

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAVACILIK BİLİMİ VE TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TIG KAYNAK YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLEN 6061
ALUMİNYUM ALAŞIMININ KARAKTERİZASYONU

AYBARS BAĞLAN

KOCAELİ 2025

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAVACILIK BİLİMİ VE TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TIG KAYNAK YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLEN 6061
ALUMİNYUM ALAŞIMININ KARAKTERİZASYONU

AYBARS BAĞLAN

Doç. Dr. Mustafa TÜMER
Danışman, Kocaeli Üniversitesi

Doç. Dr. Tolga MERT
Jüri Üyesi, Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Sinan YILMAZ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

Tezin Savunulduğu Tarih: 21.01.2025

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmada,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

☒ Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

☐ Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler tarafından no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Aybars BAĞLAN

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki makale, kitap, tebliğ, lisans, patent gibi çalışmalarda kullanımı, danışmanımın isim hakkı saklı kalmak koşuluyla ve her iki tarafın bilgisi dâhilinde bana ait olacaktır.

Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan **“Lisanüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.

☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.

☒ Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

Aybars BAĞLAN

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

İlk olarak çalışmama yön veren ve bu yolda desteğini hiçbir zaman esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Mustafa Tümer'e sonsuz şükranlarımı sunarım. Tezin mikro yapı analizlerinde yine desteklerini esirgemeyen Prof. Dr. Ş. Hakan Atapek ve Arş. Grv. Dr. Müh. Gülşah Aktaş Çelik'e teşekkürlerimi sunuyorum. Elektrokimyasal korozyon testinde yine yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Alptekin Kısasöz'e teşekkür ediyorum.

Tez çalışmasında, çalışanı olduğum Turkish Technic AŞ. bünyesinde faaliyet gösteren Kaynak Atölyesi'nde kaynakla birleştirme aşamaları gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda bana bu imkanı veren ve desteğini sürekli yanımda hissettiğim çalıştığım kurumum olan Turkish Technic A.Ş.'ye şükranlarımı sunuyorum.

Yüksek lisans çalışmalarımda desteğini sunan Turkish Technic A.Ş. personeli Metin Erbek'e teşekkürlerimi sunuyorum. Tez süreci öncesi eğitim sürecinde destek olan Başteknisyenim Serkan Onrat ve tez sürecinde motivasyon desteğiyle süreci canlandıran çalıştığım bölüm olan Board 6'daki tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi iletiyorum.

Son olarak başta yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen nişanlım Şükran Sude Toprak'a, her zaman arkamda olduğunu hissettiğim babam İrfan Bağlan'a, annem Birsal Bağlan'a ve ağabeyim İltan Bağlan'a sonsuz teşekkür ediyorum.

Ocak-2025

Aybars BAĞLAN

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ.....	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
TABLOLAR DİZİNİ.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. GİRİŞ	1
2. ALUMİNYUM VE ALAŞIMLARI	3
2.1. Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	3
2.2. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması.....	4
2.2.1. Temper Tanımı	9
2.2.2. Döküm Alüminyum Alaşımları.....	9
2.2.3. Dövme Alüminyum Alaşımları.....	10
2.3. Isıl İşleme Uygun Olan ve Uygun Olmayan Alaşımlar.....	18
2.3.1. Çözeltiye Alma İşlemi	20
2.3.2. Su Verme İşlemi.....	21
2.3.3. Yaşlandırma İşlemi	22
2.4. Bu Çalışma için Seçilen AW 6061 Malzemenin Özellikleri	23
2.5. Havacılık Endüstrisinde Alüminyum Alaşımlarının Kullanım Alanları	25
2.5.1. Havacılıkta En Çok Kullanılan Alüminyum Alaşımları	26
2.5.2. 6061 Alüminyum Alaşımlarının Kullanımı	29
3. ALUMİNYUM MALZEMELERİN BİRLEŞTİRİLMESİ VE KAYNAK METALURJİSİ.....	30
3.1. TIG Kaynağının Fiziksel Prensipleri.....	30
3.1.1. TIG Kaynak Türleri	33
3.1.2. TIG Kaynağında Kullanılan Güç Kaynakları	33
3.1.3. Alüminyum TIG Kaynağı Dolgu Metali Malzemeleri	35
3.2. Alüminyum Alaşımlarının Kaynak Kabiliyeti	35
3.2.1. Alüminyum Alaşımlarının TIG Kaynağı	37
3.3. Kaynak İşlemi Esnasında Meydana Gelen Hatalar	38
3.3.1. Porozite Hatası	38
3.3.2. Katılaşma Çatlama.....	40
3.3.3. Sıvılaşma Çatlama.....	42
3.3.4. Oksit Kalıntıları	43
3.4. Havacılık Sistemlerinde Kaynak İşlemleri.....	44
3.5. Literatürde Yapılmış Çalışmalar.....	46
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	52
4.1. Ana Malzeme, İlave metaller ve Birleştirme İşlemi	52
4.2. Makro ve Mikroyapı İncelemeleri.....	54
4.3. Mikrosertlik Testi	55
4.4. Çekme Testi.....	55
4.5. Elektrokimyasal Korozyon Deneyi	57
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	59

5.1. Makroyapı	59
5.2. Mikroyapı	60
5.3. Mekanik Özellikler.....	64
5.4. Elektrokimyasal Korozyon.....	66
6. SONUÇLAR.....	69
KAYNAKLAR	71
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	78
ÖZGEÇMİŞ.....	79



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Aluminyum alaşımlarının sınıflandırılmasının genel görünümü.....	5
Şekil 2.2.	Dövme ve dövme stokları formunun TS EN 573-5 standartına göre detaylı gösterimi (TS EN 573-5)	6
Şekil 2.3.	Ekstrüde edilmiş dövme aluminyum alaşımının TS EN 573-5 standartına göre detaylı gösterimi (TS EN 573-5).....	6
Şekil 2.4.	Hadde formunun TS EN 573-5 standartına göre detaylı gösterimi (TS EN 573-5)	7
Şekil 2.5.	Dövme aluminyum alaşımının standartlara uygun gösterimi	8
Şekil 2.6.	Döküm aluminyum alaşımının gösterimi ve tanımlanması	8
Şekil 2.7.	En çok kullanılan 6XXX aluminyum alaşımlarının bileşim sınırı	16
Şekil 2.8.	EN AW-6061 aluminyum alaşımının ısıtma işlem aşamalarının diyagramı (Velling, 2020).....	20
Şekil 2.9.	Aluminyum alaşımın proses sırasındaki mikroyapı evrimleri a) çözültiden öncesi b) çözünme evresi başlangıcı c) çözünme tamamlandıktan sonra mikroyapı.....	21
Şekil 2.10.	Ortalama soğutma hızı ve ısıtma işlem sıcaklığı arasındaki ilişki.....	22
Şekil 2.11.	Magnezyumun Aluminyum ısıtma işlemine etkisi	23
Şekil 2.12.	Farklı uçakların yapısında kullanılan malzemeler (a) B737 (b) A330	25
Şekil 2.13.	B787 uçağındaki malzeme dağılımı	26
Şekil 2.14.	Uçakların iç yapısındaki, 2024, 2014 ve 2618 gibi 2xxx serisi alaşımlardan yapılmış ekstrüzyonlar ve plakaların bir görüntüsü	28
Şekil 2.15.	Uçağın çeşitli bölgelerinde aluminyum kullanımı.....	28
Şekil 3.1.	TIG kaynağının şematik diyagramı	31
Şekil 3.2.	TIG prosesi	32
Şekil 3.3.	Kaynakta kullanılan akım türleri (modları)	34
Şekil 3.4.	Kaynak metalinde çeşitli porozite görüntüleri.....	39
Şekil 3.5.	Porozite görüntüsü	39
Şekil 3.6.	Katılma çatlaklarının ilerlemesinin şematik gösterimi	41
Şekil 3.7.	6061 aluminyum alaşımında gözlemlenen katılma çatlakları örneği	41
Şekil 3.8.	TIG kaynaklı 6061 Aluminyum alaşımında sıvılaşma çatlamaşı	43
Şekil 3.9.	Aluminyum alaşımının kaynağı sonrası oksit kalıntısı görüntüsü.....	44
Şekil 3.10.	Kondansatör üzerinde uygulanan kaynağın görüntüsü.....	45
Şekil 3.11.	Reheater üzerinde uygulanan kaynağın görüntüsü	46
Şekil 3.12.	Heat exchanger üzerinde uygulanan kaynağın görüntüsü.....	46
Şekil 3.13.	ER5356 ve ER4043 ile birleştirilen numunelerin çekme dayanımı	48
Şekil 3.14.	ER4043 ve ER5356 ile birleştirilen Aluminyum alaşımının mikroyapı görüntüleri	48
Şekil 3.15.	Numunelerin standart çekme testi sonrası kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri	49
Şekil 3.16.	Numunelerin çentikli çekme testi sonrası kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri.....	50
Şekil 3.17.	ER4043 ve ER5356 ilave metalleri ile birleştirilen AW 6061 alaşımının gerilim gerinim grafiğı	51
Şekil 4.1.	Optik emisyon spektrometre cihazı	52

Şekil 4.2.	Kök gazı kullanarak TIG kaynak yöntemi ile AW 6061 malzemenin birleştirme işlemi	53
Şekil 4.3.	Farklı ilave metaller ile birleştirilen AW6061 malzemeler.....	54
Şekil 4.4.	BMS Microbul 1000DN mikrosertlik test cihazı.....	55
Şekil 4.5.	Çekme testi numune ölçüleri	56
Şekil 4.6.	BESMAK BMT-600S model servo hidrolik çekme test cihazı	56
Şekil 4.7.	Korozyon deney hücresi	57
Şekil 5.1.	Kaynak metallerinin LM ve SEM makroyapısı a) ER 4190 b)ER 5356	59
Şekil 5.2.	Ana metalin mikroyapısı (a) SEM ve (b) EDS analizi	60
Şekil 5.3.	Ergime sınırı bölgesi mikroyapısı a) ER 4190 b)ER 5356	61
Şekil 5.4.	Kaynak metali mikroyapısı a) ER 4190 b) ER 5356 (LOM).....	62
Şekil 5.5.	Kaynak metali mikroyapısı a) ER 4190 b) ER 5356 (SEM)	63
Şekil 5.6.	ER 4190 ve ER5356 dolgu metalleri kullanılarak elde edile birleştirmenin gerilim-gerinim eğrisi.....	64
Şekil 5.7.	Çekme testi sonrası numunelerin son hali a) ER 4190, b) ER 5356.....	65
Şekil 5.8.	Mikrosertlik sonuçları.....	66
Şekil 5.9.	%3,5 NaCl çözeltisinde oda sıcaklığında ana malzeme ve kaynak metallerinin polarizasyon eğrileri	67

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1.	Aluminyumun fiziksel ve mekanik özellikleri	3
Tablo 2.2.	Dövme aluminyum alaşımları ve elementleri	8
Tablo 2.3.	Temel 1XXX alaşımları ve kimyasal analizleri (TS EN 573-3+A2).....	11
Tablo 2.4.	Temel 2XXX aluminyum alaşımları ve içerikleri (TS EN 573-3+A2).....	12
Tablo 2.5.	2XXX alaşımların ürün formları (TS EN 573-3+A2)	13
Tablo 2.6.	Temel 6XXX aluminyum alaşımları ve içerikleri (TS EN 573-3+A2).....	15
Tablo 2.7.	6XXX alaşımlarının ürün formları (TS EN 573-3+A2)	15
Tablo 2.8.	7XXX aluminyum serisi alaşımları ve içerikleri (TS EN 573-3+A2)	18
Tablo 2.9.	7XXX alaşımlarının ürün formları (TS EN 573-3+A2)	18
Tablo 2.10.	6061 aluminyum alaşımını kimyasal bileşimi	24
Tablo 2.11.	6061 aluminyum malzemenin mekanik özellikleri.....	24
Tablo 2.12.	B777 de kullanılan bazı alaşımların temperleri ve kullanıldıkları alanlar	27
Tablo 3.1.	ISO 6848 TIG kaynak elektrod örnekleri	32
Tablo 3.2.	Birleştirilecek ana malzemelere göre dolgu metalinin seçimi	35
Tablo 3.3.	Isıl işlem gören alüminyum alaşımların kaynak kabiliyetleri.....	36
Tablo 3.4.	Isıl işlem görmeyen bazı aluminyum alaşımların kaynağı	37
Tablo 4.1.	Ana malzeme ve ilave metallerin elementel içerikleri (% ağırlık), mekanik özellikleri	53
Tablo 4.2.	Birleştirme esnasında kullanılan kaynak parametreleri.....	54
Tablo 5.1.	ER 4190 ve ER 5356 dolgu metalleri ile birleştirilmiş AW 6061 alaşımının çekme testi sonuçları	64
Tablo 5.2.	Potansiyodinamik polarizasyon testlerinin sonuçları	68

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

%	: yüzde
°C	: Santigrat Derece
Al	: Alüminyum
Ar	: Argon
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
E _{corr}	: Korozyon Potansiyeli
gr/cm ³	: Gram / Santimetreküp
mm/dk	: İlerleme
Mn	: Mangan
MPa	: Megapaskal
N/mm ²	: Çekme Dayanımı Ölçü Birimi
W.m ⁻¹ .K ⁻¹	: Termal İletkenlik Ölçü Birimi

Kısaltmalar

AA	: Alternatif Akım
B777	: Boeing 777
DA	: Doğru Akım
DAEP	: Doğru Akım Elektrot Pozitif
DAEN	: Doğru Akım Elektrot Negatif
FSW	: Friction Stir Welding (Sürtünme Karıştırma Kaynağı)
HV	: Hardness Vickers (Vickers Sertlik)
MIG	: Metal Inert Gas
PMZ	: Partially Melted Zone (Kısmen Ergimiş Bölge)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Tarama Elektron Mikroskobu)
TIG	: Tungsten Inert Gas

TIG KAYNAK YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLEN 6061 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ KARAKTERİZASYONU

ÖZET

Havacılık endüstrisi, malzeme alanında meydana gelen değişimlere paralel olarak ağırlık azaltımı, mukavemet ve maliyet açısından alüminyum alaşımlarını giderek artan bir kullanım alanında tercih etmektedir. Ancak benzersiz özelliklerine rağmen alüminyum malzemelerin birleştirilmesinin kendine has zorlukları vardır. Kaynak yöntemi, kaynak parametreleri, doğru ilave metal seçimi ve ana malzemenin kapsamlı temizliği için belirli tekniklerin uygulanması gerekir. Isıl işlem uygulanabilen alüminyum alaşımlarından AW 6061 uygun işlemler neticesinde sergiledikleri mekanik özellikler ve korozyon dayanımları ile uçak gövde ve yapı elemanlarında tercih edilirler. Havacılık tamir-bakım kaynak işlemlerinde alüminyum alaşımlarında meydana gelen hasarların kaynak prosesleri ile giderilmesi yaygın bir uygulamadır. Bu çalışmada AW 6061'in Tungsten Inert Gas (TIG) kaynak yöntemi ile birleştirilmesi ve elde edilen kaynak metallerinde ilave metalin yapısal performansa etkisini belirlemek amacı ile birleştirmelere mekanik ve mikroyapısal karakterizasyon gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, potansiyodinamik polarizasyon testleri sonrasında Tafel eğrileri kullanılarak korozyon potansiyeli (E_{corr}), korozyon akım yoğunluğu (I_{corr}) ve korozyon hızı değerleri elde edilmiştir. Birleştirme performansı açısından ER 4190 ilave metal ile elde edilen kaynak metali ER5356'ya göre daha üstün mekanik özellikler elde edilmiştir. Kaynaklı numunelere uygulanan çekme testi sonrasında tüm kopmalar ana malzemede meydana gelmiştir. ER 5356'nın çekme testi ile uyumsuz olarak sertlik açısından daha yüksek değerler elde edilmesinin nedeni geniş bir alanda oluşan kaynak havuzunun ısı etkisi altındaki bölgede intermetalik fazlarda meydana getirdiği çözünmeden kaynaklanmaktadır. Ana malzemenin korozyon akım yoğunluğu ve korozyon hızı ile değerlendirildiğinde elektrokimyasal korozyon hızının kaynak metallerine göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum Alaşımları, Havacılık Endüstrisi, Kaynak Metalurjisi, Korozyon, TIG Kaynağı.

CHARACTERIZATION OF 6061 ALUMINIUM ALLOY JOINED BY TIG WELDING PROCESS

ABSTRACT

The aviation industry increasingly prefers aluminum alloys due to their weight reduction, strength, and cost benefits, which are parallel with changes in material science. Despite their unique properties, joining aluminum materials presents its own set of challenges. Specific techniques must be determined for welding methods, welding parameters, proper filler metal selection, and thorough cleaning of the base material. Among aluminum alloys that can be heat treated, AW 6061 is preferred in aircraft fuselage and structural components due to its mechanical properties and corrosion resistance achieved through appropriate processes. In aviation repair and maintenance welding operations, it is common practice to address damage to aluminum alloys through welding processes. In this study, AW 6061 was joined using the Tungsten Inert Gas (TIG) welding method, and mechanical and microstructural characterizations were performed to determine the effect of filler metal on the structural performance of the welded joints. After the potentiodynamic polarization tests, the corrosion potential (E_{corr}), corrosion current density (I_{corr}), and corrosion rate values were obtained using Tafel curves. The welding metal obtained with ER 4190 filler metal demonstrated better mechanical properties than ER 5356. In the tensile test of the welded samples, all fractures occurred in the base material. In contrast to its tensile test performance, the higher hardness values observed with ER 5356 are due to dissolution in intermetallic phases in the heat-affected zone of the wide weldpool. When evaluated in terms of corrosion current density and corrosion rate, the electrochemical corrosion rate of the base material was found to be higher than that of the weld metals.

Keywords: Aluminum Alloys, Aviation Industry, Welding Metalurgy, Corrosion, TIG Welding.

1. GİRİŞ

Aluminyum ve alaşımları, düşük yoğunlukları, üretim şartlarından kaynaklanan iyi mukavemetleri ve korozyon ortamlarda mükemmel direnç göstermeleri nedeniyle geniş bir uygulama yelpazesi göre mühendislik malzemelerinden biridir. Aluminyumun ekonomik ve geniş kullanım alanına sahip olmasının temel nedenleri arasında, uygun mekanik özelliklerinin yanı sıra düşük yoğunluğu, kolay işlenebilirliği, rahatlıkla şekillendirilebilir olması, geri dönüştürülebilir olması, yüksek ısı ve elektrik iletim kabiliyeti ile manyetik özellik taşıması gibi özellikler bulunmaktadır (Prakash ve diğ., 2016). Aluminyum alaşımları, yukarıda belirtilen özelliklere sahip olmaları sayesinde uzay, havacılık ve savunma endüstrilerinin ilerlemesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Hava taşıtı dünyasında aluminyum hafif ve mukavemetli olması nedeni ile her zaman yoğun bir ilgi görmüştür. Aluminyum alaşımlarının kaynak kabiliyeti, çelik gibi geleneksel malzemelerden önemli ölçüde farklıdır. Aluminyum kaynaklarını etkileyen fiziksel özellikler şunlardır:

- yüksek ısı iletkenliği;
- yüksek katılma büzülmesi;
- yüzeyde oksit oluşumu;
- yüksek termal genleşme katsayısı;
- ergimiş haldeyken hidrojenin yüksek çözünürlüğü;
- nispeten geniş katılma sıcaklığı aralıkları (Praveen ve Yarlagadda, 2005).

Aluminyumun çeliğe kıyasla daha yüksek termal genleşme katsayısı, kaynak işlemleri sonrasında çatlak oluşumu gibi olumsuzluklara neden olabilir. Aluminyumun yüksek ısı iletkenliği, kaynak metalinin hızlı katılmasını sağlar. Bu özellik, aluminyum parçaların her pozisyonda kolayca kaynak edilebilmesini sağlar ama parçaları eritmek için çeliğe kıyasla daha fazla ısıya ihtiyaç duyulmaktadır. Aluminyum alaşımlarının kaynağındaki başlıca problemlerden biri ise yüzeyde oksit oluşmasıdır. Kaynak metalinde hacimsel oksit kalıntılarının mukavemet düşmesine neden olmaması için kaynak öncesi yüzey temizliğine önem verilmektedir.

Aluminyum alaşımlarını birleştirilmesinde çok fazla kaynak yöntemi kullanılmaktadır. Örneğin sürtünme karıştırma kaynağı (FSW), plazma kaynağı (PAW) veya metal inert gaz kaynağı (MIG) gibi birçok kaynak yöntemi ile aluminyum alaşımı parçaların kaynağı gerçekleştirilmektedir. Bu alışmada Tungsten Inert Gaz kaynağı (TIG) yöntemi ince kesitli malzemelerde düşük ısı girdisi nedeni ile tercih edilmiştir. TIG kaynağı, aluminyum alaşımlarının birleştirilmesinde ısının rahat kontrol edilebilmesi nedeni ile yaygın bir kullanım ağına sahiptir.

Çalışmamızda birleştirilen malzeme olarak havacılık uygulamalarında yaygın kullanım alanına sahip EN AW 6061 aluminyum alaşımı kullanılmaktadır. Bu alaşım, yüksek mukavemet, düşük yoğunluk ve yüksek korozyon direnci sayesinde havacılık endüstrisi için önemli bir yere sahiptir. Günümüzde uçağın kanat kaplamalarında, gövde panellerinde ve motorun fan cowl ve thrust reverser bölgelerinde kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında EN AW 6061 aluminyum alaşımı farklı dolgu metalleri kullanılarak TIG kaynak yöntemi ile birleştirilerek mikroyapı/mechanik özellikler ilişkisi ve korozyon davranışları araştırılmıştır. Birleştirilen ince kesitli levhalara uygulanan testler ile kaynak metallerinin sunduğu performans farklılıkları incelenmiştir. Birleştirilen numunelere uygulanan makro/mikroyapı, mikrosertlik, çekme testi ve elektrokimyasal tez çalışması kapsamında uygulanmıştır.

2. ALUMİNYUM VE ALAŞIMLARI

2.1. Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Aluminyum, gümüş rengi formunda, düşük yoğunluklu, hafif, esnek ve yüksek korozyon direncine sahip bir metaldir. Elektrik ve ısı iletkenliği yüksektir. Düşük atom kütlesi nedeniyle demir, bakır ve titanyuma kıyasla daha düşük bir yoğunluğa sahiptir. Ayrıca, düşük bir çekme dayanımı vardır; bu değer 90 N/mm² olup, demir için 280 N/mm² ve titanyum için 240 N/mm²'dir. Aluminyumun modül/yoğunluk oranı yani özgül modülü, demir, titanyum ve magnezyum için olan değerlere neredeyse eşittir ve yüksektir bu da onları tercih edilen malzeme haline getirmektedir (Starke, 2005).

Aluminyum içerisinde demir oksitleri metalin ergime noktasına yakın veya daha düşük sıcaklıkta ergirken, aluminyum oksit (Al₂O₃) 2056°C'de, yani aluminyumun ergime noktasının yaklaşık 1400°C üzerinde ergir. Aluminyum, sıcaklığı yükseldikçe renk değiştirmez, bu da çeliğin aksi bir özelliktir. Aluminyumun yüksek elektrik iletkenliğine sahip olduğu yukarıda belirtilmişti; bu iletkenlik bakırın sadece dörtte üçü, fakat çeliğin altı katıdır (Mathers, 2000). Aluminyumun fiziksel ve mekanik özelliklerinin genel görünümü, Tablo 2.1'de gösterilmektedir (Vargel, 2004a).

Tablo 2.1. Aluminyumun fiziksel ve mekanik özellikleri (Vargel, 2004a)

Atom ağırlığı	26.97
Yoğunluk 20 °C'de	2,698 kg.m ⁻³
Metalin sıvı haldeki yoğunluğu	2,37 g/cm ³
Elastisite modülü	69000 MPa
Poisson oranı	0.33
Isıl genleşme katsayısı	23,5x10 ⁶ 1/°C
Özgül ısı	0,214 cal/g (0-100°C)
Ergime sıcaklığı	660.45 °C
Kaynama sıcaklığı	2056 °C
Isı iletkenliği	237 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Özgül ısı kapasitesi	897 J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
Elektrik direnci	2,65-2.95 Q/cm

Saf aluminyuma başka element metallerinin eklenmesiyle hem mekanik hem fiziksel özellikleri arttırılmaktadır. Örneğin saf aluminyuma magnezyum ve mangan eklenmesiyle meydana gelen alaşımda 270 MPa maksimum mukavemet, yaklaşık 135

MPa akma dayanımı ve yaklaşık %25 uzama görülmektedir. Bazı alaşımların ısıl işlemi (temperleme), malzemenin çok yönlülüğünü daha da artırır (Graf, 2021).

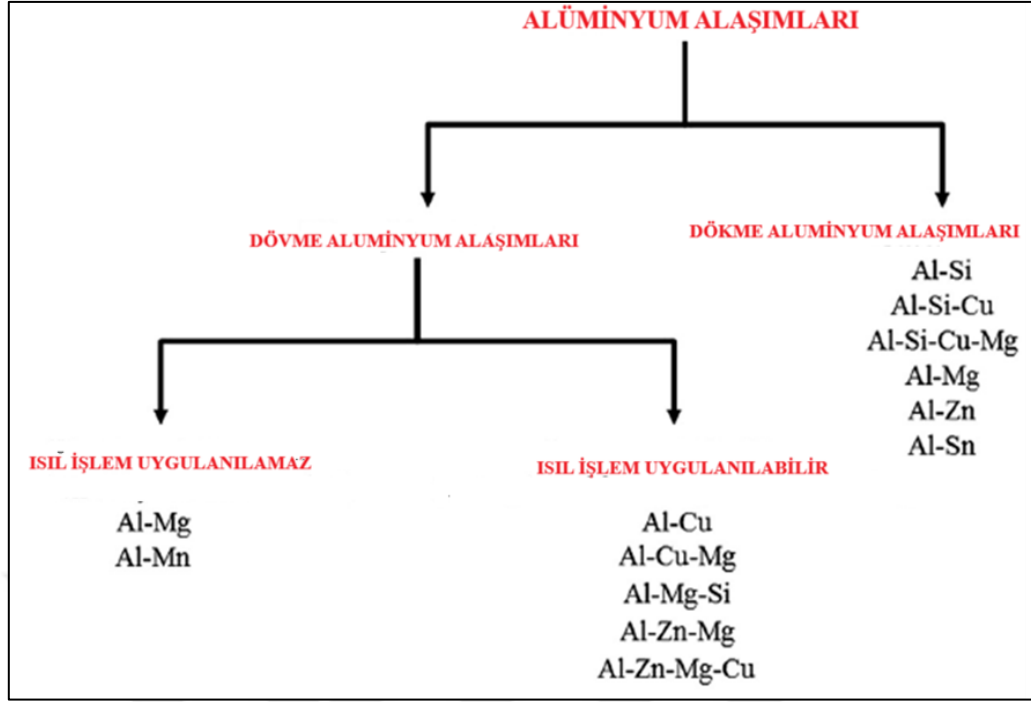
2.2. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Alüminyum alaşımları, döküm ve dövme olarak ikiye ayrılır. Döküm alüminyum alaşımları, alüminyumun eritilip kalıba dökülmesiyle, dövme alüminyum alaşımları ise metalin katı halde şekillendirilmesiyle üretilir. Döküm için kum döküm, kalıba döküm gibi yöntemler; dövme için haddelenme, ekstrüzyon gibi yöntemler kullanılır. Dövme alüminyum, şekillendirildikten sonra mukavemet ve süneklik gibi özelliklerini iyileştirmek için ısıl işlemle işlenebilir (Sun, 2023).

Alüminyum alaşımları, ısıl işlemle mukavemeti artırılamayan ve ısıl işlemle mukavemeti artırılabilen olarak da iki gruba ayrılmaktadır. Isıl işlemle mukavemeti artırılamayan alaşımlar, soğuk şekillendirme veya katı çözeltide güçlendirilir ve ikinci faz çökeltileri oluşturamaz. Isıl işlemle güçlendirilebilen alaşımlar ise havacılık, denizcilik ve ulaşım da tercih edilir, ancak kaynak esnasında meydana gelebilecek çatlamalara karşı eğilimlidir. Kaynak esnasında veya sonrasında meydana gelebilecek çatlamlar, uygun dolgu malzemesinin seçilmesi veya kaynak parametrelerinin değiştirilmesiyle önlenabilir (Akkuş, 2010).

Alüminyum alaşımlarına eklenen alaşım elementlerine göre ısıl işlem uygulanabilir veya ısıl işlem uygulanamaz olduğu belirlenir. Örneğin alüminyum-magnezyum alaşımı ısıl işlem uygulanamaz bir grup iken alüminyum-bakır alaşımı ise ısıl işlem uygulanabilir bir gruba girmektedir. Başlıca alüminyum alaşımlarının, alaşım eklemelerine dayalı sınıflandırması Şekil 2.1'de gösterilmiştir.

Alüminyum alaşımları genellikle kimyasal bileşimlerine, özelliklerine ve kullanım amaçlarına göre sınıflandırılır. Alüminyum alaşımları için çeşitli sınıflandırma sistemleri geliştirilmiştir; bunlar arasında Alüminyum Birliği (AW) tanımlama sistemi, birleşik numaralandırma sistemi (UNS), uluslararası alaşım tanımlama sistemi (IADS) ve askeri spesifikasyon (MIL-SPEC) sistemi bulunmaktadır. Bu sınıflandırma sistemleri arasında en yaygın kullanılanı Alüminyum Birliği (AW) tanımlama sistemi alüminyum alaşım tanımlama sistemidir (Sun, 2023).



