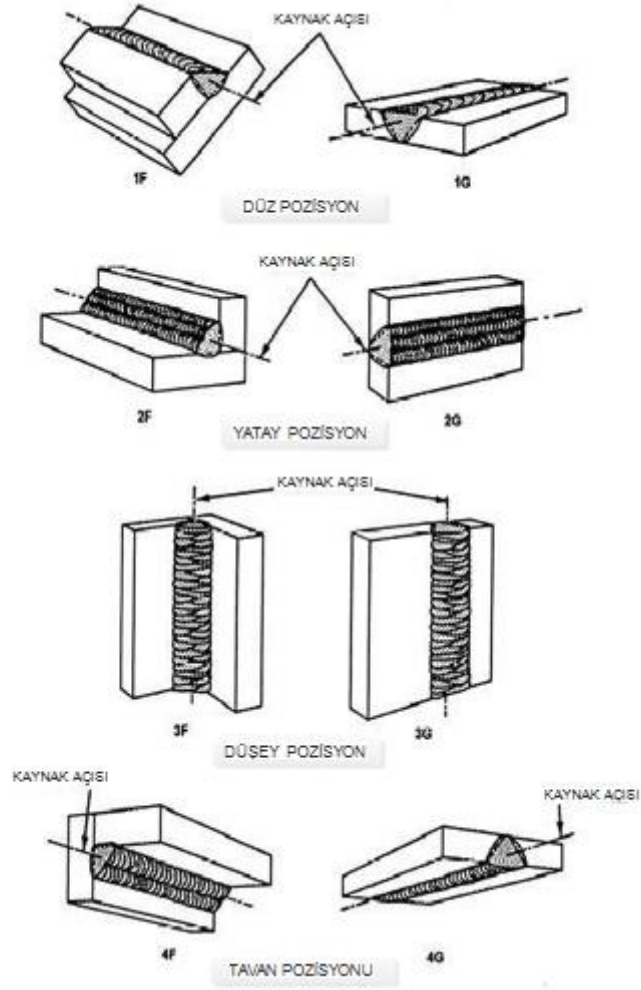
Belirli bir bileşimdeki her bir elektrot, çapına göre belli bir amper aralığında kullanılabilir. Aynı amperde farklı çaplarda iki tel kullanılırsa, daha küçük çaplı olanın ergime hızı daha yüksek olur. Nüfuziyet aynı zamanda akım yoğunluğunun bir fonksiyonudur. Örneğin, aynı amper kullanıldığında 1,14 mm çaplı bir elektrot, 1,59 mm çaplı bir elektrottan daha derine nüfuz eder. Bununla birlikte, kaynak dikişinin profili daha büyük elektrotla daha geniş olacaktır. Küçük kaynak dikiş profili istendiğinde de bunun tersi geçerlidir. Daha küçük çaplı teller ağırlık bazında daha maliyetli olduğundan, her uygulama için minimum maliyeti verecek bir tel boyutu seçilmelidir (Kearns, 1978).

3.3.3.7. Kaynak pozisyonu

Herhangi bir pozisyonda kaynak yapılmasını sağlamak için bazı teknikler geliştirilmiştir. Endüstriyel uygulamalarda, manipülatörler ve konumlayıcılar kaynak birleşme noktasını mümkün olduğunca düz bir konumda tutmak için geliştirilmiş ve kullanılmıştır. Uygulamada, dört temel kaynak pozisyonu vardır (Şekil 3.13):

- Düz pozisyon: Bu pozisyonda, dolgu metali derzin üst tarafından itibaren doldurulur ve kaynağın yüzü yaklaşık olarak yataydır. Düz pozisyonda kaynak yapmak en basit ve en uygun tekniktir. En yüksek biriktirme hızları bu teknikle sağlanabilir ve mekanize veya otomatik kaynak tekniklerine kolayca uygulanabilir. Bu pozisyonda, ergimiş metal aşağı doğru ek yerine çekilir. Böylece daha hızlı ve daha kolay bir kaynak yapılır.

- Yatay pozisyon: Bu, konum dışı bir kaynak pozisyonudur. Kaynağın yatay bir yüzeyin üst tarafında ve yaklaşık olarak dikey bir yüzeye karşı gerçekleştirildiği kaynak konumudur. Düz pozisyona kıyasla daha zor bir pozisyonudur ve kaynak operatörünün bunları iyi yapabilmesi için daha fazla beceri gerektirir.
- Düşey pozisyon: Bu pozisyonda hem plaka hem de kaynak dikey veya neredeyse dikey olarak uzanır. Düşey kaynak yaparken, yerçekimi kuvveti ergimiş metali aşağı doğru iter ve böylece yığılma eğilimi gösterir. Buna karşı koymak için yukarı veya aşağı dikey pozisyon kullanabilirsiniz.
- Tavan pozisyonu: Tüm pozisyonlar içinde en karmaşık ve en zor pozisyon, kaynak yapabilmek için özel becerilere ihtiyaç duyulan tavan pozisyonudur. Kaynak, birleşme yerinin alt tarafından yapılır ve kaynağın yüzü yataydır. Tavan pozisyonunda, derz üzerine biriken metal sarkma eğilimi gösterir ve bu da daha yüksek bir tepeye sahip bir dikiş ile sonuçlanır. Bunu önlemek için, ergimiş metal birikintisi küçük tutulmalıdır. Kaynak birikintisi çok büyürse, ergimiş metalin soğuması için kaynak alevi bir anlığına uzaklaştırılmalıdır (Grill, 2019; wwsgroup, n.d.).



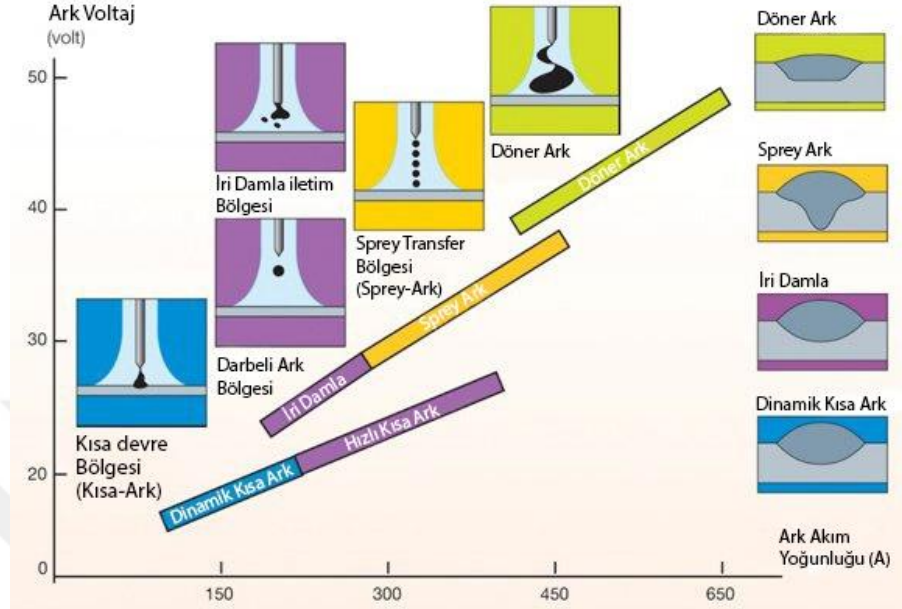
Şekil 3.13: Temel kaynak pozisyonları (Grill, 2019).

3.3.4. Ark yoluyla metal iletim mekanizmaları

Gazaltı ark kaynağında metal damlalarının elektrot telinden kaynak havuzuna aktarılması her biri farklı özelliklere, avantaj ve sınırlamalara sahip olan beş farklı iletim mekanizmasıyla gerçekleşir (Primo, 2014):

1. Kısa devre iletimi (kısa ark)
2. İri damla iletimi (uzun ark)
3. Sprey iletimi
4. Darbeli sprej iletimi
5. Çift darbeli sprej iletimi
6. Döner sprej iletimi

Hangi iletim yönteminin hangi akım ve gerilim aralığında çalıştığını gösteren grafik Şekil 3.14'te verilmiştir.



Şekil 3.14: MIG/MAG kaynağında iletim yöntemleri (Oerlikon, 2020).

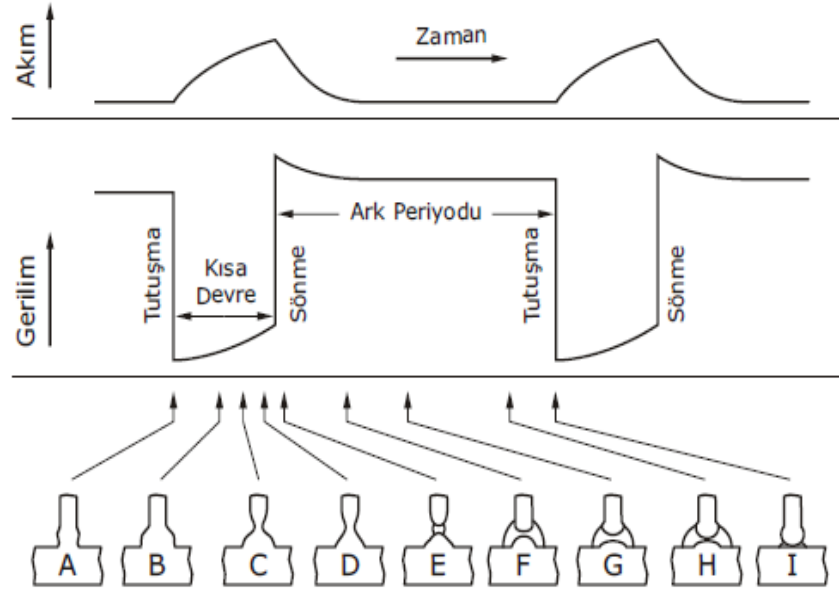
3.3.4.1. Kısa devre iletimi (kısa ark)

Kısa ark da ince elektrotlar kullanılıp (0,6 – 1,2 mm) kısa ark boyu ile kaynak yapıldığında ortaya çıkan bir ark türüdür. Bu durumda en düşük kaynak akımları ve voltajları kullanıldığından çok düşük ısı girişi sağlanır (wwsgroup, n.d.).

Bu kaynak yönteminde, metal ark boşluğu boyunca değil, kaynak telinin kaynak havuzuyla temas ettiği kısa bir süre boyunca elektrottan iş parçasına aktarılır. Elektrot telinin ucu kaynak havuzuna dokunduğunda, ark söner, voltaj düşer ve amper yükselir. Bu anda, ergimiş kaynak metalinin yüzey gerilimi yardımıyla ergimiş elektrot ucundan kaynak havuzuna metal aktarılır. Telin ucundaki damla kaynak havuzuna geçtiğinde artık metal bağlantısı kalmaz ve ark yeniden oluşur (Şekil 3.15). Ark ucunun ısısında, elektrot ertilir ve tel kaynak havuzuna girerken bir sonraki kısa devre oluşur (Tülbentçi, 1990).

Uygulanan voltaj ve ampere bağlı olarak elektrot kaynak havuzuna, saniyede 20 ile 200 arası temas eder. Damla boyutu ve kısa devre süresi, koruyucu gazın bileşiminden etkilenir. MIG için geçerli bu metal iletim yöntemi normalde demir alaşımlarının CO₂ açısından zengin karışık gazla korunduğu uygulamalarda kullanılır. Doğru ayarlanmış bir

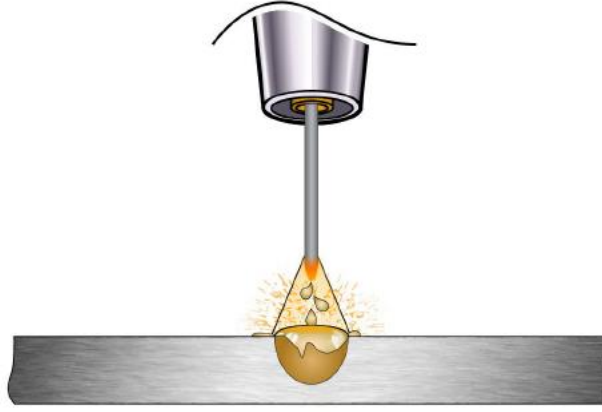
ark, az miktarda sıçrama ve nispeten küçük, hızlı donan ve kolayca kontrol edilebilen bir kaynak havuzu üretir. Bu nedenle, bu metal iletim yöntemi ince kesitler, çarpılma tehlikesi fazla olan haller, düşey ve tavan pozisyonlarında kaynak için uygundur. Ayrıca büyük kök açıklıklarının doldurulması için çok uygundur (Tülbentçi, 1990; wwsgroup, n.d.).



Şekil 3.15: Kısa ark yöntemiyle metal iletimi (Eryürek, 2007).

3.3.4.2. İri damla iletimi (uzun ark)

İri damla (küresel) metal iletimi kısa devre iletimine nispeten biraz daha yüksek çalışma akımlarında ve gerilimlerinde meydana gelir (Şekil 3.14). Bu metal iletim yönteminde, elektrotun ucunda oluşan damla telden iki veya üç kat daha büyük hale gelir. Bu damlacık, zayıf elektromanyetik ve güçlü yerçekimi kuvvetlerinin etkisi ile elektrotun ucundan ayrılır ark boyunca düzensiz formda ilerler (Şekil 3.16). Damlacıklar tel elektrotun ucunda büyüdükçe ark kararlılığını bozarlar. Sonuç olarak, iş parçasındaki ısıdan etkilenen bölge daralır, kaynağın nüfuziyeti azalır, kaynağın birikmesi düzensizdir ve büyük miktarlarda sıçrama gerçekleşir. Kısa devreyi önlemek için ark, kaynak havuzuna dokunmadan damlacıkların elektrot ucundan serbestçe ayrılmasına izin verecek kadar uzun olmalıdır (LincolnGlobal, 2016; Tülbentçi, 1990).



Şekil 3.16: İri damla iletim yöntemiyle ark kaynağı (Lincoln Global, 2016).

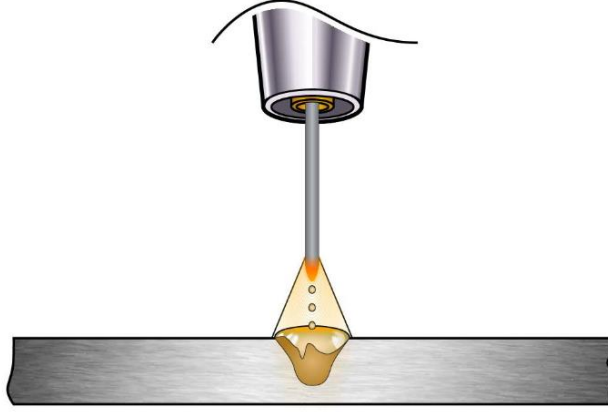
İri damla metal iletimi her tür koruyucu gazla elde edilebilir. CO₂ koruyucu gaz kullanıldığında akım ve voltaj seviyelerinin çoğunda küresel metal transferi gerçekleşir. MIG kaynağında bu çalışma şekli, yumuşak çeliğe düz ve yatay pozisyonda uygulanır. İri damla metal iletimi sınırlamaları: Sıçramanın olması, spreylere göre daha az kötü kaynak görünümü, kaynağın düz konumlar ve yatay dolgu kaynakları ile sınırlı olması, iş parçasının 3 mm veya daha kalın olması gerekliliği (Miller, 2007; wwsgroup, n.d.).

3.3.4.3. Sprey iletimi

Bu iletim yönteminde, ark boyunca metal transferi, elektrot çapına eşit veya daha küçük boyutta damlacıklar şeklindedir (Şekil 3.17). Damlacıklar elektrottan kaynak banyosuna doğru düz bir çizgide yönlendirilir. Bu da esas olarak sıçramayı ortadan kaldırır ve yüksek kaliteli bir kaynak işlemi ile sonuçlanır. Ark (plazma) enerjisi koni biçimli bir düzende yayılır. Bu da kaynak dikişi kenarlarında iyi "yıkama" özelliklerine neden olur, ancak nispeten sığ nüfuziyet verir. Genelde spreylere inert (argon veya argonca zengin) koruyucu gaz ile yüksek amper ve voltaj kullanıldığından oluşur (Primo, 2014).

Sprey iletimi, kısa devre iletiminden daha yüksek bir voltaj ve akım gerektirdiğinden, daha yüksek ısı girişi ve daha büyük kaynak banyo alanı (belirli bir kaynak elektrot çapı için) ile sonuçlanır. Genellikle sadece yaklaşık 6,4 mm üzerindeki kalınlıktaki iş parçalarında kullanılır. Büyük kaynak banyosu nedeniyle, genellikle sadece düz ve yatay kaynak pozisyonlarıyla sınırlıdır ve bazen aşağı doğru uygulanan düşey kaynaklar için de kullanılır. Kök paso kaynakları için genellikle pratik değildir. Daha küçük bir elektrotla

birlikte daha düşük ısı girişi sağlandığında çok yönlülüğü artar. GMAW uygulamaları için maksimum birikme hızı nispeten yüksektir, yaklaşık 60 mm/s (Primo, 2014).



Şekil 3.17: Eksenel spray ark iletimi (Lincoln Global, 2016).

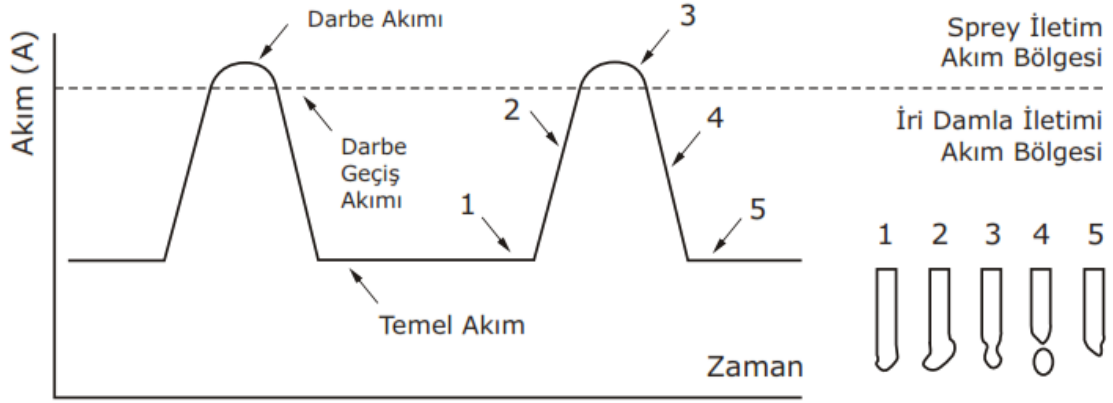
3.3.4.4. Darbeli spray iletimi (Palslı ark - Pulsed arc)

Spray iletimiyle aynı prensiplere dayanır ve onun farklı bir versiyonudur. Buradaki fark, dolgu telini eritmek ve her bir darbe ile küçük bir ergimiş damlacık düşmesine izin vermek için darbe akımı kullanılmasıdır. Darbeler ortalama akımın daha düşük olmasını sağlar, toplam ısı girişini azaltır ve böylece ince iş parçalarının kaynaklanmasını mümkün kılarken kaynak banyosunun ve ısıdan etkilenen bölgenin boyutunu azaltır (Primo, 2014).

Darbeli ark iletiminin oluşturulabilmesi için özel olarak tasarlanmış güç ünitelerine ihtiyaç vardır ve bu sayede spray ark iletiminde ortaya çıkan kaynak pozisyonu ve kaynak edilecek metalin kalınlığı ile ilgili bazı sınırlamalar ortadan kaldırılmıştır. Bu makineler sayesinde “darbeli (pulsed) akım” üretilmekte, dalga formları ve frekansları hassas bir şekilde kontrol edilebilmektedir (Eryürek, 2007).

Darbeli akım üreten bu makineler Şekil 3.18'de görüldüğü üzere, iki farklı akım seviyesi arasında değer sağlamaktadır. Düşük akım sabit şiddette olup, elektrot ucunda damla oluşturmaya yetecek kadar enerji göndermeden arkın devamını sağlar. Yüksek akım ise sabit akıma eklenen darbe akımı olup, şiddeti spray ark iletiminde gerekli geçiş akımından fazladır. Elektrot metali, yalnızca yüksek akım sırasında kaynak banyosuna aktarılır. Genellikle her yüksek akım darbesi sırasında bir damla veya birkaç damla aktarılır. Ark kararlılığı geleneksel spray ark kaynağına benzer. Düşük akım süresi arkı korur ve ortalama akımı azaltmaya yarar. Saniyede geçen darbe sayısı ve şiddeti, arkın

enerjisini ve buna bağılı olarak elektrotun ergime hızını kontrol eder. Güç kaynağı saniyede 30 ila 400 darbe arasında bir frekansta akım darbeleri sağlayabilir (Eryürek, 2007; Primo, 2014; Street, 1990; Weman, 2012).



Şekil 3.18: Darbeli spray ark iletiminin akım karakteristiği (Eryürek, 2007).

Darbe frekansının artırılması, damla sayısını, akım şiddetini, iş parçasına ısı girdisini artırır. Bütün bunlar dikiş biçimini etkiler. Darbeli ark kaynağı akım üreteçlerinde frekans değerleri genellikle 25, 33, 50 ve 100 olarak kademelendirilmiştir. Düşük frekans değerlerinde (25 ve 33 gibi) oluşan ark zararlı olduğundan, el ile yapılan kaynakta kullanılmazlar (Tülbentçi, 1990).

Kısa ark iletimi ile karşılaştırıldığında, bu yöntem biraz daha yavaş bir maksimum hıza (85 mm/s) sahiptir ve işlemde koruyucu gaz olarak öncelikle düşük oranda karbon dioksit içeren argon kullanılmalıdır. Darbeli akımla spray iletiminde ortalama ark enerjisi geleneksel spray iletime göre düşüktür. Ayrıca elektrot ergime hızı daha azdır. Darbeli akım sayesinde kararlı ve sabit bir ark elde edilir, kısa devre gerçekleşmez ve bu sayede sıçrama olmaz. Böylece yöntem tüm metaller için uygun hale gelir. Darbeli ark kaynağı esas olarak alüminyum ve paslanmaz çeliğin kaynağı için kullanılır, ancak sıradan karbon çeliğinin kaynağı için de kullanılabilir. Bu yöntemde daha kalın elektrot telleri de kullanılabilir. Ayrıca hem saclarda hem de kalın metallerin kaynağında tüm pozisyonlarda kullanılabilir (Eryürek, 2007; Primo, 2014).

Darbeli MIG kaynağının avantajları (Weman, 2012):

- Süreç tamamen kontrol edilir ve sıçramaz.

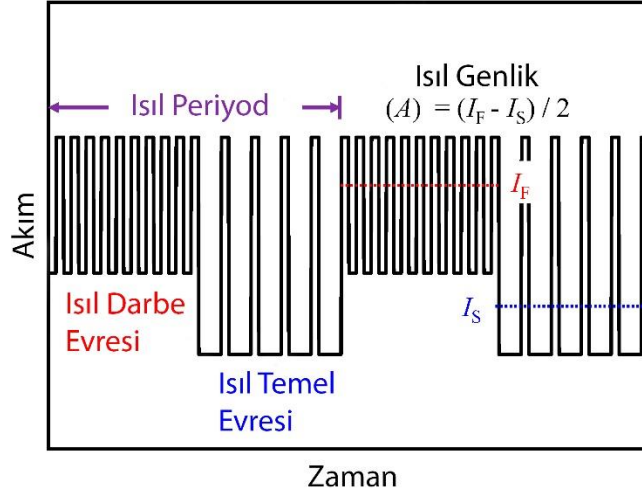
- Sprey ark kaynağını daha düşük kaynak verilerine kadar uzatabilme özelliği (özellikle paslanmaz çelik veya alüminyum gibi malzemeleri kaynaklarken uygundur).
- İnce malzemeleri kaynaklamada ya da konumsal kaynak yapmada kısa ark kaynağı ile elde edilenden daha iyi sonuçlar alınır.
- Daha az pahalı ve beslemesi daha kolay olan biraz daha kalın bir dolgu teli ile kararlı kaynak performansı elde edilebilir. Bu, alüminyumun kaynağında ince yumuşak alüminyum telleri beslemek zor olduğu için özellikle yararlıdır.
- Araştırma çalışmaları, verimli damlacık sıkıştırmanın damlacıkların aşırı ısınmasını azalttığını ve daha az duman üretimiyle sonuçlandığını göstermiştir.

Darbeli MIG kaynağının dezavantajları şunlardır:

- Üretim hızı genellikle kısa ark kaynağından daha düşüktür. Kısa ark kaynağına göre daha büyük ısı girişi sağlanır bu da maksimum kullanılabilir tel besleme hızını azaltır.
- Güç ünitesi ve tel iletme tertibatı pahalıdır. Donanımın bakımı zordur.
- Darbeli ark kaynağı, koruyucu gaz seçimini kısıtlar. Sprey ark kaynağında olduğu gibi, bir Argon/CO₂ karışımının CO₂ konsantrasyonu çok yüksek olmamalıdır (Tülbentçi, 1990; Weman, 2012).

3.3.4.5. Çift darbeli spreyletimi (Double Pulsed Arc)

Darbeli gazaltı ark kaynağında (P-GMAW) kaynak akımı, tepe (darbe) akımı ve temel akım periyodu arasında değişir. Tepe akım periyodunda kaynak bölgesi ergime noktasına gelir ve temel akım periyodunda ise ergimiş kaynak banyosu soğur ve katılaşır. Bu durumu daha da geliştirmek için çift darbeli akım üzerinde çalışılmıştır. Çift darbeli gazaltı ark kaynağında (DP-GMAW) kaynak metalinin iş parçasına transferi kontrol edilebilir ve kaynak banyosunda karıştırma etkisi sağlanabilir (Sen ve diğ, 2018). Çift darbeli iletimin dalga formu Şekil 3.19'da gösterilmiştir



Şekil 3.19: Çift darbeli spray ark iletiminin dalga karakteristiği (Wang ve Xue, 2017).

DP-GMAW'ın mevcut dalga formu, ısı girişini değiştirmeden ısı dağılımını modüle etmek için kullanılan ritmik ısıl temel (TB) ve ısıl darbe (TP) fazından oluşur. Bir ısıl periyot, bir TB evresi ve TP evresi sürelerini toplamına eşittir ve ısıl frekans (TF), ısıl periyodun karşılığı olarak tanımlanır. Isıl genlik (A), TP evresinin ortalama akımı ile TB evresinin ortalama akımı arasındaki farkın yarısına eşittir. Hem TB evresinde hem de TP evresinde, öngörülen spray transferini gerçekleştirmek üzere yüksek bir elektromanyetik kuvvet üretmek için kullanılan birkaç akım darbesi (tepe akım ve temel akım) içerir. Değişken TB ve TP evreleri, kaynak akımında bir titreşim üretir. Bu nedenle, ısı girişi ısıl periyot boyunca periyodiktir ve zamana bağlıdır (Wang ve Xue, 2017).

Şekilde gösterildiği üzere, DP-GMAW'da darbe, biraz farklı darbe özelliklerine sahip iki ardışık fazın tekrar tekrar uygulanmasını içerir. Hem birinci hem de ikinci fazlar, yüksek frekanslarda birkaç akım darbesi içerir ve Liu ve diğ. (2013)'ne göre, bu akım darbeleri spray transfer modunda metal transferini sağlamak için kullanılır. Bununla birlikte, birinci faz sırasındaki temel akım ve akım darbelerinin sayısı, ikinci fazdakinden daha yüksektir. Sonuç olarak, birinci fazın ortalama akımı, ikinci fazdakilerden daha yüksektir (Wang ve diğ, 2017).

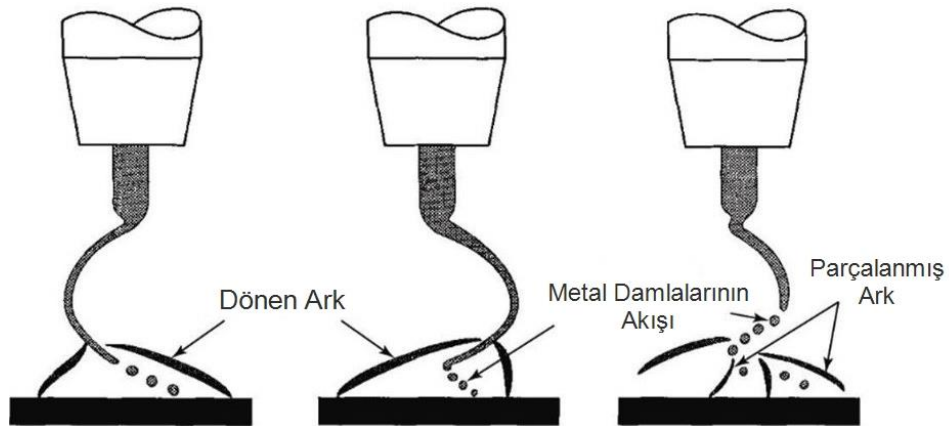
DP-GMAW ile ana metalin etkili bir şekilde ergimesi sağlanır ve düzgün yüzeye sahip iyi bir kaynak bağlantısı elde edilebilir. DP-GMAW, P-GMAW ve geleneksel GMAW süreçleri arasında yapılan karşılaştırmalı analizler, DP-GMAW işleminin diğer iki işleme göre bazı avantajlara sahip olduğunu belirlemişlerdir: (a) daha geniş ayar aralığı; (b) tüm pozisyonlarda kaynak yapma kabiliyeti; (c) daha geniş kök aralığı düzenlemesi; (d)

toplam ısı girdisinde azalma; (e) birleşme özelliklerinin iyileşmesi; (f) kaynak banyosunun güçlü karışması ve (g) çatlak hassasiyetinde azalma (Sen ve diğ, 2018).

