

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ TIG KAYNAK YÖNTEMİ
İLE BİRLEŞTİRİLMESİNDE ALAŞIM ELEMENTLERİNİN VE
KAYNAK PARAMETRELERİNİN ETKİSİ**

ELİF AYBİRDİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: PROF. DR. METİN USTA

HAZİRAN 2024

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ TIG KAYNAK YÖNTEMİ
İLE BİRLEŞTİRİLMESİNDE ALAŞIM ELEMENTLERİNİN VE
KAYNAK PARAMETRELERİNİN ETKİSİ

ELİF AYBİRDİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: PROF. DR. METİN USTA

HAZİRAN 2024

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL

**THE EFFECT OF ALLOY ELEMENTS AND
WELDING PARAMETERS ON THE WELDING OF
ALUMINUM ALLOYS BY TIG WELDING METHOD**

ELİF AYBİRDİ

**A THESIS OF MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MATERIALS SCIENCE AND
ENGINEERING**

ADVISOR: PROF. DR. METİN USTA

JUNE 2024

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 12/02/2024 tarih ve 2024/13 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 04/06/2024 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Elif AYBİRDİ'nin tez çalışması Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Metin USTA

ÜYE

: Doç. Dr. Salih DURDU

ÜYE

: Dr. Öğr. Üyesi Salim Levent AKTUĞ

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Alüminyum alaşımlarının birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılan TIG kaynak yöntemindeki kaynak proses parametrelerinin ve alaşım elementlerinin kaynağa etkisinin deneysel olarak incelenmiştir. Alüminyum esaslı 4 farklı seriye ait alaşım (2024, 5754, 6060 ve 7075) kullanılmıştır. Her seriden belirli sayıda numune kaynak proses parametreleri değiştirilerek TIG kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Kaynak işlemi tamamlandıktan sonra numuneler tahribatsız muayene yöntemlerinden Sıvı Radyografik Muayene ve Sıvı Penetrant ile Muayene kullanılarak yüzeysel ve hacimsel olarak kontrol edilmiştir. Tahribatsız Muayene yöntemleri ile kusur tespit edilmeyen numunelerin mekanik özelliklerinin tespiti için çekme testi ve mikro sertlik uygulanmıştır. AA 2024 alaşımı için mekanik özellikler açısından en iyi 85 amper ile kaynak yapılan numune, AA 5754 alaşımı için mekanik özellikler açısından en iyi 75 amper ile kaynak yapılan numune, AA 6060 alaşımı için mekanik özellikler açısından en iyi 85 amper ile kaynak yapılan numune ve AA 7075 alaşımı için mekanik özellikler açısından en iyi 75 amper ile kaynak yapılan numune olduğu gözlemlenmiştir. Optik Mikroskop ve Taramalı Elektron Mikroskobu kullanılarak mikro yapı analizi yapılmıştır. Bu çalışmada, tahribatlı ve tahribatsız muayene yöntemleri kullanılarak kaynak proses parametrelerinin ve alaşım elementlerinin kaynağa etkisi gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum, TIG Kaynağı, Tahribatsız Muayene, Çekme Testi, Mikro Sertlik Ölçümü, Mikroyapı Analizi

ABSTRACT

In this study, the effects of welding process parameters and alloying elements in the TIG welding method, which is widely used in joining aluminum alloys, were examined experimentally. Alloys belonging to 4 different Aluminum-based series (alloys 2024, 5754, 6060 and 7075) were used. A certain number of samples from each series were combined with the TIG welding method by changing the welding process parameters. After the welding process was completed, the samples were checked superficially and volumetrically using Liquid Radiographic Inspection and Liquid Penetrant Inspection, which are non-destructive inspection methods. Tensile test and micro hardness were applied to determine the mechanical properties of the samples where no defects were detected by Non-Destructive Testing methods. According to the tensile test and micro hardness test results, in terms of mechanical properties, welded with 85 amperes for AA2024 alloy, 75 amperes for AA5754 alloy, 85 amperes for AA 6060 alloy and 75 amperes for AA 7075 alloy, observed as the best samples. Microstructure analysis was performed using Optical Microscope and Scanning Electron Microscope. In this study, the effects of welding process parameters and alloying elements on the weld were observed using destructive and non-destructive testing methods.

Key Words: Aluminum, TIG Welding, Non-Destructive Testing Methods, Tensile Test, Microhardness Test, Microstructure Analysis

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım süresince beni yönlendiren, çalışmalarımın her aşamasında yakından ilgilenen değerli danışmanım Prof. Dr. Metin Usta'ya, laboratuvar çalışmalarımda yardımlarından dolayı Sayın Öğretim Görevlisi Ömer Faruk Deniz'e ve hayatımın her kademesinde maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI	3
2.1. Alüminyum	3
2.2. Alüminyum Alaşımları	4
2.2.1. 2XXX Serisi	5
2.2.2. 3XXX Serisi	5
2.2.3. 4XXX Serisi	6
2.2.4. 5XXX Serisi	6
2.2.5. 6XXX Serisi	6
2.2.6. 7XXX Serisi	7
2.2.7. 8XXX Serisi	7
2.3. Alüminyum Alaşımlarının Temper Göstergeleri	7
2.4. Alüminyum ve Alaşımlarının Kaynak Kabiliyetine Etki Eden Faktörler	9
2.5. Deneylerde Kullanılan Alüminyum Alaşımları	11
3. TIG KAYNAĞI	13
3.1. Tarihçesi	13
3.2. Koruyucu Gazlar	14
3.3. Elektrodlar	14
3.4. Akım	14
3.5. Isı Girdisi	15
3.6. Kaynak Ağzının Hazırlanması	15
3.7. TIG Kaynağının Üstünlükleri ve Kullanım Alanları	18
4. TAHRİBATSIZ MUAYENE YÖNTEMLERİ	19
4.1. Gözle Muayene	19
4.2. Girici Sıvı ile Muayene (Sıvı Penetrant Testi)	20
4.3. Manyetik Parçacık ile Muayene	21
4.4. Girdap Akımları ile Muayene (Eddy Current Testi)	22
4.5. Radyografik Muayene	23
4.6. Ultrasonik Muayene	24
5. TEZİN LİTERATÜRE KATKISI	25
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	26
6.1. Deney Materyalleri	26
6.2. Deney Materyallerinin Doğrulanması	26
6.2.1. Sertlik Testi	26
6.2.2. Elementel analiz	27
6.3. Kaynak İşlemi	27
6.4. Tahribatsız Muayene	28
6.5. Çekme Testi	29

6.6. Mikroyapı Analizi	29
6.7. Mikro Sertlik Testi (HV)	30
6.8. Taramalı Elektron Mikroskobu ve Enerji Dağılımlı X-ışını Spektrometre	30
7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	31
7.1. Deney öncesi yapılan testlerin sonuçları	31
7.1.1. Sertlik Testi	31
7.1.2. Elementel analiz	31
7.2. Deney sonrası yapılan testlerin sonuçları	32
7.2.1. Radyografik Muayene	32
7.2.2. Sıvı Penetrant ile Muayene	39
7.2.3. Çekme Testi	41
7.2.4. Mikro Sertlik Testi (HV)	52
7.2.5. Optik Mikroskop Görüntüleri	56
7.2.6. Taramalı Elektron Mikroskobu (Sem) Görüntüleri	66
8. SONUÇ	90
KAYNAKLAR	92
ÖZGEÇMİŞ	96
TEZ ÇALIŞMASI KAPSAMINDA YAPILAN YAYINLAR	97

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Amper
Al	: Alüminyum
Cu	: Bakır
Mg	: Magnezyum
Si	: Silisyum
Zn	: Çinko
TIG	: Tungsten Inert Gas
OM	: Optik Mikroskop
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
EDS	: Enerji Dağılımlı X-ışını Spektrometre
MPa	: Mega Pascal
PT	: Sıvı Penetrant Testi
RT	: Radyografik Muayene
TM	: Tahribatsız Muayene
HV	: Vickers Sertliği
HB	: Brinell Sertliği

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1: Bazı mühendislik malzemelerinin dayanım/yoğunluk oranı.	4
Şekil 2.2: Alaşım elementi ve alaşım ailesi ilişkisi.	5
Şekil 2.3: Alüminyum ve çeliğin TIG kaynağında ısının yayılışı (izotermeler).	10
Şekil 3.1: TIG kaynağının şematik gösterimi.	13
Şekil 4.1: Gözle muayene.	20
Şekil 4.2: Sıvı penetrant testi.	20
Şekil 4.3: Manyetik parçacık testi.	21
Şekil 4.4: Girdap akımları ile muayene.	22
Şekil 4.5: X-ışını ve gama ışını dalga boyu ve frekansı.	23
Şekil 4.6: Radyografik muayene.	24
Şekil 4.7: Ultrasonik muayene yöntemi şematik gösterimi.	24
Şekil 6.1: AA 5754 80 A görseli.	28
Şekil 6.2: AA 2024 85A sertlik izi görüntüleri.	30
Şekil 7.1: AA2024 radyografi dolgu AA2024, a) 75 A, b) 80 A, c) 85 A.	32
Şekil 7.2: AA2024 radyografi dolgu Al 5123, a) 75 A, b) 80 A, c) 85 A.	33
Şekil 7.3: AA2024 radyografi dolgu Al4043, a) 75 A, b) 80 A, c) 85 A.	34
Şekil 7.4: AA5754 Radyografi dolgu AA5754, a) 75 A, b) 80 A, c) 85 A.	34
Şekil 7.5: AA5754 radyografi dolgu Al5123, a) 75 A, b) 80 A, c) 85 A.	35
Şekil 7.6: AA6060 radyografi dolgu AA6060, a) 75 A, b) 80 A, c) 85 A.	36
Şekil 7.7: AA6060 radyografi dolgu Al5123, a) 75 A, b) 80 A, c) 85 A.	36
Şekil 7.8: AA7075 radyografi dolgu AA7075, a) 75 A, b) 80 A, c) 85 A.	37
Şekil 7.9: AA7075 radyografi dolgu Al5123, a) 75 A, b) 80 A, c) 85 A.	38
Şekil 7.10: AA2024 sıvı penetrant ile muayene, a) 75 A, b) 80 A, c) 85 A.	39
Şekil 7.11: AA5754 sıvı penetrant ile muayene, a) 75 A, b) 80 A, c) 85 A.	39
Şekil 7.12: AA 6060 sıvı penetrant ile muayene, a) 75 A, b) 80 A, c) 85 A.	40
Şekil 7.13: AA 7075 sıvı penetrant ile muayene, a) 75 A, b) 80 A, c) 85 A.	40
Şekil 7.14: AA2024 75A çekme testi eğrisi.	41
Şekil 7.15: AA2024 80A çekme testi eğrisi.	41
Şekil 7.16: AA2024 85A çekme testi eğrisi.	42
Şekil 7.17: AA2024 numunelerin kopma bölgeleri, a) 75 A, b) 80 A, c) 85 A.	42
Şekil 7.18: AA 5754 75A çekme testi eğrisi.	44
Şekil 7.19: AA5754 80A çekme testi eğrisi.	44
Şekil 7.20: AA5754 85A çekme testi eğrisi.	45
Şekil 7.21: AA5754 numunelerin kopma bölgeleri, a) 75 A, b) 80 A, c) 85 A.	45
Şekil 7.22: AA 6060 75A çekme testi eğrisi.	47
Şekil 7.23: AA 6060 80A çekme testi eğrisi.	47
Şekil 7.24: AA 6060 85 A çekme testi eğrisi.	48
Şekil 7.25: AA6060 numunelerin kopma bölgeleri, a) 75 A, b) 80 A, c) 85 A.	48
Şekil 7.26: AA 7075 75A çekme testi eğrisi.	50
Şekil 7.27: AA 7075 80A çekme testi eğrisi.	50
Şekil 7.28: AA 7075 85A çekme testi eğrisi.	51
Şekil 7.29: AA7075 numunelerin kopma bölgeleri, a) 75 A, b) 80 A, c) 85 A.	51
Şekil 7.30: AA2024 mikro sertlik testi.	53
Şekil 7.31: AA5754 mikro sertlik testi.	54
Şekil 7.32: AA6060 mikro sertlik testi.	55
Şekil 7.33: AA7075 mikro sertlik testi.	56

- Şekil 7.34:** AA2024 75 A OM görüntüleri a) kaynak bölgesi, b) kaynak-ITAB birleşim bölgesi, c) ITAB bölgesi. 57
- Şekil 7.35:** AA2024 80A OM görüntüleri a) kaynak bölgesi, b) kaynak-ITAB birleşim bölgesi, c) ITAB bölgesi. 57
- Şekil 7.36:** AA2024 85A OM görüntüleri a) kaynak bölgesi, b) kaynak-ITAB birleşim bölgesi, c) ITAB bölgesi. 58
- Şekil 7.37:** AA5754 75A OM görüntüleri a) kaynak bölgesi, b) kaynak-ITAB birleşim bölgesi, c) ITAB bölgesi. 59
- Şekil 7.38:** AA5754 80A OM görüntüleri a) kaynak bölgesi, b) kaynak-ITAB birleşim bölgesi, c) ITAB bölgesi. 60
- Şekil 7.39:** AA5754 85A OM görüntüleri a) kaynak bölgesi, b) kaynak-ITAB birleşim bölgesi, c) ITAB bölgesi. 60
- Şekil 7.40:** AA6060 75A OM görüntüleri a) kaynak bölgesi, b) kaynak-ITAB birleşim bölgesi, c) ITAB bölgesi. 62
- Şekil 7.41:** AA6060 80A OM görüntüleri a) kaynak bölgesi, b) kaynak-ITAB birleşim bölgesi, c) ITAB bölgesi. 62
- Şekil 7.42:** AA6060 85A OM görüntüleri a) kaynak bölgesi, b) kaynak-ITAB birleşim bölgesi, c) ITAB bölgesi. 63
- Şekil 7.43:** AA7075 75A OM görüntüleri a) kaynak bölgesi, b) kaynak-ITAB birleşim bölgesi, c) ITAB bölgesi. 64
- Şekil 7.44:** AA7075 80A OM görüntüleri a) kaynak bölgesi, b) kaynak-ITAB birleşim bölgesi, c) ITAB bölgesi. 65
- Şekil 7.45:** AA7075 85A OM görüntüleri a) kaynak bölgesi, b) kaynak-ITAB birleşim bölgesi, c) ITAB bölgesi. 65
- Şekil 7.46:** AA 2024 SEM görüntüleri a) 1000X, b) 10000X. 66
- Şekil 7.47:** AA 2024 75A SEM görüntüleri a) kaynak bölgesi 1000X, b) kaynak bölgesi 10000X, c) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 1000X, d) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 10000X, e) ITAB bölgesi 1000X, f) ITAB bölgesi 10000X. 67
- Şekil 7.48:** AA 2024 80A SEM görüntüleri a) kaynak bölgesi 1000X, b) kaynak bölgesi 10000X, c) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 1000X, d) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 10000X, e) ITAB bölgesi 1000X, f) ITAB bölgesi 10000X. 68
- Şekil 7.49:** AA 2024 85A SEM görüntüleri a) kaynak bölgesi 1000X, b) kaynak bölgesi 10000X, c) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 1000X, d) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 10000X, e) ITAB bölgesi 1000X, f) ITAB bölgesi 10000X. 69
- Şekil 7.50:** AA 2024 85 A SEM-EDS analizi görüntüleri. 70
- Şekil 7.51:** AA 5754 SEM görüntüleri a) 1000X, b) 10000X. 72
- Şekil 7.52:** AA 5754 75A SEM görüntüleri a) kaynak bölgesi 1000X, b) kaynak bölgesi 10000X, c) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 1000X, d) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 10000X, e) ITAB bölgesi 1000X, f) ITAB bölgesi 10000X. 73
- Şekil 7.53:** AA 5754 80A SEM görüntüleri a) kaynak bölgesi 1000X, b) kaynak bölgesi 10000X, c) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 1000X, d) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 10000X, e) ITAB bölgesi 1000X, f) ITAB bölgesi 10000X. 74
- Şekil 7.54:** AA 5754 85A SEM görüntüleri a) kaynak bölgesi 1000X, b) kaynak bölgesi 10000X, c) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 1000X, d) kaynak-ITAB

birleşim bölgesi 10000X, e) ITAB bölgesi 1000X, f) ITAB bölgesi 10000X.	75
Şekil 7.55: AA 5754 75A SEM-EDS analizi görüntüleri.	76
Şekil 7.56: AA 6060 SEM Görüntüsü a) 1000X, b) 10000	78
Şekil 7.57: AA 6060 75A SEM görüntüleri a) kaynak bölgesi 1000X, b) kaynak bölgesi 10000X, c) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 1000X, d) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 10000X, e) ITAB bölgesi 1000X, f) ITAB bölgesi 10000X.	79
Şekil 7.58: AA 6060 80A SEM görüntüleri a) kaynak bölgesi 1000X, b) kaynak bölgesi 10000X, c) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 1000X, d) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 10000X, e) ITAB bölgesi 1000X, f) ITAB bölgesi 10000X.	80
Şekil 7.59: AA 6060 85A SEM görüntüleri a) kaynak bölgesi 1000X, b) kaynak bölgesi 10000X, c) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 1000X, d) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 10000X, e) ITAB bölgesi 1000X, f) ITAB bölgesi 10000X.	81
Şekil 7.60: AA 6060 85A SEM-EDS analizi görüntüleri	82
Şekil 7.61: AA 7075 SEM görüntüsü a) 1000X, b) 10000X.	84
Şekil 7.62: AA 7075 75A SEM görüntüleri a) kaynak bölgesi 1000X, b) kaynak bölgesi 10000X, c) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 1000X, d) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 10000X, e) ITAB bölgesi 1000X, f) ITAB bölgesi 10000X.	85
Şekil 7.63: AA 7075 80A SEM görüntüleri a) kaynak bölgesi 1000X, b) kaynak bölgesi 10000X, c) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 1000X, d) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 10000X, e) ITAB bölgesi 1000X, f) ITAB bölgesi 10000X.	86
Şekil 7.64: AA 7075 85A SEM görüntüleri a) kaynak bölgesi 1000X, b) kaynak bölgesi 10000X, c) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 1000X, d) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 10000X, e) ITAB bölgesi 1000X, f) ITAB bölgesi 10000X.	87
Şekil 7.65: AA 7075 75A SEM-EDS analizi görüntüleri.	88

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 1.1: Çeşitli endüstri dallarında kullanılan başlıca alüminyum ve alaşımları.	1
Tablo 2.1: Hafif metal alaşımlarına uygulanan ısıt işlemlerin gösterilişi [29].	8
Tablo 2.2: Deneylerde kullanılan alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri.	11
Tablo 2.3: Dolgu tellerinin özellikleri.	12
Tablo 3.1 : TIG kaynağında kullanılan başlıca kaynak ağızları.	17
Tablo 6.1: Deney materyallerinin kalınlık ve dolgu malzemeleri.	26
Tablo 6.2: Deney materyallerinin TIG kaynak parametreleri.	27
Tablo 6.3: Dağlama çözeltilerinin kimyasal kompozisyonu [30].	29
Tablo 7.1: Sertlik değerleri.	31
Tablo 7.2: Deney numunelerinin elementel dağılımları.	31
Tablo 7.3: Radyografik muayene testi sonuçları.	38
Tablo 7.4: AA2024 çekme testi sonuçları.	43
Tablo 7.5: AA5754 çekme testi sonuçları.	46
Tablo 7.6: AA6060 çekme testi sonuçları.	49
Tablo 7.7: AA 7075 çekme testi sonuçları.	52
Tablo 7.8: AA 2024 85A EDS dağılımı.	71
Tablo 7.9: AA5754 75A EDS dağılımı.	77
Tablo 7.10: AA 6060 85A EDS dağılımı.	83
Tablo 7.11: AA 7075 75A EDS dağılımı.	89

1. GİRİŞ

Alüminyum ve alaşımları günümüzde yaşamımızın farklı alanlarına girmiş ve yaşamın ayrılmaz bir malzemesi haline gelmiştir. Hafif olması iyi ısı ve elektriksel iletkenliği ve korozyona karşı direnci sebebiyle; gıda endüstrisi, kimya endüstrisi, otomotive ve gemi endüstrisi, makine ve cihaz yapımı ile mimari ve inşaat yapımında geniş çapta bir kullanma alanına sahiptir. Endüstri dallarında kullanılan yaygın alüminyum ve alaşımları Tablo 1.1’de verilmiştir. Alüminyum ve alaşımlarını cıvata ve perçinleme yoluyla birleştirme dışında kullanılan başlıca birleştirme yöntemleri; kaynak, lehimleme ve yapıştırma. Bugün bu yöntemler çeşitli endüstri kollarında geniş çapta kullanılmakta, bazen de lehimleme, yapıştırma ve nokta kaynağı birlikte kombine edilmektedir. Bu alaşımların günümüzde birleştirilmesi %50 nispetinde kaynakla yapılmaktadır [1].

Tablo 1.1: Çeşitli endüstri dallarında kullanılan başlıca alüminyum ve alaşımları.

ENDÜSTRİDEKİ KULLANMA ALANLARI				
MALZEME	OTOMOTİV	MAKİNA YAPIMI	CİHAZ YAPIMI	İNŞAAT VE MİMARİ
Al 99,9...Al 99,5 (1XXX)			X	
Al Mn (3XXX)			X	X
Al Mg Mn (5XXX)	X	X	X	X
Al Mg 3 (5XXX-5754)	X		X	X
Al Mg 4,5 Mn (5XXX-5083)	X	X	X	
Al Mg Si 0,5 (6XXX-6060)	X	X		X
Al Mg Si (6XXX)	X	X		X
Al Zn Mg (7XXX)	X	X		X

Alüminyum ve alaşımlarının birleştirilmesinde TIG kaynak yönteminin yaygın olarak kullanılmasının sebepleri ekonomik olması, uygulamasının kolay olması, kaynak bölgesinin kaliteli elde edilmesidir. Tungsten inert gaz (TIG) kaynağı, koruyucu gaz ortamında, tüketilemeyen bir tungsten elektrotu ile ana metal malzeme arasında bir ark oluşturularak metallerin birleşmesini sağlayan bir tür ark kaynağıdır. TIG kaynak yöntemi; ısı girdisi yerel olduğu için ısı iletim katsayısı yüksek olan alüminyum ve alaşımlarının kaynağında oluşan çarpılmaları en aza indirdiğinden çok tercih edilen bir gaz altı kaynak yöntemidir. TIG kaynağında, doğru ya da alternatif akım olarak iki çeşit akım kullanılabilir. Fakat alüminyum alaşımlarının kaynağında alüminyumun yapısından dolayı alternatif akım kullanılması gerekmektedir [2].

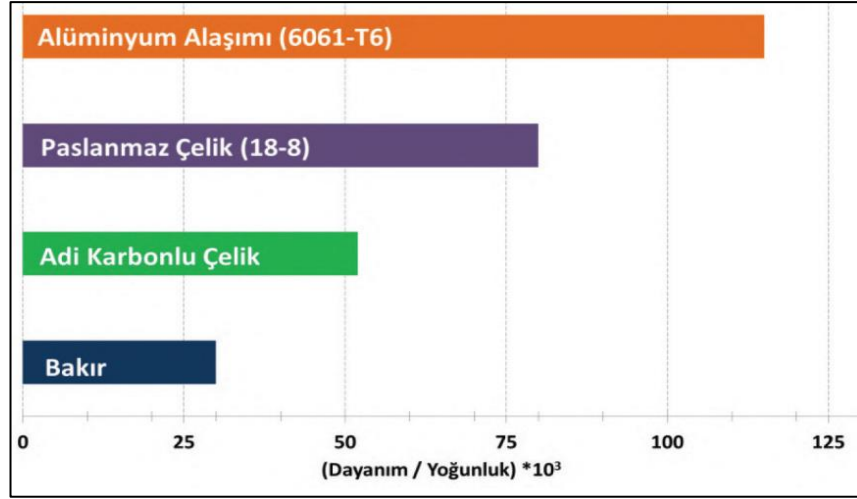
Günümüzde teknolojik öneme sahip endüstriyel uygulamalarda kullanılan materyallerin üretim ve/veya kullanım aşamasında yapılarında oluşabilen çatlak, korozyon, gözenek büyüklüğü vb. süreksizlik ve kusurlar büyük maddi kayıplara sebep olabilmektedir. Bu maddi kaybı önlemek için belirli aralıklarla tahribatsız test yöntemleri (non:destructive testing methods) ve/veya tahribatlı test yöntemleri (destructive testing methods) kullanılarak malzemedeki süreksizlik bölgeleri tespit edilmektedir. Mikroskobik inceleme için numune alma ve numuneyi bakalite(kalıba) yerleştirme yöntemi gibi deneyler tahribatlı test yöntemi deneyi arasında yer almaktadır. Tahribatlı Test Yöntemleri ile test edilecek materyale çekme, bükme gibi kuvvetler uygulanarak, zarar verilir ve sonradan kullanılamayacak hale getirebilir. Tahribatsız testlerde ise amaç parçanın fiziksel bütünlüğünü ve kullanımını bozmadan muayene edilerek kalite isterlerini sağlayıp sağlamadığını tespit etmektir. Tahribatsız test yöntemiyle gerçekleştirilen işlemlerde, test edilen materyal hiçbir şekilde deforme olmamaktadır [3].

2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI

2.1. Alüminyum

Alüminyum elementi Al sembolü ile gösterilir ve atom numarası 13'tür. Doğada boksit cevheri halinde yaygın olarak bulunur ve oksidasyona karşı yüksek direnci vardır. Bu direncin temel sebebi pasivasyon özelliğidir. Endüstrinin pek çok kolunda farklı ürünlerin yapımında kullanılmakta olup dünya ekonomisi içinde çok önemli bir yeri vardır. Alüminyum ve alaşımlarının hafif olması ve yüksek dayanıma sahip olması gibi üstün özellikleri sayesinde havacılık ve uzay sanayii, taşımacılık ve inşaat sanayiinde geniş kullanım alanı sahiptir. Alüminyum, yumuşak, sünek ve hafif bir metal olup mat gümüş rengindedir. Bu renk, hava ile teması esnasında üzerinde oluşan ince oksit tabakasından ileri gelir. Bu oksit tabakasının koruyucu özelliği sayesinde üstün korozyon özelliklerine sahiptir. Alüminyum, zehirleyici değildir ve non-manyetik özellik gösterir. Kıvılcım çıkarmaz [10]. Saf alüminyumun çekme dayanımı yaklaşık 49 MPa iken alaşım elementleri eklendiğinde çekme dayanımı 700 MPa'a kadar çıkar. Çeliğin veya bakırın yoğunluğu alüminyumun yoğunluğunun yaklaşık 3 katı kadardır. Kolaylıkla dövülebilir, makinede işlenebilir ve dökülebilir. Elektrik iletkenliği %64,94 IACS'dir (saf Al, 2 °C'de). Erime sıcaklığı 660 °C, kaynama sıcaklığı ise 2519 °C'dir [22].

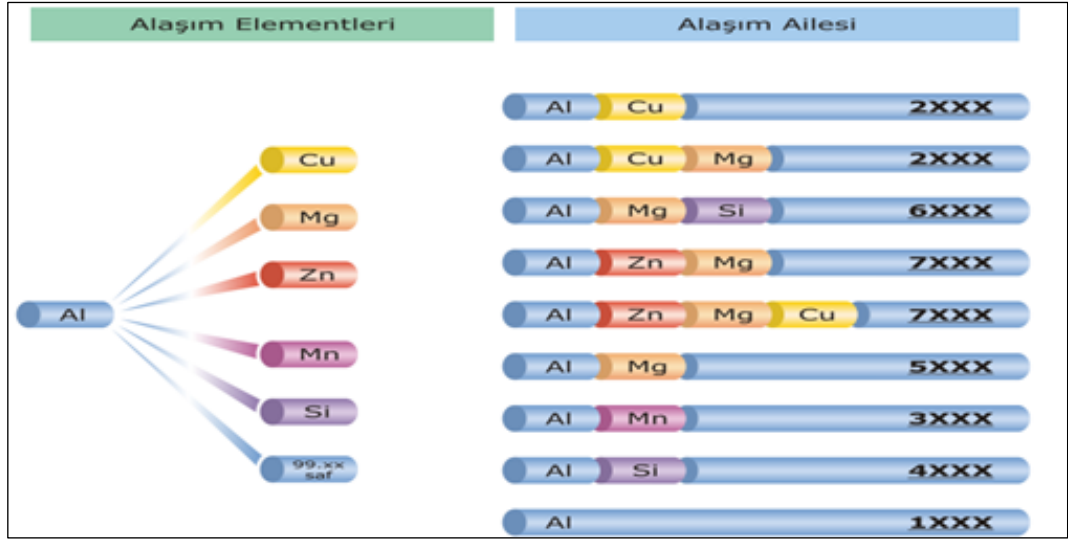
Alüminyum alaşımları üstün özellikleri nedeniyle günümüzde çelikten sonra en yaygın kullanılan metalik mühendislik malzemeleridir. Düşük yoğunluk (2,7 gr/cm³), yüksek korozyon dayanımı, yüksek elektriksel iletkenlik ve diğer mühendislik malzemelerine göre yüksek spesifik dayanım (Şekil 2.1) gibi özellikleri alüminyum alaşımlarına olan ilginin sebeplerindendir. Manyetik olmamasından dolayı manyetizmaya dayalı prensiplerle çalışan elektronik cihazların imalatında yaygın olarak kullanılan bir malzemedir. Ayrıca, alüminyum alaşımları yüksek ısı iletkenliği, yanıcı ve parlayıcı olmaması, tamamıyla geri dönüşebilir olması, kaynaklanabilir olması gibi özelliklerinden dolayı diğer mühendislik malzemelerine önemli üstünlükler de sağlamaktadır [11].



Şekil 2.1: Bazı mühendislik malzemelerinin dayanım/yoğunluk oranı.

2.2. Alüminyum Alaşımları

Ana metali alüminyum olan alaşımlara “Alüminyum Alaşımları” denir. Bunlara hafif alaşımlar da denir. Alüminyum alaşımlarının mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri alaşım elementlerine ve mikro yapısına bağlı olarak değişmektedir. Alüminyum alaşımları bakır, çinko, silisyum, magnezyum, manganez, demir, nikel, titan vb. elementler ilave edilerek elde edilir [12]. Alaşım elementi, alaşım ailesi ilişkisi Şekil 2.2 de gösterilmektedir. Temel özellikleri; hafif olmaları, ısı ve elektrik iletkenlikleri, ısı işlemlere elverişli olmaları, korozyon dayanımları ve bazı kimyasal etkilere karşı yüksek dayanıma sahip olmalarıdır. Alüminyum alaşımlarının, plastik deformasyon kabiliyetinin İyi olması kolayca şekillendirilebilmelerini sağlar. Alüminyum alaşımları döküm ile üretime uygundur. Ayrıca, dövme, çekme ve haddeleme gibi yöntemler ile de alüminyum alaşımları üretilebilmektedir [13]. Korozyon dayanımları ve zehirlenme tehlikesi yaratmadıklarından dolayı ilaç sanayinde ve gıda maddelerinde koruma maddesi olarak da kullanılabilmektedir [25].



şekil 2.2: Alaşım elementi ve alaşım ailesi ilişkisi.

2.2.1. 2XXX Serisi

Esas alaşım elementi bakırdır. %6,3'e kadar bakır içerir. Magnezyum ve diğeri alaşım elementleri de eser miktarda bulunabilir. Alüminyum; sertlik, dayanım, gibi mekanik özellikler kazandırırken dökülebilme özelliğini iyileştirir ve işlenebilmesinde kolaylıkları sağlar [15]. Bakır alüminyumla yaklaşık %33 oranında ötektik bileşim verir. Çökelme sertleştirmesi gösterir [13]. Diğeri alüminyum alaşımları gibi iyi bir korozyon dayanımına sahip değıllerdir. Kaynak kabiliyeti, alaşıma bağılı olarak kötü ile orta arasında değışmektedir. Bu serinin yaygın olarak kullanılma nedenlerinden önemli biri ise 150°C (300°F)'ye kadar olan sıcaklıklarda yüksek dayanım göstermeleridir [14]. Yüksek mukavemet istenen, uçak gövdesi ve mekanik elemanları, araç gövde panelleri gibi birçok ürünün imalatında yaygın bir şekilde kullanılır. 2024 alüminyum serisi, en yaygın alüminyum çeşidi olup, uçak tasarımında etkin bir şekilde kullanılmaktadır [12].

2.2.2. 3XXX Serisi

Esas alaşım elementi mangandır. Bu serinin temel özellikleri çok iyi şekil değıştirme, yüksek kaynak kabiliyeti ile çok iyi korozyon dayanımına sahip olmalarıdır [15]. Genellikle ısıl işlem göremez özelliktedir, fakat serinin yaklaşık %20'si 1XXX serisine göre daha güçlü alüminyum alaşımları içermektedir. Akma dayanımı yaklaşık 250 MPa değırine sahiptir [14]. İçecek kutuları, kimyasal kaplar, endüstriyel çatı, eğri borular imalatında kullanılır [13].

2.2.3. 4XXX Serisi

Esas alaşım elementi silisyumdur (Genel olarak Si oranı %12'ye kadar çıkar). Alüminyumun içinde çok az ergir (%1-1.5). Silisyum %12 oranında alüminyumla ötektik bileşim yapar [12]. Silisyum sayesinde erime derecesi düşer (565 °C), mekanik özellikleri ve sıcak dayanımı yükselir, viskozitesi düşer ve akıcılığı artar. Silisyum miktarı artması sertliği artırarak işlenmesini azaltır [14]. Termal genleşme katsayısı düşük, aşınma ve korozyon direnci yüksek alüminyum alaşımlarıdır. Bu alüminyum alaşımlarına silisyum kömür grisi rengini verdiği için mimari uygulamalarda ve anot oksit kaplamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [13]. Pistonlar gibi yüksek sıcaklığa dayanıklı parçaların imalatında, kaynaklı yapılarda, levha imalatında kullanılırlar, kaynak teli ve lehim alaşımı olarak da kullanım alanı bulurlar [15].

2.2.4. 5XXX Serisi

Esas alaşım elementi magnezyumdur. Magnezyum oranının artması sertlik ve mukavemeti artırır fakat sünekliği azaltır [14]. Magnezyum alüminyumla % 33 oranında ötektik bileşim verir [25]. Magnezyumun özgül ağırlığının düşük olması alaşımın özgül ağırlığını düşürür. Alaşımlarda Mg miktarı % 6'dan fazla bulunuyorsa çökeltme sertleşmesi oluşur [12-13]. Mükemmel kaynak kabiliyeti ve orta dayanıma sahiptir. Deniz suyu ve kimyasallara karşı yüksek korozyon dayanımına sahip oldukları için gemi sanayiinde birçok kullanım alanına sahiptir [15].

2.2.5. 6XXX Serisi

Esas alaşım elementi magnezyum ve silisyumdur. Mg ve Si birleşmesi, Mg_2Si ökeltmeli sertleşmesine sebep olur. 2XXX ve 7XXX alaşımları kadar dayanıklı olmamalarına rağmen, 6XXX serisi alaşımları iyi şekillendirilebilirlik, yüksek kaynak kabiliyeti, işlenebilirlik ve nispeten iyi bir korozyon direnci ile orta seviyede bir dayanımı bulunmaktadır [13-15]. Sac, levha, ekstrüzyon ürünü olarak bulunur. 5XXX serisi gibi uygulamalara da sahiptir [14].

2.2.6. 7XXX Serisi

Al-Zn alaşımlar. Çinko esas alaşım elementi olup, magnezyum, krom ve zirkonyum ilave alaşım elementleridir [13]. 7XXX serisi, alüminyum alaşımlarının en yüksek mukavemete sahip olanıdır, Uçak parçaları yapımı, savunma sanayi ve diğer yüksek dayanım istenen yerlerde kullanılır [15]. Şişirme kalıplarında, plastik profil makinelerinin kalibratörlerinde kullanılır. Ayrıca makine ve parça imalatında yaygın kullanıma sahiptir. Prototip parça üretiminde, kolay işlenebilirliği ve yüksek sertliği sebebi ile çelik yerine kullanılabilir [14-15].

2.2.7. 8XXX Serisi

Esas alaşım elementi lityum olup, kalayda eklenebilmektedir. Demir ve nikel elementleri, elektriksel iletkenlikten önemli bir kayıp vermeden dayanımı arttırmaktadır [14]. 8017 gibi iyi iletken olan alaşımlarda kullanılmaktadır. Özellikle havacılık ve uzay yapılarında kullanılmaya başlanan bu malzeme, iyi yorulma dayanımı ve yüksek tokluk özelliklerine sahiptir [13]. Fakat diğer Al alaşımları ile karşılaştırıldığında üretim maliyetleri yüksek olması sebebiyle sadece özel uygulamalarda kullanılmaktadır [15].

2.3. Alüminyum Alaşımlarının Temper Göstergeleri

Alüminyum alaşımlarına uygulanan ısıt işlemlerin gösterimleri aşağıdaki tabloda gösterilmektedir.

Tablo 2.1: Hafif metal alaşımlarına uygulanan ısıt işlemlerin gösterilişı [29].