Şekil 2.1. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılmasının genel görünümü (Sankaran ve Mishra, 2017)

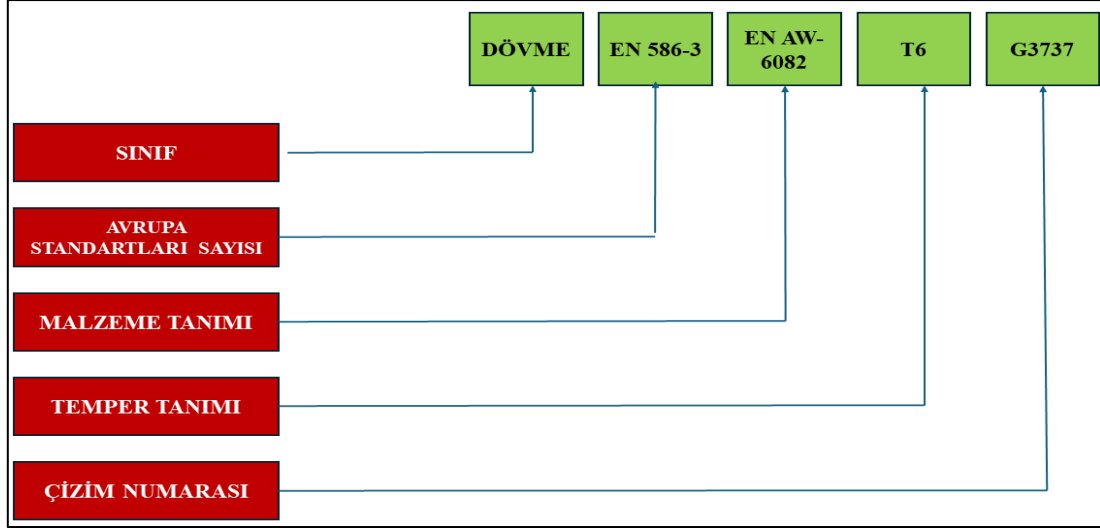
Dövme alüminyum alaşımları için AW numaralandırma sistemi, Avrupa'da 1970'ten bu yana popülerdir. İlk rakam alaşım serisini belirtir. Avrupa Standardı EN 573, iki sistem temelinde bu tanımlamayı benimsemiştir:

1. AW sistemini kullanarak yapılan sayısal tanımlama (örneğin, EN AW-3003)
2. Kimyasal sembollerle yapılan tanımlama ([AlMn1Cu]), ancak bu sistem aşamalı olarak kullanım dışı bırakılmaktadır.

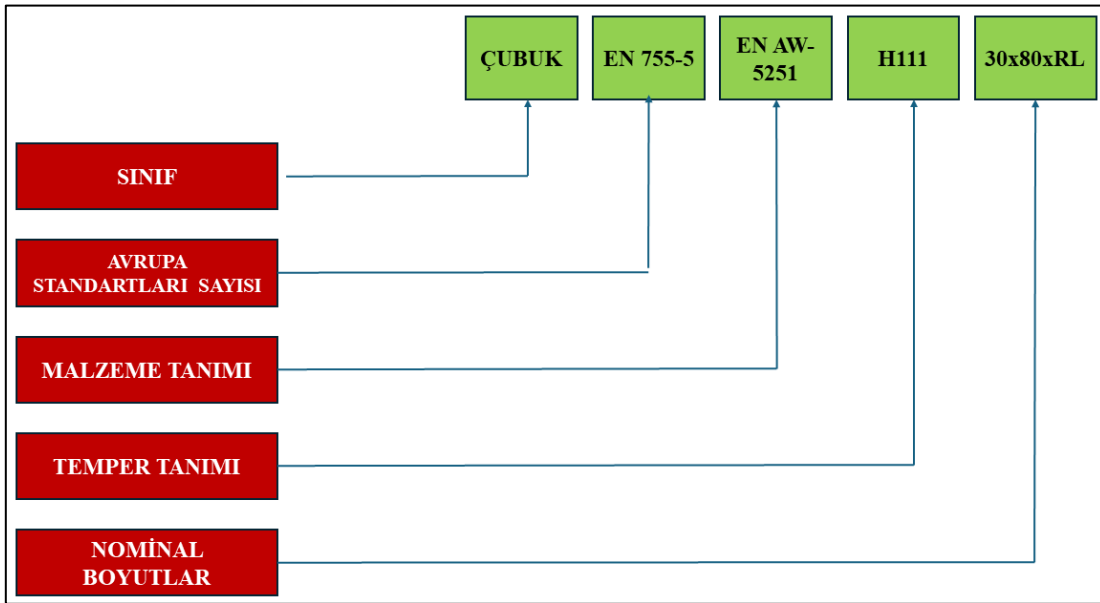
Özetle, EN 573 standardına göre, bir dövme alaşımının tam tanımlaması EN AW-3003 şeklindedir (Vargel, 2004b). Dövme alüminyum alaşımlarının detaylı gösterim şekilleri, üretim formlarına göre değişiklikler gösterebilmektedir. Dövme alüminyum alaşımlarının yaygın olarak dövme ve dövme stokları, ekstrüde edilmiş ve haddelenmiş formları mevcuttur.

Dövme ve dövme stokları formunun detaylı gösterim şekli, EN AW-6082 alaşımı üzerinden Şekil 2.2'de gösterilmektedir. Ekstrüde edilmiş formunun detaylı gösterim şekli, EN-AW-5251 Alaşımı üzerinden Şekil 2.3'de gösterilmektedir (TS EN 573-5). Haddelenmiş formunun detaylı gösterim şekli ise EN AW-6061 alaşımı üzerinden Şekil

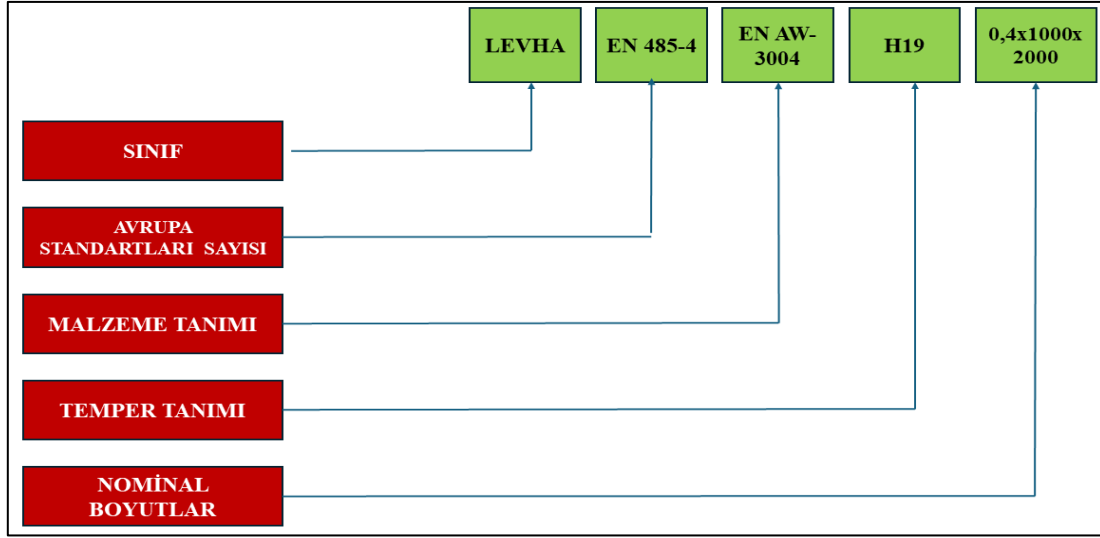
2.4'te gösterilmektedir (TS EN 573-5). Örneklerde adı geçen Temper tanımı hanesi çalışmanın 2.2.1 bölümümde anlatılmaktadır.



Şekil 2.2. Dövme ve dövme stokları formunun TS EN 573-5 standartına göre detaylı gösterimi (TS EN 573-5)



Şekil 2.3. Ekstrüde edilmiş dövme alüminyum alaşımının TS EN 573-5 standartına göre detaylı gösterimi (TS EN 573-5)



Şekil 2.4. Hadde formunun TS EN 573-5 standartına göre detaylı gösterimi (TS EN 573-5)

Sayısal tanımlama sisteminde alaşımlar 4 basamak ile tanımlanmaktadır. Yukarıda da belirtildiği gibi ilk rakam, 1XXX ailesi dışında ana alaşım elementlerini belirtir. Örneğin 2 rakamı ilk rakam olursa bakır elementinin ana alaşım element olduğu bilinmektedir. İkinci rakam, belirli bir alaşımın geliştirilme derecesini ve dolaylı olarak alaşımın "yaşını" belirtir.

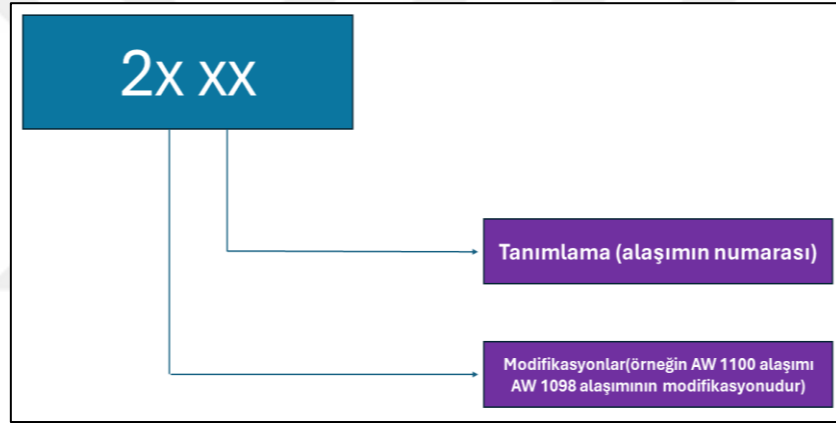
Örneğin, EN AW-1100 alaşımı, EN AW-1098 alaşımından daha sonra geliştirilmiştir, yani diğerine kıyasla daha yeni bir alaşımdır. Sağdaki son iki rakam, alaşım elementlerinin seti ve konsantrasyonları hakkında bilgi veren seri numarasını belirtir. Örneğin, EN AW-6061 ve EN AW-6062 alaşımları bileşimlerinde hafif farklılıklar gösterir. Şekil 2.5.' de dövme alüminyum alaşımının standartlara uygun gösterimi görülmektedir (Gialanella ve Malandrucolo, 2020b). Dövme alüminyum alaşımı serileri ve içerdikleri elementler Tablo 2.2'de verilmiştir.

Döküm alaşımlarında, ilk rakam ana alaşım elementini belirtir; ikinci ve üçüncü rakam belirli bileşimi tanımlar. Ondalık noktadan sonraki sıfır, ürünü belirtir. Diğer rakamlar olursa eğer ingotları tanımlamak için kullanılır. Özetle, döküm alaşımlarını tanımlamada kullanılan sistem, dövme alaşımlarını tanımlamak için kullanılanlarla benzerdir. Ana alaşım elementleri şunlardır: 1XX.0 alüminyum, 2XX.0 bakır, 3XX.0 silisyum, 4XX.0 silisyum (Cu ve/veya Mg ile), 5XX.0 magnezyum, 6XXX.0 silisyum ve magnezyum,

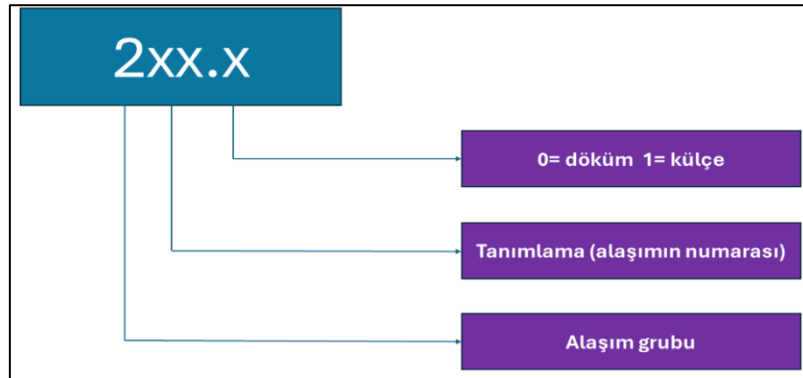
7XX.0 çinko, 8XX.0 kalay, 9XX.0 diğerleri. (Innocenti ve diğ., 2009). Şekil 2.6’da döküm alüminyum alaşımlarının temel gösterimiyle alakalı bir örnek görülmektedir.

Tablo 2.2. Dövme alüminyum alaşımları ve elementleri (Innocenti vd., 2009)

Alaşım Ailesi	Ana Alaşım Elementi
1XXX	Saf alüminyum
2XXX	Bakır
3XXX	Mangan
4XXX	Silisyum
5XXX	Magnezyum
6XXX	Magnezyum ve silisyum
7XXX	Çinko
8XXX	Diğer elementler (Fe,Sn vb.)
9XXX	Atanmamış



Şekil 2.5. Dövme alüminyum alaşımlarının standartlara uygun gösterimi (Gialanella ve Malandrucolo, 2020b)



Şekil 2.6. Döküm alüminyum alaşımlarının gösterimi ve tanımlanması (Gialanella ve Malandrucolo, 2020b)

2.2.1. Temper Tanımı

Temperleme sistemi, alüminyum alaşımlarının metalurjik özelliklerini belirtir ve Amerikan Standartlar Birliği tarafından onaylanmıştır. Temperleme, soğuk şekillendirme, sıcak şekillendirme ve ısıtma işlemleri içerir. Temel temper tanımlamaları büyük harflerle yapılır; örneğin, 'F' fabrikasyon için, 'T' yaşla sertleştirilmiş için kullanılır. Bu tanımlamalara gerektiğinde bir veya daha fazla sayı eklenir (Cassada ve Liu, 2012).

Alüminyum alaşımlarının temper özelliklerini tanımlamak için yaygın olarak kullanılan harfler ve sayılar aşağıda verilmiştir.

O: Tavlama, F: Üretildiği gibi, H: Sertleştirilmiş, T: Isıtma işlemi tabii tutulmuş

- T1: Yüksek sıcaklıkta şekillendirme işlemi sonrası doğal yaşlandırma.
- T2: Yüksek sıcaklıkta şekillendirme, soğuk şekillendirme ve doğal yaşlandırma.
- T3: Çözünme ısıtma işlemi, su verme, soğuk şekillendirme ve doğal yaşlandırma.
- T4: Çözünme ısıtma işlemi ve su verme sonrası doğal yaşlandırma.
- T5: Yüksek sıcaklıktan hızlı soğutma ve ardından yapay yaşlandırma.
- T6: Çözünme ısıtma işlemi, su verme ve ardından yapay yaşlandırma.
- T7: Çözünme ısıtma işlemi, su verme ve aşırı yaşlandırma.
- T8: Çözünme ısıtma işlemi, su verme, soğuk şekillendirme ve ardından yapay yaşlandırma (soğuk işleme miktarı sonraki rakamla belirtilir).
- T9: Çözünme ısıtma işlemi, su verme, yapay yaşlandırma ve ardından soğuk işleme.
- T10: Yüksek sıcaklıkta şekillendirme, soğuk işleme ve ardından yapay yaşlandırma (Yoshida ve Uchida, 1995).

2.2.2. Döküm Alüminyum Alaşımları

Alüminyum dökümler, otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılır ve havacılıkta yüksek basınçlı kalıp döküm ürünlerinin %2'si, sürekli kalıp döküm ve kum kalıba dökümle elde edilen ürünlerin ise %10'u kullanılmaktadır. Sürekli kalıp döküm, tekerlekler ve süspansiyon bileşenleri için tercih edilen bir yöntemdir. Alüminyum ve alaşımları çeşitli döküm ve şekillendirme işlemlerine tabii tutulabilir. Ancak, erken döküm sırasında gaz alımı nedeniyle porozite ve diğer kusurlar ortaya çıkabilir. Porozite hala bir sorun olmaya devam etmektedir ve etkilerini kontrol etmek için gaz giderme, filtrasyon,

iyileştirilmiş işleme, düşük basınç kullanımı ve katılaşma simülasyonu gibi teknikler geliştirilmiştir (Gialanella ve Malandrucolo, 2020a).

Aluminyum döküm alaşımlarının otomotivdeki yaygın kullanımı, döküm tekniklerinin gelişmesini sağlamıştır. Döküm teknikleri dört kategoriye ayrılır:

1. Kum kalıba döküm: Kum kalıpta yerçekimi ile döküm.
2. Hassas döküm: Mum veya genişletilmiş polistiren kalıbı etrafında oluşan seramik kalıpta yerçekimi ile döküm.
3. Sürekli kalıp döküm: Sürekli metal kalıpta yerçekimi veya düşük basınç altında döküm.
4. Basınçlı döküm: Sürekli metal kalıpta basınç altında döküm.

Döküm tekniğinin, alaşımların korozyon direnci üzerinde etkisi yoktur (Vargel, 2020e). Genellikle döküm parçalarının mekanik özellikleri dövme parçalarından daha düşüktür, tek istisna sürünme direncidir. Özellikler bileşen boyunca değişkenlik gösterebilir. Ancak, otomotiv endüstrisinin etkisiyle döküm aluminyum alaşımlarının kullanımı dövme aluminyum alaşımlarına oranla artmaktadır (Gialanella ve Malandrucolo, 2020a).

2.2.3. Dövme Aluminyum Alaşımları

Aluminyum dövme formları arasında sıcak ve soğuk haddelenmiş levha, plaka, çubuk, tel ve folyo bulunur. Aluminyumun sünekliği ve işlenebilirliği, ekstrüzyonla karmaşık şekillerin üretilmesini kolaylaştırır. Sıcak ve soğuk dövme, basit şekillerin hızlı ve ekonomik bir şekilde üretilmesi için yaygın olarak kullanılır. Hassas dövme, aluminyum alaşımları için uygundur ve iyi yüzey kalitesi, dar toleranslar, optimum tane boyutu ve işleme gereksiniminin azalması gibi avantajlar sağlar. Dövme ürünler, inşaat, ambalaj ve ulaşım endüstrilerinde yaygın olarak kullanılır. Özel havacılık uygulamaları için levha ve plakalar 1-10 mm kalınlığında, kanat kaplamaları ise genellikle 25-50 mm kalınlığında olur. Dövme aluminyum alaşımları, döküm alaşımlardan daha güçlü ve sünektir, bu nedenle yüksek mukavemet ve iyi şekillendirilebilirlik gerektiren uygulamalarda kullanılır. (Gialanella ve Malandrucolo, 2020a; Mathers, 2000; Polmear, 1997; Sun, 2023).

1XXX serisi aluminyum alaşımları, %99'un üzerinde saf aluminyum içerir ve yüksek korozyon direnci, iyi şekillendirilebilirlik ve yüksek elektrik iletkenliği gibi özelliklere

sahiptir. Isıl işlemle sertleştirilemeyen bu alaşımlar, genellikle elektrik iletkenleri, ambalaj folyosu, kimyasal ekipmanlar, tanker vagonları, mimari ve dekoratif elemanlar gibi uygulamalarda kullanılır. Bu seride süper saflıkta (SP) alüminyum (%99.99) ve ticari saflıkta (CP) alüminyum alaşımları bulunur. Mekanik özellikleri düşük olan bu alaşımların sertlik ve mukavemetleri sadece deformasyonla artırılabilir (Gialanella ve Malandrucolo, 2020a; Polmear, 1997; Rams, 2021).

Bu seri, yüksek saflıkta alüminyum alaşımlarını iki ana kategoriye ayırır: rafine edilmiş yüksek saflık dereceleri (EN AW-1199 ve EN AW-1198) ve diğer alaşımlar (EN AW-1050A ve EN AW-1200). Rafine edilmiş yüksek saflık dereceleri, %99,98 ile %99,999 arasında saflığa sahiptir ve elektrolitik kapasitörler, ışık reflektörleri, dekoratif uygulamalar ve lüks ambalajlarda kullanılır. EN AW-1050A alaşımı, %99,50 saflıkta olup, mekanik mukavemet, plastik deformasyon özellikleri ve dekoratif görünüm arasında iyi bir denge sunar. EN AW-1200 alaşımı ise %99 ila %99,5 saflığa sahiptir ve yeterli plastik şekillendirilebilirlik sağladığında EN AW-1050A'nın yerini alabilir (Vargel, 2020a). Tablo 2.3'te farklı 1XXX alüminyum alaşımlarının içerdikleri elementler gösterilmektedir.

Tablo 2.3. Temel 1XXX alaşımları ve kimyasal analizleri (TS EN 573-3+A2)

Alaşım	Si	Fe	Cu
EN AW 1200	Si+ Fe 1.00		0.10
EN AW 1100	Si+ Fe 0.95		0.05 ve 0.20 arası
EN AW 1050A	0.25	0.40	0.05

2XXX serisi alüminyum alaşımları, ana alaşım elementi olarak bakır içeren ve ısıtıl işlemle güçlendirilebilen alüminyum alaşımlarıdır. %2-10 oranında bakır içeren bu alaşımlar, yüksek mukavemet, dayanıklılık ve yüksek sıcaklıklarda iyi performans gibi avantajlar sunar. Ancak, atmosferik korozyona karşı dirençleri düşük olduğundan, genellikle boyanır veya kaplanır. 2xxx alaşımları, levha formunda genellikle yüksek saflıkta alüminyum, 6xxx serisinden bir Mg-Si alaşımı veya %1 çinko içeren koruyucu bir kaplama ile kaplanır. Bu kaplama, toplam kalınlığın %2 ila %5'ini oluşturur ve ana malzemeye galvanik koruma sağlayarak korozyon direncini artırır (Innocenti ve diğ., 2009; Mishra ve Sidhar, 2017).

2XXX serisi alüminyum alaşımları, yüksek mukavemetleri nedeniyle uçak (AW 2024) ve kamyon gövdeleri (AW 2014) gibi uygulamalarda kullanılır. Bu alaşımlar, genellikle vida veya perçinleme ile birleştirilir. AW 2219 ve AW 2048 gibi bazı alaşımlar, kolayca kaynak yapılabildiği için havacılık uygulamalarında tercih edilir. Alüminyum 2XXX alaşımları, ticari uçak üretiminin başlangıcından beri uçak endüstrisiyle yakından ilişkilidir. İlk olarak Duralumin (Al-Cu-Mg alaşımı) olarak bilinen alaşım, 1950'lerde uçak tasarımına dahil edilmiştir. AW 2024 alaşımı, o zamandan beri havacılık endüstrisinde kullanılan ana alaşım sistemlerinden biri olmuştur (Sankaran ve Mishra, 2017).

2XXX serisi alüminyum alaşımlarının geleneksel ergitme bazlı kaynak teknikleri ile kaynağı zor kabul edilir. Bunun nedeni, Mg, Zn ve Li'nin yüksek ergime derecesine sahip olup, yüksek sıcaklıklarda buharlaşmasıdır. Bu durum, bu alaşımların lazer bazlı kaynak teknolojisi ile de birleştirilmesini zorlaştırır. Ayrıca, hidrojen gözenekliliği, sıcak çatlama ve gerilimli korozyon çatlama gibi sorunlar, çöktürme ile güçlendirilmiş alüminyum alaşımlarının ergitme kaynağıyla ilgili temel problemlerdir (Mishra ve Sidhar, 2017).

2XXX serisindeki ana alaşımlar Tablo 2.4'te gösterilmektedir. 2XXX alaşımları da diğer alaşımlar gibi farklı ürün formlarında ve uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu ailede kullanıldıkları tavlara göre üç grup alaşım vardır. Tablo 2.5'te 2XXX alaşımlarının hangi ürün uygulamaları ve formlarında olduğu gösterilmektedir (TS EN 573-3+A2). Tablodan da anlaşılacağı üzere 2XXX alaşımlarının hadde formunda yaygın olarak kullanıldığı söylenebilir.

Tablo 2.4. Temel 2XXX alüminyum alaşımları ve içerikleri (TS EN 573-3+A2)

Alaşım	Si	Fe	Cu	Mn	Mg
EN AW- 2618A	0.15-0.25	0.9-1.4	1.8-2.7	0.25	1.2-1.8
EN AW- 2017A	0.20-0.8	0.7	3.5-4.5	0.40-1.0	0.40-1.0
EN AW-2024	0.50	0.50	3.8-4.9	0.30-0.9	1.2-1.8
EN AW-2124	0.20	0.30	3.8-4.9	0.30-0.9	1.2-1.8
EN AW-2214	0.50-1.2	0.30	3.9-5.0	0.40-1.2	0.20-0.8
EN AW-2219	0.20	0.30	3.9-5.0	0.40-1.2	0.20-0.80

Tablo 2.5. 2XXX alaşımların ürün formları (TS EN 573-3+A2)

Alaşım	Dövme ve Dövme stokları	Ekstrüzyon edilmiş formu	Hadde formu
EN AW- 2618A	X	X	X
EN AW- 2017A	X	X	X
EN AW-2024	X	X	X
EN AW-2124	-	-	X
EN AW-2214	X	X	X
EN AW-2219	X	-	X

3XXX serisi alüminyum alaşımları, orta mukavemet, yüksek şekillendirilebilirlik ve mükemmel korozyon direnci gerektiren uygulamalarda kullanılır. Ana alaşım elementi olarak genellikle %1,25'e kadar mangan içerirler ve düşük direnç ile yüksek süneklik sağlarlar. Bu serinin en popüler alaşımı, intermetalik Al_6Mn bileşiklerinin oluşumuyla güçlenen 3003 alaşımıdır. 3xxx alaşımlarının yaygın kullanımları arasında mobilya, pişirme gereçleri, gıda ve içecek kutuları ve ince folyolar yer alır. Magnezyum ilavesiyle sertleşen ve 3105 ve 3104 gibi çeşitli şekillendirilmiş sertleştirilmiş temperlerde kullanılan alaşımlar da vardır. Bu alaşımlar içecek kutularının üretiminde yaygın olarak kullanılır (Aluminum Alloy Selections and Applications, 1998).

4XXX serisi alüminyum alaşımlarında ana alaşım elementi silisyumdur ve bunlara bakır, magnezyum, nikel veya berilyum eklenir. Silisyum, alaşımın ergime noktasını düşürür ve %13,5'in altında tutulur. Bu alaşımlar, düşük ergime sıcaklıkları nedeniyle kaynak dolgu malzemesi olarak kullanılır. Isıl işlemle sertleştirilemezler ancak diğer alüminyum alaşımlarıyla kombinasyon halinde kullanılabilirler. Al-Si alaşımları, kaplama ve eklemeli üretim için avantajlıdır. İki fazlı yapıları ve yüksek akışkanlık özellikleri nedeniyle döküm amaçları için yaygındır. Bakır ve magnezyum ile çökelme sertleşmesi sağlanabilir ve nikel ile yüksek sıcaklık özellikleri geliştirilebilir (Gialanella ve Malandrucolo, 2020a; Rams, 2021).

4XXX serisinin iki yaygın alaşımı, EN AW-4032 ve EN AW-4043'tür. EN AW-4032, orta yüksek mukavemetli ve ısıl işlem yapılabilir bir alaşım olup, özellikle uçak pistonları gibi dövme uygulamaları için kullanılır. 4043 ise, 6XXX alaşımlarını MIG ve TIG kaynak yöntemleri ile birleştirmek için en yaygın kullanılan dolgu alaşımlarından biridir ve yapısal, otomotiv, havacılık vb. uygulamalarda yaygındır. Her iki alaşım da yüksek silisyum içeriği sayesinde iyi akış özellikleri sağlar; bu, dövme işlemlerinde karmaşık

kalıpların doldurulmasını ve kaynak işlemlerinde parçaların çatlak ve oyuklarının tamamen doldurulmasını kolaylaştırır (Aluminum Alloy Selections and Applications, 1998).

5000 serisi alaşımlar, ana alaşım elementi olarak Mg içerir. Ancak endüstriyel dövme alaşımlarında Mg oranı genellikle %5'i geçmez çünkü bu seviyenin üzerinde alaşımın kararlılığı, özellikle sıcaklık etkisiyle azalır (Gialanella ve Malandrucolo, 2020a).

5XXX serisi alaşımlar, mangan ve krom gibi alaşım elementleri içerir ve bu sayede çekme mukavemeti, korozyon direnci ve kaynaklanabilirlik gibi özellikleri artırılır. Bu özellikler, taşımacılık, depolama ve gemi inşası gibi uygulamalarda 5XXX serisi alaşımları tercih edilen seçenekler yapar. Ayrıca, elektro-kimyasal parlaklaştırma veya anodizasyon gibi yüzey işlemleri ile özellikle düşük demir ve silisyum içeren alaşımlar (örneğin EN AW-5657) çok çekici bir yüzey görünümüne kavuşur (Vargel, 2020b).

Bu alaşımların yüksek korozyon direnci, onları küçük teknelerin gövdeleri ve okyanuslarda seyreden gemilerin üst yapıları gibi uygulamalarda uygun hale getirir. Bu alaşımlar aynı zamanda hafif askeri araçların balistik zırh plakalarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu alaşımlara ısıl işleme uygulanamaz, ancak katı çözelti sertleştirilmesiyle yüksek mukavemet elde edilebilir (Rams, 2021).

6XXX serisi alüminyum alaşımları, ana alaşım elementleri magnezyum ve silisyum olan bir grup alaşımdır. Bu serideki alaşımlar genellikle orta mukavemete, iyi işlenebilirliğe ve etkili korozyon direncine sahiptir. EN AW-6061 ve EN AW-6063 alüminyum alaşımları, bu seride en yaygın kullanılan türlerdir. EN AW-6061 alüminyum alaşımı, otomotiv parçalarında, uçak komponentlerinde, bisiklet çerçevelerinde, denizcilik uygulamalarında, elektronik donanımlar ve genel inşaat projelerinde sıkça kullanılır. Öte yandan, EN AW-6063 alüminyum alaşımları, yapısal çerçeveler, pencere ve kapı profilleri, boru hatları, mobilya ve dekorasyon uygulamalarında tercih edilir (Vargel, 2020c).