3.3.4.6. Dönen sprej iletimi

Bu iletim, 22-38 mm serbest elektrot uzunluğu kullanıldığında ve koruyucu gaz, argon-karbondiyoksit-oksijen veya argon-oksijen karışımı olduğunda meydana gelir. Uzun elektrot, elektrotta dirençle ısınma oluşturur ve elektrotun ucu ergir. Elektromekanik kuvvetler elektrotun ergimiş ucunun helisel bir şekilde dönmesini sağlar (Şekil 3.20). Koruyucu gaz karışımları, ergimiş ucun yüzey gerilimini etkiler bu da döner iletim üzerinde etkili olur. Bu iletim yönteminde 136 ila 227 g/dk'lık biriktirme oranlarına ulaşılabilir (Primo, 2014).

Koruyucu gazda yüksek ısı iletkenlik olursa ve ergimiş elektrotun ucundaki yüzey gerilimi artarsa dönme olayı engellenir. Bu durum, gaz karışımı karbondiyoksit açısından zengin olduğunda veya karışıma helyum katıldığında ortaya çıkabilir. Bunun sonucunda damlacıkların boyutu artar ve aktarım hızı azalır. Arkın plazması döner sprej iletimi durumundakinden daha dar hale gelir, ancak iletim şekli aksel sprej iletime benzer. Ark daha konsantre hale geldiğinde birleşme bölgesindeki nüfuziyet artar (Primo, 2014).



Şekil 3.20: Yüksek serbest tel uzunluğu nedeniyle döner sprej iletimi (Bohnart, 2018).

BÖLÜM 4. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ KAYNAĞI

Teknolojik ürünlerin çoğu parçalardan veya bileşenlerden monte edilir. Bu nedenle, birleştirme ve kaynak, üretim için anahtar rol oynayan teknolojilerdir. Üretilen bir ürünün kalitesi ve güvenilirliği genellikle bağlantılarının kalitesi ile belirlenir. İdeal birleşme, bir araya getirilen malzemelerden ayırt edilemez olmalıdır.

Dünya genelinde alüminyumun genel kullanımının, özellikle ulaştırma sektöründe artmaya devam etmesi beklenmektedir. Alüminyum alaşımları ayrıca inşaat ve beyaz eşya sektörlerinde olduğu gibi ulaşım sektörünün diğer alanlarında da uygulamalar bulmaktadır. Özellikle yeni alaşımlar ve prosesler geliştirildikçe, alüminyum alaşımlarını ekonomik, güvenilir ve hızlı bir şekilde ürünlere veya yapılara entegre etmek için uygun birleştirme teknolojilerinin bulunması gerektiği açıktır.

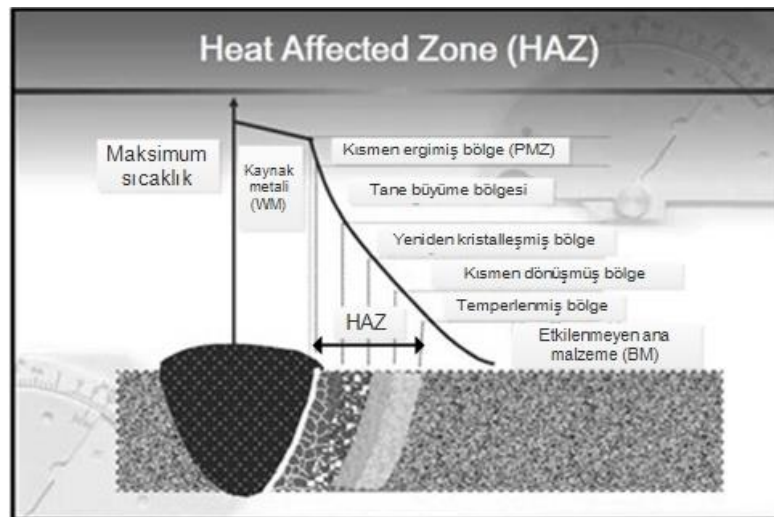
Alüminyum ve alaşımları, farklı başarı oranları ile farklı birleştirme teknolojileriyle birleştirilebilir. Birçok durumda, başta çelik olmak üzere diğer metaller için geliştirilen prosesler ve ekipmanlar, alüminyumun birleştirilmesi için başarıyla uyarlanmıştır. Bununla birlikte, bunun tersinin olduğu örnekler de vardır, yani, ilk olarak alüminyumun birleştirilmesi için kullanılan bir işlem daha sonra diğer malzemelere uygulanmıştır (Lathabai, 2011).

Isıl işlem kabul etmeyen ancak kolaylıkla kaynak edilebilen alaşımlar; 1xxx, 3xxx ve 5xxx serileridir. Isıl işlem kabul eden alaşımlar arasında 2xxx ve 4xxx serileri kaynak edilebilirlerse de bazı özel tekniklerin uygulanması gerekebilir. Ayrıca süneklik biraz düşük olabilir. Isıl işlem kabul eden ve yüksek mukavemetli olan 6xxx ve 7xxx serisi de kaynak edilebilir ama HAZ bölgeleri gevrek olur (Bozkurt, 2017).

Al-Zn-Mg alaşımlarının kaynaklanabilirliği bazı ilginç detaylara sahiptir. %9'dan yüksek Cu + Zn + Mg içeriğine sahip alaşımların kaynağı zayıf olur, %6 ila 8 arasında kaynak yapısı iyidir, ancak stres korozyon çatlağına duyarlıdır ve %6'dan düşük içerikte kaynak oldukça iyidir (Bloem ve diğ, 2011).

4.1. Alüminyum Alaşımlarının Kaynağında Kaynak Bölgeleri

Ergitme kaynağı, iki metal parçasının elektrik, yakıt veya sürtünme gücü yardımıyla ergitilerek birleştirildiği işlemdir; diğer bir deyişle, iki metal parçasının gerçek bir metal kristal karışımı yoluyla birleşmesi anlamına gelir. Hangi kaynak işleminde olursa olsun, bir ısı girişi gereklidir. Isı kaynağının doğası ne olursa olsun, tüm ergitme kaynakları o bölgenin ısıtıldığı sıcaklığa bağlı olarak belirgin şekilde farklı mikroyapısal bölgeler gösterir (Şekil 4.1). Kaynaklı eklemün alaşımunın solidus sıcaklığının aşıldığı ve ergimenin meydana geldiği bölgeye ergime bölgesi (Fusion Zone – FZ) denir. Burada biriken metale kaynak metali (Weld Metal – WM) denir. Sıvı katı sınırını oluşturan bölge kısmen ergimiş bölgedir (Partially Melted Zone – PMZ). Ergime hattından uzaklaştıkça, pik sıcaklıklar alaşımunın solidus sıcaklığının altına kademeli olarak düşer, ancak hala bazı kritik dönüşüm sıcaklıklarının üzerindedir. Burada, katı halde faz dönüşümleri nedeniyle mikroyapı değişiklikleri meydana gelir, soğuk işlenmiş malzemelerde yeniden kristalleşme ve/veya tane büyümesi, aşırı yaşlanma veya yaşlandırmayla sertleştirilmiş malzemelerde çökeltilerin çözünmesi gibi. Bu bölge ısıdan etkilenen bölge (Heat Affected Zone – HAZ) olarak adlandırılır. HAZ'dan daha uzak bir mesafede, malzeme kritik bir dönüşüm sıcaklığının üzerine ısıtılmadığı için gözlemlenebilir hiçbir mikroyapısal değişiklik meydana gelmez; bu bölgeye de etkilenmemiş ana metal (Base Metal - BM) denir (Bloem ve diğ, 2011; Lathabai, 2011; Okay, 2016).



Şekil 4.1: Kaynaklı birleştirmede sıcaklığa bağlı olarak kaynak bölgelerinin değişimi, TWI, (n.d.)’den uyarlanmıştır.

4.2. Alüminyum Alaşımlarının MIG/GMAW Kaynağı

Alüminyum alaşımları ergitme kaynağı olarak en fazla TIG (Tungsten Inert Gas) ve MIG (Metal Inert Gas) yöntemleriyle kaynak edilir. Bunların yanında gaz kaynağı, plazma ark kaynağı, örtülü elektrot kaynağı, direnç kaynağı ve lazer kaynağı yöntemleri de kullanılmaktadır. Koruyucu gaz veya gaz karışımları altında ergiyen elektrot ile yapılan MIG kaynak yöntemi alüminyum alaşımlı malzemelerde en çok tercih edilen yöntemdir (Mercan ve diğ, 2020; Mercan, 2018; Kırılı, 2011).

4.2.1. Akım ayarları ve sıvı metal transfer yöntemleri

Alüminyum ve alaşımlarının kaynağında doğru akım elektrot pozitif kullanılmaktadır. Doğru akım ve argon koruması sayesinde ana metalin üstündeki oksit tabakası parçalanır, bir temizleme etkisi ortaya çıkmış olur. Alüminyumun ısı iletkenliği yüksektir bu nedenle başlangıçta voltaj değeri yüksek tutulur daha sonra stabil koşullar sağlandığında voltaj değeri düşürülür. Bu durum göz önüne alınarak iş parçası kaynak edilmeden önce örnek parçalar hazırlanmalı ve kaynak denemeleri yapılarak kaynak için en uygun parametreler saptanmalıdır. Böylece kaynak sırasında olabilecek hatalar önceden belirlenerek önlenmiş olur (Gündüz, 2017; Uzun, 2014).

Alüminyum ve alaşımlarının MIG yöntemiyle kaynak işleminde kalınlıktan bağımsız olarak daha çok sprej ark iletimi ile kaynak yapmak tercih edilmektedir. Sprej ark iletiminde yüksek ısı girdisi sağlanmakta, alüminyumun yüksek ısı iletkenliği sayesinde kaynak banyosu çabuk katılaştığından her pozisyonda kaynak yapılabilir (Kırılı, 2011; Taban, 2004). Sprej ark transferine alternatif olarak darbeli gaz metal ark kaynağı, aynı kaynak koşulları için, daha yüksek nüfuziyet sağladığı için daha iyi bir seçimdir. Darbeli ark, metal birikimi, ısı transferi ve ark stabilitesi üzerinde daha iyi bir kontrol imkanı sağlar ve daha ince plakaların kaynak yapılmasına izin verir. Darbe frekansı ve süresi, kaynak sonrası mikroyapıyı önemli ölçüde etkiler (Bloem ve diğerleri, 2011; Lathabai, 2011)

4.2.2. Kaynak telleri

Alüminyum ve alaşımlarının kaynağında kullanılacak tellerin seçiminde, ana malzemenin kimyasal bileşimi göz önünde bulundurulmalı, kaynak sonucunda elde edilecek dayanım

özellikleri dikkate alınarak tercih edilmelidir. Alüminyum ve alaşımlarının kaynağında kullanılacak teller DIN 1732, AWS A5.10 veya EN ISO 18273 standartlarına göre seçilmelidir (Gündüz, 2017; Mercan, 2018; Taban, 2004).

4.2.3. Kaynak öncesi işlemler

Alüminyum ve alaşımlarının kaynağı öncesinde, mekanik ve kimyasal olarak kaynak bölgesinin kir, yağ, oksit tabakası gibi kalıntılardan temizlenmesi gerekir. İyi bir kaynak bağlantısı elde edebilmek için bu işlem zorunludur. Temizleme için genellikle frezeleme ya da paslanmaz çelik tel fırçalar kullanılır. Yalnız bu fırçaların sadece alüminyum ve alaşımlarının temizlenmesinde kullanılması gereklidir. Yağların temizlenmesi için beyaz ispirto ve aseton kullanılmaktadır. Oksitlerin kimyasal olarak temizlenmesinde fosforik asit çözeltileri tercih edilmektedir. Çözeltiyle muamele edilen parça bol su ile yıkanmalı ve hava üflenerek kurutulmalıdır (Gündüz, 2017; Taban, 2004).

4.2.4. Koruyucu gazlar

Alüminyum ve alaşımların kaynağında en yaygın kullanılan koruyucu gazlar; argon, helyum ve argon–helyum karışımlarıdır. Argon gazının düşük ısı iletkenliği nedeniyle enerji, helyum arkından daha az düzgün dağılmaktadır. İnce parçalar kaynak edilirken genellikle argon, kalın parçaların kaynağında ise daha iyi nüfuziyet sağlayabilmek için helyum veya argon–helyum karışımı gazlar kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan karışımlar; %75 argon + %25 helyum ya da %75 helyum + %25 argon'dur (Gündüz, 2017; Nadzam, 2014; Okay, 2016)

4.2.5. Kaynağın uygulanması

Alüminyum ve alaşımlarının MIG kaynağında dikkate alınması gereken en önemli iki faktör; ana metalin kimyasal bileşimi ve kalınlığıdır. Alüminyum alaşımlı parçalar kaynak edilirken desteklenmeleri de gerekmektedir. Alüminyum alaşımlarının MIG kaynağı her kalınlıktaki parça için uygulanabilir olmasına rağmen 3 mm'den daha kalın parçaların kullanılması tercih edilir. MIG kaynağının hızı ve ergitme gücü TIG yöntemine göre daha yüksektir, bu nedenle çok ince levhalar (0,8 mm) darbeli ark yöntemiyle kaynak edilir. Kalın parçaların kaynağında füzyon eksikliğini önlemek için (>15 mm) 50 ila

100°C arasında bir ön ısıtma genellikle uygulanır. Ancak sıcaklığın 200°C'yi geçmemesi gerekir. Kaynak sırasında sola kaynak yöntemi uygulanır ve torç 75°-80°'lik bir eğimle tutularak zikzak hareketi çok az verilir. Alüminyum alaşımlarının MIG yöntemi ile kaynağında, kaynak dikişin sonunda bir krater kalır. Bu krater, kaynak sonunda torç tersine doğru çevrilerek doldurulur (Bloem ve diğ., 2011; Gündüz, 2017; Kırılı, 2011; Taban, 2004).

MIG yöntemiyle elde edilen kaynak hızları, diğer ark veya gaz yöntemlerinde elde edilenlerden daha yüksektir. Örtülü elektrot veya oksii-asetilen kaynağındakilere nazaran ısıdan etkilenen bölge daha dardır. Alüminyumun özellikleri (özgül ağırlığı, yüzey gerilimi ve soğuma hızı) sayesinde, yatay, dik ve tavan kaynakları diğer metallerinkine göre kolay gerçekleşir. Diğer ergitmeli kaynak yöntemlerine göre daha az çarpılma, daha yüksek kaynak metali mukavemeti ve daha düşük maliyet elde edilir (Uzun, 2014).

4.3. Alüminyum Alaşımlarının Kaynağında Sorunlar

Alüminyum alaşımları, yaygın uygulamaları ve oldukça iyi kaynaklanabilirlikleri nedeniyle diğer demir dışı alaşım türlerinden daha sık kaynak yapılır. Ancak alüminyum alaşımlarının kaynağında birtakım sorunlar da mevcuttur. Tablo 4.1 alüminyum kaynağındaki tipik problemleri ve önerilen çözümleri özetlemektedir.

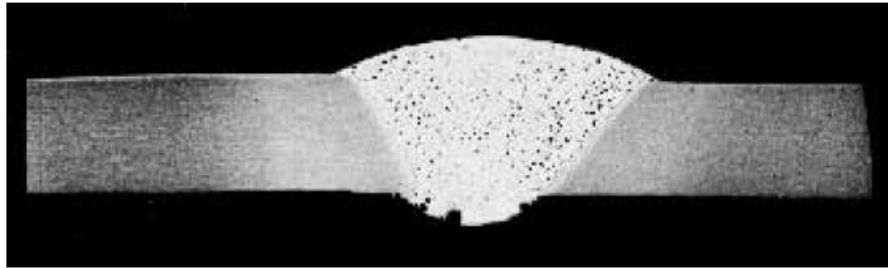
Tablo 4.1: Alüminyum alaşımlarında tipik kaynak problemleri ve çözüm önerileri (Kou, 2003).

Problemler	Alaşım	Çözüm Yöntemleri
Gözeneklilik	Al-Li alaşımları (şiddetli)	Yüzey kazıma veya frezeleme Termovakum işlemi Değişken kutuplu küçük nozul Plazma ark kaynağı Termovakum işlemi
	Toz-metalurjik alaşımlar (şiddetli)	Atomizasyon ve konsolidasyon sırasında toz oksidasyonunu ve hidrasyonunu en aza indirin.
	Diğer tipler (daha az şiddetli)	İş parçası ve tel yüzeyini temizleyin Değişken kutuplu küçük nozul Plazma ark kaynağı
Ergime bölgesinde (FZ) katılaşma çatlağı	Daha yüksek mukavemetli alaşımlar (ör. 2014, 6061, 7075)	Uygun dolgu telleri ve seyreltme kullanın Otojen GTA kaynağında ark salınımı veya daha az hassas alaşımlar kullanın (2219)
Sıcak yırtılma ve kısmen ergimiş bölgede (PMZ) düşük süneklik	Daha yüksek mukavemetli alaşımlar	Düşük ısı girdisi sağlayın* Uygun dolgu telleri kullanın Düşük frekanslı ark salınımı
Isıdan etkilenen bölgede (HAZ) yumuşama	Deformasyon sertleştirilmesi görmüş alaşımlar Isıl işlem görebilen alaşımlar	Düşük ısı girdisi sağlayın Düşük ısı girdisi sağlayın Kaynak sonrası ısıl işlem
*Düşük ısı girişi sağlayan prosesler (örn., EBW, GTAW) veya her pasoda düşük ısı girişi ve düşük pasolar arası sıcaklık ile çoklu geçiş kaynağı.		

Bu sorunlardan en önemlileri aşağıda verilmiştir:

4.3.1. Gözeneklilik

Alüminyum alaşımlarının kaynağında en ciddi sorunlardan biri, kaynağın katılaşması sırasında hidrojen gazı gözenekliliğinin oluşmasıdır. Gözeneklilik kaynak metali ile sınırlı bir sorundur. Ergimiş kaynak metalinde çözünen gaz, metal katılaştıkça sıkışıp kalır, böylece katılaşmış kaynakta kabarcıklar oluşturur (Şekil 4.2). Bunlar kaynaklı malzemenin çekme mukavemetini, sünekliğini, yorulma dayanımını olumsuz etkiler. Kaynaklı bağlantıların yorulma mukavemeti ve çekme mukavemeti gözeneklilik nedeniyle azalır. Alüminyumun kaynağındaki gözenekliliğin esas nedeni, hidrojenin sıvı ve katı alüminyumdaki çözünürlük oranının çok farklı olmasındandır, bu da kaynakta sıkışan gazı oluşturur. Hidrojenin çözünürlüğü sıvı halde katı halden daha fazladır. Çözünmüş hidrojen katılaşma sırasında kaçamazsa gözeneklilik oluşacaktır. Soğutma hızı çok yüksekse, gaz yüzeye yükselemez ve gözeneklilik oluşturur. Gözeneklilik ayrıca malzeme bileşimine de bağlıdır. Kaynaktaki hidrojenin ana kaynakları şunlardır: koruyucu gazlar, safsızlıklar, hava veya su. TIG kaynağında kaynak telinin hidrojen kontaminasyonu olmayacağından MIG'den daha düşük gözenek seviyelerine sahip olur (Abdaly, 2017; Kou, 2003; Mathers, 2002; Oğuz, 1990; Praveen ve Yarlağadda, 2005).

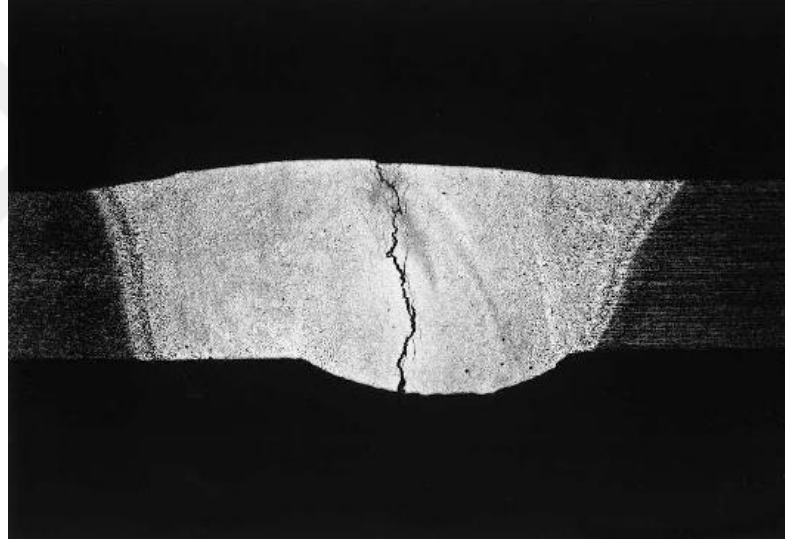


Şekil 4.2: Alüminyum alaşımlarının kaynağında gözenek oluşumu (Mathers, 2002).

4.3.2. Sıcak yırtılma

Sıcak yırtılma, alüminyum kaynağının en ciddi diğer problemidir. Saf metaller bir sıcaklıkta katılaşırken, alaşımlar genellikle daha geniş bir sıcaklık aralığında sıvıdan katıya dönüşür. Bu kademeli geçişin gerçekleştiği sıcaklık aralığına “katılaşma veya donma aralığı” denir. Bu katılaşma sırasında, en düşük ergime noktalı alaşım, bitişik dendritler arasında, yani tane sınırları boyunca sıkışana kadar katılaşan dendritler

tarafından itilir. Düşük ergime noktalı ötektik ile metalin kendisi arasındaki ergime sıcaklıkları farkı yeterince büyükse, tane sınırları boyunca bulunan sıvı film metal soğurken ve gittikçe büzülürken parçalanabilir (Şekil 4.3). Alüminyum alaşımları oluşturmak için eklenen alaşım elementleri ana metalden çok daha düşük katılma noktalarına sahip bir dizi ötektik oluştururlar. Bu da tüm alüminyum alaşımlarının, sıcak çatlamaya bir dereceye kadar duyarlı olduğu anlamına gelir. Ayrıca, yarı katı cismin termomekanik davranışı büyük ölçüde mekanik özelliklerine bağlıdır. Bakır ve magnezyum içeren geleneksel metalurjik alaşımlar sıcak yırtılmaya en duyarlı alaşımlardır. Isı uygulaması, bağ üzerinde olumsuz etkisi olabilecek ürünler oluşturabilir. Sıcak çatlama, doğru dolgu metalinin seçilmesi ve kaynak metali için ısı girişi miktarının azaltılmasıyla azaltılabilir (Abdaly, 2017; Mathers, 2002; Praveen ve Yarlagadda, 2005).



Şekil 4.3: Alüminyum alaşımlarının kaynağında sıcak yırtılma örneği (Mathers, 2002).

BÖLÜM 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, ağırlıklı olarak havacılık ve otomotiv sektöründe özellikle treyler imalatında (damper, tanker, silo, platform vb.) kullanılan farklı kalınlıklarda alüminyum levhalar kullanılmıştır. Çalışmada 16 test parçası PA pozisyonunda P-GMAW ve DP-GMAW metotlarıyla birleştirilmiştir. Aynı şartlarda 16 test parçası ise P-GMAW ve DP-GMAW metotlarıyla PB pozisyonunda birleştirilmiştir. Toplam da 32 parçadan 16 adet test numunesi elde edilmiştir.

Uygulanan birleştirme işleminde aynı kalınlıklardaki malzemelerde akım, voltaj ve elektrod besleme hızları sabit tutulup kaynak metotları değişken parametreler olarak belirlenmiştir.

Kullanılan her parametre için tahribatlı testler ve tahribatsız testler olmak üzere 2 başlıkta aşağıdaki testler uygulanmıştır.

Tahribatsız Testler;

- Kaynak Sonrası Sıcaklık Ölçümü
- Kaynak Sonrası Distorsiyon Ölçümü
- Görsel Test (VT-Visual Testing)
- Radyografik Test (RT-Radiography Testing)
- Penetrant Metodu İle Muayene (PT)

Tahribatlı Testler;

- Makro Testi
- Eğme Deneyi
- Çekme Deneyi
- Mikro Yapı İncelemesi
- Setlik Testi

5.1. Malzemelerin Özellikleri

Deney malzemelerinde ham madde olarak AA5083 ve AA6061 alüminyum alaşımları kullanılmıştır. Katalog verilerine bakılarak bu deneye en uygun kaynak teli ise AlMg5Mn belirlenmiştir. Kullanılan alüminyum alaşımların kimyasal ve mekanik özellikleri sırasıyla Tablo 5.1 ve Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.1: 5083 ve 6061 alüminyum alaşımların kimyasal bileşimi (ASM, 1985).

AA	DIN	Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr
6061	AlMg1SiCu	0,50	0,6-1,0	0,6-1,1	0,2-0,8	0,8-1,2	0,25	0,10	0,10
5083	AlMg4,5Mn0,7	0,40	0,40	0,10	0,4-1,00	4,0-4,9	0,25	0,15	0,05-0,25

Tablo 5.2: 5083 ve 6061 Alüminyum alaşımların mekanik özellikleri (ASM, 1985).

AA	DIN	Temper	Akma Mukavemeti (Mpa) min - max	Çekme Mukavemeti (Mpa) min - max	Uzama (%50) Min - max	Sertlik (Brinel) Min - max
6061	AlMg1SiCu	0	103-228	55-124	26	30
5083	AlMg4,5Mn0,7	0/H111	125-145	275-300	22	70-75

5.2. Kaynak Elektrodu ve Özellikleri

Tüm deneysel çalışmada kaynak teli olarak Lincoln Electric SuperGlaze marka AlMg5Mn (5556A) seçilmiştir. Deneylerde kullanılan elektrot malzemenin kimyasal özellikleri ve mekanik özellikleri sırasıyla Tablo 5.3 ve Tablo 5.4’de verilmiştir (Lincoln Electric, 2016).

Tablo 5.3: AlMg5Mn kaynak telinin tipik Analizi (%).

Elektrot	Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
5556A AlMg5Mn	<0,40	<0,25	<0,10	0,6-1,0	5,0-5,5	0,05-0,20	<0,2	0,05-0,20

Tablo 5.4: AlMg5Mn kaynak telinin mekanik özellikleri.

Elektrot	Akma Mukavemeti (Mpa) min - max	Çekme Mukavemeti (Mpa) min - max	Uzama (%50) Min - max
5556A AlMg5Mn	125-140	275-300	15-17

5.3. Kullanılan Kaynak Makinesi

Bu deneylerde birleştirme işlemlerini Kemppi WFX300 marka ve modelinde MIG, Pulse MIG ve Doluble Pulse MIG özellikleri olan gaz altı cihazı seçilmiştir. Şekil 5.1’de kullanılan kaynak makinesi gösterilmiştir.



Şekil 5.1: Kemppi WFX300 Kaynak Makinesi.

Bunun yanı sıra Tablo 5.5’de cihaza ait teknik özelliklerde belirtilmiştir (Kemppi Welding).

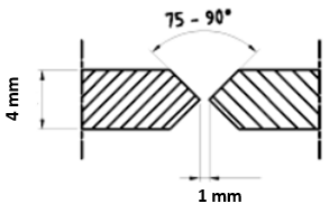
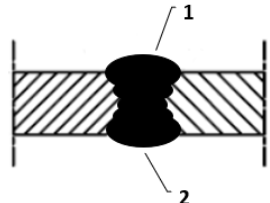
Tablo 5.5 : WFX 300 wire feeder kaynak makinesinin teknik özellikleri.

Product code	6103530
Output 60% ED	520 A
Output 100% ED	440 A
Wire feed mechanism	DuraTorque
Gun connection	Euro
Filler wire sizes (Ss)	0.6 - 1.6 mm
Filler wire sizes (Al)	0.8 - 2.4 mm
Filler wire sizes (Fe)	0.6 - 1.6 mm
Filler wire sizes (Cored wire)	0.8 - 2.0 mm
Wire feed speed	1 - 25 m/min
Software	WiseFusion WorkPack (21pcs)
Operating temperature range	-20 ... +40 °C
External dimensions LxWxH	625 × 243 × 476 mm
Degree of protection	IP23S
Standards	IEC 60974-5
Wire spool weight, max.	20 kg
Weight (empty)	12.5 kg
Wire spool diameter, max.	300 mm

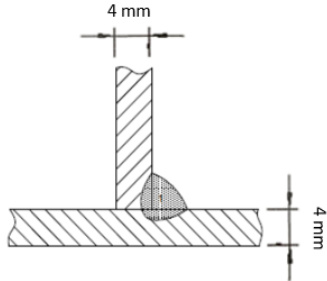
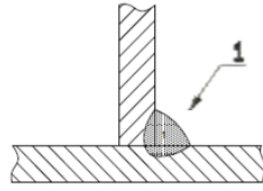
5.4. Kaynak Hazırlıkları ve Kaynak Yöntemleri

Bu deneyde iş parçaları olarak farklı kalınlıklarda plakalar (4 mm, 4.5 mm, 8.1 mm ve 10 mm) seçilmiş olup, yapılan deneylerde birleştirme operasyonlarında koruyucu gaz argon belirlenmiştir. Aynı kalınlıktaki malzemelerin pulse kaynak metodunda ve double-pulse kaynak metodunda değişimlerinin karşılaştırılabilmesi için; akım, voltaj ve elektrod besleme hızları sabit tutulmuştur. İş parçalarının kalınlıkları değiştikçe akım, voltaj ve tel hızları değiştirilmiştir.