GÖSTERİM	AÇIKLAMA
M	İmal edildiğı şekilde
F	İşlendiğı şekilde
O	Yumuşak Tavlanmış
H	Soğuk biçimlendirme ile sertleşmiş H harfinden sonra daima, temel işlem tipini belirten bir rakam ve soğuk biçimlendirmenin son durumunu gösteren ikinci bir harf kullanılır.
H1X	Sertleştirilmiş İşlemi
H2X	Sertleştirilmiş ve Kısmen Tavlanmış
H3X	Düşük Sıcaklık İşlemi ile Sertleştirildi ve Sabitleştirildi
H4X	Sertleştirilmiş ve Fırınlanmış
HX6	Üç Çeyrek Sertleştirme
HX8	Tamamen Sertleştirme
T	M, F, O ve H 'dan başka ısıt işlem görmüş, T harfinden sonra daima, işlemlerin belirli sırasını gösteren ikinci bir harf kullanılır.
TA	Yüksek sıcaklıkta biçimlendirmeden sonra, soğutulmuş ve doğal yaşlandırılmış
TB (T4)	Katı çözülme (Doyurma) ısıt işlemi uygulanmış ve doğal yaşlandırılmış
TC (T2)	Yüksek sıcaklıkta biçimlendirmeden sonra, soğutulmuş, soğuk biçimlendirilmiş, doğal yaşlandırılmış
TD (T3)	Katı çözülme ısıt işlemi uygulanmış, soğuk biçimlendirilmiş ve doğal yaşlandırılmış
TE (T5)	Yüksek sıcaklıkta biçimlendirmeden sonra, soğutulmuş ve katı çözülme işlemi uygulanmış
TF (T6)	Katı çözülme ısıt işlemi ve katı çözülme işlemi uygulanmış
TG (T10)	Yüksek sıcaklıkta biçimlendirmeden sonra, soğutulmuş, soğuk biçimlendirilmiş ve katı çözülme işlemi görmüş
TH (T8)	Katı çözülme işlemi uygulanmış, soğuk işlenmiş ve katı çözülme işlemi uygulanmış
TL (T9)	Katı çözülme ve katı çözülme işlemi uygulanmış, soğuk işlenmiş
TM (T7)	Çözülme işlemi uygulanmış ve stabilize edilmiş (dengeleştirilmiş)

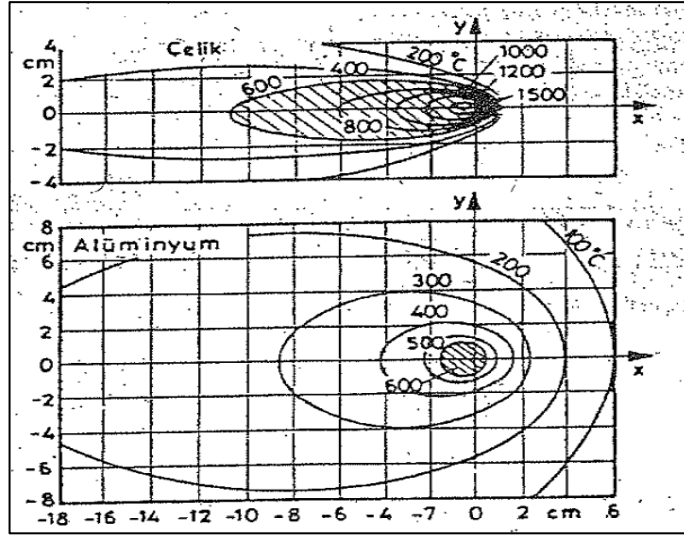
2.4. Alüminyum ve Alaşımlarının Kaynak Kabiliyetine Etki Eden Faktörler

Alüminyum ve alaşımlarının kaynak ile birleştirilmesi, normal çeliğin kaynağına göre farklılıklar gösterir. Çeliğin kaynağına göre daha zor ve sorunludur. Alüminyum ve alaşımlarının kaynağında iyi sonuçlar elde etmek için malzemenin fiziksel ve metalurjik özelliklerini tanımak ve ona göre önlemler almak gerekir.

Alüminyum ve alaşımlarının kaynak kabiliyetine etki eden faktörler sırasıyla;

a. Saf alüminyum 658°C gibi düşük bir sıcaklıkta ergimesine rağmen, yüzeyindeki oksit tabakası (Al_2O_3) 2050°C gibi yüksek bir sıcaklıkta ergir. Alüminyumun oksijene karşı ilgisi fazla olduğundan, yüzeyinde hemen 0,01 mikron kalınlığında Al_2O_3 oluşur ve bu oksit tabakası aynı zamanda yüzeye kimyasal bileşiklere karşı bir dayanıklılık kazandırır. Fakat bu oksit tabakasının mevcudiyeti alüminyum ve alaşımlarının kaynağını zorlaştırır. Kaynak yapılırken yüzeyde bulunan Al_2O_3 tabakasının ergitilmesine çalışırken (2050°C), bundan çok daha düşük sıcaklıkta ergiyen alüminyum dökülür ve kaynak çubuğundan düşen damlalar kaynak yapılacak esas metal ile birleşemez. Onun için kaynaktan önce bu tabakanın oluşmaması için önlemler almak gerekir.

b. Alüminyum ve alaşımları yüksek ısı iletim katsayısına sahip olması sebebiyle kaynak yerinde ısı yoğunluğunu sağlamak için daha fazla ısı girdisine ihtiyaç duyulmaktadır. Diğer taraftan alüminyum ve alaşımlarında, çeliğe nazaran daha geniş bir bölge ısının tesiri altında kalır. Şekil 2.3 de alüminyum ile çeliğin kaynağındaki izotermiler mukayeseli olarak verilmiştir. Ayrıca saf alüminyumunda yüksek ısı iletimi dolayısıyla ergimiş kaynak banyosu soğuyup çabuk katılaştığında dikişte gözenekler oluşur.



Şekil 2.3: Alüminyum ve çeliğin TIG kaynağında ısı yayılımı (izoterm)ler).

Yüksek elektrik iletkenliği nedeniyle elektrik direnç kaynağında sorunlar ortaya çıkmaktadır. ($Q=R \cdot I^2 \cdot t$)

d. AlMn, AlSi, AlCu ve AlMg gibi katılaşma entervali geniş olan alaşımlarda sıcak çatlamların oluşumu eğilimi vardır. Sıcak çatlaklar genellikle solidüs(katılaşma) çizgisinin (eğrisinin) üzerinde ve katılaşma aralığında meydana gelir. Bunun için bu alaşımlarda, katılaşma aralığı dar olan alaşım grupları seçilmelidir. Ayrıca çatlamaya karşı dayanımı olan ilave kaynak malzemesinin (tel veya elektrot) kullanılması gerekir.

e. Gerilme çatlakları da kuvvetli kendini çekmeler sonucu solidüs eğrisinin altında meydana gelir. Bu çatlaklar, uygun bir konstrüktif şekillendirme, kaynak sonrası, ısı işlemleri kaynak yöntemi ve tekniği uygulanarak önlenir [1].

Alüminyum alaşımları arasında kolaylıkla kaynak edilebilenler, ısı işlem kabul etmeyen 1XXX, 3XXX ve 5XXX serileridir. Isıl işlem uygulanabilen 2XXX ve 4XXX serilerinin alaşımları da kaynak edilebilirlerse de özel tekniklerin uygulanması gerekebilir ve biraz düşük süneklik elde edilebilir. Yüksek mukavemetli ve ısı işlem kabul eden 6XXX ve 7XXX serisi de kaynak edilebilir ama bunların ITAB'ları gevrek özellik gösterir [1].

2.5. Deneylerde Kullanılan Alüminyum Alaşımları

Deneyler esnasında endüstride yaygın olarak kullanılan AA2024, AA5754, AA6060 ve AA7075 alüminyum alaşımları kullanılmıştır. Bu alaşımlara ait mekanik özellikler Tablo 2.2 de gösterilmektedir.

Tablo 2.2: Deneylerde kullanılan alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri.

Alaşım	Temper	Akma Mukavemeti (MPa) min-max	Çekme Mukavemeti (MPa) min-max	Uzama (%50) min-max	Sertlik (brinel) min-max
2024 [31-49]	0	140	220	12	55
	T3	270	400	8	120
	T8	380	455	5	130
5754 [48]	0/H111	80-100	190-215	24	50-55
	HX4	160-215	240-270	12	73-75
	HX6	190-245	265-290	9	80
	HX8	250-270	290-315	8	85-90
	HX9	300	340	0-4	95
6060 [44]	0	50	100	5-6	25
	T1	90	150	6-9	45
7075 [41]	0	Max 145	276	3-5	60
	T6	434-476	510-538	2-4	140-160
	T76	427	503	3	140

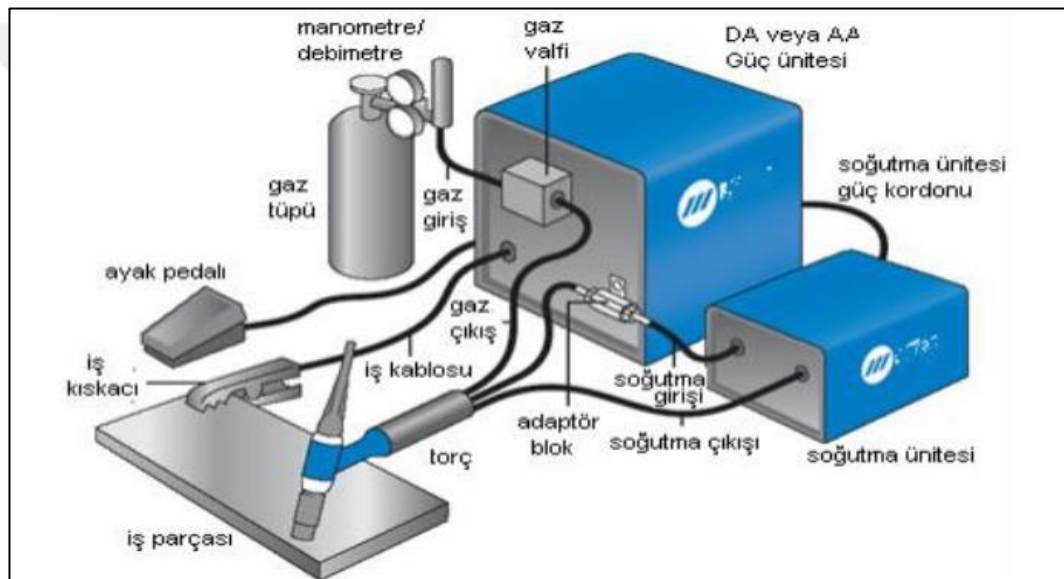
Dolgu malzemesi olarak ise numunelerden hazırlanan teller, yüksek çekme dayanımı istenen Al-Mg ve Al-Mg-Mn alaşımlarının kaynağında kullanılması uygun olan Al 5123 dolgu teli ve %2'ye kadar Mg ve Silisyum içeren alüminyum alaşımlarının kaynağında kullanılması uygun olan Al 4043 dolgu teli kullanılmıştır [36]. Dolgu tellerine ilişkin bilgiler Tablo 2.3 de gösterilmektedir.

Tablo 2.3: Dolgu tellerinin özellikleri.

Dolgu Telinin Alaşıımı	Kimyasal Özellikleri				Mekanik Özellikleri		
					Akma Dayanımı (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Uzama A5 (%)
Al 5123	Al	Mg	Mn	Ti	130	260	17
	94.55	4.75	0.60	0.10			
Al 4043	Al	Si	Mn	-	80	150	12
	94.95	5.00	0.05	-			

3. TIG KAYNAĞI

TIG sembolü, "Tungsten Inert Gas" kelimelerinin baş harflerinden oluşturulan kısaltmadır. TIG kaynağında tungsten elektrod ile iş parçası arasında ark teşekkül ettirilir ve bu ark havanın tesirinden argon veya helyum gazı atmosferiyle korunur. Bu yöntemde kaynak için gerekli ısı enerjisi bir tungsten elektrot ve iş parçası arasında oluşturulan elektrik arkı tarafından sağlanmaktadır [16]. Kaynak bölgesi de havanın olumsuz etkilerinden elektrot ile merkezlenmiş konumda bulunan bir lüleden (nozül) gönderilen bir koruyucu gaz helyum, argon veya bunların karışımı ile korunmaktadır [17]. TIG kaynağı şematik olarak Şekil 3.1 'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1:TIG kaynağının şematik gösterimi.

3.1. Tarihçesi

TIG kaynağı ilk olarak 1930'lu yılların ortalarında denenmiş, ABD'de İkinci Dünya Savaşı sırasında özellikle alüminyum alaşımlarının ve paslanmaz çeliklerinin kaynağında yoğun bir biçimde uygulanmıştır. ABD'de doğalgazdan bol miktarda helyum elde edilebilirliğinden koruyucu gaz olarak helyum kullanılmış ve bu nedenle yöntem Heliark olarak anılmıştır. Avrupa'da helyum bulunmayışı, yöntemin havadan ayrıştırılan argon ile uygulanmasına neden olmuş ve bu bakımdan bu yöntem Argonark ile anılmıştır [17].

3.2. Koruyucu Gazlar

TIG kaynağında ilk olarak helyum gazı kullanılmış olup, daha sonra argon gazı kullanılmaya başlanmıştır. Kullanılan iki gazda tek atomlu ve soy gaz olduğu için elementlerle birleşmezler, renksiz ve kokusuzdurlar, yanmazlar. Helyum gazı havadan hafif olduğu için uçar bu sebeple koruma kabiliyeti azdır. Argon gazı havadan daha ağır olması sebebiyle erimiş metali koruma kabiliyeti daha iyidir. Yüksek akım şiddetinin kullanılması gereken hallerde, daha yüksek ark gerilimi vermesi sebebiyle helyum gazı kullanılır. Hafif metal ve alaşımların kaynağında kullanılan argon gazının saflığı %99 olmalıdır. Çünkü içerisinde bulunabilecek su buharı, oksijen ve azot gibi elementler kaynakta süresizliğe sebep olur. Bu sebepten paslanmaz çelik, bakır ve alaşımlarının kaynağında oksijen ve azotun oranları sırasıyla %0,1 ve 1,5'un altında olması gerekir [16].

3.3. Elektrodlar

TIG kaynağında kullanılan elektrodlar saf tungsten veya tungsten-toryum-zirkonyum alaşımıdır. Bu elektrodlar, sinterleme metoduyla üretilir.

Tungsten-toryum-zirkonyum alaşımı elektrodların saf tungsten elektroda göre üstünlükleri;

- a. İyi bir elektron emisyonu sağlarlar.
- b. %25 daha yüksek akım şiddetiyle yüklenmeleri mümkündür,
- c. Ömürleri daha uzundur ve sarfiyatları %50 daha azdır,
- d. Ergimiş metal ile temas halinde, sıçrama ve buharlaşmaları azdır [16].

3.4. Akım

TIG kaynağında, doğru veya alternatif akım kullanılabilir. Fakat alüminyum ve magnezyum alaşımlarının TIG kaynağı ile birleştirilmesinde alternatif akım kullanılması gerekmektedir. Doğru akım kullanılarak kaynak yapılırken elektrodun negatif kutba bağlanması durumunda (direkt kutuplama); derin bir nüfuziyet sağlanır, fakat erimiş kaynak havuzunda elektriksel temizleme etkisi yoktur. Bu sebepten yüzeyde oksit tabakasının bulunduğu, hafif metallerin kaynağında direkt kutuplama yapılması uygun değildir [16].

3.5. Isı Girdisi

Türk Loydu Kısım 3 Kaynak Kurallarına göre ısı girdisi formül (3.1) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$E = \frac{U \times I \times t \times 6}{l \times 100} \quad (3.1)$$

E=Birim Uzunluk Başına Isı Girdisi

U=Voltaj

I=Amper

t=Kaynak Süresi (dk)

l= Kaynak Dikiş Uzunluğu(mm)

Isı girdisi hesaplama formülüne göre birim dikiş uzunluğunda voltaj ve süre sabit tutulursa akım artışı doğru orantılı olarak ısı girdisinin artmasına sebep olacaktır [20].

3.6. Kaynak Ağzının Hazırlanması

Genel olarak TIG kaynağı ile yapılan kaynak birleştirmelerinin büyük bir kısmını alın bağlantıları teşkil eder. Sacların birleştirilmesinde kutu imalinde metal dolapların imalinde, metal dolapların imalinde ve silindirik cebri boru konstrüksiyonlarında ince sac levhalar kullanıldığı için alın birleştirmelerine müracaat etmek gerekmektedir. Kimya sanayii ve bira fabrikalarında daha kalın sac levhaların kullanılmasına rağmen uzunlamasına ve çevresel birleştirmelerinde alın kaynağı esas teşkil eder.

Distorsiyonların minimuma indirilmesi, yüksek kaliteli kaynak dikişlerinin teşkili ve iyi bir kaynak geometrisinin sağlanması gibi TIG kaynağının başlıca üstünlüklerinden tam olarak faydalanılacak ise birleştirilecek parçaların ağız hazırlığı ağızların birbirine tam intibak ve ağızların aynı düzlemde olmaları hususunda çok dikkatli ve hassas hareket edilmelidir. İki parça arasında bırakılan mesafe, oksii-asetilen kaynağındakinden daha küçüktür. Oksii-asetilen kaynağının karakteristik tekniği olan yan yana veya zikzak hareket, TIG kaynağında kullanılmaz. Zira hamlacın gayri muntazam hareketi argon gazının düzgün akışını bozar ve kaynak dikişinin kalitesi düşer. İnce sacların kaynağında hamlaç düzgün bir hareketle ileriye doğru hareket eder. Kaynak yapılan iki kenar arasındaki birleşme, geniş ölçüde erimiş metalin

yüzeyindeki yüzey gerilimine bağlıdır ve TIG usulünde herhangi bir dekapan kullanılmadığı için yüzey gerilmesine tesirleri akışkanlığa ve daha düşük yüzey gerilmesine yardım eden dekapan kullanıldığı oksii-asetilen kaynağından daha yüksektir. TIG kaynağında sınırlandırılan teknikler dolayısıyla uğranılan kayıplar, daha iyi şartları sağlamakla telefii edilir. Tablo 3.1’de TIG kaynağında kullanılan başlıca kaynak ağızlarının hazırlanma şekilleri örnek olarak verilmiştir [1].



Tablo 3.1 : TIG kaynağında kullanılan başlıca kaynak ağızları.

TANIMLAMA	GÖSTERİM	SEMBOL
I- dikişi		
V-dikişi		V
Yarım V-dikişi		√
Y-dikişi		Y
Yarım Y-dikişi		Y
U-dikişi		U
Dik kenarlı dikiş		∇
Karşı paso		D
Nokta dikişi		O
Köşe Dikişi		Δ
Çift V-dikişi		X
Çift yarım V-dikişi		K
Çift Y-dikişi		Y
Çift yarım Y-dikişi		K
Çift U-dikişi		U
Karşı pasolu V-dikişi		∇
Çift köşe kaynak dikişi		Δ

3.7. TIG Kaynağının Üstünlükleri ve Kullanım Alanları

Genel olarak hafif metal ve alaşımlarının, bakır ve paslanmaz çeliklerin birleştirilmesinde kullanılan TIG kaynak yöntemi ile 15 mm kalınlığa kadar parçaların kaynağı yapılabilir [1]. Ayrıca kaynak kabiliyeti düşük olan bronzlar, titanyum alaşımları, zirkonyum gibi malzemelerin kaynağı bu yöntem ile süreksizlik olmadan yapılabilir [18].

TIG kaynağının üstünlükleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- a. Kaynak hızı yüksektir,
- b. Kaynak ısısı bir bölgeye yönlendirilebilir. Böylece kaynak birikintisini ısıtmanıza veya soğutmanıza izin verir. Isı girdisi elektrik akımıyla belirlenir ve genellikle ayak pedalıyla kontrol edilebilir.
- c. Isıl distorsiyonlar azdır. Bu özellik sayesinde TIG kaynağını heykeller, mimari özellikler ve otomotiv çalışmalarındaki kaynaklar için ideal hale gelir.
- d. Kaynak dikişleri temizdir. Kaynaktan sonra dikişin temizlenmesine ihtiyaç yoktur,
- e. TIG (Argon) kaynağı, farklı metal kalınlıkları için uygundur. Diğer kaynak teknikleriyle birleştirilmesi zor (veya imkânsız) çok ince malzemeler için bile kullanılabilir.
- f. TIG kaynağı birçok pozisyonda mümkündür: dikey; yatay, havada [1-16].

4. TAHRİBATSIZ MUAYENE YÖNTEMLERİ

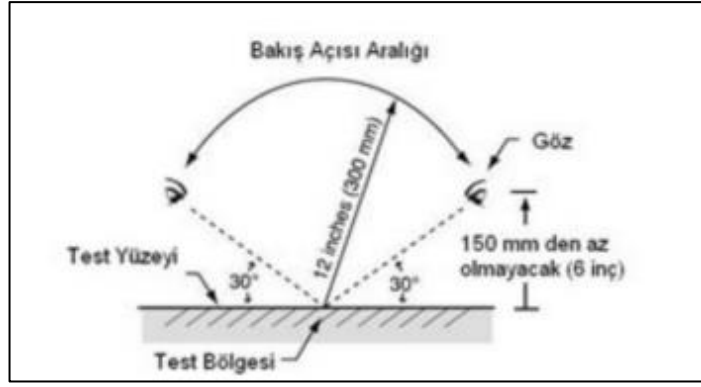
Tahribatsız muayene (Non:destructive testing, kısaca: NDT), malzeme ya da parçanın bütünlüğüne herhangi bir zarar vermeden yapılan muayene türüdür. Tahribatsız muayene insanlığın başından beri uygulanmaktadır. İnsanlar boyut, şekil ve görsel yüzey kusurlarını tespit etmek için baktılar ve bir demirci tarafından şekillendirilen veya dökülen metali dinlediler [19].

Günümüzde kullanılan teknoloji ve cihazların geliştirilmesinde 2. Dünya Savaşı büyük etkiye sahiptir. Pek çok teknoloji türü askeri kullanım için özelleştirildi ve silah, lojistik, istihbarat, tıp ve tahribatsız muayene gibi alanlarda meydana gelen büyük gelişmeler, tüm parçaların, malzemelerin veya sistemin kullanılışlılığını bozmadan test etmek için kullanıldı. Tahribatsız muayene yöntemleri malzemelerin içerisinde veya yüzeyinde bulunan süreksizliklerin tespitinde kullanılır. Süreksizlik ve kusur tespiti dışında kapalı bir malzemenin içinde bulunan bir diğer malzemenin miktarını ölçmede, metal yüzeylerdeki boya kalınlığı ölçmede, monteli parçaların durum tespitlerinde, radar sistemlerinde kullanılmaktadır [19].

Kritik bileşenlerde malzemeye zarar verecek karakterdeki yüzey hataları ve iç süreksizliklerin tespiti çeşitli Tahribatsız Muayene Yöntemlerinin yardımı ile yapılabilmektedir. Bu yöntemlerin başlıcaları; Gözle Muayene, Girici Sıvı ile Muayene (Sıvı Penetrant Testi), Manyetik Parçacık Testi, Girdap Akımları (Eddy Current) ile Muayene, Radyografik Muayene, Ultrasonik Muayenedir [19].

4.1. Gözle Muayene

Görsel yüzey kusurlarını belirlemek için kullanılan, günümüzde görsel test olarak bilinen ilk ve en eski tahribatsız muayene yöntemi. Çoğu malzemedeki yüzey hatalarını ve yarı saydam malzemelerdeki yüzey altı süreksizlikleri tespit etmek için kullanılan önemli bir muayene yöntemidir [19].

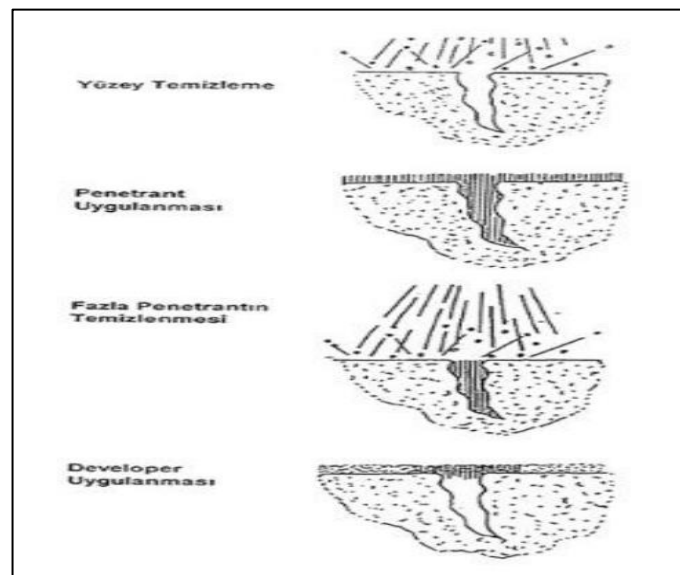


Şekil 4.1: Gözle muayene.

Uygun ışık şartları ve bakma açılarında inceleme yapılmalıdır. Uygun bakma açıları ve mesafeleri Şekil 4.1 de gösterilmiştir. Tavsiye edilen minimum ışık şiddeti 500 lux, minimum açı 30 derece ve parçaya olan maksimum uzaklık 300 mm ‘dir [23].

4.2. Girici Sıvı ile Muayene (Sıvı Penetrant Testi)

Girici sıvı ile muayene olarak adlandırılan yöntem yüzey hatalarının tespit edilmesi için penetrant adı verilen yüksek nüfuziyete sahip sıvı kullanılan bir tahribatsız muayene yöntemidir. Bu tip muayenede süreksizliğin muayene yapılacak yüzeye açık olması gerekmektedir. Bu sebeple yüzey altında kalmış veya yüzeye kapalı durumdaki süreksizlikler bu yöntem ile tespit edilememektedir [19]. Sıvı penetrant testi temsili olarak Şekil 4.2 de gösterilmektedir.



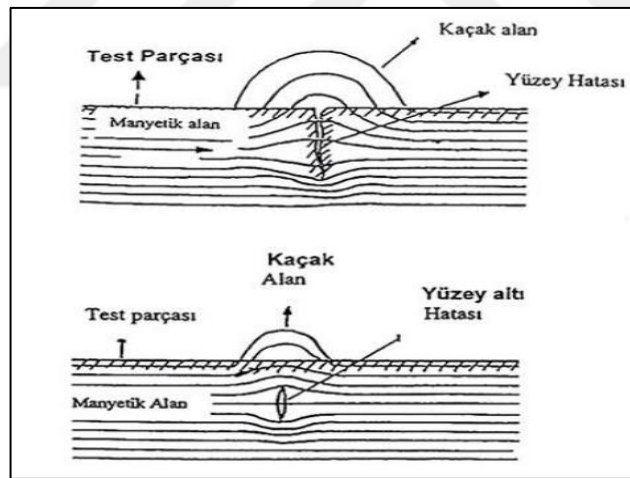
Şekil 4.2: Sıvı penetrant testi.

Metalik veya metalik olmayan bütün malzemelerde yüzeye açık süreksizliklerin tespiti için kullanılabilir. Girici sıvı ile muayene aşağıdaki süreksizliklerin tespitinde kullanılır;

- Yorulma Çatlakları
- Su Verme Çatlakları
- Gözenek
- Talaşlı İmalat Nedeniyle Oluşan Yüzey Hataları [19].

4.3. Manyetik Parçacık ile Muayene

Ferromanyetik malzemelerin yüzeyine yakın manyetik akı çizgisi malzemenin yüzey profilini izleme eğilimindedir. Akı çizgisine dik olan malzeme süreksizlikler manyetik akı çizgilerinin saçaklanmasına neden olur (akı kaçağı gibi). Akı kaçak alanı diğer ferromanyetik parçacıklarla etkileşime girer. Bu etkileşim kullanılarak muayene gerçekleştirilir. Manyetik parçacık testi temsili olarak Şekil 4.3 de gösterilmektedir [19].

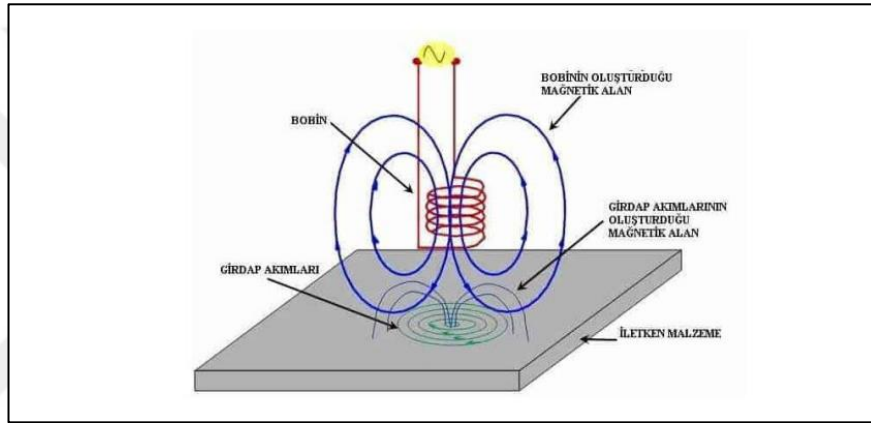


Şekil 4.3: Manyetik parçacık testi.

Manyetik Parçacık ile muayene yönteminde ferromanyetik malzeme üzerine AC veya DC akımlar uygulanarak yüzey manyetize edilir. AC akım uygulamalı testlerde yüzey süreksizlikler görülebilirken, DC akım uygulamalı testlerde ise yüzey altı süreksizlik tespit edilebilmektedir. Uygulanan akımın şiddeti frekansı, manyetik alanın yönü yüzey ve yüzey altı süreksizliklerin belirlenmesinde etkileyen parametreler arasında yer alır [19].

4.4. Girdap Akımları ile Muayene (Eddy Current Testi)

Bir sarımdan alternatif akım (AC) geçirildiğinde bu sarım etrafında bir manyetik alan oluşur. Bu sarım elektriksel olarak iletken bir malzeme yüzeyine yaklaştırıldığında, sarımın etrafındaki manyetik alan malzeme yüzeyinde indüksiyon akımları oluşturur. Bu akımlar kapalı bir devre halinde malzeme yüzeyinde hareket ederler ve Girdap akımları olarak adlandırılırlar. Girdap akımları da kendi manyetik alanlarını yaratırlar. Yaratılan bu ikincil manyetik alandan faydalanılarak yüzey hataları bulunabilir, malzemenin iletkenlik, geçirgenlik gibi özellikleri saptanabilir [19]. Şekil 4.4 de girdap akımları ile muayene temsili olarak gösterilmektedir.

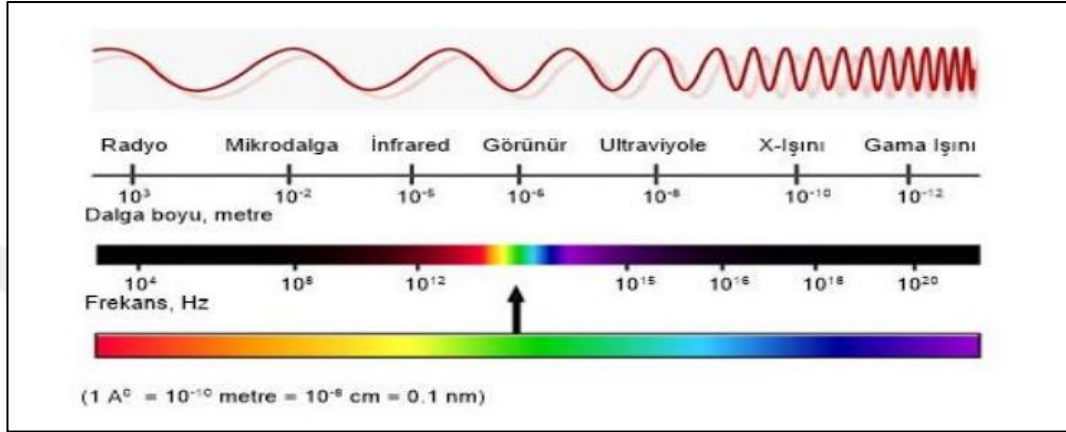


Şekil 4.4: Girdap akımları ile muayene.

Bu yöntem elektriksel olarak iletken olan bütün malzemelerde (bakır, alüminyum, vb.) yüzey ve yüzey altı süreksizliklerinin tespiti için kullanılabilir. Girdap akımları kullanılarak elektriksel iletkenlik veya manyetik geçirgenlik gibi malzemeye özgü özelliklere dayanarak malzemelerin sınıflandırılmasına da imkân verir. Bunlardan başka kaplama kalınlığı veya ince metal levhaların kalınlığı ölçümleri de yapmak mümkündür [19].

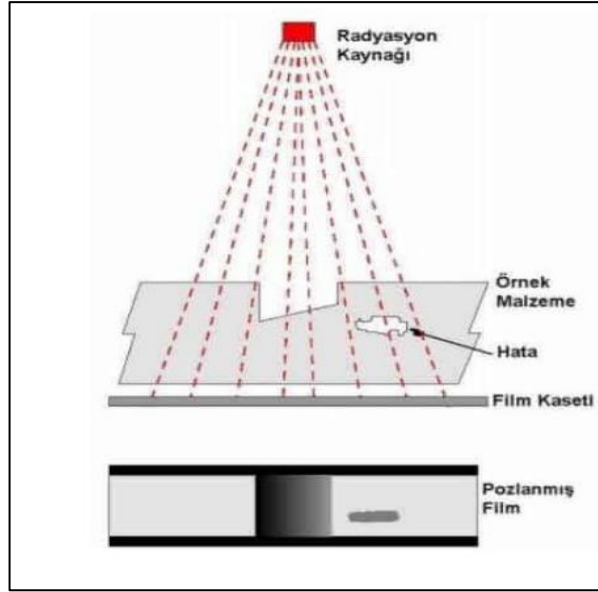
4.5. Radyografik Muayene

Yüksek enerjili, kısa dalga boyuna sahip elektromanyetik dalgalar (X:Işınları ve Gama Işınları) pek çok malzemeye nüfuz edebilirler. X-Işını ve gama ışını dalga boyu ve frekansı Şekil 4.5 de gösterilmektedir. Işınları ve Gama Işınlarının bu özelliği kullanılarak radyografik muayene gerçekleştirilir [19].



Şekil 4.5: X-ışını ve gama ışını dalga boyu ve frekansı.

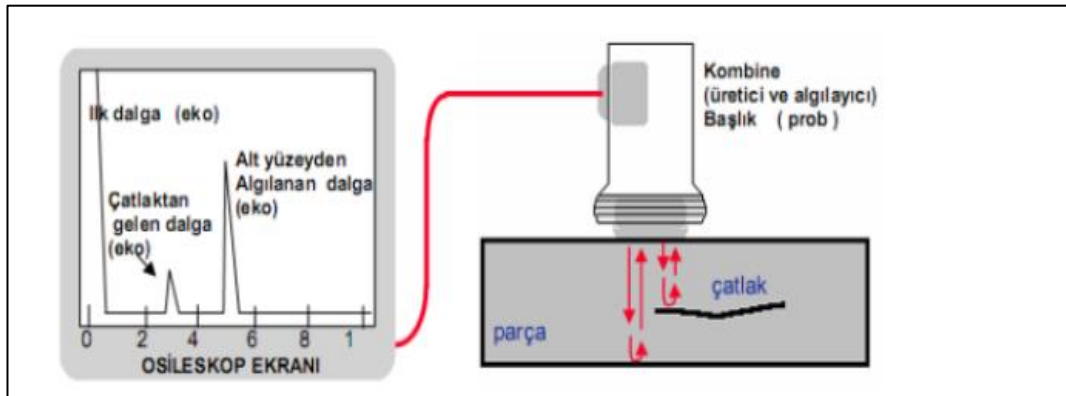
Kontrol edilecek olan malzemenin kalınlığı ve içindeki süreksizliklerin oluşturduğu yoğunluk farklılıkları sayesinde hata tespitleri yapılmaktadır. Malzeme üzerine gönderilen ışın, film üzerine yansıtılır. Bu ışınlar, parçanın kalın ve yüksek yoğunluklu yerlerinde radyograf açık, ince ve düşük yoğunluklu yerlerinde ise radyograf koyu görünür. Bu yoğunluk farkı özelliği kullanılarak malzemenin içindeki süreksizlikler ve kusurlar film üzerinde malzemedan daha koyu gözükmek hataharın yerleri tespit edilmiş olur. Şekil 4.6 da radyografik muayene ve radyograf şematik olarak gösterilmiştir [4].



Şekil 4.6: Radyografik muayene.

4.6. Ultrasonik Muayene

Malzeme içerisine gönderilen yüksek frekanslı ses dalgaları ses yolu üzerinde bir süreksizliğe çarparlarsa yansır. Çarpma açısına bağlı olarak yansıyan ses dalgası alıcı proba gelebilir veya gelmeyebilir. Alıcı proba ulaşan yansıyan sinyal ultrasonik muayene cihazının ekranında başlangıç ekosundan düşük alt taban ekosundan yüksek belirti oluşturur. Yankının konumuna ve yüksekliğine göre yansıtıcının muayene parçası içindeki konumu ve büyüklüğü hesaplanabilir. Yankı sinyalinin şekline bakılarak yansıtıcının türü hakkında da fikir sahibi olmak mümkündür [19]. Şekil 4.7 de ultrasonik muayene şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.7: Ultrasonik muayene yöntemi şematik gösterimi.

5. TEZİN LİTERATÜRE KATKISI

Bu çalışmada, otomotiv, gemi inşa, savunma gibi endüstrinin birçok dalında yaygın olarak kullanılan alüminyum esaslı 4 farklı seriye ait alaşım (2024,5754,6060 ve 7075) kullanılmıştır. Her seriden belirli sayıda numune kaynak proses parametreleri değiştirilerek TIG kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Kaynak işlemi tamamlandıktan sonra numuneler tahribatsız muayene yöntemlerinden sıvı penetrant ile muayene yöntemi kullanılarak yüzeye açık ve yüzeye açık olduğu halde hacmi olmayan kusurları tespiti açısından incelenmiştir. Ayrıca radyografik muayene kullanılarak hacimsel olarak kontrol edilmiştir. Endüstride yaygın olarak kullanılmasına rağmen literatürde yaygın olarak kullanılmayan tahribatsız muayene yöntemleri kullanılarak kaynak proses parametrelerinin ve alaşım elementlerinin kaynağa etkisi gözlemlenmiştir.

TIG kaynak yönteminde proses parametrelerinde değişiklik yapılmasının literatürdeki çalışmalardaki gibi mekanik özelliklere ve mikroyapıya etkisi açısından incelenmiştir. Bu çalışmada literatürdeki çalışmalardan farklı olarak alaşım elementlerinin ve proses parametrelerine etkisi karşılaştırmalı olarak mekanik özellikler bakımından ve mikroyapısal olarak incelenmiştir.

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Numunelerin kaynak proses parametreleri değiştirilerek ve farklı dolgu malzemeleri kullanılarak TIG kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir.

6.1. Deney Materyalleri

Deney numunelerinin kalınlıkları ve TIG kaynağında kullanılan dolgu telleri Tablo 6.1 de gösterilmiştir.

Tablo 6.1: Deney materyallerinin kalınlık ve dolgu malzemeleri.

Deney Materyali	Temper	Kalınlık (mm)	Dolgu Malzemesi	Dolgu Malzemesinin Çapı (mm)	Koruyucu Gaz
AA2024 (AlCu4Mg)	T3	3	AA 2024	1,5	Argon
			Al 5123		
			Al 4043		
AA5754 (AlMg3)	HX4	3	AA 5754	1,5	Argon
			Al 5123		
AA6060 (AlMgSi)	T4	3	AA 6060	1,5	Argon
			Al 5123		
AA7075 (AlZn5.5MgCu)	T6	3	AA 7075	1,5	Argon
			Al 5123		

Deney numunelerinin doğrulamasını yapmak maksatlı olarak numunelerin elementel analizleri yapıldıktan sonra sertlik testi yapılmıştır.

6.2. Deney Materyallerinin Doğrulanması

6.2.1. Sertlik Testi

Kaynak yapılmadan önce deney numunelerinin kalınlıklarından dolayı ince malzemelerin sertliklerinin ölçümünde kullanılan Webster Sertlik Ölçüm cihazı kullanılarak Brinell (HB) cinsinden ölçüm yapılmıştır.

6.2.2. Elementel analiz

Deney numunelerinin elementel analizi PMI Master Optik Emisyon Spektrometre kullanılarak yapılmıştır.

