

T.C.
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



KAYNAKLA BİRLEŞTİRİLMİŞ 6082 ALÜMİNYUM
LEVHALARIN YORULMA PERFORMANSLARININ
İNCELENMESİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK LİSANS TEZİ

TURGAY BAYSAL

TEZ DANIŞMANI
Prof. Dr. MURAT PAKDİL

BOLU, MART 2025

KABUL VE ONAY SAYFASI

TURGAY BAYSAL tarafından hazırlanan “**KAYNAKLA BİRLEŞTİRİLMİŞ 6082 ALÜMİNYUM LEVHALARIN YORULMA PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ**” adlı tez çalışması jürimiz tarafından Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Makine Mühendisliği Programında Yüksek Lisans Tezi olarak oy birliği kabul edilmiştir.
14/03/2025

Jüri Üyeleri

Danışman
Prof. Dr. Murat PAKDİL
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

Üye
Prof. Dr. Yahya ALTUNPAK
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

Üye
Doç. Dr. Ümit ERDEM
Kırıkkale Üniversitesi

İmza

.....

.....

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Onayı

Prof. Dr. İbrahim KÜRTÜL

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kılavuzu ve Şablonuna uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir
- aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Teze ilişkin Turnitin adlı programında enstitü müdürlüğünce belirlenen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan benzerlik raporuna göre, tezin benzerlik oranı %30'u geçmemektedir.

.....

TURGAY BAYSAL

ÖZET

**KAYNAKLA BİRLEŞTİRİLMİŞ 6082 ALÜMİNYUM LEVHALARIN
YORULMA PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
TURGAY BAYSAL
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. MURAT PAKDİL)**

**BOLU, MART 2025
X + 54 sayfa**

Bu çalışmada 2 farklı (ilave telli ve otojen) kaynak teknikleri kullanılarak haddelenmiş alüminyum alaşım ailesinden olan AA 6082 alüminyum alaşım malzemesinin temel mekanik performans özelliklerindeki değişimleri UTES servo-hidrolik yorulma test cihazı vasıtasıyla detaylı bir şekilde incelemektir. İki metal alaşım levhası birbirine haddeleme yönüne paralel olarak kaynatıldı. Yorulma testi sonucunda, numunelerin kırılmasına bağlı olarak elde edilen veriler doğrultusunda malzemelerin yorulma ömürleri Wöhler (S-N) diyagramı üzerinde, uygulanan test yükleri ile kırılma döngüsü sayısının grafiksel bir şekilde gösterilmesiyle analiz edilmiştir. Kaynaklama yöntemine bağlı değişen yorulma dayanımlarının hangi fiziksel, yüzeysel veya mekanik özelliklerden neden kaynaklandığı araştırılmıştır. Ayrıyeten, kullanılan birleştirme tekniklerinin AA 6082 haddelenmiş alüminyum alaşım malzemesinin performansı üzerindeki etkileri mikroyapısal analiz ve sertlik ölçüm testleri ile derinlemesine analiz edilmiştir. Tüm deneysel sonuçlar birlikte değerlendirilerek ilave telli ve otojen kaynaklama metoduyla üretilen alaşım parçaların performans farkları net bir şekilde ortaya konulmuştur. Araştırma, bu özel alaşımlar ve kaynak yöntemlerinin endüstriyel uygulamalarda daha verimli ve dayanıklı malzeme tasarımları için nasıl optimize edilebileceğine dair kapsamlı bir anlayış geliştirmeyi hedeflemektedir. Bu kapsamlı değerlendirme, malzeme mühendisliği ve imalat süreçlerinde yeni stratejiler geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

ANAHTAR KELİMELEER: 6082 alüminyum levha, Kaynakla Birleştirme, Yorulma dayanımı, Wöhler diyagramı

ABSTRACT

INVESTIGATION OF FATIGUE PERFORMANCE OF WELDED 6082 ALUMINUM SHEETS

MSC THESIS

TURGAY BAYSAL

BOLU ABANT IZZET BAYSAL UNIVERSITY

INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: PROF. DR. MURAT PAKDIL)

BOLU, MARCH 2025

X + 54 pages

In this study, the changes in the key mechanical performance properties of AA 6082 aluminum alloy material, being a rolled aluminum alloy parents, using 2 different (welding wire and autogenous) welding techniques are examined in detail by means of UTEST servo-hydraulic fatigue testing machine. Two metal alloy sheets are welded together parallel to the rolling direction. As a result of the fatigue test, the fatigue lives of the materials are graphically analyzed by displaying the applied test loads and the number of fracture cycles on the Wöhler (S-N) diagram according to the data obtained depending on the fracture of the samples. It is being investigated which physical, surface or mechanical properties cause the fatigue strength changes depending on the welding method. In addition, the effects of the welding techniques used on the performance of AA 6082 rolled aluminum alloy material are analyzed in depth by microstructural analysis and hardness measurement tests. All experimental results are evaluated together and the performance differences of the alloy parts produced by additional wire and autogenous welding methods are clearly revealed. The research aims to develop a comprehensive understanding of how these special alloys and welding methods can be optimized for more efficient and durable material designs in industrial applications. This comprehensive assessment will contribute to the development of new strategies in materials engineering and manufacturing processes.

KEYWORDS: 6082 aluminum sheet, Welding, Fatigue strength, Wöhler diagram

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY SAYFASI	ii
ETİK BEYAN.....	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
TABLO LİSTESİ	viii
KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ	ix
TEŞEKKÜR	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Alüminyum Metali.....	1
1.2 Alüminyum Üretimi.....	3
1.3 Alüminyum Metali ve Alaşımları	3
1.3.1 Alüminyum Alaşım Türleri	4
1.3.1 Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması	4
1.3.1 Dövme Alüminyum Alaşımları	5
1.3.1 Döküm Alüminyum Alaşımları	8
1.4 AA 6082 Alüminyum Alaşımları	11
1.5 TİG Kaynağı	13
1.5.1 Alüminyum Alaşımlarında Diğer Yaygın Kaynak Yöntemleri.....	14
1.6 Yorulma	15
2. MATERYAL VE YÖNTEM	21
2.1 Çalışmada Kullanılan Alüminyum Alaşım Malzemesi	22
2.2 Alüminyum Levhaların Kaynak İşlemi	23
3. BULGULAR	32
3.1 Taramalı Electron Mikroskobu Ölçüm Sonuçları.....	32
3.2 Yorulma Test Sonuçları	37
3.3 Sertlik Test Sonuçları	39
4. TARTIŞMA	41
4.1 SEM Görüntüleri	41
4.2 Yorulma Dayanımı	43
4.3 Sertlik Sonuçları	47
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	50
6. KAYNAKLAR.....	52

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Alüminyum alaşım levhaları birleştirmek için kullanılan kaynak teli	10
Şekil 2.1 AA 6082 alüminyum alaşım levhaları kaynaklamak için kullanılan cihaz	22
Şekil 2.2 a- Otojen ve b- Kaynak tel ile birleştirilmiş alüminyum alaşımların son görüntüsü	23
Şekil 2.3 Kaynaklı numunelerin şematik olarak kesim planı	24
Şekil 2.4 ISO 6892-1 VE ASTM E8 standartlarına göre hazırlanan yorulma test numunesi ölçüleri	24
Şekil 2.5 a- Telli kaynaklama yöntemi ile ve b- otojen kaynaklama yöntemi ile üretilen numuneler	25
Şekil 2.6 Numunelerin kaynak bölgeleri. (a) otojen kaynaklanan b) ilave kaynak telli)	26
Şekil 2.7 Kaynaklı parçaların çekme testi	27
Şekil 2.8 UTEST servo-hidrolik yorulma test cihazı	28
Şekil 2.9 Taramalı elektron mikroskobu görseli (JEOL JSM 5600)	29
Şekil 2.10 Galileo Durometria marka sertlik ölçüm cihazı	30
Şekil 3.1 a- İlave telli kaynaklama yöntemi ile üretilen ve b- Otojen kaynaklama yöntemi ile üretilen AA 6082 döme alaşımların 35, 200, 500 ve 1.000 kat büyütme SEM görüntüleri	36
Şekil 3.2 Mekanik testler sonunda kırılan numune görünüşleri	38
Şekil 3.3 İlave telli ve otojen AA 6082 kaynaklı malzemelere ait yorulma grafikleri	39

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1 Dövme alüminyum alaşımlarının AA'ya göre gösterimi (Zeytin vd., 2000; Doruk, 2015)	6
Tablo 1.2 Ticari AA 6082 alüminyum alaşımına ait kimyasal bileşim (Doruk, 2015)	11
Tablo 1.3 Ticari AA 6082 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi (Doruk, 2015)	12
Tablo 2.1 Ticari AA 6082 alüminyum alaşımının temel mekanik karakteristik özellikleri (Doruk, 2015).....	22
Tablo 3.1 Eklemeli ve eklemesiz kaynaklı üretilen AA 6082 malzemelerinin akma kuvveti ve çevrim sayıları	37
Tablo 3.2 Eklemeli ve eklemesiz kaynaklı AA 6082 malzemelerin sertlik ölçümleri (H _v).....	40

KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ

TIG	: Tungsten inert gaz kaynağı tekniği kaynak
MIG	: MIG (Metal İnert Gaz) kaynağı
Al	: Alüminyum
Cu	: Bakır
Zn	: Çinko
Mn	: Manganez
Si	: Silikon
Li	: Lityum
AA 6082	: 6xxx serisine ait dövme alaşımı
1xxx	: %99 dan fazla saf alüminyum içeren alaşım
2xxx	: Temel matrinde Cu içeren alaşım
3xxx	: Temel matrinde Al-Mn içeren alaşım
4xxx	: Temel matrinde Al-Si içeren alaşım
5xxx	: Temel matrinde Al-Mg içeren alaşım
6xxx	: Temel matrinde Al-Mg-Si içeren alaşım
7xxx	: Temel matrinde Al-Zn-Mg içeren alaşım
8xxx	: Temel matrinde Al-Li içeren alaşım
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskopu
%	: Yüzde
C	: Derece

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması sırasında öncelikli olarak, konun belirlenmesinden tezin sonuna kadar her türlü destek ve yardımlarını esirgemeyen değerli danışmanım Sayın Prof. Dr. Murat Pakdil'e şükranlarımı sunarım. Ayrıca, tez içeriğinde yer alan bilgilerin ve ekipmanların kullanılması sürecinde desteklerini esirgemeyen Prof. Dr. Gürcan YILDIRIM ve Doç. Dr. Ümit ERDEM'e teşekkürlerimi sunarım. Son olarak tüm bu süreçlerde desteklerini her zaman hissettiğim çok değerli eşim Hatice Efe Baysal'a ve en kıymetlim kızım" Hira Nil Baysal'a sonsuz teşekkürler ederim.



1. GİRİŞ

1.1 Alüminyum Metali

Alüminyumun günlük hayatta birçok uygulama alanında kullanılması, bu malzemenin hafifliği, dayanıklılığı, iyi elektrik ve ısı iletkenliği, kolay işlenebilirliği ve oksidasyona ve özellikle de korozyona karşı yüksek direnci nedeniyledir. Mat gümüş renginde bir metal olan alüminyum bu karakteristik rengi, havayla temas ettiğinde yüzeyinde oluşan ince oksit tabakasından alır ve doğada genellikle boksit cevheri formunda bulunur. Yüzeyindeki oksit tabakasının koruyucu bariyer vazifesi görmesi, alüminyumu üstün korozyon direncine sahip olmasına neden olur (Doruk, 2015).

Ayrıca döküm, dövme, haddeleme ve ekstrüzyon gibi yöntemlerle kolayca şekillendirilebilir ve geri dönüşüm sürecinde neredeyse hiç kalite kaybı olmaz. Zehirli olmaması, manyetik özelliği bulunmaması ve kıvılcım çıkarmaması özellikleriyle sanayi uygulama alanlarında çokça kullanılmasının önünü açar. 660.3°C gibi yüksek erime noktasına sahiptir. Yüksek termal iletkenlik (205 W/m.K) ve elektrik iletkenlik (37.7×10^6 S/m) sergiler. Yoğunluğu (2.7 g/cm³) çelik veya bakırın yaklaşık üçte biri kadar olması, dövme, işleme ve döküm gibi işlemlerle kolayca şekillendirilebilme özelliği sunar. Benzer olarak Yüksek ısı iletkenliğinin yanı sıra parlama ve alev almazlık özelliklerine de sahiptir. Alaşımları, saf alüminyuma çeşitli elementlerin eklenmesiyle elde edilir ve fiziksel, mekanik ve yüzeysel özellikleri artan yeni alaşımlar farklı sektörlerde daha spesifik ihtiyaçlara cevap verir. Örneğin, saf haldeyken çekme dayanımı yaklaşık 49 MPa iken, alaşımlandırılma durumunda 700 MPa'lık çekme dayanımı sunar. Ayrıyetten, alüminyumun 2 °C'de %64,94 üstün elektrik iletkenliğine sahip olması, onu uzay ve havacılık, inşaat, uçak, otomotiv, silah, ev eşyası ile ısıtma-soğutma gibi birçok sektörde tercih edilen bir malzeme haline getirmiştir (Soyano ve Matsumine, 2023; Fakıoğlu, 2012; Kıratlı vd., 2006; Vusa ve Budarapu, 2023; Sakin ve Er, 2010). Yine hafifliğin ön planda olduğu araçların (uçak, bisiklet, spot ışıklar, otomobil motorları, mutfak gereçleri, motosikletler vb.) yapımında kendine fazlaca yer bulmaktadır. Isıyı hızlı bir şekilde absorplayip kolay ve hızlı bir şekilde soğuyabilme özelliğiyle, malzeme özellikle soğutma endüstrisinde kendine geniş bir kullanım alanı bulur. Ayrıca, kolayca şekillendirilebilir olması yüzünden çeşitli

yöntemlerle yüzey işlemleri uygulamalarında kendine çokça yer bulur. Modern ekonomide kendine önemli bir yer bulan alüminyum, günümüzde imalat sektöründe, başta bakır ve alaşımları, kurşun, kalay ve çinko olmak koşulu ile diğer demir dışı metallerin toplamından daha fazla kullanılmaktadır (Er, 2006; Vikipedi, 2025). Bu yüzden, geniş kullanım alanları sayesinde milyonlarca farklı ürünün üretiminde tercih edilmektedir. Alüminyum, fiyat-performans açısından diğer metallerle üstün bir rekabet içindedir. Örneğin, bakırdan yaklaşık iki kat daha ucuz olması, doğada bol miktarda bulunması ve kolay işlenebilirliği sayesinde birçok sektörde tercih edilen bir malzemedir. Yumuşak yapısı sayesinde kolayca şekillendirilebilmesi de kullanımını daha cazip hale getirmektedir (Yılmaz, 2010). Tüm bu avantajlar dikkate alındığında, alüminyum endüstriyel uygulamalarda demir esaslı malzemelerle rekabet edebilir hale getirmiştir.

Ancak, alüminyumda her materyal gibi sıklıkla tekrarlayan gerilmelere maruz kalmaları nedeni ile yorulmaya bağlı deformasyonlar görülmektedir (Doruk ve Pakdil, 2016; Kumru, 2007; Güler, 2011). Daha detaylı olarak, bilindiği üzere tekrarlayan yüklere maruz kalan metalik malzemelerde, uygulanan yükler malzemenin akma dayanımının altında olsa bile, belirli bir tekrar sayısından sonra parça yüzeyinde çatlak oluşabilir. Yük altında çatlak kritik değeri geçince kristal yapı boyunca daha hızlı ilerler ve malzemede kopma/kırılma/yırtılma/parçalanma ile sonuçlanabilir. Bu olaya yorulma kırılması denir. Yorulma kırılması gevrek karakterli olması yüzünden yorulma kırılmasının nerede ve ne zaman gerçekleşeceğini tahmin etmek zordur. Ayrıyeten, düzensiz bir gerilme dağılımı durumunda malzemedeki gerilmelerin elastik sınırların altında kalmasına rağmen bu kırılmalar gerçekleşir. Bu olay, elastik sınırın altındaki gerilmelerde malzemenin ani ve uyarısız bir şekilde kırılmasından dolayı son derece tehlikelidir. Yorulma kırılmaları en sık dişli çarklar, miller ve bağlantı çubukları gibi hareketli parçalarda karşılaşılır. Bu yüzden, makinelerdeki kopma deformasyonlarının yaklaşık %80'inin yorulma kaynaklı olduğu tahmin edilir (Doruk, 2015; Pakdil vd., 2011). Özellikle, çelik köprülerde, kötü koşullarındaki araçlarda ve uçak kanatlarında bu tür gevrek kırılmalar sıklıkla rastlanmaktadır. Bu nedenle, yorulma kırılmalarına karşı ciddi önlemler alınması gerekmektedir. S–N diyagramları (Wöhler eğrileri) bir malzemenin yorulma özelliklerinin belirlenmesi amacıyla kullanılır (Fakıoğlu, 2012). Bu eğriler, malzemenin belirli bir gerilmede kaç yükleme döngüsüne kadar dayanabileceğini belirleyip analiz süreçlerinde ve kullanım alanları için tasarımda

kritik bir rol oynar. Alüminyum metalinin uygulanan yüke karşı mukavemetini arttırmak için kaynak yapılması gerekmektedir. Bir sonraki kısımda alüminyum alaşımları üzerine durulacaktır.

1.2 Alüminyum Üretimi

Doğada en yaygın bulunan alüminyum bileşikleri feldspatlar, mikalar ve killerdir. Alüminyumun üretiminde en önemli filiz ise alüminyumun boksitidir; bu metali çoğunluğu alüminyum oksit, gipsit, silis, demir oksit, böhmit ve diaspor gibi minerallerinden oluşur (Soyano ve Matsumine, 2023; Öz, 2007). Alüminyum üretiminin hammaddesi olan boksit, tüketim ve geri kazanım döngüsü boyunca kullanılabilir. Ayrıca, alüminyum hammaddesi boksit madenciliğinin %12'si yağmur ormanlarında yapılmakta olup, madencilik sonrası bu alanların %80'i doğal ormanlara (ekolojik dengenin korunmasına yardımcı) dönüştürülmektedir. Bunun yanı sıra, alüminyum metali, doğal yenilenebilir enerji kaynaklarıyla üretilebildiği gibi, geri dönüşüm yoluyla da tekrar kazanılır. Hammaddeden üretim için gereken enerjinin yalnızca %5'i kadar bir enerji ile yeniden ergitilebilir ve sıfırdan yeni üretilimi için kullanılabilir. Konstrüksiyon parçalarının %70'i ve işleme hurdalarının nereden ise %100'ü geri dönüştürülebilir.