Çoğu 6XXX alaşımı, maksimum mukavemet için T6 sertliğinde kullanılırken, bazı uygulamalarda T4 sertliği tercih edilebilir. Bu alaşımlar, yaşlandırma sıcaklıkları ve sürelerine bağlı olarak farklı mekanik özellikler sergiler; T6 işleminden sonra akma

mukavemeti 210–360 MPa, nihai çekme mukavemeti ise 240–385 MPa'ya çıkar. T6 sonrası sertlik, uzama oranı azalırken, brinell sertlik değeri yaklaşık 3 kat artar. Mg, Si ve Cu alaşım elementleri, mekanik özellikleri belirlerken, Mn ve Cr mukavemeti artırır, ancak fazla Si tane içi kırılabilirliği artırır. Düşük sıcaklıklarda mukavemet artar, yüksek sıcaklıklarda süneklik artar, ancak korozyon direnci Cu ve Si içeriği arttığında azalabilir. Bu alaşımlar genellikle ekstrüzyon ve haddeleme ürünleri olarak bulunur ve Al–Mg–Si alaşımları, geniş bir kullanım alanına sahiptir (Mukhopadhyay, 2012; Polmear, 1997; Starke, 1989).

6XXX serisinin alaşımları ısıtılma işlemine tabi tutulabilir. Bu serideki ana alaşımların bileşimi Tablo 2.6'da verilmiştir (TS EN 573-3+A2). 6XXX alaşımları da diğer alaşımlar gibi farklı ürün formlarında ve uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu ailede yine diğer alaşımlarda olduğu gibi kullanıldıkları tavlara göre üç grup alaşım vardır. Tablo 2.7'de 6XXX alaşımlarının hangi ürün uygulamaları ve formlarında olduğu gösterilmektedir. Tablodan da anlaşılacağı üzere 6xxx alaşımlarının yaygın bir formda olmadığı söylenebilir (TS EN 573-3+A2).

Tablo 2.6. Temel 6XXX alüminyum alaşımları ve içerikleri (TS EN 573-3+A2)

Alaşım	Si	Fe	Cu	Mn	Mg
EN AW- 6018	0.20-0.6	0.35	0.10	0.10	0.45-0.9
EN AW- 6060	0.30-0.6	0.10-0.30	0.10	0.10	0.35-0.6
EN AW-6005A	0.50-0.9	0.35	0.30	0.50	0.40-0.7
EN AW- 6016	1.0-1.5	0.50	0.20	0.20	0.25-0.6
EN AW- 6061	0.40-0.8	0.7	0.15-0.40	0.15	0.8-1.2
EN AW- 6181	0.5-1.10	0.40	0.50-0.9	0.10-0.45	0.50-1.0

Tablo 2.7. 6XXX alaşımlarının ürün formları (TS EN 573-3+A2)

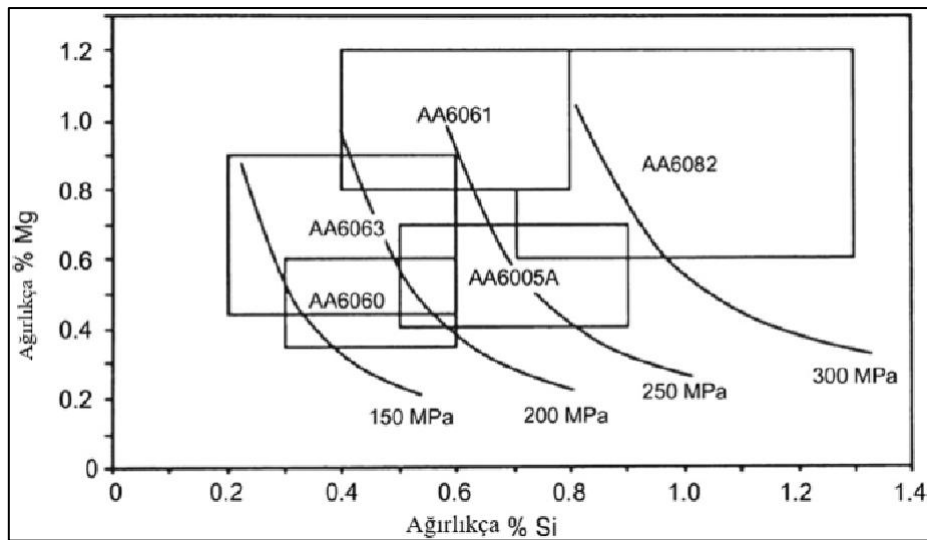
Alaşım	Dövme ve dövme formu	Ekstrüde edilmiş formu	Haddelenmiş
EN AW- 6018	-	X	-
EN AW- 6060	X	X	-
EN AW-6005A	-	X	-
EN AW- 6016	-	-	X
EN AW- 6061	X	X	X
EN AW- 6181	X	-	X

EN AW-6061, orta mukavemete sahip bir alaşımdır (T6 temperinde çekme mukavemeti 310 MPa). Orta mekanik dayanıma ve iyi korozyon direncine ihtiyaç duyulan çeşitli

uygulamalarda kullanılır. Taşımacılık (demiryolu vagonları, endüstriyel araçlar), boru hatları, kaynaklı kazan parçaları, mekanik uygulamalar ve uçağın gövde, kanat bölgelerindeki uygulamalarıyla geniş bir kullanım yelpazesi sunar (Vargel, 2020c).

EN AW-6005A, iyi ekstrüzyon özelliklerine sahiptir. T5 temperinde, yaklaşık 290 MPa çekme mukavemetine ulaşabilir. Olağanüstü kırılma tokluğuna sahip olan bu alaşım, endüstriyel araçlar, demiryolu inşaatları, mekanik uygulamalar gibi çeşitli yapı elemanlarında kullanılabilir. EN AW-6082, T6 temperinde 320 ila 340 MPa arasında yüksek çekme mukavemetine sahiptir ve endüstriyel araçlar, demiryolu vagonları, gemi yapımı ve mekanik uygulamalarda yaygın olarak tercih edilir. AA6016, T4 tavında iyi dövme şekillendirilebilirliği ve 220 MPa mukavemet seviyesi ile öne çıkar, özellikle otomotiv kaportalarında dış paneller olarak sıkça kullanılır. EN AW-6013, uçak gövdesi uygulamalarında EN AW-2024-T3'ün yerini almak amacıyla geliştirilmiştir. T4 temperinde mükemmel şekillendirilebilirliğe sahip olan bu alaşım, AA6061 ile benzer kaynaklanabilirlik özelliklerine sahiptir ve yorulma ömrü AA2024-T3 ile eşdeğerdir (Vargel, 2020c).

Şekil 2.7, en yaygın kullanılan 6XXX alaşımlarının bazılarının bileşim sınırlarını göstermektedir. Akma dayanımının Si ve Mg içeriği ile arttığı, ağırlıkça %1 Mg ve ağırlıkça %1 Si çevresinde en uygun olduğu gözlemlenebilir. En yüksek değerlere EN AW-6082 alaşımında rastlanmaktadır (Rams, 2021).



Şekil 2.7. En çok kullanılan 6XXX alüminyum alaşımlarının bileşim sınırı (Rams, 2021)

7XXX serisi Al alaşımları, ana alaşım elementi olarak çinko (Zn) ve ek olarak magnezyum (Mg) ve bakır (Cu) içeren, ısıl işlem görebilen Al alaşımlarıdır. Bu alaşımlar, Zn ile (%0,8–%12,0) alaşımlıdır ve çökeltme sertleştirmesi kullanılarak oldukça yüksek dayanım değerleri elde edilebilmektedir. Mg ilavesi bu özellikleri daha da artırır. 7xxx alaşımlarının gerilimli korozyon çatlamasına karşı direncini arttırmak ve en yüksek mukavemete ulaşması için Cu da ilave edilir. Genel olarak özetlemek gerekirse, Zn ve Mg yaşlandırma sürecini kontrol ederken, bakır yaşlanma hızını arttırarak $CuMgAl_2$ fazının çekirdeklenmesi yoluyla aşırı doyumluk derecesini artırır ve ayrıca ısıl işlem sırasında soğuma hassasiyetini artırır (Li ve diğ., 2023; Rams, 2021).

7XXX serisi alüminyum alaşımları, 2XXX serisi alaşımlara kıyasla daha üstün özellikler sunar. Yüksek mukavemet, tokluk, yorulma direnci ve stres korozyonu direnci açısından sürekli gelişim göstermektedir. Araştırmalar, alaşım elementlerini değiştirme, ısıl işlem süreçlerini ayarlama, büyük plastik deformasyonlar uygulama ve üretim sürecini iyileştirme üzerine odaklanmaktadır. 7XXX serisi alaşımlar yüksek mukavemetli olsalar da gerilim korozyon çatlamasına karşı dirençleri ve hasar toleransları daha düşüktür. Bu nedenle, mukavemet, korozyon direnci ve kırılma tokluğunun daha iyi kombinasyonlarını sağlamak için yaşlandırılmış durumda kullanılırlar. Bu özellikleri, onları havacılık ve uzay endüstrisinde kritik yapısal uygulamalarda tercih edilen malzemeler yapar (Innocenti ve diğ., 2009).

7XXX serisi Al alaşımları, özellikle havacılık ve uçak endüstrisinde geniş bir uygulama alanına sahip olduğu yukarıda belirtilmişti. Bu alanda kritik tasarım konseptleri, yüksek toklukla alaşımların geliştirilmesine yönelik bir itici güç sağlamıştır. Bu alaşımlar, rutin ticari işlemlerle kaynaklanamazlar ve genellikle perçinli yapılarda kullanılırlar. 7XXX alaşımlarının atmosferik korozyon direnci, 5XXX ve 6XXX alaşımlarına kıyasla daha düşüktür, bu nedenle bu tür hizmetlerde genellikle kaplanır. T6 tipi temper, yerine, stres korozyonu çatlaması sorunu olabileceği durumlarda T73 tipi özel temperin kullanılması gerekmektedir (Aluminum Alloy Selections and Applications, 1998).

Tablo 2.8’de 7XXX serisi alüminyum alaşımlarına ait element bilgileri verilmiştir. 6XXX alaşımları da diğer alaşımlar gibi farklı ürün formlarında ve uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu ailede yine diğer alaşımlarda olduğu gibi kullanıldıkları tavlara göre üç grup alaşım vardır. Tablo 2.9’da 6XXX alaşımlarının hangi ürün uygulamaları ve

formlarında olduğu gösterilmektedir (TS EN 573-3+A2). Tablodan da anlaşılacağı üzere 7XXX ürünleri genelde 3 formda da yaygın şekilde bulunduğu söylenebilir.

Tablo 2.8. 7XXX alüminyum serisi alaşımları ve içerikleri (TS EN 573-3+A2)

Alaşım	Si	Fe	Cu	Mg	Cr	Zn
EN AW- 7075	0.4	0.50	1.2-2.0	2.1-2.9	0.18-.28	5.1-6.1
EN AW-7175	0.15	0.20	1.2-2.0	2.1-2.9	0.18-0.28	5.1-6.1
EN AW-7475	0.10	0.12	1.2-1.9	1.9-2.6	0.18-0.25	5.2-6.2
EN AW- 7050	0.12	0.15	2.0-2.6	1.9-2.6	0.04	5.7-6.7
EN AW-7040	0.10	0.13	1.5-2.3	1.7-2.4	0.04	5.7-6.7
EN AW-7010	0.12	0.15	1.9-2.3	2.0-2.7	0.05	5.7-6.7

Tablo 2.9. 7XXX alaşımlarının ürün formları (TS EN 573-3+A2)

Alaşım	Dövme ve Dövme stokları	Ekstrüde edilmiş formu	Haddelenmiş formu
EN AW- 7075	X	X	X
EN AW-7175	X	X	X
EN AW-7475	-	-	X
EN AW- 7050	X	X	X
EN AW-7108	-	X	-
EN AW-7010	X	X	X

1943 yılında Alcoa tarafından tanıtılan EN AW-7075, genellikle uçak inşasında, mekanik uygulamalarda ve yüksek mukavemet ile orta düzeyde tokluk ve korozyon direncinin bir kombinasyonunun gerektiği spor ve eğlence ekipmanlarında haddelenmiş, ekstrüde edilmiş ve dövülmüş ürünlerde kullanılmaktadır. Avrupa kökenli EN AW-7010, EN AW-7050 ile benzer özelliklere sahiptir. Aşırı yaşlanmış T74 ve T76 durumlarında, mekanik özellikler (mukavemet, tokluk, yorulma) ile stres korozyonuna karşı direnç arasında iyi bir denge sağlar. Uçak gövdesi uygulamalarında sıkça tercih edilen bir alaşımdır. AA7049A-T6, en yüksek mekanik özelliklere sahip alüminyum alaşımlarından biridir. Örneğin, ortalama çekme mukavemeti 650 MPa'dır. Havacılık ve savunma sanayisinde ekstrüzyon veya dövme parçalarda kullanılmaktadır (Vargel, 2020d).

2.3. Isıl İşleme Uygun Olan ve Uygun Olmayan Alaşımlar

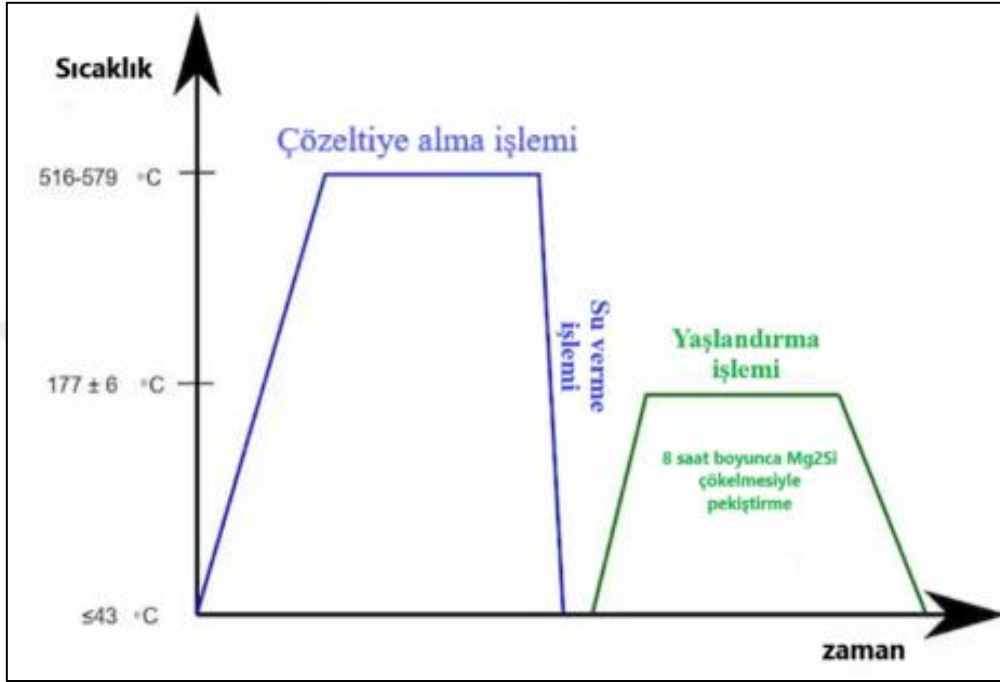
Isıl işlem, alaşımların ısıtılıp soğutulularak kimyasal bileşimlerini değiştirmeden, sertlik, mukavemet, dayanıklılık, aşınma ve korozyon direnci gibi mekanik özelliklerini iyileştiren bir işlemdir (Öz, 2020).

Aluminyum alaşımlarına eklenen bazı alaşım elementlerinin ısıtılma işlemine karşı direnç gösterdiği gibi, diğer alaşım elementlerinin eklenmesi ısıtılma işlemi uygulanabilirliğine olanak tanımaktadır. Bu nedenle, ısıtılma işlemine karşı gösterdikleri hassasiyete bağlı olarak dövme veya döküm aluminyum alaşımları, ısıtılma işlemi uygulanabilen ve uygulanamayan alaşımlar yani gerilme sertleşmeli alaşımlar olarak iki kategoriye ayrılmaktadır (Aktaşoğlu, 2023).

Isıtılma işlemi uygulanabilen alaşımlar, 2XXX, 6XXX ve 7XXX serisi dövme aluminyum alaşımlarıdır. Bu alaşımlar, yüksek sıcaklıklarda katı alüminyumda önemli ölçüde çözünebilen ve sıcaklıkla birlikte çözünürlüğü azalan elementler içerir; örneğin, Cu, Zn, Mg + Si, Li. Bu elementlerin konsantrasyonu, oda sıcaklığında ve biraz daha yüksek sıcaklıklarda denge katı çözünürlüğünü önemli ölçüde aşar. Geçiş elementlerinden biri veya birkaçı (Cr, Mn, Zr ve Sc), genellikle yaşlandırma ile sertleştirilebilen dövme alaşımlara, deformasyon sırasında ve sonrasında tane yapısını kontrol etmek için eklenir. Dövme alaşımlarının deformasyon işlemi sonrasında (veya dökme alaşımlarının döküm sonrasında) normal bir ısıtılma işlemi döngüsü, çözünebilen bileşen parçacıklarını ve çözünebilen diğer her türlü çökeltiyi (Cr, Mn veya Zr içeren dispersoidler bu noktada çökelmiştir) çözmek için yüksek sıcaklıkta bir bekletme süresi içerir. Alüminyum alaşımı, çözünme sıcaklığında yeterli süreyle tutulduktan sonra, kaba fazların çökmesini önlemek ve hem çözücü elementler hem de boşluklarla doymuş bir katı çözeltisi elde etmek için hızlı bir şekilde soğutulur veya su verilir. Sonraki adım, oda sıcaklığında (doğal yaşlanma) veya ara bir sıcaklıkta (yapay yaşlanma) yaşlandırma işlemidir (Starke ve Eskin, 2024). Şekil 2.8’ de EN AW-6061 aluminyum alaşımının yaşlandırma ısıtılma işleminin aşamaları ayrıntılı gösterilmektedir.

1XXX, 3XXX, 4XXX ve 5XXX serisi alaşımlar, ısıtılma işlemiyle işlenemeyen alaşımlardır. Bu, ısıtılma işlemleriyle alaşımın yapısal özelliklerinde değişiklik yapılamayacağı ve bu nedenle alaşımın ilgili özelliklerinin termal geçmişe büyük ölçüde duyarsız olduğu anlamına gelir. Bu durum, örneğin kaynak gibi hızlı ergime ve katılaşmanın gerçekleşebileceği kontrolsüz termal koşulları içeren uygulamalarda olumlu bir özellik olarak görülebilir. Öte yandan, yüzeyde yapılan katı çözelti sertleşmesi veya benzeri işlemler gibi soğuk işleme yöntemleri, mekanik özellikleri önemli ölçüde değiştirebilir (Gialanella ve Malandrucolo, 2020a). Katı çözelti sertleşmesiyle elde edilen mukavemet

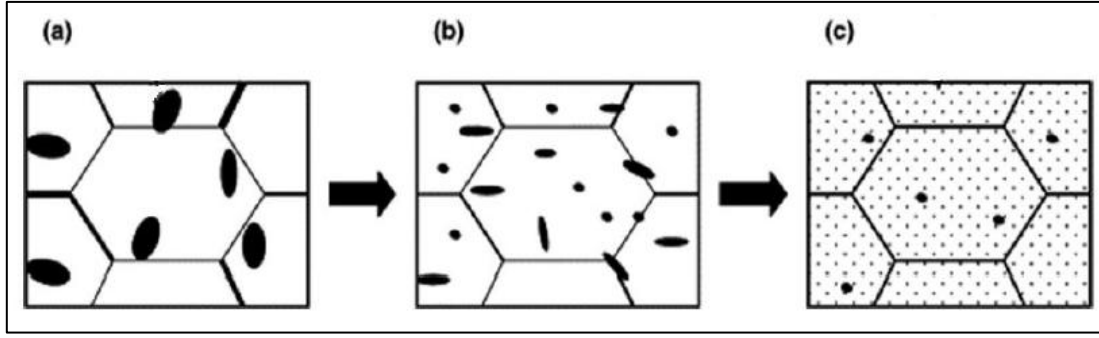
artışı sınırlıdır çünkü çoğu alaşım elementi, oda sıcaklığında alüminyum içinde düşük çözünürlük sınırlarına sahiptir. Alaşım elementlerinin, alüminyum kristal yapısında ara yer veya yer alan noktalarına büyük miktarlarda çözünememesi, çok az bir sertleşmenin sağlanabileceği anlamına gelir (Cassada ve Liu, 2012).



Şekil 2.8. EN AW-6061 alüminyum alaşımının ısı işlem aşamalarının diyagramı (Velling, 2020)

2.3.1. Çözeltiye Alma İşlemi

Bu işlemde alaşım konveksiyonlu bir ısıtıcıda veya fırında ısıtılır ve gerekli süre boyunca bekletilir. Böylece tüm bileşenlerin tamamen katı çözeltiye girdiğinden emin olunur. Daha sonra bu bileşenleri çözeltide tutmak için hızla soğutulur. Daha uzun süre bekletme genellikle malzemenin şekillendirilebilirliği açısından avantajlar sağlar. Ancak, bazı alüminyum alaşımlarının çözeltiye alma işleminde aşırı ısıtılması, erken kırılmaya yol açabilir. Al-Si-Cu-Mg sistemi gibi birden fazla çözünür faz mevcut olduğunda, düşük ergime sıcaklığına sahip fazların ergimesini önlemek için basamaklı ısı işlem gerekebilir. (Dr.G. Prabhakara rao, 2023; Yahaya ve diğ., 2020). Şekil 2.9' de Alüminyum alaşımının çözeltiye alma işlem adımları gösterilmektedir.



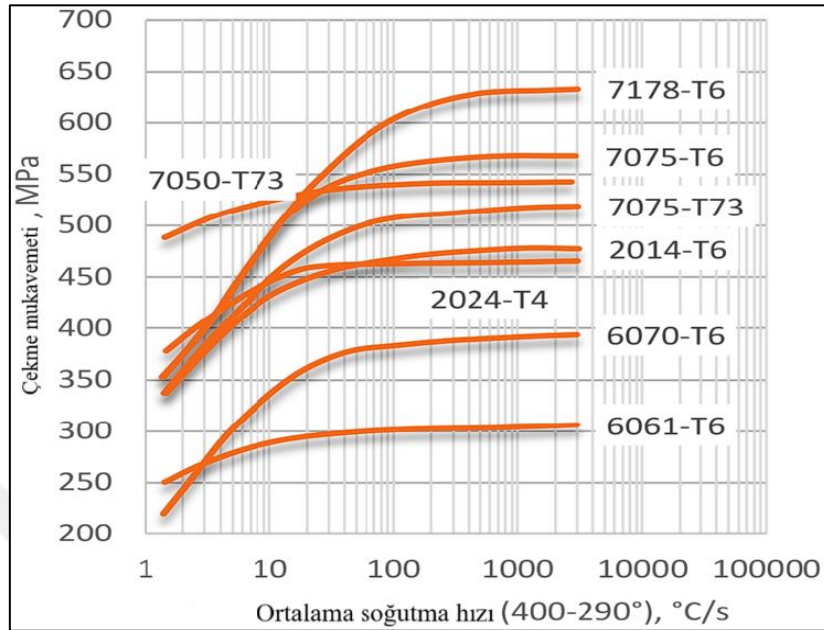
Şekil 2.9. Alüminyum alaşımlarının çözelti sürecindeki mikroyapı evrimleri a) çözeltiden önce b) çözünme evresi başlangıcı c) çözünme tamamlandıktan sonra mikroyapı (Koçdağ, 2019)

2.3.2. Su Verme İşlemi

Isıl işleme tabi tutulabilen alüminyum alaşımları, çözelti ısıl işleminin ardından söndürülerek aşırı doymuluk korunur (Starke, 2005). Su verme işlemi, çözelti ısıl işleminden sonra metali soğutma işlemidir. Bu işlem, kuvvetli hava, su, yağ, sıcak pres şekillendirme (HPF) ve kalıpta su verme (HFQ) gibi farklı yöntemler kullanılarak gerçekleştirilir. Su verme, yalnızca reaksiyonun termodinamik olarak uygun ve kinetik olarak erişilebilir olduğu dar bir zaman aralığı sağlayarak sıcaklık fazı dönüşümünü önlemek için kullanılır. Su vermenin amacı, bileşenleri minimum distorsiyon ve minimum kalıntı gerilmeleri ile korumaktır. Bu, aşırı doymuş çözelti ısıl işlem koşuluna götüren termal işlemlerde temel bir adımdır. Çözelti sıcaklığından oda sıcaklığına hızlı soğutma, kritik, zor ve genellikle termal işlemde en az kontrol edilen adımdır (Dr.G. Prabhakara rao, 2023; Yahaya ve diğ., 2020).

Su verme, çökelme ile sertleşebilen alüminyum alaşımlarının üretiminde kritik bir adımdır. Su verme hızı ve su verme ortamı, malzemenin mekanik özelliklerini kontrol eden ana parametrelerdir. Çoğu durumda, su verme hızı arttıkça daha iyi mukavemet ve tokluk kombinasyonları elde edilir. Ayrıca, hızlı su vermeyle stres korozyonu ve korozyon direnci iyileşir. Ancak, aşırı hızlı su verme, ince malzemelerde yüksek kalıntı gerilme, eğilme veya bükülme riski oluşturabilir; kalın parçalarda ise kırılma eğilimini artırabilir. Bu tür sorunların azaltılması için, yaşlandırma ile güçlendirilebilen alaşımlar gerektiğinden daha hızlı soğutulmamalıdır. Çözelti ısıl işlem sıcaklığından ortalama soğutma hızının çekme mukavemeti üzerindeki etkisinin bir örneği Şekil 2.10'te

gösterilmektedir. Şekilden de görülebileceği üzere ortalama soğutma hızı arttıkça alaşımların çekme mukavemetlerinde de bir artış gözlemlenmektedir (MacKenzie, 2020).



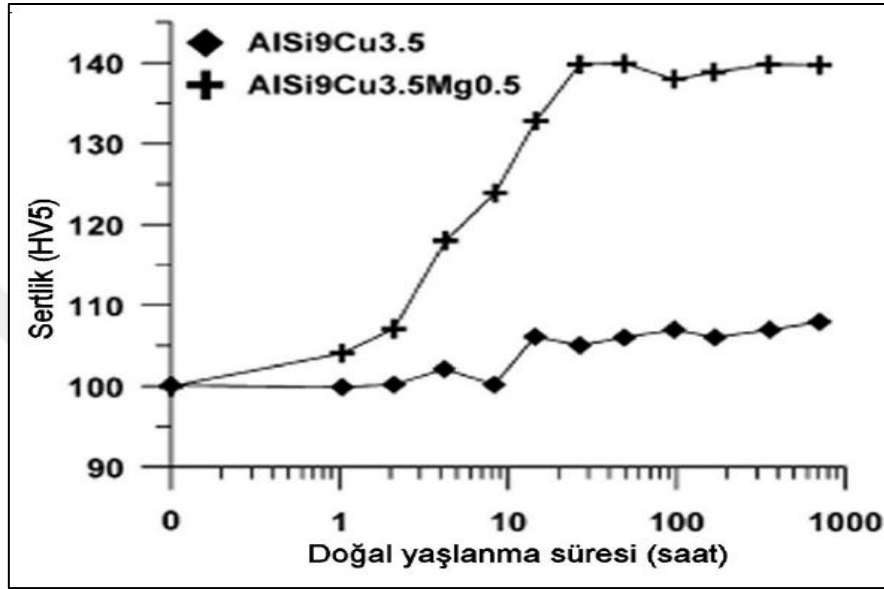
Şekil 2.10. Ortalama soğutma hızı ve ısıl işlem sıcaklığı arasındaki ilişki (MacKenzie, 2020)

2.3.3. Yaşlandırma İşlemi

Yaşlandırma işlemleri, ısıl işleme tabi tutulabilen alüminyum alaşımlarında istenen özelliklerin geliştirilmesi için son termal işlemi temsil eder (Starke, 2005). Yaşlandırma, aşırı doymuş katı çözeltilerin, genellikle uygun sıcaklıkta uygun süreler boyunca soğutulmuş, ısıyla işlenebilen alaşımlarda ince dağılmış çökeltiler oluşturmak üzere kontrollü ayrışmasıdır. Yaşlandırma işlemi, doğal yaşlandırma ve yapay yaşlandırma olmak üzere ikiye ayrılır (Yoshida ve Uchida, 1995).

Doğal yaşlanma, oda sıcaklığında gerçekleşen ve çökelmiş katı çözeltilerin yaşlanmasıyla oluşan kendiliğinden bir süreçtir. Bu alüminyum, bakır, magnezyum ve nikel gibi ısıl işlem görmüş alaşımların mukavemeti için çok önemlidir. Doğal yaşlanma, çözelti işleminden hemen sonra başlar ve alaşımları yapay yaşlanmadan daha sert hale getirir, ancak istenilen sertliğe ulaşması daha uzun sürer. Doğal yaşlanmayı önlemek için malzeme -20°C'nin altında saklanabilir (Neuman ve Alsaifi, 2017).

Doğal yaşlandırma sonucu elde edilebilecek sertlik, alaşımın bileşimine bağlıdır; daha yüksek Mg konsantrasyonu (%0.7'den az) daha yüksek sertlik sağlar. Al-Si-Cu alaşımları oda sıcaklığında yavaşça sertleşir. Küçük bir Mg konsantrasyonu eklendiğinde alaşım doğal yaşlanmaya daha hızlı yanıt verir (Sjölander ve Seifeddine, 2010). Şekil 2.11 magnezyumun doğal yaşlanma süresine etkisini göstermektedir.