Kaynak çalışmaları için PA ve PB pozisyonunda yapılan uygulamaların tüm detaylarının Şekil 5.2’de ve Şekil 5.3’de belirtildiği WPS formları düzenlenmiştir. Kaynak yöntem spesifikasyonu olarak adlandırılan bu formda; kaynak tipi, kaynak pozisyonu, kullanılan malzeme cinsi, kaynak dizaynı, kaynak teli, tel sürme hızı, tel standartı, akım tipi, ısı girdisi gibi değerler verilmektedir.

KAYNAK YÖNTEM SPESİFİKASYONU (WPS)										WPS : Test01		
Yöntem Testi No:	Test01					Malzeme Spesifikasyonu		5083 (Almg4.5Mn0.7) EN 573-3:2009				
İlgili Standart	EN ISO 15609-2 / EN ISO 15614-2					Kalınlık Aralığı(mm)		4 mm				
Kaynak Yöntemi	131 - MIG					Kaynak Pozisyonu		PA				
Kaynak Tipi	Alın kaynağı ☒		Plaka ☒		Köşe Kaynağı ☐		Boru ☐					
KAYNAK DİZAYNI						KAYNAK SIRASI						
												
Paso	Yöntem	Dolgu Teli			Akım Aralığı (A)		Voltaj Aralığı (V)		Akım tipi	Tel Sürme Hızı m/min	Kaynak Hızı mm/dk	Isı Girdisi kJ/mm
		Çap	Sınıf	Marka								
1	131	Ø 1,2	ISO 18273	Lincoln	135	140	21	22	DC (+)	4,8	500	0,26
2	131	Ø 1,2	ISO 18273	Lincoln	135	140	21	22	DC (+)	4,8	500	0,26
Gaz ☒		Flux ☐		%100 Ar EN 439 I 1			☒ shielding			☐ backing		
Gaz debisi		15 lt/dk				Kök Destek Parçası				Evet ☐ Hayır ☒		
Tugsten Elektrod tipi/Çap:		-				Kök Destek Malzemesi				-		
Kaynak Ağızı		75 - 90 derece				Arkadan Yarma:				-		
Ön Isıtma:		-				Arkadan Yarma Yöntemi:				-		
Pasolar Arası Sıcaklık		-				Kaynak Sonrası Isıl İşlem:				Evet ☐ Hayır ☐		

Şekil 5.2: Test01 kaynak yöntem spesifikasyonu PA.

KAYNAK YÖNTEM SPESİFİKASYONU (WPS)										WPS : Test02		
Yöntem Testi No:	Test02					Malzeme Spesifikasyonu			5083 (Almg4.5Mn0.7) EN 573-3:2009			
İlgili Standart	EN ISO 15609-2 / EN ISO 15614-2					Kalınlık Aralığı(mm)			4 mm			
Kaynak Yöntemi	131 - MIG					Kaynak Pozisyonu			PB			
Kaynak Tipi	Alın kaynağı ☐ Plaka ☒					Köşe Kaynağı ☒			Boru ☐			
KAYNAK DİZAYNI						KAYNAK SIRASI						
												
Paso	Yöntem	Dolgu Teli			Akım Aralığı (A)		Voltaj Aralığı (V)		Akım tipi	Tel Sürme Hızı m/min	Kaynak Hızı mm/dk	Isı Girdisi kJ/mm
1	131	Çap	Sınıf	Marka	135	140	21	22	DC (+)	4,8	450	0,29
Gaz ☒		Flux ☐		%100 Ar EN 439 I 1		☒ shielding		☐ backing				
Gaz debisi		15 lt/dk				Kök Destek Parçası		Evet ☐		Hayır ☒		
Tugsten Elektrod tipi/Çap:		-				Kök Destek Malzemesi		-				
Kaynak Ağzı		-				Arkadan Yarma:		-				
Ön Isıtma:		-				Arkadan Yarma Yöntemi:		-				
Pasolar Arası Sıcaklık		-				Kaynak Sonrası Isıl İşlem:		Evet ☐		Hayır ☐		

Şekil 5.3: Test02 kaynak yöntem spesifikasyonu PB.

PA ve PB kaynak pozisyonlarında P-GMAW ve DP-GMAW kaynakları yapılması için kullanılan plaka ölçüleri ve bu plakaların kalınlıklarına göre Akım, voltaj ve tel hızı değerlerinin değişim değerleri Tablo 5.6’da verilmiştir.

Tablo 5.6: Kullanılan malzemelerin metotları, ölçüleri, akım, volt ve elektrot besleme hız değerleri

Test No	Kaynak Yöntemi	Malzeme Cinsi	Kaynak Pozisyonu	Uzunluk	Genişlik	Kalınlık	Akım (A)	Volt (V)	Elektrot Besleme Hızı (mm/sn)
Test 1	DP-GMAW	5083	PA	300 mm	300 mm	10 mm	180	24	7
Test 2	P-GMAW	5083	PA	300 mm	300 mm	10 mm	180	24	7
Test 3	DP-GMAW	5083	PA	300 mm	300 mm	8,1 mm	170	23,6	6,4
Test 4	P-GMAW	5083	PA	300 mm	300 mm	8,1 mm	170	23,6	6,4
Test 5	DP-GMAW	5083	PA	300 mm	300 mm	4,5 mm	150	22,4	5,4
Test 6	P-GMAW	5083	PA	300 mm	300 mm	4,5 mm	150	22,4	5,4
Test 7	DP-GMAW	6061	PA	300 mm	300 mm	4 mm	140	21,8	4,8
Test 8	P-GMAW	6061	PA	300 mm	300 mm	4 mm	140	21,8	4,8
Test 9	DP-GMAW	5083	PB	150 mm	150 mm	10 mm	190	24,5	7,3
Test 10	P-GMAW	5083	PB	150 mm	150 mm	10 mm	190	24,5	7,3
Test 11	DP-GMAW	5083	PB	150 mm	150 mm	8,1 mm	180	24	7
Test 12	P-GMAW	5083	PB	150 mm	150 mm	8,1 mm	180	24	7
Test 13	DP-GMAW	5083	PB	150 mm	150 mm	4,5 mm	150	22,4	5,4
Test 14	P-GMAW	5083	PB	150 mm	150 mm	4,5 mm	150	22,4	5,4
Test 15	DP-GMAW	6061	PB	150 mm	150 mm	4 mm	140	21,8	4,8
Test 16	P-GMAW	6061	PB	150 mm	150 mm	4 mm	140	21,8	4,8

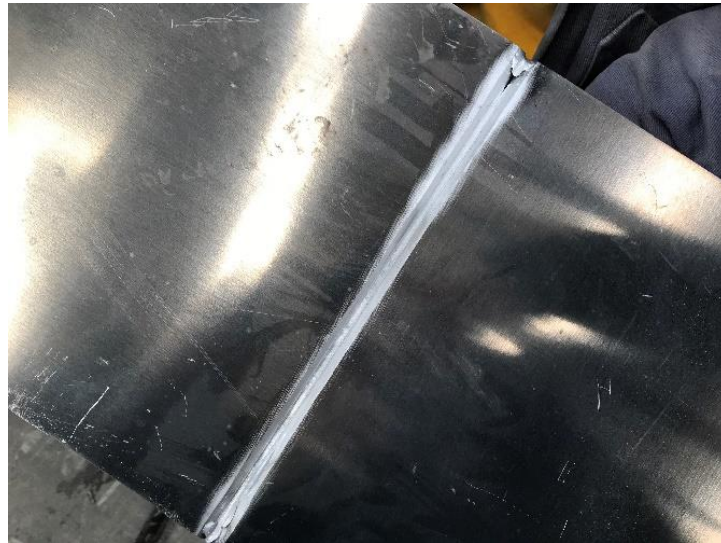
Yukarıda ölçüleri verilen 8 adet test levhasından hem P-GMAW yöntemi hemde DP-GMAW yöntemi için uygulanmış olup toplamda 16 adet test numunesi elde edilmiştir.

PA pozisyonu kaynak yönteminde birleştirme işlemleri yapılmadan önce yüzey hazırlık işlemleri yapılmıştır. Şekil 5.4’de görüleceği gibi alın kaynak yapılacak levhaların kaynak yapılacak yüzeylerine üçgen şeklinde ($h/2$) kaynak ağzları açılmıştır.



Şekil 5.4: PA pozisyonu yüzey hazırlık.

Kaynak işleminden önce yüzey Aseton ile temizlenmiştir. Ardından tek yüzeyin kaynak işlemi bittikten sonra Şekil 5.5’de görüldüğü gibi ters çevrilip kök pasoyu görene kadar taşlanmış ve kaynaksız olan bu yüzeyde kaynatılmıştır.



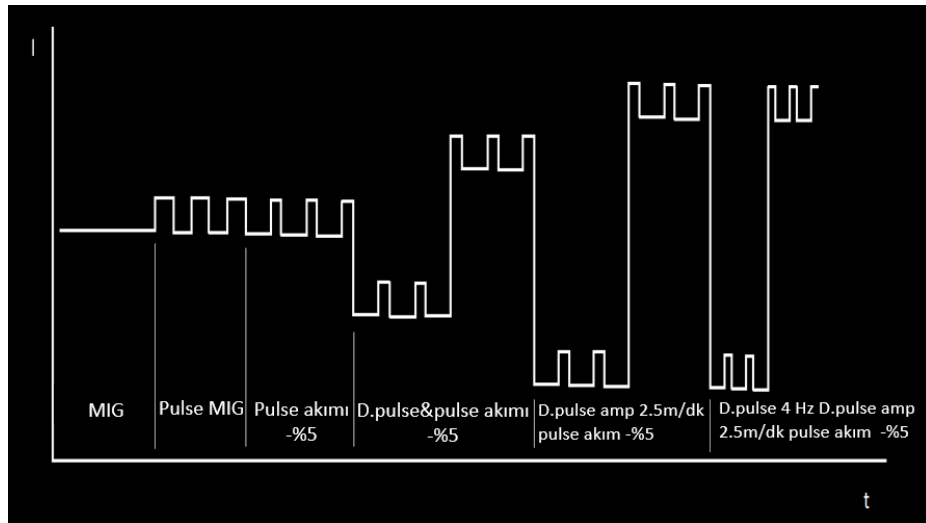
Şekil 5.5: PA pozisyonu yüzey hazırlık kaynak sonrası ters yön.

Yine PB pozisyonunda kaynak yapmadan önce yüzey hafif taşlanmış ardından bez ve Aseton yardımı ile kaynak bölgesi temizlenmiştir. Şekil 5.6’de gösterilmiştir.



Şekil 5.6: PB pozisyonu yüzey hazırlık.

Şekil 5.7’de geleneksel GMAW ve üzerl erinde çalışılan P-GMAW, DP-GMAW yöntemlerinin akım-zaman çizelgesinde değişimleri gösterilmiştir. Makine ayarları buradaki değerlere göre ayarlanmıştır. Öncelikle MIG modundan pulse MIG’e geçilmiştir. P-GMAW kaynakları bu ayarda yapılmıştır. DP-GMAW kaynağı için; pulse current eksi (-) değere alınmıştır. Sıçrantıyı yok etmek ve kaynak halkalarını kendiliğinden oluşturmak için, amp 2.5 Hz ayarlanmıştır. Stabil ark da ısı girdisini düşürmek için kaynak hızını biraz daha arttırıp frekansı 4 Hz olarak ayarlanmıştır.



Şekil 5.7: GMAW, P-GMAW, DP-GMAW değişim durumu.

5.5. Tahribatsız Deneyler

5.5.1. Kaynak sonrası sıcaklık testi

Bu deneyde amaç; Pulse (P-GMAW) ve double pulse (DP-GMAW) yöntemlerinin numuneler üzerindeki kaynak operasyonu sonrası (3sn) ve kaynak operasyonu bittikten 10sn sonraki sıcaklık farklarını gözlemlemek için yapılmıştır.

Ekipman olarak Şekil 5.8’de görseli olan Mastech Bm380 İnfrared Sıcaklık Ölçüm Cihazı kullanılmıştır.



Şekil 5.8: İnfrared sıcaklık ölçüm cihazı.

Yukarıda da belirtildiği gibi kaynak sonrası sıcaklık test iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşama kaynak işleminden 3sn sonra Şekil 5.9’da gösterildiği gibi kaynak yönüne göre sırasıyla 1, 2 ve 3 numaralı bölgelerden alınan sıcaklık verilerinin ortalamasıdır. İkinci aşama ise yine Şekil 5.7’de gösterildiği gibi numune üzerindeki kaynak operasyonu komple bittikten 10 sn sonra 2 numaralı bölgeden alınan sıcaklık verisini içermektedir.



Şekil 5.9: Sıcaklık ölçüm metodu.

5.5.2. Kaynak sonrası distorsiyon ölçümü

Bu deneyde amaç; Pulse (P-GMAW) ve double pulse (DP-GMAW) yöntemlerinin köşe kaynak (PA) ve alın kaynak (PB) ile kaynatılan numuneler üzerindeki kaynak sonrası distorsiyon açı farklarını gözlemlemek ve ölçmek için yapılmıştır.

Test de ekipman olarak üçgen delik ölçme cetveli, L gönye ve düz cetvel (master) kullanılmıştır.

Ölçüm sonrası elde edilen milimetre cinsinden verilerle tan ve arctan formülleri kullanılarak distorsiyon açıları hesaplanmıştır.

PB (köşe kaynak) pozisyonunda kaynatılan numuneler için Şekil 5.10'da görüldüğü gibi L gönye ve üçgen delik ölçme cetveli kullanılmıştır.



Şekil 5.10: PB pozisyonu distorsiyon ölçümü.

PA (alın kaynak) pozisyonunda kaynatılan numuneler için Şekil 5.11’de görüldüğü gibi düz cetvel (master) ve üçgen delik ölçme cetveli kullanılmıştır.



Şekil 5.11: PA pozisyonu distorsiyon ölçümü.

5.5.3. Görsel test (VT -visual testing)

Görsel muayene tüm testlerden önce yapılması gereken basit olarak görülse de önem derecesi fazla olan bir muayene yöntemidir. Birçok tahribatsız muayene standartlarında ilk olarak gözle muayene yapılması istenmektedir. Görsel testlerde gerek duyulursa endoskop veya büyüteç kullanılabilir.

Tahribatsız olan bu kontrolde; diğer tüm testlerden önce yapılmış olup kaynakta kaliteyi etkileyen durumlara, yüzey durumlarına, yapısal bozukluklara ve süreksizliklere bakılmıştır.

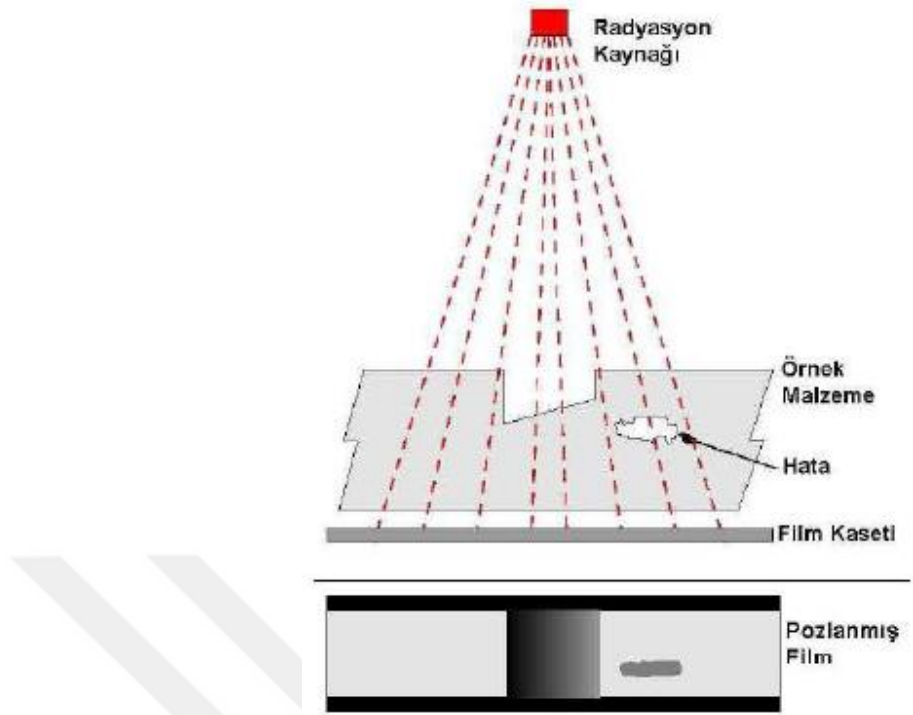
Tırsan Treyler A.Ş görsel muayene laboratuvarında 1000 lux aydınlatma ışıklandırılan ortamda görsel testler yapılmıştır.

Görsel muayeneyi yapan personel kaynak kontrolünde yeterli kalifikasyonlara sahip, belgeli kaynak kontrol personelidir. Tüm kontroller EN ISO 10042'ye göre kontrol edilmiştir.

5.5.4. Radyografik test (RT- radiography testing)

Radyografik test de temel prensip; tüm metallerde uygulanabilmesi ile beraber X ışınları ve Gama ışınlarını malzeme yapısına herhangi bir zarar vermeden malzeme yüzeyine göndererek iç yapılarını kolayca inceleme olanağına dayanır.

Çalışma şekli ise; muayene parçası X ışını veya gama ışını kaynağından çıkan ışın demeti ile ışınlanır. Bu ışınlar muayene parçasına nüfuz ettiğinde muayene parçasının diğer yönünden çıkan ışınım miktarı muayene parçasına gelen ışınım miktarından daha az düzeyde olacaktır. Işın malzeme içinden geçerken malzemenin özelliğine ve malzeme kalınlığına bağlı olarak belli oranda absorbe edilerek zayıflar ve sonra parçanın arka yüzeyine yerleştirilmiş olan filme ulaşarak filme geçer. Farklı süreksizlikler radyasyonu farklı derecelerde zayıflatacağından, süreksizliklerin olduğu bölgelerden geçen radyasyonun şiddeti ve dolayısıyla film üzerinde oluşturacağı kararlar dereceleri de farklı olacaktır (Şekil 5.12).



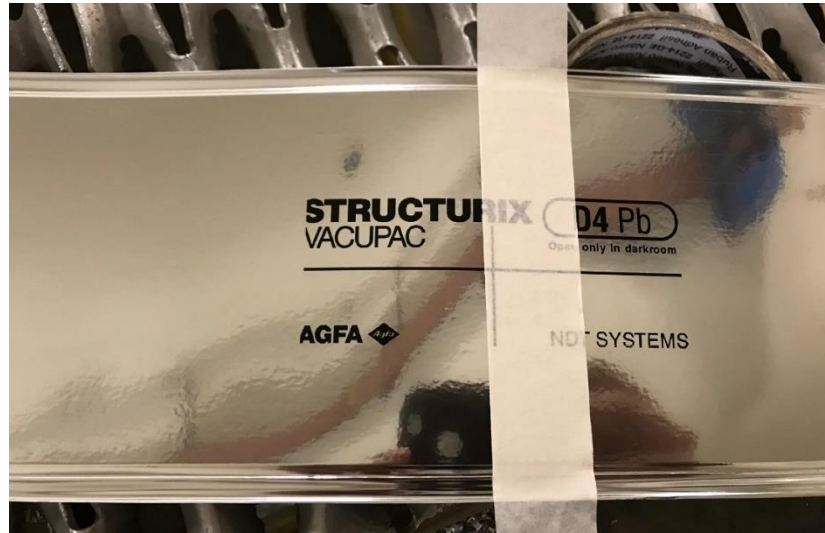
Şekil 5.12: Radyografik muayene düzeneği (Özgürlük, t.y).

Radyografik Muayene (RT) yapılmadan önce Görsel Muayene (VT) yapılmıştır. Herhangi bir problemle karşılaşılmağı olup radyografik teste devam edilmiştir. Tüm bu testler Tırsan Treyler A.Ş firmasında Şekil 5.13’de gösterilen kaynak röntgen laboratuvarın yapılmıştır. İş bu radyografik muayeneler yapılırken iş sağlığı ve güvenliği kurallarına uyulmuştur.



Şekil 5.13: Röntgen test kabini.

Alın kaynaklı numuneler sırasıyla X-ışınları altında çekim işlemleri yapılmıştır. X-ışını tüpleri Eresco marka 42MF4/MIR-200 kullanılmıştır. Şekil 5.14’de görüldüğü gibi TS EN ISO 11699- 1 uyumlu Agfa D4 marka 100x480 mm ölçülerinde filmler kullanılmıştır.



Şekil 5.14: Röntgen filmi.

Deneylerde görüntüleme ekipmanı olarak TS EN ISO25580 standartına uygun üretilmiş Lcndt FV-2010 marka ve model görüntüleme cihazı kullanılmıştır (Şekil 5.15).

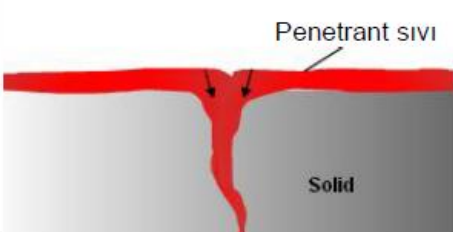
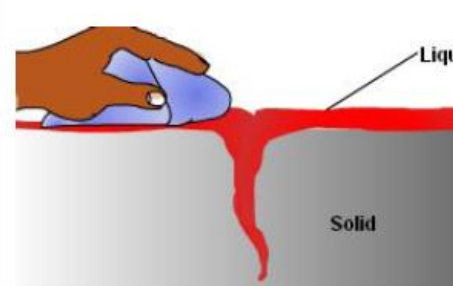
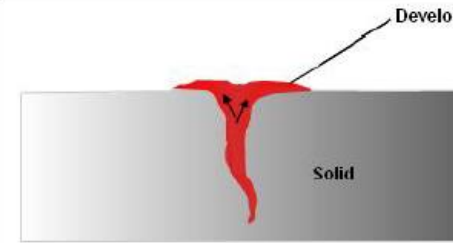


Şekil 5.15: Röntgen görüntüleme cihazı.

5.5.5. Sıvı penetrant metodu ile muayene (PT)

Penetrant testi (PT), özel sıvının boşluğa nüfuz ettiği kılcal etki prensiplerine dayanmaktadır. Penetrant ya da sıvı girinim olarak adlandırılan bu metot yüzey hatalarının tespit edilmesi için kullanılan bir tahribatsız muayene yöntemidir.

Penetrant muayene yönteminin uygulanma basamakları sırasıyla; muayene yüzeyinin temizliği, penetrantın uygulanması, penetrasyon için bekleme, ara temizlik, geliştirme (develop), inceleme, değerlendirme ve rapor hazırlama ardından son temizlik aşamalarından oluşmaktadır. Şekil 5.16'de özetle bu aşamalar gösterilmiştir.

	Her türlü yağ, kir ve pasdan mekanik yada kimyasal yolla arındırılarak ön temizleme işlemine tabi tutulan numune yüzeyine penetrant sıvı bir film halinde tatbik edilerek, penetrantın kapiler etki ile hatalara yeterince nüfuz edebilmesi için 5-30 dakika arasında beklenilir.
	Yeterince beklenilerek hatalara nüfuz etmiş penetrantın yüzeyde kalan fazla kısmı su, gaz tipi çözücüler veya emulgatör ile temizlenerek incelenen yüzey bez veya sıcak hava üflenilerek kurutulur.
	Hatalara penetrant nüfuz ettirilmiş ve kalıntıları temizlenmiş yüzeye, güçlü emiciliğe sahip ve penetrant ile yeterli kontrasta sahip geliştirici ince bir tabaka halinde incelenecek uygulanır. Yüzeye yayılan geliştirici hatalar içerisindeki penetrantı emerek yüzeye çıkmasını ve geliştirici sayesinde büyütülmüş olarak görülmesini sağlar.

Şekil 5.16: Penetrant muayene işlem kademeleri (Özgürlük, t.y).

İş bu deneyde TS EN ISO 3452-1 standartına göre işlemler uygulanmıştır. Numunelerde penetrant kontrolü yapmak için kaynak bölgeleri yağlardan ve her türlü pislikten temizlenmiş ve kuru olması sağlanmıştır. Sonrasında yüzey solvent ile temizlendi. Solvent yüzeye uygulanarak kuruması beklendi. Numune yüzeyi kuruduktan sonra penetrant sıvısı Beta BT 68 20 cm mesafeden homojen bir şekilde püskürtülerek alüminyum malzemelerde penetrasyon süresi olan 25 dakika kadar beklendi. Yüzeydeki hatasız yerlerdeki penetrant, lifsiz bir beze solvent püskürtülerek, bu bez yardımıyla parça yüzeyine bastırılmadan silinerek alındı. Daha sonra plakaların yüzeyine developer Beta BT 70 1 dakika çalkalandı ardından homojen bir şekilde püskürtüldü. Develop süresi (20 dakika) kadar beklendi. Tüm bu işlemler oda sıcaklığında yapılmıştır. Şekil 5.17’de Beta BT 68 ve Beta BT 70 görülmektedir.



Şekil 5.17: Penetrant sıvısı ve geliştirici.

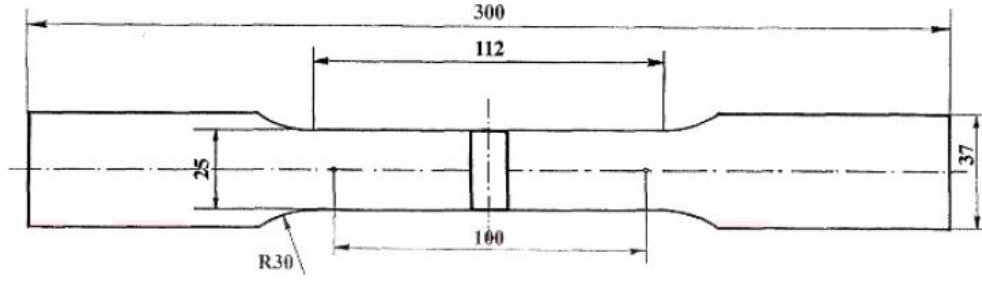
5.6. Tahribatlı Deneyler

5.6.1. Çekme deneyi

Mekanik ve tahribatlı deneylerden olan çekme deneyi malzemenin taşıma kapasitesini ölçmek için kullanılır. Bu ölçümde akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma uzamasına bakılmıştır.

Bu deneydeki en önemli nokta; pulse (P-GMAW) ve double pulse (DP-GMAW) olarak iki farklı metotla kaynatılan dört farklı kalınlıktaki malzemelerin birbirlerine karşı kıyaslamak ve dayanımlarını ölçmektir.

PA pozisyonunda kaynatılan 8 adet test numunesinden 2 adet çekme testi numunesi çıkarmak için şablon oluşturulmuş ve bu şablona göre çekme test numuneleri Şekil 5.18’de görüldüğü gibi çıkarılmıştır. Bu ölçüler TS EN ISO 4136 standartına göre belirlenmiştir.



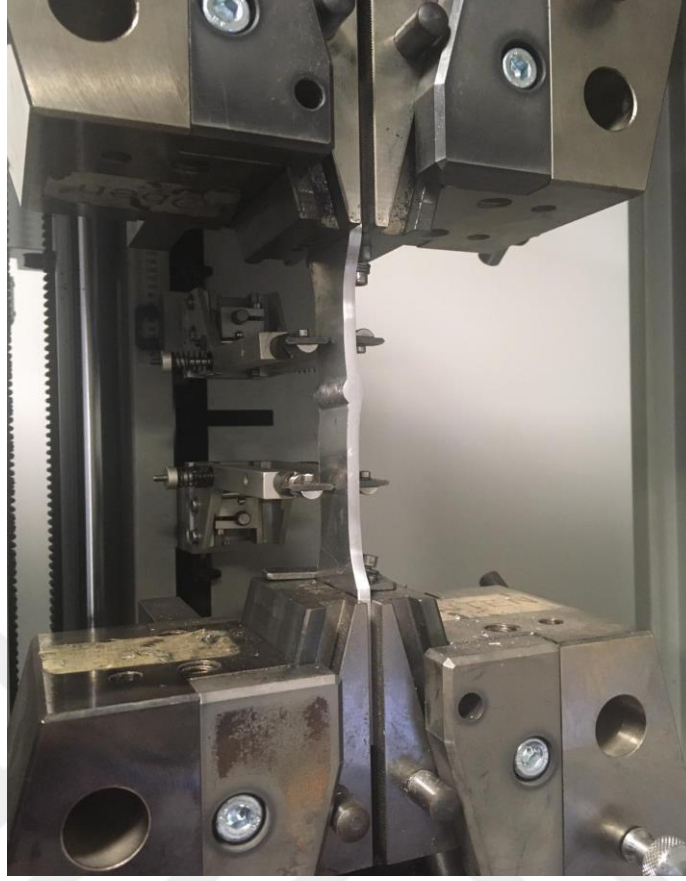
Şekil 5.18: Çekme deney parçası boyutları.

Standartlara göre hazırlanan şablona göre çıkarılan asil ve yedek test numuneleri Şekil 5.19’da görüldüğü gibidir.