1.3 Alüminyum Metali ve Alaşımları

Saf alüminyumun özellikle karakteristik mekanik özellikleri birçok mühendislik uygulaması için yetersizdir. Alaşımlama, bu özelliklerin geliştirilmesini sağlar. Yaygın olarak kullanılan alaşım elementleri arasında bakır, magnezyum, çinko, manganez, silikon ve lityum bulunur. Alüminyum matrisine bu metaller (farklı oranlarda) eklendiğinde yeni oluşan alaşımın yoğunluğu önemli ölçüde değişmez, ancak mekanik mukavemeti önemli ölçüde artar. Bu özellik alüminyumun en önemli avantajlarından biri olan çok yüksek bir mukavemet-ağırlık oranı sağlar (Demirtaş, 2009). Alüminyum alaşım matrisleri başta hafiflik ve yüksek mukavemetli malzemeler gerektiren havacılık ve uzay endüstrisinde kullanılır. Otomotiv ve ulaşım sektörlerinde şasi, karoser ve jant gibi mukavemeti yüksek

istenen bileşenlerde kullanılır. Elektronik alanında, yüksek elektrik ve termal iletkenlik avantajları ile iletkenler ve soğutucular gibi önemli parçaların üretiminde tercih edilir. İnşaat sektöründe cephe kaplamaları ve çerçeveler gibi hafif ve yüksek mukavemet gerektiren yapısal elemanlarda kullanılır. Günümüzde, paketleme sektöründe kutu ve folyo üretiminde de yaygın olarak kullanımı vardır. Ayrıca, denizcilik sektöründe 5xxx serisi alaşımlar (diğer bölümde detaylı olarak anlatılacaktır) gemi ve tekne yapımında kullanılır.

1.3.1 Alüminyum Alaşım Türleri

Alüminyum döküm alaşımları 3 temel gruba ayrılır. i- Döküm alaşımları: dökümle şekillendirme için uygun malzemeler olup, yüksek korozyon direncine sahiptir. Bu türde en önemli alaşım alüminyum ve silisyum arasında yapılan Al-Si alaşımlarıdır. ii- Kuvvetlendirilmiş alaşım türleri: bu grup materyallere ısıtılma işlemi uygulanması, alaşımların mekanik mukavemetleri artırılabilir. Bu ailede 2024 (Al-Cu) ve 7075 (Al-Zn) alaşımları buna örnektir. iii- Isıl işleme tabi tutulamayan alaşım türlerinde ise malzemelerin mukavemeti mekanik soğuk işlemlerle artırılır. 3003 (Al-Mn) ve 5052 (Al-Mg) alaşımları bu grupta yer alırlar.

1.3.1 Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Alüminyum alaşımları (magnezyum, silisyum, bakır, çinko, kurşun ve nikel en yaygın alaşım metalleridir), üretim yöntemlerine göre dövme ve döküm alüminyum alaşımları olarak iki ana kategoriye ayrılır. İlk grup (dövme) plastik deformasyon yöntemiyle şekillendirilir. Bu yüzden, döküm alaşımlarına kıyasla mikro yapısı (daha ince taneli) ve kimyasal içeriği (homojen dağılımı ile) oldukça farklıdır. Bu yüzden, dövme alüminyum alaşımları, döküm alüminyum alaşımlarına göre daha yüksek mekanik mukavemet özellik sergiler. Bu grupların içerisinde ısıtılma işlemi yapılabilen (örneğin dövme alüminyum alaşımları için 2xxx (Al-Cu), 6xxx (Al-Mg-Si), 7xxx (Al-Zn-Mg) ve 8xxx seri alaşımlar) ve ısıtılma işlemi yapılamayan (dövme alüminyum alaşımları için 1xxx, 3xxx ve 5xxx serileri) alaşımlar bulunmaktadır. Bunlar arasında, ısıtılma işlemi yapılabilen alaşımlar ısıtılma işlemi sonrası sertleşirler ve daha yüksek mekanik özellik sergilerler. Bu yüzden, yüksek mukavemet

gereksinimi olan uygulamalarda ısıtıl işlem yapılabilen alaşımlar kullanılır (Avşar, 2011; Akça, 2006; Yeni vd., 2009). Isıtıl işlem yapılamayan alaşımlarda genellikle soğuk şekillendirme gibi mekanik işlemlerle malzemelerin mukavemeti artırılır. Aşağıda dövme ve döküm alüminyum alaşımları detaylı olarak incelenmiştir.

1.3.1 Dövme Alüminyum Alaşımları

Bu grup içerisinde bulunan alaşım elementlerinin kimyasal bileşim oranlarına göre adlandırılmakta ve kendi alanında sınıflandırılmaktadır. Bu alaşımlar, Amerikan Alüminyum Birliği (AA) tarafından geliştirilen standartlara uygun alaşımların kimyasal bileşimlerini ve özelliklerini açıkça ifade etmek için dört haneli bir numaralandırma sistemi ile tanımlanır. Sınıflandırmanın detaylarını (alaşım bilgileri ve yaşlandırma kabiliyetlerini de belirterek) Tablo 1.1’de detaylı olarak sunduk. Tablo 1.1’den görüleceği üzere, AA serisinde dört haneli sayının başlarında 1 (1xxx), 2(2xxx), 3(3xxx), 4(4xxx), 5(5xxx), 6(6xxx), 7 (7xxx) ve 8 (8xxx) bulunmaktadır. Bunlardan, 1xxx serisi %99 dan fazla saf alüminyum içermektedir. Yüksek korozyon direnci ve iyi elektrik iletkenliğine sahiptir. Son iki basamaktaki rakamlar, alaşımın %99 saflığın üzerindeki saflık oranını ifade eder. Şöyle ki, 1100 alaşımı %99.00 oranında saf alüminyum içerirken 1050 alaşımı %99.50 ve 1060 alaşımı %99.60 saf alüminyum içermektedir (Kaufman ve Altenpohl, 1998; Hüseyinoğlu ve Tosun; 2009). 2xxx seri (Al-Cu) alüminyum alaşımların temel matrinde ana alaşım metali bakırdır. Çökelme sertleşmesi yoluyla uygulanan ısıtıl işlem sonucunda iyi mekanik özellik sergilerler. Oda sıcaklığında yüksek çekme mukavemeti ve düşük sıcaklıklarda üstün dayanım sağlamasının yanı sıra artan sıcaklıklarda yüksek sürünme direnci göstermesi 2xxx serilerinin yüksek işlenebilirlik gerektiren uygulamalarda tercih edilmesinin sebebidir. Diğer bir yandan, diğer alaşım gruplarına göre daha düşük korozyon direnci sergilemesi materyallerin kaynak yapılabilirliğini sınırlar. Bu bağlamda, 2xxx serisi alüminyum alaşımları, yüksek mukavemet ve düşük korozyon direnci özellikleriyle, özellikle 150°C’ye kadar dayanıklılık gerektiren bileşenlerin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kumru (2007) bu alaşımların uçak ve otomotiv endüstrisinde tekerlek, süspansiyon parçaları ve gövde üretimi gibi alanlarda kendilerine önemli bir yer edindiğini göstermiştir (Kumru, 2007). 3xxx (Al-Mn) alüminyum alaşım serisine gelecek olursak, bu alaşımların temel alaşım metali manganezdır. Bu

yüzden, bu seri alaşımlar, özellikle yüksek korozyon direnci, orta düzey mukavemet ve iyi işlenebilirlik özellikleriyle içecek kutuları, dış mekân uygulamaları ve çatı kaplamalar gibi dayanıklılık ve estetik gereksinimlerin çok fazla olduğu alanlarda kendilerine bolca yer bulurlar (Avşar, 2011).

Tablo 1.1 Dövme alüminyum alaşımlarının AA'ya göre gösterimi (Zeytin vd., 2000; Doruk, 2015)

Dövme Alüminyum Alaşımları		
1xxx	Saf alüminyum	Yaşlandırılmaz
2xxx	Al-Cu	Yaşlandırılabilir
3xxx	Al-Mn	Yaşlandırılmaz
4xxx	Si ve Cu veya Mg ana alaşım elementidir	Eğer Mg varsa Yaşlandırılabilir
5xxx	Al-Mg	Yaşlandırılmaz
6xxx	Al-Mg-Si	Yaşlandırılabilir
7xxx	Al-Zn	Yaşlandırılabilir
8xxx	Al-Li	Yaşlandırılabilir

Bu alaşım ailesinin endüstri en fazla kullanılanı AA3003 alaşımıdır. Ayrıca, 4xxx seri (Al-Si) alüminyum alaşımlarının ana matrisine silisyum eklenmesiyle karakterize edilir. Silisyum ilavesi, alaşımların ergime noktasını düşürerek, özellikle kaynak ve lehimleme işlemlerinde üstün bir performans sergilemesini sağlar. Bu özellik, malzemenin kaynak ve lehimleme kabiliyetinin iyileştirilmesine önemli ölçüde katkıda bulunur. Ayrıca, silisyumun elementinin akıcılığı artırıcı etkisi 4xxx seri alaşımlarını döküm teknolojisinde yaygın olarak görmemizi sağlar. Bu özellik, karmaşık geometrilere sahip parçaların üretimi sektörüne büyük bir avantaj sunar. Bu bağlamda, yüksek işlevsellikleri ve çok yönlü kullanımları, onları endüstriyel uygulamalarda değerli bir seçenek haline getirmektedir (Demirtaş, 2009; Kaufman ve Altenpohl, 1998). Bu yüzden, 4xxx seri alaşımlar, kaynaklı yapıların imalatında, levha üretiminde ve otomotiv endüstrisinde otomobil

parçalarının üretiminde sıkça kullanılır. Diğer dövme alüminyum alaşımlarından 5xxx serisine (Al-Mg) gelinecek olursa, adından da anlaşılacağı üzere bu alaşımlarda magnezyum, temel alaşım elementi olarak temel matriste %0,8 ile %5 arasında değişen oranlarda çözünür. Bu 5xxx alaşımları %25'in üzerinde bir uzama kabiliyeti gibi yüksek uzama oranları ile dikkat çeker. Bu özellikleri, Al-Mg alaşımlarını hem dayanıklılık (yüksek korozyon direncine bağlı) hem de işlevsellik açısından cazip kılar (Doruk ve Pakdil, 2016). Ailede en çok bilinen materyali AA5052'dir. Ancak, korozyonlu ortamlarda gerilmeli korozyon çatlaması riski bulunur. Bu yüzden, deformasyon işlemiyle sertleştirilmiş alaşım malzemelerinde yaşlanma yumuşaması sorunu görülür. Dövme alüminyum alaşımları arasında Al-Mg alaşımları, özellikle kaynaklı uygulamalarda tercih edilmektedir. Uygulama alanları arasında başta yapı sekörü olmak üzere damperli kamyon gövdeleri, petrol, süt ve tahıl taşımaya yönelik geniş tanklar bulunmaktadır. Ayrıca, düşük sıcaklıklarda depolama gerektiren basınçlı tanklarda da yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bir diğer seri ise 6xxx serisi (Al-Mg-Si) alaşımlarıdır. Bu serinin alaşımların temel bileşenleri magnezyum ve silisyumdur. Bu elementlerin kombinasyonu, alaşıma hem yüksek şekillendirme/işlenebilirlik kabiliyeti hem de iyi derecede dayanım ve korozyon direnci kazandırır. Bu önemli özellikleri, alaşımı hem dayanıklılık hem de işlevsellik açısından önemli bir malzeme haline getirmektedir. Bu yüzden, 6xxx seri alaşımlar, özellikle ekstrüzyon yöntemiyle üretilen parçaların imalatında yaygın olarak kullanılır. Serinin endüstri uygulama alanlarında en çok bilinen üyelerinden AA 6061 ve AA 6082 alaşımıdır. Bu materyal düşük karbon çeliklerle kıyaslanabilecek düzeyde akma dayanımına sahip olması, malzemenin özellikle inşaat ve ulaşım sektörü gibi çok çeşitli uygulama alanlarında kullanılmasına olanak sağlamaktadır (Kaufman ve Altenpohl, 1998; ASM Handbook, 1991). Bunun yanı sıra, araç hafifletme çalışmaları kapsamında enerji emme kabiliyeti gerektiren çarpışma traversleri gibi parçalarda kendilerine sıkça yer bulmaktadır. Dövme alüminyum Alaşım serisinin bir diğer üyesi 7xxx serisi (Al-Zn-Mg-Cu) alaşımlarıdır. Bu aileye ait malzemeler yüksek dayanım ve önemli ısıtıl işlem kabiliyeti ile uçakların gövde yapıları gibi yüksek gerilme altında çalışan mekanik parka üretiminde kendilerine bolca yer bulmaktadır (Kumru, 2007; Kaufman ve Altenpohl, 1998; American Alumni Association; 2025). Adından da anlaşılacağı üzere 7xxx serisi alüminyum alaşımlarının ana alaşım elementi

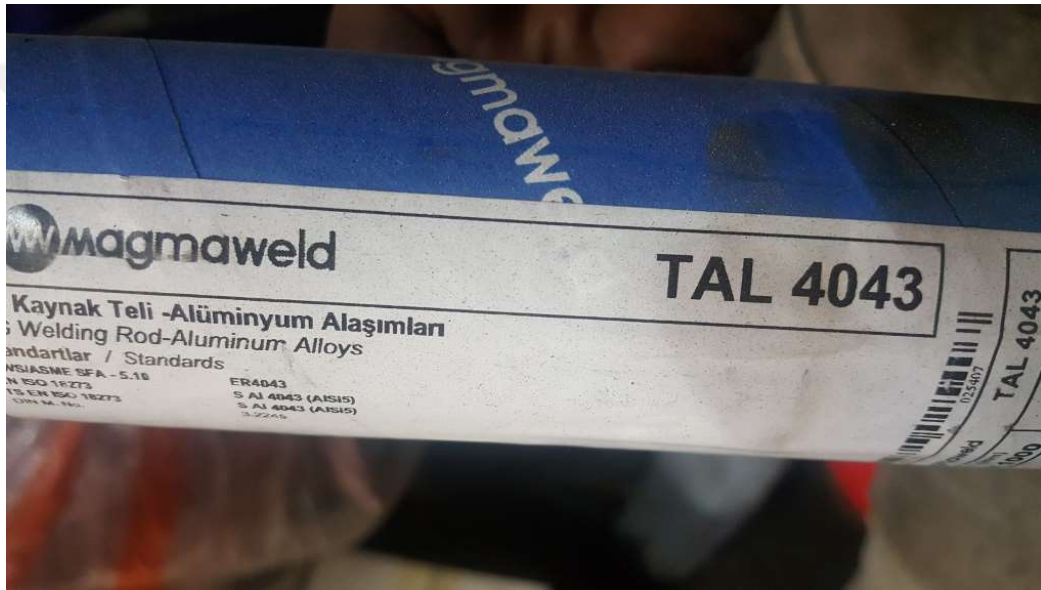
çinkodur. Çinkonun magnezyum ile birlikte kullanılması, alaşıma son derece yüksek bir dayanım kazandırır ve bu kombinasyon, ısıtma işlem uygulanabilirliğiyle dikkat çeken bir yapı oluşturur. Serinin dayanım özelliklerini daha da iyileştirmek amacıyla, genellikle az miktarda bakır, krom ve bazen de manganez gibi diğer elementler eklenir. Bu ilaveler, alaşımın mukavemetini artırırken, belirli uygulama gereksinimlerine uygun hale getirilmesini sağlar. Dövme alüminyum alaşımlar arasında en yüksek mukavemeti sunan malzemelerdir. 7xxx serisi alaşımlar, yüksek dayanım ve yük taşıma kapasitelerinin kritik önem taşıdığı havacılık, uzay ve askeri sektörlerde yaygın olarak kullanılır. Özellikle uçak gövdelerinde, iniş takımlarında ve yüksek dayanıklılık gerektiren diğer parçalarda sıkça kullanılırlar. Yüksek dayanımları yanında, korozyon direncini artırmak amacıyla genellikle yüzey kaplama veya anodize işlemleri ile tamamlanırlar. Ailede üzerine en çok çalışılan alaşım AA7075 materyalidir. Dövme alüminyum alaşımlarının son aile ferdi 8xxx serisi (Al-Li) alaşımlarıdır. Bu özel alüminyum alaşımlarının esas alaşım elementi lityumdur ve malzemeler düşük yoğunlukları ve yüksek mekanik özellikleriyle öne çıkar. Alüminyum alaşımına lityum eklendiğinde yoğunluğunu azaltır ve aynı zamanda elastik modülünü ve dayanıklılığını artırır. Bu özellikler, özellikle havacılık endüstrisinde bu alaşımların karmaşık ve tercih edilen niteliklerindeki değişikliklerdir. Bazı durumlarda istenilen mekanik ve fiziksel özellikleri optimize etmek için alaşıma kalay gibi elementler eklenir. Lityum alüminyum alaşımları, iyi yorulma direnci ve yüksek tokluk özellikleri nedeniyle uçak gövdeleri, kanat yapıları ve uydu bileşenleri gibi kritik kırıkların üretiminde kullanılır. Ancak bu ürünlerin üretim maliyetleri diğer alüminyum alaşımlarına kıyasla oldukça yüksektir. Bu durum, lityumun işlenmesi ve kompozisyonun üretimindeki zorluklardan kaynaklanmaktadır. Ancak hafiflik ve performans açısından sağladıkları avantajlar, ileri teknoloji uygulamalarının sürekli olmasını sağlamaktadır (American Alumni Association, 2005). Yukarı kısımda da bahsedildiği üzere, dövme alüminyum alaşımlarının 1xxx, 3xxx ve 5xxx serilerinin ısıtma işlemle iyileştirilemediği ve bu bağlamda mukavemetlerinin artırılması için soğuk şekillendirmeye maruz bırakıldığı gözlemlenmiştir.