Şekil 2.11. Magnezyumun Alüminyum ısıl işlemine etkisi (Koçdağ, 2019)

Çoğu alüminyum alaşımı sertleştirildikten sonra yapay yaşlandırma işlemine tabi tutulur. Yapay yaşlandırma, süper doymuş katı çözeltilerin belirli bir sıcaklık aralığında kontrollü bir şekilde çözülme sürecini içerir. Bu süreç genellikle 100-200°C arasında gerçekleşir ve alaşımın stabil bir duruma ulaşması için 2 ila 48 saat sürebilir. Yapay yaşlandırma işlemi, çözeltilerin belirli özelliklerini elde etmek için tasarlanmıştır; bu özellikler arasında optimum boyut, dağılım, yapı, morfoloji ve çözeltideki çözünen madde miktarı bulunmaktadır. (Yoshida ve Uchida, 1995).

2.4. Bu Çalışma için Seçilen AW 6061 Malzemenin Özellikleri

1921 yılında Robert Archer ve Zay Jeffries, özgün bir alüminyum alaşımı geliştirdi. Al, Mg ve Si karışımının, diğer metal alaşımlarında bulunmayan mekanik özelliklere sahip bir alüminyum alaşımı üretebileceğini tespit ettiler. Ancak, bu alaşımın orta mukavemetli, ısıl işleme uygun, anodize edilebilir veya kaynak yapılabilir uygulamaları ancak 1935 yılında başlatıldı. Archer ve Jeffries'in orijinal alüminyum alaşımını modifiye ederek,

daha gelişmiş bir alüminyum alaşımı olan AW6061 alüminyum alaşımını ortaya çıkardılar (Weber, 2014).

6061 alüminyum alaşımının temel alaşım elementleri magnezyum ve silisyumdur. EN AW 6061, 6000 Serisindeki en yaygın kullanılan alaşımlardan biridir. Isıl işlem uygulanabilir alaşımlar arasında en çok yönlü olanlardan biri olan bu standart yapısal alaşım, orta ila yüksek mukavemet gereksinimleri için popülerdir ve iyi tokluk özelliklerine sahiptir. Alaşım 6061, çeşitli ticari yöntemlerle kolayca kaynak yapılabilir ve birleştirilebilir. Tavlanmış duruma getirilmesiyle EN AW 6061 alaşımının kaynaklanabilirliği ve şekillendirilme özellikleri artar. Bu alaşım, iyi mekanik mukavemeti ile birlikte iyi korozyon direncine sahiptir. Düşük sıcaklıklarda (-196°C'ye kadar) kullanılabilir (ALCOA, 2012; Thyssenkrupp Materials Services GmbH, 2018; Upmet).

6061 alüminyum alaşımı, denizcilik endüstrisinde, depolama tanklarında, havacılık endüstrisinde (uzay araçları, fırlatma sistemleri ve uçak yapıları), otomotiv endüstrisinde, demiryolu endüstrisinde ve mimaride yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Tez çalışmasında kullanılan 6061-T6 alüminyum alaşımının kimyasal özellikleri Tablo 2.10'da verilmiştir. Tablo 2.11'de alüminyum 6061 alaşımının mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.10. 6061 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi(Rakhi ve diğ., 2023)

Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Diğer	Al
0,7	0,40-0,8	0,15-0,40	0,15	0,8-1,2	0,25	0,04-0,35	0,15	0,15	Kalan

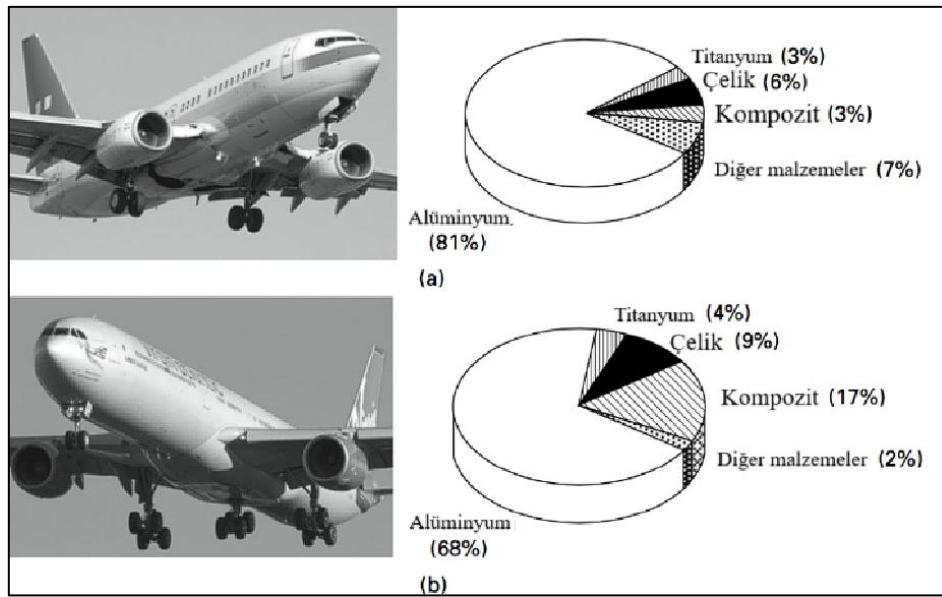
Tablo 2.11. 6061 alüminyum malzemenin mekanik özellikleri(Arııcı ve diğ., 2015)

Mekanik özellikler	Değerleri
Çekme mukavemeti (R_m)	125 MPa
Akma mukavemeti (R_p)	55 Mpa
Uzama (%)	%26
Kesme Modülü	83 MPa
Elastisite modülü	68.3 GPa

2.5. Havacılık Endüstrisinde Alüminyum Alaşımlarının Kullanım Alanları

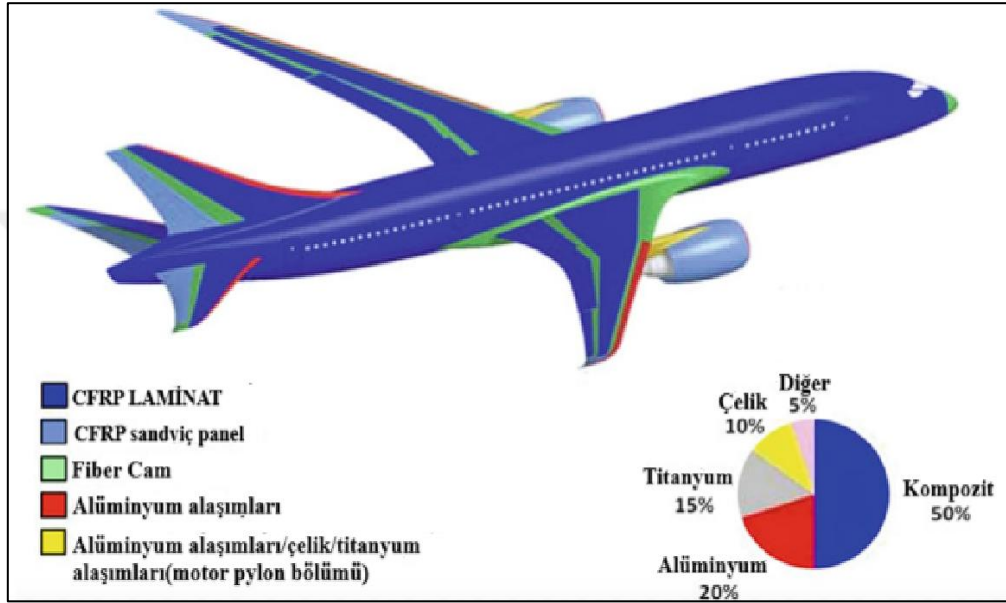
Uçak gövdesi üreticileri ve malzeme üreticileri, malzeme seçimi için tasarım temeli, yapı çevre koşulları, işlev, çalışma sıcaklığı ve yük gibi parametreleri hedefler. Normal sıcaklıkta veya yakınında çalışan uçak bileşenleri ve gövde yapıları, yüksek özgül mukavemet, yorulma ve korozyon direncine sahip olmalıdır. Bu karakteristik gereksinimler göz önüne alındığında, alüminyum alaşımları, mükemmel ağırlık-mukavemet oranı, tasarım kolaylığı, iyi korozyon direnci, termal iletkenlik ve mükemmel geri dönüştürülebilirlik gibi çok yönlü özelliklerinden dolayı askeri ve ticari uçaklar için tercih edilen malzeme olmuştur. (Dwivedi ve diğ., 2021).

Modern kompozitlerin üstün özelliklerine rağmen, yüksek maliyetleri nedeniyle uçak gövdelerinde kullanımları sınırlıdır. Alüminyum ise düşük maliyeti ve kolay üretilebilirliği ile yüksek gerilim seviyelerine dayanabilen bir malzeme olarak önemini korumaktadır. Bu nedenle, havacılık endüstrisine uygun özel alüminyum alaşımları üzerinde çalışmalar sürdürülmektedir (Hamzaoglu, 2023). Şekil 2.12 a. Bölümünde Boeing 737 uçağında kullanılan malzemelerin dağılımı ve b. Bölümünde Airbus A330 uçağında kullanılan malzemelerin dağılımı verilmektedir. Bu farklı tip uçakların ortak özelliği, yapısal olarak alüminyum malzemesinin kullanımının diğer malzemelere oranla daha yüksek olmasıdır (Zavadski, 2018).



Şekil 2.12. Farklı uçakların yapısında kullanılan malzemeler (a) B737 (b) A330 (Zavadski, 2018)

Şekil 2.13’de B737 uçağından yıllar sonra piyasaya sürülen B787 uçağındaki malzeme dağılım oranları görülmektedir. Şekilden de anlaşılabacağı üzere kompozitlerin kullanımı son yıllarda hızla artmış olsa da, hafif metal olan alüminyumun hala yapı kütlesinin %20’sini oluşturmaktadır. Bu nedenle, hafif metaller yani alüminyum gibi malzemeler üzerine odaklanan teknolojiler ve üretim süreçleri hala büyük bir potansiyele sahiptir (Zavadski, 2018).



Şekil 2.13. B787 uçağındaki malzeme dağılımı (Zavadski, 2018)

2.5.1. Havacılıkta En Çok Kullanılan Alüminyum Alaşımları

2000, 6000 ve birçok 7000 serisi alüminyum alaşımları yaşlandırma ile güçlendirilebilir. Alüminyum alaşımlarının, yüksek gerinimli yapılarda kullanılabilmesi için gerekli mukavemeti elde etmeleri yalnızca yaşlandırma ile mümkündür ve bu nedenle, bu işlem uçak yapımında kritik öneme sahiptir. Genellikle havacılık sektöründe tercih edilen alüminyum alaşımları da yukarıda bahsedilen serilerden çıkmaktadır. Bu açıdan, Airbus A380 için de benzer bir yaklaşım benimsenmiştir; bu sefer öncelik bu serilerdeki alüminyum alaşımlarına verilmiştir. Bu uçakta, Tablo 2.12’de verilen alüminyum parçalar listesinden de anlaşılabacağı üzere, yeni geliştirilmiş bileşimler ve yaygın olarak kullanılan alaşımların bir karışımı büyük ölçüde kullanılmıştır (Gialanella ve Malandrucolo, 2020a).

Tablo 2.12.B777 de kullanılan bazı alaşımların temperleri ve kullanıldıkları alanlar (Gialanella ve Malandrucolo, 2020a)

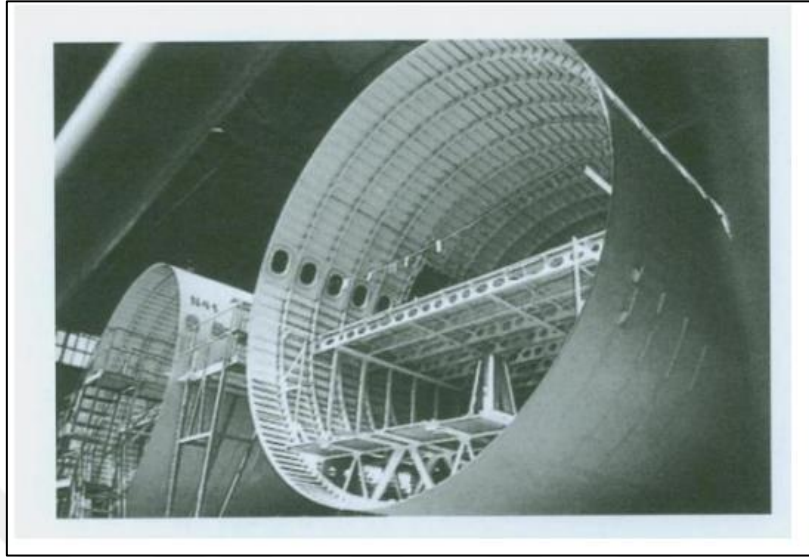
Alaşım	Temperi	Kullanım alanı
7090	T7E71	Uçak parçaları
7055	T7751	Uçak yapısı
6013	T4	Uçak sacı
6063	T6	Ekstrüzyonlar
6061	T6	Kaynaklı bölgeler
2124	T6	Uçak yapısı
2024	T3	Uçağın Gövde yapısı

2000 alaşımları uçaklardaki birçok yapısal ve yarı yapısal bileşende kullanılmaktadır. 2000 alaşımları yüksek mukavemet, yorulma direnci ve tokluk ile karakterize edilir. Bu özellikler, alaşımların gövde kaplamaları, alt kanat panelleri ve kontrol yüzeyleri için çok uygun olmasını sağlar. 2000 alaşımları, yüksek yorulma direnci gerektiren alt kanat kaplamaları ve ticari uçakların gövde yapısı gibi hasara dayanıklı uygulamalarda kullanılır (Cassada ve Liu, 2012).

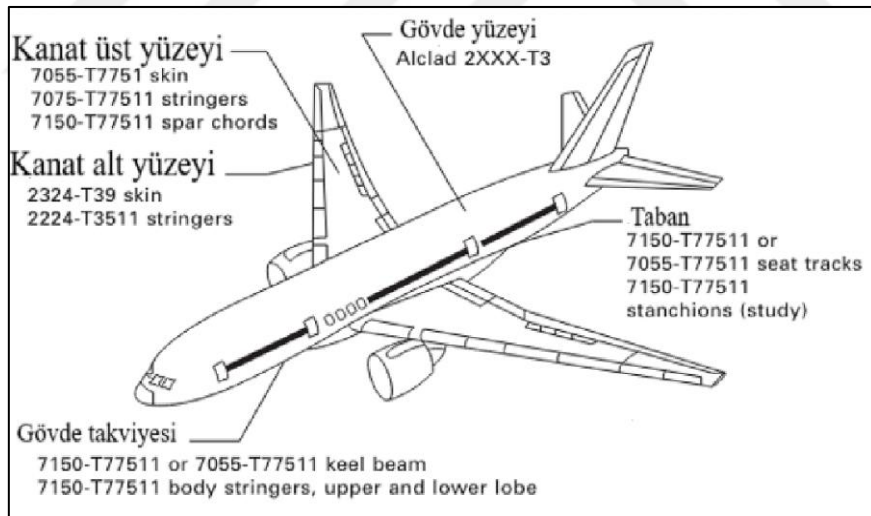
2000 serisinden yaygın olarak kullanılan bazı alaşımlar 2224, 2324 ve 2524'tür. Bu alaşımlar hava araçlarının alt kanat ve gövde yapısında tercih edilmektedir. Bir diğer alaşım ise Alclad 2XXX-T3 alaşımıdır. Bu alaşım, B777 uçağının gövde yapısının gereksinimlerini karşılayacak şekilde mukavemet ve kırılma tokluğu kombinasyonunu sağlamak için geliştirilmiştir. Bu alaşımın yorulma çatlak büyüme direnci, yüksek tepe gerilme yoğunluğu faktörlerinde 2024-T3 sacından neredeyse 2 kat daha iyidir. Bu alaşımın daha yüksek kırılma tokluğu ve daha yüksek çatlak büyüme direnci, bu uygulama için önemli avantajlar sağlamıştır. Şekil 2.14, 2XXX serisi alaşımlar olan 2024, 2124 ve 2618'in ekstrüzyonları ve plakalarını içeren uçak entegre yapısını göstermektedir (Bhat ve diğ., 2018).

Uçaklarda en sık kullanılan 7000 alaşımı 7075 Al alaşımıdır. Uçak yapılarında kullanılan diğer 7000 alaşım arasında 7049 Al, 7050 Al, 7079 Al, 7090 Al, 7091 Al, 7178 Al ve 7475 Al bulunmaktadır (Cassada ve Liu, 2012). Şekil 2.15, uçakta tercih edilen 2XXX ve 7XXX alaşımların genel bir özeti niteliğindedir. Şekil 2.15'de görülebileceği gibi, uçağın çeşitli bölgelerinde genellikle farklı alüminyum alaşımları tercih edilmektedir. Yukarıda da bahsedildiği üzere uçağın gövde kaplamasında genellikle 2024 Al alaşımları

kullanılırken, gövde yapısında yer alan zemin bölgelerinde, seat track ve body stiffeners bölgelerinde ise genellikle 7000 serisi alüminyum alaşımları tercih edilmiştir.



Şekil 2.14. Uçakların iç yapısındaki, 2024, 2014 ve 2618 gibi 2xxx serisi alaşımlardan yapılmış ekstrüzyonlar ve plakaların bir görüntüsü (Bhat ve diğ., 2018)



Şekil 2.15. Uçağın çeşitli bölgelerinde alüminyum kullanımı (Cassada ve Liu, 2012)

Uçağın kanat bölgelerinde genellikle 2XXX ve 7XXX gruplarına ait alüminyum alaşımları kullanılmaktadır. Kanadın üst yüzeyindeki skin ve stringers bölgelerinde genellikle 7XXX serisi alüminyum alaşımları tercih edilirken, kanadın alt yüzeyindeki skin ve stringers bölgelerinde ağırlıklı olarak 2XXX serisi Alüminyum alaşımları kullanılmaktadır (Cassada ve Liu, 2012).

Uçağın iniş takımı bölgesinde, iniş sırasında karşılaşılan dayanım ve esneklik gereksinimlerini karşılamak için 7075 T6 / T651, 7050 T7451 ve 2024 T3 / T351 gibi alaşımlar kullanılmaktadır. Ayrıca, bağlantı elemanı olarak mukavemeti ve dayanıklılığı yüksek olan alaşım 2014 T4 / T351 ve 2017 T4 de tercih edilmektedir (Cassada ve Liu, 2012).

2.5.2. 6061 Alüminyum Alaşımlarının Kullanımı

Alüminyum alaşımı AW6061, özellikle amatör ve hobi uçak yapımcıları tarafından en yaygın kullanılan alaşımlardan biridir. Havacılık endüstrisinde genellikle kanatlarda ve gövdelerde kullanılır. Uzay aracı yapılarında ve uydu yüzeylerinde AA6061, 6XXX serisi alaşımlar arasında en yaygın olarak kullanılanıdır. 6061 alaşımı uçaklarda kanatlar, gövde yapıları ve koltuk rayları, tutacaklar, uçak iniş pedleri gibi diğer kritik olmayan uçak parçaları ve uçağın gövdesi gibi yerlerde yaygın olarak kullanılır, ancak ticari veya askeri uçaklarda daha az yaygındır. 2024 alaşımı biraz daha güçlüdür, ancak 6061 daha kolay işlenir ve yüzeyi aşındığında bile korozyona karşı dayanıklılığını koruduğundan dolayı uçaklarda tercih edilmektedir (Abd El-Hameed ve Abdel-Aziz, 2021).

3. ALUMİNYUM MALZEMELERİN BİRLEŞTİRİLMESİ VE KAYNAK METALURJİSİ

3.1. TIG Kaynağının Fiziksel Prensipleri

Tungsten Inert Gas (TIG) kaynağı işlemi, kaynak yapmak için gerekli ısıyı, tungsten elektrot ile kaynak yapılacak parça arasında oluşturulan elektrik arkı kullanarak elde eden bir kaynak yöntemidir (Smith ve Mobley, 2003). Bu işlem için tungsten elektrod ile ekstra bir malzeme kullanılır. Bu malzemeye dolgu metali denir. Tungsten elektrotu ve ergimiş metali korumak ve ark akımı için iletken bir yol sağlamak amacıyla, ark bölgesi inert bir gazla doldurulur (Smith ve Mobley, 2003). Bu işlemde, Argon (Ar) ve Helyum (He) veya karışımları gibi iki farklı inert gaz türü kullanılır. Bu gazlar, ergimiş metalin atmosferdeki hava ile temas ederek oksitlenmesini önler (Liu ve Hu, 2021). Her gazın kendine özgü özellikleri vardır. Her iki gaz da inerttir, yani yüksek sıcaklıklarda bile diğer maddelerle reaksiyona girmez, karışmaz veya kimyasal olarak çözünmez (Khoshnaw ve diğ., 2023).

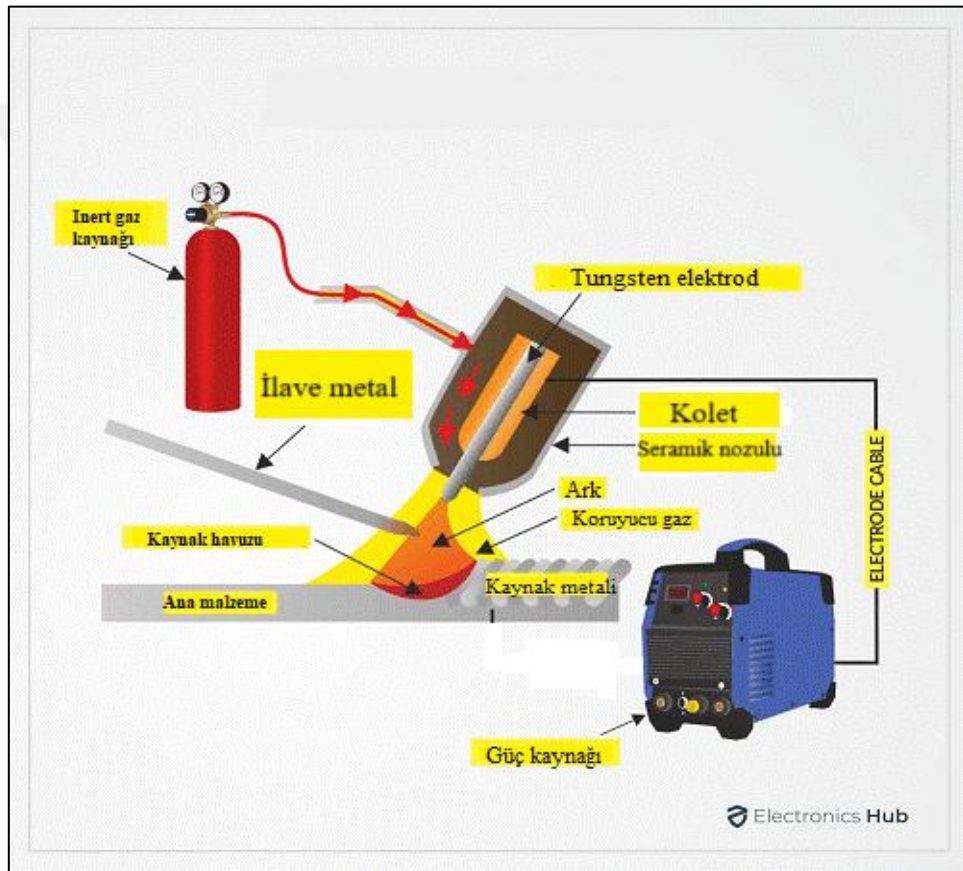
Inert gaz kullanmanın faydaları şunlardır:

- Tungsten elektrodunun ve ergiyik havuzun oksidasyondan korunması
- Arkın başlatılmasına ve arkın istikrarının sağlanmasına yardımcı olur
- Kaynağın formunu ve nüfuziyetini kontrol eder (Khoshnaw ve diğ., 2023).

Ar, diğer inert gazlara kıyasla atmosferde daha yüksek bir oranda bulunur ve He'nin özelliklerine göre birçok avantajı vardır. Şekil 3.1, Ar kullanan TIG yönteminin şematik diyagramını göstermektedir. Kaynak havuzu ve elektrot, kaynak torcu ucunda, elektrodun merkezi olarak yerleştirildiği bir gaz tüpü yoluyla sağlanan Ar ile korunur. Benzer şekilde oksit-gaz kaynağında olduğu gibi elle uygulanabilen çubuk şeklinde dolgu malzemeleri de TIG işlemi sırasında kullanılabilir. Ar genellikle ince kesitli alüminyum malzemeler, alaşımsız çelikler, düşük alaşımlı çelikler ve paslanmaz çeliklerin TIG işlemi için tercih edilir (Liu ve Hu, 2021).

He, atmosferde az miktarda bulunur ve kaynakta yüksek iyonizasyon enerjisi nedeni ile ark sıcaklığını artırır, bu da derin nüfuziyet sağlar. Genellikle bakır, alüminyum alaşımları ve diğer metallerin kaynağında Ar ile karıştırılarak kullanılır. Ar ve He karışımları farklı oranlarda mevcuttur ve He'nin eklenmesi, kaynak sırasında sıcaklığı artırarak iş parçasına

hızlı ve derin nüfuz etme avantajı sağlar. He oranı %50'den az olduğunda, Ar gazının ark stabilitesi gibi avantajları korunur (Khoshnaw vd., 2023). He'nin bir olumsuz yanı, özellikle düşük kaynak akımlarında arkı sürdürmenin zor olmasıdır. Bu yüzden genellikle manuel kaynak için Ar, otomatik kaynak için ise He tercih edilir (H. Liu ve Hu, 2021). TIG işlem kaynak donanımı, uygun güç kaynakları, bir Ar gazı tüpü, kablo bağlantılarına sahip kaynak torcu, koruyucu gaz besleme sistemi ve torcu soğutmak için soğutma sisteminden oluşmaktadır (Janunkar ve diğ., 2017).

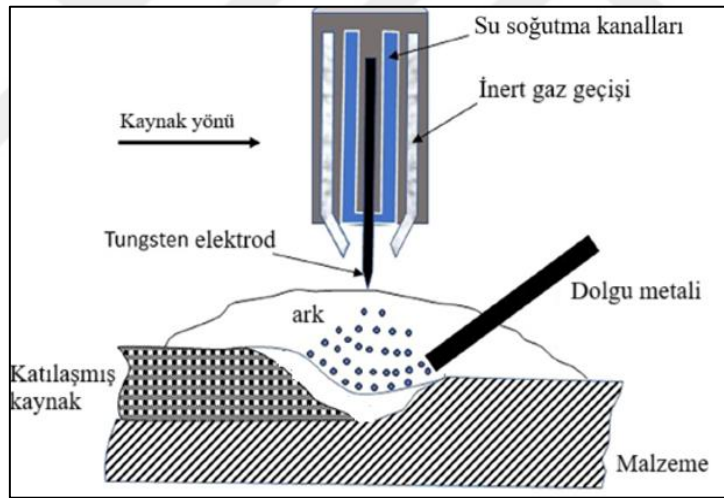


Şekil 3.1. TIG kaynağının şematik diyagramı (Teja, 2024)

Şekil 3.2, TIG kaynak işleminin şematik görüntüsünü temsil etmektedir. Torç, elektrotu tutar ve soğutma ayarlarını su veya hava ile sağlayabilir. (Khoshnaw ve diğ., 2023). Kaynak torcunun temel gereksinimleri, kullanımının basit olması ve etkili bir şekilde yalıtılmış olmasıdır (H. Liu ve Hu, 2021). Ergimeyen elektrod, düşük elektrik direncine, yüksek ergime noktasına, iyi elektron emisyonuna ve etkili termal iletkenliğe sahip olmalıdır. 3370 °C'de ergiyen ve alüminyumla benzer şekilde ısı ileten tungsten, en uygun

malzemedir. Saf tungsten bazı uygulamalarda kullanılabilirken, elektrotun elektron emisyonunu artırmak için genellikle %1-2 oranında toryum oksit eklenmesi tavsiye edilir (Khoshnaw ve diğ., 2023). Toryum radyoaktif özellik gösterir, ancak taşıma tozunu solumaktan kaçınmak dışında özel önlemlerin alınmasını gerektirecek kadar tehlikeli değildir. Alüminyum alaşımlarının birleştirilmesinde toryum kullanılmaz. Alüminyum TIG-AC kaynağında, zirkonyum, seryum veya lantan gibi radyoaktif olmayan alternatif oksit katkı maddeleri kullanılabilir. Bu seçenekler Tablo 3.1'de listelenmiştir (Weman, 2012).

Güç kaynağı, elektroda akım sağlamak için genellikle suyla soğutulan bir akım memesi yoluyla elektroda akım verir. İş parçaları ve elektrotlar temiz olmalıdır, çünkü parçacıklar kaynağı zayıflatır. Ark başladıktan sonra elektrot, iş parçası ve dolgu metal arasında uygun bir tolerans bırakılarak düşeyden 10-15 derecelik bir açıyla tutulmalıdır. (Khoshnaw ve diğ., 2023).



Şekil 3.2. TIG prosesi (Khoshnaw ve diğ., 2023)

Tablo 3.1. ISO 6848 TIG kaynak elektrod örnekleri (Weman, 2012)

Katkı maddesi	Oran %	Renk kodu	Tipi	Akımı
-	0	Yeşil	WP	AC
Toryum	2	Kırmızı	WT20	DC
Zirkonyum	0,8	Beyaz	WZ8	AC
Lantan	1	Siyah	WL10	AC,DC
Seryum	2	Gri	WC20	AC,DC

3.1.1. TIG Kaynak Türleri

TIG kaynağı çeşitleri, alternatif akım (AA) veya doğru akım (DA) güç kullanımına, darbeli veya darbesiz akım tercihin ve dolgu teli kullanımına göre sınıflandırılabilir. AC veya DC seçimi, ana malzemeye bağlı olarak yapılır. Darbeli veya darbesiz akım tercih edilebilir. Darbeli TIG kaynağı, kaynak akımının sabit bir frekansta darbe akımı ile temel akım arasında dönüşümlü olarak değiştirildiği bir yöntemi ifade eder. Bu yöntemde, ana malzeme darbe akımı sırasında ergir ve baz akım sırasında soğur. Bu periyodik değişim, kaynak noktalarının oluşmasına ve sonuç olarak dikişin bir dizi boncuk gibi görünmesine neden olur (Keyence, 2019).