Şekil 5.19: Çekme test numuneleri.

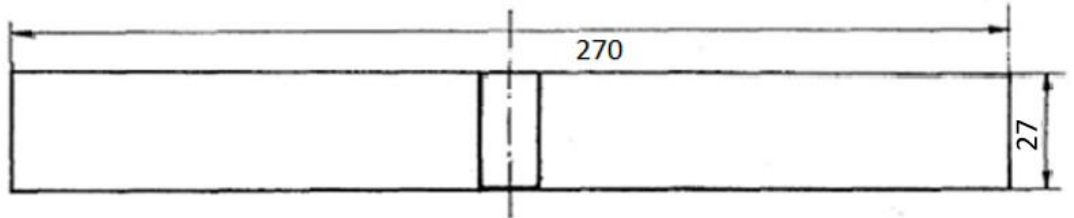
Çekme deneyleri Asaş Alüminyum San.Tic.A.Ş . Laboratuvarında bulunan Zwick AllroundLine Z250 marka çekme test cihazında ve 5 mm/dk çekme hızda gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.20). Çekme işlemlerinin tümü oda sıcaklığında yapılmış ve tüm sonuçlar bilgisayara aktarılarak otomatik grafiğe dönüştürülmüştür.



Şekil 5.20: Çekme test cihazı.

5.6.2. Eğme deneyi

PA pozisyonunda kaynatılan 8 adet test levhası eğme deneyi için, standart da verilen ölçülere uygun olarak her kaynaklı parçadan kaynak bölgesi ortada kalacak şekilde kesildi. Deney için Asaş Alüminyum San.Tic.A.Ş. Laboratuvarında bulunan Zwick AllroundLine Z250 marka deney cihazı kullanılmış olup basma hızı 5 mm/s seçilmiştir. Parçalar TS EN ISO 5173'e göre hazırlanmış ve Şekil 5.21'de gösterilmiştir.



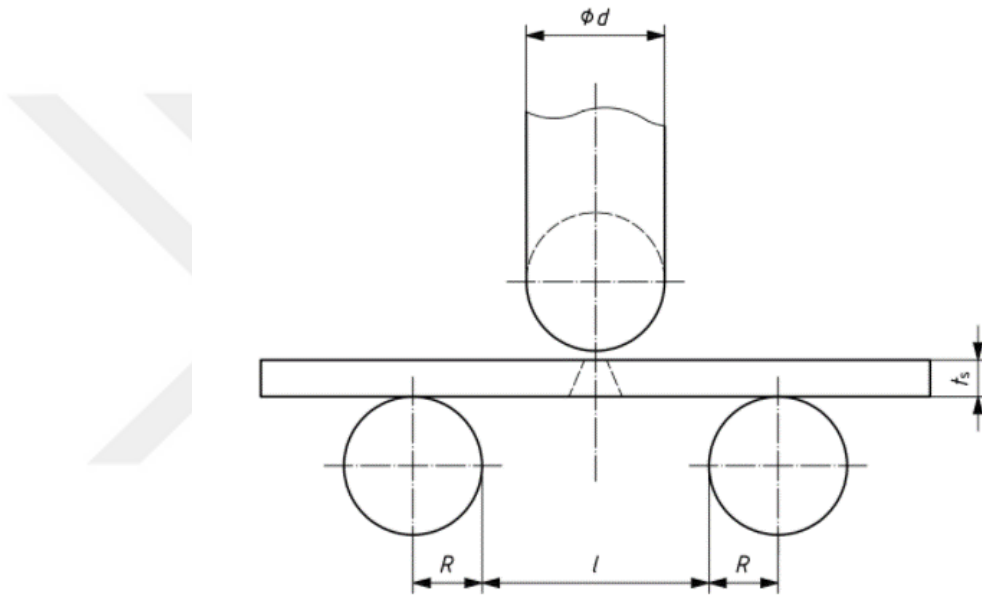
Şekil 5.21: Eğme test parçası boyutları.

İş bu deneyde malzeme kalınlıklarına göre deneyde kullanılan basma çene yarı çapı, kalıp yarıçapı ve çene açıklıkları EN ISO 5173'e göre belirlenmiştir ve Tablo 5.7'de verilmiştir.

Tablo 5.7: Basma deneyi teknik özellikleri.

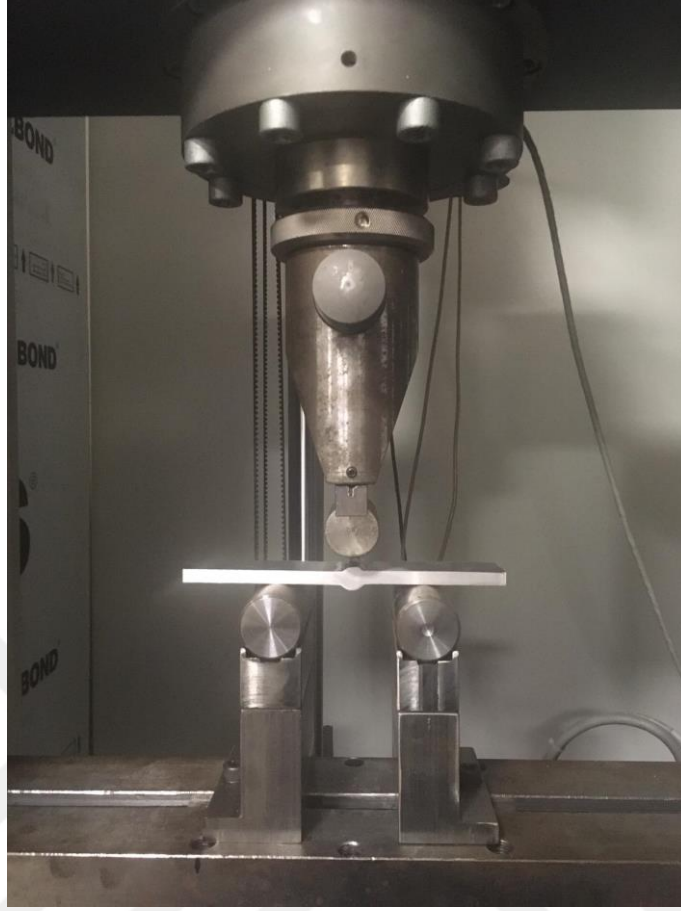
Kalınlık (ts) (mm)	Zımba Çap (d) (mm)	Kalıp Yarıçap (R) (mm)	Çene açıklığı (l) (mm)
4	8	14	28
4,5	9	15,5	31
8,1	16,2	26,3	55
10	20	32	70

Şekil 5.22’de EN ISO 5173’e göre kaynak dikişleri eğme testi uygulama prensibi sembolize edilmiştir.



Şekil 5.22 : Eğme testi prensibi.

Deney için kullanılan Zwick AllroundLine Z250 marka deney cihazı ile yapılan eğme deneyi esnasında alınan bir görüntü Şekil 5.23’de görülmektedir.



Şekil 5.23: Eğme deneyi test cihazı.

Eğme işlemlerinden sonra elektronik açı ölçer yardımı ile eğilen numunelerin eğme açıları ölçülmüştür.

5.6.3. Makro testi

Bu testte AA 5083 ve AA 6061 alüminyum alaşımlı malzemelerin pulse ve d.pulse kaynaklı birleştirmelerine ait makro yapı incelemesi yapılabilmesi için; numunelerin hazırlanması, zımparalama, parlatma ve dağlama işlemleri adım adım uygulanmıştır.

PB (yatay köşe kaynak) pozisyonu ile kaynatılan levlahardan (Test9, Test10, Test11, Test12, Test13, Test14, Test15 ve Test16) numuneler kesilmiş ve sırası ile SiC 500, 800, 1000 ve 1200 lük zımparalar ile zımparalanmıştır.

Zımparalama işlemi biten numuneler cuha adı verilen bez ve polisaj makinesi ile herhangi bir partikül vs. kalmayınca kadar parlatılmıştır.

Alüminyum malzemelerin dağlama işlemi için en ideal sıvı olan Poulton ayracı kullanılmıştır. Bu işlemler yapılırken TS EN ISO 17639'e göre yapılmıştır. Şekil 5.24'de 8 adet yatak köşe kaynak test levhalarına ait elde edilen makro numuneleri gösterilmiştir.



Şekil 5.24: Makro test numuneleri.

5.6.4. Mikro yapı incelemesi

PB köşe kaynaklı parçalardan alınan 8.1 mm kalınlığındaki double pulse Test 11, pulse yöntemiyle kaynaklı Test 12 ve 4.5 mm kalınlığındaki double pulse Test 13, pulse Test 14 numunelerine metalografik inceleme yapmak için sırasıyla; zımparalama, parlatma dağlama ve mikroskop altında inceleme adımları uygulanmıştır.

Numuneler Şekil 5. 25'de Struers Labopol-5 marka zımparalama cihazında sırasıyla 200, 400, 600, 800, 1000, 1200 ve 2000 kumluk zımparalar ile işlem yapılmıştır. Her zımpara geçişinde yüzeydeki zımpara izlerinin yok olması için 90 derece ters yönde işlem uygulanmıştır. Bu işlemler sonrası aynı cihaz ile kadife parlatma bezi ve alümina solüsyon yardımıyla parlatma işlemleri gerçekleştirilmiştir. HBF4 Barker dağlayıcı ile numuneler elektrolit dağlama yöntemi ile mikroskopta bakılmak için hazırlanmıştır.



Şekil 5.25: Zımparalama cihazı.

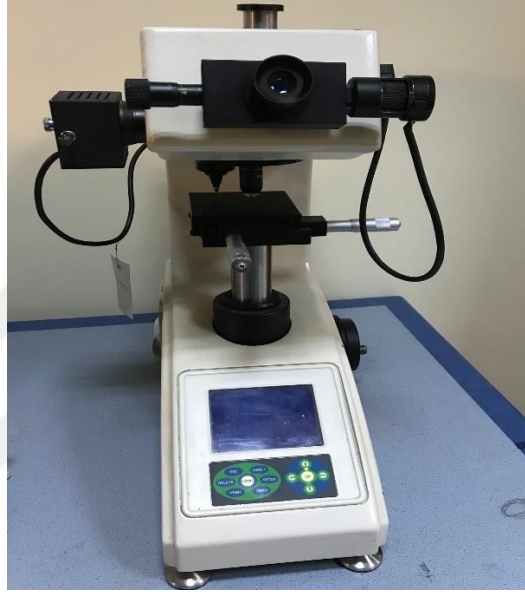
Dağlama işleminden sonra metalürjik alanda en iyi mikroskoplardan birisi olan Nikon marka Eclipse MA200 model optik mikroskop ile ana metal, HAZ bölgesi ve kaynak dikişinden görüntüler 50x, 100x ve 200x büyütme halinde elde edilmiştir. Şekil 5.26’da görüntülerin alındığı cihaz verilmiştir. İncelemeler TS EN ISO 17639 standartlarına uygun yapılmıştır.



Şekil 5.26: Mikro yapı incelemeleri için kullanılan optik mikroskop.

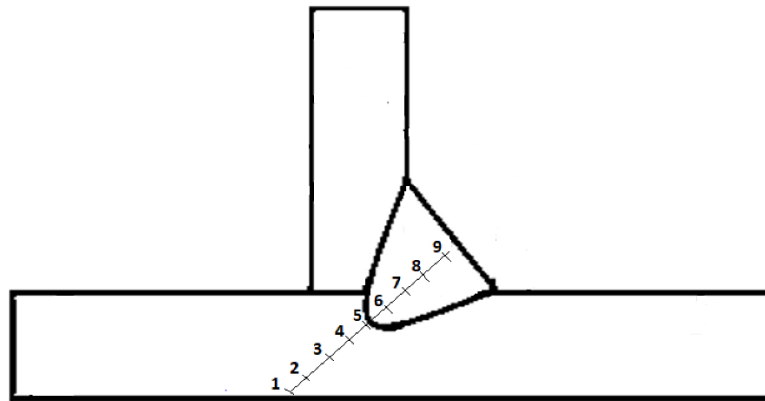
5.6.5. Sertlik testi

İki ayrı metot olan pulse mig ve double pulse mig kaynaklarının sertlik üzerindeki etkisini incelemek için dört farklı numunenin sertlik değerleri Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Laboratuvarında bulunan Vilson Hardnes 402MVD marka mikro sertlik ölçüm cihazında 300 g yük altında gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.27). Sonuçlar Vickers cinsinden kaydedilmiş olup, konik uçlu batıcının yardımıyla değerlere ulaşılmıştır.



Şekil 5.27: Vickers mikro sertlik ölçme cihazı.

Şekil 5.28’da gösterildiği gibi PB köşe kaynak 4 adet numuneden alınan değerler ana malzeme birleşim yeri dibinden başlayarak kaynak dolgusu sonuna kadar 9 farklı noktadan ölçülmüştür. Ölçümler EN ISO 14271 standartı doğrultusunda yapılmıştır. 5. Değerin ölçüldüğü yer ITAB bölgesidir.



Şekil 5.28: Mikro sertlik ölçümü yapılan noktalar.

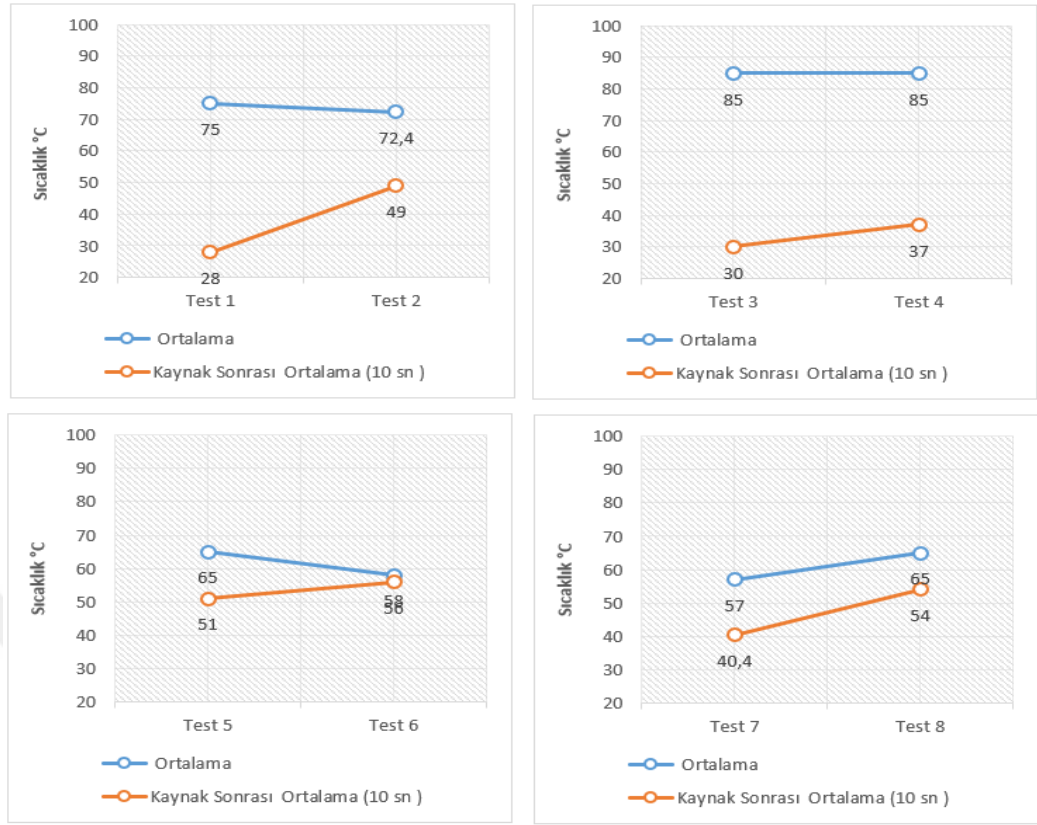
BÖLÜM 6. DENEYSEL BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Dört farklı kalınlıktaki alüminyum malzemelere yapılan pulse (P-GMAW) ve double pulse (DP-GMAW) kaynakları ile 16 adet test plakası elde edilmiştir. Bu test plakalarına tahribatlı ve tahribatsız olarak iki ada başlıkta bir takım deneyler uygulanmıştır.

Yapılan deneylerde pulse (P-GMAW) ve double pulse (DP-GMAW) metotları bir çok yönden karşılaştırılmış olup aynı koşullar altında birbirlerine karşı farklı kalınlıktaki ve hammadedeki durumları gözlemlenmiştir.

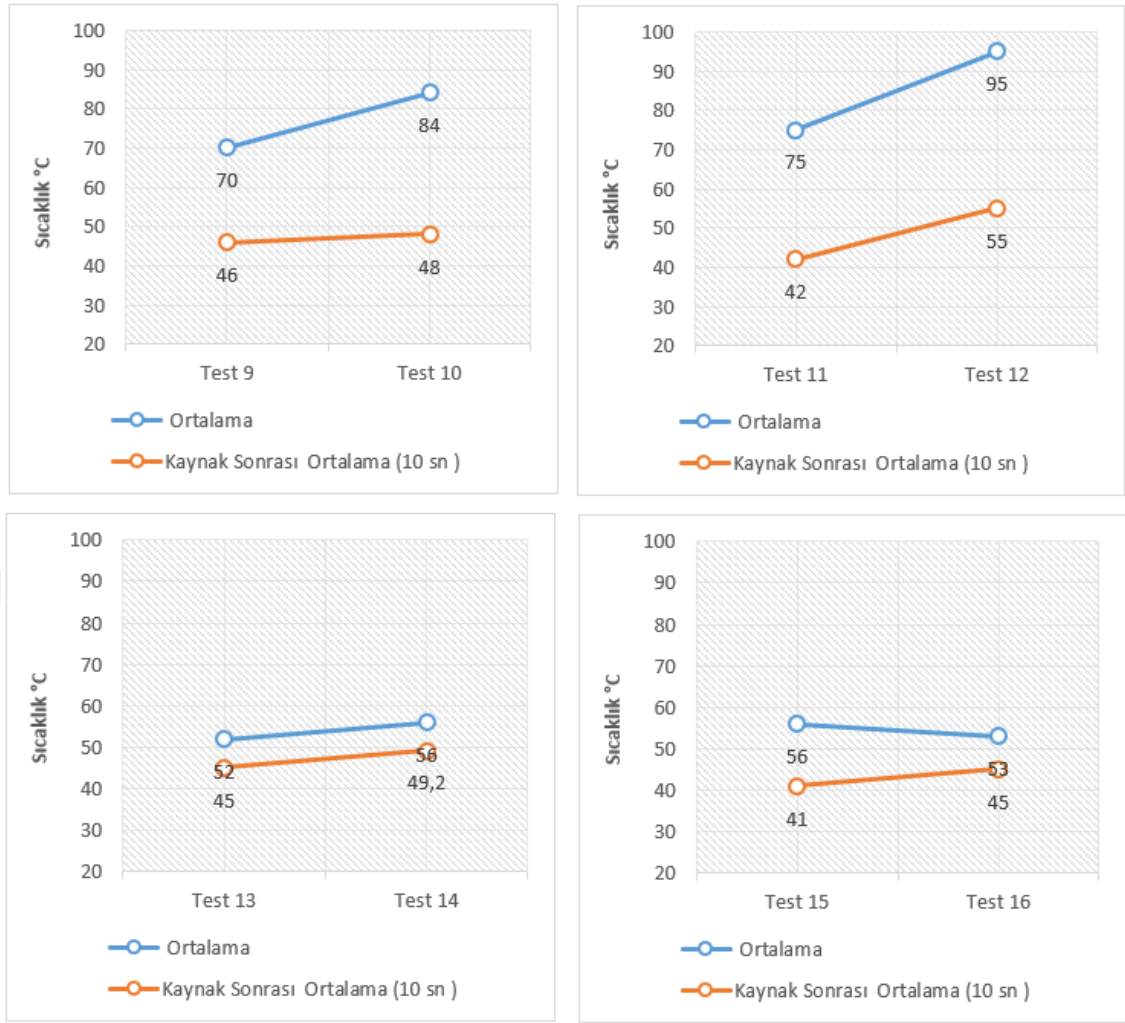
6.1. Kaynak Sonrası Sıcaklık İncelemeleri

Bu incelemede 16 adet test numunesinde 2 yöntemle sıcaklık ölçülmüştür. Bunlardan ilkinde kaynak işleminden hemen sonra 3 bölgeden sıcaklık verisi toplanmıştır. İkinci yöntemde ise kaynak işleminden 10sn sonra 3 bölgeden sıcaklık verisi alınmış ve tüm bu verileri test plakası olarak ortalaması alınarak iki sıcaklık değeri elde edilmiştir.



Şekil 6.1: PA pozisyonu kaynaklı numunelerin sıcaklık değişimleri.

Şekil 6.1’de grafikleri verilen PA pozisyonunda kaynatılan test parçalarından pulse (Test2, Test4, Test6 ve Test8) metoduyla kaynatılanlar double pulse (Test1, Test3, Test5 ve Test7) metoduyla kaynatılan test parçalarının anlık ölçülen sıcaklık verileri hemen hemen paralellik göstermekle birlikte kaynaktan 10 sn sonra alınan değerlerin ortalamasına bakıldığında ciddi sıcaklık farklarının olduğu gözlemlenmiştir.



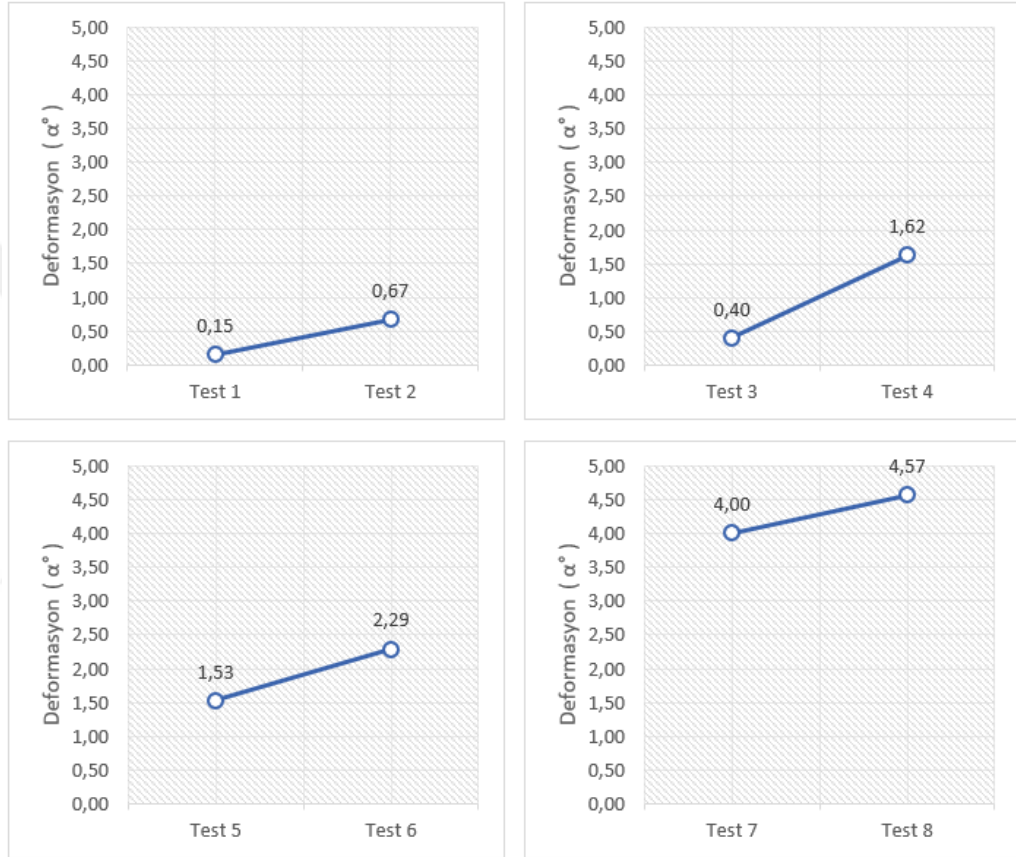
Şekil 6.2: PB pozisyonu kaynaklı numunelerin sıcaklık değişimleri.

Şekil 6.2’de grafikleri verilen PB pozisyonunda kaynatılan test parçalarından pulse (Test10, Test12, Test14 ve Test16) metoduyla kaynatılanlar double pulse (Test9, Test11, Test13 ve Test15) metoduyla kaynatılan test parçalarının anlık ölçülen sıcaklık verileri az da olsa farklılık göstermekle birlikte kaynaktan 10 sn sonra alınan değerlerin ortalamasına bakıldığında farkın arttığı görülmektedir.

Bu iki metot sıcaklık yönünden kıyaslandığında 10 °C derecelere kadar farklar olduğu tespit edilmiştir. Double pulse metodu pulse metoduna göre sıcaklık girdisi ve çıktısı olarak daha düşük değerlerde olduğu görülmüştür. Sonuçlardan elde edilen bilgi Wang ve Xue (2017) çalışması tarafındanda desteklenmektedir.

6.2. Kaynak Sonrası Distorsiyon İncelemeleri

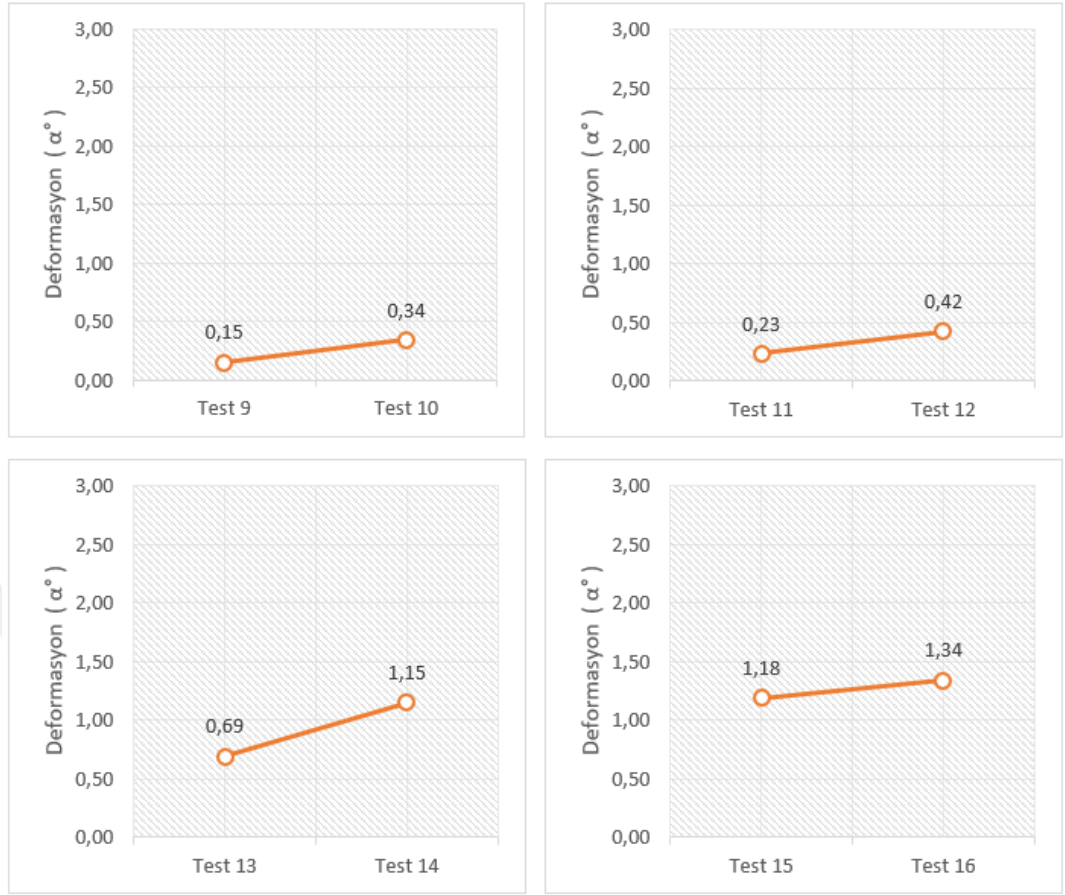
Distorsiyon açılarının ölçümünde 16 adet test numunesinde üçgen delik ölçme cetveli, L gönye ve düz cetvel yardımı ile çekme oluşturdıkları yükseklikler ölçülmüştür. Ölçülen bu değerler tan ve arctan fonksiyonları kullanılarak açıya dönüştürülmüş ve nihai distorsiyon açı değerleri elde edilmiştir.



Şekil 6.3: PA pozisyonu kaynaklı numunelerin distorsiyon açıları.

Şekil 6.3’de grafikleri verilen PA pozisyonunda kaynatılan test parçalarından pulse (Test2, Test4, Test6 ve Test8) metoduyla kaynatılanlar, double pulse (Test1, Test3, Test5 ve Test7) metoduyla kaynatılan test parçalarına göre daha fazla distorsiyona uğradığı görülmektedir.