1.3.1 Döküm Alüminyum Alaşımları

Döküm alüminyum alaşımları, şekillendirme amaçlı alüminyum dökümüyle üretilen alaşımlardır ve kimyasal bileşimlerine göre sınıflandırılırlar. Bu alaşımlar, döküm kabiliyeti, mekanik özellikler ve korozyon direnci gibi faktörlere göre çeşitlendirilir. Sınıflandırma için uluslararası geçerliliği olan “U.S. Aluminium Association” tarafından geliştirilmiş bir sistem kullanılmaktadır. Döküm alüminyum alaşımlarının isimlendirilmesinde, üç rakam, bir nokta ve ardından gelen tek bir rakam kullanılır. Örneğin, 319.0 gibi bir numaralandırma sistemi, alaşımın özelliklerini temsil eder (The Aluminium Association, 1988). Daha detaylı olarak, 1xx.x serisi yüksek saflıkta alüminyum içerir. Noktanın solundaki iki rakam, alaşımdaki minimum alüminyum oranını ifade eder. Örneğin, 135.0 alaşımı, %99.35 oranında alüminyum içerir. 2xx.x-8xx.x seri alaşım gruplarını tanımlamak için kullanılır. Bu serilerde noktanın solundaki rakamlar, alaşım içindeki belirgin bir kimyasal anlam taşımak yerine grubu ayırt eder. Noktadan sonraki rakamlar ise ürünün şekli hakkında bilgi verir. Yani, 0: Döküm ürünlerini ifade ederken 1 ve 2 rakamları külçe formundaki ürünleri göstermektedir. Mukavemeti arttırma, termal genleşmeyi düşürme ve başta döküm ve ısıtma işlem kabiliyetini arttırmak için ana matris bakır, silisyum, magnezyum, çinko ve demir gibi elementler eklenir. Döküm alüminyum alaşımları, şekillendirme kolaylığı, hafiflik ve dayanıklılık gibi özellikleriyle birçok endüstriyel alanda tercih edilmektedir. Böylece, döküm alüminyum alaşımları otomotiv sektöründe motor blokları, silindir kafa ve jant üretiminde kullanımı oldukça yaygındır. Hafif yapı oluşturmaları nedeni ile kendisine havacılık uygulama alanında bolca yer bulan döküm alüminyum alaşımları, elektrik bağlantı elemanları ve soğutma sistemlerinde de kullanımı oldukça yaygındır. Yüksek işlenebilir kabiliyeti ile karmaşık geometrik şekiller gerektiren makine parçaları imalatında kullanımı bulunmaktadır. Bu alaşım serisinin ısıtma işlem uygulanabilen ve uygulanamayan seriler olmak üzere farklı türleri vardır. Diğer bir deyişle, döküm alüminyum alaşımlarının bazı serilerine, mukavemet ve sertlik gibi mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla ısıtma işlem uygulanabilir. Bu aile fertleri, 2xx.x serisi (Cu içeriği yüksek alaşımlar), 3xx.x serisi (Si ve Cu içeren alaşımlar), 4xx.x serisi (Si içeren alaşımlar) ve 7xx.x serisi (Zn içeriği yüksek alaşımlar)’dır. Isıtma işlem uygulanabilirliği, döküm yöntemine uygunluğu ve kimyasal kompozisyonları, bu alaşımları farklı uygulamalarda ideal bir seçenek haline getirir. Diğer bir yandan, ısıtma işlemi tabi tutulamayan alaşımlar, kimyasal içerikleri ve yapıları nedeniyle doğal hallerinde veya üretim

yöntemlerinden kaynaklanan özelliklerle mekanik özelliklerini korurlar. Bu tipler özellikle düşük sıcaklık uygulamaları için uygundurlar.

Bu çalışmada, AA 6082 alüminyum levhayı hem ilave tel (Şekil 1.1) hem de telsiz (otojen) ile birbirine tig kaynak yapıp, oluşan yeni sistemlerin (alaşımların) yorulma davranışı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Araştırmanın temel amacı, tel ilaveli ve otojen kaynakla birleştirmenin yorulma dayanım performansı üzerindeki etkilerini belirlemek ve bu etkileri analiz etmektir. Bu bağlamda bu özel alaşımların kendine has kimyasal bileşimi, fiziksel ve mekanik özelliklerini daha detaylı incelemek gerekmektedir.



Şekil 1.1 Alüminyum alaşımlar levhaları birleştirmek için kullanılan kaynak teli

TAL 4043 dolgu teli, özellikle alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynak işlemlerinde kullanılan bir dolgu malzemesidir. %5 oranında silisyum içermesi (Al-Si alaşımı), kaynak havuzunun akışkanlığını artırarak kolay erime sağlar ve düzgün bir kaynak dikişi oluşturur. Bu özellik, ince kesitlerde ve karmaşık geometrilerde avantaj sunar. Kaynak işlemi sırasında, kaynak havuzunun düzgün bir şekilde yayılmasını sağlayarak işlem kalitesini artırır.

Kaynak sonrası malzeme, ısıtılma işlem süreçlerine dayanıklıdır ve düşük sıcaklıklarda çatlama eğilimini azaltır. Ayrıca, termal çatlama karşı yüksek direnç gösterir ve deformasyon riskini düşürür. TAL 4043 ile yapılan kaynak, iyi bir korozyon direnci sunar ve özellikle 4000 ve 6000 serisi alüminyum alaşımlarıyla uyumlu bir şekilde çalışır. TIG ve MIG kaynak yöntemlerinde geniş bir kullanım alanına sahip olup, hafif ve korozyona dayanıklı yapılar oluşturmak için uygundur. Bu nedenle otomotiv, havacılık ve uzay sanayii gibi sektörlerde sıkça kullanılmaktadır. Ayrıca, atmosferik koşullarda ve tatlı su ortamlarında sorunsuz bir şekilde uygulanabilir.

Bununla birlikte, kaynak dikişindeki %5 silisyum içeriği nedeniyle, ana malzemeye göre sertlik artışı gözlemlenebilir ve bu durum, mukavemet özelliklerinin bir miktar azalmasına neden olabilir. Yüksek sıcaklık uygulamaları için uygun değildir. Ayrıca, kaynak sonrası anodizasyon işlemi yapıldığında, kaynak dikişi ile ana malzeme arasında renk farklılıkları oluşabilir ve bu durum, estetik açıdan önemli projelerde dikkate alınmalıdır.

1.4 AA 6082 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI

Ekstrüzyon ile üretilen parçaların imalatında çokça tercih edilen dövme alüminyum alaşımlarından 6xxx serisine ait olan AA 6082 alaşımının kimyasal kompozisyonu Tablo 1.2’de detaylıca verilmektedir.

Tablo 1.2 Ticari AA 6082 alüminyum alaşımına ait kimyasal bileşim (Doruk, 2015)

Alaşım elementi	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ga	V	Al
% Ağırlık	0.85	0.47	0.1	0.55	1.15	0.17	0.013	0.09	0.019	0.012	0.017	Kalan

Bilindiği üzere, sertleştirilebilirlik elemanları, çelik gibi malzemelerin alaşımında bulunan ve malzemenin ısı ile sertleşme yeteneğini etkileyen elementlerdir. Bu elementler, özellikle martensit fazının oluşumunu destekleyerek, malzemenin sertliğini ve sertleşme derinliğini artırır. Karbon, çelikteki sertlik için en kritik element olup, martensit fazının oluşumunu belirler ve malzemenin sertliğine doğrudan katkı sağlar. Ayrıca, martensiti stabilize ederek ve kritik soğuma hızını azaltarak sertleştirilebilirliği iyileştirir. Manganez, karbon ve diğer alaşım elementlerinin difüzyonunu yavaşlatarak, martensit fazının büyük kesitlerde oluşmasını sağlar ve sertleşme derinliğini artırır. Krom, karbürler oluşturarak martensit fazını stabilize eder, böylece büyük kesitlerde sertleştirme etkisini derinleştirir ve aşınma ile korozyon direncini artırır. Molibden, ostenitin perlit veya bainite dönüşümünü geciktirir, böylece soğuma sırasında çeliklerin sertleşmesini iyileştirir. Nikel, sünekliği azaltmadan tokluğu ve mukavemeti artırarak sertleşebilirliği artırır. Bor, düşük miktarlarda bile güçlü bir sertleşebilirlik arttırıcıdır ve ferrit ile perlitin çekirdeklenmesini engelleyerek sertleşebilirliği önemli ölçüde iyileştirir. İkincil sertleştirilebilirlik elemanları arasında silisyum, vanadyum, tungsten ve kobalt bulunur. Silisyum, ferriti güçlendirir ve bainit oluşumunu desteklerken, vanadyum karbürler oluşturarak sertleştirilebilirliği iyileştirir ve aşınma direncini artırır. Tungsten, sıcak sertliği ve aşınma direncini artırır, yüksek sıcaklıklarda yumuşama riskini azaltır. Kobalt ise, genellikle takım çeliklerinde kırmızı sertliği iyileştirmek amacıyla kullanılır ve sertleştirilebilirlik üzerindeki etkisi sınırlıdır. Bu elementlerin kullanımı, malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirerek çeşitli endüstriyel uygulamalarda optimize edilmesini sağlar. AA 6082 alüminyum alaşımının içerdiği elementler doğrultusunda yüksek korozyon dayanımına sahip olduğu açıktır.

Bu özel alaşımın temel mekanik özellikleri Tablo 1.3'te detaylıca verilmektedir.

Tablo 1.3 Ticari AA 6082 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi (Doruk, 2015)

Akma Gerilmesi	285 MPa
Kopma Gerilmesi	310 MPa
Uzama (%)	10
Sertlik $Hv_{0,2}$	115

Tablo 1.3'ten anlaşılacağı üzeri AA 6082 alaşımı yüksek korozyon dayanımına sahiptir. Çok iyi kaynak yapılabilir özelliği dolayısı ile makine yapımı için uygun bir materyaldir (Sharma ve Bhushan, 2022; Surendarnath vd., 2023; Tunc vd., 2021; Msomi ve Moni, 2022; Lipinska vd., 2024; Zhou vd., 2021). Gerekli ısıl işleminden (T4) sonra stabilize edilmiş formunun soguk şekillendirilebilme kalibiyeti çok yüksektir. Bu yüzden, demiryolu vagonlarında ağır yapılardan gemi inşaat sektörüne, kazan imalatından hidrolik sistem ve parka üretimine birçok endüstriyel uygulama alanında kendine yer bulmaktadır. Ancak yorulma dayanımı orta seviyede olmasından dolayı kompleks parçalar için uygun degildir. Yorulma testleri, yüksek hassasiyetli UTEST servo-hidrolik yorulma test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemle, alaşıma uygulanan ısıl işlemlerin, yorulma özelliklerindeki değişimi nasıl etkilediği sistematik bir şekilde değerlendirilmiştir.

1.5 TİG Kaynağı

Tungsten inert gaz kaynağı tekniği kaynak için yaygın olarak kullanılan ve özellikle hassasiyet gerektiren uygulamalarda tercih edilen tungsten elektrotla gerçekleştirilen yöntemidir. Özellikle ince metal levhaların kaynaklanmasında ve estetik olarak temiz ve güçlü kaynakların oluşturulmasında çeşitli avantaj sağlar. Kaynak bölgesine, argon veya helyum gibi koruyucu gazlar verilerek doğrudan temas etmeyen bir tungsten elektrotu kullanarak gerçekleştirilir. Burada kullanılan gazlar, kaynak yapılan alanın oksijen ve nem gibi dış etkenlerden koruyup metalin oksitlenmesini ve kirlenmesini engeller. Kaynaktaki ısı, tungsten elektrotu ile iş parçası arasındaki elektrik arkı sayesinde sağlanır. Kaynak işlemi sırasında, iş parçasına kaynak metali dolgu teli veya telsiz (otojen) olarak eklenir. TIG kaynağı özellikle otomotiv, havacılık ve dekoratif metal işçiliğinde yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda tercih edilir. Özellikle düşük sıcaklıklarda çalışması ve malzeme üzerinde minimum termal etki oluşturması, ince sacların kaynaklanmasında tercih sebebidir. Argon, helyum gazları veya iki gazın karışımı kullanılarak (metalin oksitlenmesini ve kirlenmesini engeller) yapılan kaynak işlemi, dikişlerin temiz ve oksidasyona dayanıklı olmasını sağlar. Bu yüzden, korozyon dayanıklılığı önemli olan (alüminyum ve paslanmaz çelik) malzemeler için büyük avantaj sağlar. Ayrıyeten, çelik, paslanmaz çelik, alüminyum, bakır ve titanyum gibi çeşitli metalleri yüksek kaliteli, temiz ve pürüzsüz kaynaklanmasında

kullanımı TIG kaynağını çok yönlü/esnek ve çeşitli endüstrilerde yaygın bir kaynak yöntemi haline getirmiştir (Kaya, 2005). Düşük sıcaklıklarda çalışması, kaynak yapılan metalin çevresindeki bölgelere zarar gelmesini önleyip kaynakçıya süreç üzerinde tam kontrol sağlaması ince malzemelerle çalışırken önem arz eder.

1.5.1 Alüminyum Alaşımlarında Diğer Yaygın Kaynak Yöntemleri

MIG (Metal İnert Gaz) kaynağı ergiyen telle yapılan kaynak işlemlerine denir ve küçük boyutlu metal parçaların birleştirilmesinde kullanılır. MIG kaynak, çok düşük güç seviyelerinde (düşük ısı girişi sağlar), yüksek hassasiyet gerektiren küçük parçaların ve ince materyallerin küçük alanlarında yapılan dikiş işlemleri için yaygın olarak tercih edilmektedir. Kaynak yapılırken çevredeki malzemelere zarar gelmesi engellenir ve yüksek dayanıklılık gerektiren uygulamalarda kullanılır. Bu yüzden elektronik devreler, tıbbi cihazlar, mikro makineler, otomotiv endüstrisi ve daha birçok hassas uygulama alanlarında kullanılır (Kaya, 2005).

Yüksek frekanslı elektron ışın kaynağı, lazer kaynağı ve tungsten inert gas kaynağı temel 3 mikro kaynak yöntemleridir. İlk kaynak modelinde yüksek enerjili bir elektron ışını kullanıp, mikro seviyede metal parçaların birleştirilmesinde kullanılır. İkinci olarak, metallerin çok küçük alanlarda birleştirilmesi yüksek yoğunluklu çok hassas ve odaklanmış ısı sağlayan lazer ışını kullanılarak sağlanır. Son kaynak teknolojisi düşük ısıda çalışıp mikro yapıların bozulmamasını sağlayarak ince metal parçaların birleştirilmesinde kullanılır (Önal ve Avcı, 2009).

Materyalleri diğer bir birleştirme türü de otojen (Autogenous Welding) kaynaktır. Bu kaynak işleminde dolgu malzemesi kullanılmadan yalnızca iş parçalarının kendi metalinden yararlanarak gerçekleştirilen bir kaynak türüdür. Bu işlemin en önemli özelliği, kaynak işlemi sırasında dışarıdan ek bir dolgu malzemesinin eklenmemesidir. Otojen kaynağı yönteminde, iki metal parça elektrik arkı veya başka bir ısıtma kaynağı ile ısıtılarak doğrudan kaynak bölgesinde eritilerek birbirine dikişlenir. Başarılı bir kaynak yapılabilmesi için parçaların doğru şekilde hizalanması ve istenilen derecede ısıtılması çok en önemli etkenlerdir. Ayrıca, kaynak boyunca dolgu malzemesi kullanılmadığı için dikişin kalitesi doğrudan iş parçasının kendisinden etkilenir. Bunun yanı sıra, otojen kaynağın düşük ısıda çalışması çevre metalin zarar görmesini en aza indirir. Bu yüzden malzemelerin homojen bir şekilde birleştirilmesi gereken durumlarda

avantaj sağlar. Otojen kaynak genellikle ince metal levhaları birleştirmek ve ince metal parçaları kaynaklamak için tercih edilir. Düşük sıcaklık işlemleri hassas (yüksek sıcaklıklar ve ısıtma sırasında oksitlenmeye meyilli olan) metal işleri için idealdir ve özellikle paslanmaz çelik ve alüminyum gibi malzemeler için yaygın olarak terci edilmektedir.

Araştırmanın temel amacı, AA 6082 alaşımlarının telli ve otojen birleştirme ile üretilen yeni parçaların mekanik özellikleri üzerinin değişiminin yanı sıra, özellikle yorulma dayanımının nasıl değiştiği ve bu değişimlerin hangi fiziksel ve mekanik özelliklerden kaynaklandığı detaylı bir şekilde incelenmektedir. Elde edilen S–N diyagramları (Wöhler eğrileri) doğrultusunda alaşımla tekniğinin materyal üzerine etkileri derinlemesine analiz edilecektir. Bu süreçte, alaşımların mikroyapısal analizi, sertlik testi, gerilme testleri ve yorulma testleri gibi yöntemler kullanılarak, her iki kaynağın performansı arasındaki farklar belirlenmeye çalışılacaktır. Böylece, bu özel alaşımlar ve kaynak yöntemlerinin endüstriyel uygulamalarda daha verimli ve dayanıklı malzeme tasarımları için nasıl optimize edilebileceği konusunda derinlemesine bir anlayış geliştirilecektir.

1.6 Yorulma

Döngüsel yüklere maruz kalan metal malzemelerde, uygulanan yükler malzemenin akma dayanımının altında da olsa belirli sayıda yük tekrarından sonra parçanın yüzeyinde çatlaklar görülebilmektedir. Bu çatlakların kritik değere geldikten sonra hızlanarak yorulma kırılmasına neden olur. Ancak, yorulma kırılmasının yer ve zamanının tahmin edilmesi oldukça zordur. Yorulma kırılması, gerilimler elastik aralıkta kalsa bile meydana gelebilir ve genellikle gerilim dağılımı eşit olmadığında malzeme içinde daha olası bir durumdur. Şaftlar, bağlantı çubukları ve dişliler gibi hareketli bileşenler, bu tür kırılmaların sıklıkla meydana geldiği parçaların yaygın örnekleridir. Çalışmalarda makine parçalarındaki kırılmaların %80'inin yorulmayla ilgili olduğunu gösterilmektedir (Akça, 2006; Fakıoğlu, 2012). Bu tür kırılmalar, elastik bölgenin altındaki gerilimler altında malzemenin aniden bozulmasına neden olan beklenmedik bir durumdur ve makineler ve belki de iş sağlı ve güvenliği açısından tehlikeli olabilir. Bu tür kırılmalar, uçak kanatları başta olmak üzere çelik köprülerde ve zorlu şartlar altında çalışan makinelerde görölme riski daha fazladır. Bu yüzden bu ortamlarda sıkı güvenlik protokollerine ve iyi bir mühendislik

hesaplarına/yaklaşımlarına ihtiyaç olmaktadır. Malzemelerde oluşa(bilecek)cak yorulma kırılmaları ya da malzemelerin uygulanan yüke karşı göstereceği yorulma dayanımları genellikle S–N diyagramları (Wöhler eğrileri) kullanılarak belirlenir (Kıratlı vd., 2006). Özet olarak, birçok mekanik parça ve yapısal eleman, çalışma sırasında doğası gereği tekrarlanan gerilimlere maruz kalır (Li vd., 2008; Çimenoglu ve Kayalı, 1986). Bu tür malzemelerde, (yorulma kırılmasına neden olan) gerilim çevrimlerinin sayısı maksimum gerilim değerinden daha önemlidir.