Dolgu teli kullanan iki farklı TIG kaynağı türü bulunmaktadır: soğuk tel kaynağı ve sıcak tel kaynağı. Soğuk tel kaynağında standart bir dolgu teli kullanılır. Sıcak tel kaynağı ise telin önceden ısıtılması için içinden akım geçirilerek gerçekleştirilir. Bu yöntem, birim zamanda dolgu biriktirme miktarını artırabilir. Soğuk tel kaynağına göre yaklaşık üç kat daha fazla dolgu malzemesi ergitilebildiği için kaynak daha hızlı tamamlanabilir (Keyence, 2019).

3.1.2. TIG Kaynağında Kullanılan Güç Kaynakları

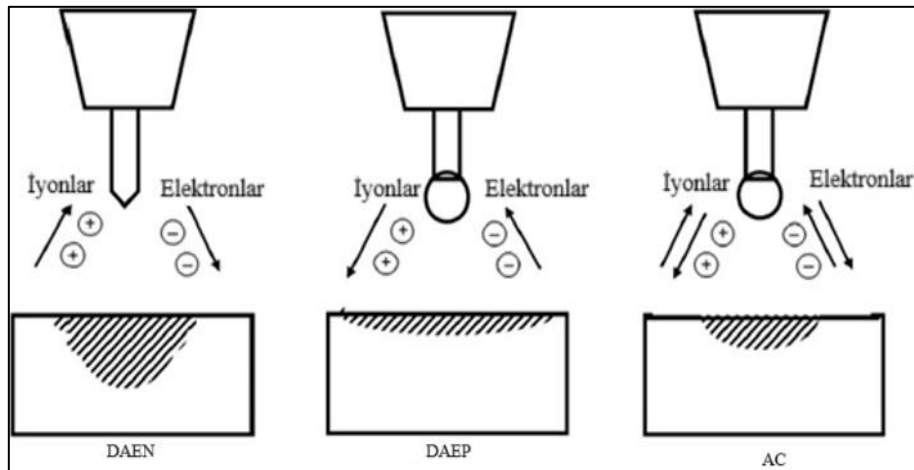
TIG ve diğer ark kaynağı yöntemleri, doğru akım (DA) veya alternatif akım (AA) gibi farklı akım modları uygulanarak çalıştırılabilir. İş parçası DA güç kaynağının pozitif kutbuna ve elektrot negatif kutbuna bağlıysa, çalışma moduna DA düz kutuplama (DAEP) adı verilir. Bunun tersi olarak elektrot pozitif (EP) ile negatif ise iş parçası ile bağlanırsa buna DA ters kutuplama (DAEN) denir (Khoshnaw ve diğ., 2023). Şekil 3.3 de yukarıda bahsedilen modları görselleştirmektedir. DAEN modunda, elektronlar elektrottan yayılır ve yüksek hızlara hızlandırılır ve kinetik enerjiler ısı üretmek için iş parçasıyla çarpışır, bu da derin nüfuziyete ve dar kaynak dikişlerine yol açar (Khoshnaw ve diğ., 2023). Ayrıca DAEP'e göre tungsten elektrodun ısınması engellenir.

Bu özelliklerinden ötürü de DAEN bağlantı, DA kaynak akımı bağlantılarında en yaygın kullanılan bağlantıdır (İjes ve İjes, 2015). Elektrot negatif (düz) kutuplamanın bir dezavantajı vardır; çalışma yüzeyinde temizleme etkisi sağlamaz. Bunun çoğu metal için pek bir önemi yoktur, çünkü bunların oksitleri arkın ısısı altında ayrışır veya ergir, böylece

ergimiş metal birikintileri bağlantı yüzeylerini ıslatır. Bununla birlikte, alüminyum ve magnezyum oksitleri çok karardır ve ergime sıcaklıkları metalin çok üzerindedir. Ark ısıyla giderilmezler ve metal yüzeyde kalırlar ve ıslanmayı kısıtlarlar (Smith ve Mobley, 2003).

Bununla birlikte DAEP bağlantı çok nadiren kullanılır çünkü ısıнын çoğu tungstenin üzerindedir, dolayısıyla tungsten kolaylıkla aşırı ısınır ergiyebilir. DAEP sıg, geniş bir profil üretir ve çoğunlukla düşük amperde çok ince malzemelerde kullanılır (İjes ve İjes, 2015). Elektrot pozitif (ters) polarite modunda, gaz iyonlarının etkisiyle çalışma yüzeyinde temizleme eylemi gerçekleşir. Bu, yüzey inert bir gazın örtüsü altındayken ince bir oksit tabakasını ortadan kaldırır ve daha fazla oksit oluşmadan önce ergimiş metalin yüzeyi ıslatmasına olanak tanır (Smith ve Mobley, 2003).

AA, her iki DA modunun bir kombinasyonu olarak kabul edilen bir üçüncü moddur, çünkü karşılık gelen yarım döngüler içerir. Bu mod, iyi penetrasyon ve uygun temizlik sağlar. AA genellikle sinüzoidal bir dalga formunda olur, ancak bazı modern kaynak güç kaynaklarında daha iyi dalga dengelemesi için kare AA özelliği bulunmaktadır. Kare dalgalar sayesinde pozitif ve negatif polarite akımlarının oranları ayarlanabilir, bu da penetrasyonu ve oksit parçalanmasını kontrol etmeye yardımcı olabilir (Khoshnaw ve diğ., 2023).



Şekil 3.3. Kaynakta kullanılan akım türleri (modları)(Khoshnaw ve diğ., 2023)

3.1.3. Alüminyum TIG Kaynağı Dolgu Metali Malzemeleri

Dolgu metalleri, TIG uygulamalarının neredeyse tamamında kullanılır. Dolgu metalleri, farklı çaplarda ve çeşitli malzemelerden üretilmiş olarak bulunur. Çoğu durumda, çubuk şeklindeki dolgu metali kaynak banyosuna elle eklenir, ancak bazı uygulamalarda otomatik olarak beslenen dolgu metali kullanılır ve bu metal genellikle makaralarda veya bobinlerde saklanır (NTTI, 2014).

Dolgu metallerinin, genellikle ana metal ile benzer bir kimyasal spektral analize sahip olmalıdır, ancak bazen gözenek oluşumunu azaltmak için oksit giderici bileşenler bir miktar daha fazla olabilir. İnce malzemeler (3-4 mm'ye kadar) tek taraflı kaynak edilebilir ve kaynak metali tamamen ergimiş iş parçası malzemesinden oluşur. Daha kalın iş parçaları, birleşim yerini doldurmak için dolgu malzemesinin eklenmesiyle hazırlanmış bir bağlantı gerektirir. Gözenek oluşumunu azaltmak için, yumuşak çelik kaynaklarında dolgu maddelerinin her zaman kullanılması önerilir (Khoshnaw ve diğ., 2023). Tablo 3.2 de birleştirilecek ana malzemelere göre hangi dolgu metalinin kullanılacağı gösterilmektedir.

Tablo 3.2. Birleştirilecek ana malzemelere göre dolgu metalinin seçimi (Eryürek ve diğ., 2007)

Ana metal-Ana metal	1060, 1100, 2219, 3003	A201.0	3004, Alclad 3004	5154, 5254	7005	6005, 6061, 6063, 6351
7005	5356	4145	5356	5356	5356	5356
6005, 6061, 6063, 6351	4043	4145	5356	5356	-	4043, 5356
1060, 1100, 3003	1100	-	-	-	-	-
5083, 5456	5356	NR	5356	-	-	-
3004, Alclad 3004	4043	4145	4043	-	-	-
2219, A201.0	4145	2319	-	-	-	-
3056.0, A444.0, 443.0, A357.0	4043	4145	4043	4043	4043	4043

3.2. Alüminyum Alaşımlarının Kaynak Kabiliyeti

Alüminyum ve alaşımları, hafiflik, etkili korozyon direnci, yüksek tokluk, yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklılık ve kolay geri dönüşüm özellikleri nedeniyle kaynak endüstrilerinde geniş bir şekilde tercih edilmektedir (Olabode ve diğ., 2013). Alüminyum, demir gibi bir element ve metaldir ancak birçok açıdan demirden farklıdır. Örneğin,

alüminyumun sadece bir allotropik formu bulunmaktadır, dolayısıyla faz dönüşümü söz konusu değildir ve bu özellik, mikroyapıyı kontrol etmek için kullanılabilir. Alüminyumun güçlendirilebileceği ana yöntemler arasında deformasyon sertleşmesi, katı çözelti ile sertleştirme veya mikro yapıya çökeltilerin eklenmesi bulunmaktadır. Yukarıda bahsedilen özellikleri sayesinde, alüminyum alaşımları kaynak mühendisleri için son derece kullanışlı bir malzemedir. Eğer istenen koşullar sağlanırsa kolayca kaynaklanabilir ve görece kolay bir şekilde istenilen şekil ve boyuta dönüştürülebilir (Singh, 2020). Alüminyum alaşımlarının kaynağı, yapısal yapıların ve uçaklar gibi mekanik imalatların üretimi için önemlidir. Bununla birlikte, alüminyum alaşımlarının kaynağı sırasında bazı kusurlar meydana gelebilir. Alüminyumda sıkça görülen kaynak kusurları arasında gözenek oluşumu, sıcak çatlama, ergime eksikliği gibi durumlar bulunmaktadır (Olabode ve diğ., 2013).

Alüminyum alaşımları kaynaklanabilirlik olarak 3'e ayrılır:

- kolayca kaynaklanabilir; kaynaklı yapılarda kullanılacak malzemeler
- sınırlı kaynaklanabilirlik; kaynaklı yapılarda kaçınılması gereken malzemeler
- uygun değil; kaynaklı yapılarda kullanılmaması gereken malzemeler (Mattson, 2012).

Geniş bir katılma sıcaklığı aralığına sahip alaşımlarda, dar bir katılma sıcaklığı aralığına sahip olanlara göre katılma çatlama riski daha yüksek olabilir. Isıl işlem gören ve görmeyen alaşımların kaynaklanabilirliği Tablo 3.3 ve 3.4'te detaylı olarak açıklanmıştır.

Tablo 3.3. Isıl işlem gören alüminyum alaşımların kaynak kabiliyetleri (Mattson, 2012)

Alüminyum alaşımları	Gaz kaynağı	MIG/TIG kaynağı	Direnç kaynağı	MMA (manuel metal ark kaynağı)	Sert lehimleme
1060	A	A	B	A	A
1100	A	A	A	A	A
1350	A	A	B	A	A
3003	A	A	A	A	A
3004	B	A	A	A	B
5005	A	A	A	A	B
5050	A	A	A	A	B
5052	A	A	A	A	C

Tablo 3.4. Isıl işlem görmeyen bazı alüminyum alaşımların kaynağı(Mattson, 2012)

AlüminyumGaz alaşımları	kaynağı	MIG/TIG kaynağı	Direnç kaynağı	MMA(manuel metal ark kaynağı)	Sert lehimleme
2014,2024	X	C	B	C	X
2036	X	B	B	C	X
2090	X	B	B	X	X
2218	X	C	B	C	X
2519	X	B	B	C	X
2618	X	B	B	C	X
6061	A	A	A	A	A
6010	C	B	B	C	X
6013	C	B	A	C	X
6070	C	B	B	C	X
6101	A	A	A	A	A
6262	B	A	A	B	X
6351	C	B	A	C	B
7004	X	A	A	X	B
7039	X	A	A	X	C
7075	X	C	B	X	X
7079	X	C	B	X	X

A = İyi kaynaklanabilirlik.

B = Çoğu uygulama için kabul edilebilir kaynaklanabilirlik, ancak özel yöntemler gerektirebilir veya doğru kaynak parametrelerini bulmak için testler yapın.

C = Sınırlı kaynaklanabilirlik.

X = Bu birleştirme yöntemi önerilmez (Mattson, 2012).

Alüminyum birleştirmek için en sık kullanılan iki kaynak işlemi metal inert gaz (MIG) ve TIG yöntemidir. Her iki işlem de ergimiş kaynak havuzunu oksidasyondan korumak ve ark plazmasına iyon sağlamak için bir inert gaz (He veya Ar) kullanır. Her iki ark prosesinde de, kaynak ısısı girdisi (birim uzunluk başına), ark gücü (voltaj x akım) ile ark verimlilik faktörü (kaynak prosesine bağlı olarak genellikle %50-80) çarpımı ve kaynak hızına bölünmesiyle tanımlanır (Dickerson, 2018).

3.2.1. Alüminyum Alaşımlarının TIG Kaynağı

TIG işlemi, özellikle ince metallerde yaygın olarak kullanılan alüminyum kaynağı ile ilişkilidir ve havacılık endüstrisinde uzun bir geçmişe sahiptir. Diğer kaynak işlemleri de

kullanılabilir, ancak TIG alüminyumun ince kalınlıkları için en uygun seçenektir (Mattson, 2012).

Daha öncesinde bahsedildiği üzere gaz korumalı ark kaynağı işlemlerinin özelliği ısının büyük kısmının pozitif kutupta üretilmesidir. Pozitif kutba (DAEP) bağlanan elektrotla TIG kaynağı, elektrotun aşırı ısınmasına ve ergimesine neden olur. Bu nedenle alüminyumun manuel TIG kaynağı normal olarak alternatif akım (AA) kullanılarak gerçekleştirilir; burada oksit filminden kurtulması elektrot pozitif yarı döngüsünde gerçekleşir ve elektrot soğuması ve kaynak dikişinin nüfuziyeti AA sinüs dalgasının elektrot negatif yarı döngüsünde gerçekleşir (Mathers, 2000).

AWS 5.12 tarafından EWP olarak sınıflandırılan saf tungsten elektrotlar veya EWZr-1 (uç rengi=kahverengi, altın sarısı) olarak sınıflandırılan tungsten zirkonyum elektrotlar, bir alüminyumun kaynak işlemi için tercih edilen elektrotlardır (Mattson, 2012).

3.3. Kaynak İşlemi Esnasında Meydana Gelen Hatalar

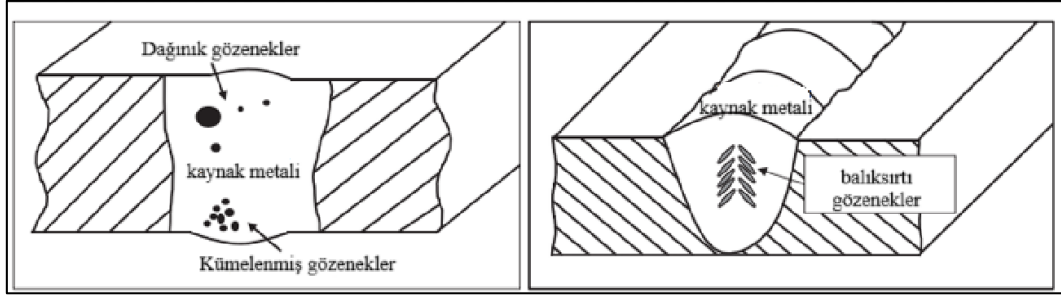
3.3.1. Porozite Hatası

Havayla dolu boşluklar veya porozite, alüminyumun kaynak işlemlerinde çok fazla gözlemlenen bir hatadır. Bu hata, ergime bölgesinde sıvı metale gazların, örneğin hidrojenin, girmesi sonucu ortaya çıkar. Alüminyum sıvı haldeyken hidrojen gibi gazları çözebilirken, katı hâlde bu çözünürlük çok düşüktür. Bundan dolayı, kaynak sırasında kaynak dikişine herhangi bir anda hidrojen sızarsa, kaynak sonrası soğuma ile ergime bölgesinde gaz boşlukları yani porozite oluşabilir. Alüminyum alaşımlarında porozite içermeyen bir kaynak dikişi elde etmek genellikle zordur (Çam, 2020).

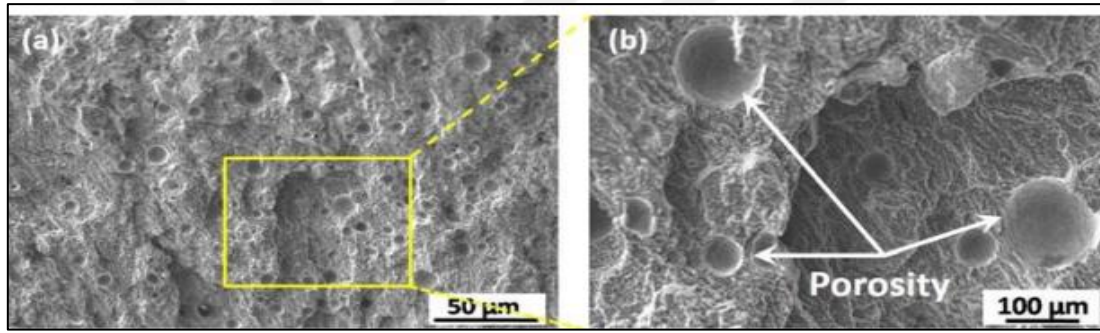
Gözeneklerin görüntüsü, yayılımı ve miktarı; kaynak koşulları, kaynağın katılaşması, soğuma hızı, konvektif kaynak akışı ve koruyucu gaz karışımı gibi faktörlere bağlıdır. Şekil 3.4, kaynak malzemesindeki ve kaynak dikişindeki gözenekleri göstermektedir (Yusof ve Jamaluddin, 2014).

Makro gözeneklilik (porozite), 5 mm'nin üzerinde daha büyük bir boyuta sahip olan gözenekleri tanımlamak için kullanılan bir terimdir. Bu tür makro gözeneklilik, kaynak bağlantısındaki mukavemetin azalmasına neden olabilen kaynak kusurlarına yol açabilir.

Makro gözenekliliğin sebebi, hidrojenin kaynak içerisindeki yüksek çözünürlüğe sahip olmasıdır. Hidrojenin içeriği, hava akış hızı ve oda sıcaklığı kontrol edildiğinde, makro gözeneklilik en aza indirgenebilir. (Ardika ve diğ., 2021). Porozitenin kaynak içerisindeki görünümü Şekil 3.5'te gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Kaynak metalinde çeşitli porozite görüntüleri (Yusof ve Jamaluddin, 2014)



Şekil 3.5. Porozite görüntüsü (Ardika ve diğ., 2021)

Aluminyum kaynak ortamının gözeneklilik üzerindeki etkisi, sıcaklık, hidrojen içeriği ve nem gibi faktörlerden etkilenir. Özellikle alüminyumun ergimesi sırasında, hidrojenin çözünürlüğü artar ve bununla birlikte sıcaklık da artar. Bundan dolayı da kaynak sırasında ergimiş metalde çok miktarda hidrojen gazı meydana gelebilir. Kaynak işlemi sırasında, alüminyumun ergime sıcaklığında hidrojenin yüksek çözünürlüğü nedeniyle genellikle kaynak metalı bölgesinde gözeneklilik görülür. Ortam sıcaklığındaki artış, alüminyumun ergitildiğinde hidrojenin çözünürlüğüne neden olur. Kaynaktaki gözeneklilik kusurları tokluğu düşürebilir, yorulma çatlamlarına neden olabilir, kaynaklı bağlantılarda sünekliği azaltabilir ve mikro yapıda değişikliklere yol açarak kaynak sonuçlarının mekanik özelliklerinde değişikliklere neden olabilir (Ardika ve diğ., 2021).

Çevresel faktörlerden biri olan hava neminin, gözenekliliğin varlığını etkilemesi önemlidir. Kaynak bağlantılarında hidrojenin neden olduğu gözenekliliğin oluşumunda nem, kritik bir rol oynar. Yayılmış hidrojen iyonlarının içeriği, havadaki su buharı basıncının artmasıyla birlikte artar. Bu nedenle, yükselen nem seviyeleri, yüksek gözeneklilik oluşmasına neden olabilmektedir. Yapılan bir çalışmada (Gou ve diğ., 2015) alüminyum alaşımlarının kaynak işlemleri sırasında %50, %70 ve %90 oranlarında farklı nem değişim parametreleri uygulanmıştır. Araştırma sonuçlarına göre, %90 nem koşullarında gerçekleştirilen kaynaklı bağlantılarda yüksek düzeyde gözeneklilik gözlemlenmiştir. %70 nem koşulu altında yapılan kaynaklarda ise, kaynaklı bağlantılarda maksimum çap ve gözenek alanı elde edilmiştir. Buna karşın, %50 nem koşulunun uygulandığı kaynak işlemleri, düşük gözeneklilik değerleri ile sonuçlanmıştır. Bu bulgular, nem oranının alüminyum alaşımlarının kaynak kalitesi üzerindeki etkisini vurgulamakta ve optimum kaynak parametrelerinin belirlenmesi açısından önemli bir katkı sağlamaktadır. Dolayısıyla artan gözeneklilik miktarı artan nemden kaynaklanmaktadır.

Kaynak işlemi sırasında gözeneklerin azaltılması, kullanılan kaynak tekniklerine, çevresel koşullara ve kaynak malzemesinin şekline bağlı olarak değişik yöntemlerle gerçekleştirilebilir. Gözenekliliği azaltmanın ilk adımı, örneğin parçaları temizleyerek hidrojen kaynaklarını ortadan kaldırmaktır. Dolgu malzemesinin kalitesi ve saflığı da büyük öneme sahiptir (Deekhunthod, 2014). Alüminyum alaşımının TIG kaynağı sırasında, ilave metalin kuru olmasına ve koruyucu gazın temiz olmasına özen gösterilerek, kaynak yapılacak parçaların yüzeyinin aseton ile temizlenmesiyle porozite miktarı kabul edilebilir seviyelere indirilebilir (Çam, 2020).

3.3.2. Katılma Çatlama

Katılma çatlama, özellikle yüksek kükürtlü çelikler, östenitik çelikler ve alüminyum alaşımlarında kaynak sırasında yaygın olarak karşılaşılan bir kusurdur. Bundan dolayı da alüminyumların kaynağında, döküm ve eklemeli imalatlarında ciddi hatalar gözlemlenmektedir. Katılma çatlakları, mekanik, termal ve metalurjik faktörlerin karmaşık etkileşimi nedeniyle oluşur. Bu çatlakların oluşumu, hem malzeme bileşimi hem de kaynak parametrelerine güçlü bir şekilde bağlıdır (Coniglio ve Cross, 2020).

duyarlı hale gelir. Ayrıca ince taneli morfolojinin bir avantajı, tane sınır alanının kaba taneli morfolojiye göre nispeten daha fazla olmasıdır. Bu nedenle düşük ergime noktalı bileşenler, ince tane boyutunda tane sınırlarında daha az yoğunlaşır (Kou, 2003).

3.3.3. Sıvılaşma Çatlaması

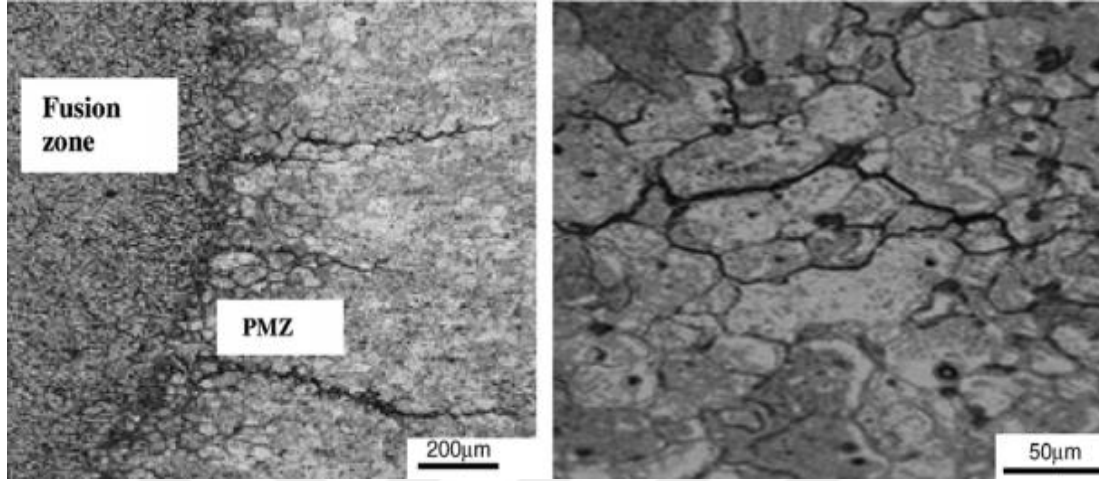
Yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarında, kaynak işlemi sırasında ötektik dönüşüm sıcaklığının üzerine ısınan ergime bölgesinde kısmen ergimiş bölge (PMZ) meydana gelir. (Çam, 2020). PMZ 'nin ön kısmında ergime meydana gelir, yani iş parçasındaki taneler (genellikle aynı ekseninde olanlar) ısınma sonucunda ergir. Diğer yandan, katılaşma PMZ 'nin arka kısmında gerçekleşir, yani kısmen ergimiş taneler katılaştıktan sonra büyür. PMZ 'nin iç kısmı erime hattındaki yumuşak bölgeye, dış kısmı ise katılaşmış PMZ 'ye ve iş parçasına bağlanır. Böylece, soğuyan yumuşak bölge, katılaşmış PMZ 'ye ve iş parçasına bağlı olan ve dolayısıyla serbestçe küçülmeyen PMZ 'de gerilime neden olabilir. Tane sınırı boyunca PMZ'de taneler arası çatlama oluşabilir. Buna sıvılaşma çatlaması adı verilir (Kou, 2021).

Mikroskobik taneler arası çatlaklar kaynaktan hemen sonra mevcut olabilir veya zaman geçtikçe gelişebilir. Çatlamaya duyarlılık daha sonra tane sınırlarındaki sıvı filmlerin varlığı ve kalıcılığı ile bağlantılıdır. Çatlakların oluşumuna yol açan şey, bu filmlerin, kaynağın soğuması sırasında yaşanan termal ve/veya mekanik gerilimleri karşılayamamasıdır. Böylece, hasar oluşması için hem çatlamaya duyarlı bir mikro yapının hem de kritik düzeyde bir sınırlamanın gerekli olduğu kabul edilmektedir (Lu ve diğ., 1996).

Sıvılaşma çatlamasına duyarlılık sıcaklık aralığından, ana malzemedeki bileşimden ve yapı tasarımı türünden etkilenir. Sıvılaşma çatlama duyarlılığı artan soğutma sıcaklığı aralığıyla birlikte artmaktadır. Örneğin, EN AW 7075 alaşımı, katılaşma sıcaklığı aralığında EN AW6061'e göre daha yüksek miktarda sıvıya sahiptir ve bu nedenle EN AW 7075 alaşımı, sıvılaşma çatlaması açısından daha yüksek bir riske sahiptir (Deekhunthod, 2014).

Geleneksel ergitme kaynak yöntemlerinde, yüksek ısı girişi nedeniyle sıvılaşma çatlağı riski artar. Bu tür yöntemler kullanıldığında, AW 6061 gibi Alüminyum alaşımlarında

yeterli düzeyde ısı girdisi varsa sıvılaşma çatlamaşı oluşabilir. Şekil 3.8'de, TIG kaynağı kullanılarak kaynak yapılmış 6061 alaşımında bu tür çatlamaşı bir örnek verilmiştir (Prasad Rao ve diğ., 2008).



Şekil 3.8. TIG kaynaklı 6061 Alüminyum alaşımında sıvılaşma çatlamaşı (Prasad Rao ve diğ., 2008)

3.3.4. Oksit Kalıntıları

Ara yüzeydeki metal ile kaynak havuzundaki ergimiş metal ve buharlaşan metal/koruyucu gaz arasındaki etkileşim, hava ve gaz koruyucunun hapsedilmesinden dolayı oksitlenmiş katmanlar oluşturacaktır. Kırılgan oksit tabakası iki tipte olabilir: (1) parçacıklar ve (2) filmler. Oksitlerin parçacık formunda olması durumunda kaynaklı bağlantı kalitesinden ödün verilmez. Çatlak benzeri süreksizlikler formundakiler ise, başlangıç çatlakları ve yeni çatlaklar için çekirdeklenme başlangıç noktaları görevi görecekleri için çatlak oluşumlarını teşvik edecektir (Yusof ve Jamaluddin, 2014).

Yüzeydeki bir oksit filminin kırılması ergime eksikliğini ve oksitlerin kaynak dikişine hapsolmasını engellemek için gerekmektedir. Aksi takdirde ergime bölgesinde oksit kalıntıları, özellikle de kaynak dikişi boyunca sürekli ise kaynaklı bağlantının mukavemeti üzerinde önemli oranda olumsuz etki yapar. Şekil 3.9'da FSW ile birleştirilmiş bir alüminyum alaşımının karıştırma bölgesindeki çizgi şeklindeki oksit kalıntısı görülmektedir (Çam, 2020).



Şekil 3.9. Alüminyum alaşımlarının kaynağı sonrası oksit kalıntısı görüntüsü (Çam, 2020)

Alüminyum ve oksijen arasındaki etkileşimden dolayı açık yüzeylerde her zaman kaynağı zorlaştıran bir oksit filmi oluşur. Oksit filmi, ana metalden önemli ölçüde farklıdır. Kaynak sırasında refrakter ve ağır oksit filmi çözünmez, ergimiş metalin içine batar, ergiyik sınırına ve ana metale yerleşir ve biriken kaynak metalinin ana metale katılmasını engeller (Vertii, 2023).