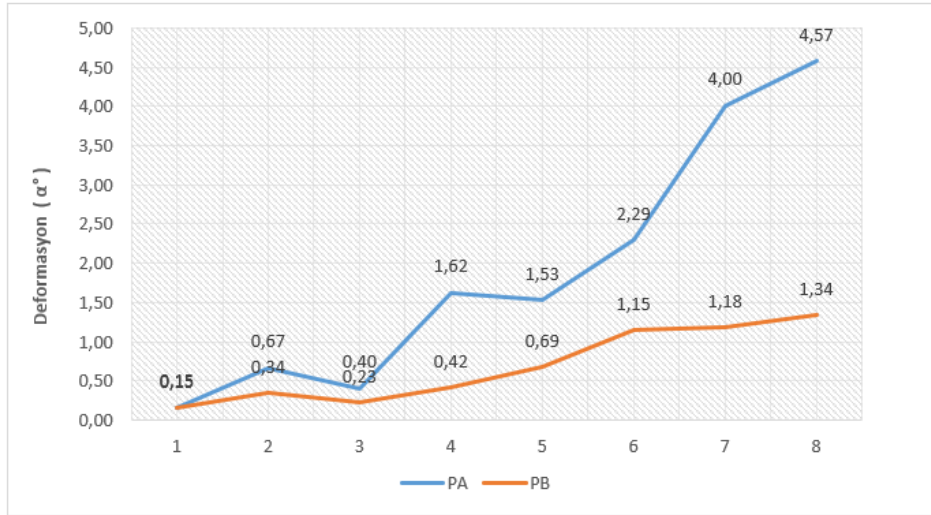
Ayrıca kalınlık azaldıkça distorsiyon açısının PA pozisyonunda 4.57 ° derecelere kadar çıktığı görülmüştür.



Şekil 6.4: PB pozisyonu kaynaklı numunelerin distorsiyon açıları.

Şekil 6.4’de grafikleri gösterilen PB pozisyonunda kaynatılan test parçalarından pulse (Test10, Test12, Test14 ve Test16) metoduyla kaynatılanlar, double pulse (Test9, Test11, Test13 ve Test15) metoduyla kaynatılan test parçalarına göre daha fazla distorsiyona uğradığı görülmektedir.

Ayrıca kalınlık azaldıkça distorsiyon açısının PB pozisyonunda 1.34 ° derecelere kadar çıktığı görülmüştür.



Şekil 6.5: Kalınlığa göre distorsiyon değişimi.

Şekil 6.5’de görüleceği gibi alın kaynağın çekme açısı köşe kaynağa göre çok daha fazla olduğu ve kalınlık 10mm’den 4mm’e doğru düştükçe bu açının arttığı tespit edilmiştir.

Yapılan testler sonucunda sıcaklık karşılaştırmasıyla distorsiyon oranlarının birbiriyle bağdaştığı görülmüştür. Sıcaklık girdisi arttıkça çekme açısı da paralelinde artmaktadır.

DP-GMAW metodunda ısı girdisinin düşük olması sebebiyle distorsiyon açısından P-GMAW metoduna göre avantajlı olduğu incelenmiştir.

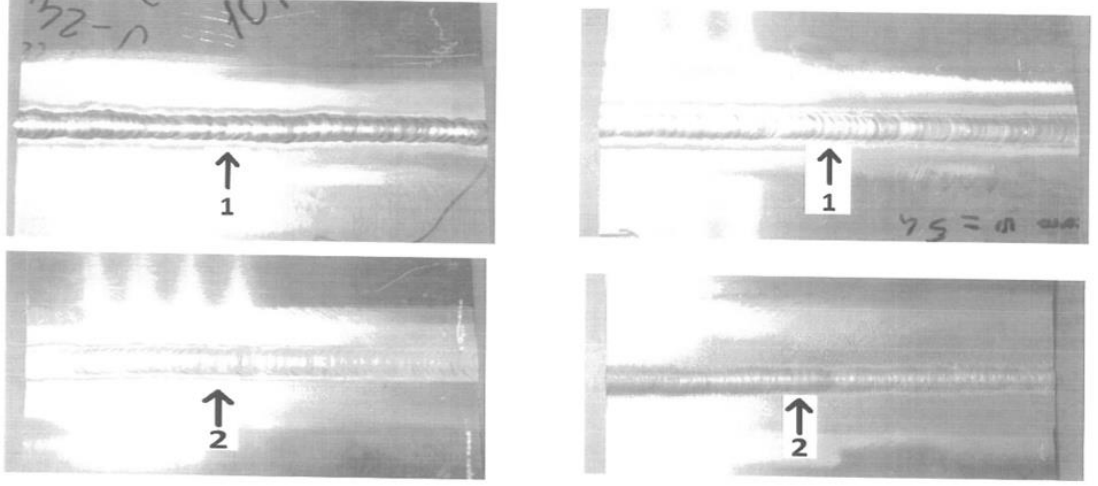
6.3. Görsel (VT -Visual Testing) Kaynak İncelemeleri

16 adet alüminyum test plakasına (8 adet PA pozisyonu, 8 adet PB pozisyonu) kaynak işlemlerinden sonra görsel muayeneye tabi olmuştur. Görsel muayene diğer test ve incelemeler içinde önem teşkil etmektedir. Görsel testten kalan bir numune diğer testlere girmeden ret edilmelidir.

Deneyler Tırsan Treyler A.Ş. test laboratuvarlarında; ergitme kaynaklı birleştirmelerin gözle muayene standartı olan EN ISO 17637 kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bu incelemelerde; çatlak, krater çatlağı, gözenek, krater oluşu, aşırı kaynak metali, taşma/binme, doğrusal kaçıklık, yetersiz oldurulmuş kaynak ağzı, yetersiz kaynakyüksekliği gibi kaynak hatalarına bakılmıştır.

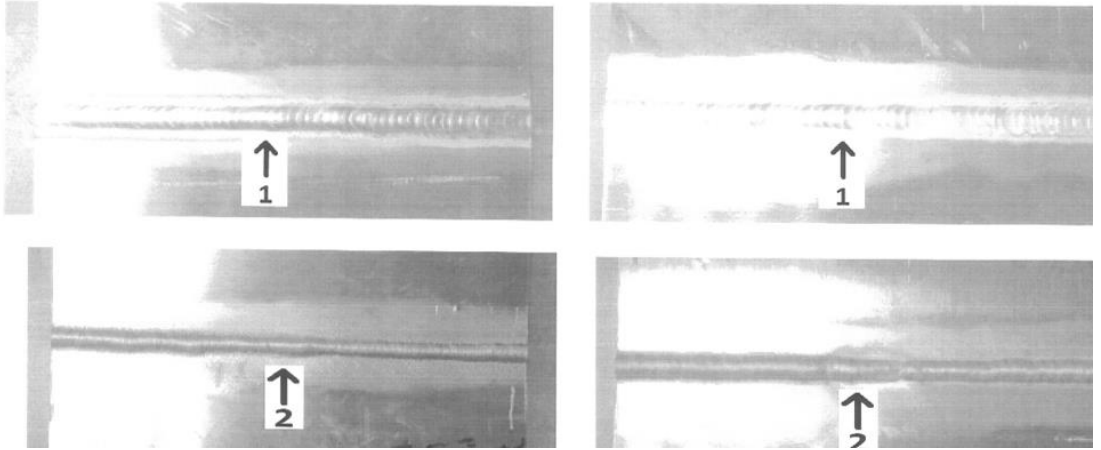
PA pozisyonunda double pulse ve pulse metotlarıyla kaynak işlemi yapılan test numunelerinin VT görüntüleri aşağıda gösterilmiştir. Şekil 6.6’da 10 mm kalınlığındaki

5083 serisi plakalara yapılan test görseli verilmiştir. Ret/kabul kriterlerine göre test numuneleri kabul edilmiştir.



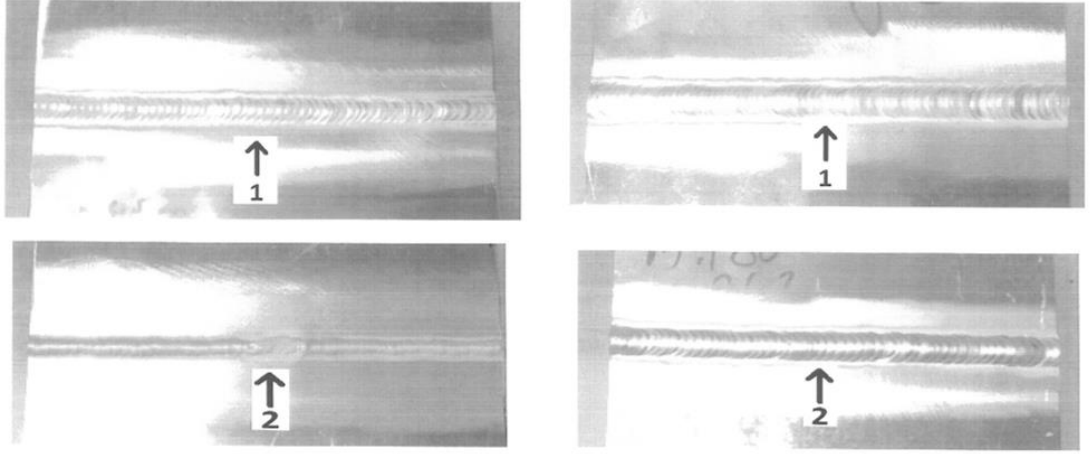
Şekil 6.6: PA pozisyonu 10 mm VT sonuçları.

Şekil 6.7’de 5083 serisi 8.1 mm kalınlığındaki malzemelere yapılan test görselleri verilmiştir. Ret/kabul kriterlerine göre test numuneleri kabul edilmiştir.



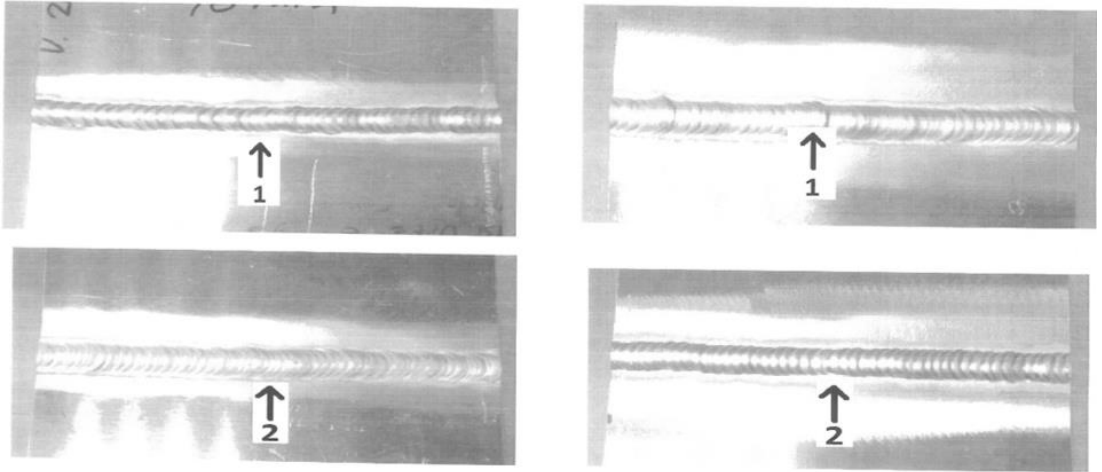
Şekil 6.7: PA pozisyonu 8.1 mm VT sonuçları.

Şekil 6.8’de yine aynı seriden 4.5 mm kalınlığında plakalara yapılan test sonuçları verilmiştir. Ret/kabul kriterlerine göre test numuneleri kabul edilmiştir.



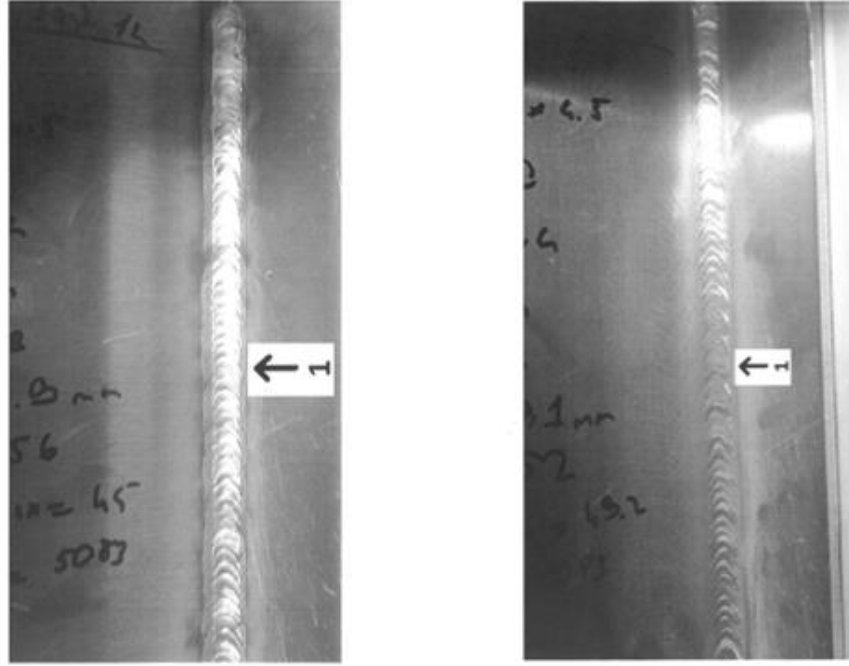
Şekil 6.8: PA pozisyonu 4.5 mm VT sonuçları.

Şekil 6.9’da 4mm kalınlıkta 6061 serisinde yapılan testlerin görseli verilmiştir. Ret/kabul kriterlerine göre test numuneleri kabul edilmiştir.



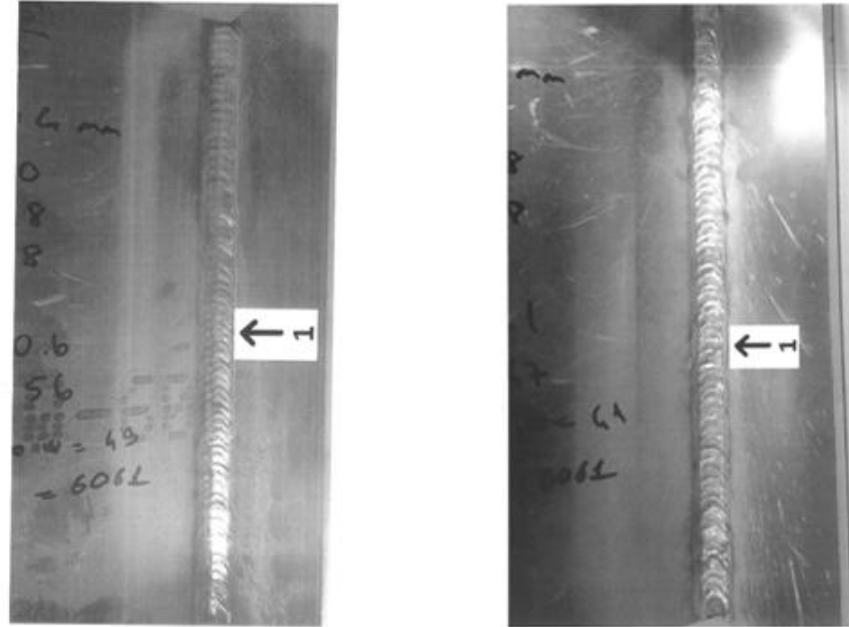
Şekil 6.9: PA pozisyonu 4 mm VT sonuçları

PB pozisyonunda double pulse ve pulse metotlarıyla kaynak işlemi yapılan test numunelerinin VT görüntüleri aşağıda gösterilmiştir. Şekil 6.10’da 10 mm kalınlığındaki 5083 serisi plakalara yapılan test görseli verilmiştir. Ret/kabul kriterlerine göre test numuneleri kabul edilmiştir.



Şekil 6.12: PB pozisyonu 4.5 mm VT sonuçları.

Şekil 6.13’de 4mm kalınlıkta 6061 serisinde yapılan testlerin görseli verilmiştir. Ret/kabul kriterlerine göre test numuneleri kabul edilmiştir.



Şekil 6.13: P B pozisyonu 4 mm VT sonuçları.

Tüm bu VT inceleme sonuçları; alüminyum ve alaşımlarında ark kaynaklı birleştirmelerin standartı olan EN ISO 10042’ye göre kontrol edilmiştir. Test numunelerinde standartlara

aykırı bir durum tespit edilmemiştir, tüm parçalar görsel testten geçmiştir. Pulse ve double pulse metotları VT yönünden incelendiğinde; temel farklılıklar gözlenmemekle birlikte balık pulu görünümü olarak double pulse metodu daha iyi sonuç vermiştir. Benzer çalışmalar bunu desteklemektedir (Yi ve diğ, 2015). Ayrıca kep yüksekliği olarak da double pulse, pulse metodu kaynaklarına göre daha fazla olduğu incelenmiştir. Elde edilen bu sonuçların paraleli olarak ITAB bölgesinin double pulse metodunda daha fazla olduğu Demir (2019) tarafından desteklenmektedir.

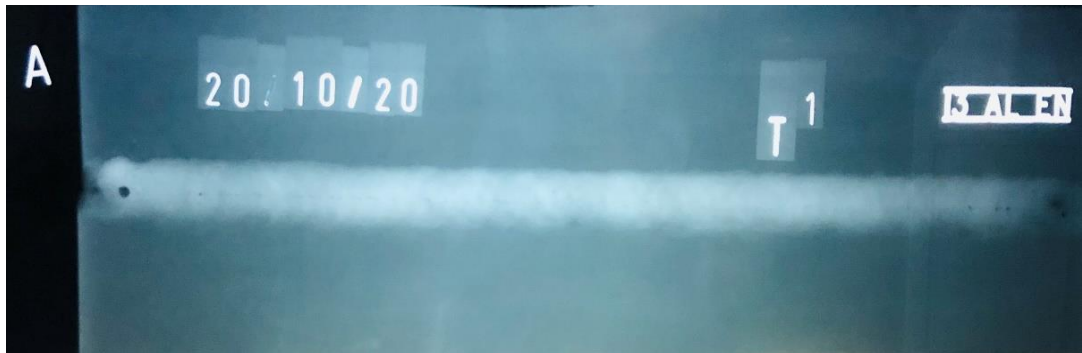
6.4. Radyografik Test (RT - Radiography Testing) İncelemeleri

Görsel testlerden sonra (VT) radyografik teste geçilmiştir. Bu test sürecinde 8 adet PA pozisyonunda işlemleri yapılan pulse ve double pulse kaynaklarının durumları incelenmiştir.

Radyografik test tahribatsız deneyler içinde en etkili yöntemlerden birisidir. Görsel kontrollerde tespit edilemeyecek iç bölgelerdeki gözenekler, birleşme problemleri gibi hataların tespiti için etkilidir.

Bu testler Tırsan Treyler A.Ş. röntgen test laboratuvarlarında; EN ISO 17636-1 radyografik muayene - filmli X ve gama ışını teknikleri standartları kapsamında uygulanmıştır.

Şekil 6.14’de Test1 10 mm kalınlığındaki double pulse metoduyla kaynaklı test plakalarına yapılan radyografik röntgen çıktısı gösterilmiştir. İncelendiğinde kabul kriterleri içinde başlama ve bitirme bölgelerinde gözenekler olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.14: PA pozisyonu double pulse 10 mm RT sonucu.

Şekil 6.15’de Test2 10 mm kalınlığındaki pulse metoduyla kaynaklı test plakalarına yapılan radyografik röntgen çıktısı gösterilmiştir. Röntgen incelendiğinde sadece başlama bölgesinde bir noktada gözenek tespit edilmiştir.



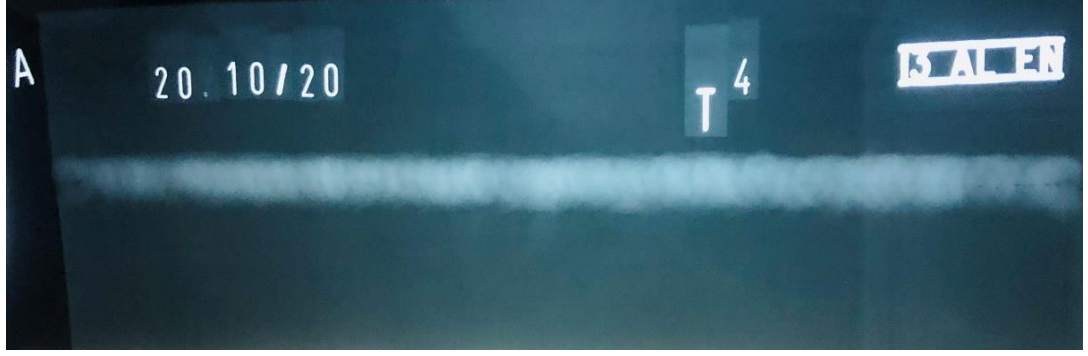
Şekil 6.15: PA pozisyonu pulse 10 mm RT sonucu.

Şekil 6.16’da Test3 8,1 mm kalınlığındaki double pulse metoduyla kaynaklı test plakalarına yapılan radyografik röntgen çıktısı gösterilmiştir. Röntgen incelendiğinde ilk 70 mm lik alanda sıralı gözenek tespit edilmiştir.



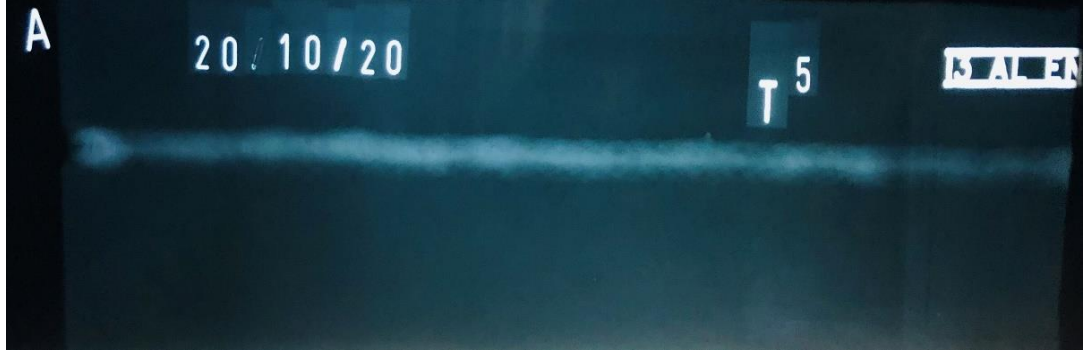
Şekil 6.16: PA pozisyonu double pulse 8.1 mm RT sonucu.

Şekil 6.17’de Test4 8,1 mm kalınlığındaki pulse metoduyla kaynaklı test plakalarına yapılan radyografik röntgen çıktısı gösterilmiştir. Röntgen incelendiğinde son 25 mm lik alanda sıralı gözenek gözlemlenmiştir.



Şekil 6.17: PA pozisyonu pulse 8.1 mm RT sonucu.

Şekil 6.18’de Test5 4,5 mm kalınlığındaki double pulse metoduyla kaynaklı test plakalarına yapılan radyografik röntgen çıktısı gösterilmiştir. Uygunsuzluk tespit edilmemiştir.



Şekil 6.18: PA pozisyonu double pulse 4.5 mm RT sonucu.

Şekil 6.19’da Test6 4,5 mm kalınlığındaki pulse metoduyla kaynaklı test plakalarına yapılan radyografik röntgen çıktısı gösterilmiştir.

Röntgenler incelendiğinde her iki mototla yapılan birleştirmenin de hatasız olduğu görülmüştür.



Şekil 6.19: PA pozisyonu pulse 4.5 mm RT sonucu.

Şekil 6.20’de 6061 serisi Test7 4 mm kalınlığındaki double pulse metoduyla kaynaklı test plakalarına yapılan radyografik röntgen çıktısı gösterilmiştir. Uygunsuzluk tespit edilmemiştir.



Şekil 6.20: PA pozisyonu double pulse 4 mm RT sonucu.

Şekil 6.21’de 6061 serisi Test8 4 mm kalınlığındaki pulse metoduyla kaynaklı test plakalarına yapılan radyografik röntgen çıktısı gösterilmiştir. Başlangıç bölgesindeki ilk 15 mm lik bölgede birleşmeme ve sıralı gözenek hatası tespit edilmiştir.



Şekil 6.21: PA pozisyonu pulse 4 mm RT sonucu.

Röntgen sonuçları gösterilen tüm test plakalarından Test1, Test2, Test3, Test4 ve Test8 de gözenekler görülmesine karşı kabul standartları içinde kalmıştır. En fazla hata Test3 8,1 mm kalınlığındaki double pulse metodu ile yapılan kaynakta 70 mm alanda sıralı gözenek hatası görülmüştür. Çift darbe kaynağında gözenek oluşma yatkınlığı Mendes ve Scotti (2006) çalışmasında görülmüştür. Çekme ve eğme numuneleri bu bölgeden alınmayarak kesimde fire olacak bölge olarak seçilmiştir.

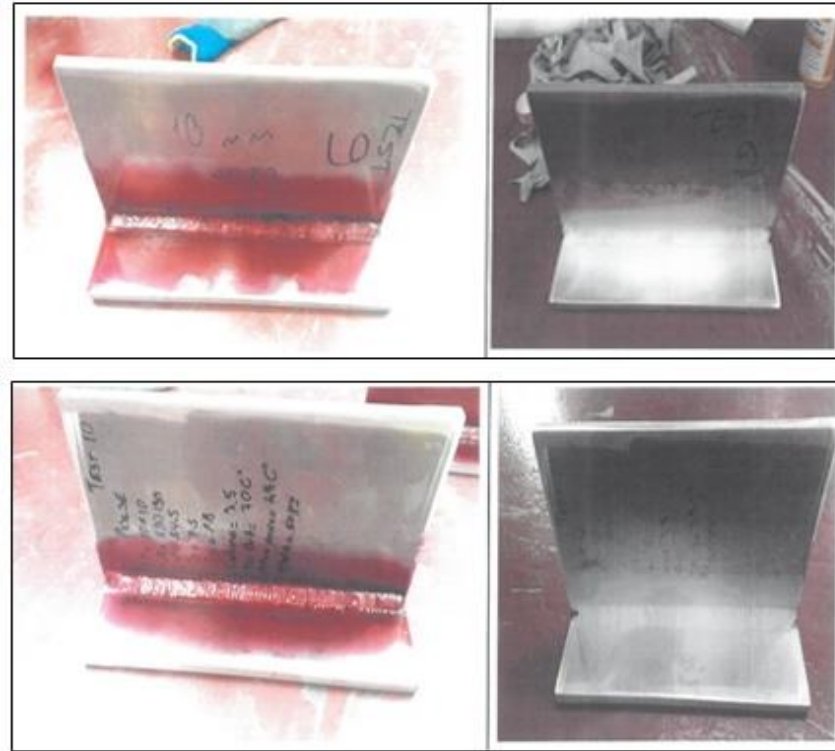
Radyografik testlerin sonuçları; TS EN ISO 10675-2 Radyografik muayene için kabul seviyeleri - bölüm 2: alüminyum ve alaşımları adlı standarta göre değerlendirilmiştir.

6.5. Sıvı Penetrant (PT) Metodu İncelemeleri

PB pozisyonunda kaynak operasyonları yapılmış 8 adet farklı kalınlıktaki alüminyum test plakasına kaynak işlemlerinden sonra sıvı penetrant testine tabi olmuştur. Göz ile muayenede görülemeyen hataların tespiti için sıvı penetrant yöntemi önem kazanmaktadır.

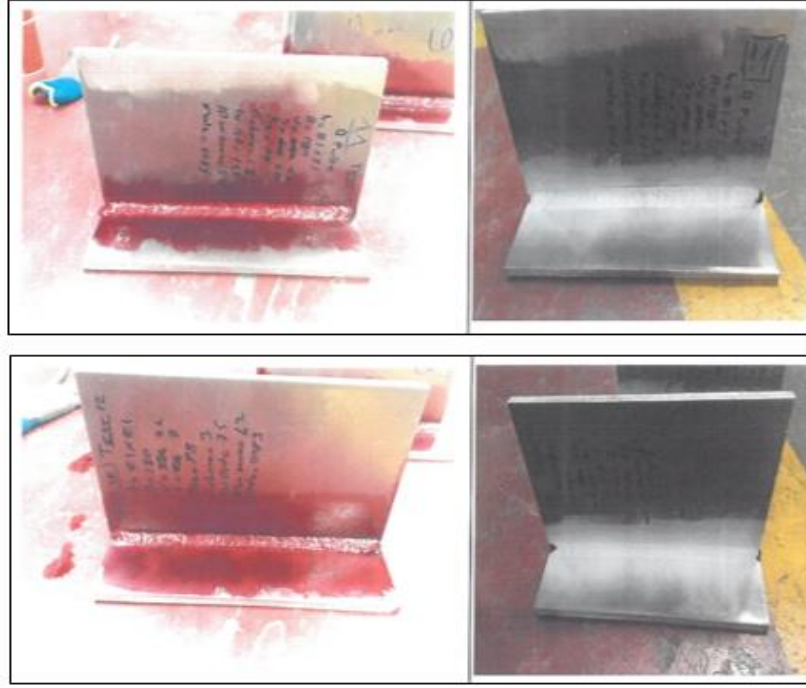
İş bu deneyler Tırsan Treyler A.Ş. test laboratuvarlarında; penetrant muayene standardı olan EN ISO 3452-1 kapsamında gerçekleştirilmiştir.

PB pozisyonunda double pulse ve pulse metotlarıyla kaynak işlemi yapılan test numunelerinin PT görüntüleri aşağıda gösterilmiştir. Şekil 6.22’de 10 mm kalınlığındaki Test-9 double pulse ve Test-10 pulse metotlarıyla kaynatılan 5083 serisi plakalara yapılan penetrant test görseli verilmiştir.