Daha detaylı olarak bakacak olursak, yorulma, malzemelerde tekrarlanan gerilmeler ile eksenel, kesme, eğilme ve burulma yüklerinin birleşik veya ayrı ayrı etkileri sonucu ortaya çıkmaktadır. Yorulma nedeniyle kırılan parçalara örnek olarak miller, biyel kolları, dişliler, yataklar, cıvatalar, yaylar, türbin kanatları, motor parçaları ve raylı sistem tekerlekleri gibi hareketli elemanlar verilebilir. Bu nedenle yorulma, bu tür elemanların tasarım ve üretim aşamalarında dikkate alınması gereken en önemli faktörlerden biridir. Dinamik yükler altında çalışan parçaların yorulma özelliklerinin doğru bir şekilde belirlenebilmesi için bu parçaların gerçek yaşam koşulları veya benzer çalışma koşulları altında test edilmesi gerekir. Ancak bu testler zaman alıcı ve maliyetli olduğundan belirli standartlara göre hazırlanmış numunelerle basit laboratuvar testleri yapılmakta ve bu şekilde malzemelerin yorulma davranışları hakkında temel bilgi edinilmektedir (Doruk, 2015; Soyano ve Matsumine, 2023). Bu bağlanma malzeme içinde yorulma olayı üç aşamada gerçekleşmektedir: i- Çatlak başlaması; ii- Çatlak ilerlemesi ve en son olarak iii-Kırılma olayının (ani kopmanın) gerçekleşmesidir. Bu durumlardan ilki malzeme içerisinde bulunan kılcal çatlaklar genellikle malzemenin yüksek gerilme yığılmalarının olduğu bölgelerinde ve kristal yapıda bulunan noktasal kusurlarda ortaya çıkar. Bu tür kusurlar, çatlak oluşumunun başlangıç noktalarıdır. İkinci olay çatlak ilerlemesi durumudur. Çatlaklar genelde malzemenin yüzeyinden başlar ve kayma hatları boyunca orta bölgelere doğru ilerler. Ayrıca, malzeme içerisinde mevcut olan mikro çatlaklar ve çatlak uçlarında meydana gelen gerilme yığılmaları, çatlağın ilerlemesi için yeterli düzeye ulaştığında (kritik çatlak hızı ve boyuna ulaşması durumunda), çatlaklar büyümeye devam eder. Ancak, numunenin maruz kaldığı kuvvet uygulanan gerilme çatlağı ilerletmeye yetecek kadar büyük değilse, malzemede yorulma meydana gelmez. Eğer gerilme yeterince büyükse, çatlak malzemenin zayıf bölgelerinden ilerlemeye başlar. Bu süreçte, deforme tüm kesite yayılır. Malzemede son olay olarak

malzemede kırılma/ani kopma durumu gerçekleşir. Bu bağlamda, çatlakların oluşumu ve kritik hız/boyut değerine oluşması sonucu malzemede deforme belirli bir seviyeye ulaşır ve kesitin sağlam kalan kısmı da uygulanan yükü taşıyamaz duruma gelir ve malzeme ani bir şekilde kopmalar yaşanır (Ün, 2007).

Özelinde üzerine yük uygulanan malzemelerdeki yorgunluk genellikle materyalin iç yapıdaki kusurlardan kaynaklanan lokalize olarak büyük gerilme yığılma (çatlak başlama ve ilerleme) bölgelerinden kaynaklanmaktadır. Bu bağlamda çatlaklar, çentikler, atomlar arası boşluklar, sert kapanımlar ve ani kesit geçişleri gibi gerilim yığılma alanları, malzemenin ortalama gerilim seviyelerini aşan gerilimler yaşar. Bu yüksek gerilimler ve gerilme alanları, uygulanan yükler malzemenin akma dayanımının altında olsa bile materyal içinde lokalize plastik deformasyona yol açarlar. Düzgün, kusursuz, cilalı bir yüzey ve düzenli bir kesitle başlayan bir metalde, elastik sınırın altındaki gerilim seviyeleri altında lokalize çarpılma hareketi meydana gelebilir ve kayma bantlarının oluşumuna yol açar. Bu kayma bantları, çarpılmalar ve çöküntüler gibi yüzey düzensizlikleri oluşturarak gerilim (yığılmış alanları) yoğunlaşmalarını daha da artırır. Bu koşullar altında, malzeme tekrarlanan yüklemeden dolayı geri döndürülemez plastik deformasyona uğrar ve bu da gerilim sertleşmesine (pekleşme: şekil değişim seviyesine bağlı malzemenin kristal yapısındaki dislokasyon sayısında artış), artan kırılma direncine ve nihayetinde ani bir yorulma kırığına neden olur (Önal ve Avcı, 2009). Alüminyum alaşımlarının yorulma özelliklerine gelecek olursak, bilindiği üzere alüminyum ve alaşımlarının düşük yorulma mukavemetinin temel sebepleri tane sınırlarına yakın bölgelerdeki sertliğin azalması çökeltilerin bulunmadığı bölgelerin varlığı ve metastabil parçacıkların çökmesi gibi çeşitli faktörlere bağlanabilir. Aşırı yaşlandırma veya çözelti işlemi gibi işlemler, kayma bantlarındaki parçacıkların kaybolmasına ve bunun sonucunda da lokalize gerilme yığılma alanlarının oluşmasına yol açmaktadır. Bu gerilim alanları kırılma sürecini hızlandıran temel katalizör görevi görmektedir. Bu temel problemin çözümü için, malzeme içindeki kayma hareketinin diğer yapısal bileşenlere eşit şekilde dağıtılması önerilmiştir. Bu yaklaşımı destekleyen araştırmalar, ticari alüminyum alaşımlarında bulunan intermetalik bileşiklerin veya safsızlıkların, yüksek saflıktaki alüminyum alaşımlarına kıyasla yorulma mukavemetlerini artırdığını göstermektedir.

Literatürde birçok bilimsel çalışmada, bir alaşım malzemesinin kimyasal bileşiminde yapılan küçük değişimler/ayarlamalar, malzeme içi ince çökeltilerin

oluşumuna bağlı materyalin genel mekanik performansını (mukavemeti, çekme dayanımı, ısıtıl işlem kabiliyeti, korozyon dayanıklılığı ve yorulma dayanımı) önemli ölçüde etkileyebilir (Kaya, 2005; Cirik, 2007).

Bu bağlamda yorulma mukavemetine etki eden temel faktörler parçanın yüzey işleme kalitesi, sıcaklık, korozyon, gerilme türü, malzeme içyapı ve yüzey çentik etkisidir. Sıcaklık ile başlayacak oluyorsak, sıcaklık arttıkça, genellikle malzemelerin mukavemetini zayıflatır ve yorulma mukavemetinde buna karşılık gelen bir azalmaya yol açar (Onaran, 1999). Yorulma mukavemeti yaklaşık 200°C gibi bir sıcaklığa kadar sıcaklıktan büyük ölçüde etkilenmez; ancak bu eşğin ötesinde yorulma mukavemetine zarar vermektedir. Metastabil mikro yapılara sahip alaşımlar, yüksek sıcaklıklarda ayrışma nedeniyle içyapısal değişikliklere uğrar. Bu ayrışma, bu tür alaşımların yorulma mukavemetini önemli ölçüde etkiler (Kayalı vd., 1978; Weissbach, 1998). Parçanın yüzey işleme kalitesine gelinecek olursa, çoğu yorulma kırılması alaşımların yüzeyinden kaynaklanmaktadır. Bu yüzden, yüzeydeki herhangi bir değişiklik/deformasyon alaşımın uygulanan yük karşısında yorulma ömrünü önemli ölçüde azaltır. Ayrıyeten, materyalde yüzey düzensizliklerinin varlığı, çatlakların başlamasını kolaylaştıran gerilim yığılma alanların oluşmasına ve yoğunlaşmalarına neden olur. Yüzey işleme kalitesinin azalması (gerilim yığılma alanların artması), malzemenin yorulma mukavemetini azaltır. Ancak, metal yüzeyinde artık basma gerilmesi oluşturan işlemler, malzemenin yorulma ömrünü artırabilir (Eryürek, 1993). Ayrıyeten, gerilme türü de yorulma kırılması üzerinde ciddi etkiler sunmaktadır. Örnek olarak, çekme-basınç gerilimleri uygulayan cihazlar kullanılarak yürütülen yorulma testleri, çekme gerilimlerinin yorulma direncini azalttığını, basınç gerilimlerinin ise tam tersi etki göstererek onu artırdığını göstermiştir (Çimenoglu ve Kayalı, 1986). Korozyon olayına gelirse, çevresel kimyasal etkilerle birleşen alternatif gerilimler, alaşımların yorulma ömürlerinde ciddi azalmaya yol açar. Korozi bir ortamın yorulma ömrü üzerindeki etkisi genellikle oldukça belirgindir. Bu tür ortamlarda, yorulma çatlakları, korozi olmayan koşullara göre daha az çevrimden sonra gelişir. Yorulma çatlakları oluştuğunda, korozi bir ortamın varlığı çatlak yayılma hızını da hızlandırır (Eryürek, 1993) ve böylece malzemede ani kırılmalara/kopmalara neden olmaktadır. Bunun yanı sıra, yüzey çentik etkisinde döngüsel yükleme altında, yorulma çatlakları genellikle gerilimlerin en yüksek olduğu alanlarda başlar. Herhangi bir yüzey çentiği ve pürüzlülüğü, malzeme yüzeyinde artık basma

gerilmesi ve stres yığılma alanların artmasına neden olur. Bu gelişmeler yüzeyde yorulma çatlaklarının oluşumuna yol açar. Özellikle malzemenin içyapısı malzemelerin mekanik özellikleri üzerine değerli etkileri vardır. Yorulma ömrünü etkileyen faktörler arasında bir diğer faktör ortalama tane boyutu, tane yapısı ve mikro yapıdaki kusurlar bulunur. Malzemenin döküm yöntemi, sıcak ve soğuk şekillendirme işlemleri ve faz dağılımı, çeşitli mikro yapıların oluşumuna katkıda bulunur. Tane boyutunun uzun vadeli yorulma davranışı üzerindeki etkisini değerlendirmek zordur, çünkü tane boyutunu değiştirmek malzemenin yorulma özelliklerinde olumsuz değişikliklere neden olabilir (Karcı, 2002). Genellikle kusur olarak adlandırılan kapanımlar ve boşluklar, gerilim yoğunlaşmasına yol açarak malzemeyi zayıflatır ve böylece hem yorulma mukavemetini hem de kullanım ömrünü azaltır. Bu kapanımlar, malzeme matrisinden daha kırılgandır ve yüklemeye altında kolayca deforme olmazlar, bu da sınırlarında veya kapanımlar içinde mikro boşlukların oluşmasına neden olur. Zamanla bu boşluklar genişler ve birleşir (Mitchell, 2004).

Malzemelerin yorulma mukavemeti yorulma testi ile belirlenir. Bu testler, alaşımların hem yorulma ömrünü hem de yorulma limitini değerlendirmek için yapılır. Diğer mekanik testlere benzer şekilde, bu değerlendirmelerde standart test numuneleri kullanılır. Wöhler diyagramı, bir numunenin üzerine uygulanan gerilime bağlı olarak arızalanmadan önce geçirdiği çevrim sayısını temsil eder. Bu diyagramda, dikey eksen uygulanan gerilimi gösterirken, yatay eksen malzemenin kırılıncaya kadar dayandığı çevrim sayısını temsil eder. Bu eğriler, bir alaşımların arızalanmadan önce çeşitli sabit gerilim koşulları altında dayanabileceği çevrim sayısını belirlemeye yardımcı olur. Test sırasında, ortalama gerilim değeri sabit kalır ve kırılmadan önce kaç çevrime dayanabileceğini belirlemek için numuneye farklı periyodik gerilim yükleri uygulanır. Wöhler diyagramları eğrisi çevrim sayısı arttıkça (10^6 - 10^7) düzleşme eğilimindedir.

Yorulma testi sonuçları ve malzemelerin yorulma ömrü hesaplamaları, Wöhler (S-N) eğrisine ek olarak Smith diyagramı kullanılarak da analiz edilebilir. Tasarımcılar, farklı stres koşulları altında değerlendirmek için mevcut literatürdeki çeşitli malzemelerin Smith diyagramlarına başvurabilirler (Özdemir, 2009). Literatürde birçok bilimsel çalışmalarda kullanılan Smith diyagramı örneği görülebilir. Bu diyagramda, stres koşulları bölge içinde kalırsa malzemenin sonsuz bir ömre sahip olduğu varsayılır. Smith diyagramı, malzemelerin yorulma

dayanıklılık sınırlarını belirlemek için farklı yaklaşımlar (Gerber parabolü, Goodman çizgisi ve Soderberg çizgisi gibi) kullanılarak değiştirilebilir. Smith diyagramının aksine, bu yöntemler ayarlanmış yorulma mukavemetini elde etmek için tamamen değişken yorulma sınırının belirli faktörlerle çarpılmasını içerir. Bu kriterlere ait detaylı bilgiler literatürde bulunabilir. Yorulma testlerinde kullanılan cihazlara gelecek olursak, bu testler numuneye uyguladıkları gerilme türüne göre dört ana kategoride sınıflandırılabilir: (i) Eksenel çekme ve basma uygulayan cihazlar, (ii) burulma gerilmesi uygulayan cihazlar, (iii) bileşik gerilme uygulayan yorulma cihazları ve (iv) eğme gerilmesi uygulayan cihazlardır. Eğme gerilmesi uygulayan cihazlar ise düzlemsel eğme gerilmesi ve dönen eğme gerilmesi uygulayan cihazlar olarak iki alt gruba ayrılmaktadır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Tez kapsamında gerçekleştirilen yorulma testlerinde, AA 6082 alüminyum alaşım levhayı hem ilave telli hem de telsiz (otojen) ile birbirine Işık kaynak INV 320 A kaynak makinası (Şekil 5.1) kullanarak kaynakladık. Üretilen 2 farklı alaşımların mekanik özellikleri üzerinin değişimi ve yorulma davranışı yorulma testlerinde üretilen S–N diyagramları ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Ölçüm metotlarından kaydedilen S–N diyagramları kullanarak mekanik karakteristik performans ve yorulma davranışı değişimlerinin kaynak çeşidine bağlı materyallerin hangi fiziksel ve mekanik özelliklerden kaynaklandığı detaylı bir şekilde incelendi. Bu şekilde, bu özel alaşımlar ve kaynak yöntemlerinin endüstriyel uygulamalarda daha verimli ve dayanıklı malzeme tasarımları için nasıl iyileştirilebileceği konusunda kapsamlı bir anlayış kazanılacaktır. Yorulma testlerinde UTEST servo-hidrolik yorulma test cihazı kullanılmıştır.





Şekil 2.1 AA 6082 alüminyum alaşım levhaları kaynaklamak için kullanılan cihaz

2.1 Çalışmada Kullanılan Alüminyum Alaşım Malzemesi

Tez kapsamında çalışılacak yorulma AA 6082 alaşım malzemesi Pınar Metal Plastik Ltd. Şti.'den 5 mm kalınlığında alüminyum plaka olarak sağlanmıştır. Bu malzeme, tüm kimyasal ve mekanik özellikleri belirli ve sertifikalı bir üründür. Malzemeye ait kimyasal özellikler Tablo 2.1'de detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 2.1 Ticari AA 6082 alüminyum alaşımının temel mekanik karakteristik özellikleri (Doruk, 2015)

Akma Gerilmesi	285 MPa
Kopma Gerilmesi	310 MPa
Uzama (%)	10
Sertlik $HV_{0.2}$	115
Çözeltiye alma tavlama sonrası akma gerilmesi	80 MPa

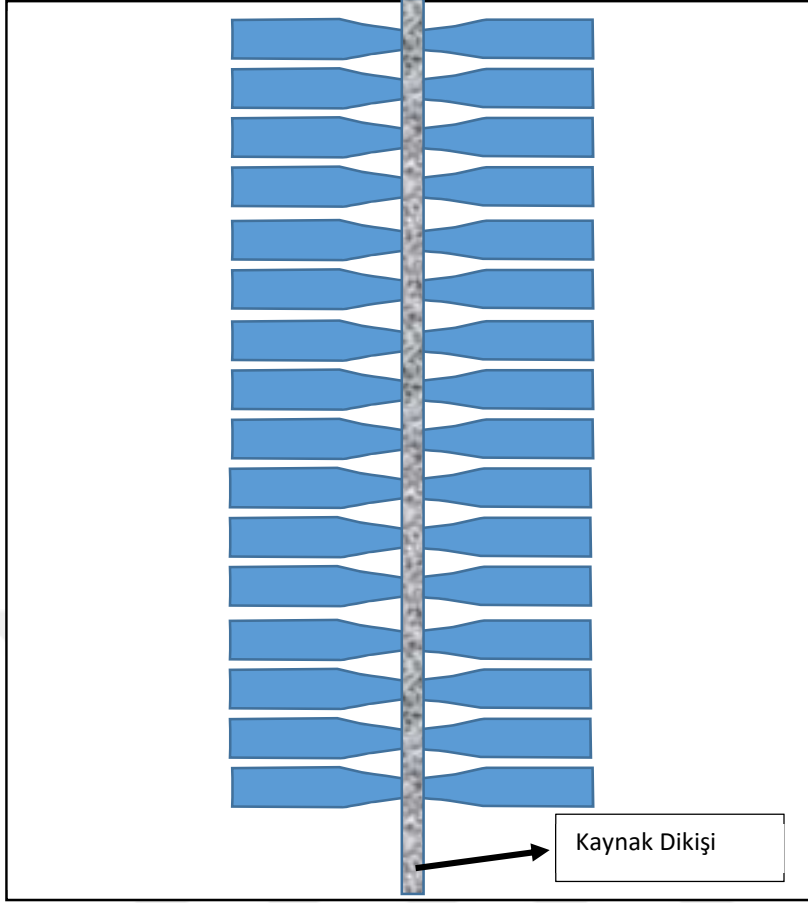
2.2 Alüminyum Levhaların Kaynak İşlemi

AA 6082 alaşım malzemelerinin bir birine kaynaklanmış fotoğrafları aşağıdaki Şekil 2.2’de verilmiştir. Kaynak işlemi argon gazı altında 85-95 Amper Aralığında 18 cm/dakika hız ile geleneksel yöntemle yapılmıştır.