Inert bir gazdaki alüminyum bağlantılarının gaz tungsten darbeli ark kaynağı, kaynak sırasında alüminyum alaşımlarının sıcak kırılabilirliğe karşı direncini arttırmak için dikişlerdeki oksit film kalıntılarının sayısını azaltmayı mümkün kılar. Ancak kaynak torçunun şeklinin özellikleri nedeniyle dar açıda bulunan parçaların kaynaklanması sırasında bu yöntemin uygulanması zordur (Vertii, 2023).

3.4. Havacılık Sistemlerinde Kaynak İşlemleri

Havacılık endüstrisinde, düşük adetli imalat, yüksek maliyet, aşırı güvenilirlik ve zorlu çalışma koşullarıyla tanımlanan kaynak, en yaygın kullanılan birleştirme yöntemlerinden biridir. Bu sektörde kaynak, alüminyum, titanyum alaşımları ve paslanmaz çelikten yapılan parçalarda uygulanır. Ark kaynağı, katı hal kaynağı, direnç kaynağı ve yüksek enerji yoğunluğu kaynağı gibi yöntemler hem parça üretiminde hem de bakım

faaliyetlerinde kullanılır. Özellikle, uçak bakım maliyetlerini kontrol altında tutmak ve uzun arıza sürelerini önlemek için değiştirilmesi zor bileşenlerin onarımı bu yöntemlerle yapılabilir.

Uçaklarda kullanılan çeşitli bileşenlerden biri kondansatördür. Kondansatör, uçağın hava sisteminin bir bileşenidir. Kondansatörün görevi sistemde ısı transferini sağlamaktır ve görüntüsü yüzeyinde kanatçıklar bulunan uzun bir boru şeklinde bir radyatör gibidir. Şekil 3.10 da bir kondansatör görülmektedir. Şekilden de anlaşıldığı üzere kondansatörün hasarlı bölgelerine kaynak işlemi uygulanmıştır.



Şekil 3.10. Kondansatör üzerinde uygulanan kaynağın görüntüsü

Kondansatöre uygulanan kaynağın benzerleri yine uçak üzerindeki farklı bileşenlerde uygulanmaktadır. Şekil 3.11 ve şekil 3.12 de uçağın air condition sisteminde kullanılan 2 farklı bileşen görülmektedir. Bunların isimleri yeniden ısıtıcı (reheater) ve ısı eşanjörüdür (heat exchanger). Şekillerden de anlaşılacağı üzere bu iki farklı bileşende de hasar görülen noktalara kaynak işlemleri uygulanmaktadır. Yapılan bu kaynak işlemleriyle bakım maliyetleri oldukça düşürülmüştür.



Şekil 3.11. Reheater üzerinde uygulanan kaynağın görüntüsü



Şekil 3.12. Heat exchanger üzerinde uygulanan kaynağın görüntüsü

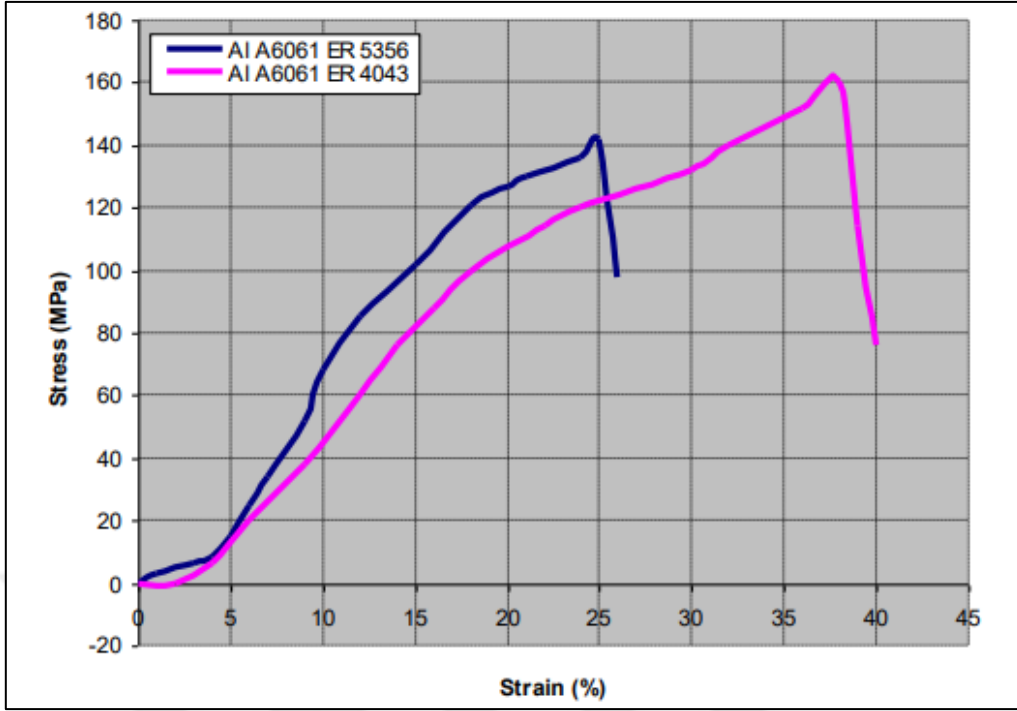
3.5. Literatürde Yapılmış Çalışmalar

Alüminyum alaşımlarının kaynak işlemlerinde, parametrelerinin yanı sıra malzemenin ve ilave metallerin kimyasal bileşimi, ısı girdisi, koruyucu gaz ve oksit tabakasının temizliği, birleştirmelerin mukavemeti üzerinde büyük bir etkiye sahiptir (Vettum Perumal ve diğ.,

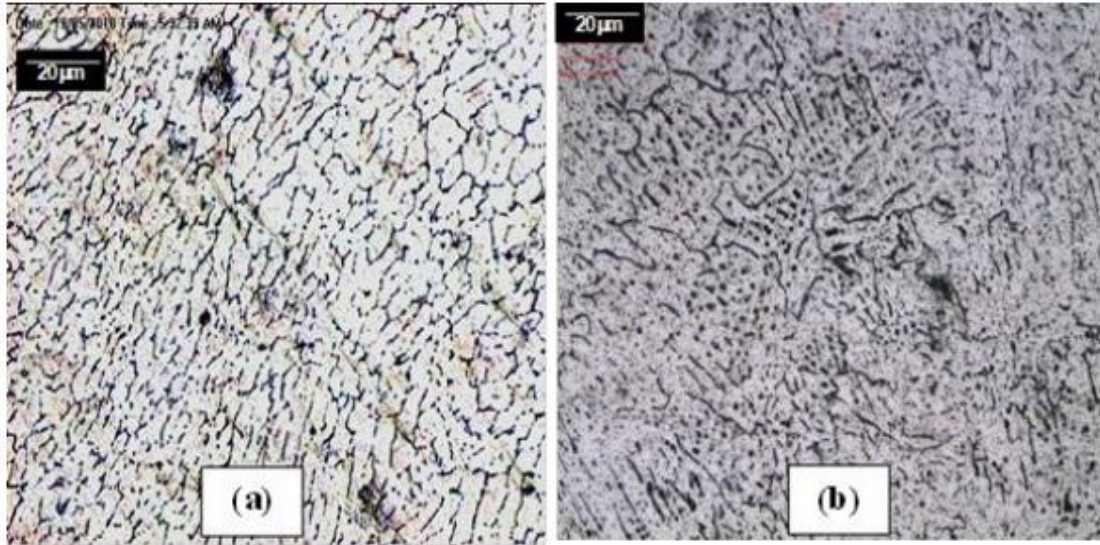
2023). Tungsten Inert Gas (TIG) kaynak yöntemi, alüminyum alaşımlarının birleştirilmesi için kullanılan en yaygın kaynak tekniklerinden biridir. İşlem sırasında herhangi bir oksidasyon ve kirlenmenin oluşmasını önleyen ve ergimeyen bir tungsten elektrot kullanır. Bu işlem diğer ark kaynak yöntemlerine göre dar alanda daha yoğun bir ısı kaynağına sahiptir; dolayısıyla benzer maliyetle daha az distorsiyona sahip bağlantılar üretebilir. Fakat alüminyum malzemelerin birleştirilmesinde en önemli sorunlardan biri üretim şartları ile elde edilen mukavemet özelliklerinin birleştirme işlemi esnasında uygulanan ısı girdisi ile kaybedilmesidir. Kaynak metalinin özelliklerini iyileştirmek için yapılabilecek çok az şey vardır. Katı çözelti güçlendirmesi yararlı olabilir ve uygun dolgu metalinin seçimi, kaynak metali dayanımına önemli ölçüde katkıda bulunabilir (Mathers, 2000). AW 6061'in ergitme kaynağında iki yaygın problemin, ısıdan etkilenen bölge ve kaynak metalinde yumuşama veya sertleşmeye ilave olarak kaynakların özelliklerini bozabilecek gözeneklilik olduğu iyi bilinmektedir (Yadav ve diğ., 2023). Literatürde birleştirme sorunlarından yola çıkılarak yapılan çalışmalar aşağıda detaylı olarak verilmiştir:

Yılmaz ve Fındık (2022) yaptıkları çalışmada aynı malzemede koruyucu gazı etkilerini araştırmıştır. Yazarlar çalışmanın sonuçlarında, He gazının yüksek ısı iletkenliği ve iyonlaşma enerjisi nedeniyle koruyucu gaz bileşimindeki He içeriğinin artmasıyla kaynak bağlantısındaki gözeneklilik oranı azaldığını fakat ısı etkisi altındaki bölgenin genişlediğini belirtmişlerdir.

CheLah ve Hussin (2020) TIG kaynak yöntemi ile birleştirdikleri AA6061 alüminyum alaşımında ilave metallerin etkisini araştırmıştır. Yazarlar, ER 4043 kullanılarak elde edilen birleştirmeleri, ER 5356 ile elde edilen kaynak metalleri ile karşılaştırdığında birleştirmenin mukavemet değerinde yaklaşık %12 oranında iyileşme elde edildiğini rapor etmiştir (Şekil 3.13). Yapılan çalışmada elde edilen iki numune için mikroyapı görüntüleri Şekil 3.14 de görülmektedir. Şekilde görüldüğü üzere ER4043 dolgu metali kullanımıyla AW6061 kaynaklarında sağlanan yüksek dayanım, kaynak bölgesinde daha ince taneler ve kristal yapıların homojen dağılımına bağlanabilir. Sonuç olarak AW6061 kaynak metalinin, ER4043 dolgu metaliyle birleştirilmesi ER5356 ile birleştirmeye göre daha yüksek bir süneklik sağlamaktadır.



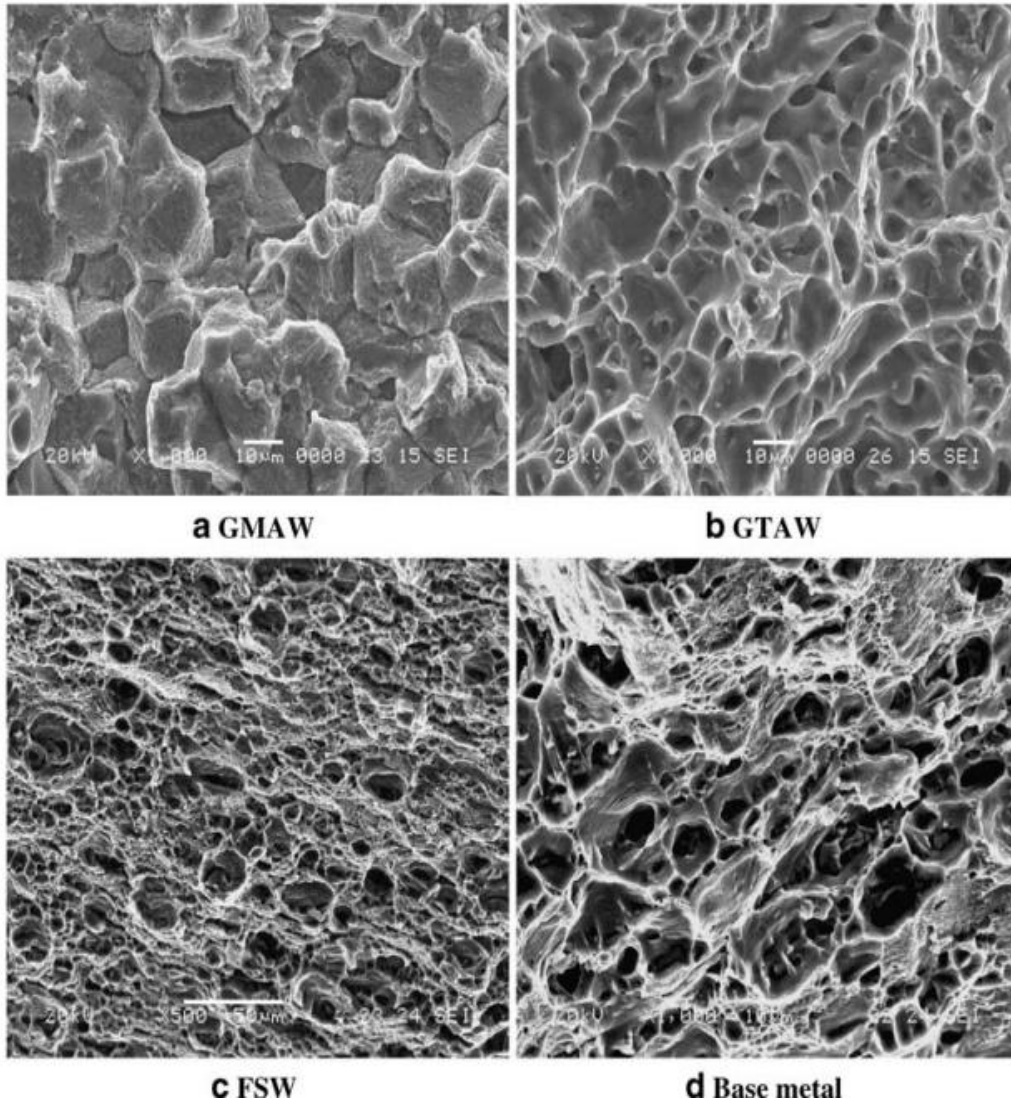
Şekil 3.13. ER5356 ve ER4043 ile birleştirilen numunelerin çekme dayanımı (Che Lah ve Hussin, 2020)



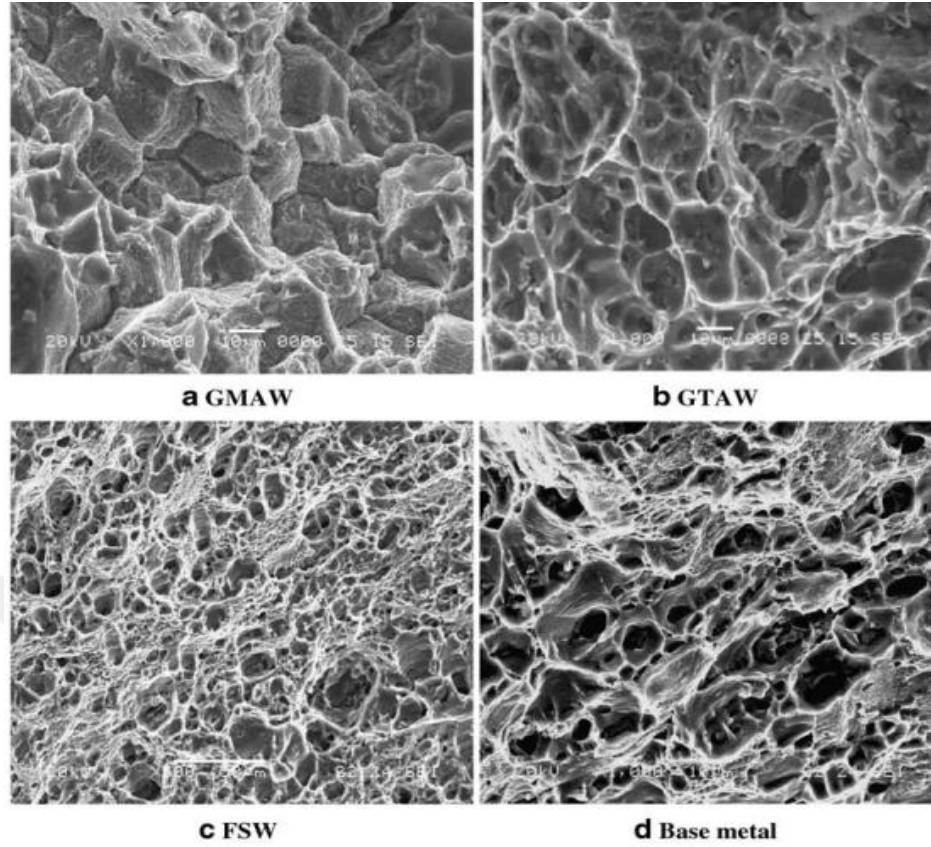
Şekil 3.14. ER4043 ve ER5356 ile birleştirilen Alüminyum alaşımlarının mikroyapı görüntüleri (Che Lah ve Hussin, 2020)

Lakshminarayanan ve diğ. (2009) AW 6061 alaşımlarının metal inert gaz (MIG), TIG ve sürtünme karıştırma (FSW) kaynak yöntemleri ile elde edilen birleştirmelerin mekanik özellikleri incelemiştir. Kaynak metali mikroyapısında ince, eş eksenli tanelerin oluşumu ve homojen dağılmış, çok ince mukavemet artırıcı çökeltilerin varlığı tespit edilmiştir.

FSW ile elde edilen birleştirmenin TIG ve MIG birleştirmelerine göre daha yüksek çekme özelliklerine sahip olduğu ortaya konmuştur. Yapılan çalışmadaki standart ve çentikli çekme testi sonucunda oluşan kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri şekil 3.15 ve şekil 3.16’da görülmektedir. Kaynak yöntemine bağlı olarak gözenek boyutlarında belirgin bir fark bulunmaktadır. GMAW bağlantılarında iri taneli yapı ve çökelti oluşumu nedeniyle tane sınırlarında kırılmalar gözlenirken, GTAW bağlantılarında daha büyük, FSW bağlantılarında ise daha küçük gözenekler görülmüştür.

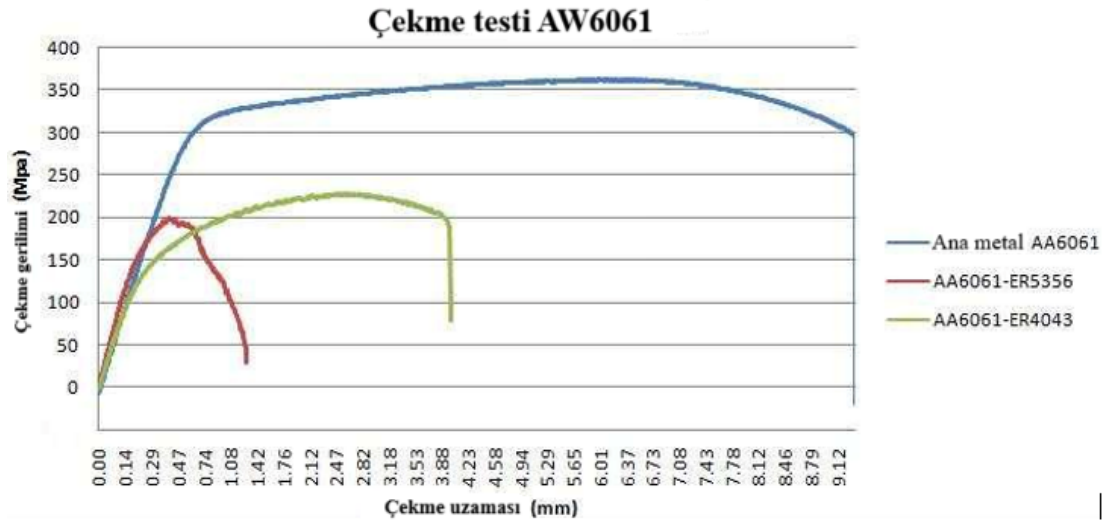


şekil 3.15. Numunelerin standart çekme testi sonrası kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri (Lakshminarayanan ve diğ., 2009)



Şekil 3.16. Numunelerin çentikli çekme testi sonrası kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri (Lakshminarayanan ve diğ., 2009)

Aziz ve arkadaşları, 6mm kalınlığındaki AW 6061-T6 alüminyum alaşımının birleştirmesinde farklı dolgu metallerinin (ER4043 ve ER5356) mekanik ve mikro yapı özelliklerine etkilerini görmek amacı ile araştırmalar yapmıştır. Çekme dayanımı ER4043 için 200 MPa ve ER5356 için 235 MPa elde edilmiştir. Akma dayanımı ise ER4043 için 180 MPa ve ER5356 için 190 MPa'dır. Gerilim gerinim eğrisine göre Eğriye göre, ana malzemenin sahip olduğu 9,12 mm'lik uzama ER 4043 için 3,88 mm'ye ve ER5356 için 1,2 mm'ye düşmüştür. Bu sonuçlar, kaynak işleminin mekanik özellikler üzerindeki ciddi etkisini göstermektedir. Ancak, dolgu metali açısından bakıldığında, ER4043, ER5356 ile karşılaştırıldığında daha iyi sünekliğe sahiptir. Sonuçlar, dolgu metali içindeki kimyasal bileşimin mekanik özellikleri belirlemede önemli bir rol oynadığı gösterilmiştir (Jalar ve diğ., 2011).

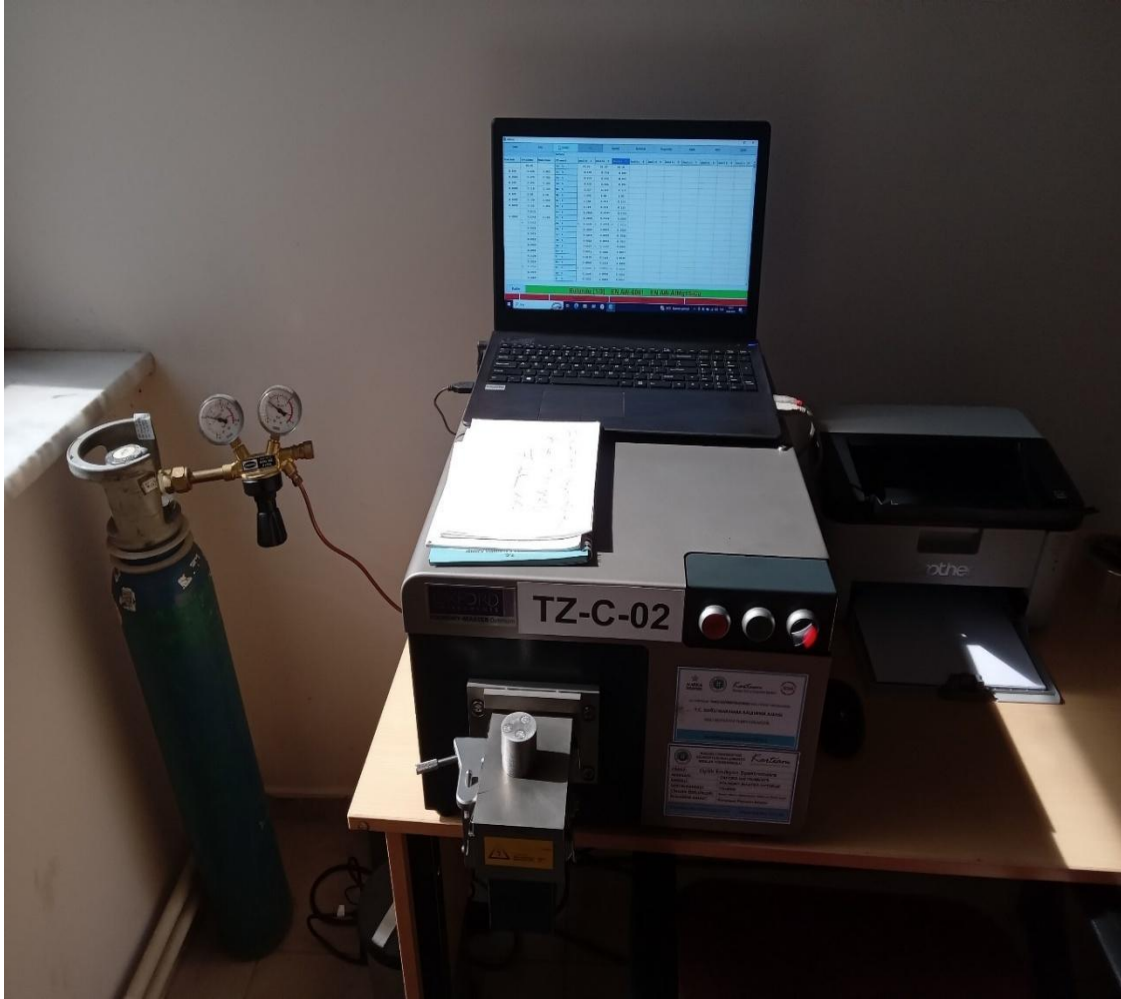


Şekil 3.17. ER4043 ve ER5356 ilave metalleri ile birleştirilen AW 6061 alaşımının gerilim gerinim grafiği (Jalar ve diğ., 2011)

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Ana Malzeme, İlave metaller ve Birleştirme İşlemi

AW 6061 alüminyum alaşımının birleştirilmesinde ER5356 ($AlMg_5Cr$) ve ER4190 ($AlSi_5$) ilave metalleri kullanılmıştır. Malzeme kalınlığı 1,3 mm'dir. Bu alaşım AW 6061'e eşdeğerdir, ancak daha yüksek Cu içeriği nedeniyle korozyon direnci biraz daha düşüktür. Kullanılan ana malzeme ve ilave metallerin kimyasal içerikleri ve mekanik özellikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Verilen kimyasal değerler Foundry Oxford optik emisyon spektrometre (Şekil 4.1) kullanılarak elde edilmiştir. Spektrometre alüminyum için demir dahil tüm elementlerin ölçümünü yapmaktadır. Yapılan ölçümler EN ISO 14284 standartına göre yapılmıştır.



Şekil 4.1. Optik emisyon spektrometre cihazı

Tablo 4.1. Ana malzeme ve ilave metallerin elementel içerikleri (% ağırlık), mekanik özellikleri

Element (% ağırlık)	AW 6061	ER 5356	ER4190
Al	96,95	95,77	95,11
Si	0,67	-	4,69
Cu	0,35	-	0,02
Mg	1	4,02	-
Cr	0,12	0,06	-
Mn	0,12	0,15	0,02
Fe	0,470	-	0,16
Akma Dayanımı (MPa)	279	120	124
Çekme Dayanımı (MPa)	338	270	186
% Uzama	14,6	28	8

Birleştirme işleminde Miller Syncrowave 350LX TIG kaynak makinası kullanılmıştır. Kaynak ve kök gazı olarak Ar kullanılmıştır. Kaynak esnasında gaz debisi 5 L/dak olarak kullanılırken, kök gazı işleminde bu değer 10 L/dak olarak kullanılmıştır. Kök gazı ile birleştirme işlemi, özel hazırlanmış bir fikstür üzerinde yapılmıştır (Şekil 4.1). Alternatif akım kullanılarak yapılan birleştirmede tungsten elektrod olarak 3.2*175 mm çapında WP (wolfram pure) ergimeyen elektrot seçilmiştir. Birleştirme işlemi esnasında kullanılan parametrelerin birbirine yakın olması nedeni ile ısı girdileri hemen hemen birbirine eşittir ve kullanılan parametre değerleri Tablo 4.2’de verilmiştir. 125*80*2 mm³ boyutundaki parçaların birleştirilmesi sonucu elde edilen bağlantıların görüntüleri Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Kök gazı kullanarak TIG kaynak yöntemi ile AW 6061 malzemenin birleştirme işlemi

Tablo 4.2. Birleştirme esnasında kullanılan kaynak parametreleri

Parametreler	ER 4190	ER5356
Akım (A)	70	70
Gerilim (V)	11,8	11,8
Kutuplama	Alternatif Akım	
Kaynak hızı (mm/s)	1,37	1,33
Isı girdisi (kJ/mm)	0,36	0,37



Şekil 4.3. Farklı ilave metaller ile birleştirilen AW6061 malzemeler

4.2. Makro ve Mikroyapı İncelemeleri

Farklı ilave metalleri ile birleştirilen AW 6061 malzemenin kaynak bölgesinin mikroyapı görüntülemeleri, hem Olympus optik mikroskop (Olympus BX41M-LED) hem de taramalı elektron mikroskobu (Jeol JSM – 6060 – IXRF) kullanılarak gerçekleştirilmiştir). Metalografik işlem sürecinde tüm yüzeyler sırasıyla 320, 600, 1000, 2500, 4000 mesh'lik SiC esaslı zımpara kağıtları kullanılarak zımparalanmış, nihai parlatma 3 ve 1 μm 'lik çuha ile elmas solüsyon kullanılarak yapılmıştır. Parlatılmış

konumdaki numune Modified Poulton's (30 ml HCl, 40 ml HNO₃, 2,5 ml HF, 12 g Cr₂O₃, 42,5ml H₂O) dağlayıcısı ile 3 saniye boyunca kimyasal olarak dağlanmıştır.

4.3. Mikrosertlik Testi

Mikrosertlik ölçümleri ISO 6507-1 standartına göre BMS Microbul 1000DN (şekil 4.4) Vickers sertlik ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Bu test öncesi test numuneleri sıcak bakalit ile kalıplanıp sonrasında metalografik olarak hazırlama işlemine tabi tutulmuştur. Sırası ile ana malzeme, ısı tesiri altındaki bölge ve kaynak metalinin sertlik özellikleri değerlendirilmiştir. Sertlik izleri arasında 0,5 mm mesafe bırakılmıştır. Test işlemi 200 gf yük uygulanmıştır.