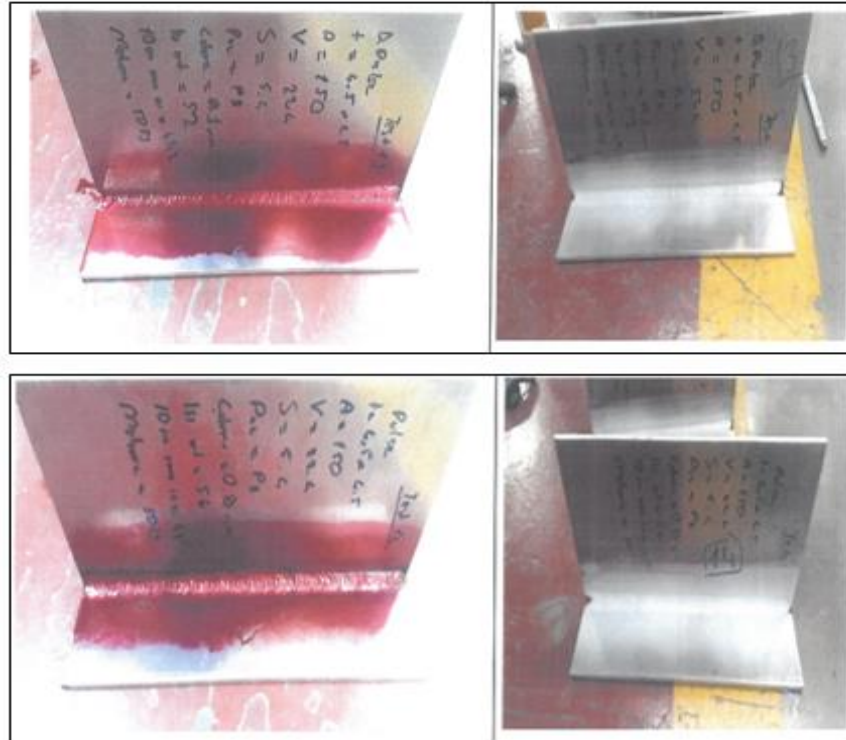
Şekil 6.22: PB pozisyonu 10 mm PT sonucu.

Şekil 6.23’de 8,1 mm kalınlığındaki Test-11 double pulse ve Test-12 pulse metotlarıyla kaynatılan 5083 serisi plakalara yapılan penetrant test görseli verilmiştir. Test 11 köşe kaynak parçasında 40 mm lik alanda sıralı gözenek tespit edilmiştir.



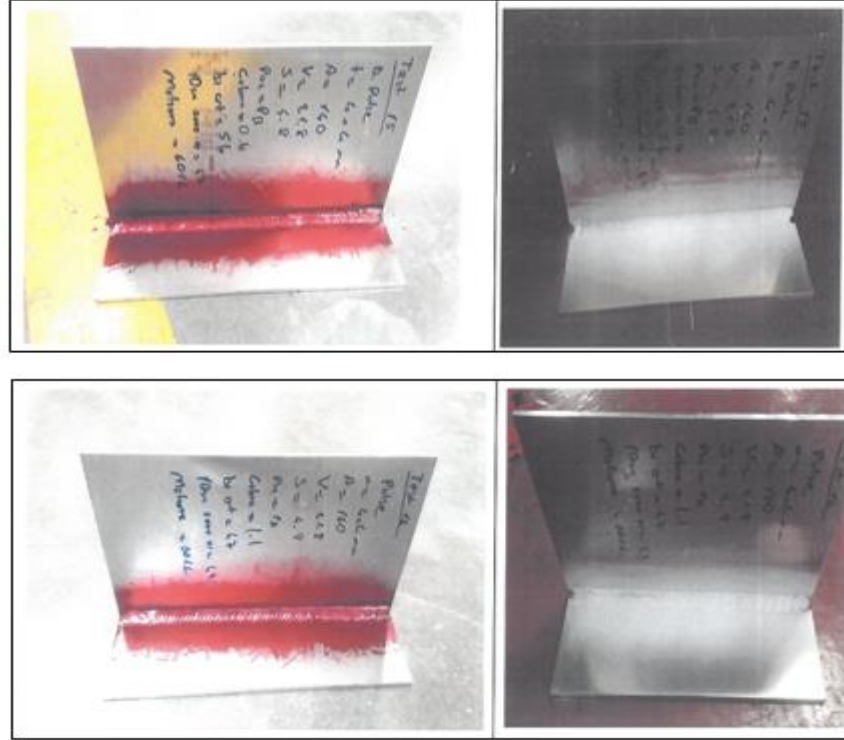
Şekil 6.23: PB pozisyonu 8.1 mm PT sonucu.

Şekil 6.24'de 4,5 mm kalınlığındaki Test-13 double pulse ve Test-14 pulse metotlarıyla kaynatılan 5083 serisi plakalara yapılan penetrant test görseli verilmiştir.



Şekil 6.24: PB pozisyonu 4.5 mm PT sonucu.

Şekil 6.25’de 4 mm kalınlığındaki Test-15 double pulse ve Test-16 pulse metotlarıyla kaynatılan 6061 serisi plakalara yapılan penetrant test görseli verilmiştir.

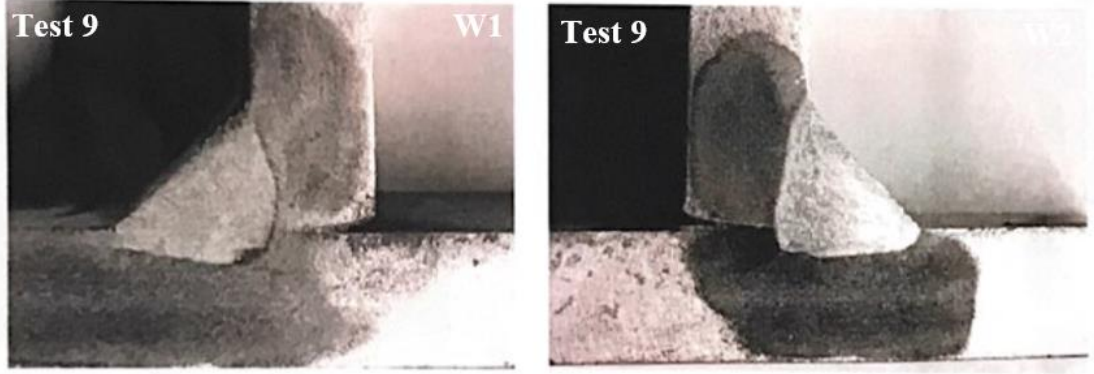


Şekil 6.25: PB pozisyonu 4 mm PT sonucu.

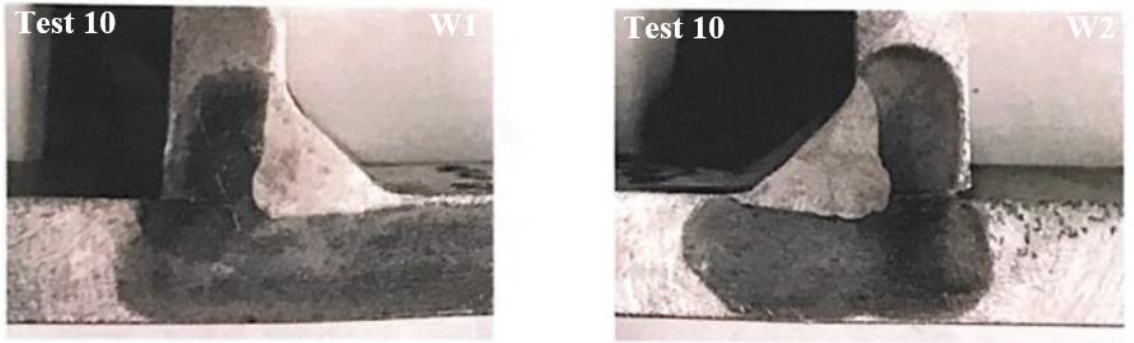
6.6. Makro Test Sonuçları

Bu testte PB (yatay köşe kaynak) pozisyonu ile AA 5083 ve AA 6061 alüminyum alaşımlı malzemelerin pulse ve d.pulse kaynaklı birleştirmelerine ait makro yapı incelemesi yapılmıştır. Bu testler yapılırken TS EN ISO 17639 standartına uyulmuştur. Makro yapı incelemeleri Tırsan Treyler A.Ş laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

Şekil 6.26’da Test-9 10 mm double pulse Şekil 6.27’de Test-10 10mm pulse metoduyla kaynatılmış test plakalarından alınan numunenin sol ve sağ yüzlerinden makro yapı görüntüsü verilmiştir.



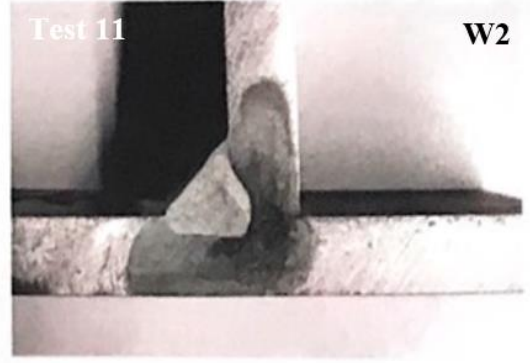
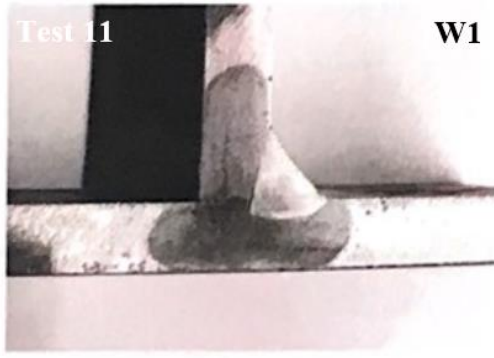
Şekil 6.26: PB 10 mm double pulse kaynak makro sonucu.



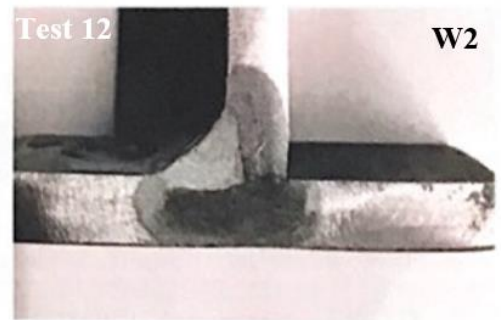
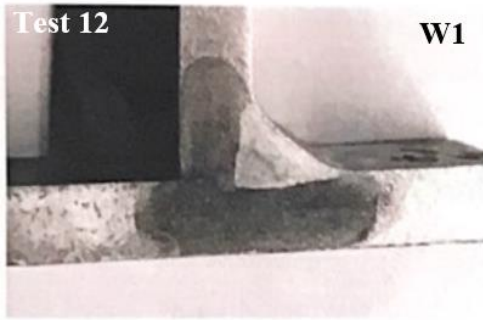
Şekil 6.27: PB 10 mm pulse kaynak makro sonucu.

Nüfuziyetler ölçüldüğünde Test-9 double pulse metodu 3.6 mm, Test-10 metodu ile kaynatılan numune 3.4 mm olduğu görülmüştür.

Şekil 6.28’de Test-11 8,1 mm double pulse Şekil 6.29’da Test-12 8,1mm pulse metoduyla kaynatılmış test plakalarından alınan numunenin sol ve sağ yüzlerinden makro yapı görüntüsü verilmiştir.



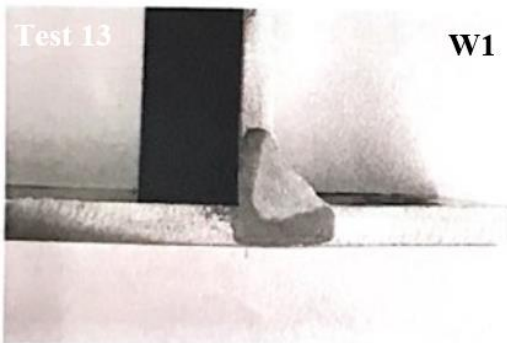
Şekil 6.28: PB 8.1 mm double pulse kaynak makro sonucu.



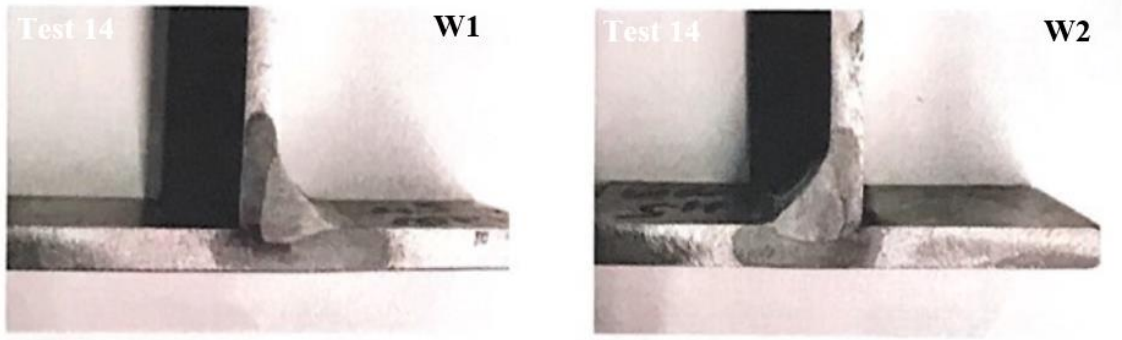
Şekil 6.29: PB 8.1 mm pulse kaynak makro sonucu.

Nüfuziyet değerlerine bakıldığında Test-11 double pulse metodu ile kaynatılan numune 3.2 mm, Test-12 metodu ile kaynatılan numune 3.0 mm olduğu görülmüştür.

Şekil 6.30'da Test-13 4,5 mm double pulse Şekil 6.31'de Test-14 4,5 mm pulse metoduyla kaynatılmış test plakalarından alınan numunenin sol ve sağ yüzlerinden makro yapı görüntüsü verilmiştir.



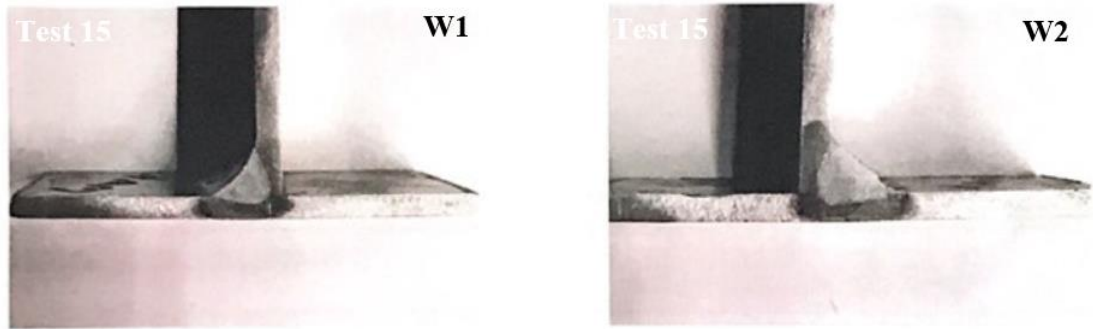
Şekil 6.30: PB 4.5 mm double pulse kaynak makro sonucu.



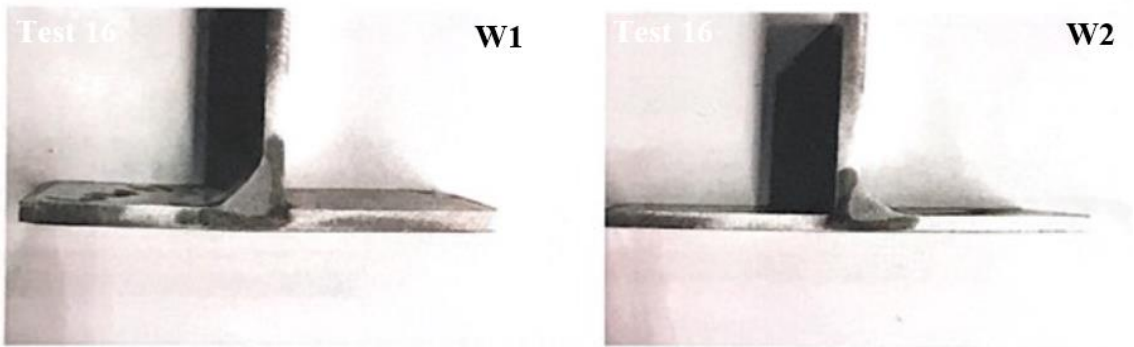
Şekil 6.31: PB 4.5 mm pulse kaynak makro sonucu.

Nüfuziyet değerlerine bakıldığında Test-13 double pulse metodu ile kaynatılan numune 2.4 mm, Test-14 metodu ile kaynatılan numune 2.1 mm olduğu görülmüştür.

Şekil 6.32’de Test-15 4 mm 6061 serisi double pulse Şekil 6.33’de Test-16 4 mm 6061 serisi pulse metoduyla kaynatılmış test plakalarından alınan numunenin sol ve sağ yüzlerinden makro yapı görüntüsü verilmiştir.

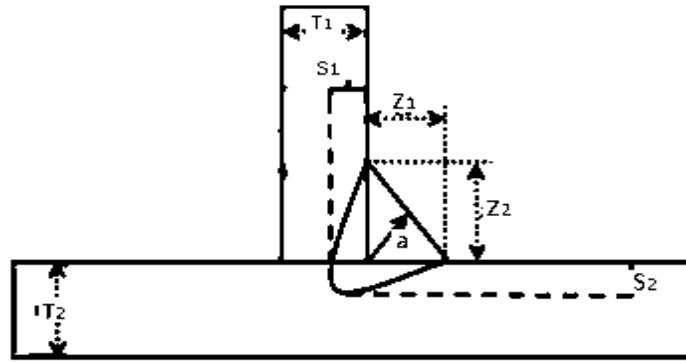


Şekil 6.32: PB 4 mm double pulse kaynak makro sonucu.



Şekil 6.33: PB 4 mm pulse kaynak makro sonucu.

Nüfuziyet değerlerine bakıldığında Test-15 double pulse metodu ile kaynatılan numune 2.1 mm, Test-16 metodu ile kaynatılan numune 1.8 mm olduğu görülmüştür.



Şekil 6.34: Nüfuziyet değerlendirme kriteri.

PB pozisyonu kaynak nüfuziyetleri Şekil 6.34’de verilen S1 ve S2 değerleri ile ifade edilmiştir. Kumpas ile ölçülen değerler Tablo 6.1’de verilmiştir.

Tablo 6.1: Makro testi nüfuziyet sonuçları.

Test No	Malzeme kalınlığı	Kaynak Yöntemi	W1-S1 (mm)	W1-S2 (mm)	W2-S1 (mm)	W2-S2 (mm)	S (mm)
9	10 mm	D.Pulse	3,7	3,6	3,6	3,5	3,6
10	10 mm	Pulse	3,5	3,3	3,6	3,3	3,4
11	8,1 mm	D.Pulse	3,2	3,1	3,3	3,2	3,2
12	8,1 mm	Pulse	3,0	3,0	3,1	3,0	3,0
13	4,5 mm	D.Pulse	2,6	2,3	2,4	2,2	2,4
14	4,5 mm	Pulse	2,2	2	2,1	1,9	2,1
15	4 mm	D.Pulse	2,1	2,2	2,1	2,1	2,1
16	4 mm	Pulse	1,8	1,8	1,7	1,9	1,8

Makro yapı incelemelerini bütününe bakıldığında tüm kalınlıklarda çift darbe metodu ile kaynatılan numunelerin daha iyi nüfuziyet sağladığı görülmüştür. 10 mm kalınlıkta double pulse %5.1 daha iyi nüfuz ettiği, 8.1 mm kalınlıkta double pulse %5.8 daha iyi nüfuz ettiği, 4.5 mm kalınlıkta double pulse %15.9 daha iyi nüfuz ettiği, 4 mm kalınlıkta double pulse %18.1 daha iyi nüfuz ettiği görülmüştür. Kaynak formları ve kaynak damla geometrilerine göre tüm numuneler testlerden geçmiştir. Yüzdelere bakıldığında malzeme kalınlığı azaldıkça double pulse metodunun nüfuziyet oranının arttığı da gözlemlenmiştir. Double pulse yöntemindeki nüfuziyet artışı Da Silva ve Scotti (2006) çalışmasında da gözlemlenmiştir.

6.7. Çekme Deneyi Sonuçları

Tahribatlı deneylerden olan çekme deneyi; mekanik özelliklerin incelenmesinde önemli bir rol üstlenir. Bu deney tek bir eksen üzerinde sabit hızda ve sıcaklıkta malzemenin

kopuncaya kadar çekilerek teste tabi olmasıdır. Deney sonucu olarak ayrıca numunenin uzaması da ölçülür.

Çekme deneyleri Asaş Alüminyum San.Tic.A.Ş. Laboratuvarında bulunan Zwick AllroundLine Z250 marka çekme test cihazında ve 5 mm/dk çekme hızda gerçekleştirilmiştir. Çekme işlemlerinin tümü oda sıcaklığında yapılmış ve tüm sonuçlar bilgisayara aktararak otomatik grafiğe dönüştürülmüştür. Deneylerde DIN EN 10002-1 Metalik malzemeler - çekme deneyi - bölüm 1'e uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

Çekme işlemleri tamamlanan numunelerin görselleri Şekil 6.35'de verilmiştir. Burada görüldüğü gibi ITAB bölgesinden kopan 8. numune hariç hepsi ana malzemeden kopmuştur.

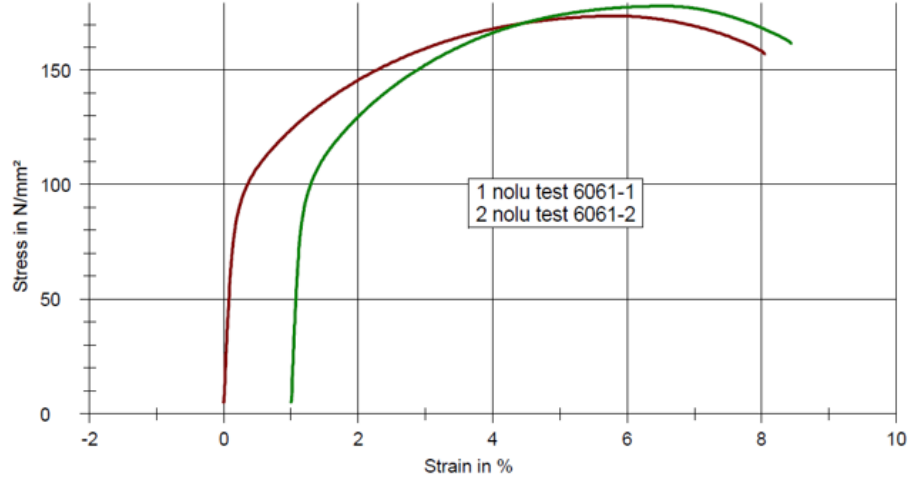


Şekil 6.35: Çekme testi tamamlanmış numuneler.

Test sonuçlarında pulse ve d.pulse metotlarını birbirleriyle kıyaslamak için aynı kalınlıktaki plakalardan alınan numuneler birlikte grafiğe dökülmüştür.

Şekil 6.36'de 4 mm kalınlığındaki 6061 malzemesine yapılan deney sonuçları görülmektedir. Akma dayanım sonuçlarına bakıldığında pulse metodu ile kaynatılan numune yaklaşık %4 daha fazla çıktığı görülmüştür. Aynı durum çekme dayanımı içinde geçerlidir. Uzama durumları ise %7.8 ve %7.2 ile birbirlerine yakındır.

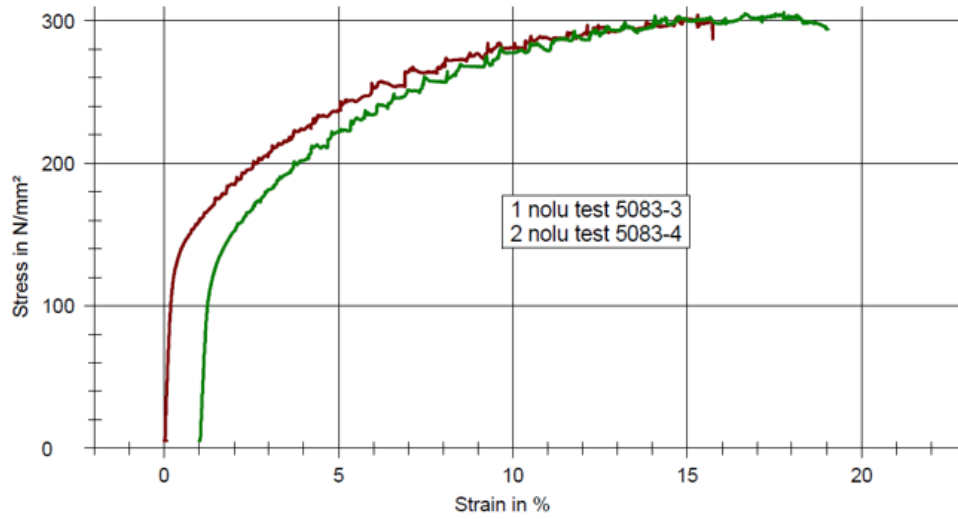
Legends	Nr	Rp 0,2 N/mm ²	Rm N/mm ²	A %
1	1	100,23	173,63	7,80
2	2	104,36	177,92	7,20



Şekil 6.36: 6061 serisi 4 mm çekme deneyi sonuçları.

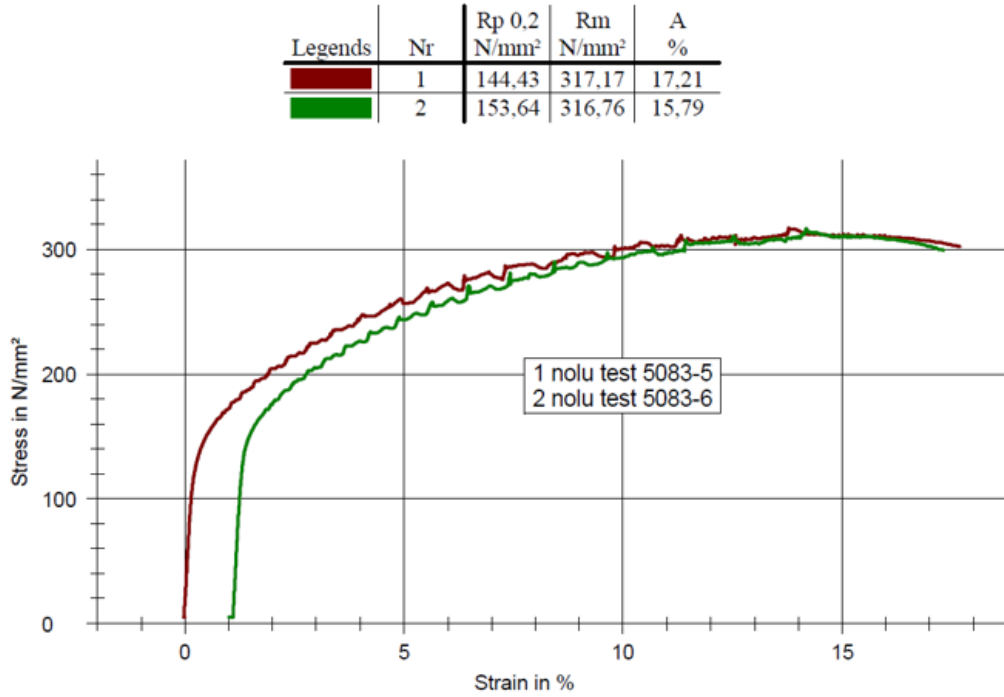
Şekil 6.37’da 4,5 mm kalınlığındaki 5083 malzemesine yapılan deney sonuçları verilmiştir. Akma dayanım sonuçlarına bakıldığında double pulse metodu ile kaynatılan numune yaklaşık %6 daha fazla çıktığı görülmüştür. Çekme dayanımında ise sırasıyla neredeyse aynı diyebileceğimiz 304,02 Mpa ve 305,83 Mpa değerleri elde edilmiştir. Uzama durumları ise %15,29 ve %17,46 ile birbirlerine yakındır.

Legends	Nr	Rp 0,2 N/mm ²	Rm N/mm ²	A %
1	1	134,20	304,02	15,29
2	2	126,26	305,83	17,46



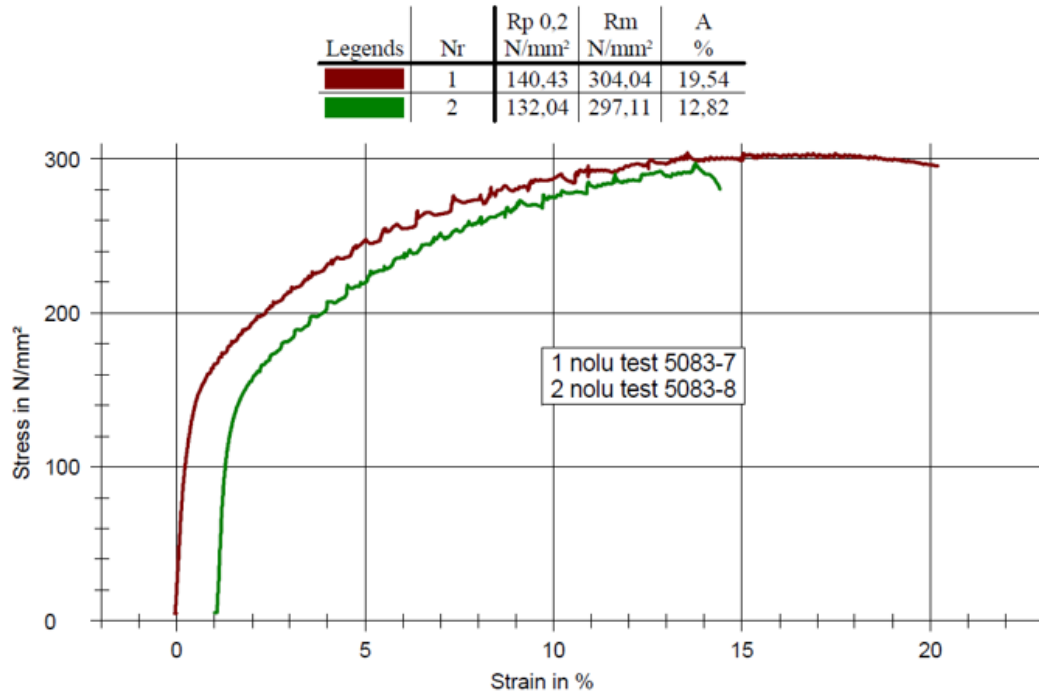
Şekil 6.37: 5083 serisi 4.5 mm çekme deneyi sonuçları.