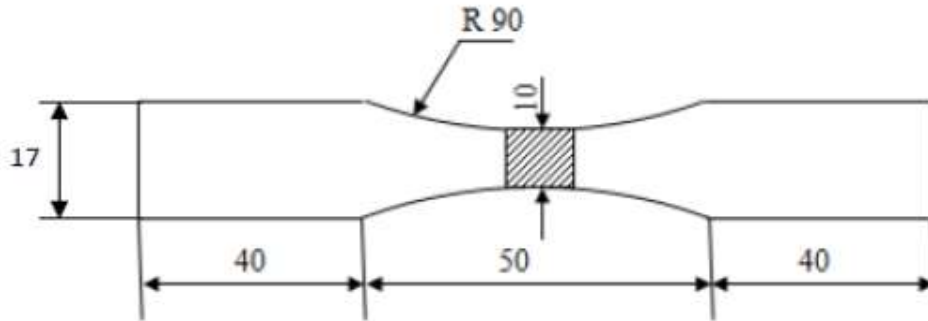


Şekil 2.2 a- Otojen ve b- Kaynak tel ile birleştirilmiş alüminyum alaşımların son görüntüsü

Şekil 2.3'te görülen plakaların her birinden, haddeleme yönüne paralel (akma, çekme ve yorulma ömürlerinin dik yönde kesilene göre daha yüksek olması sebebi ile) olarak yorulma numuneleri hazırlanmıştır. İmalat yöntemi olarak lazer jet kesme kullanılmıştır.

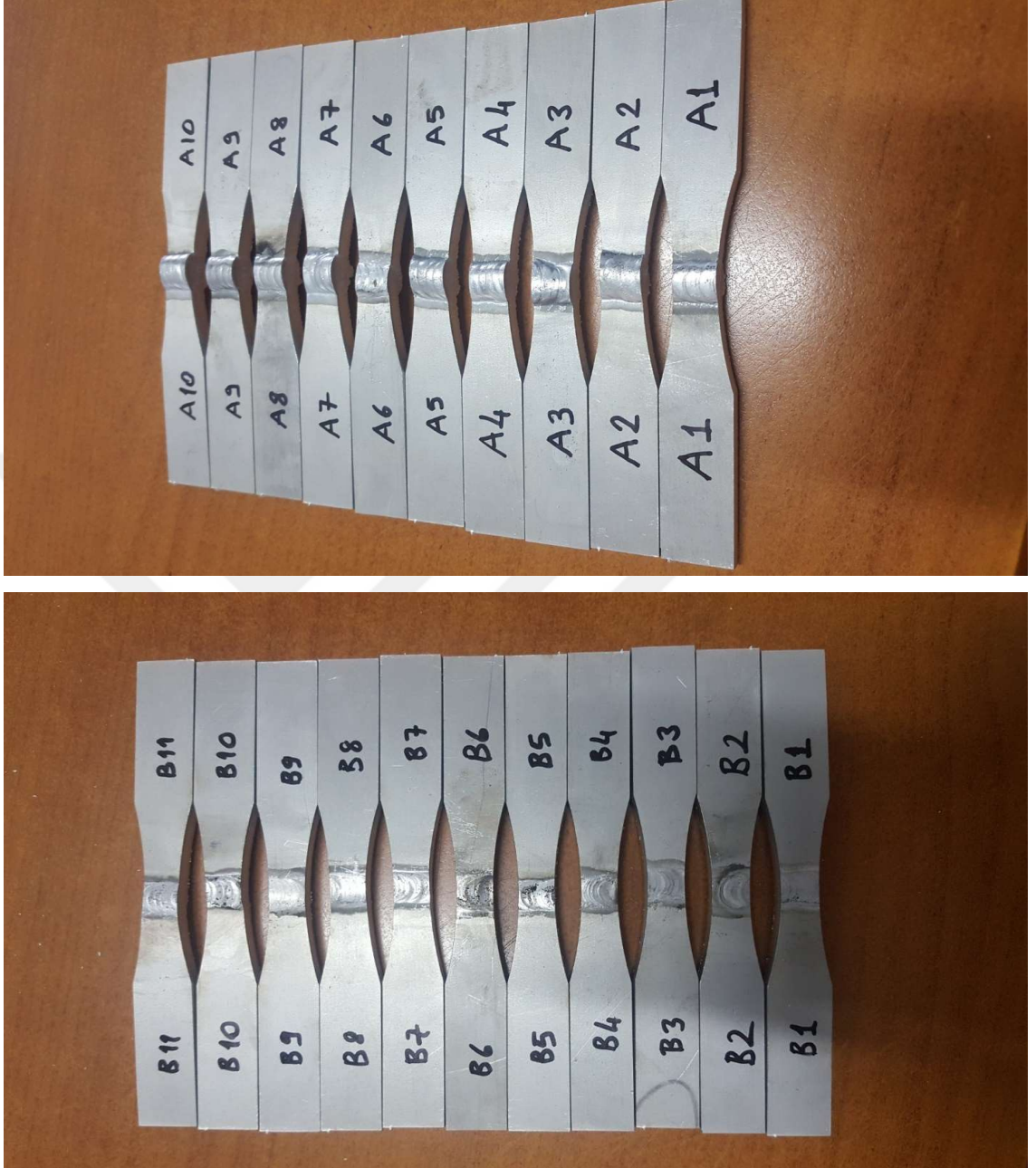


Üretilen mekanik test numuneleri ISO 6892-1 VE ASTM E8 standartlarına göre hazırlanmıştır (Şekil 2.4).



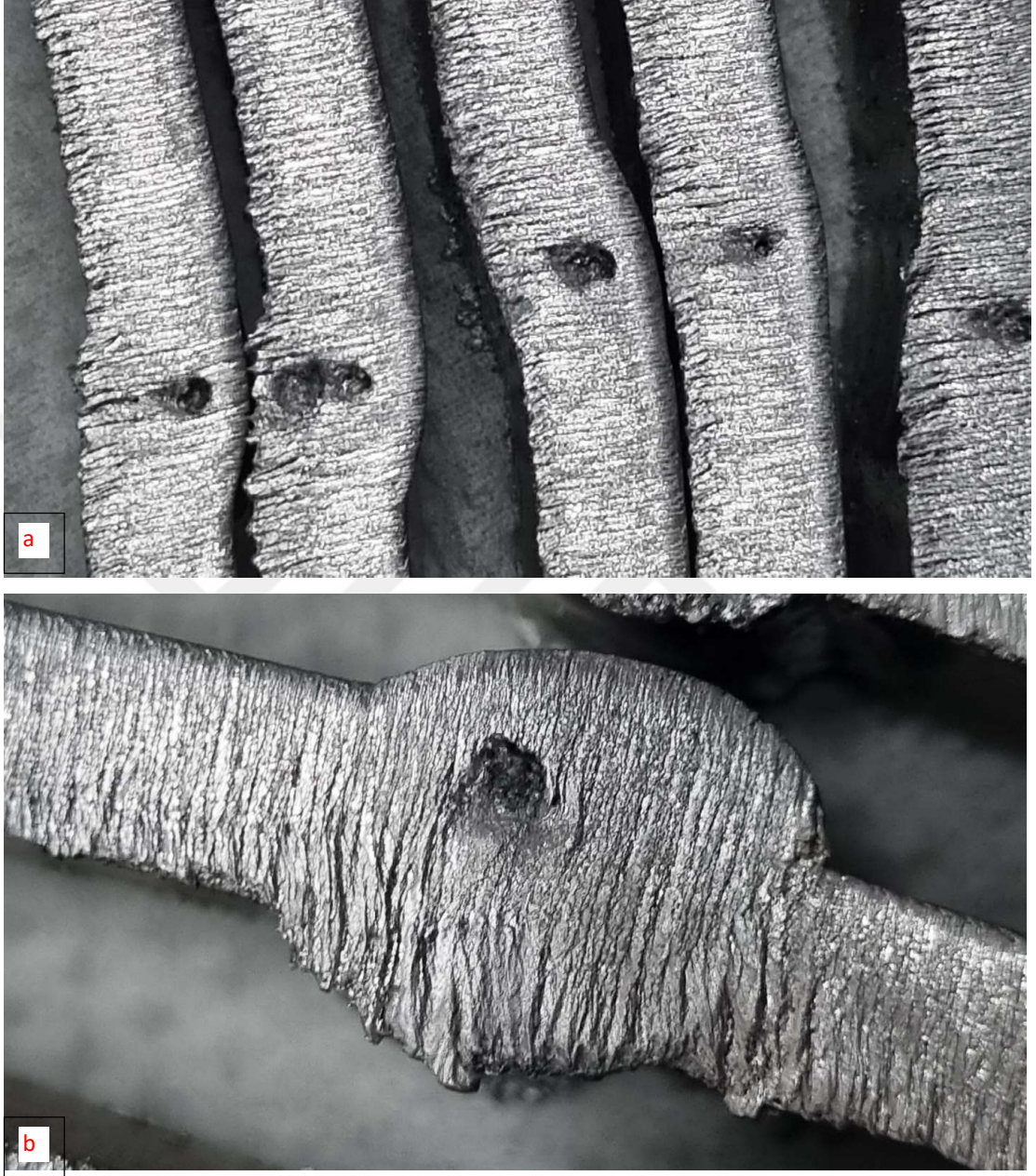
Şekil 2.4 ISO 6892-1 VE ASTM E8 standartlarına göre hazırlanan yorulma test numunesi ölçüleri

Şekil 2.5'te ise her iki metot (a- ilave telli ve b- otojen kaynaklaklı mekanik test numuneleri) ile üretilen yorulma test numuneleri ve ölçüleri gösterilmektedir.



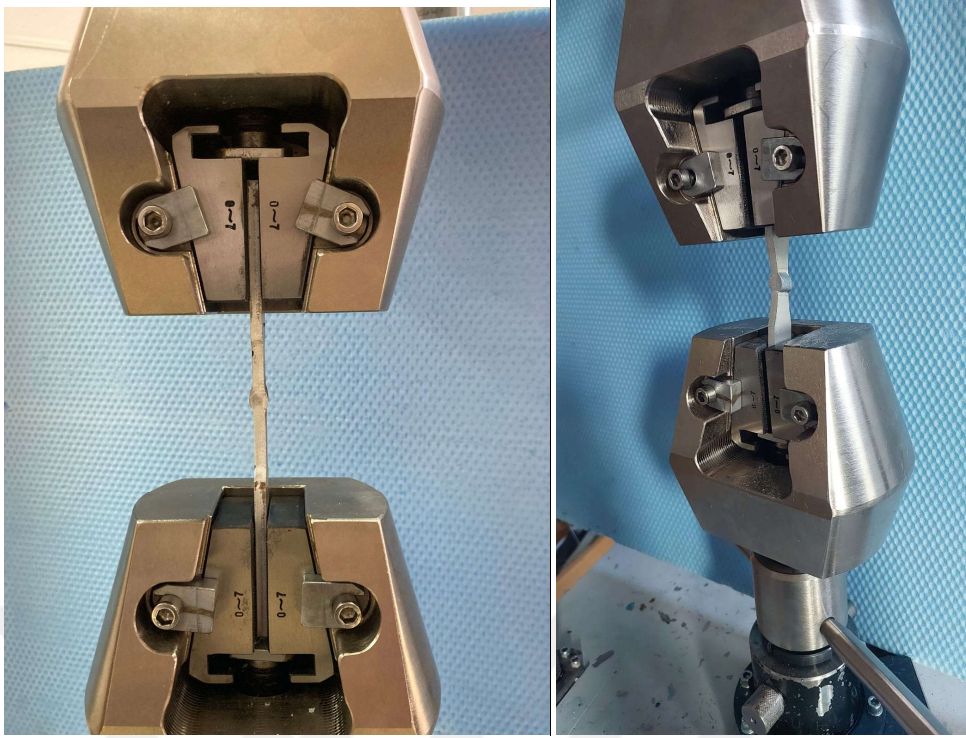
Şekil 2.5 a- Telli kaynaklama yöntemi ile ve b- otojen kaynaklama yöntemi ile üretilen numuneler

Şekil 2.6’da ise her bir üretim yöntemi ile hazırlanmış numunelerin kaynak bölgelerinin de kaynak hatası olan numuneler tespit edilerek ayrılmıştır. İlave kaynak telsiz numunelerde kaynak hatasına daha fazla rastlanmıştır.



Şekil 2.6 Numunelerin kaynak bölgeleri. (a) otojen kaynaklanan b) ilave kaynak telli)

Yorulma testi öncesi numunelerin kaynaklı numunenin çekme testi yapılmıştır (Şekil 2.7). Elde edilen veriler yorulma testindeki gerilmelerin hangi aralıklarda yapılacağını hesaplamalarında kullanılmıştır.



Şekil 2.7 Kaynaklı parçaların çekme testi

Kaynaklı alümiyum numunelerin mekanik özellikleri belirlendikten sonra alümiyum alaşımların yorulma testleri UTEST servo-hidrolik yorulma test cihazı (Şekil 2.8) ile gerçekleştirilmiştir. Test boyunca yük, alaşımlar üzerine döngüsel gerilmeleri oluşturacak üç nokta eğme kuvveti uygulandı. Daha sonra bulunan kuvvet değerleri yorumlanabilmesi açısından gerilme değerlerine dönüştürülmüştür. Deney esnasında uygulanan maksimum yükler, çekme testindeki akma oranlarına göre seçilmiştir ve testler $R= 0.1$ oranında olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Çalışılan alaşımlarımız, yükleme cihazında sürekli olarak yükleme ve boşaltma döngülerine tabi tutulduktan sonra numune kırılana kadar devam edildi (yorulma testi ile detaylı bilgi daha önceki kısımda detaylı olarak verilmiştir).



Şekil 2.8 UTEST servo-hidrolik yorulma test cihazı

Yorulma testin sonunda, numunenin kopmasına bağlı olarak hazırlanan malzemelerin yorulma ömürlerini, kıyaslanması amacıyla Wöhler (S-N) diyagramına dönüştürülmüştür (Mzad, 2022). Elde edilen diyagramlar kullanılarak uygulanan gerilme ve kırılma döngüsü sayısı ile grafiksel olarak aşağıda sunulmuştur. Ayrıca, tez kapsamında 2 farklı kaynaklama metodu ile üretilen numunelerin bieleşme bölgeleri JEOL JSM 5600 markalı taramalı elektron mikroskobu (SEM, Şekil 2.9) ile detaylıca farklı büyütme oranlarında incelenmiştir.



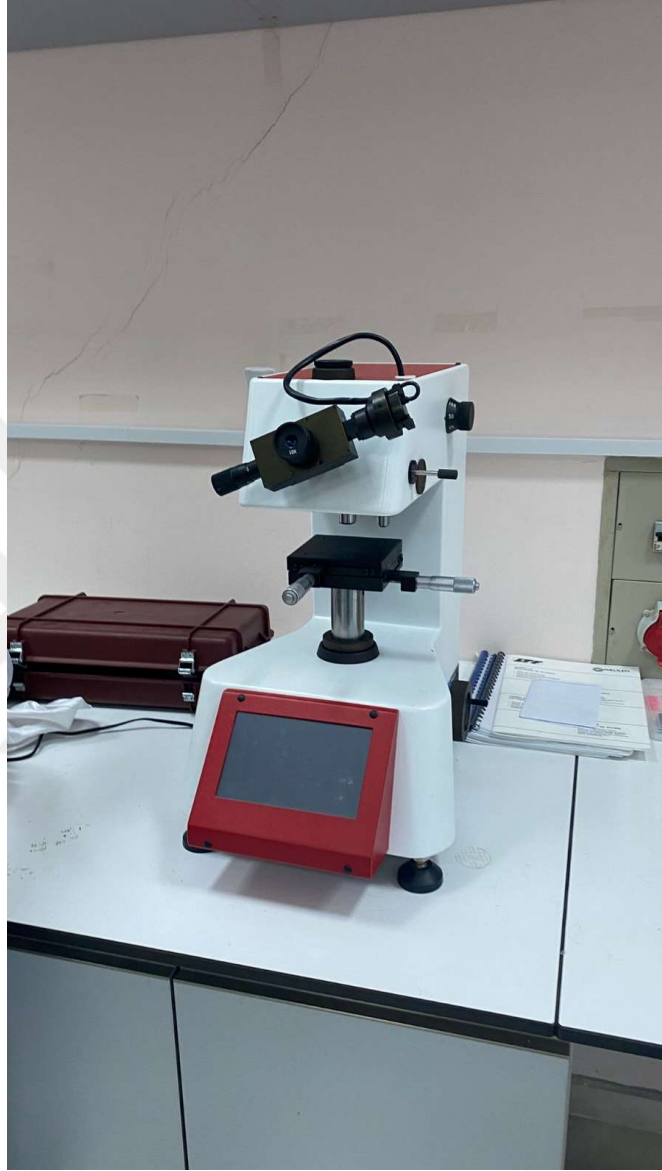
Şekil 2.9 Taramalı elektron mikroskobu görseli (JEOL JSM 5600)

Bu analizde, kaynak bölgelerinin yüzey görünümünün homojen olup olmadığı ve parçacık büyüklük dağılımları dikkatle incelenmiş; yüzey morfolojisindeki düzgünlük ve mikrokristal birleşme yönelimleri belirlenmiştir. Dahası, bu bölgelerde herhangi bir probleme yol açacak (önceki kısımlarda değinilmiştir) gözlemlenen kısmi erime bölgeleri, numunelerin parçacıkların büyüme durumları ve tane yönelimleri kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Son olarak, elde edilen SEM fotoğraflarına göre kaynak çeşidinin malzemelerin yorulma dayanımlarının değişimi üzerine yorumlar yapılmıştır.