6.3. Kaynak İşlemi

Aynı seriye ait 2 sacın TIG kaynağı ile birleştirilmesi ile numuneler elde edilmiştir. Numunelerin kaynakla birleştirilmesi Magmaweld marka Monotig 220 ip model kaynak makinesi kullanılarak atölye ortamında yapılmıştır. Kaynak esnasında dolgu malzemesi olarak saclardan hazırlanan dolgu telleri, Al 5123 ve Al 4043 kullanılmıştır. Numunelerin kaynak parametreleri Tablo 6.2 de gösterilmektedir.

Tablo 6.2: Deney materyallerinin TIG kaynak parametreleri.

Deney Materyali	Akım Türü	Akım (A)	Gaz Debisi (L/Dk)	Frekans (Hz)
AA2024 (AlCu4Mg)	AC	75	15	110
		80		
		85		
AA5754 (AlMg3)	AC	75	15	110
		80		
		85		
AA6060 (AlMgSi)	AC	75	15	110
		80		
		85		
AA7075 (AlZn5.5MgCu)	AC	75	15	110
		80		
		85		

TIG kaynağı esnasında argon gazı helyum gazına göre daha iyi izolasyon sağladığı için kullanılmıştır. Argon gazının debisi numunelerin kalınlığı ve dolgu malzemesinin çapına göre belirlenmiştir. Frekans ise koruyucu gaz olarak argon kullanılması, tungsten elektrod kullanılması ve dolgu malzemesinin çapına uygun olarak belirlenmiştir.

TIG kaynağı ile birleştirilmiş numuneler ait görseller temsili olarak Şekil 6.1 de gösterilmektedir.



Şekil 6.1: AA 5754 80 A görseli.

6.4. Tahribatsız Muayene

Kaynak işlemi tamamlandıktan sonra numunelerdeki hacimsel kusurların tespiti için radyografik muayene yöntemi kullanılmıştır. Radyografik muayene için Seifert Eresco marka 42 mf 4 model X-ışını kaynağı kullanılmıştır. 50 kV voltaj ve 4.5 mA akım ile üretilen X-ışınları kullanılarak 92 cm mesafeden 0.8 dk pozlayarak numunelerin radyografları elde edilmiştir.

Numunelere ait radyograflar TS EN ISO 10675-2 Kaynakların tahribatsız muayenesi- Radyografik muayene için kabul seviyeleri- Bölüm 2: Alüminyum ve alaşımları standardına göre değerlendirilmiş, standarda göre uygun kabul edilen numunelere sıvı penetrant testi, çekme testi, mikro sertlik testi ve mikro yapı incelemesi yapılmıştır. Hacmi olmayan yüzeysel veya yüzeye açık kusurları tespit etmek için sıvı penetrant ile muayene yöntemi kullanılmıştır. Sıvı penetrant ile muayene de ilk olarak Beta 69 sprey temizleyici kullanılarak yüzey temizliği yapılmıştır. Yüzey temizliği yapıldıktan sonra Beta 68 marka Tip 2 görünür penetrant kontrast kırmızı renk uygulanmıştır. Yüksek penetrasyon özelliğine sahip görünür yüzeyde 20 dk bekletildikten sonra yüzeydeki fazla penetrant silinerek yüzeyden uzaklaştırılmıştır. Yüzey temizliği yapıldıktan sonra geliştirici çeşidi olarak Metot C ve Form-e Susuz Yaş kullanılmıştır. Geliştirici yüzeyde kuruyunca kusurlar ortaya çıkar.

6.5. Çekme Testi

Tahribatsız Muayene uygulamaları tamamlandıktan sonra mekanik özelliklerin tespiti için numunelere oda sıcaklığında Instron marka 5569 model (5-50 kN) mekanik test cihazı kullanılarak 1 mm/dk çekme hızında çekme testi uygulanmıştır.

6.6. Mikroyapı Analizi

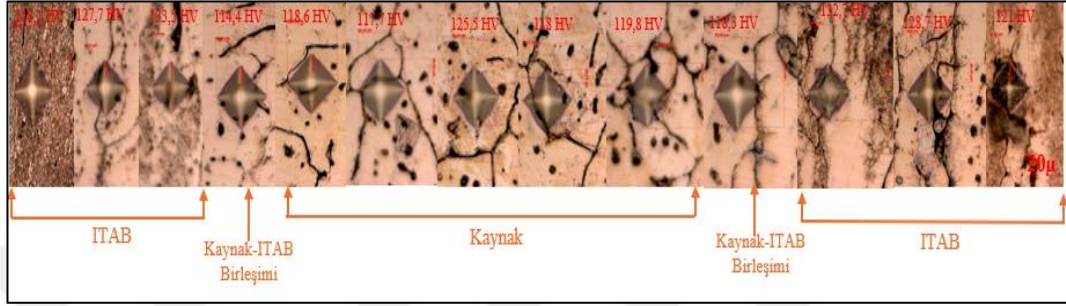
Mikroyapı analizi için kaynaklı numuneler kesildikten sonra kesit yüzey incelenecek şekilde epoksi ile kalıba alınmıştır. Kalıba alma işleminden sonra sırasıyla 80-180-600-800-1200-2000 grid zımparalar kullanılarak yüzey hazırlığı yapılmıştır. Zımparalanan numunelere çizik kalmayacak şekilde alümina kullanılarak parlatma işlemi yapılmıştır. Parlatma işlemi yapılan numunelere mikroskop altında incelenebilmesi için AA 2024 ve AA 7075 alaşımları Polarize 1 çözeltisi ile AA 5754 ve AA 6060 alaşımları Keller çözeltisi ile dağlanmıştır. Polarize 1 çözeltisi ve Keller Çözeltisinin kimyasal kompozisyonu Tablo 6.3'te gösterilmektedir. ZEISS CARL Imager M1U1 marka model optik mikroskop (OM) kullanılarak mikroyapı analizleri yapılmıştır.

Tablo 6.3: Dağlama çözeltilerinin kimyasal kompozisyonu [30].

Çözelti	İçerdiği Kimyasallar	Kompozisyon (%)
Polarize 1	Etanol	73.14
	2-Bütoksietanol	10.02
	Perklorik Asit	7.8
	Saf Su	9.04
Keller	Hidroflorik Asit	1
	Hidroklorik Asit	1,5
	Nitrik Asit	2.5
	Saf Su	95

6.7. Mikro Sertlik Testi (HV)

ZEISS CARL Imager M1U1 marka model optik OM'a bağlanan Anton Paar MHT-10 mikro sertlik ölçme cihazı kullanılarak, optik mikroskop altında mikrosertlikleri 100gf yük 10 sn uygulanarak Vickers sertliği cinsinden ölçülmüştür. Sertlik izi görüntüsü temsili olarak Şekil 6.2'de gösterilmektedir.



Şekil 6.2: AA 2024 85A sertlik izi görüntüleri.

6.8. Taramalı Elektron Mikroskobu ve Enerji Dağılımlı X-ışını Spektrometre

Kesit olarak mikroyapı analizi için hazırlanan numunelerden SEM kullanılarak görüntü alabilmek için yüzeye Quorum marka SC7620 model cihaz kullanılarak altın kaplama yapılmıştır. Philips XL 30 SFEG marka model SEM kullanılarak yüzey görüntülemeleri yapılmıştır.

Philips XL30 SFEG marka taramalı elektron mikroskobu ile bütünleşik EDAX marka EDS cihazı kullanılarak alaşım elementlerinin etkisi incelenmiştir.

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

7.1. Deney öncesi yapılan testlerin sonuçları

7.1.1. Sertlik Testi

Ölçüm sonuçları Tablo 7.1 da gösterilmektedir.

Tablo 7.1: Sertlik değerleri.

Deney Materyali	Ölçülen Sertlik Değeri (HB)			Tolerans (HB)
AA2024 (AlCu4Mg)	118,5	118,3	119,1	0,5
AA5754 (AlMg3)	71,9	72,5	73,7	0,5
AA6060 (AlMgSi)	45,2	46,1	46,5	0,5
AA7075 (AlZn5.5MgCu)	141,9	145,4	146,8	0,5

Deney numunelerinin sertlik değerleri literatür ile karşılaştırılmış ve uyumlu olduğu gözlemlenmiştir [6;9].

7.1.2. Elementel analiz

Deney numunelerinin elementel analiz sonuçları Tablo 7.2’de gösterilmektedir.

Tablo 7.2: Deney numunelerinin elementel dağılımları.

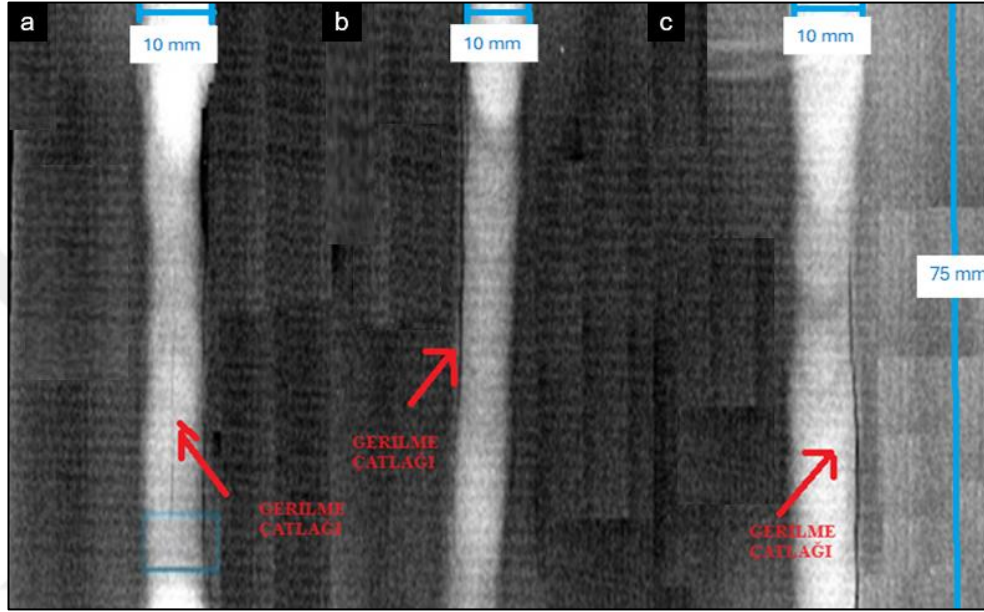
Alaşım	Alaşım Elementleri (%)							
	Al	Mg	Si	Mn	Cu	Zn	Fe	Cr
2024	93.3	1.42	0.102	0.559	4.39	<0.005	0.107	0.018
5754	96.6	2.63	0.107	0.184	<0.002	<0.005	0.375	0.077
6060	98.8	0.471	0.418	0.023	0.10	0.15	0.195	0.05
7075	89.0	2.34	0.069	0.157	1.84	5.97	0.264	0.208

AA2024, AA5754, AA6060 ve AA7075 alüminyum alaşımlarının elementel analiz sonuçları ile literatürdeki elementel dağılım uyumludur [6;9].

7.2. Deney sonrası yapılan testlerin sonuçları

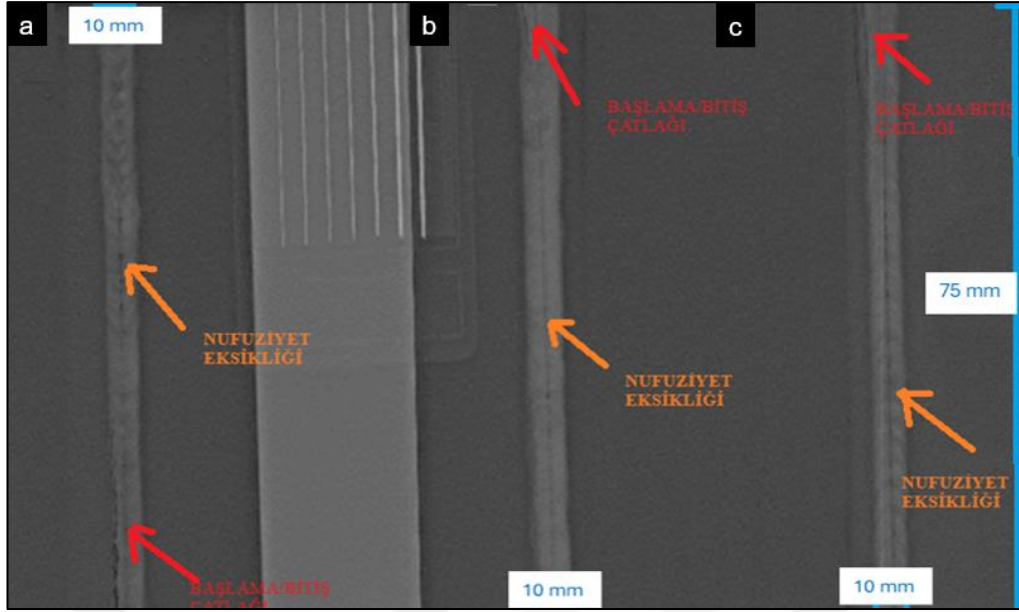
7.2.1. Radyografik Muayene

Radyografik Muayene yöntemi ile radyograflar elde edilmiştir. AA2024 e ait radyograflar Şekil 7.1-7.2-7.3'te gösterilmektedir.



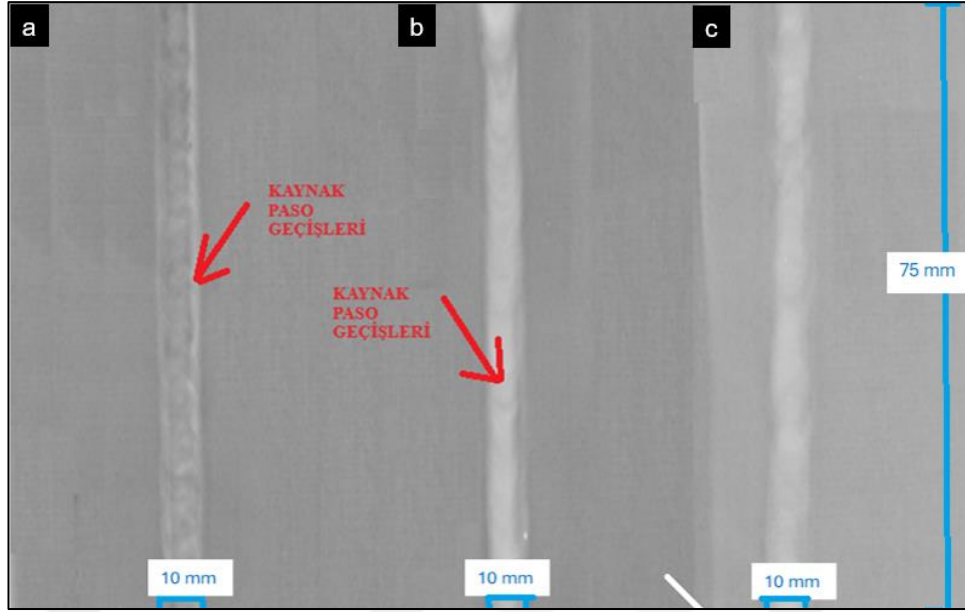
Şekil 7.1: AA2024 radyografı dolgu AA2024, a) 75 A, b) 80 A, c) 85 A.

Şekil 7.1 de gösterilen, AA2024 dolgu malzemesi kullanılan numunelere ait radyograflar da dolgu malzemesi ile ana malzemenin aynı mekanik ve kimyasal özelliklere sahip olması sebebiyle katılaşma esnasındaki yüksek termal gerilmeler olduğu, bu gerilmelerden dolayı kaynak-ITAB birleşiminde ve kaynak merkezinde gerilme çatlakları olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 7.1'deki AA2024-dolgu malzeme AA2024 numunelerindeki çatlaklar ISO standardına göre bütün kabul seviyelerinde uygun değil olarak belirtilmiştir [37].



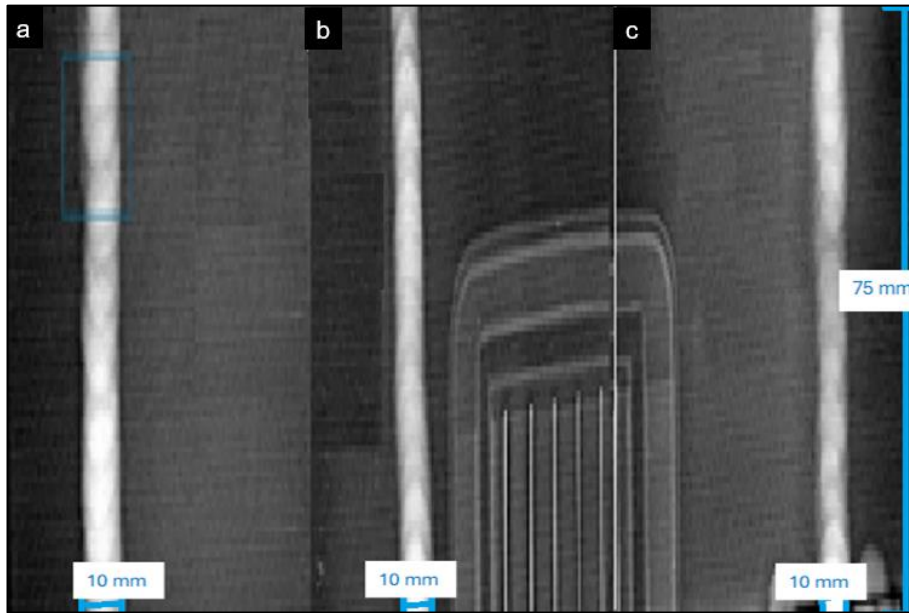
Şekil 7.2: AA2024 radyografî dolgu Al 5123, a) 75 A, b) 80 A, c) 85 A.

Şekil 7.2 de gösterilen, Al5123 dolgu malzemesi kullanılan numunelere ait radyograflar da dolgu malzemesi ile ana malzemenin kimyasal özelliklerinin arasındaki uyumsuzluk sebebiyle dolgu malzemesi arkın önünde toplandığı ve penetrasyona engel olduğu için nüfuziyet eksikliğine sebep olduğu ve yüksek gerilmeler olduğu, bu gerilmelerden dolayı başlama-bitiş bölgelerinde gerilme çatlakları olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca akım arttıkça nüfuziyet eksikliğinin arttığı da gözlemlenmiştir. Şekil 7.2’deki AA2024-dolgu malzeme Al5123 numunelerindeki çatlaklar ve kaynak boyunca devam eden nüfuziyet eksiklikleri ISO standardına göre bütün kabul seviyelerinde uygun değil olarak belirtilmiştir [37].

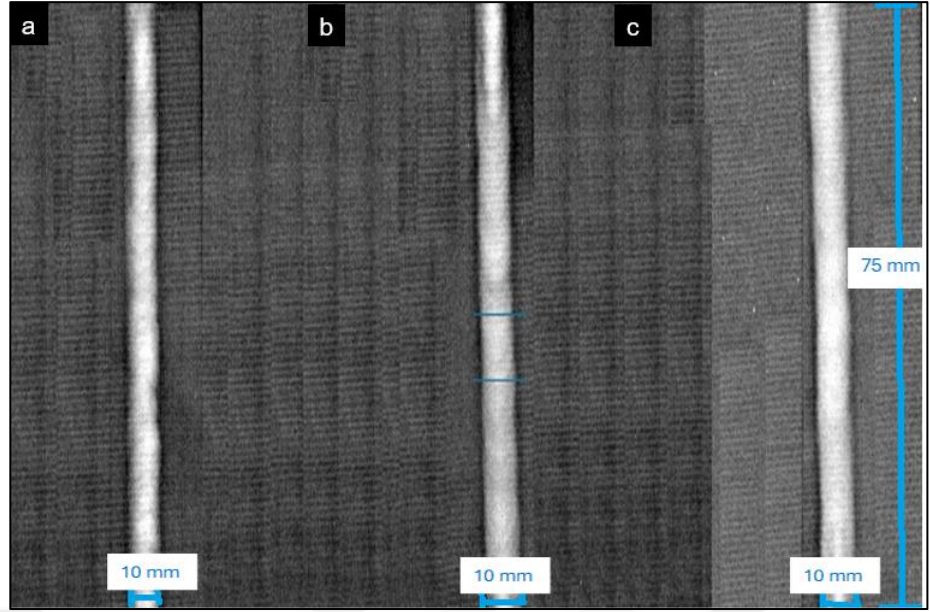


Şekil 7.3: AA2024 radyografı dolgu Al4043, a) 75 A, b) 80 A, c) 85 A.

Şekil 7.3 de gösterilen, Al4043 dolgu malzemesi kullanılan numunelere ait radyograflar da dolgu malzemesi ile ana malzemenin uyum sağladığı ISO standardına göre kusur kabul edilen bir süreksizlik bulunmadığı gözlemlenmiştir [37]. Akım artışına bağlı olarak ısı girdisindeki artış pasolar arasındaki geçişlerin belirginliğinin azalmasını sağladığı, daha homojen bir kaynak elde edildiği görülmektedir. AA5754 e ait radyograflar Şekil 7.4-7.5'te gösterilmektedir.



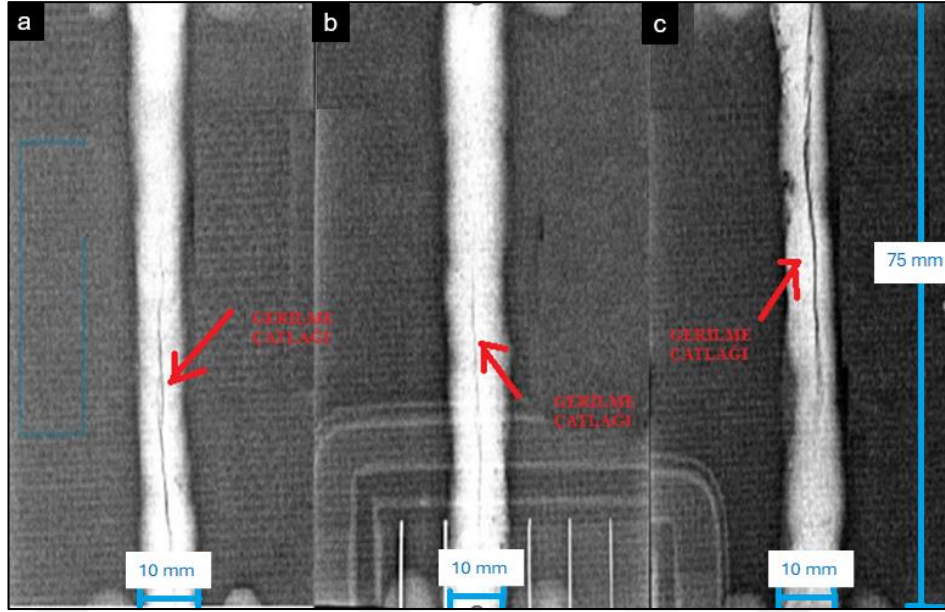
Şekil 7.4: AA5754 Radyografı dolgu AA5754, a) 75 A, b) 80 A, c) 85 A.



Şekil 7.5: AA5754 radyografî dolgu Al5123, a) 75 A, b) 80 A, c) 85 A.

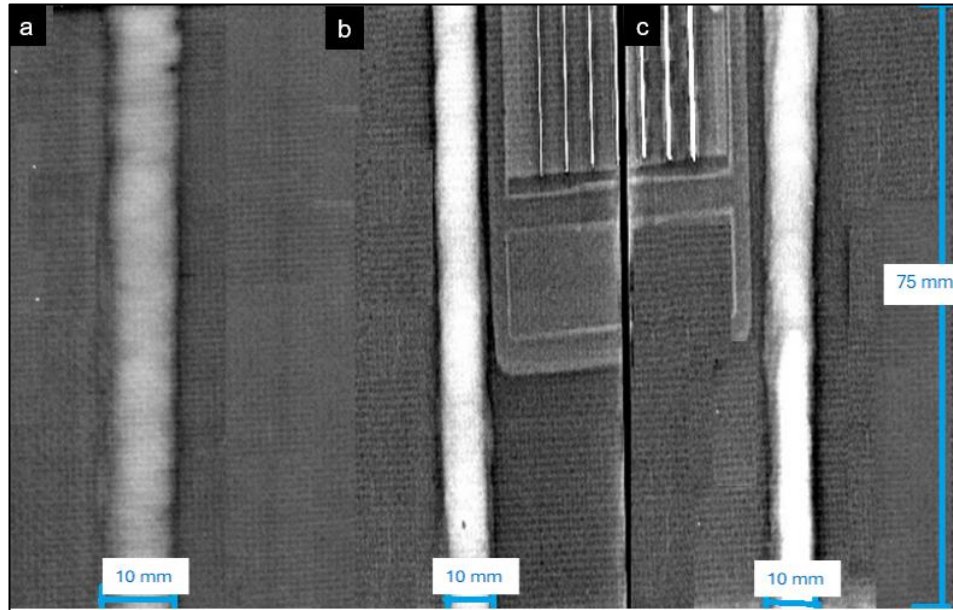
Şekil 7.4 ve Şekil 7.5 de gösterilen, AA5754 ve Al 5123 dolgu malzemesi kullanılan numunelere ait radyograflar da dolgu malzemesi ile ana malzemenin uyum sağladığı ISO standardına göre kusur kabul edilen herhangi bir süreksizlik bulunmadığı gözlemlenmiştir [37]. Akım artışına bağlı olarak ısı girdisindeki artışın pasolar arasındaki geçişlerin belirginliğinin azalmasına neden olduğu, daha homojen bir kaynak elde edildiği görülmektedir. Al5123 dolgu malzemesi kullanıldığında AA 5754'e göre daha homojen bir görüntü oluştuğu pasolar arası kaynak geçişlerinin belirgin olarak görünmediği gözlemlenmiştir.

AA6060 a ait radyograflar Şekil 7.6-7.7'de gösterilmektedir.



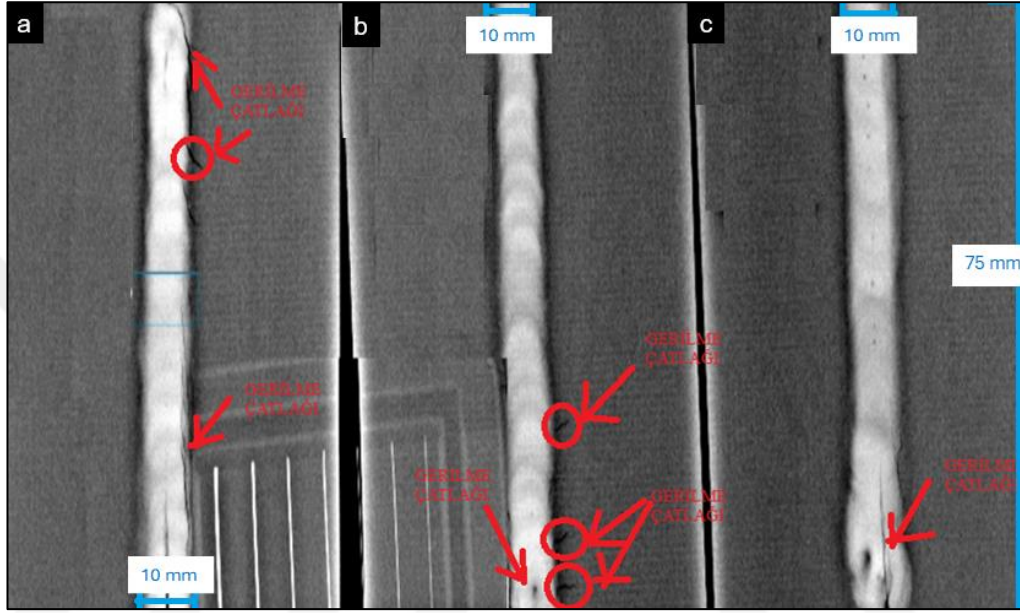
Şekil 7.6: AA6060 radyografi dolgu AA6060, a) 75 A, b) 80 A, c) 85 A.

Şekil 7.6 da gösterilen, AA6060 dolgu malzemesi kullanılan numunelere ait radyograflar da dolgu malzemesi ile ana malzemenin aynı mekanik ve kimyasal özelliklere sahip olması sebebiyle katılaşma esnasındaki yüksek gerilmeler olduğu, bu gerilmeler nedeniyle kaynak merkezinde gerilme çatlakları olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 7.6'daki AA6060-dolgu malzeme AA6060 numunelerindeki çatlaklar ISO standardına göre bütün kabul seviyelerinde uygun değil olarak belirtilmiştir [37].



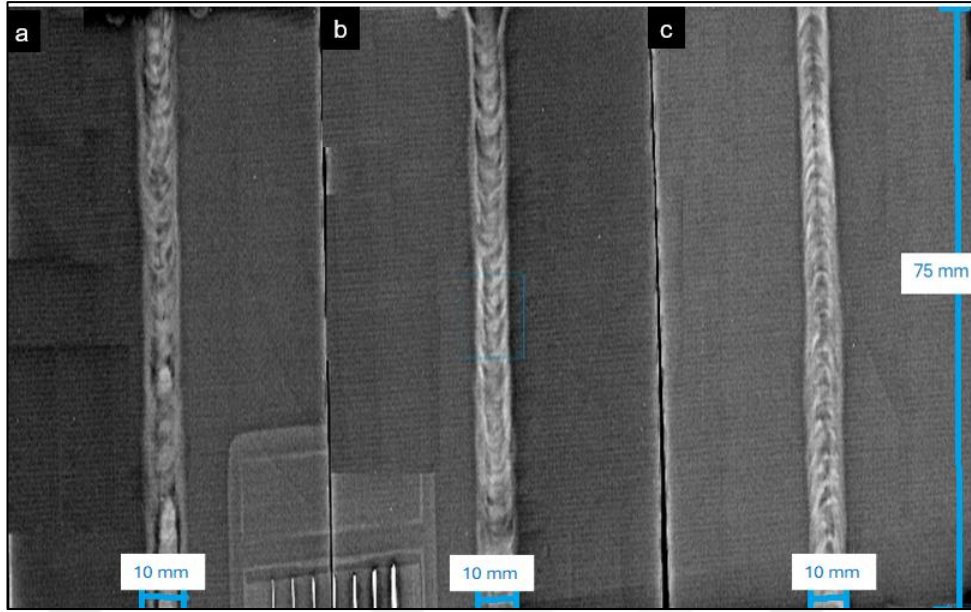
Şekil 7.7: AA6060 radyografi dolgu Al5123, a) 75 A, b) 80 A, c) 85 A.

Şekil 7.7 de gösterilen, Al5123 dolgu malzemesi kullanılan numunelere ait radyograflar da dolgu malzemesi ile ana malzemenin uyum sağladığı ISO standardına göre kusur kabul edilen bir süreksizlik bulunmadığı gözlemlenmiştir [37]. Akım artışına bağlı olarak ısı girdisindeki artış pasolar arasındaki geçişlerin belirginliğinin azalmasına sebep olduğu için daha homojen bir kaynak elde edildiği görülmektedir. AA7075 e ait radyograflar Şekil 7.8-7.9’da gösterilmektedir.



Şekil 7.8: AA7075 radyografı dolgu AA7075, a) 75 A, b) 80 A, c) 85 A.

Şekil 7.8 de gösterilen, AA7075 dolgu malzemesi kullanılan numunelere ait radyograflar da dolgu malzemesi ile ana malzemenin aynı mekanik ve kimyasal özelliklere sahip olması sebebiyle katılaşma esnasındaki yüksek termal gerilmeler olduğu, bu gerilmeler nedeniyle kaynak merkezinde gerilme çatlakları olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 7.8’deki AA7075-dolgu malzeme AA7075 numunelerindeki çatlaklar ISO standardına göre bütün kabul seviyelerinde uygun değil olarak belirtilmiştir [37].



Şekil 7.9: AA7075 radyografi dolgu Al5123, a) 75 A, b) 80 A, c) 85 A.

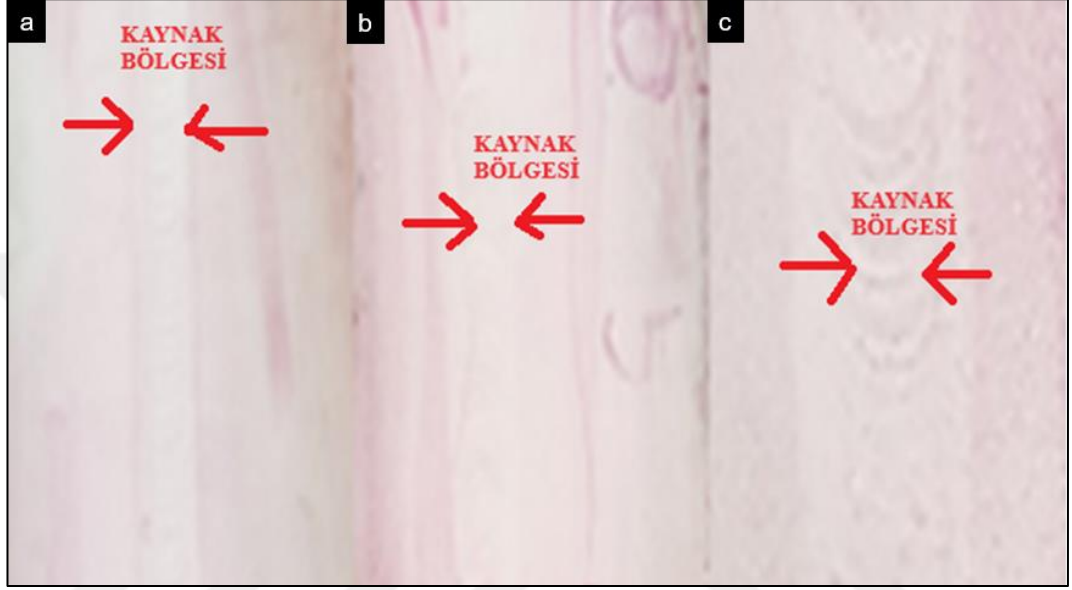
Şekil 7.9 da gösterilen, Al5123 dolgu malzemesi kullanılan numunelere ait radyograflar da dolgu malzemesi ile ana malzemenin uyum sağladığı ISO standardına göre kusur kabul edilen bir süreksizlik bulunmadığı gözlemlenmiştir [37]. Fakat kaynak paso geçişlerinin çok belirgin ve düzensiz olduğu, akım artışına bağlı olarak ısı girdisindeki artışın pasolar arasındaki geçişleri düzenlediği görülmektedir. Numunelerin radyografik muayene testi sonuçlarına TS EN ISO 10675-2 standardına göre değerlendirilmiş olup sonuçları Tablo 7.3’ te gösterilmiştir.

Tablo 7.3: Radyografik muayene testi sonuçları.

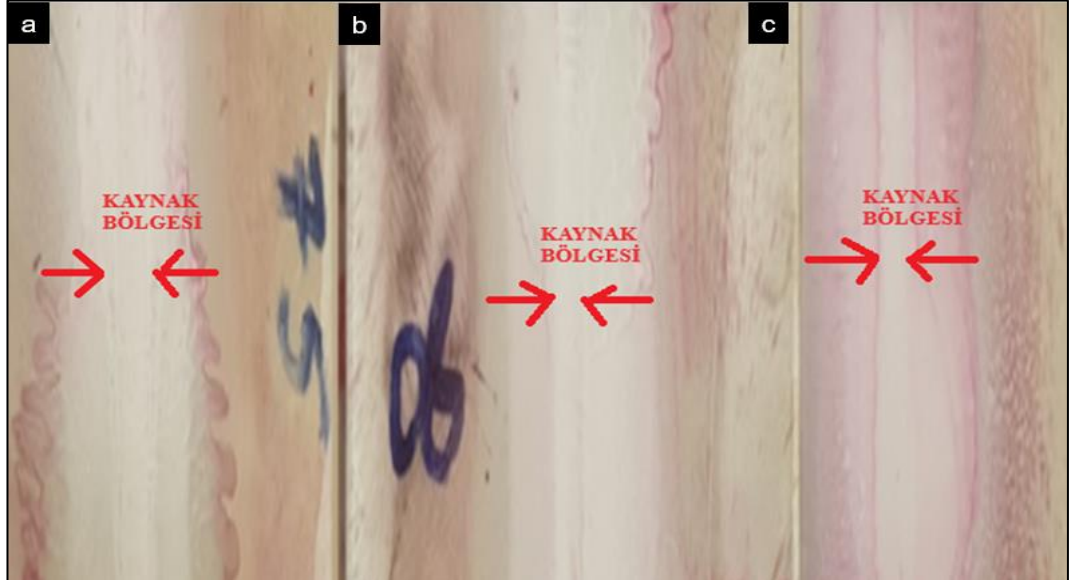
Deney Materyali	Dolgu Materyali	TS EN ISO 10675-2
AA 2024	AA 2024	Uygun Değil
AA 2024	Al 5123	Uygun Değil
AA 2024	Al 4043	Uygun
AA 5754	AA 5754	Uygun
AA 5754	Al 5123	Uygun
AA 6060	AA 6060	Uygun Değil
AA 6060	Al 5123	Uygun
AA 7075	AA 7075	Uygun Değil
AA 7075	Al 5123	Uygun

7.2.2. Sıvı Penetrant ile Muayene

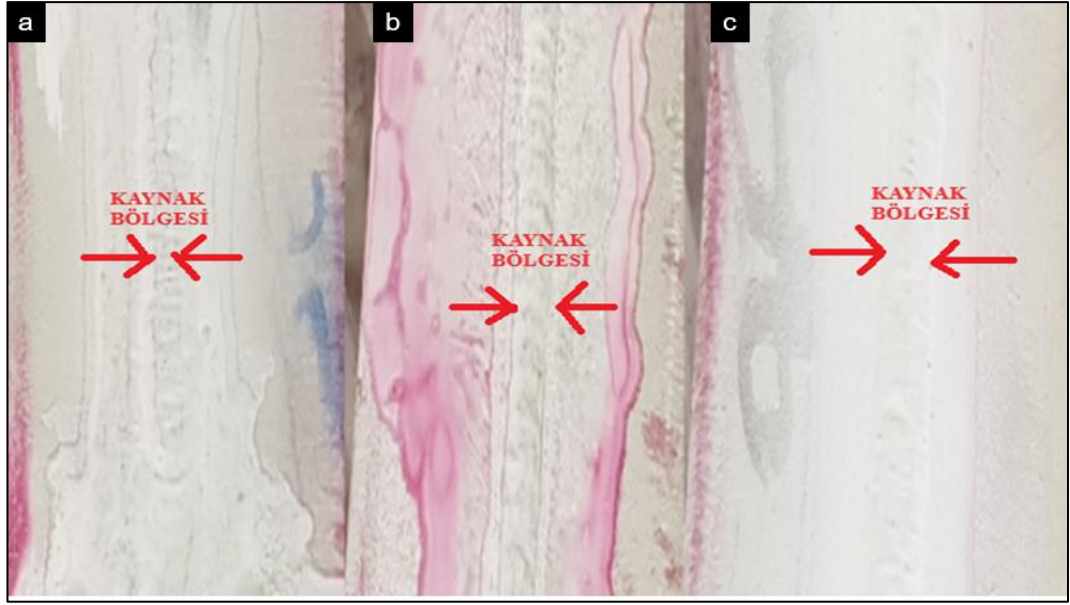
Tablo 7.3'te uygun olduğu gösterilen numunelerin sıvı penetrant testi sonuçları; AA 2024-dolgu Al 4043 Şekil 7.10'da, AA 5754-dolgu Al 5123 Şekil 7.11'de, AA 6060-dolgu Al 5123 Şekil 7.12'de ve AA 7075-dolgu Al 5123 Şekil 7.13'de gösterilmektedir.