Şekil 6.38’de 8,1 mm kalınlığındaki 5083 malzemesine yapılan deney sonuçları verilmiştir. Akma dayanım sonuçlarına bakıldığında double pulse metodu ile kaynatılan numune yaklaşık %6 daha az çıktığı görülmüştür. Çekme dayanımında ise sırasıyla 317,17 Mpa ve 316,76 Mpa değerleri ile hemen hemen aynı sonuçlar elde edilmiş diyebiliriz. Uzama durumları ise %17,21 ve %15,49 ile birbirlerine yakındır.



Şekil 6.38: 5083 serisi 8.1 mm çekme deneyi sonuçları.

Şekil 6.39’de 10 mm kalınlığındaki 5083 malzemesine yapılan deney sonuçları verilmiştir. Akma dayanım sonuçlarına bakıldığında double pulse metodu ile kaynatılan numune yaklaşık %6 daha fazla çıktığı görülmüştür. Çekme dayanımında ise sırasıyla 304,04 Mpa ve 297,11 Mpa değerleri ile yaklaşık %2,5 fark gözlemlenmiştir. Uzama durumlarında ise %19,54 değeriyle double pulse ile kaynatılan numunenin, %12,82 çıkan pulse metoduyla kaynatılan numuneye göre fazla olduğu görülmüştür.



Şekil 6.39: 5083 serisi 10 mm çekme deneyi sonuçları.

PA pozisyonunda pulse ve double pulse metotları ile kaynatılan test numunelerinin akma dayanımları, çekme dayanımları ve uzama miktarlarının değerleri Tablo 6.2’de verilmiştir.

Tablo 6.2: Çekme deneyi özellikleri ve sonuçları.

Test No	Malzeme kalınlığı	Kaynak Yöntemi	Temper	Malzeme Cinsi	Rp 0,2 N/mm ²	Rm N/mm ²	A %
1	4 mm	D.Pulse	0/H111	6061	100,23	173,63	7,8
2	4 mm	Pulse	0/H111	6061	104,36	177,92	7,2
3	4,5 mm	D.Pulse	0	5083	134,2	304,02	15,29
4	4,5 mm	Pulse	0	5083	126,26	305,83	17,46
5	8,1 mm	D.Pulse	0	5083	144,43	317,17	17,21
6	8,1 mm	Pulse	0	5083	153,64	316,76	15,79
7	10 mm	D.Pulse	0	5083	140,43	304,04	19,54
8	10 mm	Pulse	0	5083	132,04	297,11	12,82

Çekme testinde akma dayanımı, çekme dayanımı ve uzama olarak tüm sonuçları karşılaştırılan 8 adet test parçasını DP-GMAW ve P-GMAW metotları çerçevesinde ele alırsak; ITAB bölgesinden kopan pulse yöntemiyle kaynak edilmiş 8. Test numunesi hariç diğer numunelerin ana malzemeden koptuğu görülmüştür, değerlerin yer yer %6 farklar göstermesine rağmen birbirlerine çok yakın olduğu deneylerle gözlemlenmiştir.

Bu çalışmayı destekler nitelikten olan Liu ve diğ. (2013) yaptığı çalışmada kopmaların ana metalde olduğunu, çekme ve akma mukavemetlerinin ana metale yakın olduğunu ortaya koymuştur.

6.8. Eğme-Basma Deneyi Sonuçları

Tahribatlı deneyler sınıfında yer alan eğme deneyinde yapılan kaynakların dayanımı ölçülmüştür.

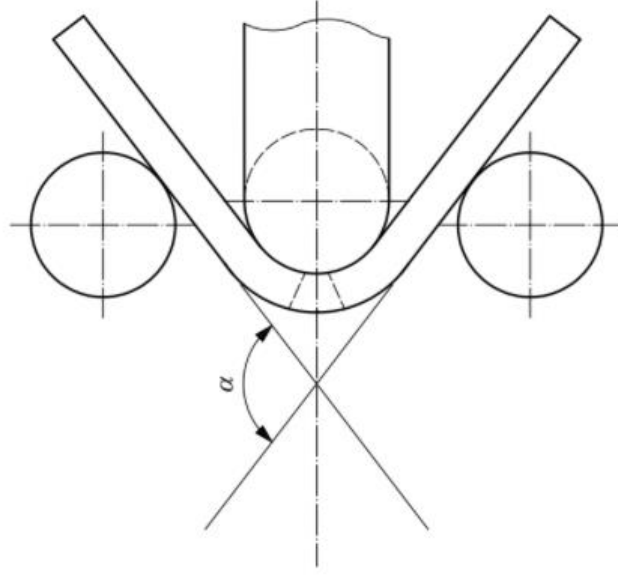
PA pozisyonunda pulse ve double pulse metotları ile kaynatılan ve EN ISO 5173 standartlarına göre hazırlanan 8 adet eğme numunesiyle deney yapılmıştır. Test malzeme kalınlıklarına göre belirlenen zımba yarıçap, kalıp yarıçap ve çene açıklıklarına dikkat edilerek malzemeler kaynak bölgelerinden çatlayana kadar eğme işlemine devam edilmiştir.

Çekme işlemleri tamamlanan numunelerin görselleri Şekil 6.40'da verilmiştir. Burada görüldüğü gibi 8 numuneden hepsi ITAB bölgelerinden çatlamıştır.



Şekil 6.40: Eğme testi tamamlanmış numuneler.

Şekil 6.41'da teorik şeması verilen eğme deneyi düzeneği görülmektedir. Alfa açısı (α) eğme açısını göstermektedir.



Şekil 6.41: Eğme deneyinde eğme açısı gösterimi.

Şekil 6.42’de ölçüm yapılan eğilmiş paralar gösterilmiştir. Ölçüm elektronik açıölçer ile yapılmıştır.



Şekil 6.42: Eğme numunelerinin eğilme açıları.

Eğme açısını bulmak için ölçülen değerler bütünleyeni 180° den çıkarılarak hesaplanmıştır ve Tablo 6.3’de değerler verilmiştir.

Tablo 6.3: Eğme deneyi sonuçları.

Test No	Malzeme kalınlığı	Kaynak Yöntemi	Temper	Malzeme Cinsi	Eğme Açısı
1	4 mm	D.Pulse	0/H111	6061	103,4°
2	4 mm	Pulse	0/H111	6061	145,6°
3	4,5 mm	D.Pulse	0	5083	113,3°
4	4,5 mm	Pulse	0	5083	115,7°
5	8,1 mm	D.Pulse	0	5083	79,1°
6	8,1 mm	Pulse	0	5083	84,6°
7	10 mm	D.Pulse	0	5083	75,9°
8	10 mm	Pulse	0	5083	78,5°

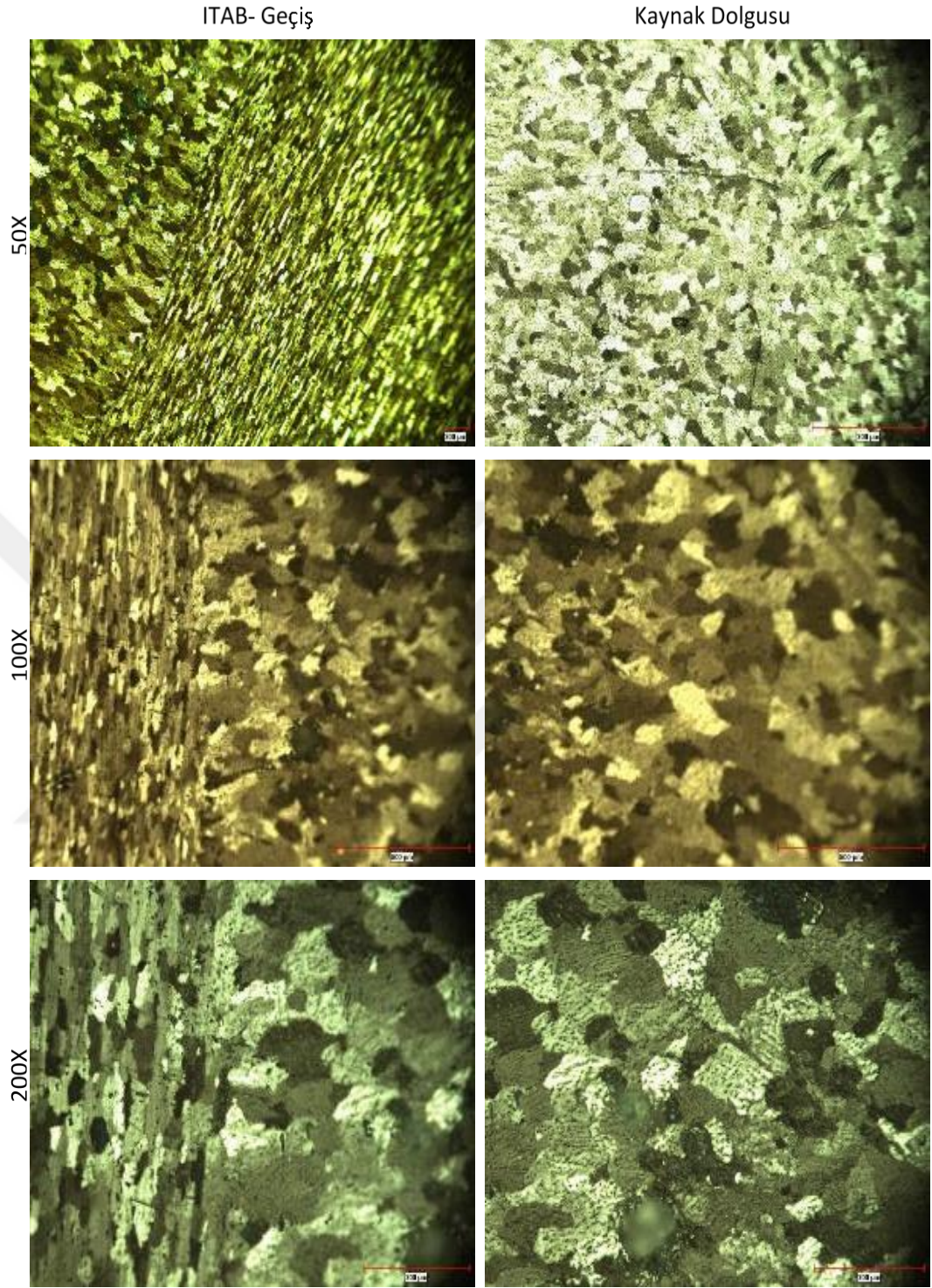
Eğme testi sonuçlarında aynı kalınlıktaki test numuneleri kendi aralarında incelendiğinde pulse metoduyla kaynatılan dört eğme testi numunesi de double pulse metoduna göre kaynatılanlardan daha fazla eğildiği gözlemlenmiştir. Bunun sebebi olarak; double pulse metodundaki düşük ısı girdisi ile kaynak bölgesi çevresini sertleştirmesi ön görülmüştür. Sen ve diğ. (2018) yaptığı çalışma double pulse metoduyla yapılan birleştirmelerde sertliğin arttığını ortaya koymuştur, bu çalışmayı destekler niteliktedir.

İş bu deneyde malzeme kalınlığı azaldıkça ters orantılı olarak eğme açılarının arttığı sonuçlarla gözlemlenmiştir.

6.9. Mikro Yapı Sonuçları

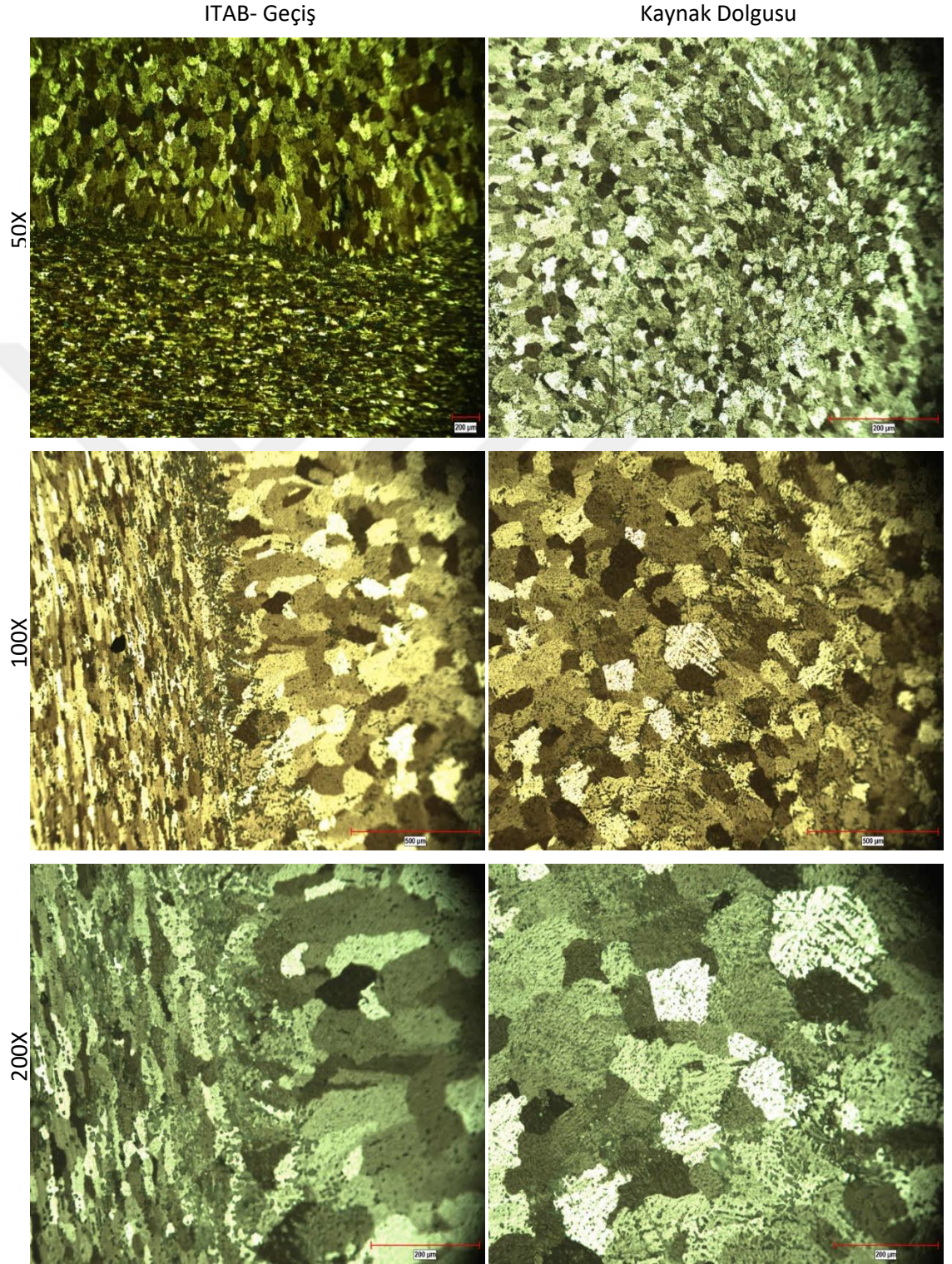
Metalografik inceleme için sırasıyla kesme, zımparalama, dağlama ve parlatma işlemleri uygulanan Test 9, Test 10, Test 11 ve Test 12 numunelerine TS EN ISO 17639 standartlarına uygun olarak mikro yapı incelemeleri yapılmıştır. İncelemeler ana metal, ITAB, geçiş bölgesi ve kaynak dikiş bölgelerinde yapılmıştır.

Şekil 6.43’de double pulse metoduyla kaynatılan Test 9 kaynak dolgusu ve ITAB geçişi optik mikroskop görüntüsü verilmiştir.



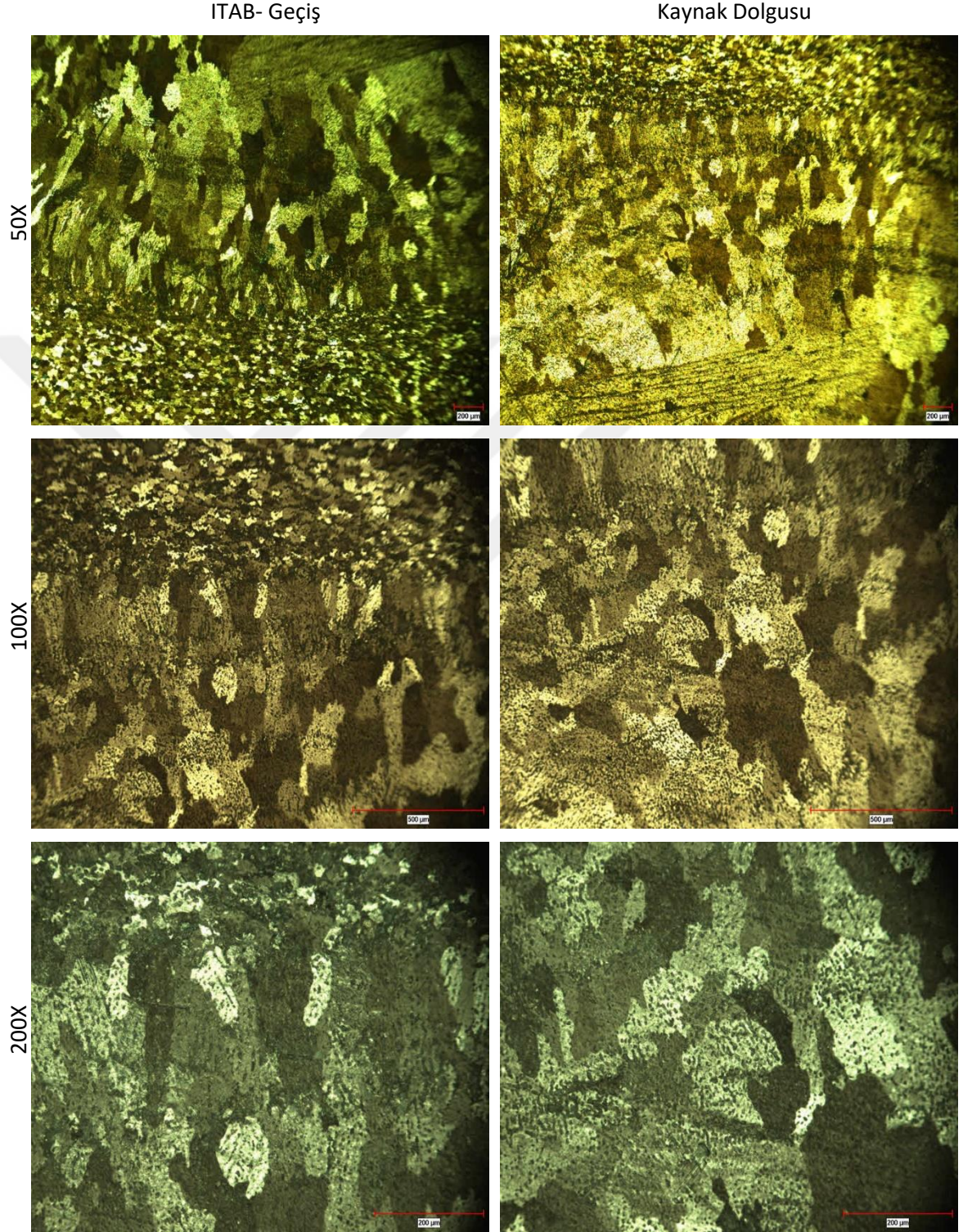
Şekil 6.43: Test 9 mikro yapı görüntüleri.

Şekil 6.44’de pulse metoduyla kaynatılan Test 10 kaynak dolgusu ve ITAB geçişi optik mikroskop görüntüsü verilmiştir.



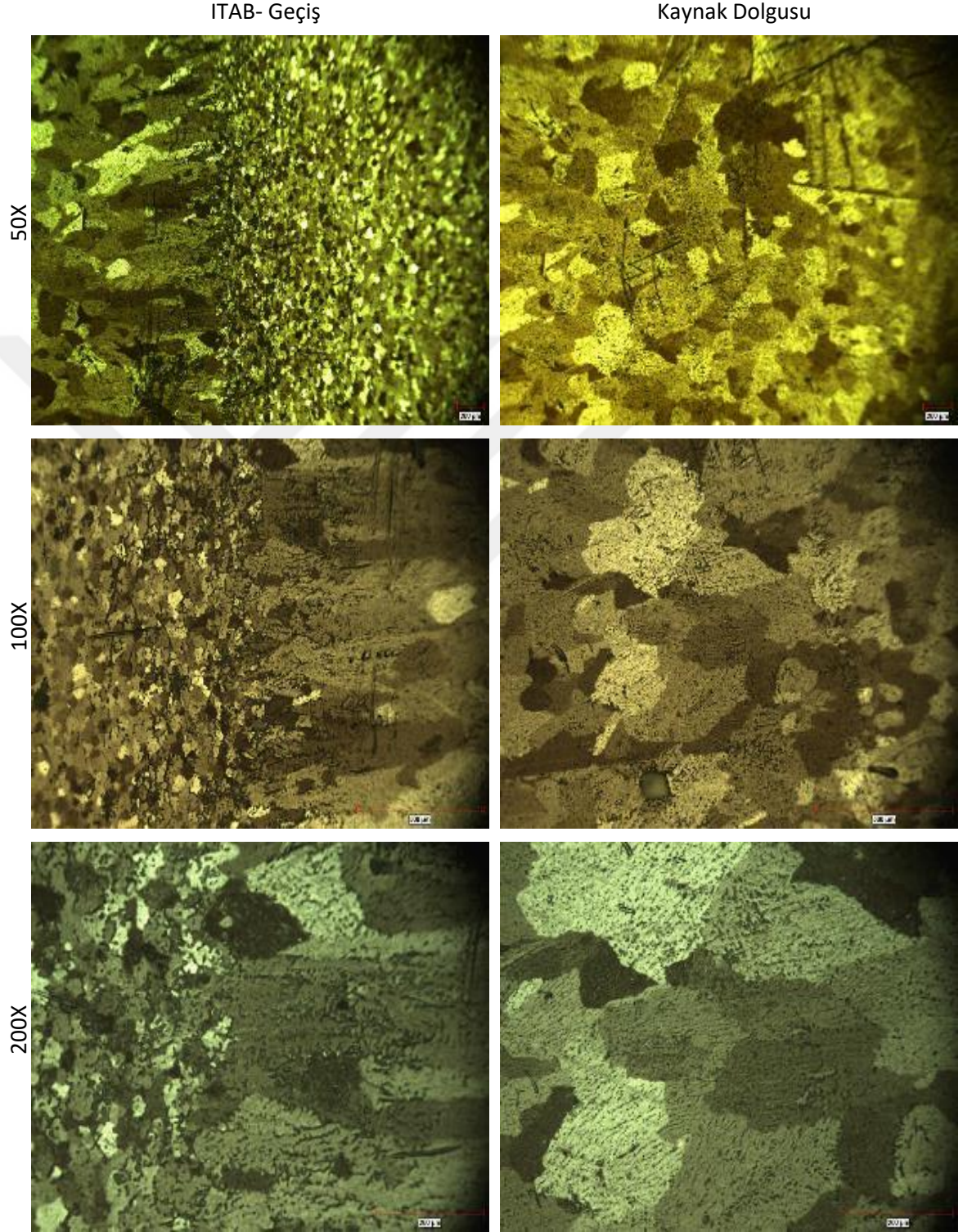
Şekil 6.44: Test 10 mikro yapı görüntüleri.

Şekil 6.45’de double pulse metoduyla kaynatılan Test 11 kaynak dolgusu ve ITAB geçişi optik mikroskop görüntüsü verilmiştir.



Şekil 6.45: Test 11 mikro yapı görüntüleri.

Şekil 6.46'da pulse metoduyla kaynatılan Test 12 kaynak dolgusu ve ITAB geçişi optik mikroskop görüntüsü verilmiştir.



Şekil 6.46: Test 12 mikro yapı görüntüleri.

Double pulse Test 9 pulse Test 10' a göre kaynak çekirdeğinde daha ince taneli yapı da olduğu optik mikroskopta görülmüştür. Aynı durum double pulse Test 11'in pulse Test 12'ye göre daha ince taneli olduğu mikro yapı incelemesinde görülmüştür. Bu duruma sebep olarak çift darbeli metot da düşük ısı girdisinin olması ön görülmüştür. Bu iki karşılaştırmanın paralel olması double pulse metodu ile yapılan kaynakların daha sert ve mukavemetli olduğunu göstermektedir.

Yapılan mikro yapı incelemelerinde tüm numunelerde ITAB bölgesinin ana metale göre daha iri taneli olduğu görülmüştür. Hakem ve diğ. (2012) tarafından yapılan çalışma bunu desteklemektedir.

Pulse metodu ile birleştirilen Test 10 ve Test 12 de ITAB geçiş bölgesinde tanecik yapısında büyüme gözlemlenmiştir. Kolonsal yapı kaynak çekirdeğine doğru olduğu gözlemlenmiştir. Double pulse metodu ile birleştirilen numunelerde bu duruma yönelim minimum seviyelerde olduğu incelenmiştir. Tanecik yapısı küçüldükçe sertlik ve mukavemet artmaktadır (Demir, 2019). Elde edilen bu sonuçlar; PA pozisyonunda kaynatılan numunelere yapılan eğme ve çekme testleriyle paralel olduğunu göstermektedir. Double pulse metodunda yapılan kaynak numunelerinin mikro yapı sonuçları Wang ve Xue (2017) çalışması tarafından desteklenmektedir.

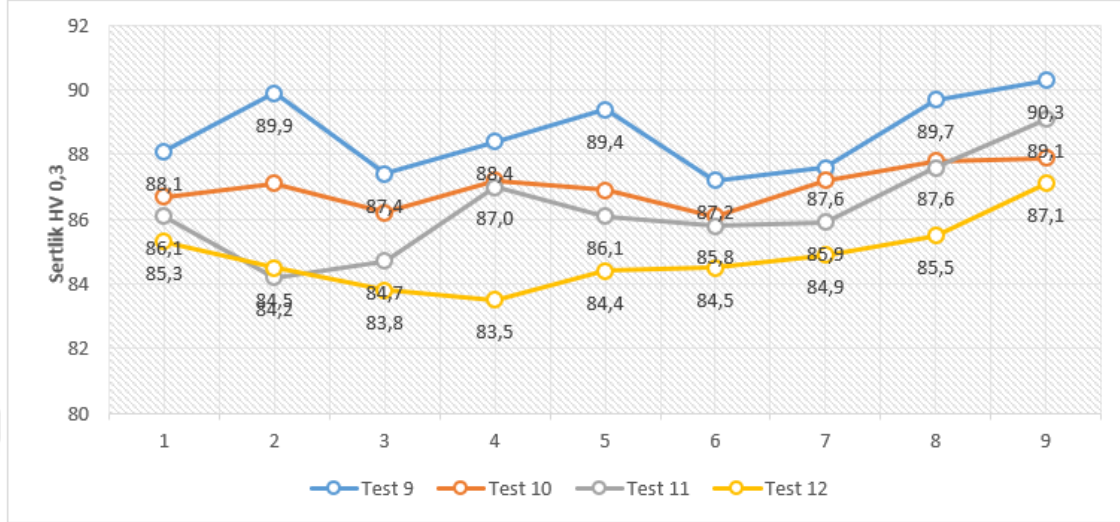
6.10. Sertlik Test Sonuçları

PB pozisyonunda double pulse ve pulse metotları ile birleştirilen Test 9, Test 10, Test 11 ve Test 12 numunelerinin metalografik inceleme ile beraber 300g yük altında Vickers sertlik değerleri 9 noktadan ölçülmüştür. Ölçülen bu değerler Tablo 6.4'de verilmiştir.

Tablo 6.4: Ana metal, ITAB ve kaynak dikişi sertlik değerleri.

Ölçüm Noktası	Test 9	Test 10	Test 11	Test 12
1	88,1	86,7	86,1	85,3
2	89,9	87,1	84,2	84,5
3	87,4	86,2	84,7	83,8
4	88,4	87,2	87,0	83,5
5	89,4	86,9	86,1	84,4
6	87,2	86,1	85,8	84,5
7	87,6	87,2	85,9	84,9
8	89,7	87,8	87,6	85,5
9	90,3	87,9	89,1	87,1

Vickers sertlik değerleri 83 HV ve 90 HV arasında değiştiği görülmüştür. Şekil 6.47’de bu noktaların değerleri grafiğe dökülmüştür.