Ayrıca, AA 6082 alaşımından üretilen numunelerin sertlik ölçümleri, kullanılan kaynak yöntemine bağlı olarak önemli farklılıklar göstermektedir. Telli ve telsiz kaynaklama yöntemleri ile üretilen numuneler üzerinde gerçekleştirilen sertlik analizleri, kaynak bölgesinin soğuma hızı, ulaşılan maksimum sıcaklık ve toplam kaynak süresinin mekanik mukavemet ve sertlik üzerinde belirleyici bir rol oynadığını bilinmektedir.

Bu farklılıkların temel sebepleri arasında, kaynak bölgesinin yüzey yapısındaki değişimler, matrisin tane yapısındaki modifikasyonlar ve atomların ana matris içerisinde homojen dağılımını etkileyen termal ve metalurjik süreçler yer

almaktadır. Özellikle kaynak sonrası meydana gelen mikro yapısal dönüşümler, tane sınırlarında çökelme veya yeniden kristalleşme gibi mekanizmalar aracılığıyla sertlik değerlerinde belirgin değişikliklere yol açmaktadır.



Şekil 2.10 Galileo Durometria marka sertlik ölçüm cihazı

Ayrıca, farklı soğuma hızları ve sıcaklık değişimleri, kaynak bölgesindeki iç gerilmeleri ve faz dönüşümlerini doğrudan etkileyerek malzemenin sertlik ve mekanik mukavemet özelliklerinde heterojenliğe neden olmaktadır. Bu bağlamda, elde edilen bulgular, kaynak yöntemi seçiminde bu parametrelerin dikkatle değerlendirilmesi gerektiğini ve uygun işlem parametrelerinin belirlenmesinin, kaynaklı yapıların mekanik performansını optimize etmede kritik bir öneme sahip

olduğunu göstermektedir. Tez kapsamında 2 farklı kaynaklama metodu ile üretilen numunelerin mikro sertlik değerleri Galileo Durometria marka cihazla (Şekil 2.10) ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

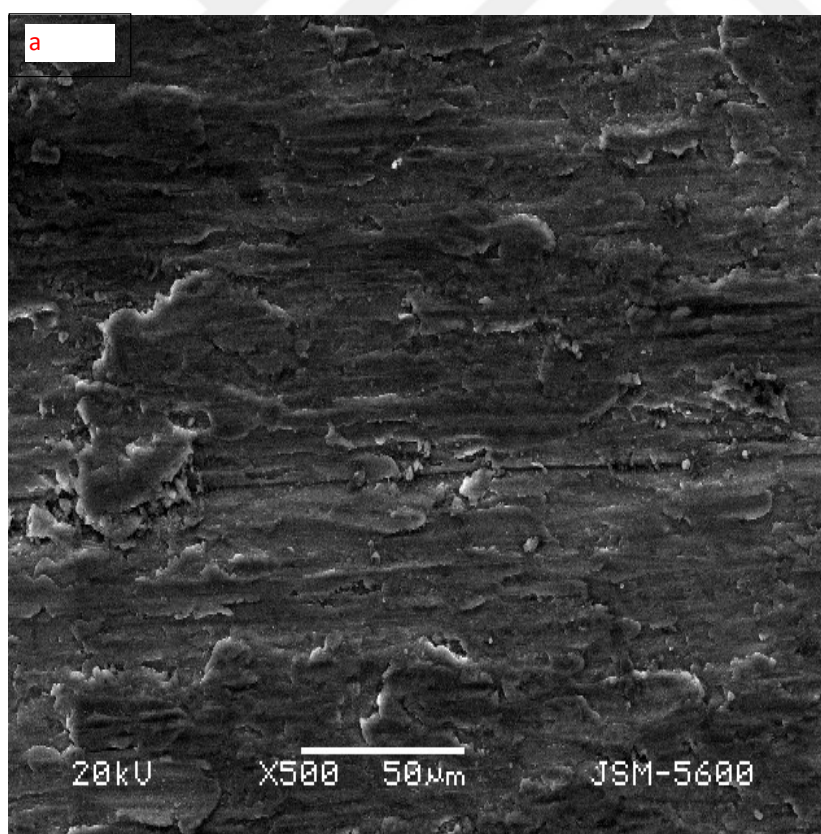
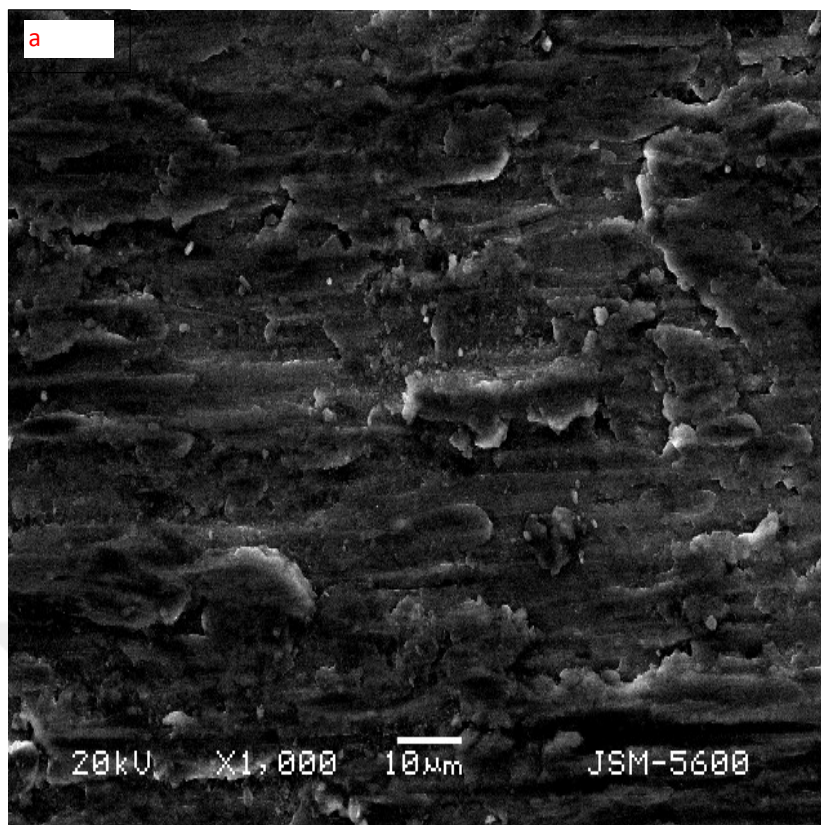


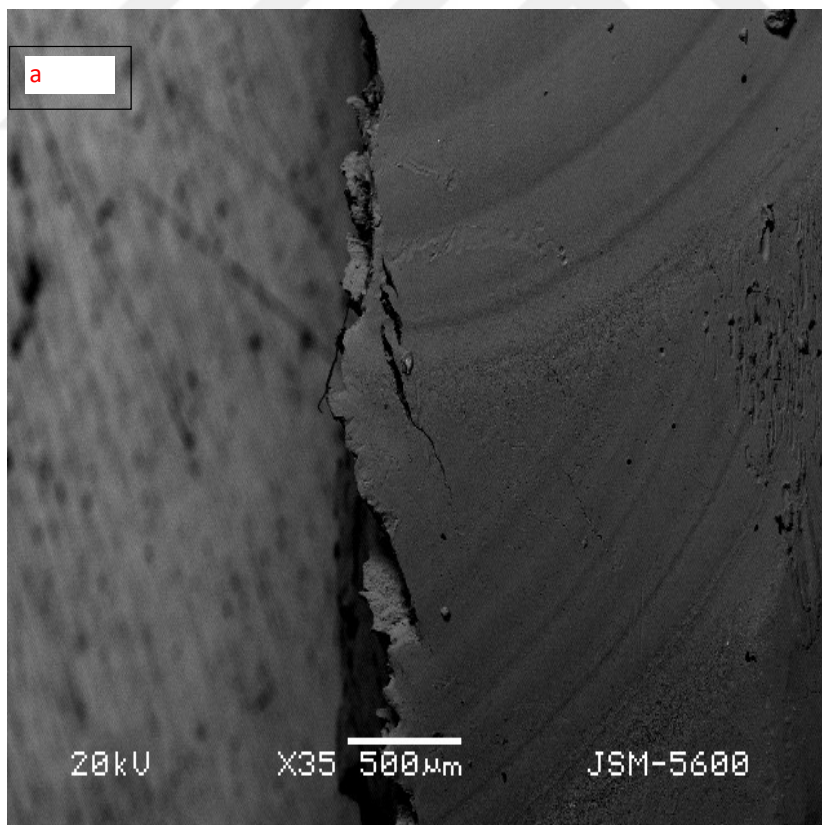
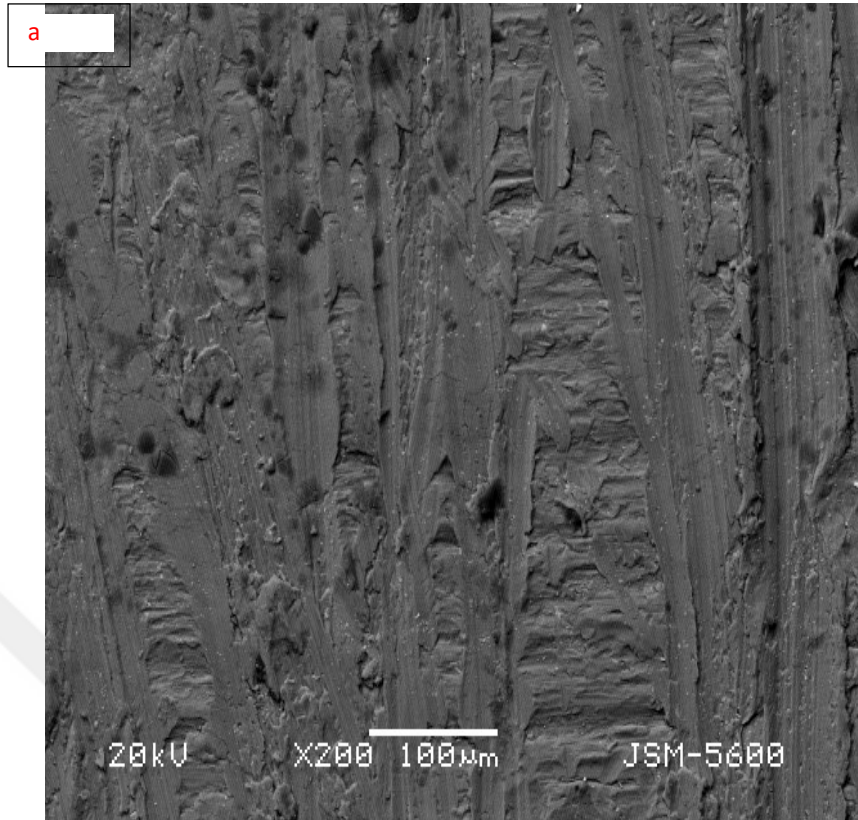
3. BULGULAR

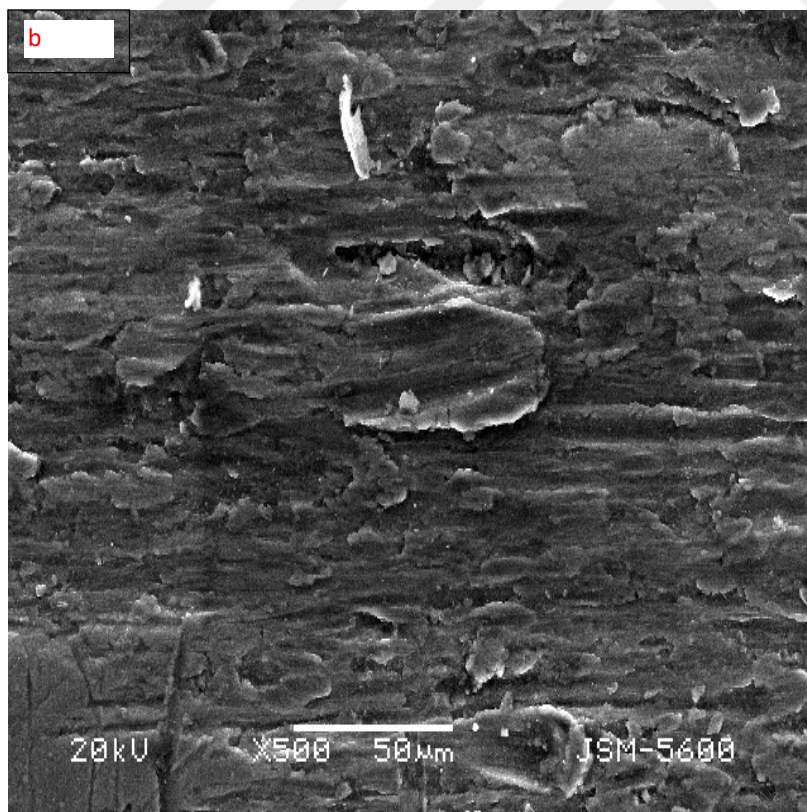
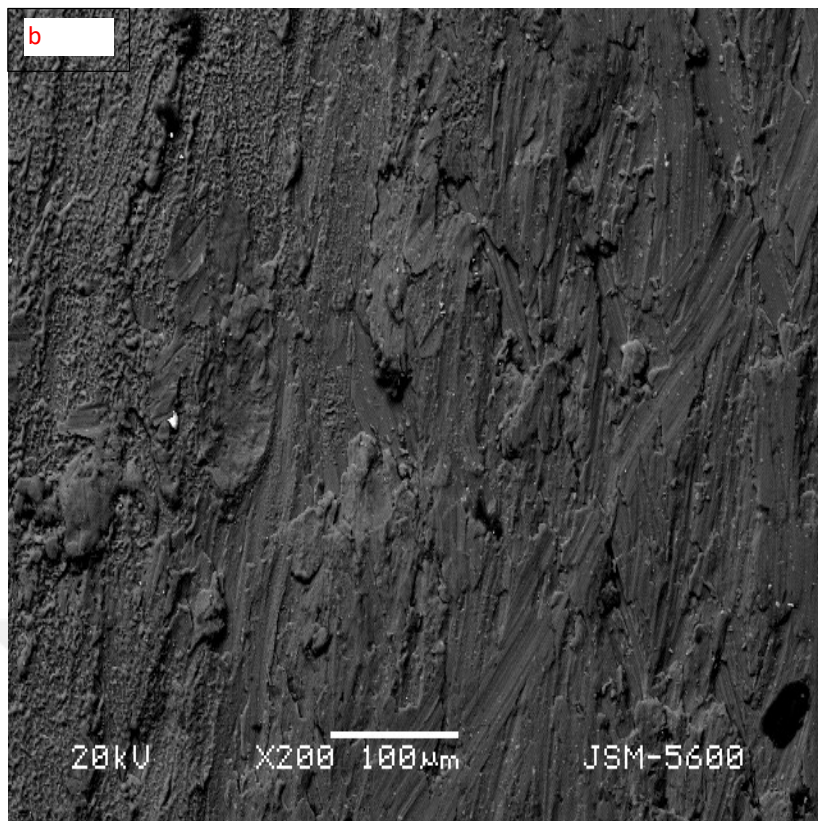
Bu çalışma, mekanik özelliklerin iyileştirilmesi amacıyla AA 6082 alaşım levhalarının haddeleme yönüne paralel olarak ilave telli ve otojen teknikleriyle kaynaklanmasını incelemektedir. Yorulma performansı, UTEST servo-hidrolik yorulma test cihazı ile test edilmiş ve gerilme ile kırılma döngüleri Wöhler (S-N) diyagramları kullanılarak analiz edilmiştir. Kaynaklama yöntemleri ve alaşımlama tekniklerinin yorulma dayanımındaki değişimlerini açıklamak için mikroyapısal analizler, sertlik testleri ve SEM değerlendirmeleri yapılmıştır. Araştırma, ilave telli ve otojen kaynaklama yöntemleri arasındaki performans farklarını ortaya koyarak bu yöntemlerin dayanıklı ve verimli endüstriyel malzeme tasarımlarında nasıl optimize edilebileceğine dair kapsamlı bilgiler sunmayı amaçlamaktadır.