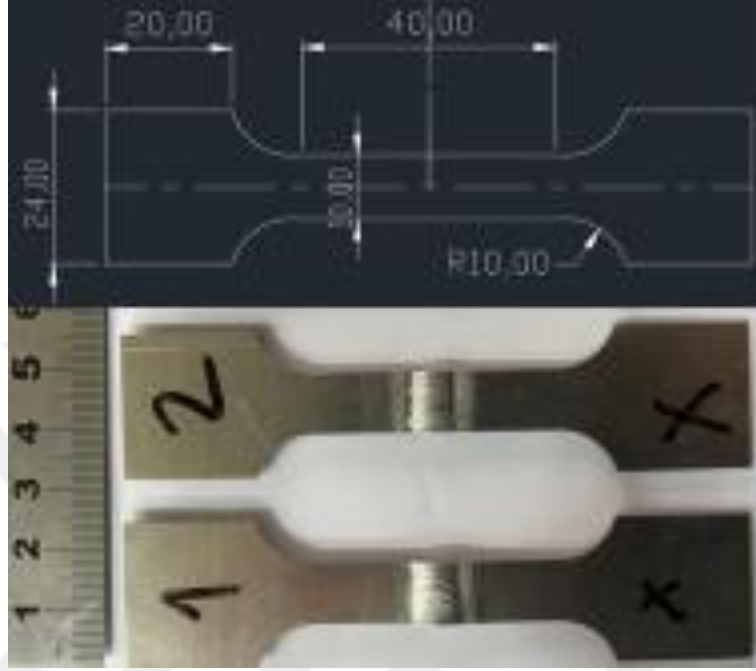


şekil 4.4. BMS Microbul 1000DN mikrosertlik test cihazı

4.4. Çekme Testi

Birleştirilmiş parçalara çekme testi TS EN ISO 6892-1 ve TS EN ISO 4136'ya göre her bir plaka için iki adet uygulanmıştır (TS EN ISO 4136; TS EN ISO 6892-1). Çekme testi numune ölçüleri ve hazırlanan numunelerin görüntüsü şekil 4.5'te gösterilmiştir. Çekme hızı 2 mm/dk olarak seçilmiştir. Çekme testi BESMAK BMT-600S model servo hidrolik çekme test cihazında gerçekleştirilmiştir (şekil 4.6). Çekme numuneleri hiçbir ısı etkisine

maruz kalmadan elektroerozyon cihazı kullanılarak hazırlanmıştır. İşleme sonrası kaynak kök ve kep fazlalıkları zımparalanmıştır.



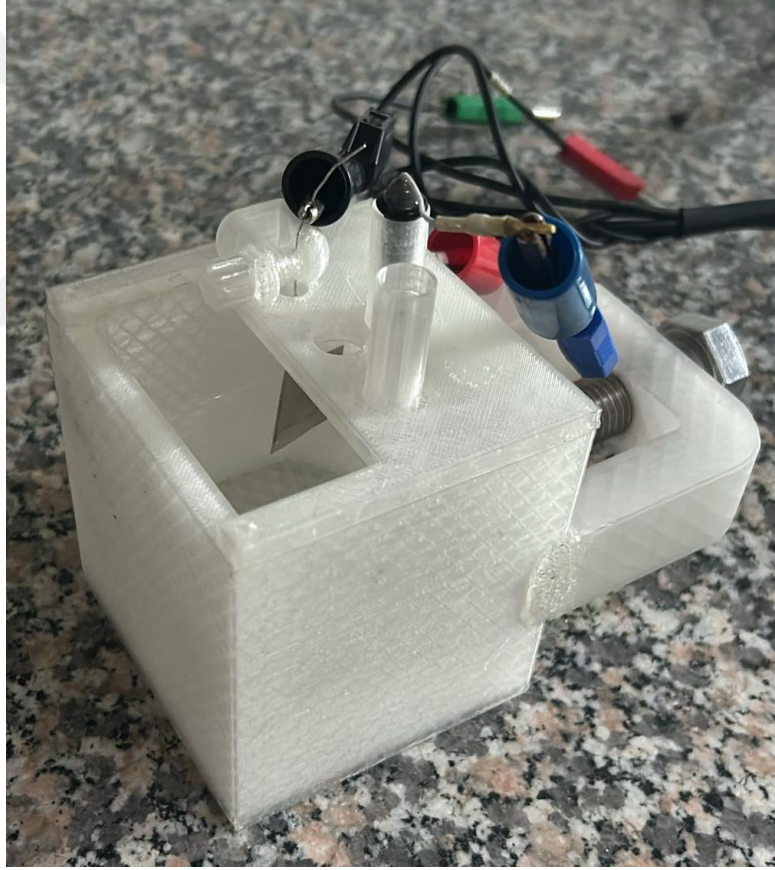
Şekil 4.5. Çekme testi numune ölçüleri



Şekil 4.6. BESMAK BMT-600S model servo hidrolik çekme test cihazı

4.5. Elektrokimyasal Korozyon Deneyi

Kaynak metalinde meydana gelen kimyasal kompozisyon değişiminin ve oluşabilecek ikincil fazların malzeme özelliklerinde etkilediği en kritik noktanın korozyon direnci olduğu görülmüştür. İlave metallerin mekanik özelliklerin korozyon özelliklerini değiştirmesi kaçınılmazdır. Bu nedenle yapılan mekanik testler ve mikroyapı incelemelerinin ardından, kaynak metalinin yeni kimyasal kompozisyonu ve ikincil fazların malzemenin korozyon özelliklerine etkisinin incelenmesi amacıyla potansiyodinamik polarizasyon ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi gibi testler Ivium marka, potansiyostat/galvanostat cihazı ile ölçülmüştür. Korozyon deney hücresi Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Korozyon deney hücresi

Deneylerde, oda sıcaklığında %3,5 NaCl çözeltisi kullanılmıştır. Deney düzeneği üç elektrotlu olup, karşıt elektrot olarak %99,95 saflıkta 20x20x1 mm boyutlarında platin levha tercih edilmiştir. Referans elektrot olarak ise Gümüş/Gümüş Klorür (Ag/AgCl) kullanılmıştır. Tüm korozyon testlerinden önce açık devre potansiyeli (ADP) analizi

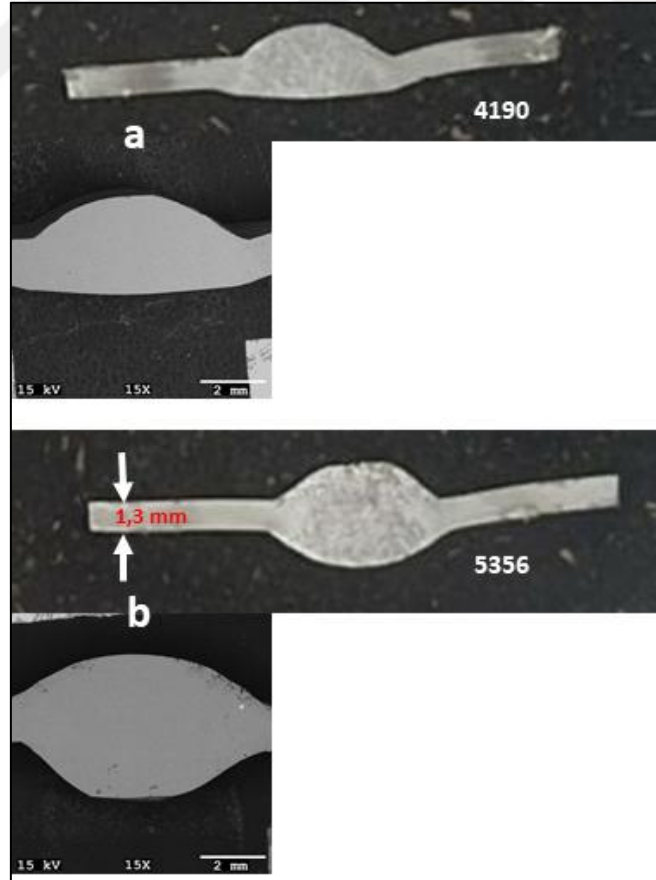
yapılmıştır; bu analiz, çalışma elektrodu ile referans elektrot arasındaki potansiyelin ölçülmesi için gerçekleştirilmiştir. Elde edilen potansiyel değeri, ‘korozyon potansiyeli’ olarak adlandırılmaktadır ve bu değer, korozyonun hangi potansiyel seviyesinde başlayacağını belirlemektedir. Ayrıca, malzemenin korozyona karşı duyarlılığını ölçmektedir. Potansiyodinamik polarizasyon testleri için tarama hızı 1 mV/s olarak belirlenmiş, tarama aralığı ise tüm numunelerde -250 mV ile 250 mV arasında tutulmuştur. Deneylerden önce, çalışma elektrodunun korozyon potansiyelinin tespit edilmesi amacıyla 900 saniyelik bir OCP analizi gerçekleştirilmiştir. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi testleri, başlangıç potansiyeli -0,5 V olacak şekilde, 10 mA akım aralığında ve 180 saniyelik bir OCP analizi ile uygulanmıştır.



5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Makroyapı

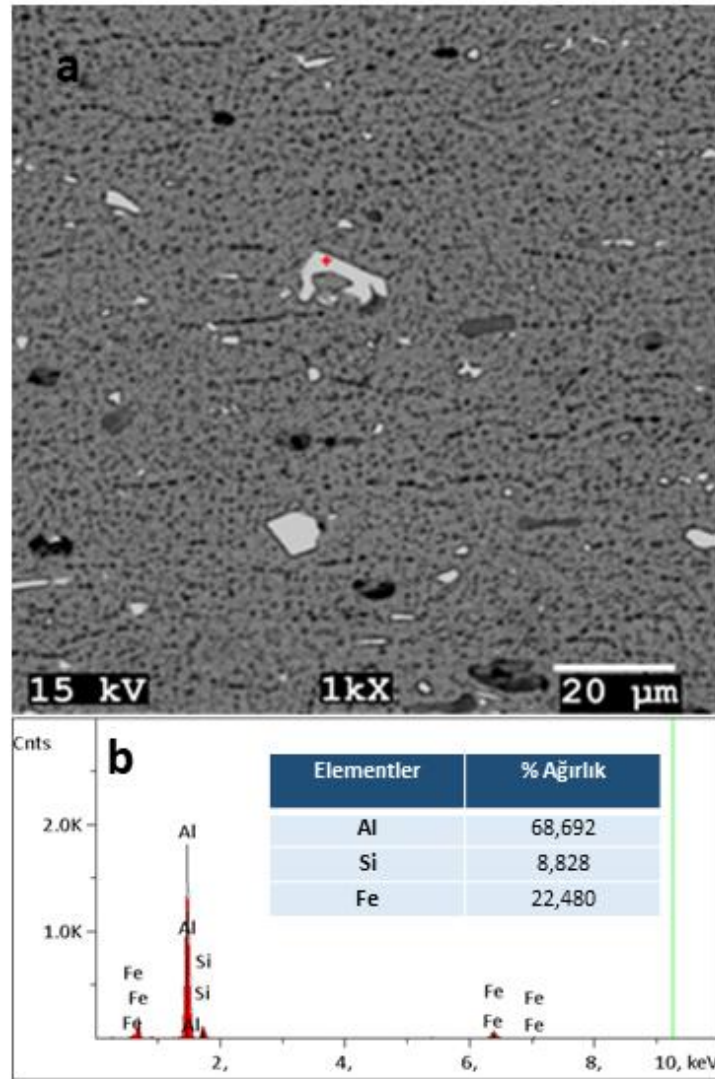
Düşük kalınlıktaki alüminyum alaşımları geleneksel olarak metal inert tungsten inert gaz (TIG) kaynak yöntemi ile alternatif akım kullanılarak birleştirilir. Alüminyum alaşımlarının yüzeyinde oluşan oksit tabakası iyi temizlenmediği zaman ergime güçlüğü ve kaynak metali içerisinde hacimsel hataların gelişmesine neden olabilir. Bu durum, ergime noksanlığı ve dolayısı ile birleştirme mukavemetinde düşüşe neden olmaktadır (Dewangan ve diğ., 2023). Çökelme sertleştirmesi ile mukavemeti artırılan AW 6061 alüminyum alaşımlarında ısı etkisi altındaki bölgede önemli bir mukavemet kaybı olabilir. Si elementi tek başına matris içinde mukavemeti ve sünekliği arttırırken, magnezyum ile birlikte çökelme sertleşmesi sağlar. Şekil 5.1’de elde edilen birleştirmelere ait makrograflar gösterilmiştir. Birleştirmelerin herhangi bir hacimsel kusur veya ergime noksanlığı meydana gelmemiştir.



Şekil 5.1. Kaynak metallerinin LM ve SEM makroyapısı a) ER 4190 b)ER 5356

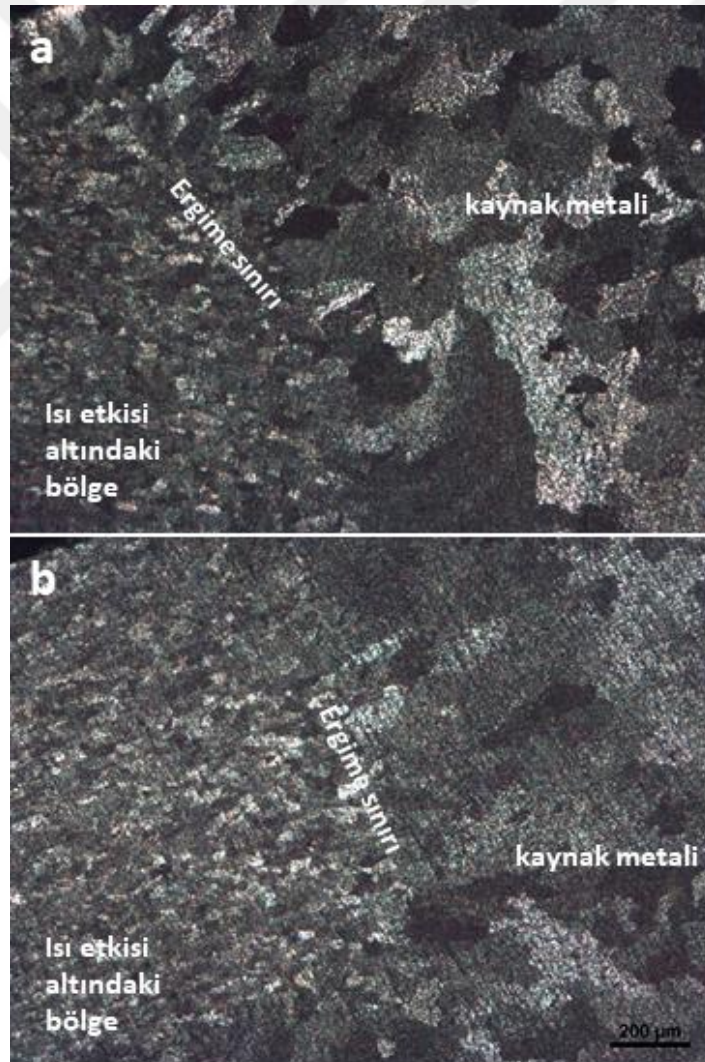
5.2. Mikroyapı

Havacılık malzemesi olarak kullanılan AW 6061 çökelme sertleşmeli alüminyum alaşımı bu çalışmanın ana malzemesidir. Şekil 5.2’de ana metalin optik ve taramalı elektro mikroskobu ile elde edilmiş mikroyapısını göstermektedir. $Mn_{12}Si_7Al_5$ veya $(Fe,Mn)_3SiAl_{12}$ ve Mg_2Si gibi ikinci faz parçacıkları alüminyum katı çözeltisinde bulunmaktadır(Naing ve Muangjunburee, 2022). SEM görüntüsünde görülen beyaz çubuk şeklindeki parçacıklar Şekil 5.2a ve 5.2b'deki EDS analizi ile metaller arası AlFeSi bileşiklerinin karmaşık formları olarak tanımlanabilir.



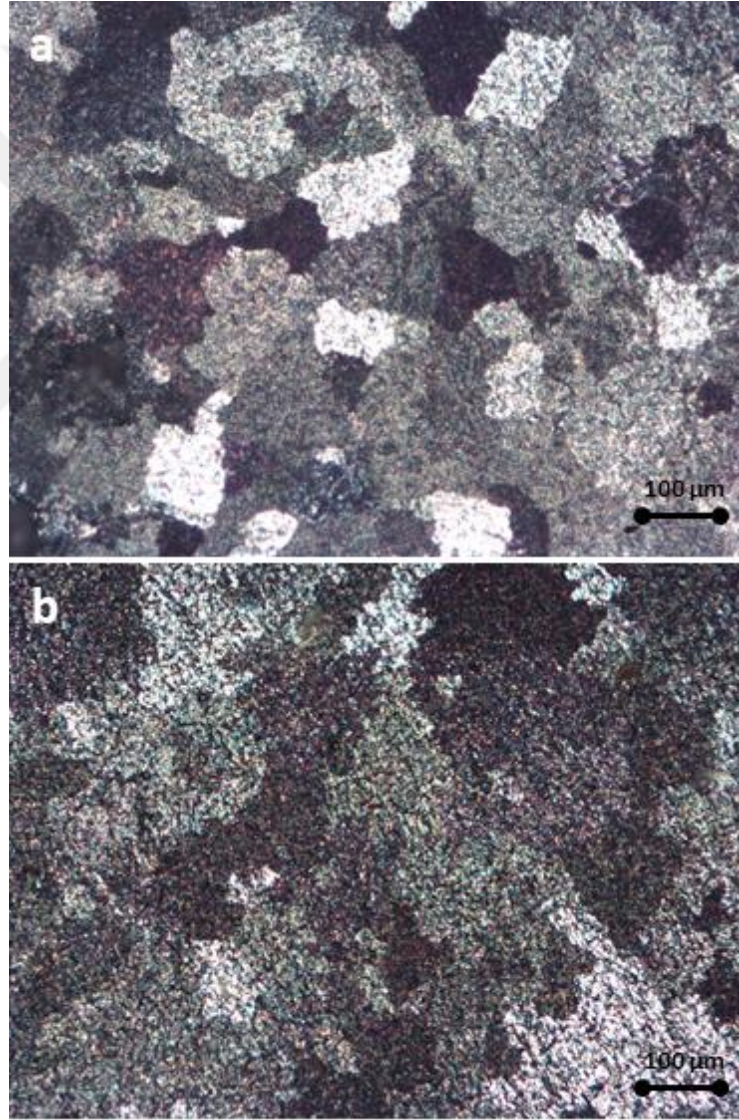
Şekil 5.2. Ana metalin mikroyapısı (a) SEM ve (b) EDS analizi

AW 6061 alaşının mukavemeti α fazında Mg_2Si çökeltilerinin oluşması sonucu oluşur. Bu çökeltiler kaynak sırasında ergime nedeniyle kaynak metalinde tamamen çözünür ve bu da birleştirme yerindeki kaynak metalinde yumuşama etkisine neden olur (Gündoğdu İş vd., 2023). ER 4190 ve ER 5356 numunelerinin kaynaklı bölge ve ısıdan etkilenen bölgeleri Şekil 5.3 ve 5.4’de incelenmiştir. Mikroyapı görüntüleri, kaynak metali ve kaynak metali/ısıdan etkilenmiş bölge arayüzünde belirgin bir katılaşma çatlağı olmadığını göstermektedir. Makroyapılarda belirgin bir gözenekliliğin olmadığı mikroyapılarla da desteklenmektedir. Silisyumun hidrojen emilimi magnezyum kadar az olmasa bile gözeneklilik oluşmamıştır. Burada TIG kaynak yönteminin sağladığı sakin ark oluşumunun etkisi vardır (Mathers, 2000).



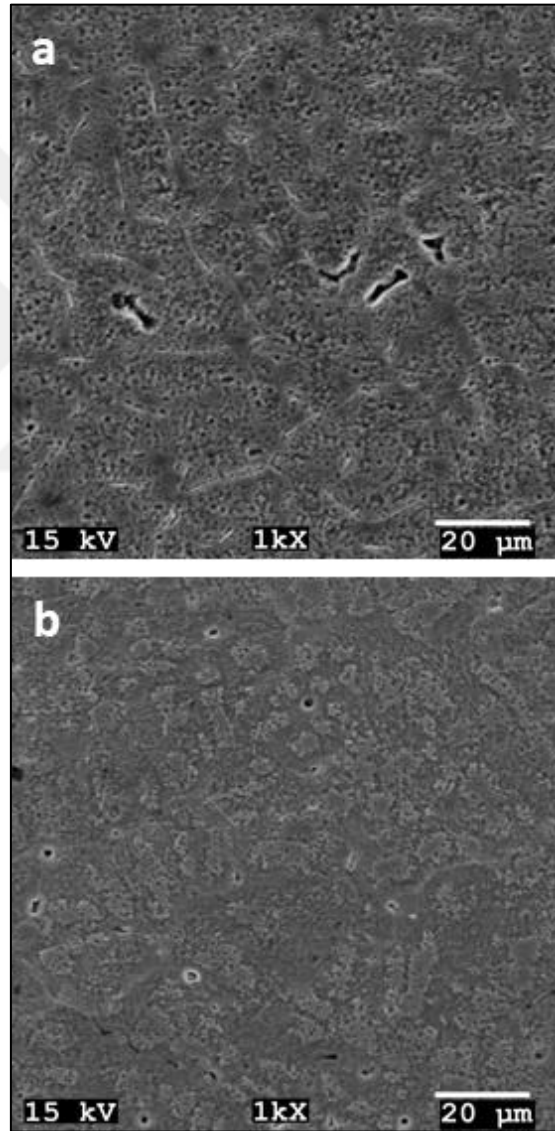
Şekil 5.3. Ergime sınırı bölgesi mikroyapısı a) ER 4190 b)ER 5356

Kaynak metalleri mikroyapıları karşılaştırıldığında (Şekil 5.4) daha ince tane boyutuna sahip olan ER 4190 numunesi mikroyapısı eş eksenli bir tane dizilimine sahiptir. Silisyumun sağladığı düşük ergime sıcaklığı hızlı katılaşmaya neden olur ve bu durum tanelerin büyümesinde en önemli engellerden biridir (Anderston ve American Welding Society. Product Development Committee, 2010). ER 5356 numunesindeki dar ve eş eksenli olmayan ER 4190'dan daha kaba tane yapısına sahip olması, katılaşma hızıyla ilişkilidir ve artan katılaşma süresi (Che Lah ve Hussin, 2020) tanelerin büyümesine neden olmuştur.



Şekil 5.4. Kaynak metali mikroyapısı a) ER 4190 b) ER 5356 (LOM)

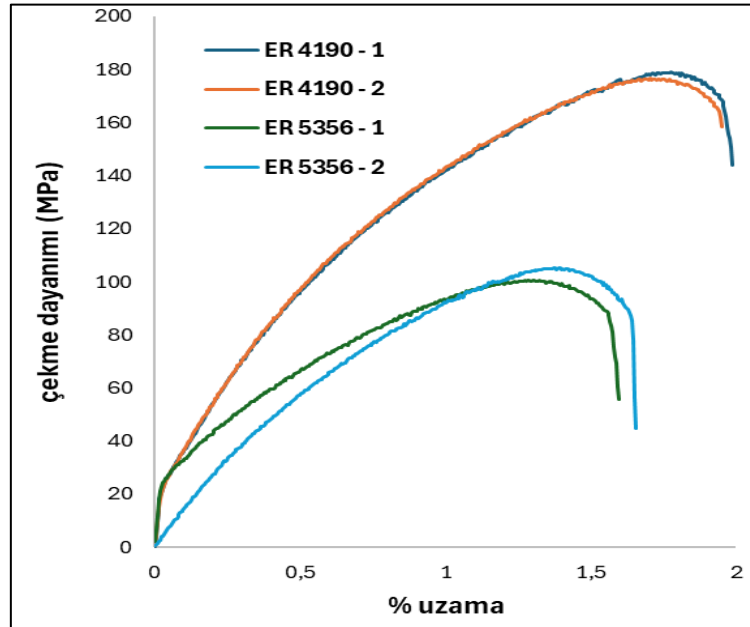
Katı çözeltili içerisinde dağılmış uzun beyaz parçacıklar, ER4190 ilave metali ile oluşturulan kaynak metalinin tane sınırları boyunca dağılmıştır (Şekil 5.5a). Katı çözeltili içerisinde dağılmış uzun beyaz parçacıklar, ER4190 ilave metali ile oluşturulan kaynak metalinin tane sınırları boyunca dağılmıştır. Genel olarak mikro yapı, α -Al, ötektik Si, Mg_2Si , α -Al(FeMn)Si ve β -AlFeSi intermetaliklerinden oluştuğu daha önceki çalışmalarda da ortaya konmuştur (Ahmed vd., 2024). Mg_3Al_2 intermetalik bileşikler, şekil 5.5b'de gösterildiği gibi, ER 5356 ilave metali ile oluşturulan kaynak metalinin katı çözeltilisinde uniform bir şekilde dağılım göstermektedir.



Şekil 5.5. Kaynak metali mikroyapısı a) ER 4190 b) ER 5356 (SEM)

5.3. Mekanik Özellikler

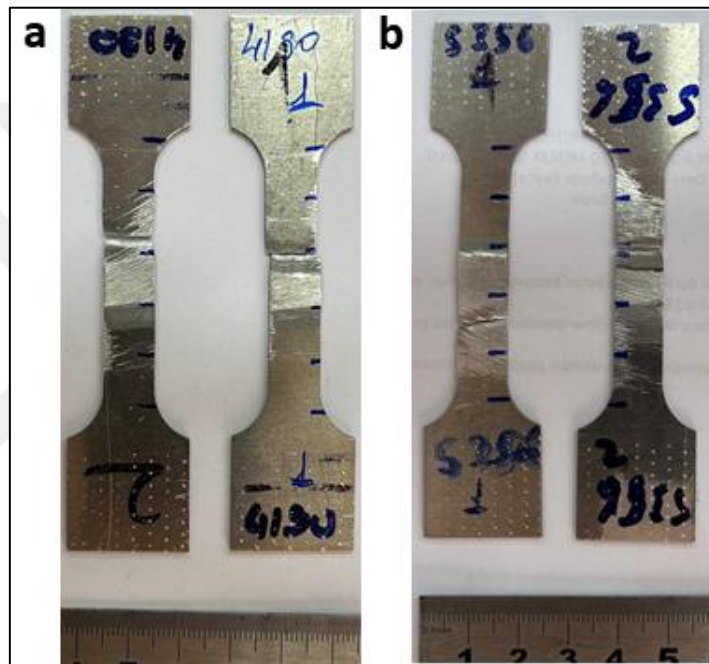
Her iki ilave metale ait çekme test sonuçları Şekil 5.6'da gösterilmiş ve tablo 5.1'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde ER 4190 ile elde edilen birleştirmenin mukavemetinin ER 5356'ya göre oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca ER 4190, ER 5356'ya kıyasla kısmen daha iyi süneklığe sahiptir. Bunda dolgu metalindeki kimyasal bileşim ve seyrelme etkisi ile meydana gelen kaynak metali kimyasal kompozisyonu ve çökelen intermetalik bileşiklerin mekanik özelliklere etkisi yadsınamaz. Yelamasetti ve arkadaşlarının yaptığı iki çalışmada (Venkat Ramana ve diğ., 2021; Yelamasetti ve diğ., 2021) aynı ilave metaller ile yaptıkları çalışmada TIG ve MIG yöntemlerinin birleştirme üzerindeki etkisini araştırmışlardır. MIG yönteminde, ER4043 dolgu metali ile elde edilen birleştirmeler ER 5356 dolgu metali ile meydana getirilenden daha yüksek çekme mukavemeti sunarken bu durumun TIG birleştirme yönteminde tam tersi olduğunu rapor etmiştir. Çekme testi sonucunda kırılmaların hepsi ana malzemede meydana gelmiştir. Fakat düşük et kalınlığı ile ısı girdisinin geniş bir bölgede maruz bıraktığı etki Mg_2Si intermetaliklerinin çözünmesine ve ana malzeme ve kaynak metali arasında düşük mukavemete sahip bir alanın oluşmasına neden olmuştur. Bu durum ana malzemeden daha düşük mukavemet değerlerinin elde edilmesi ile sonuçlanmıştır.