Şekil 6.47: Bölgelere göre sertlik değerleri.

Her iki metot için de kaynak dolgusuna gelindikçe sertlik değerlerinin arttığı ve double pulse metodu pulse metoduna göre 1-3 HV arasında daha sert olduğu ölçülmüştür. Ana metalde sertlik değeri ortalama 86,1 HV ölçülürken kaynak dolgularında bu değer ortalama 87,3 HV olarak ölçülmüştür. Double pulse metodu ile kaynatılan numunelerin ortalama kaynak dikişi sertlik değeri 87,9 HV iken pulse metodunda ortalama kaynak dikiş değeri 86,4 HV’dir. Bu ölçümler EN ISO 14271 standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Çekme testlerinde test çubuklarının ana metalden kopması sertlik değerlerini destekler niteliktedir. Ayrıca DP metot kaynak dolgusundaki sertlik değer artışı Liu ve diğ. (2013a) çalışması ile paraleldir.

BÖLÜM 7. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu yüksek lisans tezin de yapılan çalışmalarda otomotiv sektörünün yarı römork (damper, tanker, silo platform vb.) imalatı başta olmak üzere bir çok sektörde kullanılan alüminyum alaşımların iki farklı metotla birleştirilmeleri ve birleştirmeler sonucunda bu iki farklı metot da oluşan farklılıkları ele almıştır.

Analiz ve karşılaştırma olarak üzerine az sayıda çalışma yapılan P-GMAW ve DP-GMAW metotlarını çok yönlü araştırılması için; 4 mm, 4.5 mm, 8.1 mm ve 10 mm olmak üzere dört farklı kalınlık, AA6061 ve AA5083 olmak üzere iki farklı alüminyum malzeme cinsi, PA (yatay alın) ve PB (yatay köşe) olmak üzere iki farklı kaynak pozisyonu varyasyonları ile ele alınmıştır.

Kaynak yapılarını ve mekanik özelliklerini gözlemlemek için testler ve incelemelerde ise tahribatlı testler ve tahribatsız testler olmak üzere on farklı yöntemle analiz edilmiştir. Tahribatsız muayeneler; kaynak sonrası sıcaklık ölçümü, kaynak sonrası distorsiyon ölçümü, görsel test (VT-visual testing), radyografik test (RT-radiography testing) ve sıvı penetrant muayeneleri (PT) olmak üzere beş farklı test uygulanmıştır. Tahribatlı muayeneler ise; Makro testi, eğme testi ve çekme testi olmak üzere üç inceleme yapılmıştır.

Kaynaklı bağlantı işlemlerinde, iki ayrı malzemenin istenilen dayanımda ve kriterlerde birleştirilmesi olmazsa olmazdır. Bunun için de kaynak dikişinin yeterli nüfuziyette olmasının yanı sıra, kaynak hatalarının (sıçrantı/çapak, yetersiz erime, nüfuziyet yetersizliği, yanma olukları, gözenek, sıralı gözenek, kaynak çatlakları, vb.) oluşmaması gereklidir. Bu tezde uygulanan iki yöntem test sonuçlarına göre genel olarak değerlendirildiğinde kaynak işlemi olarak kabul seviyededir.

VT görsel testler olarak P-GMAW ve DP-GMAW yöntemlerine baktığımızda benzer sonuçlar elde edilmiş olup en temel farklılık olarak double pulse kaynaklarında kep çıkıntısı daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Kaynak sonrası iki farklı yöntemle ölçülen sıcaklık verileri analiz edildiğinde double pulse ile birleştirilen test numunelerinin pulse ile birleştirilenlere oranla düşük sıcaklıkta kaldığı tespit edilmiştir. Bu sonuç bize kaynak esnasında düşük ısı girdisi olduğunu göstermektedir.

Sonuçlara distorsiyon açıları olarak bakıldığında termal şoklar sayesinde ısı girdisinin düşük olmasıyla beraber double pulse metodu ile birleştirilen numuneler pulse metoduna göre çok daha iyi sonuçlar vererek kaynak distorsiyonunun minimumda olduğu incelenmiştir. Distorsiyon açısının pulse metorunda PA pozisyonunda 4.57 ° dereceye, PB pozisyonunda 1.34 ° dereceye kadar çıktığı görülmüştür.

Penetrent test sonuçlarında (PT), her iki yöntemde yapılan kaynaklarda 11 nolu test plakası hariç bir problemle karşılaşılmamıştır. Bu numune kendi içinde kabul standartlarındadır fakat kılcal derinlikte 40 mm lik bir alanda sıralı gözenek tespit edilmiştir.

Radyografik test sonuçları (RT) kaynaklı bölgelerin iç yapılarıyla ilgili detaylı incelenme sağlamıştır. Her iki yöntemle kaynatılan test plakalarının başla-bitir bölgelerinde gözeneklere rastlanmıştır. Farklı tespitler olarak 3 numaralı test 8,1 mm kalınlığındaki double pulse metoduyla kaynaklı test plakasında ilk 70 mm lik alanda sıralı gözenek tespit edilmiştir. 4 mm kalınlığındaki pulse metoduyla kaynaklı 8 numaralı test plakasında ise başlangıç bölgesindeki ilk 15 mm lik bölgede birleşmeme hatası tespit edilmiştir.

Makro yapı kapsamında double pulse ve pulse yöntemleri incelendiğinde; her iki yöntemde test plakalarına yeteri kadar nüfuziyet ettiği görülmüştür. 10 mm kalınlıkta double pulse %5.1 daha iyi nüfuz ettiği, 8.1 mm kalınlıkta double pulse %5.8 daha iyi nüfuz ettiği, 4.5 mm kalınlıkta double pulse %15.9 daha iyi nüfuz ettiği, 4 mm kalınlıkta double pulse %18.1 daha iyi nüfuz ettiği incelenmiştir. Tüm kalınlıklarda çift darbe metodu ile kaynatılan numunelerin daha iyi nüfuziyet sağladığı görülmüştür. Yüzdelere bakıldığında malzeme kalınlığı azaldıkça double pulse metodunun nüfuziyet oranının arttığı da gözlemlenmiştir.

Eğme test düzeneğinde elde edilen sonuçlar incelendiğinde malzeme kalınlığı azaldıkça eğme açılarının arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca aynı kalınlıktaki test numuneleri pulse ve double pulse olarak kendi aralarında karşılaştırıldığında pulse metoduyla birleştirilen dört eğme testi numunesi de double pulse metoduna göre birleştirilenlerden daha fazla eğildiği

gözlemlenmiştir. Bu duruma sebep olarak; double pulse metodundaki düşük ısı girdisi ve paralelinde kaynak bölgesi çevresini sertleştirmesi ön görülmüştür.

Çekme deneyinde P-GMAW ve DP-GMAW yöntemleri çekme dayanımı, akma dayanımı ve uzama miktarlarının yüzdesi olarak üç ana başlıkta karşılaştırılmıştır. Çekme test parçaları (çekme çubukları) testler sonucunda incelendiğinde 8 parçanın da kaynak bölgesinden kopmadığı görülmüştür. Eş parçaların değerleri birbirleri ile mukayese edildiğinde %3-4 aralığında farklılık gösterdiği test sonucu olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak karşılaştırma ve analizi yapılan iki metot da çekme deneyinde birbirlerine yakın karakteristik özellikler sergilemiştir.

Mikro yapı incelemesinde double pulse metodunun pulse metoduna göre daha ince taneli yapıda olduğu görülmüştür. Bu karşılaştırma double pulse metodu ile yapılan kaynakların daha sert ve mukavemetli olduğunu göstermektedir. Çekme test sonuçları ve sertlik değerleri bunu doğrular niteliktedir.

Sertlik ölçümlerinde her iki metot için de kaynak dolgusuna gelindikçe sertlik değerlerinin arttığı ve double pulse metodu pulse metoduna göre 1-3 HV arasında daha sert olduğu ölçülmüştür. Double pulse metodu ile kaynatılan numunelerin ortalama kaynak dikişi sertlik değeri 87,9 HV iken pulse metodunda ortalama kaynak dikiş değeri 86,4 HV'dir. Çekme testlerinde test çubuklarının ana metalden kopması sertlik değerlerini destekler niteliktedir.

Sonuç olarak yapılan bu tez çalışmasında P-GMAW ve DP-GMAW yöntemleri birbirlerine yakın özellikler sergilerken malzeme kalınlığı azaldıkça double pulse metodunun daha işlevsel hale geldiği görülmüştür. Ayrıca ısı girdisinin düşük olması bir çok alanda DP-GMAW metoduna bir avantaj sağlayacağı görülmüştür.

Öneriler;

1. Kaynaklı imalat sektörlerinde düşük ısı girdisi istenen operasyonlarda (proseslerde) DP-GMAW metodu tercih edilebilir.
2. Düşük kalınlıktaki malzemelerin birleştirilmesinde DP-GMAW metodu tercih edilebilir.
3. Çalışmalara GMAW da dahil edilerek GMAW, P-GMAW ve DP-GMAW birlikte incelenebilir.

4. PA ve PB'den farklı kaynak pozisyonlarında çalışma yapılabilir.
5. 4mm den daha ince malzemelerde çalışma yapılabilir.
6. Kaynak robotlarındaki durumları incelenebilir.



KAYNAKLAR

- Abdaly, H. M. M. (2017). *Comparative Study of Mechanical Properties of Plates of Different Sizes of Welded Aluminum Alloys by TIG and MIG Techniques*. (Master's thesis). Karabük University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Mechanical Engineering, Karabük.
- Al-Helli, A. S. M. (2013). *Microstructural Analysis of Pulse Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) in Ti-6Al-4V Alloy*. (Master's thesis). University of Gaziantep, Graduate School of Natural & Applied Sciences, Gaziantep.
- Anık, S. (1991). *Kaynak Tekniği El Kitabı*. İstanbul: Gedik Eğitim Vakfı.
- Anık, S. ve Vural, M. (t.y.). *Gazaltı Ark Kaynağı (TIG • MIG • MAG)*. İstanbul: Gedik Eğitim Vakfı.
- Arslan, E. (2019). *Sinerjik Kontrollü Darbeli MIG/MAG T-Bağlantı Kaynağında Tel Besleme Hızının Dikiş Geometrisi ve Kaynak Parametrelerine Etkisinin İncelenmesi*. (Yüksek Lisans tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya.
- ASM (1985). *ASM Metals Handbook Properties and Selection of Metals*, Volume 1, 8th Edition, pp: 917, Metals Park, Ohio
- Balasubramanian, V., Ravisankar, V. & Madhusudhan Reddy, G. (2008). Influences of Pulsed Current Welding and Post Weld Aging Treatment on Fatigue Crack Growth Behaviour of AA7075 Aluminium Alloy Joints. *International Journal of Fatigue*, 30(3), 405–416. doi:10.1016/j.ijfatigue.2007.04.012
- Başer, T. A. (2012). Alüminyum Alaşımları ve Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı. *Mühendis ve Makina*, 53(635), 51–58.
- Bloem, C., Salvador, M., Amigó, V. & Vergara, M. (2011). Aluminium 7020 Alloy and Its Welding Fatigue Behaviour. In T. Kvačak ve R. Bidulský (Ed.), *Aluminium Alloys, Theory and Applications* (pp. 115–134). Rijeka, Croatia: InTech.
- Bohnart, E. R. (2018). *Welding - Principles and Practices* (Fifth ed.). New York: McGraw-Hill Education.
- Bozkurt, B. (2017). Alüminyum Alaşımlarında Kullanılan Kaynak Yöntemleri. 8 Mart 2020 tarihinde <https://malzemebilimi.net/aluminyum-alasimlarinda-kullanilan-kaynak-yontemleri.html> adresinden erişildi.
- Çimenoglu, H. (t.y.). *Kaynak Metalurjisi*. Erişim adresi: <https://docplayer.biz.tr/24917903-Kaynak-metalurjisi-prof-dr-huseyin-cimenoglu-i-t-u-metalurji-ve-malzeme-muhendisligi-bolumu.html>

- Connor, L. P. (Ed.). (1987). *Welding Handbook - Vol.1 Welding Technology*. Miami, FL: American Welding Society.
- Da Silva, C. L. M. & Scotti, A. (2006). The influence of double pulse on porosity formation in aluminum GMAW. *Journal of Materials Processing Technology*, 171(3), 366–372. doi:10.1016/j.jmatprotec.2005.07.008
- Degemak. (2010). Gaz Altı MIG/MAG Kaynağı. Erişim: 08 Şubat 2020, https://www.degemak.com/index.php?option=com_content&view=article&id=53&Itemid=73
- Demir, B. (2019). Aa 5083-H111 Alüminyum Alaşımının Mig Kaynağında Farklı Akım Türlerinin Mekanik Ve Mikroyapıya Etkisi. (Yüksek Lisans tezi). Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kompozit Malzeme Teknolojileri Anabilim Dalı, Düzce.
- Djukanovic, G. (2019). Aluminium Alloys in the Automotive Industry: a Handy Guide. Retrieved March 6, 2020, from <https://aluminiuminsider.com/aluminium-alloys-automotive-industry-handy-guide/>
- Dwight, J. (1999). *Aluminium Design and Construction*. Aluminium Design and Construction. London: E & FN SPON.
- Eagar, T. W. (1993). Energy Sources Used for Fusion Welding. In D. L. Olson, T. A. Siewert, S. Liu ve G. R. Edwards (Ed.), *ASM Handbook, Volume 6: Welding, Brazing, and Soldering* (10th ed., pp. 15–22). Materials Park, OH: ASM International.
- Ertürk, İ. (t.y.). Gazaltı Kaynak Yöntemleri. Erişim: 04 Şubat 2020, <http://detayquality.com/teknik/20.pdf>
- Eryürek, İ. B. (2007). *Gazaltı Ark Kaynağı*. İstanbul: ASKAYNAK.
- Grill, J. (2019). *Welding Positions*. Retrieved February 12, 2020, from <https://weldguru.com/welding-positions/>
- Gündüz, B. B. (2017). 6082-T6 Alüminyum Alaşımının MIG Kaynağında Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. (Yüksek Lisans tezi). Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Niğde.
- Habashi, F. (2003). Extractive Metallurgy of Aluminum. In G. E. Totten ve D. S. MacKenzie (Ed.), *Handbook of Aluminum - Volume 2: Alloy Production and Materials Manufacturing* (pp. 1–47). New York: Marcel Dekker Inc.
- Hakem, M., Lebaili, S., Miroud, J., Bentaleb, A., Tokali, S. (2012). Welding And Characterization Of 5083 Aluminum Alloy. *Metal* 2012; 5: 23–25.
- Harinadh, V., Edison, G., Akella, S., Sanjeeva Reddy, L. & Buddu, R. K. (2017). Multipass Welding on Inconel Material with Pulsed Current Gas Tungsten Arc Welding. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 1452–1458. doi:10.1016/j.matpr.2017.01.167
- Hasanniah, A. & Movahedi, M. (2018). Welding of Al-Mg Aluminum Alloy to Aluminum Clad Steel Sheet Using Pulsed Gas Tungsten Arc Process. *Journal of Manufacturing Processes*, 31, 494–501. doi:10.1016/j.jmapro.2017.12.008

- Holliday, D. B. (1993). Gas-Metal Arc Welding. In D. L. Olson, T. A. Siewert, S. Liu ve G. R. Edwards (Ed.), *ASM Handbook, Volume 6: Welding, Brazing, and Soldering* (pp. 569–581). Materials Park, OH: ASM International.
- Jaypuria, S., Ranjan, T., Sahoo, S. & Jaypuria, O. (n.d.). Effect of arc length trim and adaptive pulsed-MIG process parameters on bead profile of stainless steel with synergic power source. *Materials Today: Proceedings*, in press. doi:10.1016/j.matpr.2020.01.027
- Kearns, W. H. (Ed.). (1978). *Welding Handbook, Seventh Edition, Volume 2, Welding Processes - Arc and Gas Welding and Cutting, Brazing, and Soldering* (Seventh ed.). Miami, FL: American Welding Society.
- Kemppi Welding, Kemppi WFX300. Erişim: 28 Kasım 2020 <https://resources.userdoc.kemppi.com/manuals/fastmig-wfx-om-en.pdf>
- Kırlı, S. (2011). *Alüminyum Malzemelerin MIG Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Dikiş Geometrisine ve Mekanik Özelliklere Etkisi*. (Yüksek Lisans tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Sakarya.
- Korg, H. (2007). *Ostenitik Paslanmaz Çeliklerin Robot Kaynağı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi* (Yüksek Lisans tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Sakarya.
- Kou, S. (2003). *Welding Metallurgy* (Second ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Kumar, B. A. & Raveendra, A. (2016). Effect of Pulsed and Non-pulsed current on welding characteristics of AA6061 Aluminium alloy welded joints using Tig welding. *International Journal of Engineering Research & Science (IJOER)*, 2(7), 93–102.
- Lathabai, S. (2011). Joining of Aluminium and Its Alloys. In R. Lumley (Ed.), *Fundamentals of Aluminium Metallurgy: Production, Processing and Applications* (pp. 607–650). Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
- Lean, P. P., Gil, L. & Ureña, A. (2003). Dissimilar welds between unreinforced AA6082 and AA6092/SiC/25p composite by pulsed-MIG arc welding using unreinforced filler alloys (Al-5Mg and Al-5Si). *Journal of Materials Processing Technology*, 143–144(1), 846–850. doi:10.1016/S0924-0136(03)00331-5
- Lincoln Electric, SuperGlaze® MIG 5556A. Erişim: 5 Haziran 2020 https://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/ConsumableEU_MIGWires-SUPERGLAZE-SuperGlazeMIG5556A/SUPERGLAZEMIG5556A-ENG.pdf
- Lincoln Electric. (2016). *Aluminum GMAW - Gas Metal Arc Welding for Aluminum Guide*. Cleveland, OH.
- Lincoln Electric. (1997). *MIG/MAG Welding Guide For Gas Metal Arc Welding (GMAW)*. The Lincoln Electric Company. Retrieved from <https://www.scribd.com/doc/3096258/welding-MIG-MAG-Welding-Guide-Lincoln-Electric-eBook-48-pages>
- Lincoln Global. (2016). *Classroom Student Reference Material: GMAW Modes of Metal*. Retrieved from <https://education.lincolnelectric.com/wp-content/uploads/2017/07/ULINC-Curriculum-Sample-Lesson-Plan.pdf>

- Liu, A., Tang, X. & Lu, F. (2013a). Study on welding process and prosperities of AA5754 Al-alloy welded by double pulsed gas metal arc welding. *Materials and Design*, 50, 149–155. doi:10.1016/j.matdes.2013.02.087
- Liu, A., Tang, X. & Lu, F. (2013b). Arc Profile Characteristics of Al Alloy in Double-Pulsed GMAW. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 65(1–4), 1–7. doi:10.1007/s00170-012-4141-0
- Lumley, R. N. (2011). Introduction to Aluminium Metallurgy. In Roger Lumley (Ed.), *Fundamentals of Aluminium Metallurgy: Production, Processing and Applications* (pp. 1–18). Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
- Mathers, G. (2002). *The Welding of Aluminium and Its Alloys*. Cambridge: Woodhead Publishing Ltd.
- Mathivanan, A., Senthilkumar, A. & Devakumaran, K. (2015). Pulsed current and dual pulse gas metal arc welding of grade AISI: 310S austenitic stainless steel. *Defence Technology*, 11(3), 269–274. doi:10.1016/j.dt.2015.05.006
- Mendes, C. L., & Scotti, A. (2006). The influence of double pulse on porosity formation in aluminum GMAW. *Journal Of Materials Processing Technology*, 366–372.
- Mercan, E. (2018). *5XXX-6XXX Alüminyum Alaşımlarının Otomatik MIG Kaynak Yöntemi ile Birleştirilebilirliğinin Araştırılması*. (Yüksek Lisans tezi). Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Karabük.
- Mercan, Emine, Ayan, Y. & Kahraman, N. (2020). Gazaltı Metal Ark Kaynak (GMAK) Yöntemiyle Birleştirilen AA5754 ve AA6013 Alüminyum Alaşımlarının Mikro Yapı ve Mekanik Özellikleri. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(1), 82–87. doi:10.5505/pajes.2019.38063
- Miller. (2007). *Guidelines For Gas Metal Arc Welding (GMAW)*. Appleton, WI: Miller Electric Mfg. Co. Retrieved from www.MillerWelds.com
- Muzafferoğlu, H. F. (2008). *Darbeli Akımla MIG/MAG Kaynağında Darbe Parametrelerinin Dikiş Geometrisine Etkisi*. (Yüksek Lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Nadzam, J. (Ed.). (2014). *Gas Metal Arc Welding System-Product and Procedure Selection*. Cleveland, OH: The Lincoln Electric Company. Retrieved from www.lincolnelectric.com
- Nie, F., Dong, H., Chen, S., Li, P., Wang, L., Zhao, Z., ... Zhang, H. (2018). Microstructure and Mechanical Properties of Pulse MIG Welded 6061/A356 Aluminum Alloy Dissimilar Butt Joints. *Journal of Materials Science and Technology*, 34(3), 551–560. doi:10.1016/j.jmst.2016.11.004
- oerlikon-welding.com. (n.d.). *TIG Welding*. Retrieved February 5, 2020, from <https://www.oerlikon-welding.com/processes/tig-welding-process>
- Oerlikon. (2020). *Scheme MIG MAG Transfer Modes*. Retrieved February 13, 2020, from <https://www.oerlikon-welding.com/scheme-mig-mag-transfer-modes>
- Oğuz, B. (1990). *Demir Dışı Metallerin Kaynağı*. Oerlikon. Erişim adresi: <http://temekmuhendislik.com.tr/belgeler/2ddd9c5517d6b0be874618f4e3a09cb4.pdf>

- Okay, S. (2016). *Investigation of Mechanical Property Changes After MIG Welding of (7xxx) Series Aluminum Alloys*. (Master's thesis). Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Metallurgical and Materials Engineering, Ankara.
- Open.edu. (2018). *Gas Shielded Arc Welding Processes (TIG/MIG/MAG)*. Retrieved February 5, 2020, from <https://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/engineering-technology/manupedia/gas-shielded-arc-welding-processes-tig/mig/mag>
- Özgürlük, Y. (t.y). Tahribatsız Malzeme Muayenesi Deneyi. Erişim: 24 Aralık 2020, <https://cdn.bartın.edu.tr/metalurji/d7ee7cd9-f063-4669-8e1c-393503ed6ffb/tahribatsizmalzememuayenesi2.pdf>
- Praveen, P. & Yarlagadda, P. K. D. V. (2005). Meeting Challenges in Welding of Aluminum Alloys Through Pulse Gas Metal Arc Welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 164–165, 1106–1112. doi:10.1016/j.jmatprotec.2005.02.224
- Primo, J. (2014). *Gas Metal Arc Welding – GMAW Best Practices*. PDH Center: Fairfax, VA.
- Rooy, E. L. (1990). Introduction to Aluminum and Aluminum Alloys. In *ASM Handbook, Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials* (pp. 17–38). Materials Park, OH: ASM International.
- Sen, M., Mukherjee, M., Singh, S. K. & Pal, T. K. (2018). Effect of Double-Pulsed Gas Metal Arc Welding (DP-GMAW) Process Variables on Microstructural Constituents and Hardness of Low Carbon Steel Weld Deposits. *Journal of Manufacturing Processes*, 31, 424–439. doi:10.1016/j.jmapro.2017.12.003
- Singh, R. (2012). *Applied Welding Engineering: Processes, Codes and Standards*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Şık, A. (2002). *Otomobil Saclarının MIG/MAG Kaynağında Gaz Karışımlarının Bağlantının Mekanik Özelliklerine Etkisi*. (Doktora tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstriyel Teknoloji Eğitimi, Ankara.
- Sparkerweld.com. (2018a). *Elektrik Ark Kaynağı Nedir*. Erişim: 04 Şubat 2020, <http://www.sparkerweld.com/tr/teknoloji-detay/elektrik-ark-kaynagi-nedir/10>
- Sparkerweld.com. (2018b). *Gazaltı Kaynağı Nedir*. Erişim: 05 Şubat 2020, <http://www.sparkerweld.com/tr/teknoloji-detay/gazalti-kaynagi-nedir/11>
- Street, J. A. (1990). *Pulsed Arc Welding*. Cambridge: ABINGTON PUBLISHING.
- Subrammanian, A., Senthil, P. V., Jabaraj, D. B. & Devakumar, D. (2019). Improving Mechanical Performance of Resistance Spot Welded Joints of AISI 409M Steel by Double Pulse Current. *Materials Today: Proceedings*, 16, 949–955. doi:10.1016/j.matpr.2019.05.181
- Sukiman, N. L., Zhou, X., Biribilis, N., Hughes, A. E., Mol, J. M. C., Garcia, S. J., ... Thompson, G. E. (2012). Durability and Corrosion of Aluminium and Its Alloys: Overview, Property Space, Techniques and Developments. In Z. Ahmad (Ed.), *Aluminium Alloys - New Trends in Fabrication and Applications* (pp. 47–97). Rijeka, Croatia: InTech.

- Sverdlin, A. (2003). Properties of Pure Aluminum. In G. E. Totten ve D. S. MacKenzie (Ed.), *Handbook of Aluminum - Volume 1: Physical Metallurgy and Processes* (pp. 33–80). New York: Marcel Dekker Inc.
- Szłapa, P. & Marczak, W. (2020). Arc Welding Noise Assessment from the Measured Ultrasound Pressure Levels. Part II: Pulsed and Double Pulsed Metal Active Gas Welding. *Ultrasonics*, 100(August 2019), 105976.
- Taban, E. (2004). *5XXX Serisi Alüminyum Alaşımlarının TIG, MIG ve Sürtünen Eleman ile Birleştirme Kaynaklı Bağlantılarının Mekanik ve Mikroyapısal Özelliklerinin İncelenmesi*. (Yüksek Lisans tezi). Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Kocaeli.
- The Aluminum Association. (n.d.). *Aluminum Alloys 101*. Retrieved March 4, 2020, from <https://www.aluminum.org/resources/industry-standards/aluminum-alloys-101>
- Tülbentçi, K. (1990). *MIG-MAG Eriyen Elektrod ile Gazaltı Kaynağı*. İstanbul: Gedik Eğitim Vakfı.
- TWI. (n.d.). *What is the Heat Affected Zone (HAZ)?* Retrieved March 7, 2020, from <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-the-heat-affected-zone>
- Uzun, M. (2014). *MIG Kaynağı ile Birleştirilen A 5000 Serisi Malzemenin Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerinin İncelenmesi*. (Yüksek Lisans tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Ankara.
- Wang, L. L., Wei, H. L., Xue, J. X. & DebRoy, T. (2017). A Pathway to Microstructural Refinement Through Double Pulsed Gas Metal Arc Welding. *Scripta Materialia*, 134, 61–65. doi:10.1016/j.scriptamat.2017.02.034
- Wang, L. L., Wei, H. L., Xue, J. X. & DebRoy, T. (2018). Special Features of Double Pulsed Gas Metal Arc Welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 251(July 2017), 369–375. doi:10.1016/j.jmatprotec.2017.08.039
- Wang, L. & Xue, J. (2017). Perspective on Double Pulsed Gas Metal Arc Welding. *Applied Sciences (Switzerland)*, 7(9). doi:10.3390/app7090894
- Weman, K. (2012). *Welding Processes Handbook* (Second ed.). Cambridge: Woodhead Publishing.
- Wu, K., Ding, N., Yin, T., Zeng, M. & Liang, Z. (2018). Effects of Single and Double Pulses on Microstructure and Mechanical Properties of Weld Joints During High-Power Double-Wire GMAW. *Journal of Manufacturing Processes*, 35(September), 728–734. doi:10.1016/j.jmapro.2018.08.025
- wwsgroup. (n.d.). *An Introduction to MIG Welding*. Retrieved February 20, 2020 from https://www.weldability-sif.com/media/docs/Intro_MIG_Welding.pdf
- Yi, J., Cao, S. F., Li, L. X., Guo, P. C. & Liu, K. Y. (2015). Effect of welding current on morphology and microstructure of Al alloy T-joint in double-pulsed MIG welding. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 25(10), 3204–3211. doi:10.1016/S1003-6326(15)63953-X

- Yıldırım, H. (2006). *Alüminyum Malzemenin Otomotiv Sektöründeki Uygulamaları*. (Yüksek Lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Zhao, Y., Lee, P. S. & Chung, H. (2019). Effect of Pulsing Parameters on Drop Transfer Dynamics and Heat Transfer Behavior in Pulsed Gas Metal Arc Welding. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 129, 1110–1122. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.10.037



ÖZGEÇMİŞ

Mustafa Çağatay YILDIRIM, [REDACTED] doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini İstanbul'da tamamladı. 2010 yılında Maltepe Kadir Has Anadolu Lisesinden mezun oldu. 2010 yılında başladığı Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü'nü 2016 yılında bitirdi. Ardından 2017 yılında Sakarya Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine başladı. 2016 yılında Tırsan Treyler A.Ş.firmasında Lowbed ve Özel Araçlar Üretim Mühendisi olarak göreve başladı. Halen Tırsan Treyler A.Ş.'de Üretim Mühendisi olarak görev yapmaktadır.