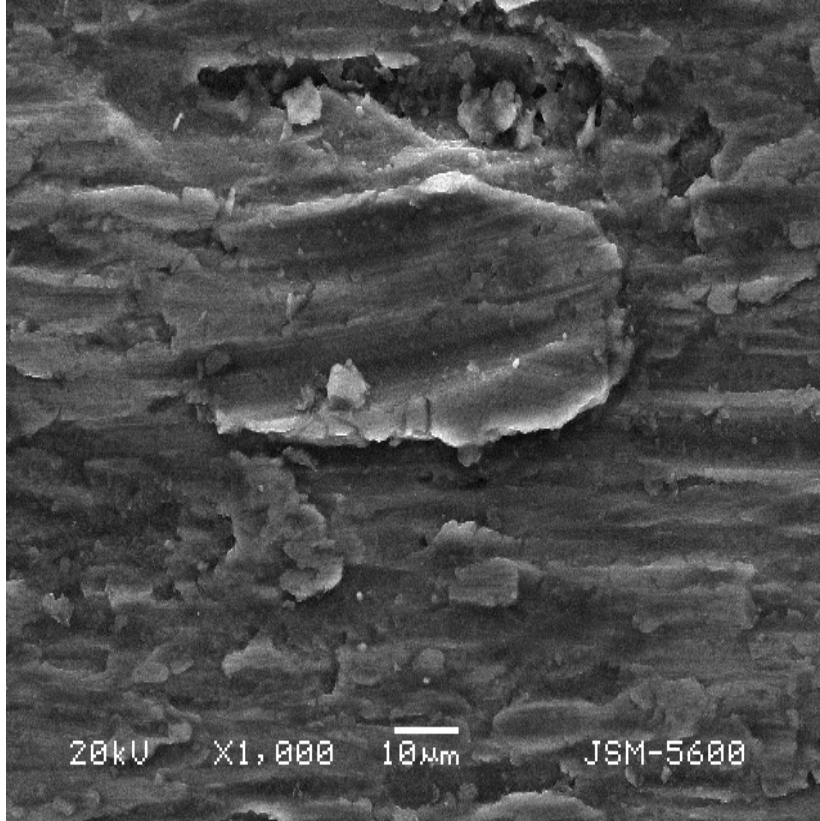
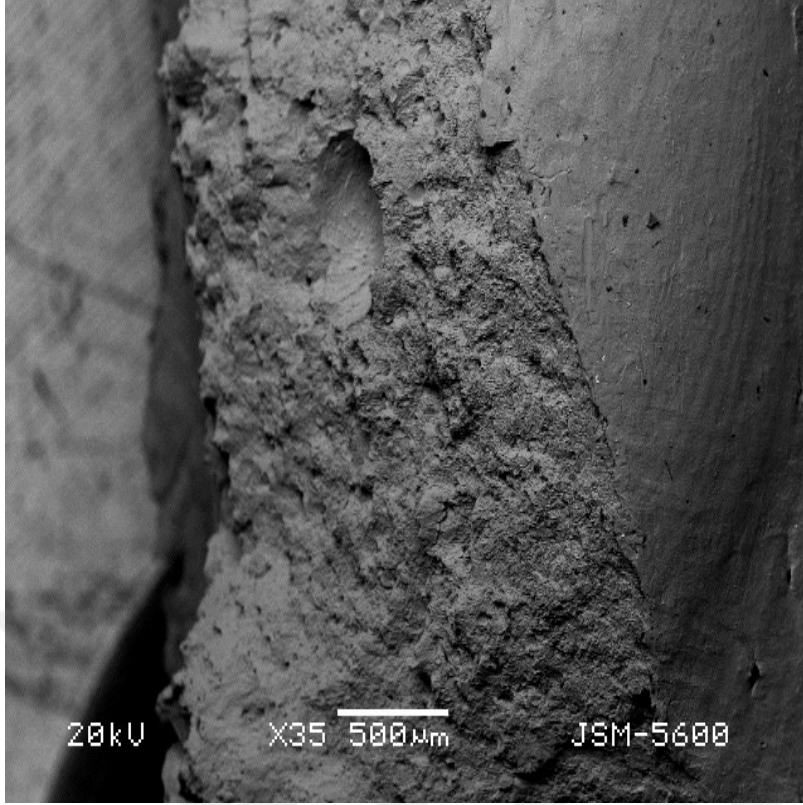
3.1 Taramalı Electron Mikroskobu Ölçüm Sonuçları

Bu çalışmada, haddeleme yönüne paralel olarak mikro ve otojen kaynakla birleştirme teknikleriyle kaynaklanan AA 6082 alaşım levhalarının genel yüzey morfolojisi, tane hizalama dağılımları, tane sınır bağlanma problemleri, gözeneklilik, kusurlar, çatlaklar, boşluklar ve kısmi ergime bölgeleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Analizler, standart taramalı elektron mikroskobu (SEM) mikrografları kullanılarak gerçekleştirilmiş, yüzeyler ikincil elektron görüntüleme modunda 1.000, 500, 200 ve 35 kat büyütmeyle değerlendirilmiştir. SEM görüntüleri, her iki kaynağın da istenilen şekilde oluştuğunu göstermektedir. Ancak malzemelerin incelenen bölgelerinde kaynak yapma metodunun yüzey morfolojisinde önemli bir rol oynadığı ve bunun sonucunda malzemenin mikrokristal birleşme yönelimleri, granüler yapı, tane hizalama dağılımları ve parçacık büyüme özelliklerinde belirgin bir şekilde değişmiş olduğu tespit edilmiştir. Özellikle ilave telli ile üretilen numunelerin kaynak bölgelerinde daha yumuşak geçişler olduğunu belirlenmiştir. Bu bağlamda ilave telli kaynaklama yöntemi ile yapılan dikişlerin genel mekanik özellikleri ve yorulma ömürlerindeki artışı doğrulamıştır.









Şekil 3.1 a- İlave telli kaynaklama yöntemi ile üretilen ve b- Otojen kaynaklama yöntemi ile üretilen AA 6082 döme alaşımların 35, 200, 500 ve 1.000 kat büyütme SEM görüntüleri

3.2 Yorulma Test Sonuçları

Üretilmiş olan numune türlerinin her birinden 2 adet olarak çekme deneyleri ile numunelerin akma değerleri ve uygulanan kuvvet altında akmadaki yer değiştirme belirlendi. Bu değerler Tablo 3.1’de detaylı olarak verilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlara göre, yorulma deneylerine geçildi.

	Akma Gerilmesi (MPa)	Yorulma Gerilmesi (Akma Kuvvetinin %80)	Yorulma Gerilmesi (Akma Kuvvetinin %60)	Yorulma Gerilmesi (Akma Kuvvetinin %40)
İlave Telli	263,418	210,734	140,489	70,245
Çevrim Sayısı		392153	839241	2098547
		202452	844642	2295898
	Akma Gerilmesi (MPa)	Yorulma Gerilmesi (Akma Kuvvetinin %80)	Yorulma Gerilmesi (Akma Kuvvetinin %60)	Yorulma Gerilmesi (Akma Kuvvetinin %40)
İlave Telsiz	226,944	181,555	121,037	60,519
Çevrim Sayısı		70124	571125	1340128
		69441	601188	1369987

Tablo 3.1 Eklemeli ve eklemessiz kaynaklı üretilen AA 6082 malzemelerinin akma kuvveti ve çevrim sayıları

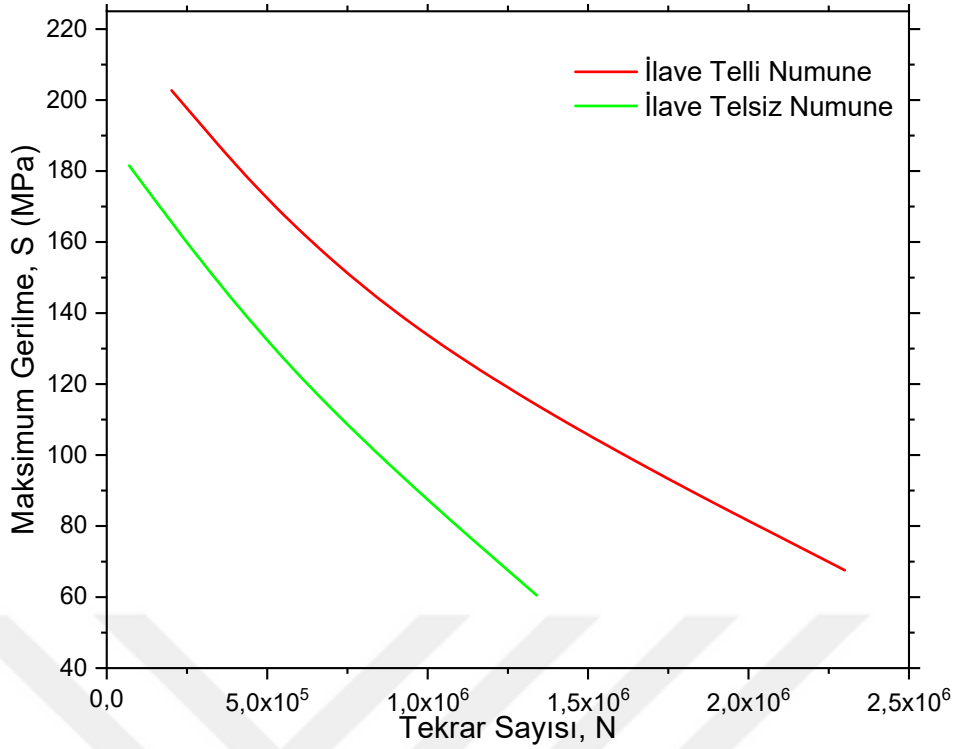
Bilindiği üzere, kaynaklı birleştirmelerde, ısı tesiri altında kalan bölge (ITAB) genişliği arttıkça, kaynaklı birleştirmenin yorulma ömrü önemli ölçüde azalır. Bu durumun temel nedeni, ITAB bölgesinin sertlik ve mukavemet değerlerinin düşük olmasıdır. Özellikle çekirdek çapının artmasıyla ITAB genişliği artmakta ve bu da yorulma ömrünün azalmasına neden olmaktadır.

Yorulma ömrünün azalmasında bir diğer önemli mekanizma ise kaynak bölgesindeki kırılganlığın artması ve çekirdek çapının artmasıyla çentik etkisinin daha belirgin hale gelmesidir. Çentik etkisinin artması, dinamik gerilmeler sırasında bu bölgelerde gerilme yoğunlaşmalarına neden olur. Gerilme yoğunlaşması, çatlakların oluşumunu hızlandırır ve mevcut çatlakların daha hızlı yayılmasına neden olarak yorulma ömrünün kısılmasına yol açar. Yorulma kapsamında gerçekleştirilen tüm deneysel süreç aşağıda gösterildiği gibidir.



Şekil 3.2 Mekanik testler sonunda kırılan numune görüntüleri

Mekanik testler sonucunda elde edilen görüntüler Şekli 3.2’de toplanmıştır. Şekilden görüleceği üzere, ilave telsiz kaynaklı numunelerde kaynak dikişi bölgesinden hasar uğramışken, ilave telli numunelerde ise kaynak ikiye dışında hasar oluşumu gözlenmiştir.



Şekil 3.3 İlave telli ve otojen AA 6082 kaynaklı malzemelere ait yorulma grafikleri

Yorulma deneylerinde kullanılan kuvvetler akmada elde edilen kuvvetlerin belirli oranları altında alınmıştır. Detaylar tartışma bölümünde detaylı olarak aktarılacaktır.

3.3 Sertlik Test Sonuçları

AA 6082 alaşımından üretilen numunelerin sertlik ölçümleri, kullanılan kaynak yöntemine bağlı olarak önemli farklılıklar göstermektedir. Telli ve telsiz kaynaklama yöntemleri ile üretilen numuneler üzerinde gerçekleştirilen sertlik analizleri, kaynak bölgesinin soğuma hızı, ulaşılan maksimum sıcaklık ve toplam kaynak süresinin mekanik mukavemet ve sertlik üzerinde belirleyici bir rol oynadığını bilinmektedir.

Bu farklılıkların temel sebepleri arasında, kaynak bölgesinin yüzey yapısındaki değişimler, matrisin tane yapısındaki modifikasyonlar ve atomların ana matris içerisinde homojen dağılımını etkileyen termal ve metalurjik süreçler yer almaktadır. Özellikle kaynak sonrası meydana gelen mikro yapısal dönüşümler,

tane sınırlarında çökelme veya yeniden kristalleşme gibi mekanizmalar aracılığıyla sertlik değerlerinde belirgin değişikliklere yol açmaktadır.

Ayrıca, farklı soğuma hızları ve sıcaklık değişimleri, kaynak bölgesindeki iç gerilmeleri ve faz dönüşümlerini doğrudan etkileyerek malzemenin sertlik ve mekanik mukavemet özelliklerinde heterojenliğe neden olmaktadır. Bu bağlamda, elde edilen bulgular, kaynak yöntemi seçiminde bu parametrelerin dikkatle değerlendirilmesi gerektiğini ve uygun işlem parametrelerinin belirlenmesinin, kaynaklı yapıların mekanik performansını optimize etmede kritik bir öneme sahip olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada elde edilen sertlik değerleri aşağıdaki tabloda detaylı olarak verilmiştir. Her iki numuneden iki örnek alınarak sertlik deneyler gerçekleştirilmiş olup, yapılan çalışmanın güvenilirliği arttırmak istenmiştir. Kaynak bölgelerinden alınan sonuçlar Tablo 3.2’de elde detaylı olarak verilmiştir. Ayrıca, bu çizelgede, kaynaklı bölgenin sertliklerindeki değişimleri göstermek için numunelerin kaynak bölgelerinden 20 mm soldan ve sağdan ölçüm alınıp ortalama sertlik değerleri de verilmiştir. Detaylar tartışma bölümünde gerçekleştirilecektir.

Numuneler	Kaynaklı Bölge		Kaynaksız Bölge (20 mm soldan ve sağdan)	
Eklemeli	138,1	134,8	99.8	100.4
Eklemesiz	110,0	108,8	111.1	110.6

Tablo 3.2 Eklemeli ve eklemesiz kaynaklı AA 6082 malzemelerin sertlik ölçümleri (H_v)

4. TARTIŞMA

4.1 SEM Görüntüleri

Bu çalışmada, haddeleme yönüne paralel olarak ilave telli ve otojen kaynaklama teknikleriyle kaynaklanan AA 6082 alaşım levhalarının genel yüzey morfolojisi, tane hizalama dağılımları, tane sınır bağlanma problemleri, gözeneklilik, kusurlar, çatlaklar, boşluklar ve kısmi ergime bölgeleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Analizler, standart taramalı elektron mikroskobu (SEM) mikrografları kullanılarak gerçekleştirilmiş, yüzeyler ikincil elektron görüntüleme modunda 35, 200, 500 ve 1.000X kat büyütmeyle değerlendirilmiştir. SEM görüntüleri, her iki kaynağın da istenilen şekilde oluştuğunu göstermektedir. Ancak malzemelerin incelenen bölgelerinde kaynak yapma metodunun yüzey morfolojisinde önemli bir rol oynadığı ve bunun sonucunda malzemenin mikrokristal birleşme yönelimleri, granüler yapı, tane hizalama dağılımları ve parçacık büyüme özelliklerinde belirgin bir şekilde değişmiş olduğu tespit edilmiştir. Özellikle eklemeli kaynak ile üretilen numunelerin kaynak bölgelerinde daha yumuşak geçişler olduğunu belirlenmiştir. Bu bağlamda ilave telli yöntem ile yapılan kaynakların genel mekanik özellikleri ve yorulma ömürlerindeki artışı doğrulamıştır. Daha detaylı olarak SEM görüntüleri, farklı kaynaklama prosedürlerinin hem çekme mukavemeti üzerindeki etkilerinin hem de kırılma yüzeylerinin analiz edilmesine olanak sağlamıştır. Çalışma kapsamında, TAL 4043 kaynak teli kullanılarak dikiş yapılmış numunelerin, telsiz kaynaklama işlemiyle üretilmiş numunelere kıyasla daha yüksek çekme mukavemeti sergilediği belirlenmiştir. Bu sonuçlar, kaynak işlemi sırasında kullanılan telin (içeriğindeki katkı elementleriyle birlikte) mekanik özellikler üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Çekme ve yorulma deneyleri sonrası, numunelerin kırılma yüzeyleri SEM aracılığıyla analiz edilmiş ve mikroyapısal değişiklikler ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir.

Özellikle telsiz kaynaklama ile üretilmiş numunelerin kırılma yüzeylerinde belirgin bir gözenekli ve düzensiz yapı gözlemlenmiştir. Bu gözenekli mikro yapı, tane sınırlarının azalması (taneciklerin kabalaşması) ve malzeme içerisinde homojen olmayan bir mikro yapı dağılımından (hızlı kaynaklama işlemi nedeniyle) kaynaklanmıştır. Gözenekli yapının varlığı, kaynaklı birleştirmenin mekanik

mukavemetini düşürmüş ve kırılma eğilimini artırmıştır. Yine, tane sınırı yoğunluğundaki azalma, malzeme içindeki yük taşıma kapasitesini sınırlayarak düşük mukavemet özelliklerinin temel sebeplerinden biri olarak öne çıkmıştır. Sertlik ölçüm sonuçları da bu bulgularla uyumludur. SEM analizleri, kırılmanın şekil değiştirme kapasitesini ve plastik deformasyon davranışını etkileyen önemli mikroyapısal unsurların varlığını ortaya koymuştur. Gözenekli yapının oluşumu, kaynaklama sırasında uygulanan sıcaklık ve süre parametrelerinin etkisine bağlanmıştır. Bu durum, kaynaklı bölgenin (hem temel matris hem de tel kullanılan kaynaklı bölgeye kıyasla) heterojen bir yapıya sahip olmasına neden olmuştur. Ayrıca, dikiş bölgesinden alınan kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri, numunelerde mikro ölçekte kopmaların (sünme nerede ise yok) mevcut olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, telsiz kaynaklanan numunelerde kırılma mekanizmasının gevrek bir karaktere sahip olduğunu göstermektedir. Gevrek kırılma davranışı, kaynak kökündeki birleşme yüzeylerinde yetersiz birleşme (hızlı kaynaklama nedeniyle) ve boşluklu mikro yapı ile ilişkilendirilmiştir (Cam vd., 2009).

Ek olarak, SEM görüntülerinde kırılma yüzeylerinin belirli bölgelerinde lamelli bir yapı oluşumu gözlenmiştir. Benzer şekilde, alaşım bölgelerinde mikro ölçekte şeritler halinde ayrılmalar tespit edilmiştir. Bu durum, malzemenin mekanik dayanımının düşmesine ve kırılma direncinin azalmasına neden olmuştur. SEM fotoğrafları bize kaynak teli kullanılarak yapılan numunenin dikiş bölgesinde oluşan iç gerilmelerin üzerinde pozitif etkisi olduğunu da göstermektedir. Kaynak alanının da genişlemesi de mukavemet değerindeki artışı desteklemektedir.

Ayrıyeten, eklemesiz kaynaklı numunelerin SEM görüntülerinde, numune yüzeyinde derin çizgisel izler ve yırtılma alanları, yüksek plastisite içeren bir kırılma mekanizmasına bağlı bir durumdur. Benzer olarak, yüzeyde sünek kırılma ve yarı gevrek kırılma özelliklerine bağlı düzensiz ve yırtılma benzeri bir yapı gözlenmiştir. Özetle, düzlemsel kırılma izleri, kaynağın bazı bölgelerinde gevrek kırılma bölgeleri olduğunu göstermektedir. Bunun yanı sıra, eklemesiz kaynaklı numunenin görüntüsünde düzensiz yüzey, pürüzlülük ve mikro boşluklar vardır. Özellikle, kaynak bölgesindeki hızlı ısı girdisi, soğuma hızı ve metalurjik değişimler nedeniyle yüzeyde ciddi porozite ve çatlak oluşumu meydana gelmiştir.