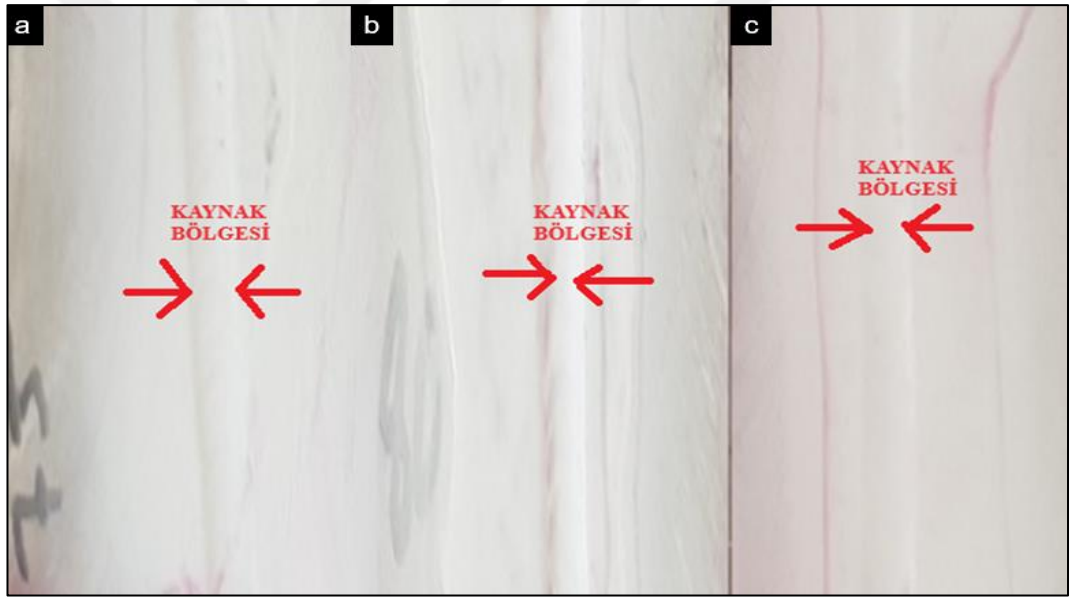
Şekil 7.10: AA2024 sıvı penetrant ile muayene, a) 75 A, b) 80 A, c) 85 A.



Şekil 7.11: AA5754 sıvı penetrant ile muayene, a) 75 A, b) 80 A, c) 85 A.



Şekil 7.12: AA 6060 sıvı penetrant ile muayene, a) 75 A, b) 80 A, c) 85 A.

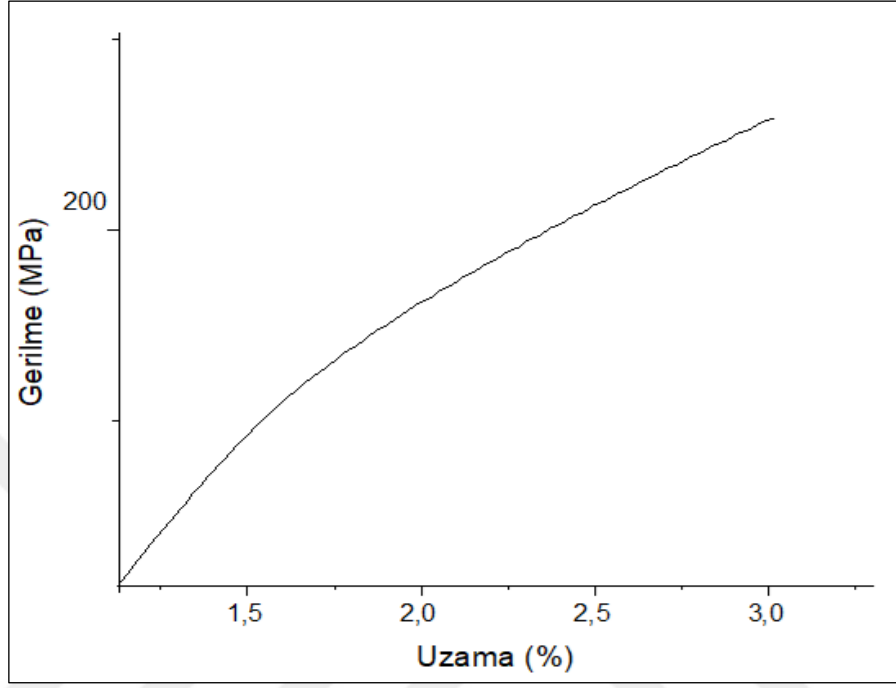


Şekil 7.13: AA 7075 sıvı penetrant ile muayene, a) 75 A, b) 80 A, c) 85 A.

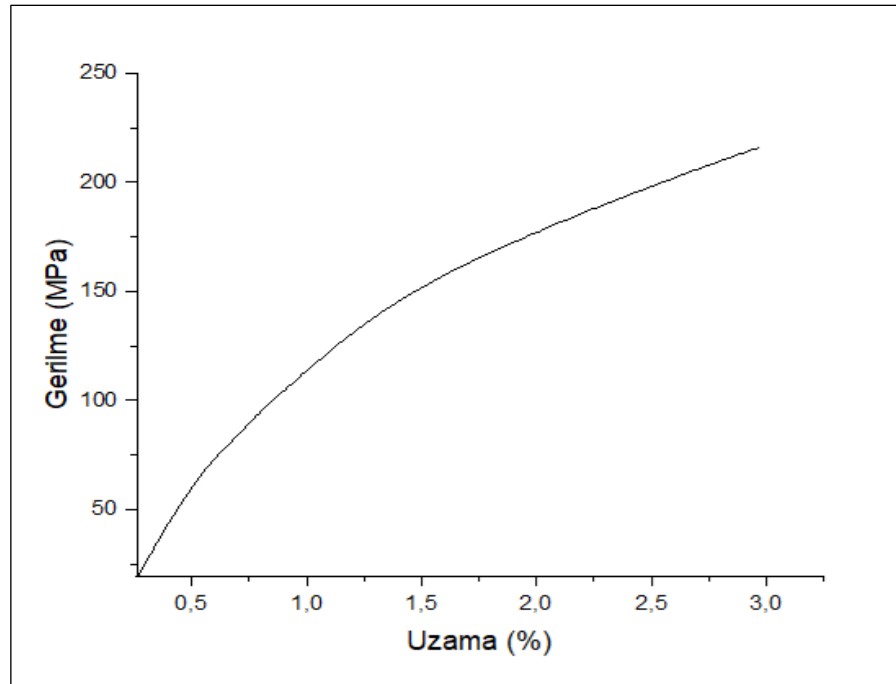
Sıvı penetrant ile muayene test sonuçları TS EN ISO 23277 standardına göre değerlendirilmiş olup, kusur kabul edilen yüzeye açık süreksizlik bulunmadığı gözlemlenmiştir [38].

7.2.3. Çekme Testi

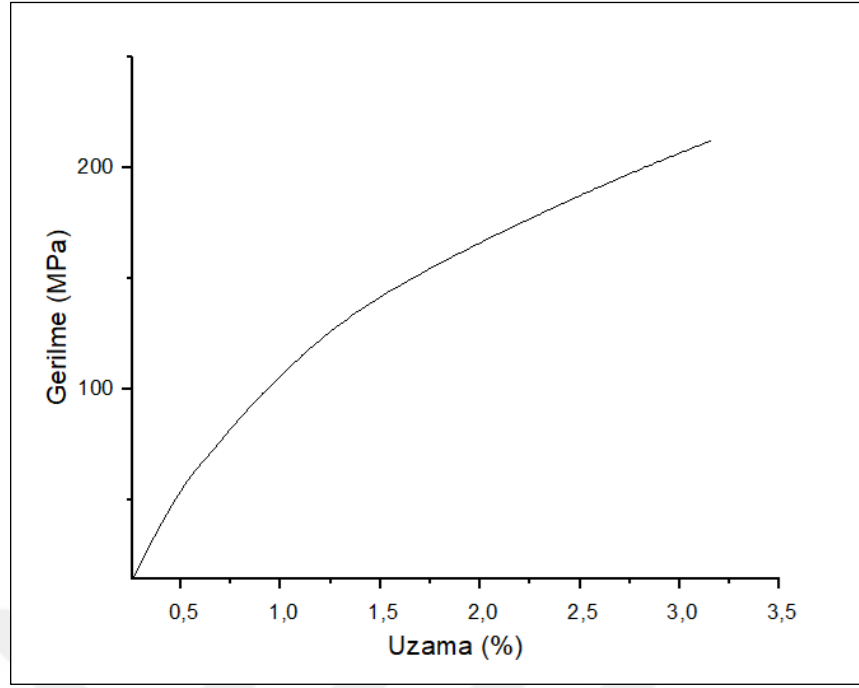
AA2024-dolgu malzemesi Al4043 numunelere ait, çekme testi grafikleri Şekil 7.14-7.15-7.16’da gösterilmektedir.



Şekil 7.14: AA2024 75A çekme testi eğrisi.

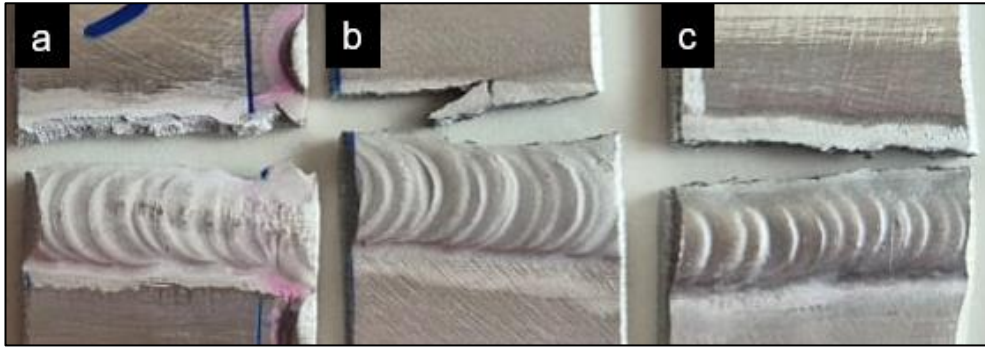


Şekil 7.15: AA2024 80A çekme testi eğrisi.



Şekil 7.16: AA2024 85A çekme testi eğrisi.

Şekil 7.14-7.15-7.16 incelendiğinde AA 2024 numunelerin çok az miktarda uzama olduğu ve ani kırılmaya uğradığı gözlemlenmiştir. Kopma bölgesine ilişkin görsel Şekil 7.17 de gösterilmektedir.



Şekil 7.17: AA2024 numunelerin kopma bölgeleri, a) 75 A, b) 80 A, c) 85 A.

Krishnaja Devireddy ve arkadaşlarının çalışmasındaki gibi AA 2024 numunelerinin çekme dayanımı 200-230 MPa aralığında olduğu, kopmanın ITAB'da olduğu görülmektedir [26].

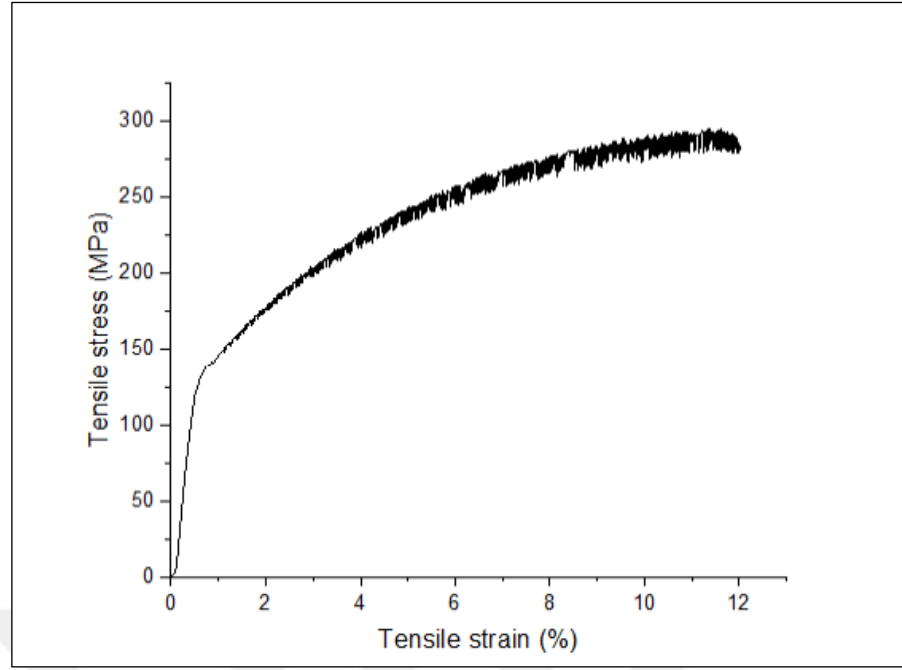
AA 2024 numunelerin çekme testi sonuçlarına ilişkin bilgiler Tablo 7.6 gösterilmektedir.

Tablo 7.4: AA2024 çekme testi sonuçları.

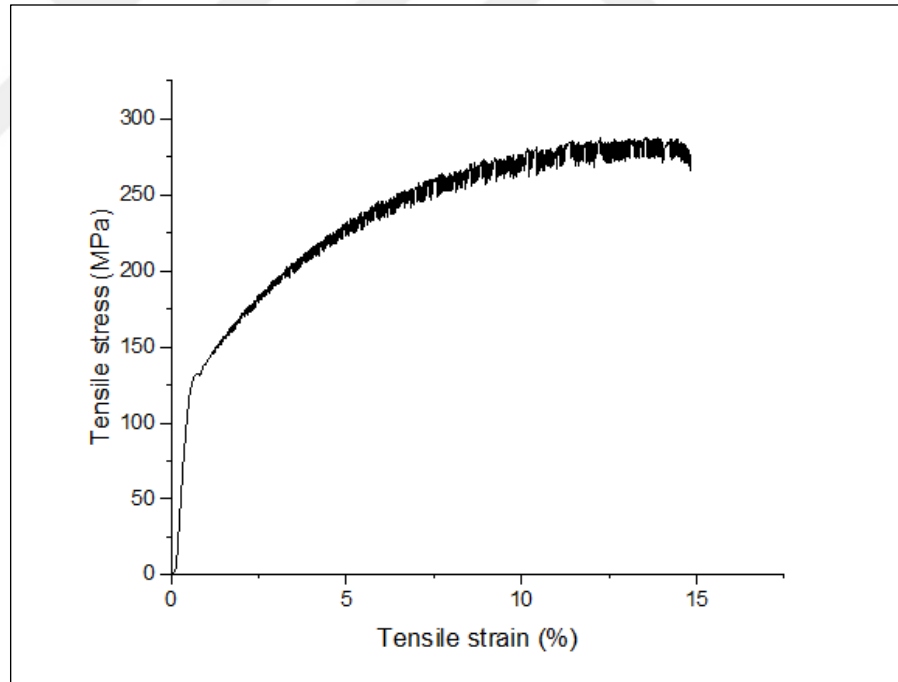
Amper	75 A	80A	85A
Elastisite Modülü	93,16	92,95	91,19
Akma Dayanımı (MPa)	160,13	140,70	130,80
Çekme Dayanımı (MPa)	229,23	215,83	212,24
Kopma Bölgesi	ITAB Bölgesi	ITAB Bölgesi	ITAB Bölgesi

Tablo 7.4 AA 2024 alaşımının çekme test sonuçları, incelendiğinde deneyler esnasında kullanılan T3 temper özelliklerinin kaynak işlemi esnasında kaybedildiğinin ve 0 (tempersiz) halinin akma dayanımını ve çekme dayanımını göstermiş olduğu görülmektedir. Numunelerin çekme dayanımının, ana malzemeye göre daha düşük olması, kaynak esnasında gözenekli ve kusurlu yapının ITAB'ta birikmiş olmasıyla ve çökelmelerin en yoğun bu bölgede olmasıyla açıklanmıştır [26]. Ayrıca kaynak esnasında kullanılan akımın artmasına bağlı olarak girdisindeki artış, Mg_2Si ve $CuAl_2$ partikülleri oluşumunu hızlandırdığı, gözenekli ve kusurlu yapıyı artırdığı için çekme dayanımını ve akma dayanımını olumsuz etkilemiştir [31].

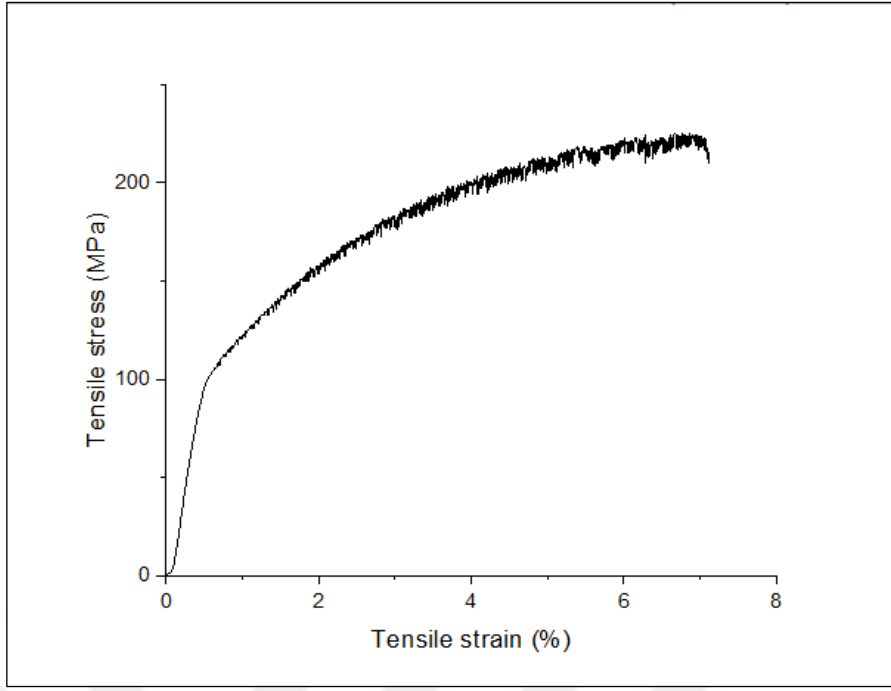
AA5754- dolgu malzemesi Al5123 numunelere ait, çekme testi grafikleri Şekil 7.18-7.19-7.20'de gösterilmektedir.



Şekil 7.18: AA 5754 75A çekme testi eğrisi.

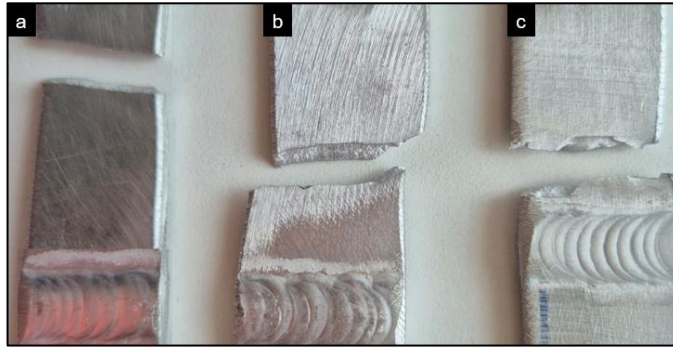


Şekil 7.19: AA5754 80A çekme testi eğrisi.



Şekil 7.20: AA5754 85A çekme testi eğrisi.

Şekil 7.18-7.19-7.20 incelendiğinde AA5754 numunelerin sünek davranış gösterdiği, kırılmadan önce plastik şekil değiştirmeye uğradığı gözlemlenmiştir. Kopma bölgesine ilişkin görsel Şekil 7.21’de gösterilmektedir.



Şekil 7.21: AA5754 numunelerin kopma bölgeleri, a) 75 A, b) 80 A, c) 85 A.

Arif Karadağ’ın çalışmasındaki gibi AA5754 alaşımı numunelerinin çekme dayanımının 220-300 MPa aralığında, akma dayanımının ise 100-140 MPa aralığında olduğu görülmektedir [34].

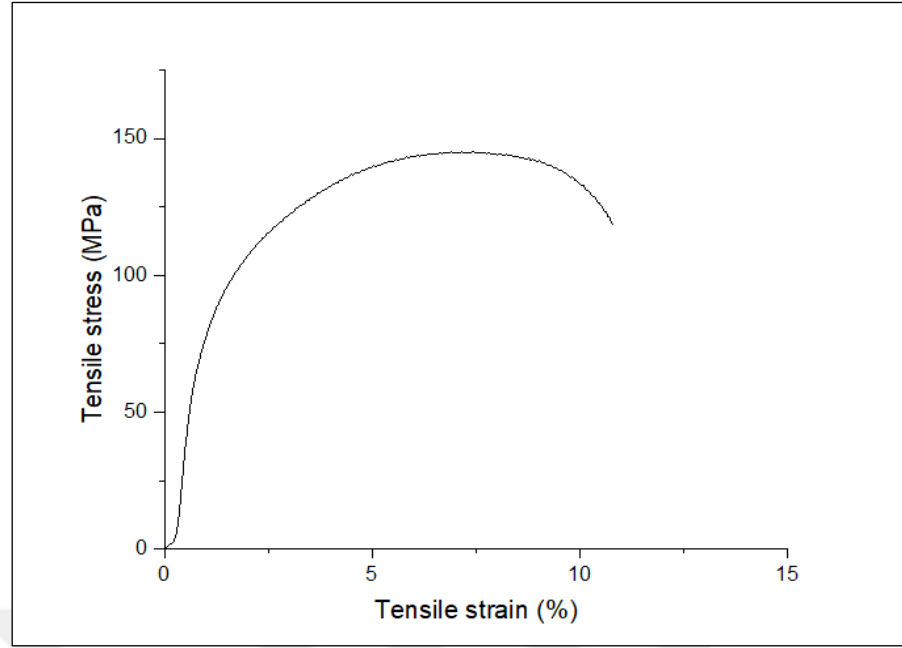
AA 5754 numunelerin çekme testi sonuçlarına ilişkin bilgiler Tablo 7.5’te gösterilmektedir.

Tablo 7.5: AA5754 çekme testi sonuçları.

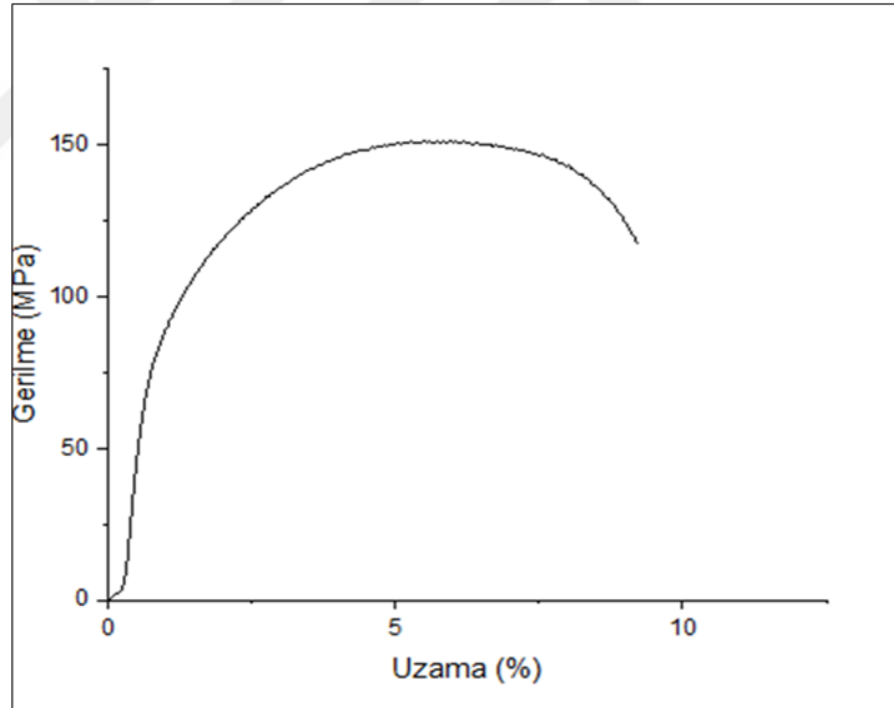
Amper	75 A	80A	85A
Elastisite Modülü	341,56	321,38	296,99
Akma Dayanımı (MPa)	139,25	132,72	101,92
Çekme Dayanımı (MPa)	295,70	287,69	225,12
Kopma Bölgesi	Ana Malzeme	Ana Malzeme	ITAB Bölgesi

Tablo 7.5 AA 5754 ‘ün çekme test sonuçları incelendiğinde deneyler esnasında kullanılan HX4 temper özelliklerini kaynak esnasında kaybettiğinin ve akma dayanımını özelliklerinin akım miktarının artmasına bağlı ısı girdisindeki artma ile önce HX2 sonra H11 aralığına geldiği ve çekme dayanımının ise düşük akımlarda HX6 aralığına olduğu fakat ısı girdisindeki artışla beraber HX4 temper dayanımında kaldığı görülmektedir. Ayrıca kaynak esnasında kullanılan akımın artması ile ısı girdisindeki artış çekme dayanımını ve akma dayanımını olumsuz etkilemiştir. Bu durum yüksek akımda şiddetli arktan dolayı kaynak bölgesindeki gaz , kaynak banyosunda sıkışıp kalmış ve gözenekli bir yapı oluşmasıyla ilişkilendirilmiştir [34].

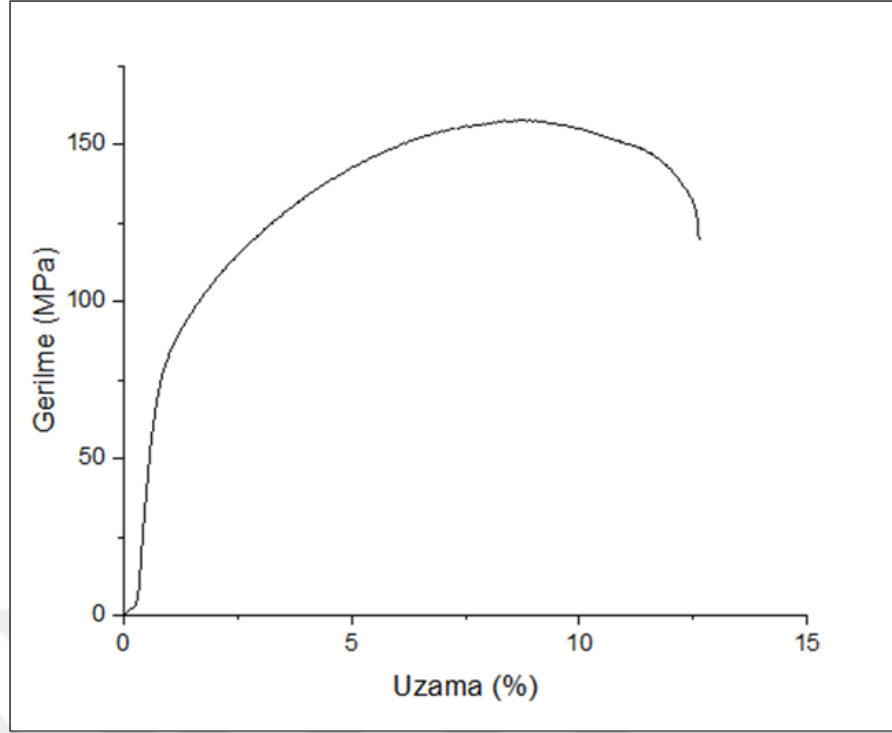
AA6060- dolgu malzemesi olarak Al5123 numunelere ait çekme testi grafikleri Şekil 7.20-7.21-7.22’de gösterilmektedir.



Şekil 7.22: AA 6060 75A çekme testi eğrisi.

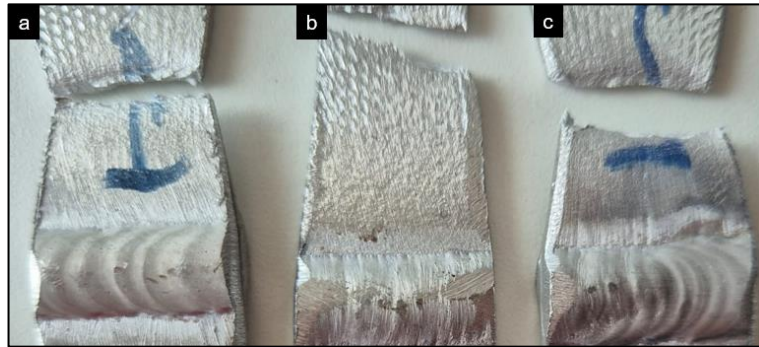


Şekil 7.23: AA 6060 80A çekme testi eğrisi.



Şekil 7.24: AA 6060 85 A çekme testi eğrisi.

Şekil 7.22-7.23-7.24 incelendiğinde AA6060 numunelerin sünek davranış gösterdiği, kırılmadan önce AA 5754 numuneler kadar olmasa da plastik şekil değiştirmeye uğradığı gözlemlenmiştir. Kopma bölgesine ilişkin görsel Şekil 7.25'te gösterilmektedir.



Şekil 7.25: AA6060 numunelerin kopma bölgeleri, a) 75 A, b) 80 A, c) 85 A.

Jialiang Dong ve arkadaşlarının çalışmasındaki gibi AA 6060 alaşımı numunelerinin çekme dayanımlarının 140-160 MPa aralığında olduğu görülmektedir [28].

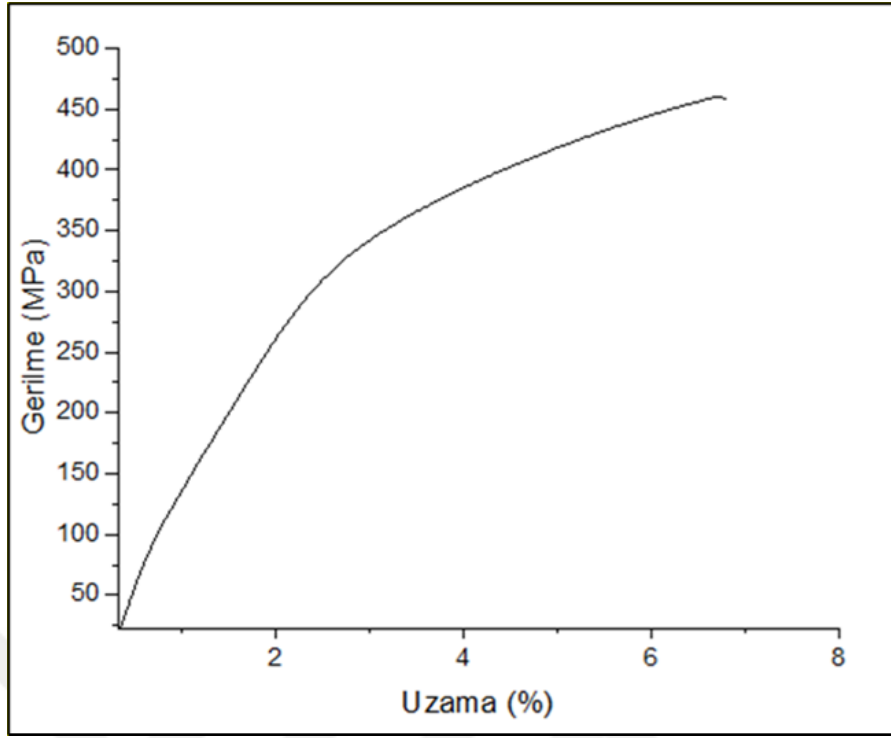
AA 6060 numunelerin çekme testi sonuçlarına ilişkin bilgiler Tablo 7.8 gösterilmektedir.

Tablo 7.6: AA6060 çekme testi sonuçları.

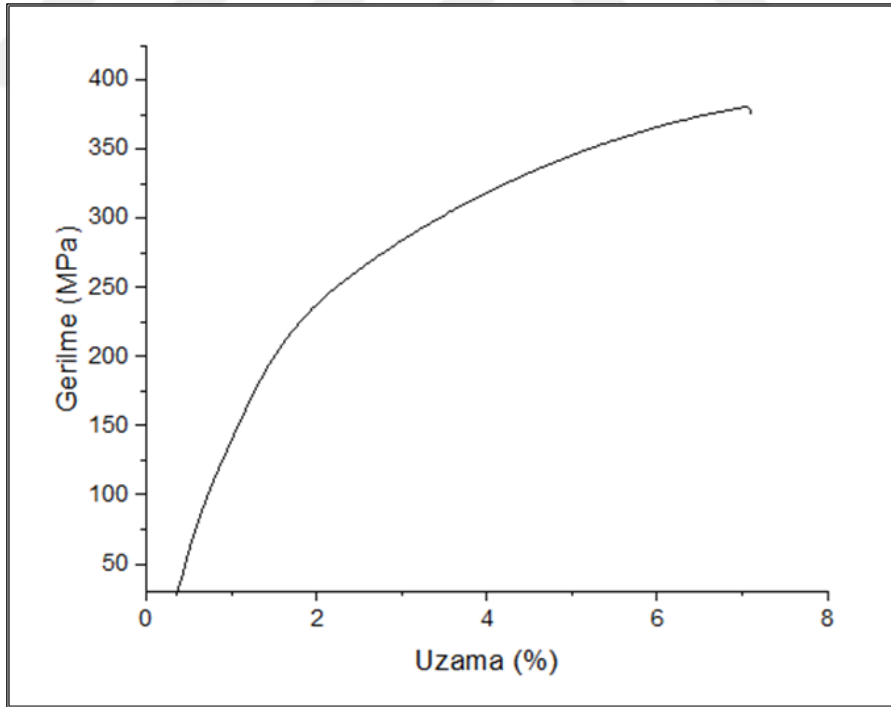
Amper	75 A	80A	85A
Elastisite Modülü	158,69	195,83	208,28
Akma Dayanımı (MPa)	57,25	63,40	65,78
Çekme Dayanımı (MPa)	145,25	151,42	157,77
Kopma Bölgesi	Ana Malzeme	Ana Malzeme	Ana Malzeme

Tablo 7.6 AA 6060 ‘ün çekme test sonuçları incelendiğinde deneyler esnasında kullanılan T1 temper özelliklerinin kaynak işlemi esnasında kaybedildiğinin ve akma dayanımının 0 (tempersiz) haline geldiğinin fakat çekme dayanımının T1 temper özellikleri göstermeye devam ettiği görülmektedir. Bu durumun nedeni 6XXX serisinin mikroyapısında bulunan ince ve küresel çökelmelerin matris içerisinde çözünme mekanizması ile açıklanabilir [28]. Ayrıca kaynak esnasında kullanılan akımın artmasına bağlı ısı girdisindeki artış çekme dayanımını ve akma dayanımını olumlu etkilemiştir. 6XXX serisinin ısıl işlem uygulanabilir ve çökelme sertleşmesi ile mekanik özellikleri iyileştirilebilir özellikte olması nedeniyle ısı girdisindeki artış çökelmeyi artırmış ve mekanik özellikleri iyileştirmiştir [39].

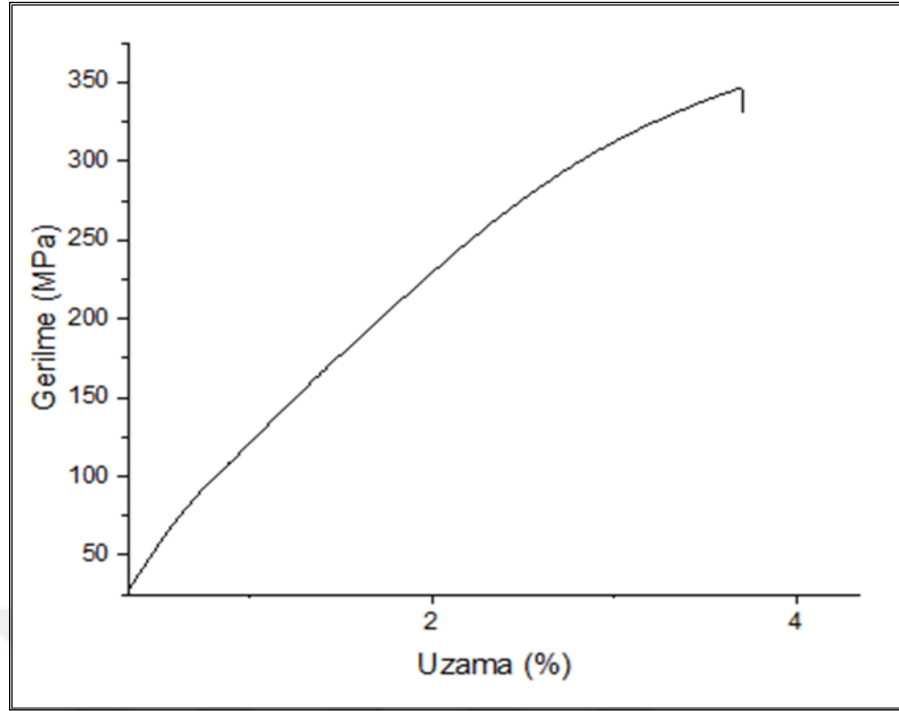
AA7075- dolgu malzemesi olarak Al5123 numunelere ait çekme testi grafikleri Şekil 7.26-7.27-7.28’te gösterilmektedir.



Şekil 7.26: AA 7075 75A çekme testi eğrisi.

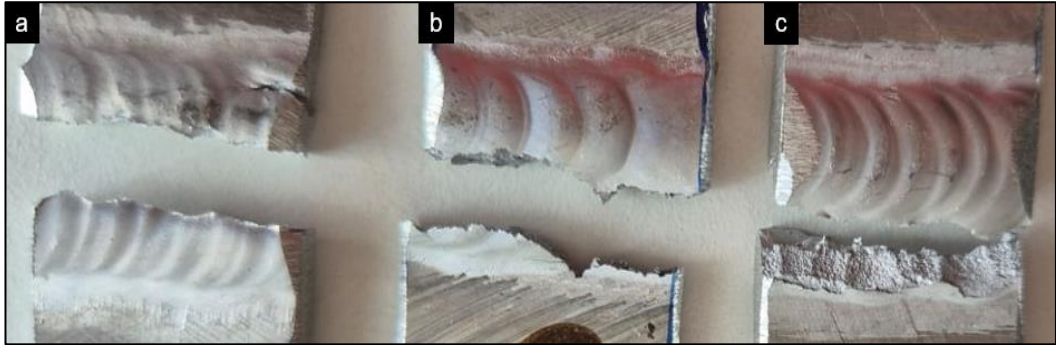


Şekil 7.27: AA 7075 80A çekme testi eğrisi.