Şekil 5.6. ER 4190 ve ER5356 dolgu metalleri kullanılarak elde edilen birleştirmenin gerilim-gerinim eğrisi

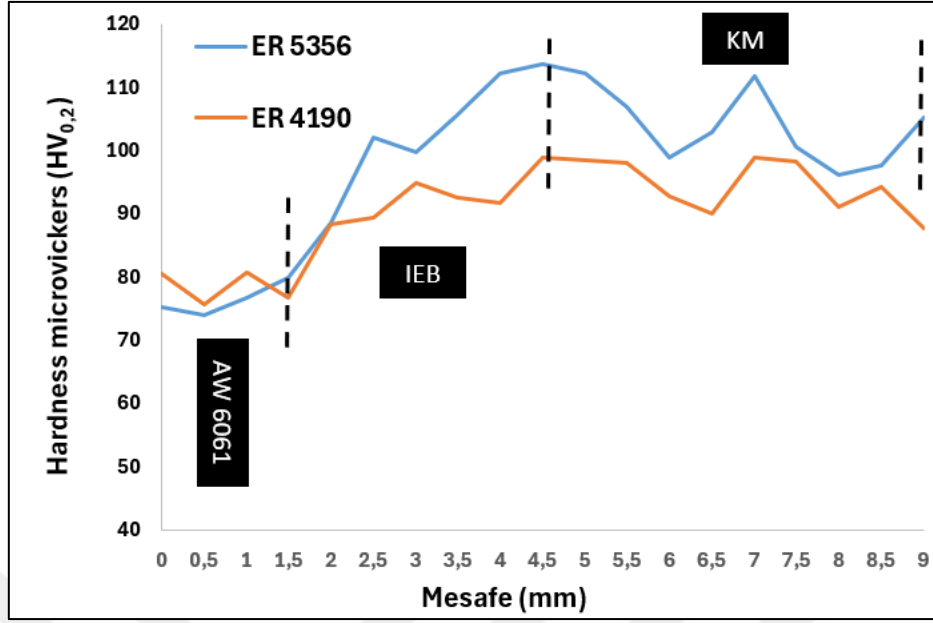
Tablo 5.1. ER 4190 ve ER 5356 dolgu metalleri ile birleştirilmiş AW 6061 alaşımının çekme testi sonuçları

	ER 4190	ER5356
Çekme dayanımı Rm (MPa)	177,9 ± 0,14	102,95 ± 3,46
Akma dayanımı R0,2 (MPa)	141,5 ± 1,69	92,2 ± 4,94
Uzama %	1,97 ± 0,03	1,63 ± 0,03



Şekil 5.7. Çekme testi sonrası numunelerin son hali a) ER 4190, b) ER 5356

Kaynak bölgelerinin sertlik grafiği (Şekil 5.8) kaynak metalinin dolgu metalinden element ilavesinin varlığına bağlı olarak en yüksek sertlik değerlerinin kaynak metali (KM) ve ısı etkisi altındaki bölgede (IEB) yer aldığını ortaya koymaktadır. Dolgu metaline alaşım elementlerinin eklenmesinin performansını arttırdığını göstermektedir. Sertlik profilleri incelendiğinde, ER 5356, ER4043 kullanılan birleştirmeye kıyasla daha yüksek bir değer göstermiştir. Muhtemelen sertlikteki artış, yüksek sıcaklıklarda ergime işlemi sırasında intermetalik faz oluşumunu teşvik eden dolgu metalindeki (%4,02) Mg elementlerinin miktarı ile ilişkilidir. Metaller arası fazlar iyi bir sertliğe sahiptir ancak bu fazlar metalin sünekliğine ve mukavemetine zarar vermiştir.



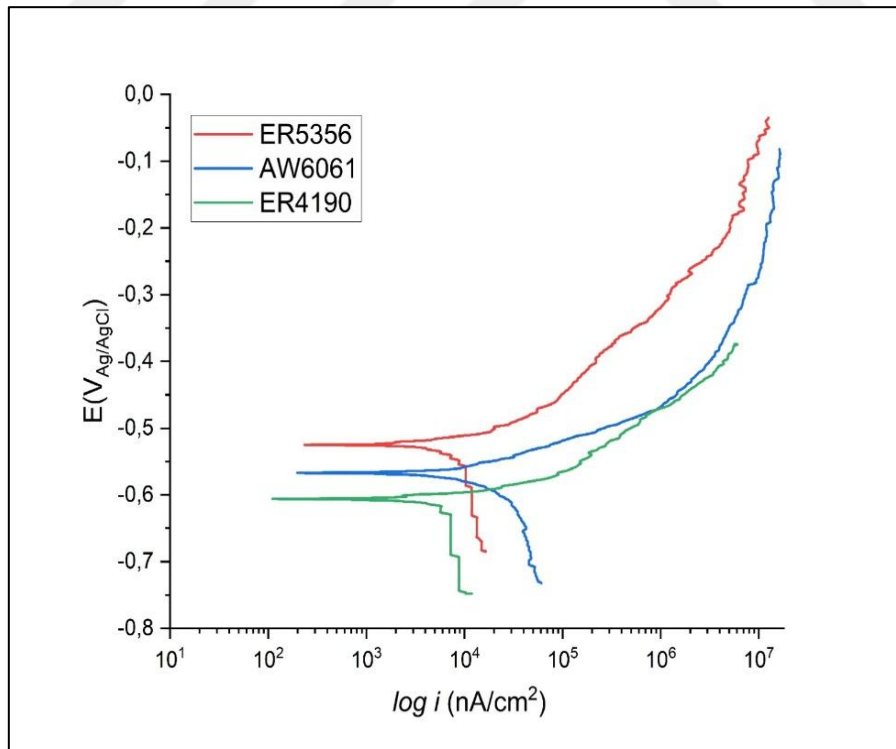
Şekil 5.8. Mikrosertlik sonuçları

5.4. Elektrokimyasal Korozyon

% 3,5 NaCl çözeltisinde oda sıcaklığında yapılan potansiyodinamik polarizasyon testleri, farklı ilave metaller ile birleştirilen AW 6061 malzemenin korozyon direnci üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Tipik polarizasyon eğrileri Şekil 5.9'da gösterilmiştir. Korozyon parametrelerinin ortalama değerleri Tablo 5.2'de listelenmiştir. Korozyon direnci için dikkate alınan ana parametreler korozyon potansiyeli (E_{corr}), korozyon akım yoğunluğu (I_{corr}) ve korozyon hızı (CR). Korozyon potansiyeli (E_{corr}), elektro-kimyasal korozyon direncinin statik bir göstergesidir ve malzemenin korozyon hassasiyetini ortaya koyar. Yüksek korozyon potansiyeli, daha iyi korozyon direnci için gereklidir. Genel olarak, yüksek korozyon potansiyeline sahip malzemeler, daha yüksek korozyon direnci sunar. Bu, malzemenin elektrokimyasal tepkimelere karşı daha az duyarlı olduğu anlamına gelir, bu da uzun ömür ve dayanıklılık sağlar. Korozyon akım yoğunluğu (I_{corr}), malzemenin yüzeyinde gerçekleşen elektro-kimyasal reaksiyonların hızını yansıtır; daha düşük değerler daha iyi korozyon direncini gösterir. Korozyon hızı, genellikle mm/yıl cinsinden ifade edilen, zaman içinde korozyon nedeniyle malzeme kaybını ifade eder. Bu üç parametre, farklı malzemelerin çeşitli ortamlardaki korozyon performansını değerlendirmek ve karşılaştırmak için birlikte

kullanılır (Evangeline ve Sathiya.,2019; Mortezaie ve Shamanian, 2014; Wang ve diğ., 2011).

Alüminyum alaşımlarındaki korozyon potansiyelleri esas olarak alüminyum alaşımlarının üretimi ve işlenmesi sırasında oluşan intermetalik türlerine bağlıdır. Alüminyum alaşımlarının elektrokimyasal davranışı alaşım elementlerinden etkilenir. Bu nedenle, her Al alaşımının kimyasal bileşimine bağlı olarak kendi elektrokimyasal potansiyeli vardır. Aşırı silisyum bulunduğunda, tane sınırlarında Mg_2Si 'nin çökmesi, silisyum açısından yoksul bir komşu aktif bölge oluşturur. Eğer çökeltiler birbiriyle bağlantılıysa, tanelerarası korozyon riski ortaya çıkabilir (Gadallah ve diğ., 2023). ER 4190 ile elde edilen kaynak metalinin silisyum içeriğinin fazla olması nedeni ile korozyon potansiyeli ana malzeme ve ER 5356 ile elde edilen kaynak metaline göre yüksek çıkmıştır. AW 6061 malzemenin korozyon akım yoğunluğu, korozyon hızı ile değerlendirildiğinde elektrokimyasal korozyon hızının kaynak metallerine göre daha yüksek olduğunu söylenebilir. Korozyon potansiyeli düşük olsa bile herhangi bir korozyon başlangıcında ilerleme kaynak metallerine göre daha hızlı olacaktır.



Şekil 5.9. %3,5 NaCl çözeltisinde oda sıcaklığında ana malzeme ve kaynak metallerinin polarizasyon eğrileri

Tablo 5.2. Potansiyodinamik polarizasyon testlerinin sonuçları

	AW 6061	ER 41490	ER 5356
Yüzel alanı (mm²)	0,5	0,5	0,5
Korozyon potansiyeli E_{corr} (V)	-0.5670	-0.6089	-0.5276
Korozyon akımı I_{corr} (A)	22.28×10 ⁻⁶	4.8×10 ⁻⁶	7.798×10 ⁻⁶
I_{corr} (A/cm²)	44.56×10 ⁻⁶	9,6×10 ⁻⁶	1.56×10 ⁻⁶
R_p (ohm)	1000	2228	2955
Korozyon hızı (mm/yıl)	0,4843	0.1044	0.1695

6. SONUÇLAR

Aluminyum alaşımlarının birleştirilmesinde ilave metal seçimi istenilen mukavemet değerlerinin elde edilmesi açısından önemlidir (Verma ve diğ., 2015). Bu çalışmada uçağın kanat kaplamalarında, gövde panellerinde ve motorun fan cowl ve thrust reverser bölgelerinde kullanılan AW 6061 aluminyum alaşımı malzeme TIG kaynak yöntemi ile ER 4190 ve ER 5356 ilave metalleri kullanarak birleştirilmiştir. Bu sayede farklı kimyasal kompozisyona sahip ilave metallerin sunduğu mikroyapısal farklılıklar incelenmiş, mikroyapıya bağlı olarak mekanik özelliklerde meydana gelen farklılıklar değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre;

- Mikroyapı analizi, ER 4190 teliyle elde edilen kaynak metalinin daha ince bir tane boyutuna ve eş eksenli bir tane oluşumuna sahip olduğunu göstermektedir. İlave metalin silisyum içeriği, kaynak havuzunun akışkanlığını artırarak katılaşma sıcaklığının düşmesine neden olmuştur ki bu durum tanelerin aşırı büyümesini engellemiştir. Buna karşın, ER 5356 numunesinin daha kaba tane yapısı, katılaşma süresinin uzamasına bağlı olarak gelişmiştir.
- ER 4190 ve ER5356 ile elde edilen birleştirmelere uygulanan enine çekme testleri sonucunda, ER 4190 birleştirmesinin ER 5356'ya göre belirgin şekilde daha yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, ER 4190'ın daha iyi süneklik özellikleri sergilediği gözlemlenmiştir. Dolgu metalinin kimyasal bileşimi ve kaynak işlemi sırasında meydana gelen çökelen intermetalik bileşiklerin mekanik özellikler üzerindeki etkisi bu sonuçlar ile desteklenmektedir. Fakat süneklik her iki birleştirmede ciddi oranda düşmüştür. ER 5356 ilave metalinin sağlandığı daha yüksek sertlik, kaynak bölgesinin daha geniş bir bölgede gerçekleşen ergitme sonucu meydana gelen dönüşümler nedeni ile çekme test sonuçlarına yansımamıştır. Çekme testi numunelerinin hepsi, çözünen çökeltilerin etkisi ile ana malzemeden kopmuştur.
- Alüminyum alaşımlarındaki korozyon potansiyelinin, ilave metalin kimyasal içeriği ile önemli ölçüde ilgilidir. Özellikle ER 4190 kaynak metalinin yüksek silisyum içeriği, korozyon potansiyelini ana malzemenin değerlerine yaklaştırırken, AW 6061'in korozyon akım yoğunluğu ve oranının daha yüksek çıkması, malzemenin elektrokimyasal korozyon hızının kaynak metallerine göre daha fazla olduğunu göstermektedir. Korozyon direncinin, mukavemet özellikleri ile beraber artırılması için seçilen ilave metallerin

önemi ortaya çıkmaktadır. Hem korozyon hem de mekanik performansını iyileştirmek için bu sonuçlar gelecekteki çalışmalara yardımcı olabilir.



KAYNAKLAR

- Abd El-Hameed, A. M., Abdel-Aziz, Y. A. (2021). Aluminium Alloys in Space Applications: A Short Report. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 22(1), 1–7.
- Evangelina, A., Sathya, P. (2019). Cold Metal Arc Transfer (CMT) Metal Deposition of Inconel 625 Superalloy on 316L Austenitic Stainless Steel: Microstructural Evaluation, Corrosion and Wear Resistance Properties. *Materials Research Express*, 6(6), 1–2.
- Ahmed, M., Javidani, M., Maltais, A., Chen, X. G. (2024). Microstructure and Mechanical Properties of High-Strength AA6011 Aluminum Alloy Welding with Novel 4xxx Filler Metals. *Materials*, 17(2).
- Akkuş, M. (2010). Effect of Welding Parameters On The Hot Cracking Behavior Of 7039 Aluminum-Zinc Alloy. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 268252.
- Aktaşoğlu, C. (2023). *Alüminyum alaşımlarının elektron ışın kaynak kabiliyetlerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Karabük, 800561.
- ALCOA. (2012). *Understanding Extruded Aluminum Alloys*. Alcoa Engineered Products. http://www.astro.caltech.edu/sedm/_downloads/Extruded_Alloy_6061.pdf (Ziyaret tarihi: 10 Ocak 2025).
- Aluminum Alloy Selections and Applications. (1998). *Aluminum Alloy Selections and Applications*. The Aluminum Association, Inc.
- Anderston, T., American Welding Society. Product Development Committee. (2010). *Welding Aluminum: Questions And Answers*. A Practical Guide for Troubleshooting Aluminum Welding-Related Problems.
- Ardika, R. D., Triyono, T., Muhayat, N., Triyono. (2021). A Review Porosity in Aluminum Welding. *Procedia Structural Integrity*, 33(C), 171–180.
- Arıcı, R., Köksal, N.S., Ömeroğlu, E. (2015). AA6061 Alaşımının İki Farklı Dolgu Teli Kullanılarak TIG Kaynağında Özelliklerin İncelenmesi. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilim Dergisi*, 11(2).
- Aziz, A. A. A., Ibrahim, M. F. A., Jalar, A., Junaidi, S., Abdullah, S., Rashdi, N., Kornain, Z. (2011). Effects of Different Fillers on Microstructure and Tensile Properties of Welded AA6061-T6. *Key Engineering Materials*, 462–463, 1189–1193.
- Bhat, B. N., Pandey, A. B., Tamirisakandala, S., Nathal, M. V., Ellis, D. L., McGill, P. B., Zhu, D. (2018). *Aerospace materials characteristics* (No. M17-6171). American Institute of Aeronautics and Astronautics.

- Çam, G. (2020). *Kaynak Bilimi ve Teknolojisi* (1. Basım). İstanbul: Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık Tic. Ltd. Şti.
- Cassada, W.A., Liu, J., Staley, J.T. (2002). Aluminum Alloys for Aircraft Structures. *Advanced Materials & Processes*, 160, 27-29.
- Che Lah, N. A., Hussin, M. H. (2020). Influence of Alloying Element in Filler Metal on Mechanical Properties of A6061 Al Alloy Welded Joints. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 9(3), 661–666.
- Coniglio, N., Cross, C. E. (2009). Mechanisms for Solidification Crack Initiation and Growth in Aluminum Welding. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 40(11), 2718–2728.
- Coniglio, N., Cross, C. E. (2020). Effect of Weld Travel Speed on Solidification Cracking Behavior. Part 1: Weld Metal Characteristics. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107(11–12), 5011–5023.
- Deekhunthod, R. (2014). Weld Quality in Aluminium Alloys. Master Thesis, Uppsala Üniversitesi, Uppsala.
- Dewangan, S., Reddy, A. P., Sunder, S. S. S., Legutko, S., Burja, J., Kumar, U. (2024). Mechanical Property Analysis into the Welded Plates of Al-6061 Joined by TIG and FSW Techniques. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series D*, 105(3), 1703-1713.
- Dickerson, P. B. (2018). Welding of Aluminum Alloys. *Welding, Brazing, and Soldering*, 31, 722–739.
- DS. Heat Treatment of Aluminum – part I: Quenching Basics. <https://thermalprocessing.com/>; 2020 <https://thermalprocessing.com/heat-treatment-of-aluminum%e2%80%89-%e2%80%89part-i-quenching-basics/> (Ziyaret tarihi: 11 Ocak 2025).
- Dwivedi, P., Siddiquee, A. N., Maheshwari, S. (2021). Issues and Requirements for Aluminum Alloys Used in Aircraft Components: State of the Art. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 62(2), 212–225.
- Eryürek, B., Sevük, A., Odabaş, A. (2007). *Kaynak Teknolojisi*. Kocaeli: AS Kaynak.
- Gialanella, S., Malandrucolo, A. (2020a). *Aerospace Alloys*. In Topics in Mining, Metallurgy and Materials Engineering. http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-24440-8_2%0Ahttp://link.springer.com/10.1007/978-3-030-24440-8 (Ziyaret tarihi: 03 Ocak 2025).
- Gadallah, E. A., El Aal, M. I. A., Mohamed, A. Y., El-Fahhar, H. H. (2023). Effects of Filler on The Microstructure and Corrosion of Similar and Dissimilar Gas Inert Tungsten Arc welding aluminum alloys joints. *Scientific Reports*, 13(1), 1–18.

- Gialanella, S., Malandrucolo, A., Gialanella, S., Malandrucolo, A. (2020). Gas turbine aero-engines. *Aerospace Alloys*, 17-39.
- Graf, A. (2021). Aluminum Alloys for Lightweight Automotive Structures. In *Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles* (pp. 97-123). Woodhead Publishing.
- Gou, G., Zhang, M., Chen, H., Chen, J., Li, P., Yang, Y. P. (2015). Effect of humidity on porosity , microstructure , and fatigue strength of A7N01S-T5 Aluminum Alloy Welded Joints in High-Speed Trains. *Materials & Design*, 85, 309–317
- Gündoğdu İş, E., Atapek, Ş. H., Yılmaz, M. (2023). Effect of Welding Speed and Shielding Gas Composition on The Properties of Laser Welded EN AW 6061-T6 al Alloy using 5356 Filler Metal. *Journal of Laser Applications*, 35(3).
- Hamzaoglu, B. M. (2023). Havacılık Alanında Kullanılan Kritik Parçalara Uygun Alüminyum Malzeme Seçimi için Örnek Bir Çalışma. Yüksek Lisans Tezi, Başkent Üniversitesi, Ankara, 799546.
- Ijes, T., Ijes, T. (2015). The Parameters and Equipments Used in TIG Welding : A Review. *The International Journal Of Engineering And Science (IJES)*, 4(2), 11–20.
- Innocenti, F. D., Razza, F., Fieschi, M., Bastiol, C. (2009). LCA of Biopolymers and Biocomposites. In *Environmentally Degradable Materials based on Multicomponent Polymeric Systems* (pp. 627–643). CRC Press.
- Janunkar, R. G., Allurkar, S., Mahesh, P. (2017). An Influence on Effect of Welding Speed on Strength of Welded Joint Using Tig Welding Process. *World Journal of Technology, Engineering and Research*, 2(3), 337–342.
- Keyence. (2019). *Automated Welding Basics*. <https://www.keyence.com/ss/products/measure/welding/about/grouping.jsp> (Ziyaret tarihi: 03 Aralık 2024).
- Khoshnaw, F., Krivtsun, I., Korzhyk, V. (2023). Arc welding methods. In Khoshnaw F. (Ed.). *Welding of Metallic Materials: Methods, Metallurgy, and Performance*. Elsevier.
- Koçdağ, N. (2019). 6013 Alüminyum Alaşımının Özelliklerine Isıl İşlem ve Deformasyon Parametrelerinin Etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, 614981.
- Kou, S. (2003). *Welding Metallurgy*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Kou, S. (2015). A Simple Index for Predicting The Susceptibility to Solidification Cracking. *Welding Journal*, 94(12), 374-388.
- Kou, S. (2021). Predicting Susceptibility to Solidification Cracking and Liquation Cracking by Calphad. *Metals*, 11(9).

- Lakshminarayanan, A.K., Balasubramanian, V., Elangovan, K. (2009). Effect of Welding Processes on Tensile Properties of AA6061 Aluminium Alloy Joints. *Int Journal Adv Manuf Technology*, 40, 286–296.
- Li, S. S., Yue, X., Li, Q. Y., Peng, H. L., Dong, B. X., Liu, T. S., Yang, H. Y., Fan, J., Shu, S. L., Qiu, F., Jiang, Q. C. (2023). Development and Applications of Aluminum Alloys for Aerospace Industry. *Journal of Materials Research and Technology*, 27, 944–983.
- Liu, H., Hu, Y. (2021). Welding. *Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys*, 3, 39–65.
- Liu, J., Zeng, P., Wu, Y., Kou, S. (2020). Determination of Tensile Strain Causing Solidification Cracking in Welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, 25(5), 431–437.
- Lu, Z. J., Evans, W. J., Parker, J. D., Birley, S. (1996). Simulation of Microstructure and Liquation Cracking in 7017 Aluminium Alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 220(1–2), 1–7.
- Mathers, G. (2000). *Welding of Aluminum and its Alloys*. Woodhead Publishing Limited Amerika: CRC Press.
- Mattson, S. (2012). Welding of Aluminium. *Welding Processes Handbook*, 207–220.
- Mishra, R. S., Sidhar, H. (2017). Physical Metallurgy of 2XXX Aluminum Alloys. Friction Stir Welding of 2XXX Aluminum Alloys Including Al-Li Alloys, 15–36.
- Mortezaie, A., Shamanian, M. (2014). An Assessment of Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Resistance of Dissimilar Welds Between Inconel 718 and 310S Austenitic Stainless Steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 116(1), 37–46.
- Mukhopadhyay, P. (2012). Alloy Designation, Processing, and Use of AA6XXX Series Aluminium Alloys. *ISRN Metallurgy*, 2012(Table 1), 1–15.
- Naing, T. H., Muangjunburee, P. (2022). Metallurgical and Mechanical Characterization of MIG Welded Repair Joints for 6082-T6 Aluminum Alloy with ER 4043 and ER 5356. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 75(6), 1583–1593.
- Neuman, M., Alsaifi, F. (2017). *Natural Ageing: Process Parameters And Temperature Impact on Natural Ageing of Aluminium Profiles*. Master Thesis, KTH Kraliyet Araştırma Enstitüsü, Stockholm.
- NTTI. (2014). Tig Welding. *Nairobi Technical Training Institute*, August, 1–8.
- Olabode, M., Kah, P., Martikainen, J. (2013). Aluminium Alloys Welding Processes: Challenges, Joint Types and Process Selection. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 227(8), 1129–1137.

- Öz, A. Ö. (2020). 6061 - T6 Alüminyum Alaşımından Üretilmiş Gyrocopter Pervanelerinin Yorulma Davranışının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin, 654977.
- Polmear, I. J. (1997). Wrought aluminium alloys. In *Materials Forum* (Vol. 21).
- Prakash, J., Tewari, S. P., Srivastava, B. K. (2016). Shielding Gas for Welding of Aluminium Alloys by TIG / MIG Welding-A Review. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, 1(2), 690–699.
- Prabhakara, Rao G. (2023). *Heat Treatment of Aluminium Alloy -International Publication*. In Bala Theja M. USA: Book Sağa Publications.
- Praveen, P., Yarlagağda, P. K. D. V. (2005). Meeting Challenges in Welding of Aluminum Alloys Through Pulse Gas Metal Arc Welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 164–165, 1106–1112.
- Prasad Rao, K., Ramanaiah, N., Viswanathan, N. (2008). Partially Melted Zone Cracking in AA6061 Welds. *Materials and Design*, 29(1), 179–186.
- Rakhi, K., Kang, S., Shin, J. (2023). Hot-Cracking Mechanism of Laser Welding of Aluminum Alloy 6061 in Lap Joint Configuration. *Materials*, 16(19), 1–15.
- Rams, J. (2021). Wrought Aluminum Alloys. *Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys*, 1, 132–140.
- Sankaran, K. K., Mishra, R. S. (2017). Aluminum Alloys. In *Metallurgy and Design of Alloys with Hierarchical Microstructures*, 31, (February, pp. 57–176). Elsevier.
- Singh, R. (2020). Weld defects and inspection. *Applied Welding Engineering*, 285–301.
- Sjölander, E., Seifeddine, S. (2010). The Heat Treatment of Al-Si-Cu-Mg Casting Alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(10), 1249–1259.
- Smith, R., Mobley, R. K. (2003). Maintenance Welding. In *Industrial Machinery Repair* (pp. 460–538). Elsevier.
- Starke, E. A. (2005). Alloys: Aluminum. In *Encyclopedia of Condensed Matter Physics* (Issue August 2022, pp. 18–24). Elsevier.
- Starke, J.R, E. A. (1989). Heat-Treatable Aluminum Alloys. In *Treatise on Materials Science & Technology* (Vol. 31, pp. 35-63). Elsevier.
- Sun, Y. (2023). The Use of Aluminum Alloys in Structures: Review and Outlook. *Structures*, 57(September), 105290.
- Thyssenkrupp Materials Services GmbH. (2018). *Material Data Sheet EN AW-6061*.

- Türk Standartları Enstitüsü. (2008). Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları - Biçimlendirilebilen Mamullerin Kimyasal Bileşim ve Şekli - Bölüm 5: Biçimlendirilmiş Mamullerin Kodlanması (TS 573-5). Ankara.
- Türk Standartları Enstitüsü. (2024). Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları - Kimyasal Bileşim ve Biçimlendirilebilir Ürünlerin Şekli - Bölüm 3: Kimyasal Bileşim (TS 573-3+A2). Ankara.
- Türk Standartları Enstitüsü. (2012). Metalik Malzemelerin Kaynakları Üzerinde Tahribatlı Deneyler-Enine Çekme Deneyi (ISO 4136:2012). Ankara.
- Türk Standartları Enstitüsü. (2020). Metalik Malzemeler - Çekme Deneyi - Bölüm 1: Ortam Sıcaklığında Deney Yöntemi (ISO 6892-1:2019). Ankara.
- Teja R. (2024). What is tig welding? how tig welding works. Electronicshub; 2024 electronicshub.org/tig-welding-process (Ziyaret tarihi: 28 Eylül 2024).
- URL-1: https://www.aubertduval.com/wp-media/uploads/sites/2/pdf/6061_GB.pdf, (Ziyaret tarihi: 10 Nisan 2024).
- URL-2: <https://www.upmet.com/sites/default/files/datasheets/6061.pdf/>, (Ziyaret tarihi: 10 Nisan 2024).
- Vargel, C. (2004a). Physical Properties of Aluminium. In *Corrosion of Aluminium* (pp. 19–20). Elsevier.
- Vargel, C. (2004b). The Metallurgy of Aluminium. In *Corrosion of Aluminium* (pp. 23–57). Elsevier.
- Vargel, C. (2020a). 1XXX Series. *Corrosion of Aluminium*, 447–451.
- Vargel, C. (2020b). 5XXX series alloys. *Corrosion of Aluminium*, 469–484.
- Vargel, C. (2020c). 6XXX series alloys. *Corrosion of Aluminium*, 485–495.
- Vargel, C. (2020d). 7XXX series with copper. *Corrosion of Aluminium*, 505–514.
- Vargel, C. (2020e). Cast aluminium alloys. In *Corrosion of Aluminium* (Vol. 3, pp. 21–23). Elsevier.
- Velling A. (2020). What is Heat Treatment? Methods & Benefits <https://fractory.com/heat-treatment-methods/> (Ziyaret tarihi: 03 Aralık 2024).
- Venkat Ramana, G., Yelamasetti, B., Vishnu Vardhan, T. (2021). Study on Weldability And Effect of Post Heat Treatment on Mechanical and Metallurgical Properties of Dissimilar AA 2025, AA 5083 and AA7075 GTAW Weld Joints. *Materials Today: Proceedings*, 46(2021), 878–882.

- Vertii, A. E. (2023). Methods and Technological Characteristics of Welding of Aluminum and Aluminum Alloy Machine Parts (Review). *Steel in Translation*, 53(3), 227–231.
- Wang, S., Ma, Q., Li, Y. (2011). Characterization of Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Resistance of Dissimilar Welded Joint Between 2205 duplex stainless steel and 16MnR. *Materials and Design*, 32, 831–837.
- Weber, M. (2014). *UNF Digital Commons The Effect of Surface Corrosion Damage on the Fatigue Life of Extruded Aluminum Alloy 6061-T6*.
- Weman, K. (2012). TIG welding. In *Welding Processes Handbook* (pp. 63–69). Elsevier.
- Yahaya, S. N. M., Azmi, I. I., Ng, C. H., Lai, C. F., Hashim, M. Y., Adam, A., Baehr, R., Grote, K. H. (2020). An Overview on Forming Process And Heat Treatments For Heat Treatable Aluminium Alloy. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 70(1), 112–124.
- Yelamasetti, B., Venkat Ramana, G., Vishnu Vardhan, T. (2021). Weldability and Mechanical Properties of AA5052 and AA7075 Dissimilar Joints Developed by GTAW Process. *Materials Today: Proceedings*, 47, 4162–4166.
- Yılmaz, E., Fındık, F. (2022). Effect of Shielding Gas on Microstructure and Mechanical Properties in AA6061-T6 alloy MIG welding. *Period Eng Nat Science*, 10, 268–277.
- Yoshida, H., Uchida, H. (1995). Heat Treatment of Aluminum Alloys. *Journal of Japan Institute of Light Metals*, 45(1), 41–55.
- Yusof, F., Jamaluddin, M. F. (2014). Welding Defects and Implications on Welded Assemblies. In *Comprehensive Materials Processing: Thirteen Volume Set* (Vol. 6). Elsevier.
- Zavadski, A. (2018). Advanced Welding Technologies Used in Aerospace Industry. Master Thesis, Saimaa University of Applied Sciences, Lappeenranta.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Bağlan, A., & Tümer, M. (2024). Farklı İlave Metallerin AW 6061 Kaynaklı Bağlantıların Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerine Etkisi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 39(4), 897-905.



ÖZGEÇMİŞ

Hüseyin Saim Ekim Okulu'nda ilköğretimini tamamladı. 2013-2017 yılları arasında Hasan Ferruh Anadolu Lisesi'nde lise öğrenimini geçirdi. 2017 yılında Kocaeli Üniversitesi, Uçak Elektrik ve Elektronik bölümü'ne girdi ve 2021 yılında mezun oldu. Mezun olduktan sonra Özel Yesevi Havacılık Lisesi'nde 7 ay Elektrik Öğretmenliği yaptıktan sonra 2022 Temmuz ayından beri Turkish Technic firmasında Uçak Bakım Teknisyeni olarak çalışmaktadır.