Şekil 7.28: AA 7075 85A çekme testi eğrisi.

Şekil 7.26-7.27-7.28 incelendiğinde AA 7075 numunelerin yüksek mukavemete sahip olduğu, AA 2024 gibi çok az uzama olduğu ve ani kırılmaya uğradığı gözlemlenmiştir. Kopma bölgesine ilişkin görsel Şekil 7.29’da gösterilmektedir.



Şekil 7.29: AA7075 numunelerin kopma bölgeleri, a) 75 A, b) 80 A, c) 85 A.

Safa Şahin’in çalışmasındaki gibi AA 7075 alaşımının numunelerinden 80 amper akım çekme dayanımı yaklaşık 382 MPa olduğu görülmektedir [27].

AA 7075 numunelerin çekme testi sonuçlarına ilişkin bilgiler Tablo 7.9 gösterilmektedir.

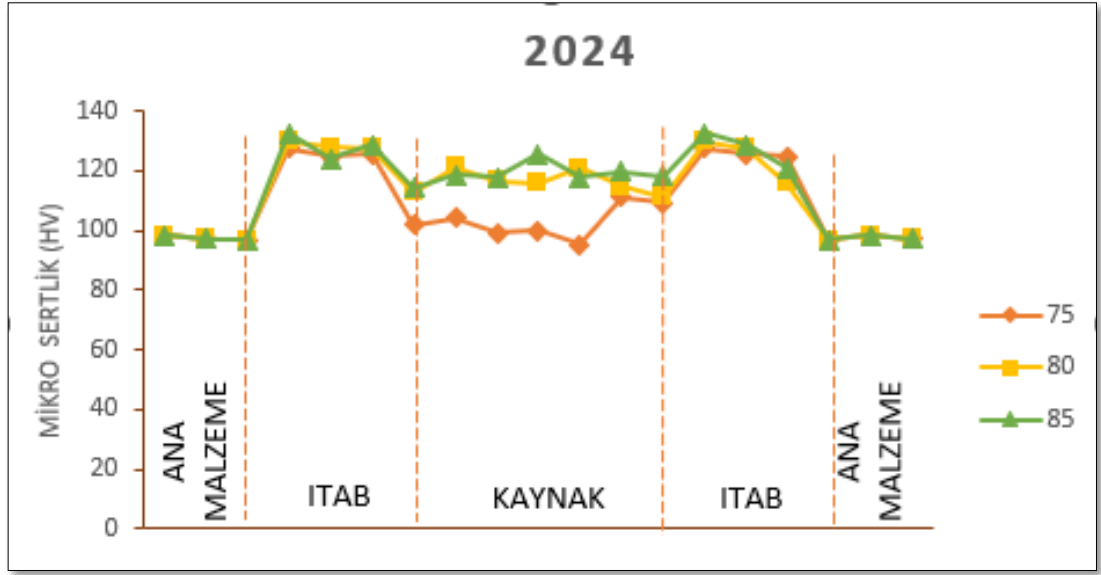
Tablo 7.7: AA 7075 çekme testi sonuçları.

Amper	75 A	80A	85A
Elastisite Modülü	120,58	114,66	103,016
Akma Dayanımı (MPa)	298,21	226,14	273,74
Çekme Dayanımı (MPa)	460,06	380,91	346,57
Kopma Bölgesi	Kaynak Bölgesi	Kaynak Bölgesi	Kaynak Bölgesi

Tablo 7.7 AA 7075 numunelerin çekme test sonuçları incelendiğinde deneyler esnasında kullanılan T6 temper özelliklerinin kaynak işlemi esnasında kaybedildiği görülmektedir. AA 7075 numunelere kaynak işlemi esnasında, alaşım elementlerinin ergime sıcaklıkları arasındaki farktan dolayı homojen kaynak havuzu elde edilemediği için çökeltme sertleştirilmesi ile kazanılan mekanik özelliklerin olumsuz etkilendiği gözlemlenmiştir [40]. Ayrıca kaynak esnasında kullanılan akımın artması çekme dayanımını ve akma dayanımını olumsuz etkilemiştir. Bu durumun akım artışına bağlı olarak ısı girdisindeki artışın çözünmeyi artırarak çökelmelerin azalması ile ilişkilendirilmektedir [27].

7.2.4. Mikro Sertlik Testi (HV)

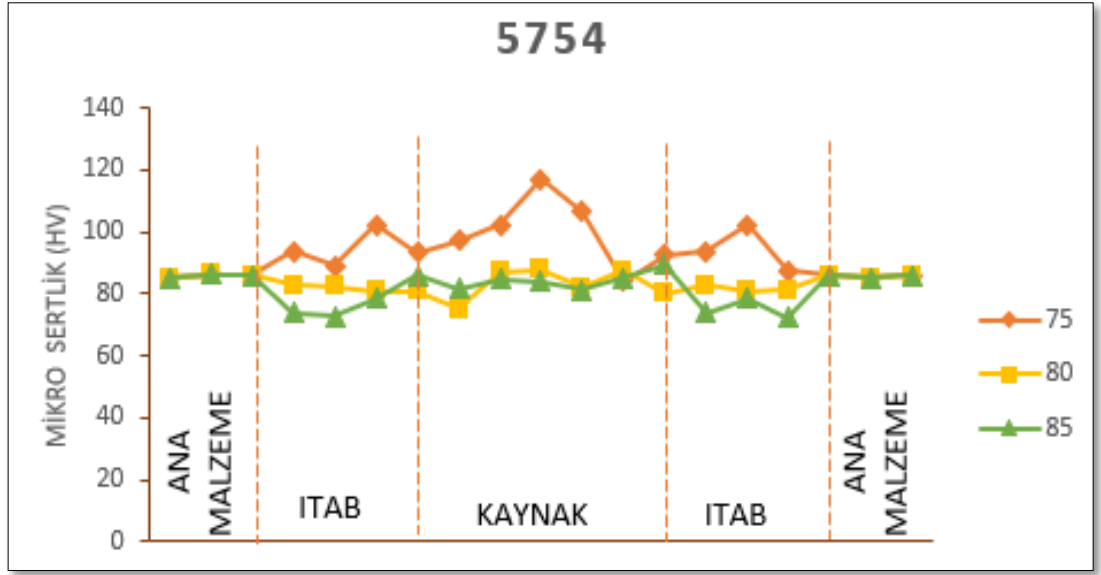
AA2024-dolgu malzemesi olarak Al4043 numunelere ait, mikro sertlik grafiği Şekil 7.30'da gösterilmektedir.



Şekil 7.30: AA2024 mikro sertlik testi.

Krishnaja Devireddy ve arkadaşlarının çalışmasındaki gibi AA 2024 malzemesinin kaynaklı kısmının mikro sertliğinin, ITAB bölgesine göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. ITAB bölgesinde kaynak ve ana malzemeye göre yüksek sertlik olması tane sınırı boyunca oluşan çökelmeler, gözenekli ve kusurlu yapının bulunması ile açıklanmıştır [26]. Akımın artmasına bağlı olarak ısı girdisindeki artış tane sınırı boyunca Mg_2Si partikülleri çökelmelerini artırdığı için kaynak bölgesinde ve kaynak-ITAB geçiş bölgesinde mikro sertlikte artışa sebep olmuştur [31]. Fakat ITAB bölgesinde akım artışına bağlı ısı girdisindeki artışının önemli bir etkisi olmadığı gözlemlenmiştir. Bu durum ITAB bölgesinde Mg_2Si partikülleri ile $CuAl_2$ partiküllerinin bulunmasıyla açıklanmaktadır [31]. Krishnaja Devireddy ve arkadaşlarının çalışmasındaki kaynak, kaynak ITAB birleşimine ve ITAB bölgesi sertlik değerleri ile 75 amper ile kaynatılan numunenin sertlik değerlerinin ortalama aynı aralıkta olduğu gözlemlenmiştir [26].

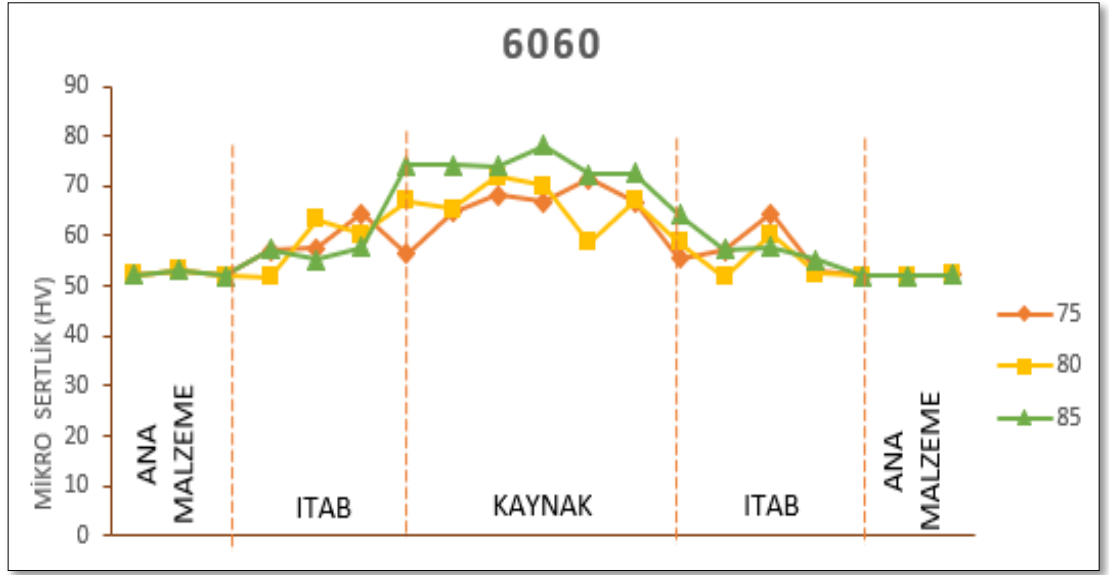
AA5754- dolgu malzemesi Al5123 numunelere ait, mikro sertlik grafiği Şekil 7.31’de gösterilmektedir.



Şekil 7.31: AA5754 mikro sertlik testi.

Ceyhun Köse'nin çalışmasındaki gibi AA 5754 malzemesinin kaynak bölgesinde, kaynak ITAB birleşiminde ve ITAB bölgesinde ortalama mikro sertlik değerlerinin benzer olduğu gözlemlenmiştir [7]. Bu durumun temel nedeni kaynak malzemesi ile dolgu malzemesinin ikisinin de 5XXX serisi olmasıdır. Sadece 75 amper ile yapılan numunenin kaynak bölgesinde ve ITAB bölgesinde mikro sertliğin ana malzemeye göre biraz arttığı gözlemlenmiştir. Akımın düşük olması kaynak havuzunda çözünmeyi, yeniden kristalleşmeyi ve homojen dağılımı olumsuz etkilemiş, mikrosertlik değerinin diğer numunelere göre daha yüksek olması ile açıklanmıştır [34].

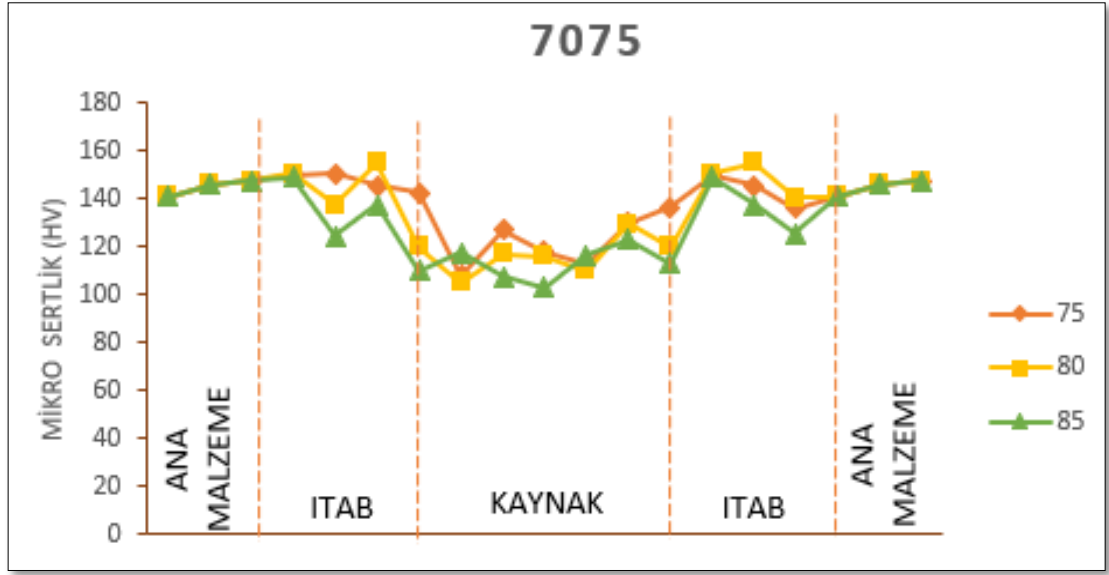
AA6060- dolgu malzemesi Al5123 numunelere ait, mikro sertlik grafiği Şekil 7.32'e gösterilmektedir.



Şekil 7.32: AA6060 mikro sertlik testi.

Jialiang Dong ve arkadaşlarının çalışmasındaki gibi AA 6060 malzemesinin kaynak bölgesinde, kaynak ITAB birleşiminde ve ITAB bölgesinde mikrosertliğin ana malzemeye göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Kaynak bölgesinde, kaynak işlemi sırasındaki ergime ve yeniden kristalleşme ile oluşan küresel çökelmeler kaynak bölgesinin daha sert olmasına, kaynak esnasındaki ısı girdisine bağlı çökelmeler ise ITAB'ta da sertlik artışına neden olmuştur [28]. Akımın artmasına bağlı olarak ısı girdisindeki artış kaynak bölgesinde ve kaynak-ITAB geçiş bölgesinde mikro sertlikte artışa sebep olmuştur. Isı girdisinin artması kaynaklı bağlantıda mukavemeti yükselten Mg_2Si partiküllerin kabalaşarak çökmesiyle ilişkilendirilmiştir [45]. Fakat ITAB bölgesine akım artışının önemli bir etkisi olmadığı gözlemlenmiştir. Bu durum ITAB bölgesinde Mg_2Si partiküllerinin çözünmesinde kayda değer bir artış olmaması açıklanabilir.

AA7075- dolgu malzemesi Al5123 numunelere ait mikro sertlik grafiği Şekil 7.33'te gösterilmektedir.

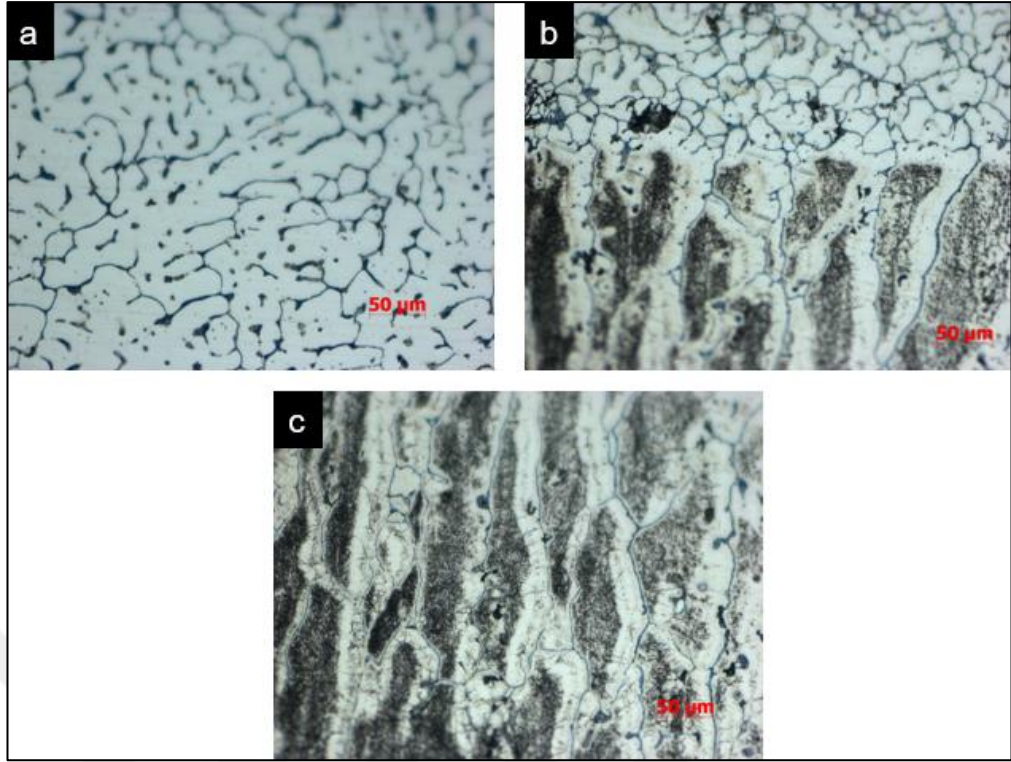


Şekil 7.33: AA7075 mikro sertlik testi.

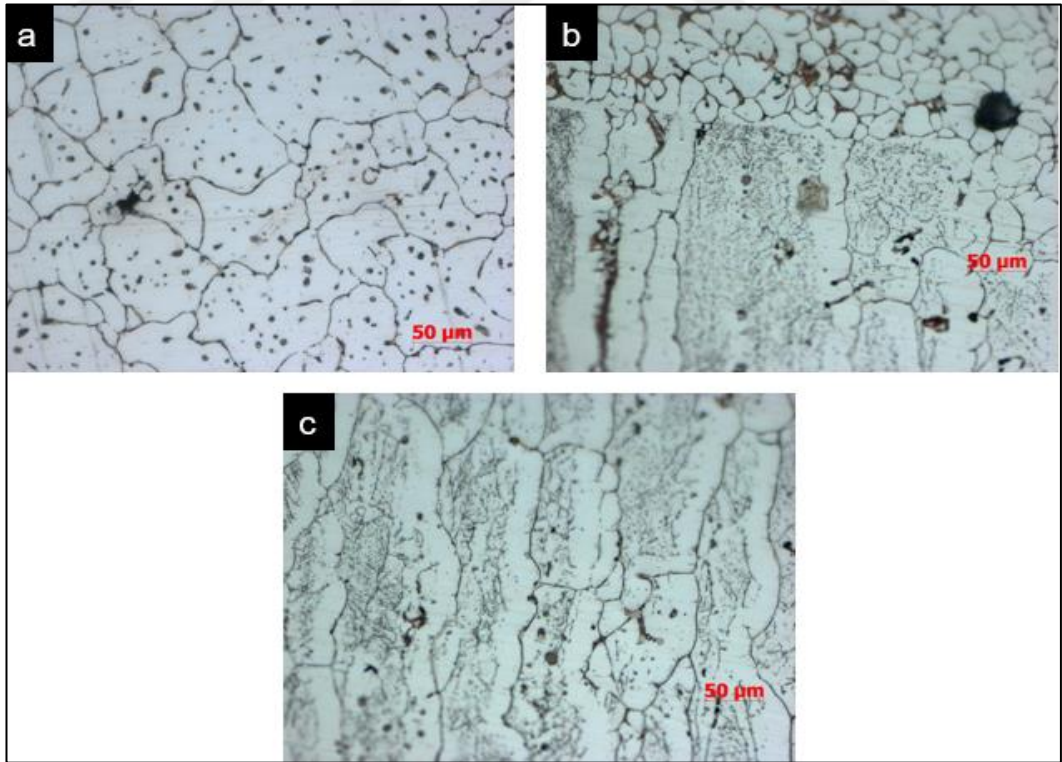
Safa Şahin'in çalışmasındaki gibi AA 7075 malzemesinin kaynaklı kısmının mikro sertliğinin kaynak ITAB birleşimine ve ITAB bölgesine göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir [27]. Kaynak esnasında kullanılan dolgu telinin daha yumuşak olması kaynak bölgesinin ve kaynak-ITAB birleşim bölgesinin sertliğinin ana malzemeden daha az olmasına sebep olduğu gözlemlenmiştir. ITAB bölgesinde ise akım artışına bağlı ısı girdisinin artması az miktarda da olsa sertlik değişimine sebep olmuştur. Isı girdisi artıkça çözünme ve yeniden kristalleşmenin artması nedeniyle düşük amper ile kaynak yapıldığında daha sert ITAB bölgesi elde edilmiştir [40]. SAFA ŞAHİN'in çalışmasındaki kaynak, kaynak ITAB birleşimine ve ITAB bölgesi sertlik aralığı ile numunelerin değerleri ile benzerlik göstermektedir [27].

7.2.5. Optik Mikroskop Görüntüleri

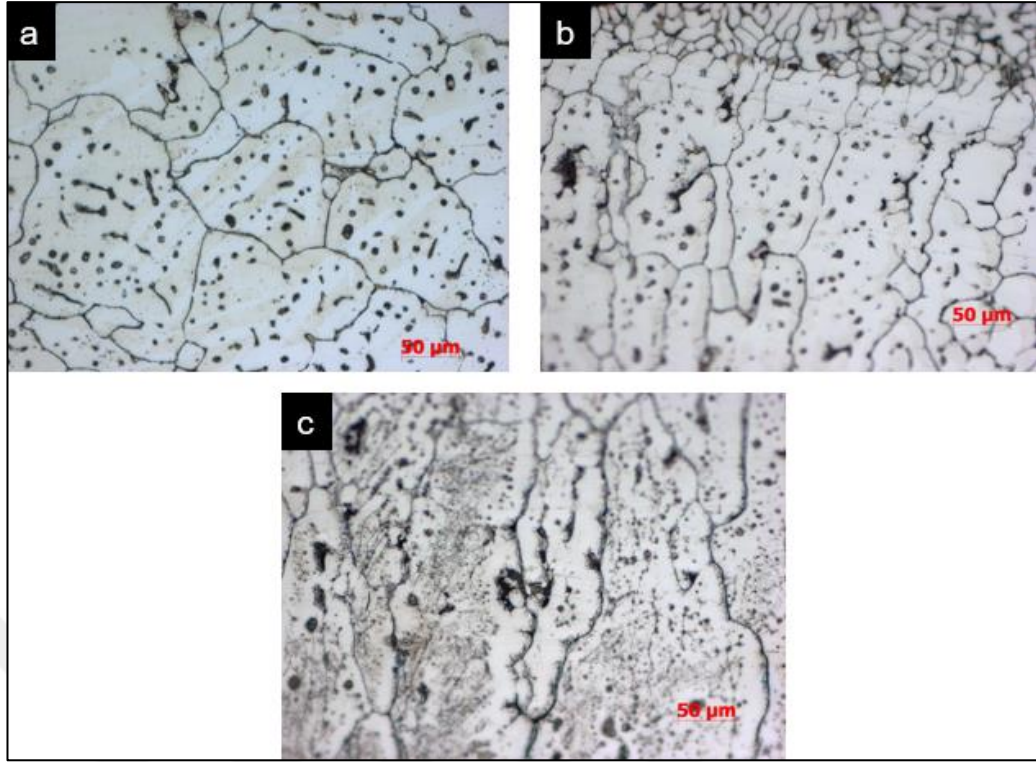
AA2024 75 A OM görüntüleri Şekil 7.34, AA2024 80 A OM görüntüleri Şekil 7.35 ve AA2024 85 A OM görüntüleri Şekil 7.36'da gösterilmektedir.



Şekil 7.34: AA2024 75 A OM görüntüleri a) kaynak bölgesi, b) kaynak-ITAB birleşim bölgesi, c) ITAB bölgesi.



Şekil 7.35: AA2024 80A OM görüntüleri a) kaynak bölgesi, b) kaynak-ITAB birleşim bölgesi, c) ITAB bölgesi.



Şekil 7.36: AA2024 85A OM görüntüleri a) kaynak bölgesi, b) kaynak-ITAB birleşim bölgesi, c) ITAB bölgesi.

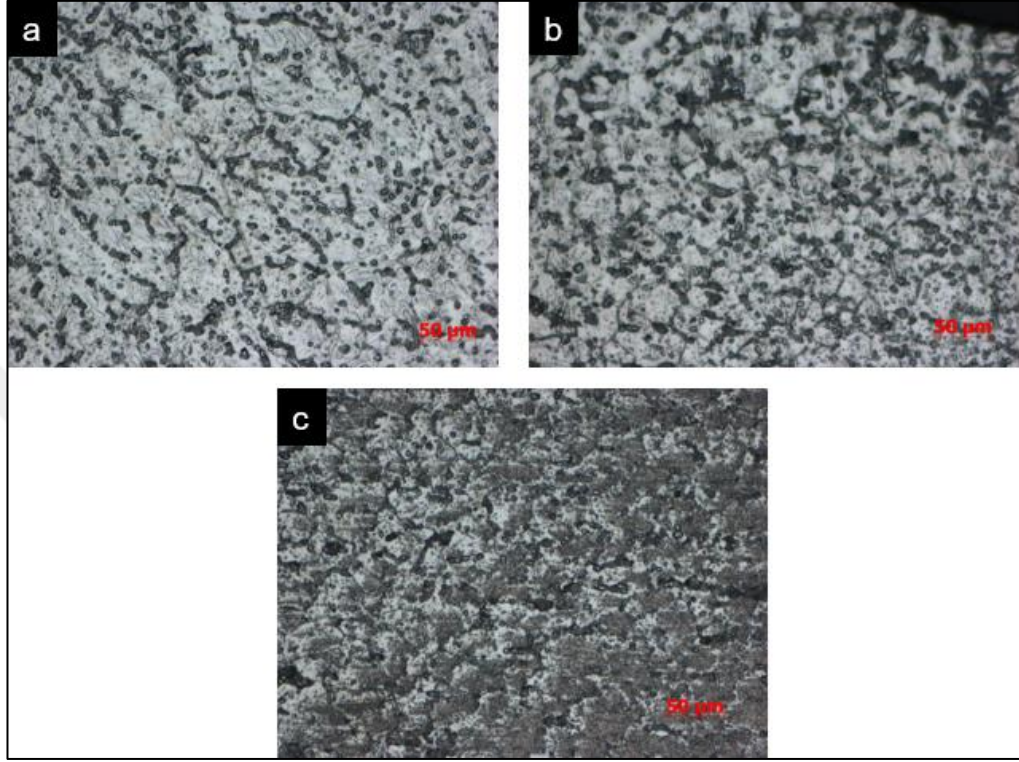
AA 2024 numunelerin OM görüntüleri incelendiğinde, Krishnaja Devireddy ve arkadaşlarının çalışmasındaki gibi AA 2024 malzemesinin kaynaklı kısımda düzensiz fakat küçük tanecikler bulunurken ITAB kaynak birleşim noktasında daha düzenli ve daha küçük tanecikler olduğu görülmektedir [26]. ITAB mikroyapıları, α -Al ve θ -fazlarının daha kaba ve büyümüş epitaksiyel dentritik tanelerini içerir. Mg ve diğer ötektik fazdaki elementlerin kaynak havuzundaki soğuma ve katılaşma hızı mikroyapı modifikasyonuna neden olmuştur [26]. ITAB bölgesinde taneciklerin uzadığı ve büyüdüğü gözlemlenmiştir.

AA 2024 'e ait kaynak, kaynak-ITAB birleşim noktası ve ITAB bölgelerinin mikroyapı görüntüleri incelendiğinde;

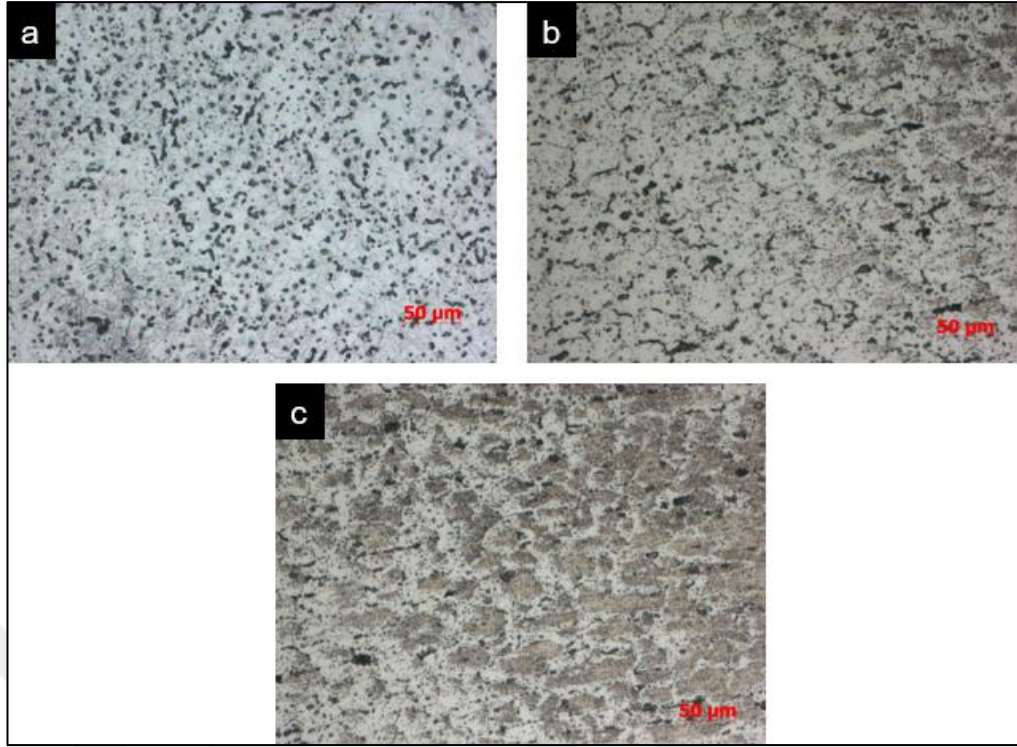
- Kaynaklı bölgenin mikroyapısında akım artıkça daha düzenli ve daha küçük taneler olduğu ve tane büyüklüğünün daha homojen dağıldığı gözlemlenmiştir.
- Kaynak ITAB birleşim bölgesinin mikroyapısında akımın artışının kayda değer bir etkisi olmamış bütün akım değerlerinde kaynak ve ITAB bölgesine kıyasla daha küçük ve düzenli taneler olduğu gözlemlenmektedir.
- ITAB bölgesinin mikroyapısında akım artıkça tane büyüklüğünün genişleme ve uzama miktarının arttığı daha uzun ve geniş taneler olduğu gözlemlenmiştir.

Tane büyüklüklerindeki bu değişimler ısı girdisindeki artışın kaynak havuzundaki ötektik fazdaki elementlerin soğuma ve katılaşma hızına etkisi ile açıklanabilir.

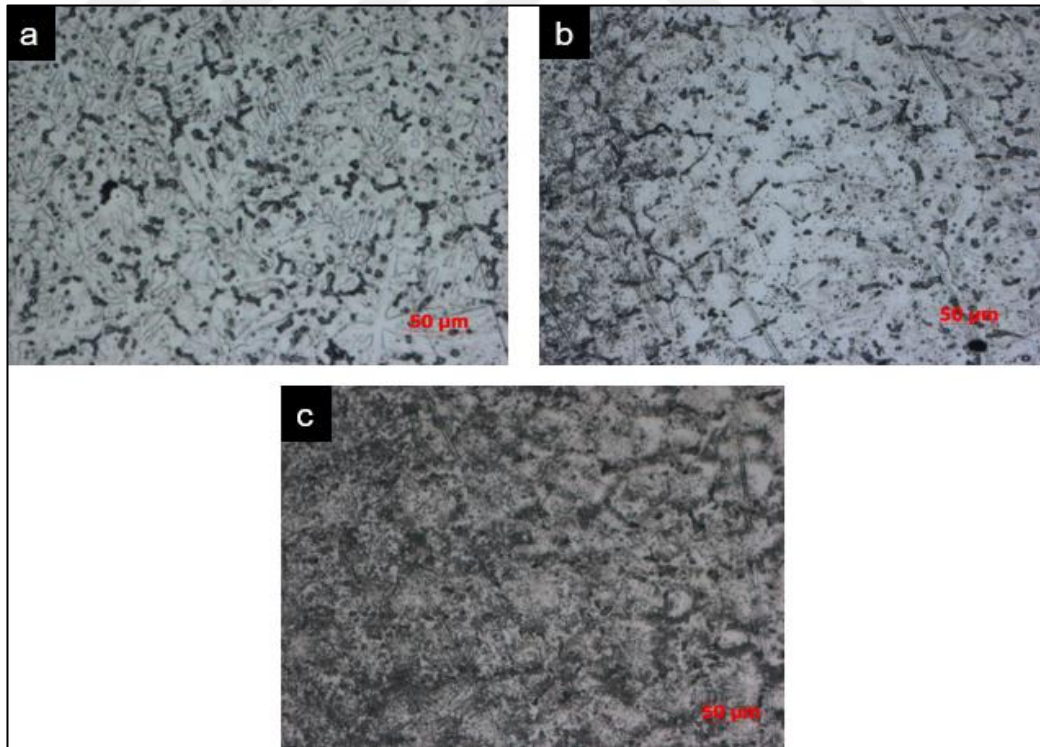
AA5754 75 A OM görüntüleri Şekil 7.37, AA5754 80 A OM görüntüleri Şekil 7.38 ve AA5744 85 A OM görüntüleri Şekil 7.39’da gösterilmektedir.



Şekil 7.37: AA5754 75A OM görüntüleri a) kaynak bölgesi, b) kaynak-ITAB birleşim bölgesi, c) ITAB bölgesi.



Şekil 7.38: AA5754 80A OM görüntüleri a) kaynak bölgesi, b) kaynak-ITAB birleşim bölgesi, c) ITAB bölgesi.



Şekil 7.39: AA5754 85A OM görüntüleri a) kaynak bölgesi, b) kaynak-ITAB birleşim bölgesi, c) ITAB bölgesi.

Ceyhun Köse'nin çalışmasındaki gibi AA 5754 malzemesinin kaynak bölgesinde, ITAB birleşiminde ve ITAB bölgesinde tane sınırlarında dentritik büyüme ve çökelmeler olduğu gözlemlenmiştir [7]. Bu dendritler kaynağın soğuması esnasında oluşmuştur, bu dendritler soğuma hızına bağlı olarak boyutlarında farklılıklar arz ettiği gözlenmiştir. Dentritik büyüme ve çökelmeler tane sınırlarının belirgin olarak gözükmemesine engel olmuştur [7]. Bu nedenle tane büyüklük ve geometrik olarak şekilleri ayırt edilememektedir.

AA 5754 'a ait kaynak, kaynak-ITAB birleşim noktası ve ITAB bölgelerinin mikroyapı görüntüleri incelendiğinde;

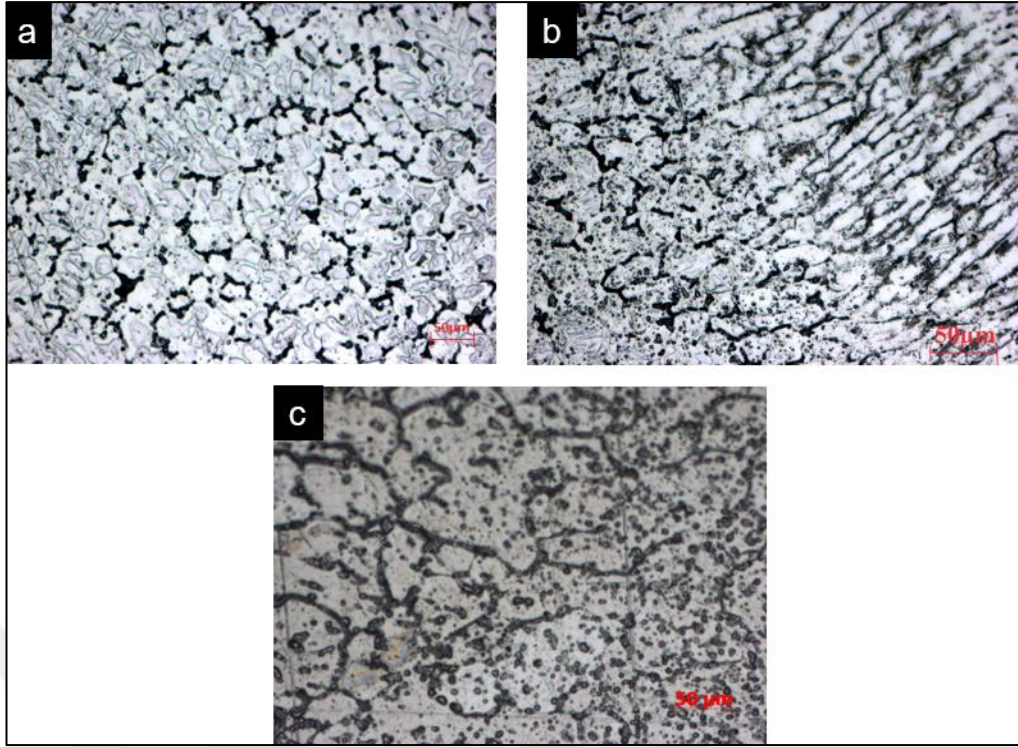
a. Kaynaklı bölgenin mikroyapısında akım arttıkça tane sınırlarında dentritik büyüme ve çökelmelerin azaldığı fakat tane sınırlarında belirginleşme olmadığı gözlemlenmiştir.

b. Kaynak ITAB birleşim bölgesinin mikroyapısında akım arttıkça tane sınırlarında dentritik büyüme ve çökelmelerin azaldığı ve tane sınırlarının belirginleşmeye başladığı gözlemlenmiştir.

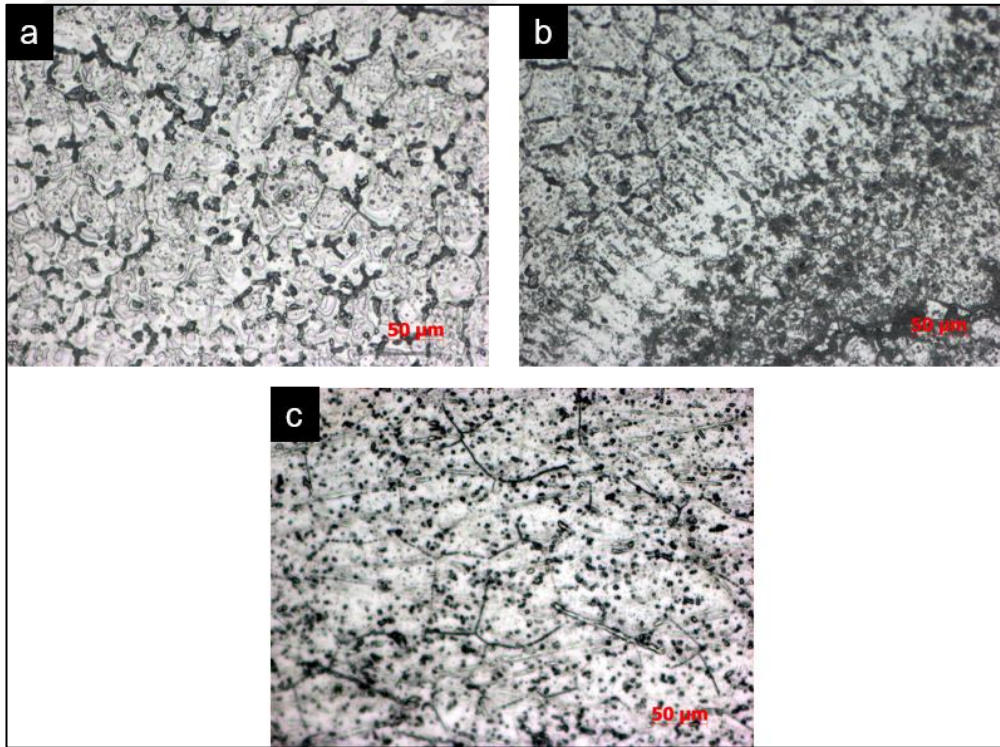
c. ITAB bölgesinin mikroyapısında akım arttıkça tane sınırlarında dentritik büyüme ve çökelmelerin azaldığı gözlemlenmiştir.

Bu durum ısı girdisinin artışına bağlı olarak çözünmenin artması ile açıklanabilir.

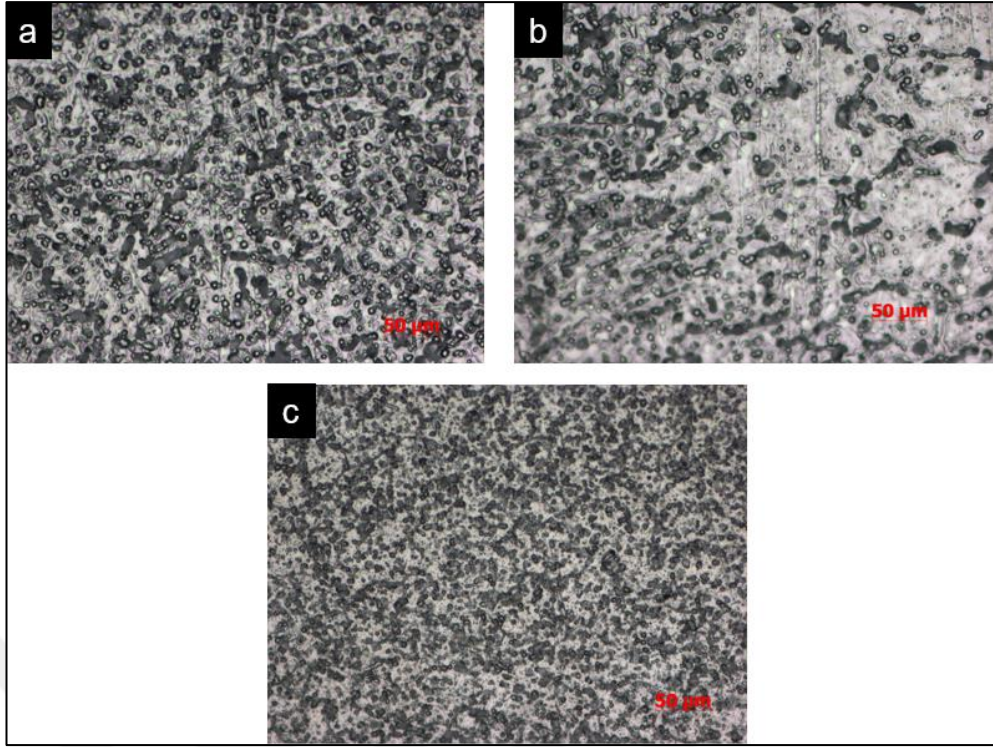
AA6060 75 A OM görüntüleri Şekil 7.40, AA6060 80 A OM görüntüleri Şekil 7.41 ve AA6060 85 A OM görüntüleri Şekil 7.42'de gösterilmektedir.



Şekil 7.40: AA6060 75A OM görüntüleri a) kaynak bölgesi, b) kaynak-ITAB birleşim bölgesi, c) ITAB bölgesi.



Şekil 7.41: AA6060 80A OM görüntüleri a) kaynak bölgesi, b) kaynak-ITAB birleşim bölgesi, c) ITAB bölgesi.



Şekil 7.42: AA6060 85A OM görüntüleri a) kaynak bölgesi, b) kaynak-ITAB birleşim bölgesi, c) ITAB bölgesi.

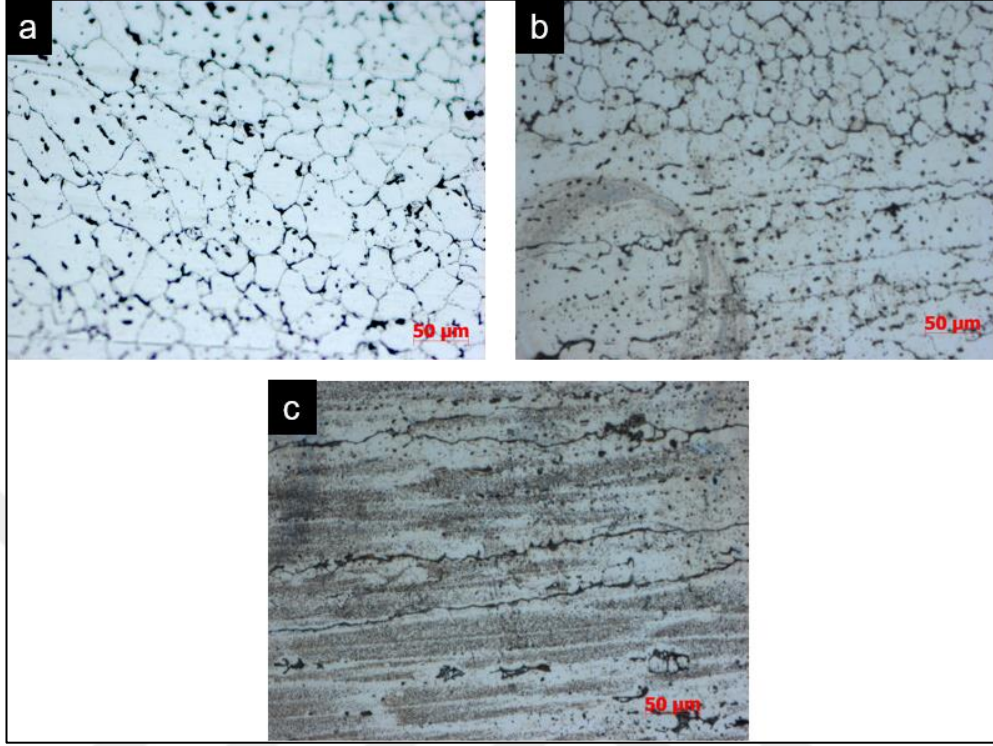
Jialiang Dong ve arkadaşlarının çalışmasında görüldüğü gibi AA 6060 malzemesinin kaynaklı kısımda tane sınırlarında dentritik büyüme ve çökelmeler olduğu için net olarak görünmektedir [28]. Ayrıca 75 A ile kaynak yapılan numune ile Jialiang Dong ve arkadaşlarının çalışmasında benzer şekilde ITAB bölgesinde uzun tanecikler olduğu gözlemlenmiştir. Dentritik büyüme ve çökelmeler tane sınırlarının belirgin olarak gözükmesine engel olmuştur [28]. Bu nedenle tane büyüklük ve geometrik olarak şekilleri net olarak görünmemektedir.

AA 6060 'a ait kaynak, kaynak-ITAB birleşim noktası ve ITAB bölgelerinin mikroyapı görüntüleri incelendiğinde;

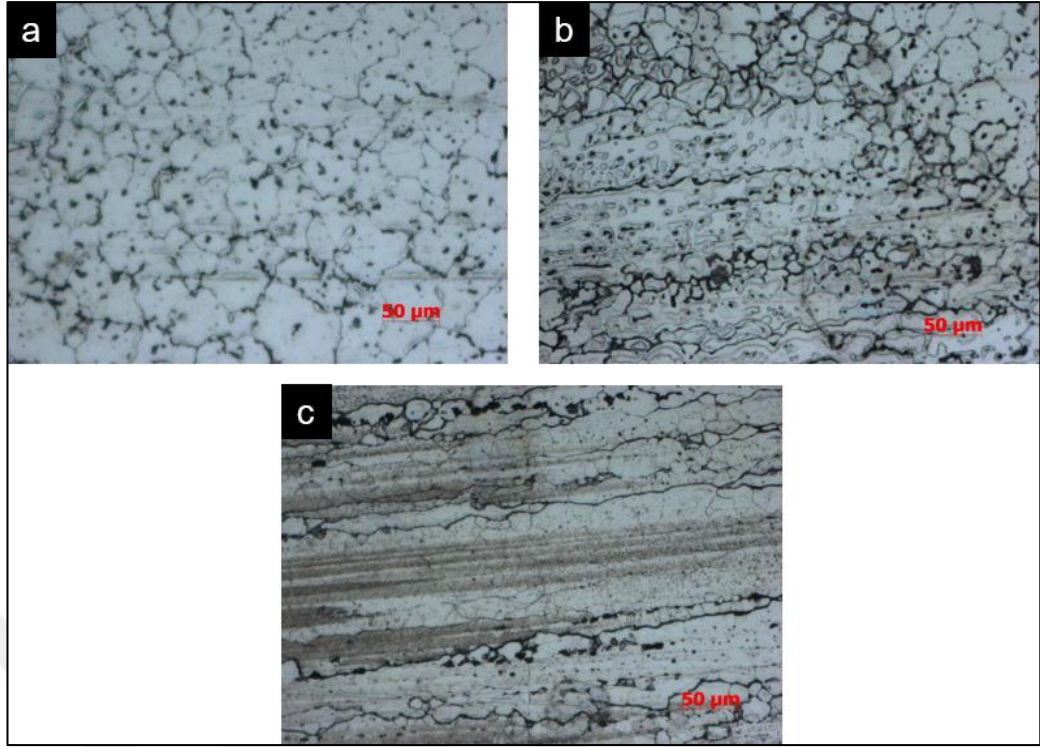
- Kaynaklı bölgenin mikroyapısında akım arttıkça tane sınırlarında dentritik büyüme ve çökelmelerin arttığı tane sınırlarının belirginliğinin azaldığı gözlemlenmiştir.
- Kaynak ITAB birleşim bölgesinde düşük akımda tane sınırında uzama olduğu gözlemlenirken akım arttıkça uzun taneciklerin oluşmadığı gözlemlenmektedir.
- ITAB bölgesinin mikroyapısında akım arttıkça tane sınırlarında dentritik büyüme ve çökelmelerin arttığı tane sınırlarının belirginliğinin azaldığı gözlemlenmiştir.

Akım artışına bağlı olarak gözlemlenen çökeltme miktarındaki artış ve tane geometrisindeki değişim ince ve küresel çökelmelerin matris içerisinde çözünme mekanizması ile açıklanabilir [28].

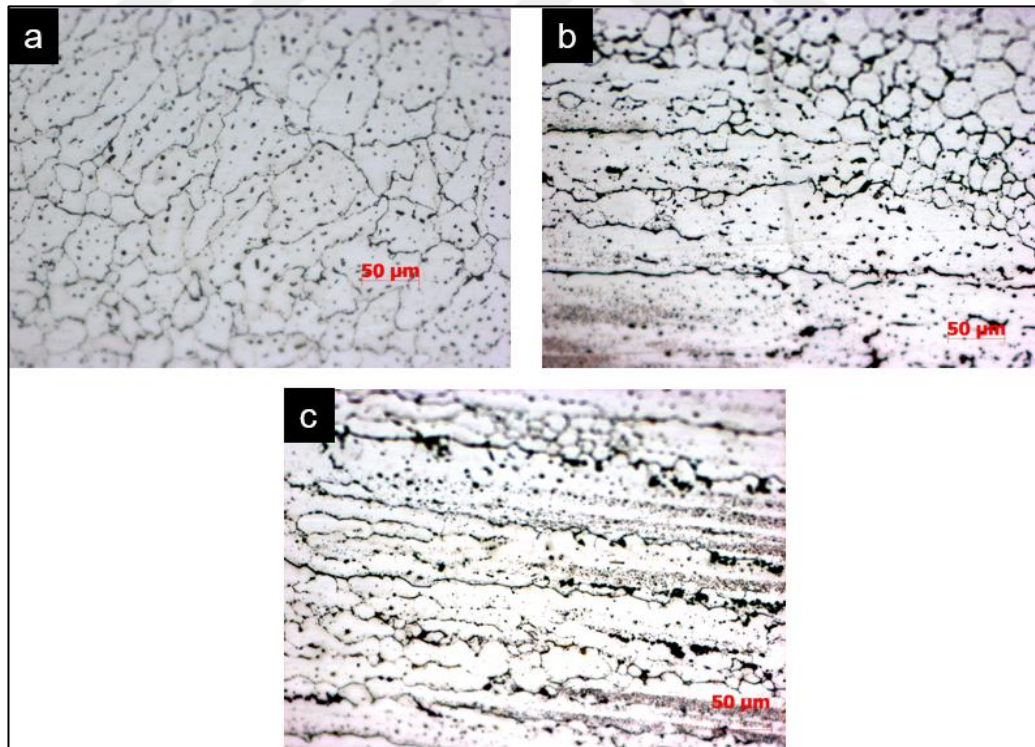
AA7075 75 A OM görüntüleri Şekil 7.43, AA7075 80 A OM görüntüleri Şekil 7.44 ve AA7075 85 A OM görüntüleri Şekil 7.45'te gösterilmektedir.



Şekil 7.43: AA7075 75A OM görüntüleri a) kaynak bölgesi, b) kaynak-ITAB birleşim bölgesi, c) ITAB bölgesi.



Şekil 7.44: AA7075 80A OM görüntüleri a) kaynak bölgesi, b) kaynak-ITAB birleşim bölgesi, c) ITAB bölgesi.



Şekil 7.45: AA7075 85A OM görüntüleri a) kaynak bölgesi, b) kaynak-ITAB birleşim bölgesi, c) ITAB bölgesi.

Safa Şahin'in çalışmasındaki gibi AA 7075 malzemesinin kaynaklı kısımda düzensiz fakat küçük tanecikler bulunduğu, kaynak- ITAB birleşim noktasında daha düzenli ve daha küçük tanecikler olduğu, ITAB bölgesinde ise ince uzun taneler olduğu görülmektedir [27]. AA 7075 numunelere kaynak işlemi esnasında, alaşım elementlerinin ergime sıcaklıkları arasındaki farktan dolayı homojen kaynak havuzu elde edilemediği için katılaşma esnasında tane sınırlarının modifiye olduğu gözlemlenmiştir [40].

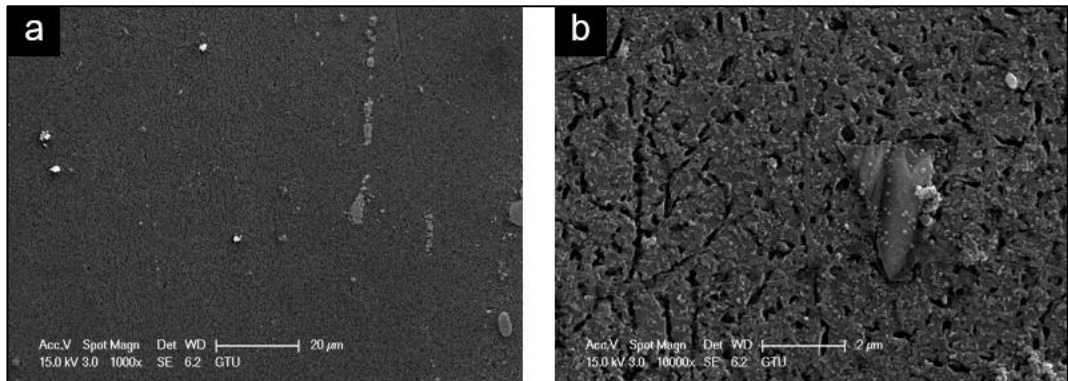
AA 7075 'e ait kaynak, kaynak-ITAB birleşim noktası ve ITAB bölgelerinin mikroyapı görüntüleri incelendiğinde;

- a. Kaynaklı bölgenin mikroyapısında akım artıçça daha düzensiz ve daha büyük taneler olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca daha düşük akımla yapılan kaynakta tane büyüklüğünün daha homojen dağıldığı gözlemlenmiştir.
- b. Kaynak ITAB birleşim bölgesinin mikroyapısında akımın artışının kayda değer bir etkisi olmamış bütün akım değerlerinde kaynak ve ITAB bölgesine kıyasla daha küçük ve düzenli taneler olduğu gözlemlenmektedir.
- c. ITAB bölgesinin mikroyapısında akım artıçça tane büyüklüğünün azalma ve uzama miktarının azaldığı daha kısa ve dar taneler olduğu gözlemlenmiştir.

Tane geometrisindeki bu değişimler ısı girdisinin artmasına bağılı olarak çözünmenin artması, çökelmelerin azalması ve kaynak havuzunun katılaşma esnasındaki ötektik fazdaki elementlerin soğuma ve katılaşma hızına etkisi ile açıklanabilir.

7.2.6. Taramalı Elektron Mikroskobu (Sem) Görüntüleri

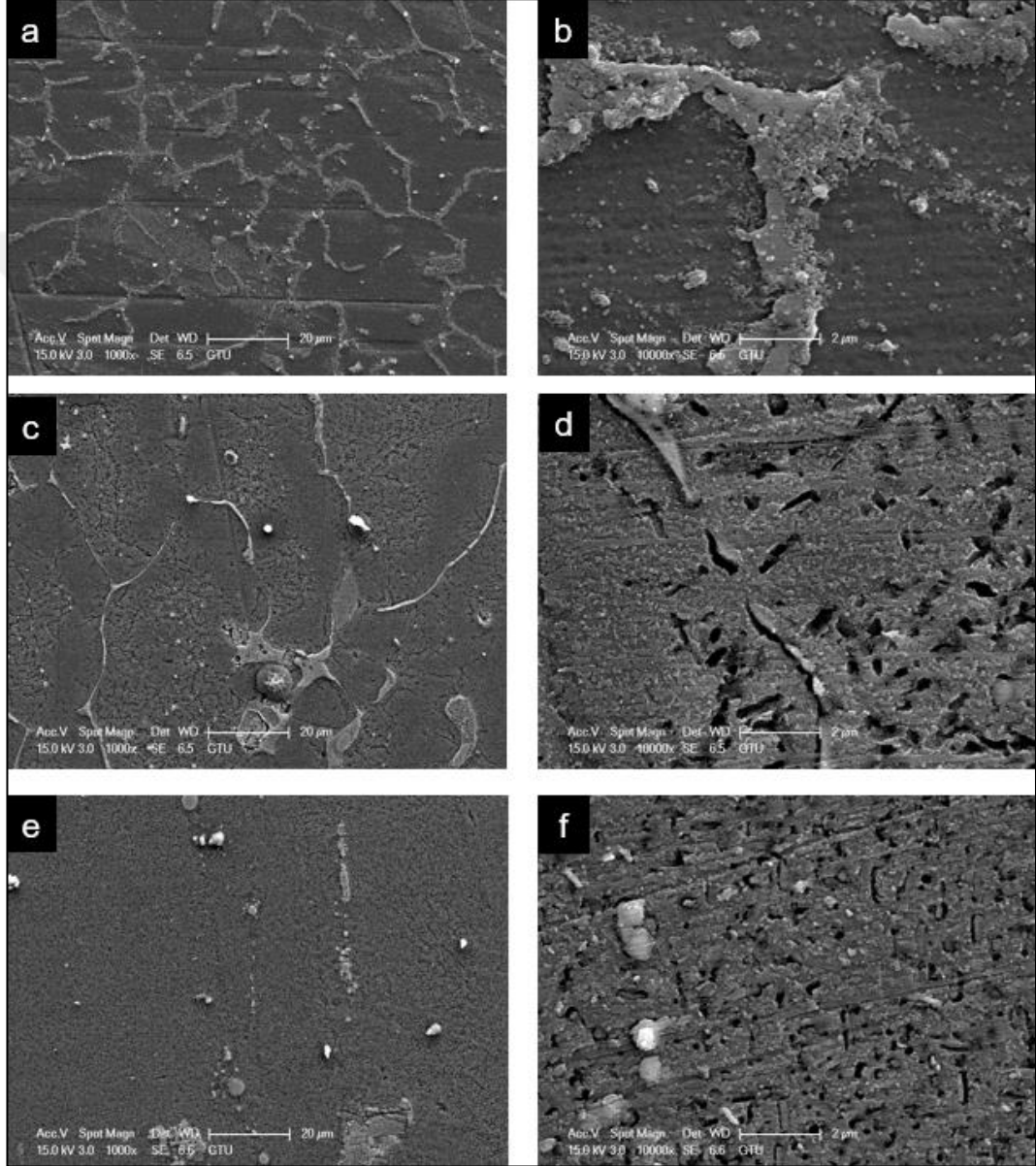
AA2024 numunelerinin hazırlandığı ana malzemeye ait SEM görüntüleri Şekil 7.46'da gösterilmiştir.



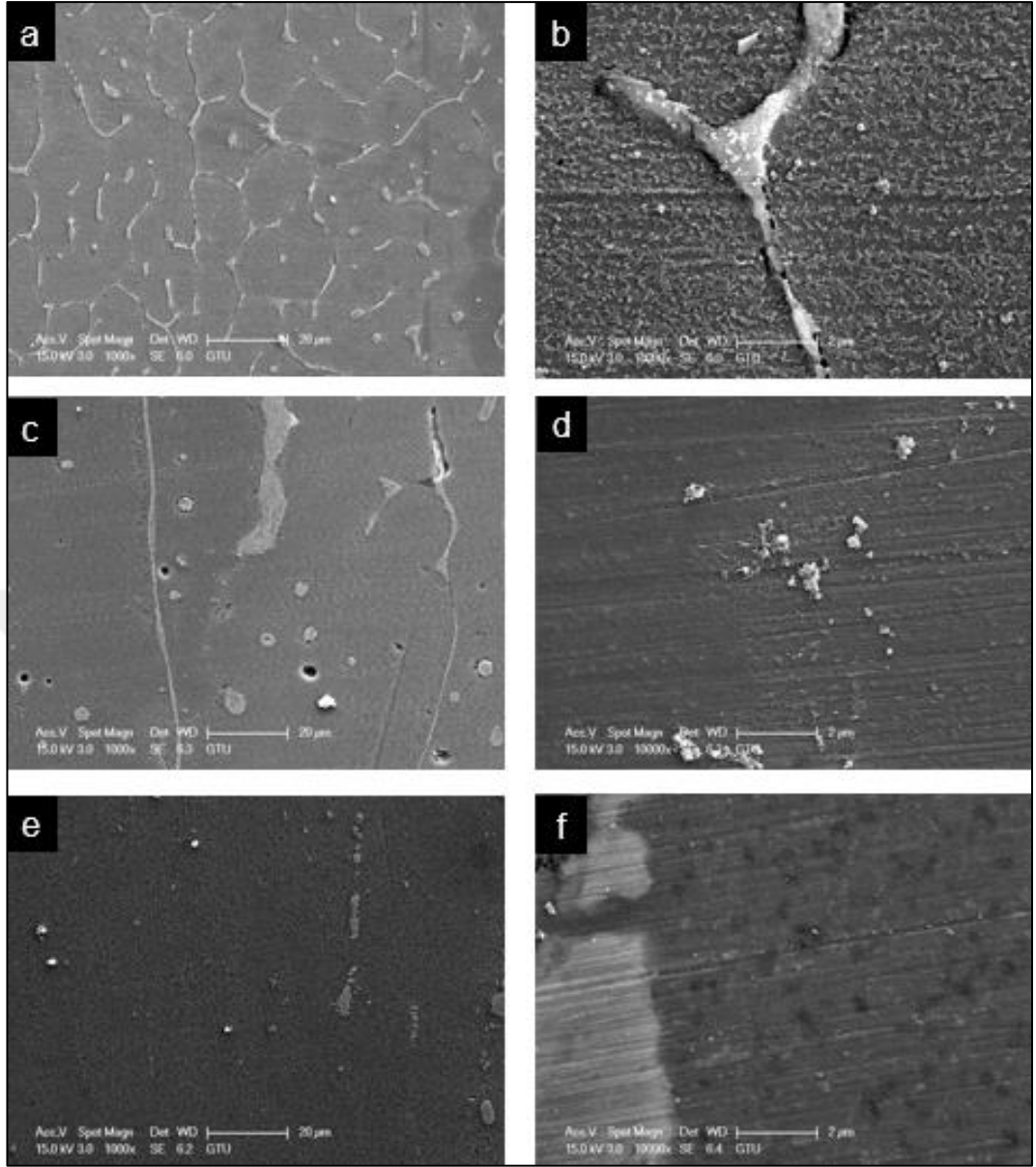
Şekil 7.46: AA 2024 SEM görüntüleri a) 1000X, b) 10000X.

Liamine Kaba ve arkadaşlarının çalışmasındaki gibi AA 2024 ana malzemenin yüzeyinde dairesel çökelmeler olduğu gözlemlenmiştir [31]. Ayrıca AA 2024 ana malzemenin yüzeyinin gözenekler, delikler ve oyuklar içerdiği gözlemlenmiştir.

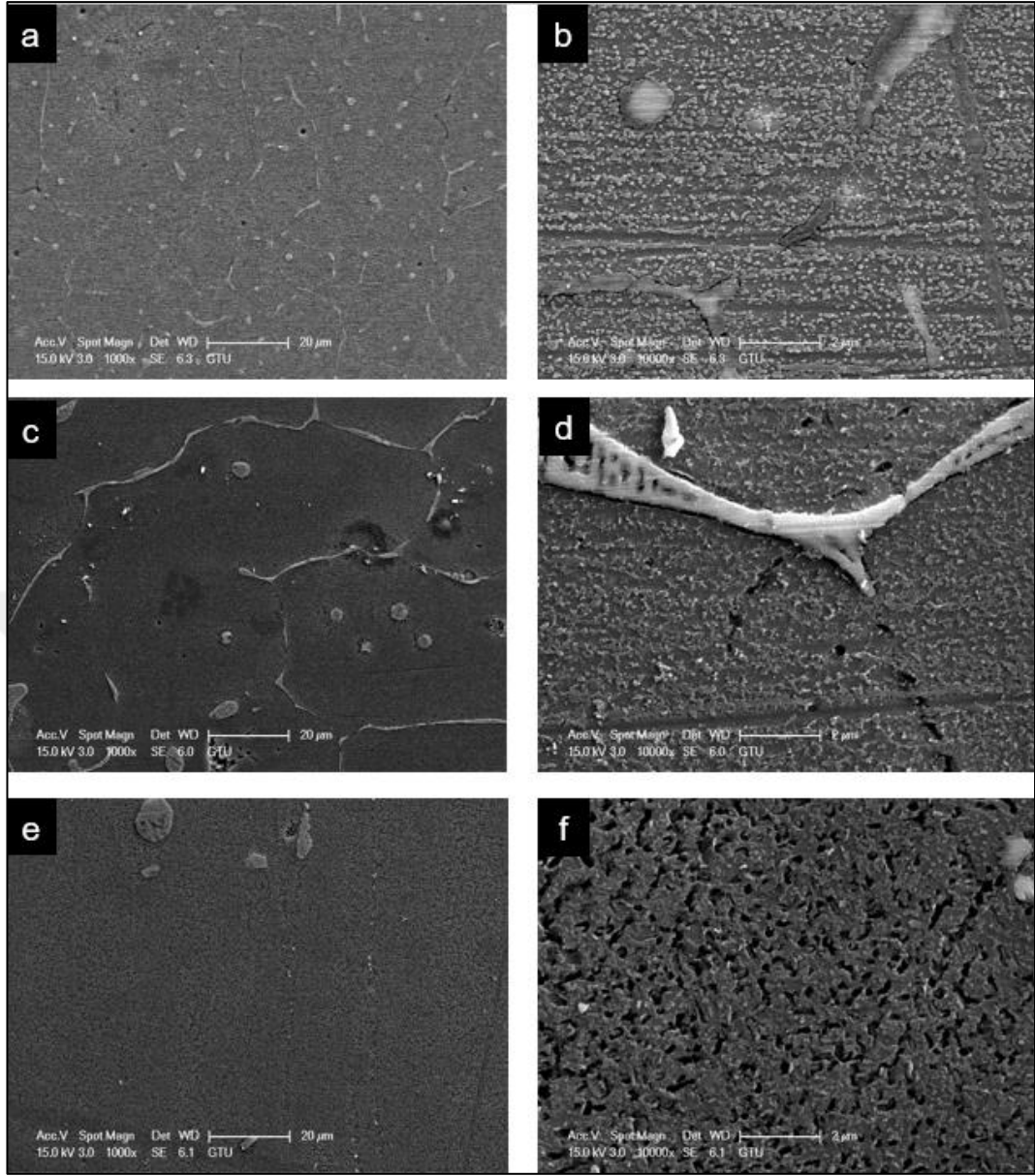
AA2024 75 A SEM görüntüleri Şekil 7.47, AA2024 80 A SEM görüntüleri Şekil 7.48 ve AA2024 85 A SEM görüntüleri Şekil 7.49’da gösterilmektedir.



Şekil 7.47: AA 2024 75A SEM görüntüleri a) kaynak bölgesi 1000X, b) kaynak bölgesi 10000X, c) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 1000X, d) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 10000X, e) ITAB bölgesi 1000X, f) ITAB bölgesi 10000X.



Şekil 7.48: AA 2024 80A SEM görüntüleri a) kaynak bölgesi 1000X, b) kaynak bölgesi 10000X, c) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 1000X, d) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 10000X, e) ITAB bölgesi 1000X, f) ITAB bölgesi 10000X.

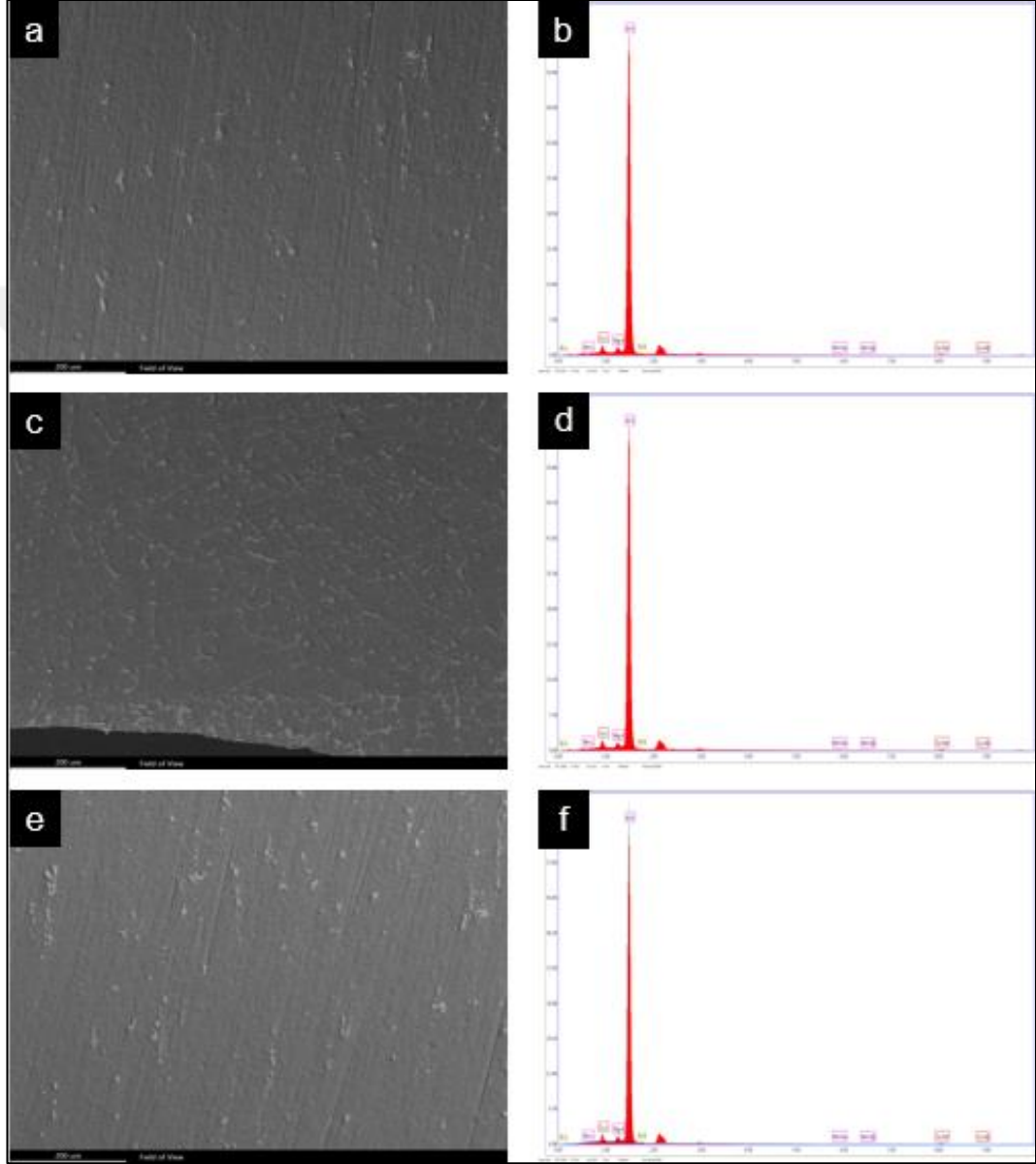


Şekil 7.49: AA 2024 85A SEM görüntüleri a) kaynak bölgesi 1000X, b) kaynak bölgesi 10000X, c) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 1000X, d) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 10000X, e) ITAB bölgesi 1000X, f) ITAB bölgesi 10000X.

Liamine Kaba ve arkadaşlarının çalışmasındaki gibi AA 2024 ün kaynak, ITAB kaynaklı AA 2024 numunelerin kaynaklı kısımlarında ve kaynak ITAB birleşim ise tane sınırları ve çökelmeler görülmektedir [31]. Akım arttıkça numunelerin kaynaklı kısımlarında tane sınırlarının belirginliği azalmış ve çökelmeler olduğu gözlemlenmiştir. Kaynak-ITAB birleşim bölgesinde ise ana malzemede görünen çukurlar gibi çukurlar, gözenekler, kurt oyukları oluşmaya başladığı gözlemlenmiştir. Bu çukurların belirginliği akım arttıkça azalmıştır. Ayrıca akımın artması çökelmelerin de artmasına sebep olmaktadır. ITAB bölgesi ise ana malzeme ile benzer yüzey

görüntüsüne sahiptir. Bu durum kaynak esnasında kullanılan akımın artmasına bağlı girdisindeki artış, Mg_2Si ve $CuAl_2$ partikülleri oluşumunu hızlandırdığı, gözenekli ve kusurlu yapıyı artırması ile açıklanmıştır [31].

AA2024 SEM-EDS analizi görüntüleri Şekil 7.50’de, EDS elementel dağılımı Tablo 7.8 de gösterilmektedir.



Şekil 7.50: AA 2024 85 A SEM-EDS analizi görüntüleri.

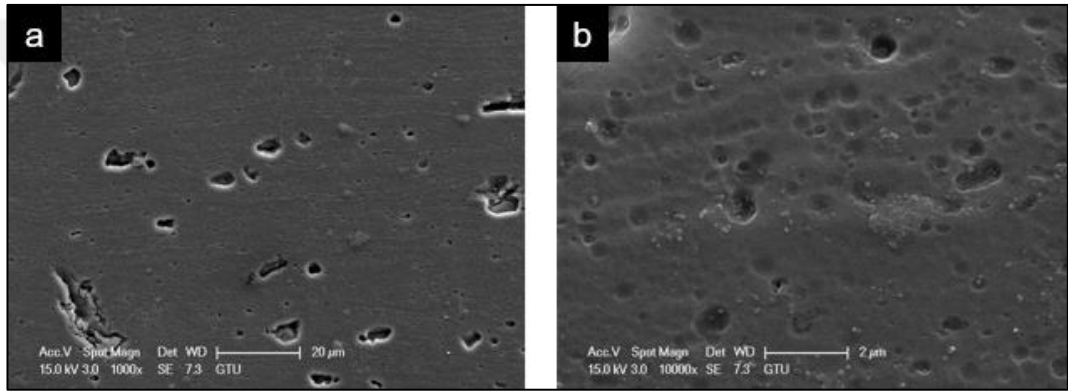
Tablo 7.8: AA 2024 85A EDS dağılımı.

	Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Net Int. Error
KAYNAK	Mg K	1,74	1,99	322,30	0,02
	Al K	91,84	94,69	15910,28	0,00
	Si K	3,85	0,84	74,05	0,04
	Mn K	0,58	0,30	18,62	0,29
	Cu K	1,99	2,19	63,07	0,09
KAYNAK- ITAB BİRLEŞİM	Mg K	1,66	1,89	315,65	0,02
	Al K	92,01	94,86	16411,87	0,00
	Si K	0,81	0,80	73,06	0,04
	Mn K	0,43	0,22	14,12	0,40
	Cu K	5,09	2,23	66,07	0,12
ITAB	Mg K	1,72	1,97	306,62	0,02
	Al K	92,20	94,87	15295,84	0,00
	Si K	0,87	0,86	72,61	0,04
	Mn K	0,46	0,23	13,90	0,39
	Cu K	4,75	2,07	57,16	0,13

Şekil 7.50 ve Tablo 7.8 incelendiğinde AA2024' ün ana alaşım elementlerinden Mg, Mn ve Cu'nun eser miktarda da olsa kaynak esnasında uygulanan ısı ile kaynak metaline difüzyona ile geçiş yaptığı gözlemlenmiştir.

AA 2024-T3 alüminyum alaşımı çökelme sertleşmesi uygulanmış alaşım olup Mg_2Si ve $CuAl_2$ partikülleri bulunmaktadır [31]. Lima Kaba ve arkadaşlarının çalışmasındaki gibi EDS analizi sonuçlarında Mg ve Cu alaşımları bulunduğu ve bunların büyük olasılıkla θ ve S fazında olduğu düşünülmektedir [31-46]. Literatürde θ fazı Al_2Cu ve S fazı Al_2CuMg olup, ayrıca ötektik $AlCuMg$, içerir [31-46-47].

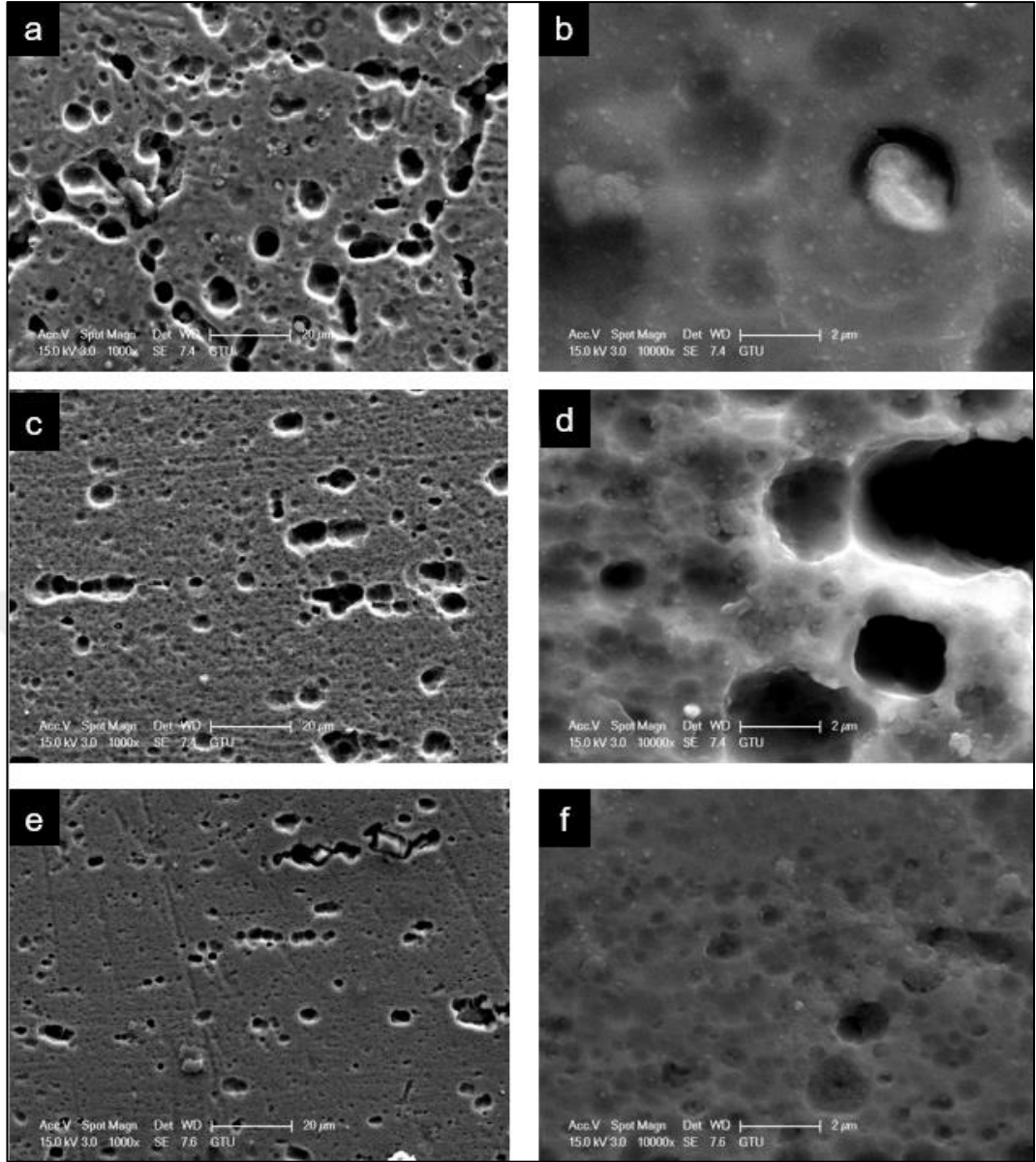
AA5754 numunelerinin hazırlandığı ana malzemeye ait SEM görüntüleri Şekil 7.51'de gösterilmiştir.



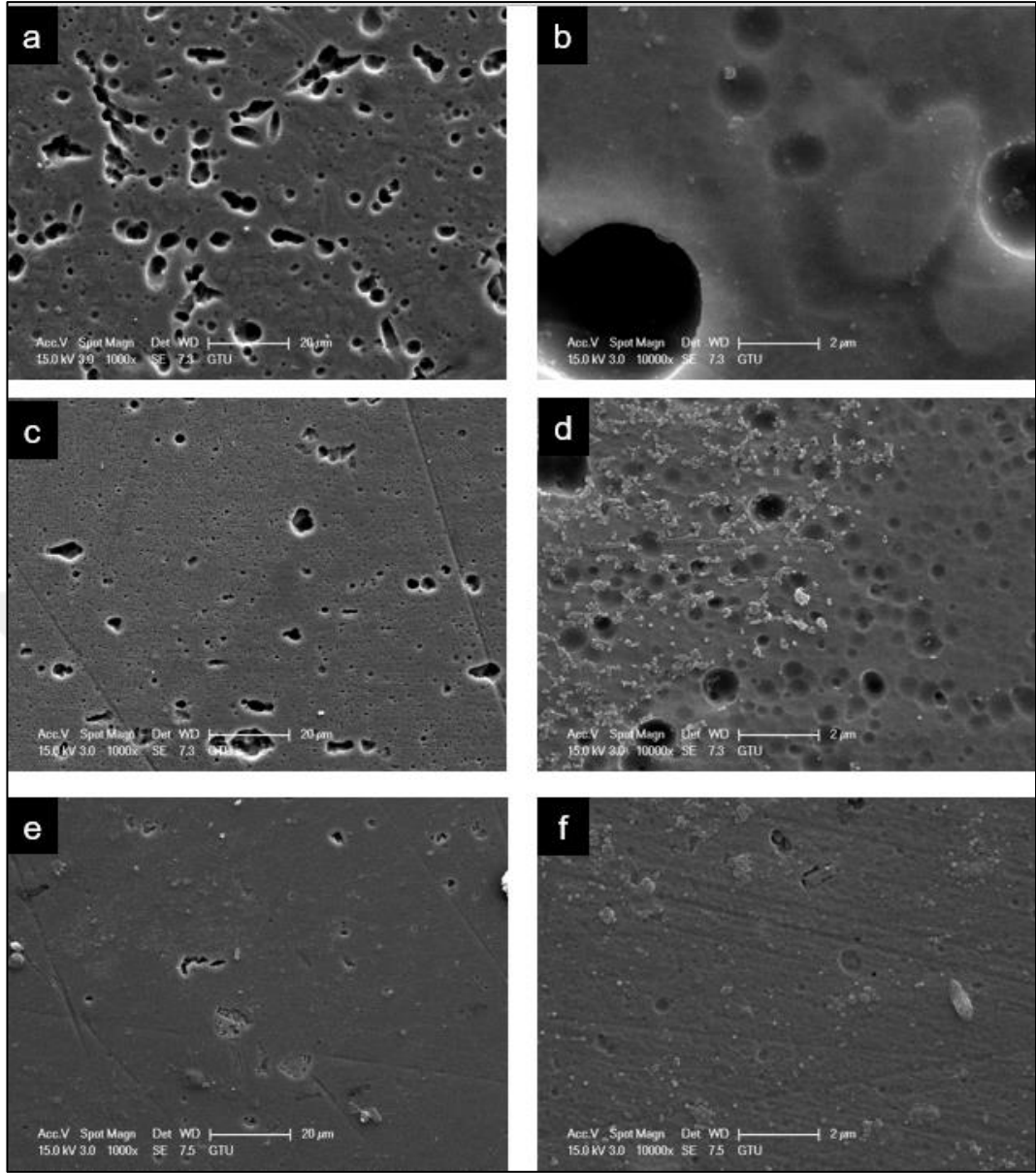
Şekil 7.51: AA 5754 SEM görüntüleri a) 1000X, b) 10000X.

M. Vural ve arkadaşlarının çalışması ile AA 5754 ana malzemenin SEM görüntüleri benzerlik göstermektedir [22]. İki çalışmada da yüzeyde segregasyonlar, çökelmeler ve gözenekler olduğu belirgin olarak gözlemlenmiştir.

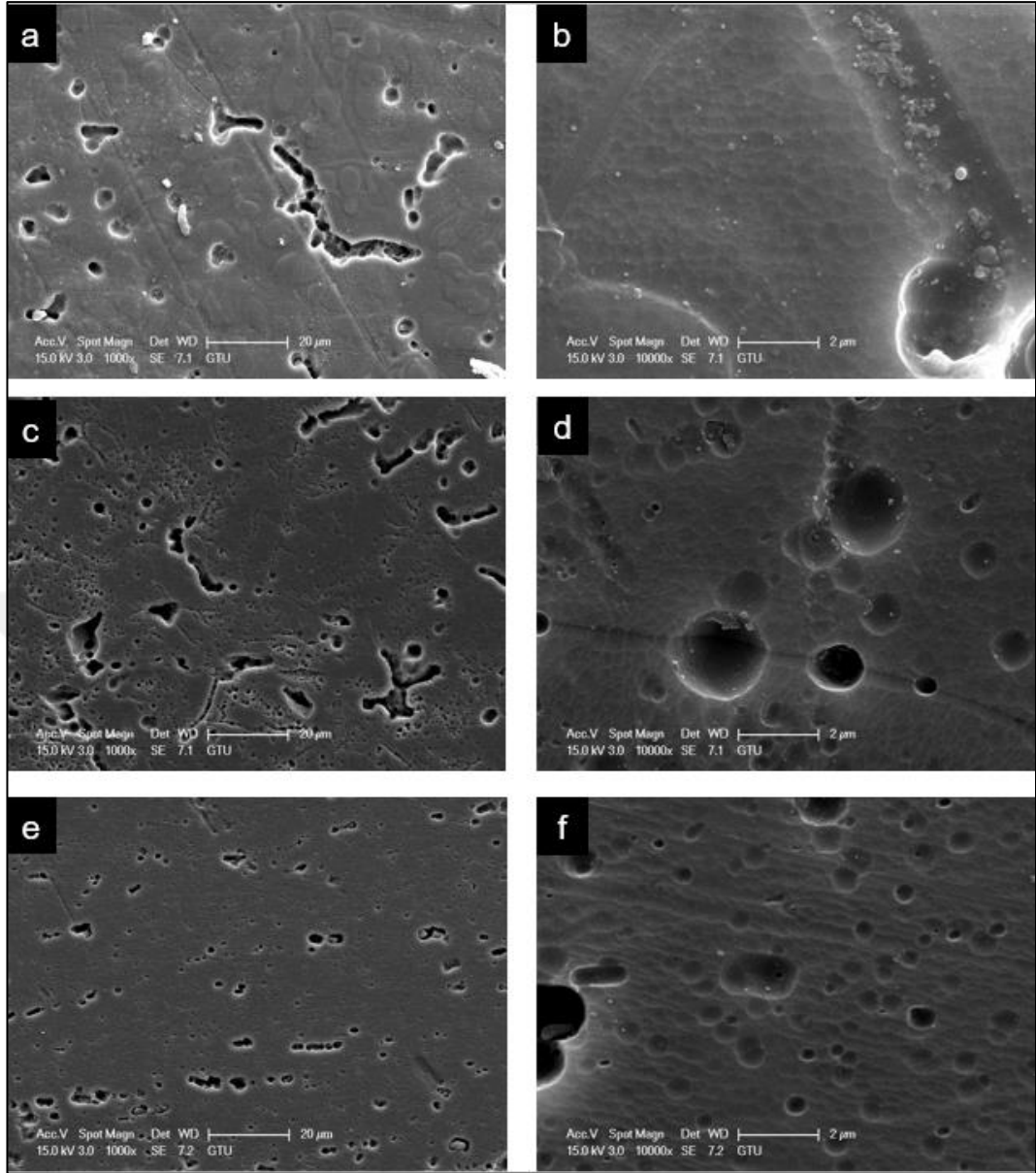
AA5754 75 A SEM görüntüleri Şekil 7.52, AA5754 80 A SEM görüntüleri Şekil 7.53 ve AA5744 85 A SEM görüntüleri Şekil 7.54'te gösterilmektedir.



Şekil 7.52: AA 5754 75A SEM görüntüleri a) kaynak bölgesi 1000X, b) kaynak bölgesi 10000X, c) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 1000X, d) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 10000X, e) ITAB bölgesi 1000X, f) ITAB bölgesi 10000X.



Şekil 7.53: AA 5754 80A SEM görüntüleri a) kaynak bölgesi 1000X, b) kaynak bölgesi 10000X, c) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 1000X, d) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 10000X, e) ITAB bölgesi 1000X, f) ITAB bölgesi 10000X.



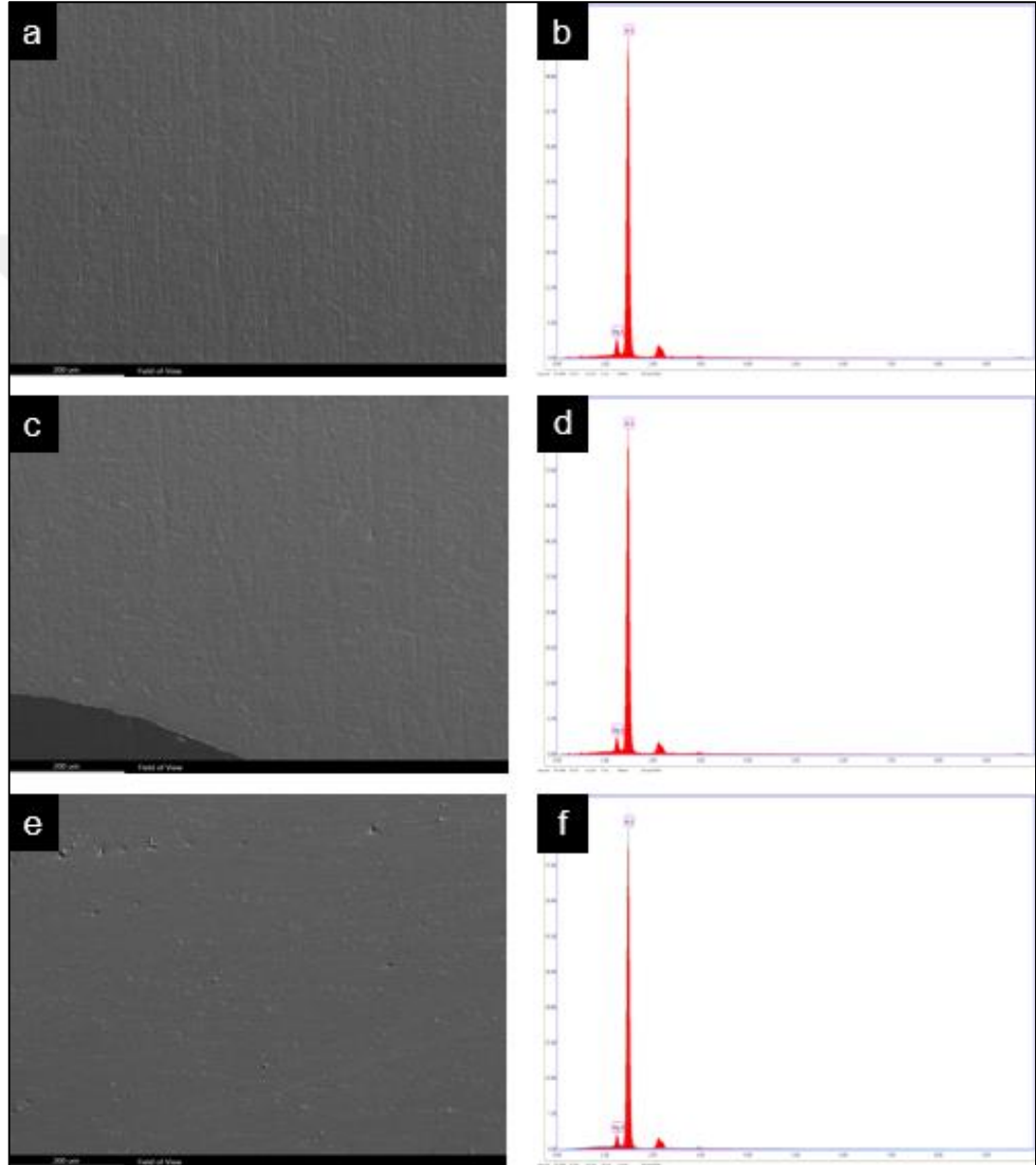
Şekil 7.54: AA 5754 85A SEM görüntüleri a) kaynak bölgesi 1000X, b) kaynak bölgesi 10000X, c) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 1000X, d) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 10000X, e) ITAB bölgesi 1000X, f) ITAB bölgesi 10000X.

Hülya Durmuş ve arkadaşlarının çalışması ile segregasyonlar ve çökelmeler yönünden AA 5754 numunelerinin kaynak bölgesinde ve kaynak ITAB birleşim bölgelerinde benzerlik göstermektedir [32]. Ayrıca ITAB bölgesi M. Vural ve arkadaşlarının çalışması ile çökelmeler yönünden benzerlik göstermektedir [22].

Numunelerin kaynak bölgesinde, kaynak-ITAB birleşim bölgesinde ve ITAB bölgelerinde ana malzemeye göre çukur ve gözenekli yapının arttığı gözlemlenmiştir. Akım arttıkça numunelerin kaynak bölgesinde, kaynak-ITAB birleşim bölgesinde ve ITAB bölgelerinde çukur ve gözeneklerin arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca akımın

artması numunelerin kaynak bölgesinde, kaynak-ITAB birleşim bölgesinde ve ITAB bölgelerinde katılaşma çökelmelerinin ve segregasyonların azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum akım artışı ile uygulanan ısı girdisinin artmasına bağlı olarak çözünmenin artması ile ilişkilendirilmiştir [32].

AA5754 SEM-EDS analizi görüntüleri Şekil 7.55'te, EDS elementel dağılımı Tablo 7.9 da gösterilmektedir.



Şekil 7.55: AA 5754 75A SEM-EDS analizi görüntüleri.

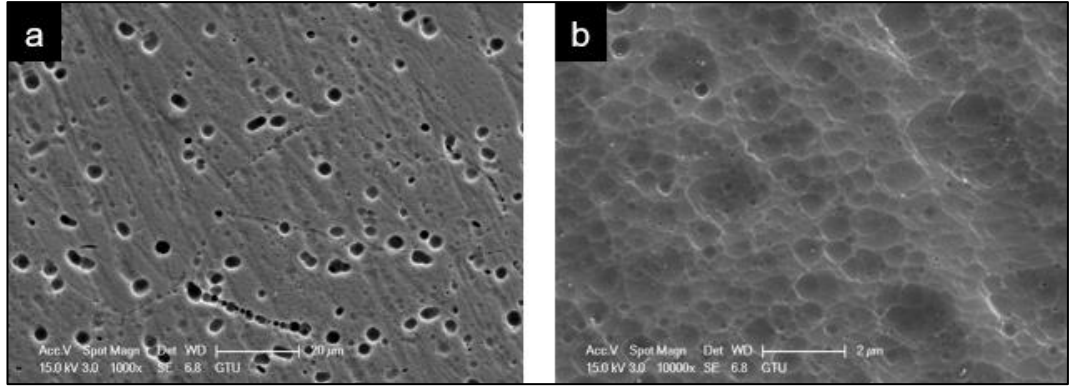
Tablo 7.9: AA5754 75A EDS dağılımı.

	Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Net Int. Error
KAYNAK	Mg K	4,65	5,13	801,15	0,01
	Al K	95,35	94,87	14029,99	0,00
BİRLEŞİM	Mg K	3,91	4,32	730,47	0,01
	Al K	96,09	95,68	15413,25	0,00
ITAB	Mg K	3,50	3,87	691,58	0,01
	Al K	96,50	96,13	16405,12	0,00

Şekil 7.55 ve Tablo 7.9 incelendiğinde AA5754' ün ana alaşım elementlerinden Mg'un eser miktarda da olsa kaynak metalinden kaynak-ITAB bölgesine ve ITAB bölgesine kaynak esnasında uygulanan ısı ile difüzyona uğradığı gözlemlenmiştir.

Magnezyum içeriğinin %3–4'ü geçtiği Al-Mg alaşımlarında, β (Al_8Mg_5 ya da Al_3Mg_2) fazı, alüminyumca zengin α fazının tane sınırlarına küçük aralıklarla sürekli bir ağ oluşturarak çökelme eğilimindedir. Özellikle alaşımın 400°C üzerindeki sıcaklıklardan yavaş olarak soğuması, diğer bir deyişle uzun süre ısıya maruz kalması, β fazının tane sınırlarına çökmesini tetiklemektedir [32]. AA 5754 EDS analizinde gözlemlenen alaşımların β fazında olduğu düşünülmektedir.

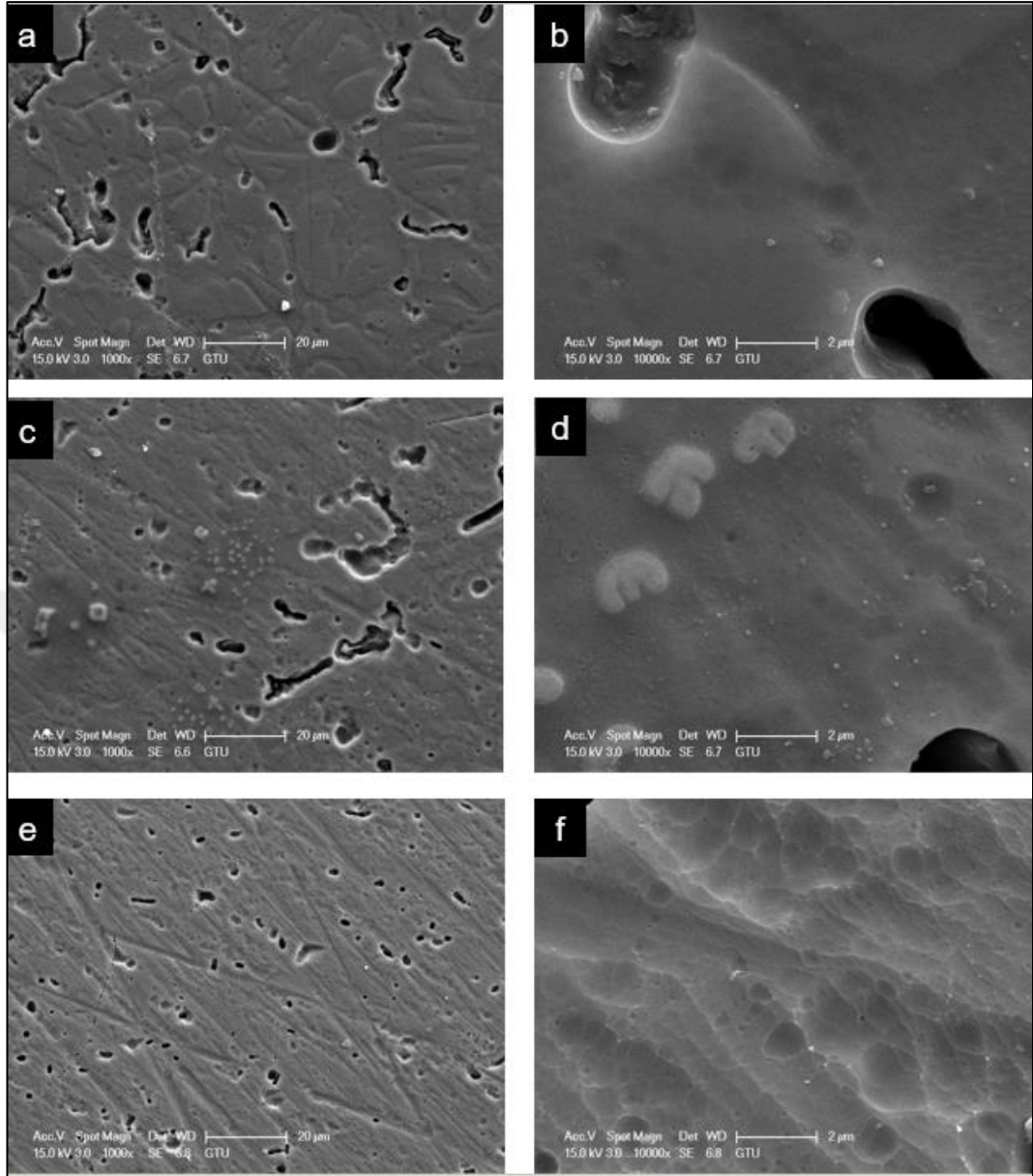
AA6060 numunelerinin hazırlandığı ana malzemeye ait SEM görüntüleri Şekil 7.56'da gösterilmiştir.



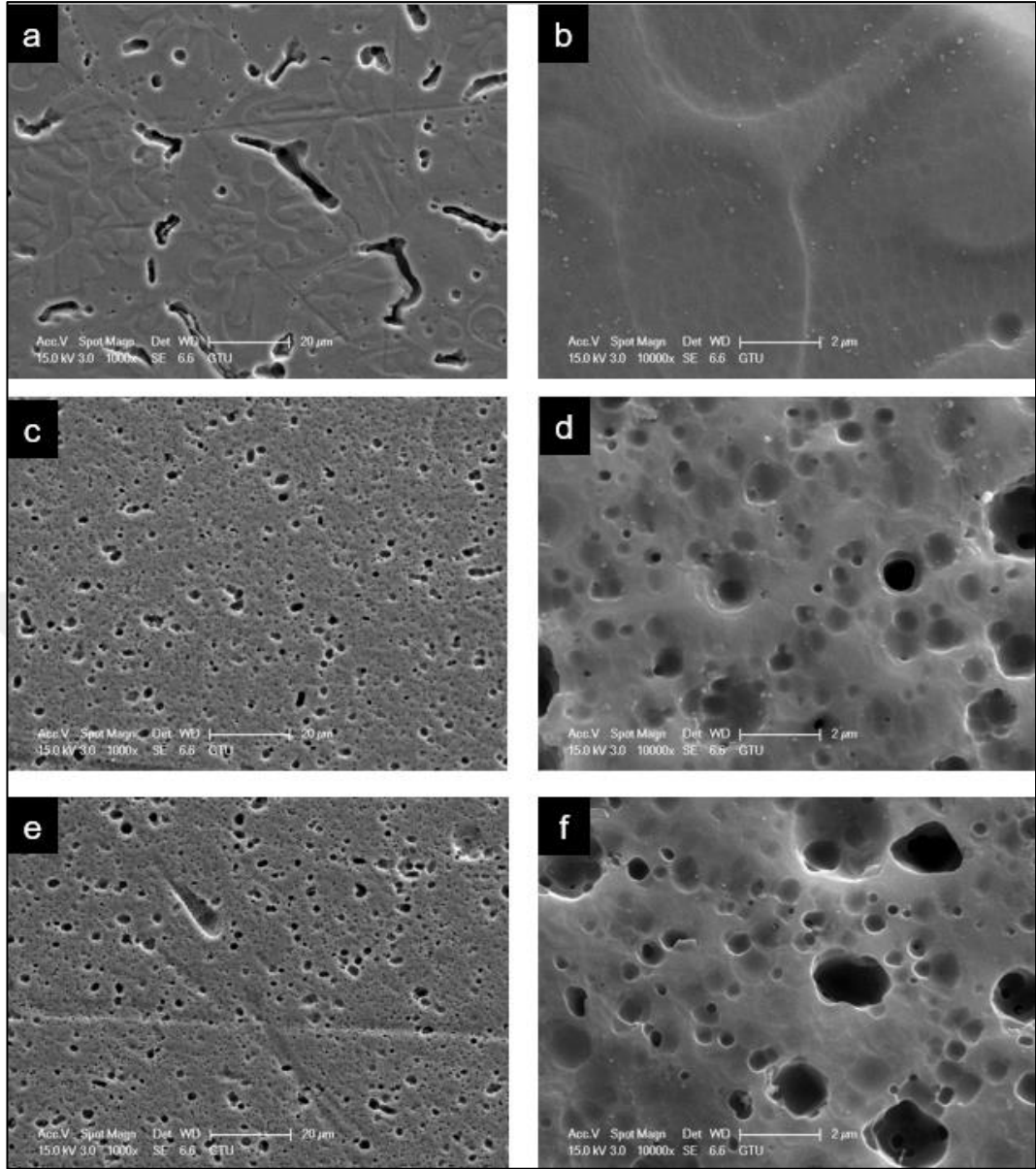
Şekil 7.56: AA 6060 SEM Görüntüsü a) 1000X, b) 10000

Kübra Dalli ve arkadaşlarının çalışması ile AA 6060 numunelerinin ana malzemenin SEM yüzey görüntüleri benzerlik göstermektedir [33]. Bu benzerlikler yüzeydeki, çukurlar ve katılaşma esnasındaki çökelme oluşumlarıdır. AA 6060 ana malzemenin yüzey yapısı incelendiğinde düzenli dağılmış çukur ve gözenekler olduğu görülmektedir.

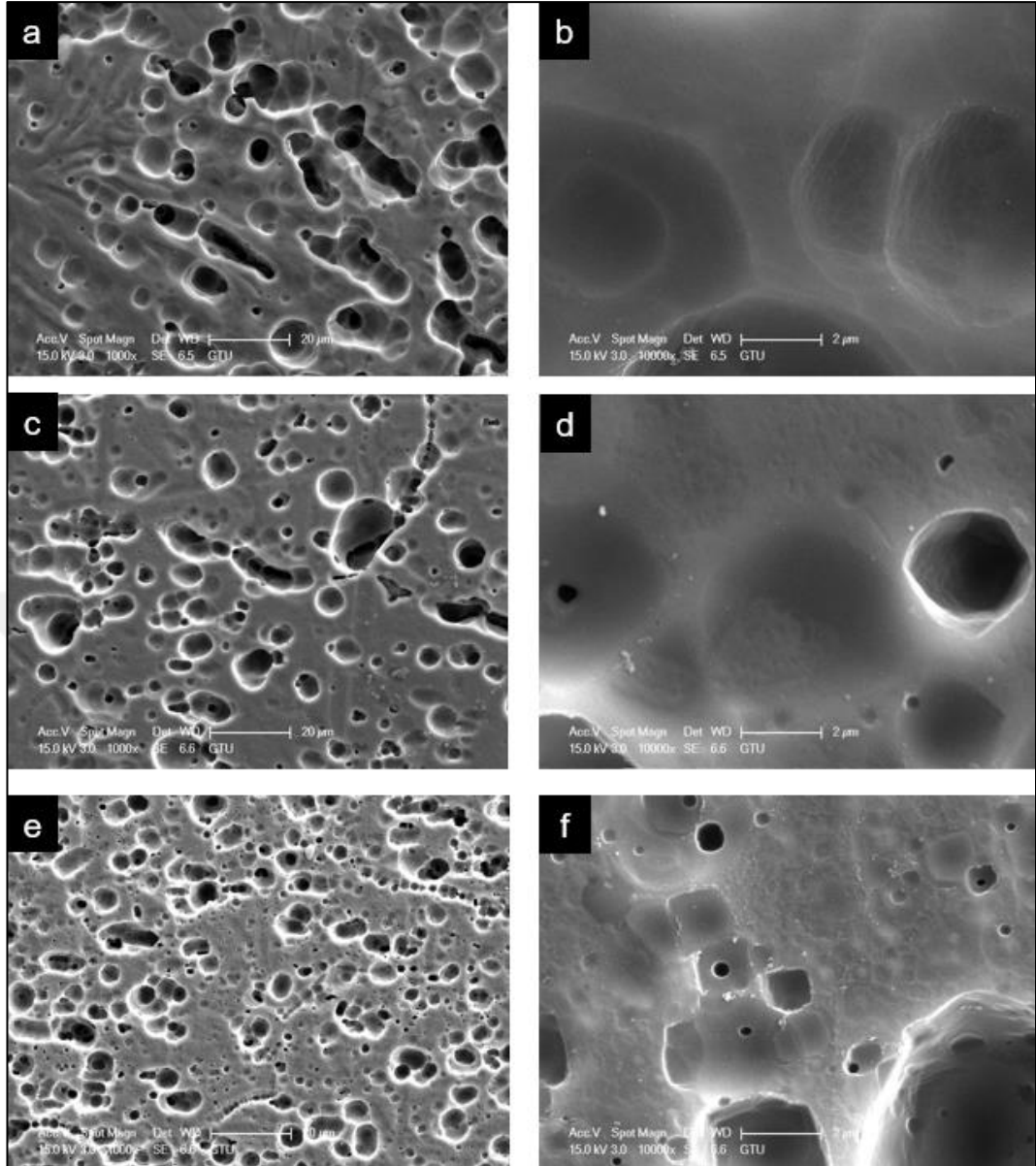
AA6060 75 A SEM görüntüleri Şekil 7.57, AA6060 80 A SEM görüntüleri Şekil 7.58 ve AA6060 85 A SEM görüntüleri Şekil 7.59’da gösterilmektedir.



Şekil 7.57: AA 6060 75A SEM görüntüleri a) kaynak bölgesi 1000X, b) kaynak bölgesi 10000X, c) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 1000X, d) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 10000X, e) ITAB bölgesi 1000X, f) ITAB bölgesi 10000X.



Şekil 7.58: AA 6060 80A SEM görüntüleri a) kaynak bölgesi 1000X, b) kaynak bölgesi 10000X, c) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 1000X, d) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 10000X, e) ITAB bölgesi 1000X, f) ITAB bölgesi 10000X.



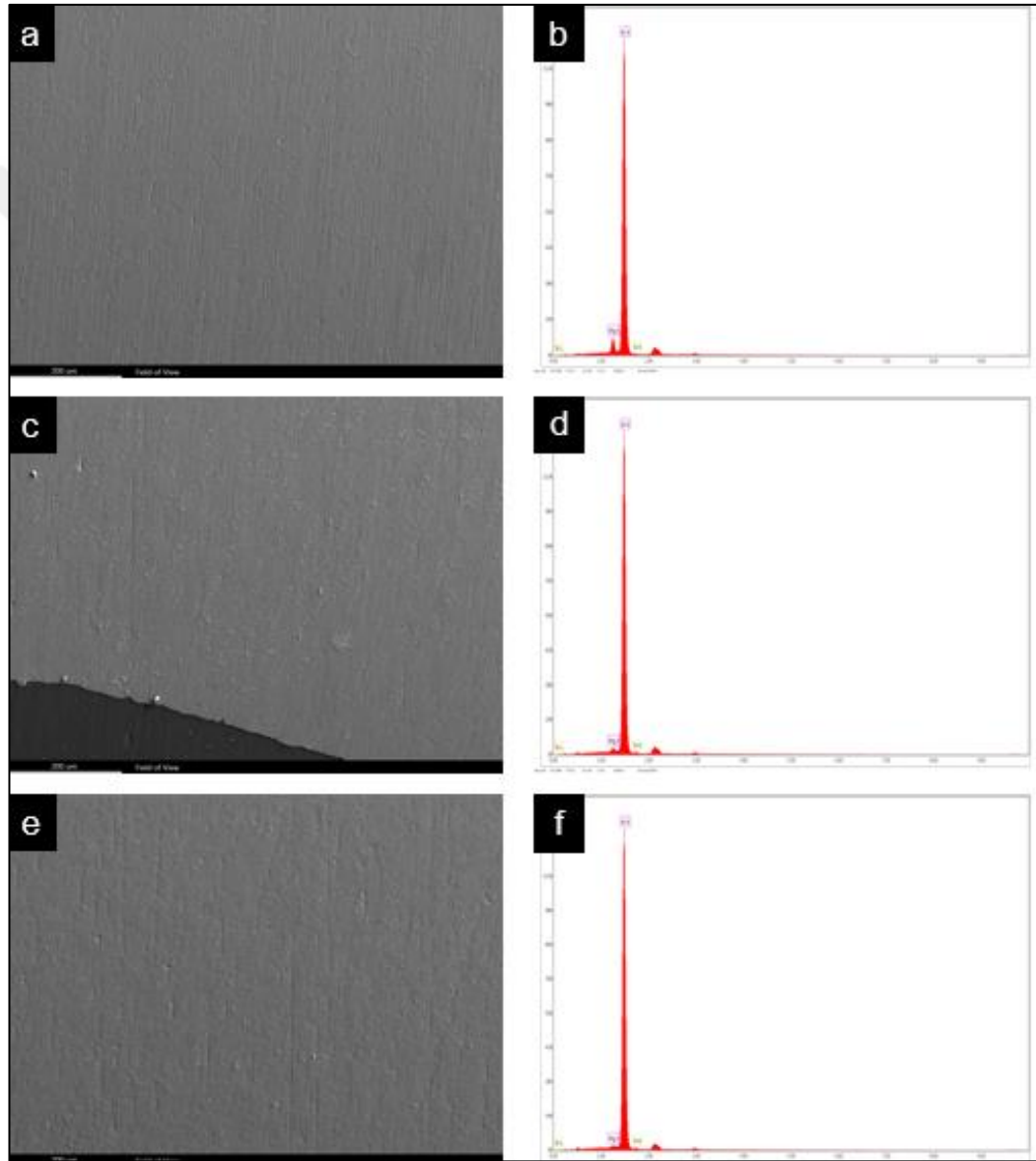
Şekil 7.59: AA 6060 85A SEM görüntüleri a) kaynak bölgesi 1000X, b) kaynak bölgesi 10000X, c) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 1000X, d) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 10000X, e) ITAB bölgesi 1000X, f) ITAB bölgesi 10000X.

Mustafa Arslan'ın çalışmasındaki ile AA 6060 numunelerinin kaynak, kaynak-ITAB birleşim bölgesi ve ITAB bölgelerinin SEM yüzey görüntüleri ile katılaşma çökeltileri ve gözenekler yönünden benzerlik göstermektedir [24]. Ayrıca Kübra Dalli ve arkadaşlarının çalışması ile AA 6060 numunelerinin ITAB bölgesinin SEM yüzey görüntüleri ile de benzerlik göstermektedir [33].

Numunelerin kaynak bölgesinde, kaynak-ITAB birleşim bölgesinde ve ITAB bölgelerinde ana malzemeye kıyasla katılaşma çökeltileri ve gözenek miktarında artış olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum kaynak ile birleştirme esnasında malzemenin

maruz kaldığı ısıya bağlı olarak Mg_2Si partiküllerin kabalaşarak çökmesiyle ilişkilendirilmektedir [45]. Numuneleri kaynak bölgesinde, kaynak-ITAB birleşim bölgelerinde akımın artması ile katılma çökeltileri ve gözenek arttığı gözlemlenmiştir. Bu artışın nedeni olarak akımın artışına bağlı olarak ısı miktarındaki artışın Mg_2Si partiküllerinin kabalaştırmasıdır.

AA6060 SEM-EDS analizi görüntüleri Şekil 7.60 'da ,EDS elementel dağılımı Tablo 7.10 da gösterilmektedir.



Şekil 7.60: AA 6060 85A SEM-EDS analizi görüntüleri

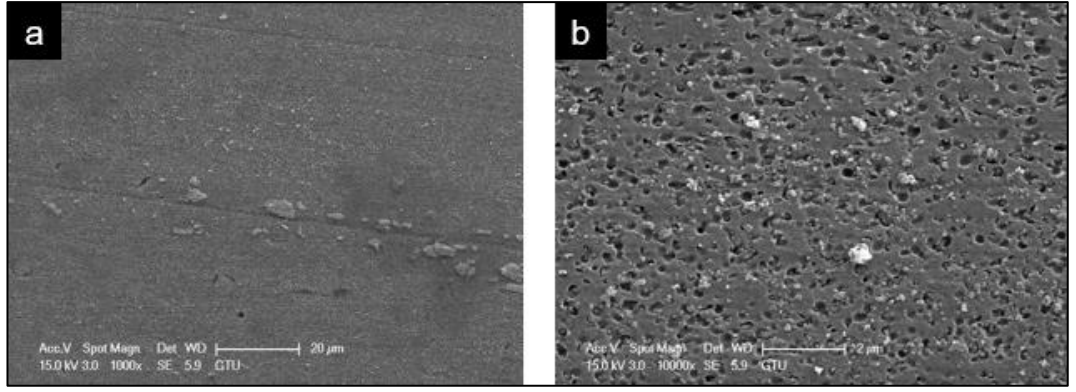
Tablo 7.10: AA 6060 85A EDS dağılımı.

	Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Net Int. Error
KAYNAK	Mg K	4,09	4,52	926,88	0,01
	Al K	95,09	94,77	18512,55	0,00
	Si K	0,82	0,79	77,29	0,03
KAYNAK-ITAB BİRLEŞİM	Mg K	1,61	1,79	372,80	0,01
	Al K	96,86	96,75	19488,33	0,00
	Si K	1,53	1,46	144,33	0,02
ITAB	Mg K	1,22	1,35	282,31	0,01
	Al K	97,22	97,15	19703,79	0,00
	Si K	1,56	1,50	147,83	0,02

Şekil 7.60 ve Tablo 7.10 incelendiğinde AA 6060'ın ana alaşım elementlerinden Mg ve Si'un eser miktarda da olsa kaynak metaline kaynak esnasında uygulanan ısı ile kaynak metaline difüzyon ile geçiş yaptığı gözlemlenmiştir.

AA 6060 'un kaynak esnasında ortaya çıkan ısının etkisiyle Mg_2Si partiküllerini içerdiği gözlemlenmiştir [45].

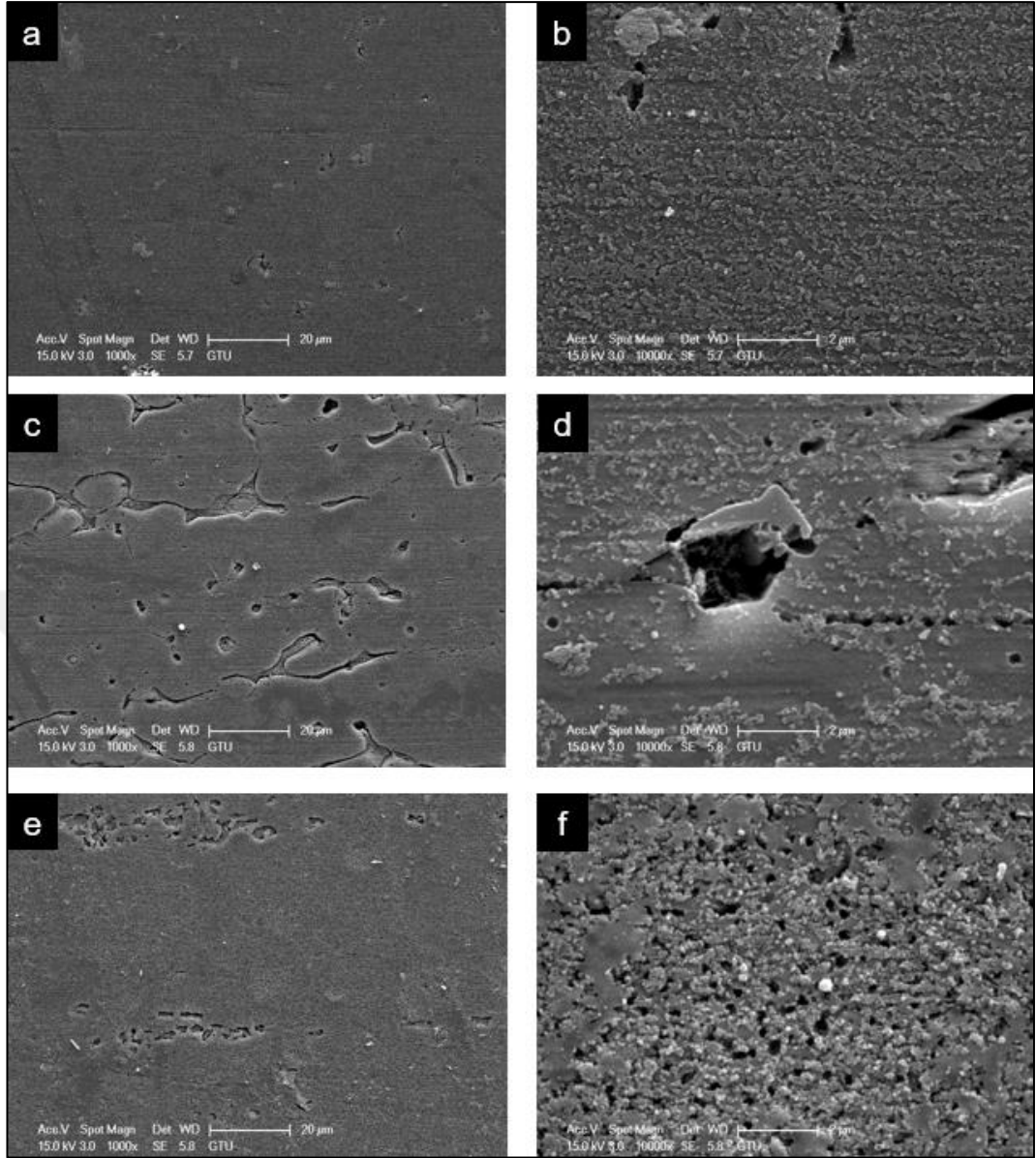
AA7075 numunelerinin hazırlandığı ana malzemeye ait SEM görüntüleri Şekil 7.61'de gösterilmiştir.



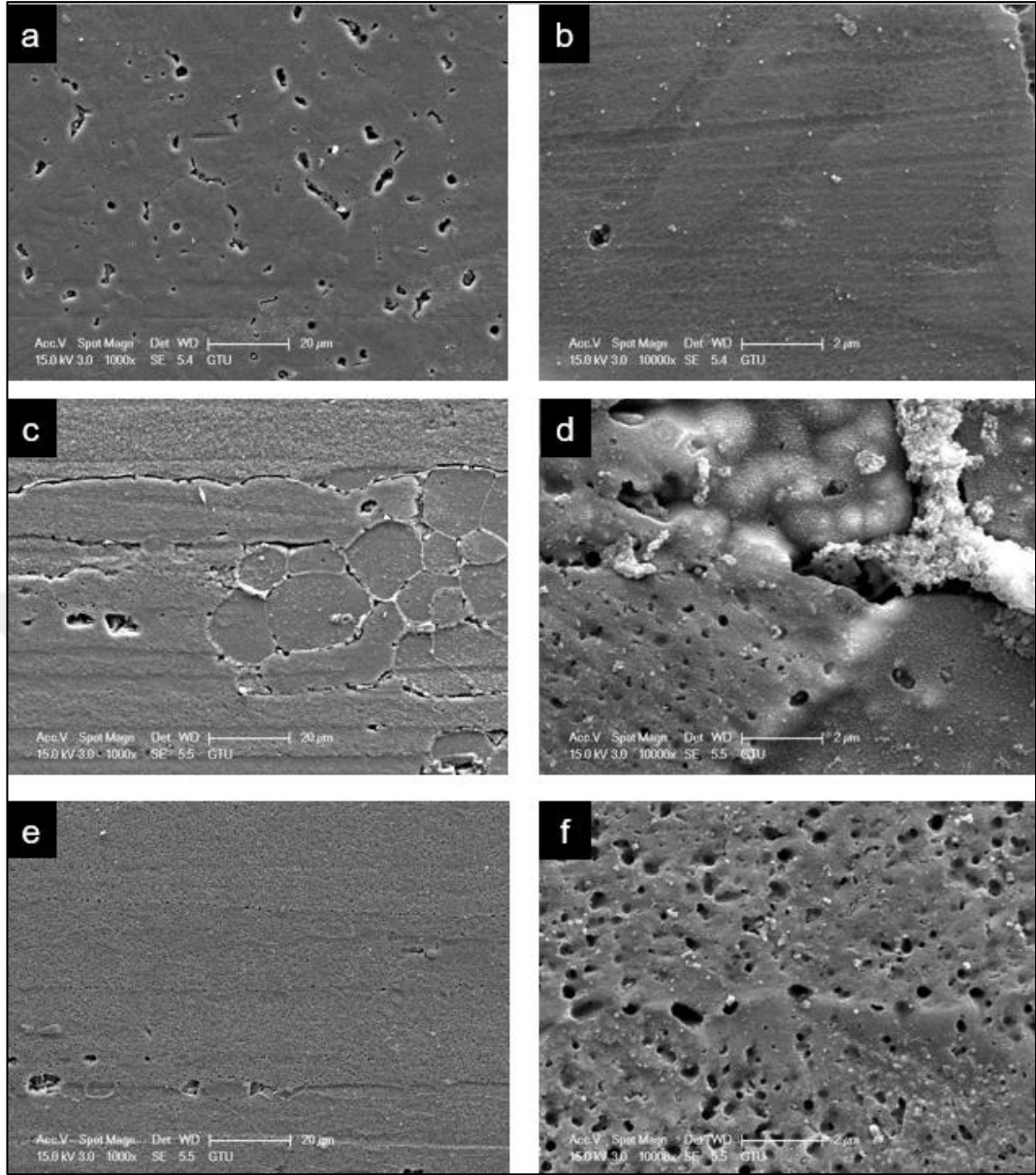
Şekil 7.61: AA 7075 SEM görüntüsü a) 1000X, b) 10000X.

Liamine Kaba ve arkadaşlarının çalışması ile AA 7075 ana malzemenin SEM yüzey görüntüleri gözenekli ve çukurlu yapısı ile benzerlik göstermektedir. Ayrıca bahse konu çalışma ile kaba partiküller çökelmeleri yönünden de benzerlik görülmektedir [31].

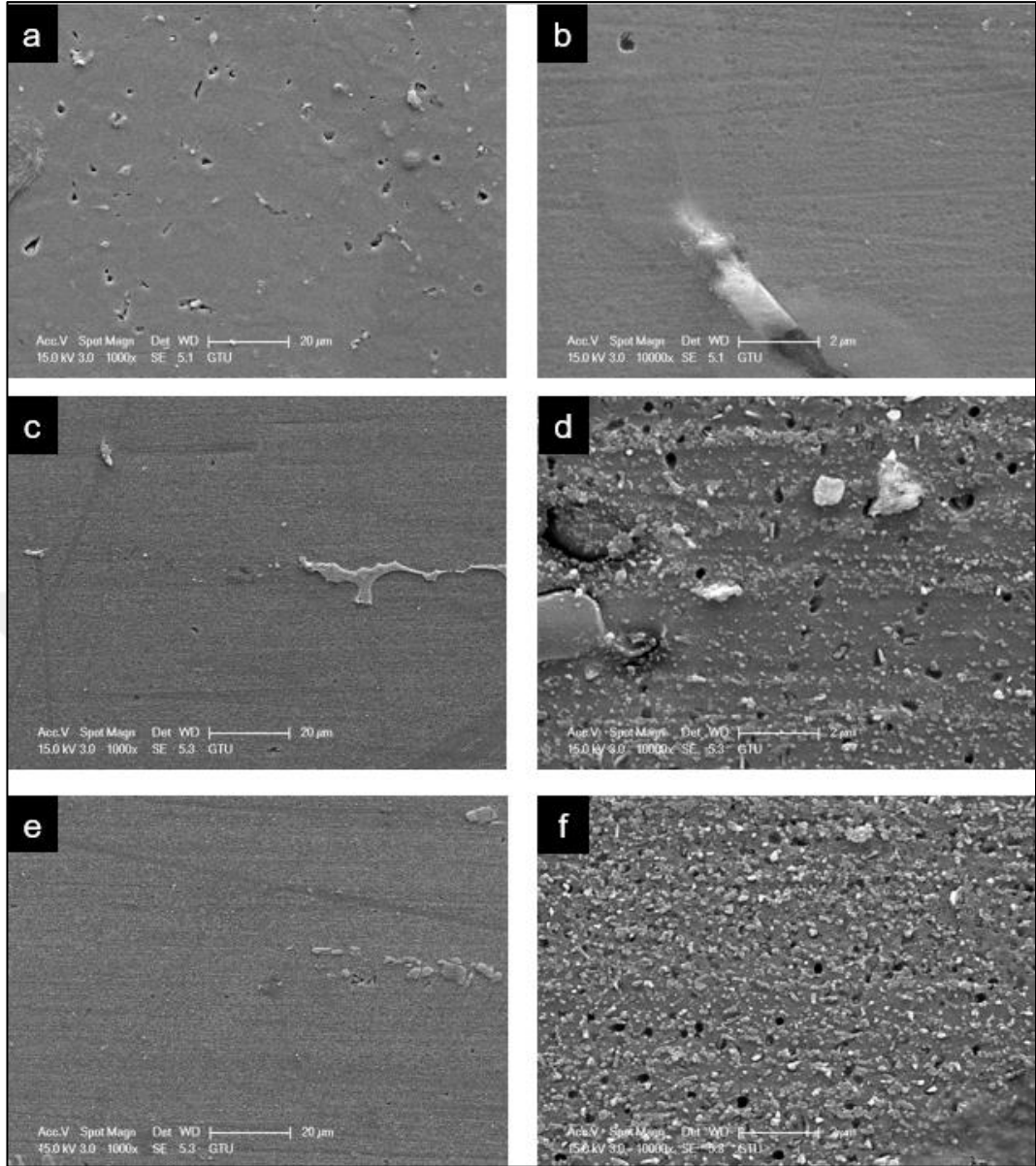
AA7075 75 A SEM görüntüleri Şekil 7.62, AA7075 80 A SEM görüntüleri Şekil 7.63 ve AA7075 85 A SEM görüntüleri Şekil 7.64’te gösterilmektedir.



Şekil 7.62: AA 7075 75A SEM görüntüleri a) kaynak bölgesi 1000X, b) kaynak bölgesi 10000X, c) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 1000X, d) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 10000X, e) ITAB bölgesi 1000X, f) ITAB bölgesi 10000X.



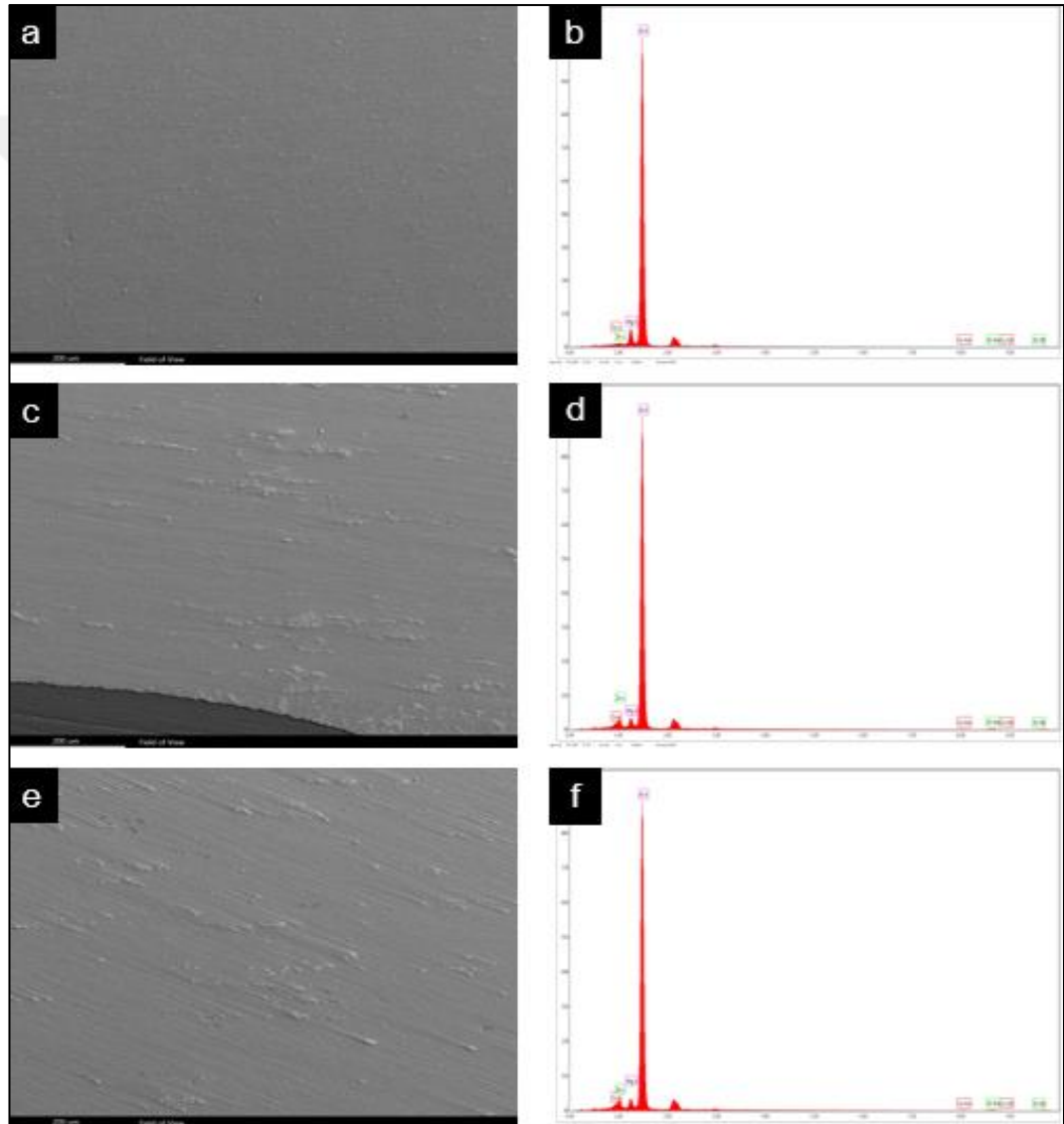
Şekil 7.63: AA 7075 80A SEM görüntüleri a) kaynak bölgesi 1000X, b) kaynak bölgesi 10000X, c) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 1000X, d) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 10000X, e) ITAB bölgesi 1000X, f) ITAB bölgesi 10000X.



Şekil 7.64: AA 7075 85A SEM görüntüleri a) kaynak bölgesi 1000X, b) kaynak bölgesi 10000X, c) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 1000X, d) kaynak-ITAB birleşim bölgesi 10000X, e) ITAB bölgesi 1000X, f) ITAB bölgesi 10000X.

Veeraiah Goriparthi ve arkadaşlarının çalışmasındaki kaynak bölgesinin SEM görüntüsü ile kaynak bölgesinin görüntüleri benzerlik göstermektedir [35]. Ayrıca Liamine Kaba ve arkadaşlarının çalışması ile AA 7075 ana malzemenin ve ITAB bölgesinin SEM yüzey görüntüleri gözenekli ve çukurlu yapısı ile benzerlik göstermektedir [31]. Ayrıca bahse konu çalışma ile kaba partiküller çökeltmeleri yönünden de benzerlik görülmektedir.

Numunelerin kaynak bölgesinde, kaynak-ITAB birleşim bölgesinde ve ITAB bölgelerinde ana malzemeye göre çukurlu yapı azalmıştır. Numunenin kaynak bölgesinde, kaynak-ITAB birleşim bölgesinde ve ITAB bölgelerinde tane sınırlarında ve çukurların etrafında çökelmeler başlamıştır. Akım arttıkça partiküllerin çözünme miktarı artmış ve kaynak bölgesinde, kaynak-ITAB birleşim bölgesinde ve ITAB bölgelerinde çukur ve gözenek miktarında azalma olduğu gözlemlenmiştir [27]. AA7075 SEM-EDS analizi görüntüleri Şekil 7.65'te, EDS elementel dağılımı Tablo 7.11 de gösterilmektedir.



Şekil 7.65: AA 7075 75A SEM-EDS analizi görüntüleri.

Tablo 7.11: AA 7075 75A EDS dağılımı.

	Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Net Int. Error
KAYNAK	Mg K	4,55	5,06	928,94	0,01
	Al K	94,33	94,48	16740,76	0,00
	Cu K	0,35	0,15	4,43	0,57
	Zn K	0,77	0,32	7,16	0,12
BİRLEŞİM	Mg K	2,84	3,31	500,42	0,01
	Al K	88,31	92,82	15004,39	0,00
	Cu K	1,95	0,87	26,08	0,15
	Zn K	6,90	2,99	67,04	0,03
ITAB	Mg K	3,00	3,49	518,91	0,01
	Al K	88,16	92,65	14709,98	0,00
	Cu K	1,82	0,81	24,00	0,14
	Zn K	7,02	3,04	67,10	0,03

Şekil 7.65 ve Tablo 7.11 incelendiğinde AA 7075 teki ana alaşım elementi olan Cu ve Zn kaynak esnasında ortaya çıkan ısının etkisi ile difüzyona uğradığı ve kaynak metalinde bu elementlerin varlığı gözlemlenmiştir.

AA 7075-T6 alüminyum alaşımı çökelme sertleşmesi uygulanmış alaşımı olup $MgZn_2$ ikinci faz partiküllerinin varlığı ile yüksek sertliğe sahiptir [42]. K. Dehghani ve arkadaşlarının çalışmasındaki gibi EDS analizi sonuçlarında Zn, Mg ve Cu alaşımları bulunduğu ve bunların büyük olasılıkla η fazında olduğu düşünülmektedir [27-42]. Literatürde bu faz $MgZn_2$ olup, ayrıca $AlCuMg$, Al_2CuMg , $Mg(Zn,Al,Mg)_2$ ve $Mg(Zn_2, AlMg)$ içerir [27-42-43].

8. SONUÇ

AA2024, AA5754, AA6060 ve AA7075 alüminyum alaşımlarından hazırlanan deney numunelerine kaynak öncesi ve sonrası bazı testler uygulanmıştır.

Kaynak öncesi yapılan elementel analiz ve sertlik testleri ile deney numunelerinin bahse konu alaşımlar olduğu literatür ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

Kaynak sonrası yapılan testlerin sonuçları aşağıda yer almaktadır.

1. AA2024 ‘ün TIG kaynağı ile birleştirilmesinde Al 4043 tel kullanılarak 85 A akım ile radyografi açısından en iyi sonuç alınmıştır. Sıvı Penetrant ile muayene sonucunda deney numunelerinde yüzeye açılan veya yüzeysel bir hata olmadığı gözlemlenmiştir. Çekme testi grafiklerinden, numunelerin ani kırılmaya uğradığı anlaşılmaktadır. Numuneler mikro sertlik değeri en yüksek olan ITAB’ tan kopmuştur. Akım artıça; akma ve çekme dayanımında azalmaya, mikro sertlik değerlerinde artışa, kaynak bölgesinde tane büyüklüğünün azalmasına ve düzenlenmesine, ITAB bölgesinde ise tanelerin genişlemesine ve uzamasına, tane sınırlarına çökkelmenin artmasına sebep olduğu gözlemlenmiştir. AA 2024 numunelere uygulanan test sonuçları değerlendirildiğinde en iyi sonuç Al 4043 tel kullanılarak 85 A ile kaynak yapıldığında elde edildiği gözlemlenmiştir.

2. AA5744 ‘ün TIG kaynağı ile birleştirilmesinde Al 5123 tel kullanılarak 85 A akım ile radyografi açısından en iyi sonuç alınmıştır. Sıvı Penetrant ile muayene sonucunda deney numunelerinde yüzeye açılan veya yüzeysel bir hata olmadığı gözlemlenmiştir. Çekme testi grafiklerinden, numunelerin sünek davranış gösterdiği yüksek plastik deformasyona uğradığı anlaşılmaktadır. Akım artışına bağlı olarak, akma ve çekme dayanımında azalmaya, çözünmesinin artmasına ve çökelmelerin, gözeneklerin ve dentritik yapıların azalmasına neden olduğu gözlemlenmiştir. Mikro sertlik değerlerinde 75 A kaynak bölgesinde dentritik büyüme ve çökelmelerin yoğunluğundan kaynaklı ana malzemeye ve diğer numunelere göre daha yüksek sertlik olduğu gözlemlenmiştir. Diğer numunelerin mikro sertliğinde önemli bir farklılık gözlemlenmemiştir. Numunelerin en yumuşak bölge olan ana malzemeden kırıldığı gözlemlenmiştir. AA 5754 numunelere uygulanan test sonuçları değerlendirildiğinde en iyi sonuç Al 5123 tel kullanılarak 75 A ile kaynak yapıldığında elde edildiği gözlemlenmiştir.

3. AA6060 ‘ın TIG kaynağı ile birleştirilmesinde Al 5123 tel kullanılarak 85 A akım ile radyografi açısından en iyi sonuç alınmıştır. Sıvı Penetrant ile muayene sonucunda deney numunelerinde yüzeye açılan veya yüzeysel bir hata olmadığı gözlemlenmiştir. Çekme testi grafiklerinden, numunelerin sünek davranış gösterdiği plastik deformasyona uğradığı anlaşılmaktadır. Akım artışına bağlı olarak ısı girdisindeki artışın, dentritik büyüme ve çökeltme oluşumunun arttırdığı tane sınırlarının belirginliğini azalttığı, bu sayede mikrosertlik, akma ve çekme dayanımlarının doğru orantılı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Dentritik büyüme çökelmelerin en yoğun olduğu kaynak bölgesinin en sert bölge olduğu gözlemlenmiştir. AA 6060 numunelere uygulanan test sonuçları değerlendirildiğinde en iyi sonuç Al 5123 tel kullanılarak 85 A ile kaynak yapıldığında elde edildiği gözlemlenmiştir.

4. AA7075 ‘ın TIG kaynağı ile birleştirilmesinde Al 5123 tel kullanılarak 85 A akım ile radyografi açısından en iyi sonuç alınmıştır. Sıvı Penetrant ile muayene sonucunda deney numunelerinde yüzeye açılan veya yüzeysel bir hata olmadığı gözlemlenmiştir. Çekme testi grafiklerinden, numunelerin ani kırılmaya uğradığı anlaşılmaktadır. Numunelerin en yumuşak, büyük tanelerden oluşan kaynak bölgesinden koptuğu gözlemlenmiştir. Akım artışına bağlı olarak ısı girdisindeki artış, akma ve çekme dayanımında azalmaya, mikro sertlik değerlerinde artışa, kaynak bölgesinde tane büyüklüğünün artmasına ve tane dağılımının düzensiz hale gelmesine, ITAB bölgesinde ise tanelerin daralmasına ve uzamasına sebep olduğu gözlemlenmiştir. AA 7075 numunelere uygulanan test sonuçları değerlendirildiğinde en iyi sonuç Al 5123 tel kullanılarak 75 A ile kaynak yapıldığında elde edildiği gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Anık, S. (1993). 1000 Soruda Kaynak Teknolojisi Cilt:I-II. Birsen Yayınevi.
- [2] Demirbaş, A., & Çevik, S. (2020). “TIG Kaynak Yöntemiyle Birleştirilmiş Alüminyum 1050 Alaşımının Mekanik ve Mikroyapı Özellikleri”. Academic Platform Journal of Engineering and Science, 471-477.
- [3] Kara, O., Erdal, H., & Çelik, H. H. (2017). “Bazı Tahribatsız Test Yöntemleri:Karşılaştırmalı Bir Derleme Çalışması”. Marmara Fen Bilimleri Dergisi, 82-93.
- [4] Deligöz, C. (2010). “Radyografik muayene yöntemi ile petrol boru hatlarındaki borularda kaynak dikişi ve diğer hataların incelenmesi.” İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi / Enerji Enstitüsü / Enerji Bilim ve Teknoloji Ana Bilim Dalı 95 sf.
- [5] Guirong, X., Xuesong, G., Yuliang, Q., & Yan, G. (2015). “Analysis and Innovation for Penetrant Testing for Airplane Parts”. Procedia Engineering, sf. 1438-1442.
- [6] Sutton, M., Yang, B., Reynolds, A., & Taylor, R. (2002). “Microstructural Studiess of Friction Stir Welds in 2024-T3” Aluminum. Materials Science and Engineering, 160-166.
- [7] Köse, C. (2011). “Robotik MIG ile Birleştirilen Aa 5754 Alüminyum Alaşımının Mikroyapı ve Mekanik Özellikleri”. Sakarya: Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.
- [8] Silva, M., Barbosa, C., Acselrad, O., & Pereira, L. (2004). “Effect of Chemical Composition Variation on Microstructure and Mechanical Properties of a 6060 Aluminum Alloy”. Journal of Materials Engineering and Performance, 129-134.
- [9] Temmar, M., Hadji, M., & Sahroui, T. (2011). “Effect of Post-Weld Aging Treatment on Mechanical Properties of Tungsten Inert Gas Welded Low Thickness 7075 Aluminum Alloy Joints”,. Materials & Design, 3532-3536.
- [10] ASM International. (1992). ASM Metals HandBook Volume 02 Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials (sf. 506-507).
- [11] Gökçe, A., Fındık, F., & Kurt, A. (2017). “Alüminyum Alaşımlarının Toz Metalurjisi İşlemleri”. Mühendis ve Makina, 21-47.
- [12] Yurdakul, M., Özbay, O., & İç, Y. (2002). “Havacılık Alanında Kullanılan Alüminyum Alaşımlarının Seçimi”. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, sf. 1-23.
- [13] Cagan, C., Ugurlu, M., & Buldum, B. (2017). “Alüminyum ve Alaşımlarının Asker Araçlarda Kullanımı. 2. Ulusal Savunma Sanayi Endüstrisi Sempozyumu Kırıkkale” , (sf. 402-406).

- [14] Yeşil, F. (2020). “Enjeksiyon Pres Döküm Yöntemiyle Üretilen Alüminyum Alaşımlarına Alaşım Element Etkisi”. Sakarya: Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi 68sf.
- [15] Gürdaş, M. (1999). “Kaynaklı Konstrüksiyonlarda Alüminyum ve Alaşımlarının Kullanımı”. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi 130 sf.
- [16] Anık, S. (1991). Kaynak Tekniği El Kitabı: Yöntemler ve Donanımlar. İstanbul: Gedik Eğitim Vakfı.
- [17] Kaluç, E. (2004). Kaynak Teknolojisi El Kitabı Clit-1. Ankara: TMMOB Makina Mühendisleri Odası.
- [18] Jeyaparakash, N., Haile, A., & Arunprasath, M. (2015). “The Parameters and Equipments Used in TIG Welding: A Review”. The International Journal Of Engineering And Science (IJES), sf.11-20.
- [19] Yağcı, T.; Çidem, A.; Durmuş, H.. (2018). Geçmişten Günümüze Tahribatsız Muayene Yöntemleri. Manisa Celal Bayar Üniversitesi Soma MYO Teknik Bilimler Dergisi, sf. 49-61.
- [20] Türk Loydu Kısım 3 Kaynak Kuralları
- [21] Binczewski, G. J. (1995). “The Point of a Monument: A History of the Aluminum Cap of the Washington Monument” . JOM: Sayı 47, sf. 20-25.
- [22] Vural, M., Ogur, A., Cam, G., & Ozarpa, C. (2007). “On the friction stir welding of aluminium alloys EN AW 2024-0 and EN AW 5754-H22”. Archives of Materials Science and Engineering, sf.49-54.
- [23] TSE. (2003). TS EN 13018 - Tahribatsız muayene-Gözle Muayene Genel Kurallar. Ankara.
- [24] Arslan, M. (2023). “Gazaltı (MIG) kaynak yöntemiyle birleştirilen 6061 serisi alüminyum plakalarına yapılan kaynak tamirinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi”. Sakarya: Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi 120sf..
- [25] Poole, W., Millitzer, M., & Wells, M. (2003). “Modelling Recovery and Recrystallisation During Annealing of AA 5754 Aluminium Alloy”. Materials Science and Technology, sf.1361-1368.
- [26] Devireddy, K., Devuri, V., Cheepu, M., & Kumar, B. (2018). “Analysis of the Influence of Friction Stir Processing on Gas Tungsten Arc Welding of 2024 Auminum Alloy Weld Zone”. International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD) , 243-252

- [27] Şahin, S. (2021). “AA7075 Alüminyum Alaşımının Sürtünme Karıştırma Kaynağı İle Birleştirilmesinde Kaynak Parametrelerinin Mekanik Özellikler Üzerine Etkilerinin İncelenmesi”. Yozgat: Yozgat Bozok Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tez.
- [28] Dong, J., Zhang, D., Zhang, W., Zhang, W., & Qiu, C. (2018). “Microstructure Evolution during Dissimilar Friction Stir Welding of AA7003-T4 and AA6060-T4”. Materials (Basel), 342-353.
- [29] Tımaç, G. (2006). “Uçak endüstrisinde kullanılan alüminyum alaşımlarının TIG kaynak yöntemi ile kaynaklanabilirliğinin incelenmesi”. İstanbul: Marmara Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Metal Eğitimi Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi.
- [30] Arıcı, K.(2019). “Ticari Saflıkta 5xxx Ve 7xxx Serisi Alüminyum Alaşımlarının Lazer Kaynağında Kaynak Değişkenlerinin Kaynaklı Birleştirmenin Mekanik Ve Metalurjik Özellikleri Üzerine Etkisi” İzmir: Ege Üniversitesi /Fen Bilimleri Enstitüsü/ Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi.
- [31] Kaba, L., Djeghlal, M., Ouallam, S., & Kahla, S. (2022). “Dissimilar welding of aluminum alloys 2024 T3 and 7075 T6 by TIG process with double tungsten electrodes”. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 937-948.
- [32] Durmuş, H., & Çömez, N. (2018). “Soğuk metal transferi ile birleştirilen AA5754 alaşımı ince sacların korozyon davranışı”. Politeknik Dergisi, 907-911.
- [33] Dallı, K. (2022). “Zn5.5mgcu Al Alaşımına Uygulanan Yüzey Haddeleme İşleminin Mekanik Özelliklere Etkisi”. Ankara: Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi.
- [34] Karadağ, A. (2011). “Alüminyum alaşımlarının TIG kaynağında kaynak parametrelerinin dikiş geometrisine ve mekanik özelliklere etkisi”. Sakarya: Sakarya Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Metal Eğitimi Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi.
- [35] Goriparthi, V., Nallu, R., Chebolu, R., Indupuri, S., & Rudrapati, R. (2023). “Experimental Studies on Mechanical Behavior of TIG and Friction Stir Welded AA5083 -AA7075 Dissimilar Aluminum Alloys”. Advansec in Materials Science and Engineering, 7sf.
- [36] Magmaweld. (2024). Malzeme Kalite Sertifikaları
- [37] TS EN ISO 10675-2 Kaynakların tahribatsız muayenesi- Radyografik muayene için kabul seviyeleri- Bölüm 2: Alüminyum ve alaşımları
- [38] TS EN ISO 23277 Kaynakların tahribatsız muayenesi- Kaynakların penetrant muayenesi - Kabul seviyeleri

- [39] Fallah, V.; Langelier, B.; Ofori-Opoku, N.; Raeisinha, B.; Provatas, N.; Esmaeili, S. "Cluster evolution mechanisms during aging in Al–Mg–Si alloys". *Acta Mater.* 2016, 103, 290–300.
- [40] Çubuk HS, Kurt G, Çavdar U. "Investigation of the Effects of Different Welding Methods Applied on Aluminum 7075 Material on the Mechanical and Microstructure Structure Properties of the Joint Zone". *TUR J ENG RES & EDUC.* November 2022;1(2):120-128.
- [41] Askeland D. R., Fulay, P. P., Wright, W. J. (2010). *The Science and Engineering of Materials*, 1-896, USA: Cengage Learning.
- [42] Dehghani, K., Ghorbani, R., Soltanipoor, A. R. (2015). "Microstructural Evolution and Mechanical Properties During the Friction Stir Welding of 7075-O Aluminum Alloy". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 77(2), 1671-1679.
- [43] Mao, Y., Ke, L., Chen, Y., Liu, F., Xing, L. (2017). "Improving Local and Global Mechanical Properties of Friction Stir Welded Thick AA7075-T6 Joints by Optimizing Pin-Tip Profile". *Int J Adv Manuf Technol*, (88), 1863-1875.
- [44] Wimmer, A., Hämmerle, A., Marioara, C.D. (2022). "Precipitation Hardening in Innovative Processing of 6xxx Aluminum Alloys. In: Eskin, D. (eds) *Light Metals 2022*". *The Minerals, Metals & Materials Series*. Springer, Cham.
- [45] Arıbal, T. (2023). "Sürtünme Karıştırma Kaynağında Takım Kaynak Hızı Parametrelerinin Ve Omuz Tasarımının Mekanik Özelliklere Etkisinin Alüminyum 6061 T6 Özelliğindeki Malzeme İçin İncelenmesi". Ankara: Gazi Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi.
- [46] Alfieria V, Caiazzoa F, Sergi V (2015) "Autogenous laser welding of AA 2024 aluminium alloy: process issues and bead features". *Procedia Cirp* 33:406–411.
- [47] Jalilvand V, Omidvar H, Khorrami H (2014) "Effect of welding parameters on the mechanical properties of AA2024 aluminium alloy joints welded by resistance seam welding". *Can Metall Q* 53(2):117–124.
- [48] Kulekci, M. K., Eşme, U., Ekşi, A. K., Koçoğlu, Z., vd. (2017). "En Aw 5754 (Almg3) Alüminyum Alaşımının Frezelenmesi İşleminde Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin İncelenmesi". *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(2), 153-160.
- [49] Takhakh, A.M., & Hussein, H. (2021). "Experimental Investigation and Parametric Optimization of FSW for the 2024-O Aluminum Alloy Joints", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1094.

ÖZGEÇMİŞ

Elif AYBİRDİ, Lise Öğrenimini 2011 yılında Ankara’da tamamladı. 2013 yılında Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü’nde başladığı Lisans eğitimini 2017 yılında tamamladı. 2021 yılında Gebze Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalında, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği’nde yüksek lisans eğitimine başladı.



TEZ ÇALIŞMASI KAPSAMINDA YAPILAN YAYINLAR

Aybirdi E., Usta M., (2023), “Alüminyum Alaşımlarının TIG Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmesinde Alaşım Elementlerinin ve Kaynak Parametrelerinin Etkisi”, 11. Uluslararası Alüminyum Sempozyumu (ALUS11), İstanbul Fuar Merkezi, İstanbul, Türkiye, 12-14 Ekim.