Diğer elde edilen bulgularla birleştirildiğinde, kaynaklama işlemi sırasında kullanılan ilave kaynak teli AA 6082 numunesinin kaynak kalitesi üzerinde önemli

bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Bu bağlamda, tel kullanmanın yanı sıra kayna süresi, sıcaklığı gibi parametrelerin dikkatli bir şekilde optimize edilmesi kaynak kalitesinin artacağını göstermektedir. TAL 4043 kaynak teli ile yapılan dikiş işlemi, daha yüksek çekme mukavemetine sahip numunelerde mikro yapının daha homojen bir şekilde dağılımını sağlamış ve gözenekli yapı oluşumunu büyük ölçüde engellemiştir. Bunun temel nedeni, yavaş dikiş işlemi (daha uzun süre) ile çökelme sertleşmesinin korunması ve kaynak telinden gelen sertleşebilirlik özelliklerine sahip katkı elementlerinin varlığıdır. Bu parametreler sayesinde kaynaklanan bölgede daha yoğun (daha az gözenekli) ve düzenli bir yapı (daha küçük tanecikli ve daha fazla tane sınırına sahip) oluşmuştur. Yoğun mikro yapı ve artan tane sınırlarının varlığı, malzeme içerisinde daha homojen bir mikro yapı dağılımı sağlayarak, kaynaklı birleştirmenin mekanik mukavemetini ve kırılma dayanımını artırmıştır. Özellikle tane sınırlarının fazlalığı, malzeme içindeki yük taşıma kapasitesini artırarak daha yüksek mukavemet özellikleri elde edilmesini sağlamıştır. Şekil 4.3, telsiz kaynaklama yapılan bölgeye kıyasla daha homojen bir mikro yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Daha yoğun yapılar ve artan tane sınırlarının varlığı, kaynak işleminin mikroyapı üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir. Bu durum, kaynaklı birleştirmenin mekanik mukavemetini artırmış ve telli kaynaklama yönteminin metalurjik uyum açısından daha başarılı olduğunu ortaya koymuştur (Fouladi vd., 2017; Naderi vd., 2013; Ma vd., 2008; Öcalır, 2019).

Sonuç olarak, çekme mukavemeti farklılıkları, kaynaklama mekanizmasının (telli-telsiz, çökeltme atomlarının katkısı, hızlı-yavaş işlem vb.) mikro yapı üzerindeki etkileriyle doğrudan ilişkilidir. Gözenekli ve düzensiz yapıların oluşumu, kaynaklı bölgenin mekanik özelliklerini olumsuz etkilerken, uygun kaynaklama yöntemi ile daha sağlam ve homojen yapılar elde edilebilmektedir. Bu bağlamda, yapılan bu çalışma, kaynaklama prosedürlerinin mekanik mukavemet üzerindeki etkilerini anlamak ve optimum kaynaklama koşullarını belirlemek adına önemli veriler sunmaktadır (Öcalır, 2019).

4.2 Yorulma Dayanımı

Yorulmada uygulanacak kuvvet değerleri akma deneylerinden elde edilmiştir. Üretilen numunelere akma kuvvetinin %40'si, %60'i ve %80'i

büyükluğündeki kuvvet uygulanarak yorulma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yorulma deneyinlerini yorumlamadan önce, kısaca elde edilen sonuçları değerlendirelim. Bulgular ve tartışma kısmında verilen tabloda eklemeli ve eklemesiz kaynak ile üretilen AA 6082 numunelere ait akma kuvveti ve akma yer değiştirmesi verilmiştir. İlk olarak akma kuvveti değerlerine bakacak olursak, tabloda eklemeli üretilen numunenin akma kuvveti 8456 N olarak belirlenirken eklemesiz kaynaklı AA 6082 malzemesinin değeri ise 8376 N olarak ölçülmüştür. Bu bulunan ölçüm sonuçları literatürdeki AA 6082-T6 numunesinin akma mukavemet değerlerine göre küçük kalmaktadır. Bunun nedeni kaynak anındaki sıcaklık dağılımının kaynak bölgesinde makroskobik heterojenlik sağlamasındandır (Shi vd., 1998). Bunun yanı sıra, alüminyum kaynaklarının ısı girdisinden dolayı aşırı yaşlanma etkisi de mukavemet üzerine negative etkisi olmuştur. Numunelerin değerleri birbirine oldukça yakın olsa da eklemeli numune daha yüksek değer sergilemesi, kuvvete karşı daha büyük mekanik mukavemet/dayanım sergilediğini göstermektedir. Akma yer değiştirmelerine gelinecek olursa, eklemeli ürün için yer değiştirme 2,04 mm olarak ölçülürken eklemesiz üründe bu değer ise 1,84 mm olarak bulunmuştur. Bu bağlamda, eklemeli ürünün akma kuvvetindeki yer değiştirme miktarı daha yüksek olduğu için sünekliği eklemesiz numuneye göre biraz daha fazla olarak tespit edilmiştir.

Farklı kaynaklama uygulamalarına göre işlenmiş deney numunelerinin S-N eğrileri, Şekil 3.3'te detaylı bir şekilde sunulmuştur. Bu grafikte her iki numuneden 2 örnek alınarak deneyler gerçekleştirilmiş olup, yapılan çalışmanın güvenilirliği arttırmak istenmiştir. Şekil 3.3'teki eğriler, telli ve telsiz dikiş uygulamalarının, malzemenin yorulma dayanımını nasıl etkilediğini ve bu etkilerin belirli kaynaklama koşulları altında nasıl daha belirgin hale geldiğini göstermektedir. Telli kaynak dikişi, telin sağladığı sertleşebilme kabiliyetli yapıştırıcı etki, çökme sertleşmesi mekanizması, tanecik büyüme davranışı, dikiş süresi, porozite oluşumu, sertlik düşüş bölgesinin genişlemesi ve homojen bir mikro yapı dağılımı gibi faktörlerle malzeme üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

S-N eğrileri, genellikle bir malzemenin belirli bir gerilme seviyesinde ne kadar süreyle dayanabileceğini ortaya koyduğundan, bu çalışmada farklı kaynaklama uygulamalarıyla işlenmiş numunelerin yorulma dayanımları karşılaştırılmıştır. Amaç, kaynaklama yöntemine bağlı olarak malzemenin mukavemetinde meydana gelen değişimleri detaylı bir şekilde incelemektir. Bu

bağlamda, AA 6082 alüminyum alaşımının yorulma dayanımı üzerindeki etkiler, farklı kaynaklama yöntemlerine tabi tutulan numune gruplarının S-N eğrilerinin analizi ile belirlenmiştir. Örneğin, kaynaklama yöntemine bağlı olarak telden gelen sertleşebilme kabiliyetli yapıştırıcı etkiler, çökelme sertleşmesi mekanizması, tanecik büyüme, kaynaklama süresi, porozite oluşumu, sertlik düşüş bölgesinin genişlemesi ve mikro yapı homojenliği gibi parametreler incelenmiştir. Bu değişkenlerin AA 6082 alaşımının yorulma sınırını nasıl artırdığı ya da azalttığına ilişkin bilgiler, S-N eğrilerinin eğim ve şekil değişikliklerinden elde edilmiştir.

Elde edilen Şekil 3.3, yorulma dayanım sınırında gözlemlenen değişimleri grafiksel olarak sunmakta ve bu değişimlerin belirli bir matematiksel eğilim gösterip göstermediğini analiz etmektedir. Özellikle kaynak teli kullanılarak yapılan dikişlerin, kaynaklama sürecinde malzeme içerisinde oluşan sıcaklık kaynaklı iç gerilmeleri olumlu yönde etkilediği ve bu etkinin, telsiz yapılan dikişle kıyaslandığında, yorulma sınırındaki artış ile doğrudan ilişkili olduğu gözlemlenmiştir.

Bu veriler, kaynak teli ile sağlanan kimyasal katkıların ve diğer kaynaklama parametrelerinin, AA 6082 alüminyum alaşımı üzerinde oluşturduğu mekanik ve mikro yapısal değişiklikleri anlamak açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle, kaynak teli kullanımının malzemenin yorulma performansı üzerindeki etkileri ve bu etkilerin optimizasyon gereksinimleri, endüstriyel süreçlerin geliştirilmesi için önemli ipuçları sunmaktadır.

Ayrıca, Şekil 3.3'te görüldüğü üzere, telsiz kaynak kullanılması durumunda malzemenin yorulma dayanım sınırında belirgin bir azalma olduğu açıkça gözlemlenmiştir. Bu azalma, kaynaklanan yüzeyde meydana gelen basma kalıntı gerilmeleri ve yüzey pürüzlülüğünün etkileri ile doğrudan ilişkilendirilmiştir. Kaynak sırasında oluşan bu kalıntı gerilmeler ve yüzey morfolojisindeki bozulmalar, yorulma yükleri altında malzemenin dayanımını olumsuz yönde etkileyerek yorulma dayanım sınırının düşmesine neden olmuştur. Basma kalıntı gerilmelerinin yetersiz dağılımı ve pürüzlü yüzeyin oluşturduğu lokal gerilme yığılmaları, yorulma davranışını daha da olumsuz hale getirmiştir (Özerkan, 2018; Jaffery vd., 2013).

Telsiz yapılan kaynaklama ile tel kullanılarak yapılan kaynaklama arasındaki fark değerlendirildiğinde, tel ile yapılan kaynaklama, yorulma dayanım sınırında iyileşme sağlamıştır. Bu bulgu, kaynak sırasında tel kullanımının malzeme

yüzeyinde mikro yapısal iyileştirmeler gerçekleştirdiğini ve bu iyileştirmelerin yorulma performansı üzerindeki olumlu etkilerini ortaya koymaktadır. Tel kullanılarak kaynaklanmış malzemelerde, yorulmanın telsiz kaynaklamaya kıyasla daha yüksek gerilme seviyelerinde gerçekleşebileceği deneysel olarak kanıtlanmıştır (Özerkan, 2018). Bu durum, telin malzeme yüzeyine sertleşebilme kabiliyetli elementler katkısı yapması ve mikro yapısal özelliklerde olumlu yönde değişikliklere yol açması ile açıklanabilir. SEM görüntüleri de yorulma hasarının kaynak yüzeyinde gelişen çatlaktan başladığını tespit etmişlerdir.

Tel kullanılarak yapılan kaynaklama, özellikle dikiş bölgesindeki mikro yapıyı daha homojen hale getirmekte ve gözenek oluşumunu azaltarak dayanım sınırını yükseltmektedir. Bu iyileştirme, kaynak bölgesindeki tanecik sınırlarının yoğunlaşması ve mikro yapının daha düzenli bir şekilde organize edilmesi ile ilişkilidir. Özellikle kaynak telinin sağladığı çökelme sertleşmesi mekanizması ve sertlik düşüş bölgesinin minimize edilmesi, malzemenin yorulma dayanımını artıran önemli faktörler arasında yer almaktadır. Tersine, telsiz kaynaklama yöntemi, bu avantajları sağlamadığından, daha düşük yorulma dayanım sınırları ile sonuçlanmıştır.

Bu deneysel bulgular, kaynaklama işlemi sırasında kullanılan telin, AA 6082 alüminyum alaşım malzemesinin yorulma dayanımında oynadığı kritik rolü açıkça göstermektedir. Tel kullanımı, sadece mikro yapısal düzenlemeleri iyileştirmekle kalmamakta, aynı zamanda malzemenin mekanik performansını da optimize etmektedir. Özellikle, dikiş bölgesindeki basma kalıntı gerilme durumlarının tel ile yapılan kaynaklama sonucu iyileştirilmesi, yorulma dayanımının artışı ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, kaynaklama işleminin tipi ve parametrelerinin doğru bir şekilde optimize edilmesi, AA 6082 gibi mühendislik malzemelerinin mekanik özelliklerini geliştirmek ve endüstriyel uygulamalarda uzun vadeli dayanıklılık sağlamak açısından kritik bir öneme sahiptir.

Sonuç olarak, farklı kaynaklama prosedürleri altında elde edilen S-N eğrileri ve yorulma dayanım sınırındaki değişimlerin analizi, dikiş süreçlerinin (örneğin, tel kullanımı durumunda meydana gelen değişiklikler) ve bu süreçlerle ilişkili parametrelerin, AA 6082 alüminyum alaşımının dayanım özelliklerini nasıl etkilediğini daha kapsamlı bir şekilde anlamamızı sağlamaktadır. Bu tür çalışmalar, endüstriyel uygulamalarda malzeme seçiminden işleme tekniklerinin optimize edilmesine kadar geniş bir yelpazede değerli bir rehberlik sunmaktadır.

Farklı kaynak birleştirme işlemleriyle yapılan incelemelerde, tel kaynak kullanılarak yapılan kaynaklamada yorulma limiti telsiz yapıya kaynak birleştirmede daha yüksek olarak tespit edilmiştir. Bu durum, telli ya da telsiz kaynaklı birleştirmenin yorulma ömrü üzerindeki kritik etkisini ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, kaynak birleştirmede ekstra dolgu materyali olarak tel kullanma AA 6082 alaşımının yorulma performansını arttırmıştır.

4.3 Sertlik Sonuçları

Alaşımın kaynak dikiş bölgelerinde mekanik davranışlar, sertlik ve morfolojik özelliklerde, kaynak işlemi sırasında meydana gelen termal ve mekanik etkiler nedeniyle çeşitli değişiklikler gözlenmektedir. Özellikle, kaynak dikişi erimiş metalin tekrar katılaşmasıyla oluşur. Bu süreçte, hal değişimleri, çökeltilerin yok olması (ana matrise dağılması), tanecik kabalaşması, porozite artışı ve bazı durumlarda faz dönüşümleri gibi etkiler, bölgenin mikro yapısını tamamen değiştirmektedir.

Alüminyum alaşımlarında, kaynak dikiş bölgelerindeki hassasiyet nedeniyle uygulanan sıcaklık ve sürenin, gevrekleşme ve kırılganlık artışı gibi sorunları artırması, dikiş kalitesini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, optimum sıcaklık ve sürede dikiş işlemi gerçekleştirilmelidir. Kaynak bölgesinin soğuma hızı, ulaşılan maksimum sıcaklık ve kaynaklama süresi; bölgenin yüzeysel yapısı, matrisin tanecik yapısındaki değişiklikler ve atomların ana matris içinde homojen dağılımını etkileyen süreçler nedeniyle, mekanik mukavemet ve sertlik üzerinde belirleyici rol oynamaktadır.

Hızlı soğuma durumunda, ana matriste farklı fazların oluşması kaynak dikişinin sertliğini artırabilirken, yavaş soğuma durumunda ise daha yumuşak fazların oluşumu sertlikte azalmaya yol açabilir. Bunun yanı sıra, kaynak sırasında yüksek sıcaklık, kaynak dikişine bitişik ısıdan etkilenmiş bölgeleri (HAZ) de etkiler. Bu bölgelerde tam erime gözlenmemekle birlikte, mikro yapıda tane büyümesi, karbür çözünmesi veya yeniden çözünme gibi değişiklikler meydana gelebilir. Bu değişiklikler, bazen temel malzemeden daha yumuşak veya tavlama etkisine bağlı olarak daha sert bir yapı oluşmasına neden olabilir.

Bu çalışmada, dikiş bölgesinde yalnızca TAL 4043 kaynak teli kullanılması ve kullanılmaması durumuna bağlı olarak, kaynak bölgesinin yorulma kırılması, mekanik sertlik ve morfolojik yapısı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, kullanılan tel malzemenin, ısıtılma işlem sonrası sertlik ve mukavemeti düşen T6 fazlı alüminyum alaşımında çökelme sertleşmesini artırarak alaşımın sertlik ve mukavemet değerlerini iyileştirdiğini göstermiştir. TAL 4043 kaynak telinden temel matrise katılan sertleşebilir elementler (içyapı kimyasal kompozisyon), çökelme sertleşmesi oluşturarak dislokasyon hareketini engellemiş ve böylece malzemenin sertlik ve mukavemetini artırmıştır.

Daha yavaş kaynak işlemi, matrisin homojen olmayan kristalleşmesine ve mukavemet ile sertliğin artmasına neden olmuştur. Kaynaklama süresinin, dikiş bölgelerinin mukavemeti ve sertliği üzerindeki etkisi literatürde de bilinmektedir. Buna karşın, daha hızlı bir kaynak işlemi, çözünmüş fazların homojen olmayan bir şekilde kristalleşmesini engellemekte ve çökelme sertleşmesinin etkisini artırmaktadır. Kaynak teli kullanılmadan yapılan işlemlerde, daha düşük sertlik ve mukavemet değerleri gözlemlenmiş olup, bu durum çökelme sertleşmesinin tam olarak sağlanamamasından kaynaklanmaktadır.

Sertlik ve mukavemet değerlerindeki değişimin bir diğer nedeni ise kaynaklama sırasında porozite oluşumudur. Telsiz yapılan kaynaklama işlemlerinde daha fazla porozite oluştuğu, taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleriyle de doğrulanmıştır. Artan porozite, AA 6082 alüminyum alaşımının kaynak bölgesinin yapısal bütünlüğünü olumsuz etkilemiş, ancak TAL 4043 kaynak teli kullanımıyla bu porozitelerin dolması, bölgenin yoğunluğunu artırmıştır. Böylece, sertlikteki düşüş bölgesinin genişliği daralmış ve mukavemete pozitif katkı sağlanmıştır.

Tel kullanılarak yapılan kaynaklama işlemlerinde, sertleşebilir katkı elementleri sayesinde (içyapı kimyasal kompozisyon), çökelme sertleşmesi yeniden aktive edilmiş, bu durum mekanik mukavemet ve sertliği telsiz kaynağa göre önemli ölçüde artırmıştır. Ayrıca, kaynaklama süresi, matrisin tanecik büyüklüğü dağılımını etkilemiş ve tel kullanımıyla daha küçük tanecik boyutları elde edilmiştir. Bu durum, yapının mukavemet ve sertlik değerlerini artırmıştır. Son olarak, kaynak telinden gelen sertleşebilir kabiliyetli kimyasal kompozisyonlar AA 6082 alüminyum alaşımının kaynağa bağlı oluşan iç gerilmeler üzerinde pozitif etkisi de vardır.

Numerik değerlere bakacak olursak (Tablo 3.2), eklemeli kaynakla üretilen AA 6082 numunesinin kaynak bölgesinin mikrosertlik değeri seçilen her iki numune için 138,1 ve 134,8 (H_v) olarak bulunmuştur. Bilindiği zere AA 6082'nin sertlik değeri 115 (H_v) civarındadır. Bu bağlamda eklemeli kaynaklı bölgede %20 civarında bir mukavemet artışı gzenmektedir. Ekleme-siz kaynaklı numunede ise bu değer 110 ve 108,8 olarak tespit edilmiştir. Burada da yaklaşık %5 değerinde bir mekanik dayanım kaybı gözlenmektedir. Kaynaklı bölgelerin 20 mm solundan ve sağından alının değerle bakılacak olursa eklemeli kaynaklamada göreceli olarak yavaş soğumaya dayalı bir düşüş gözlenmektedir.

Sonuç olarak, TAL 4043 kaynak teli kullanımı, çökelme sertleşmesi, tanecik büyümesi, dikiş süresi, porozite oluşumu ve mikro yapı özellikleri üzerindeki etkileriyle kaynak dikişi bölgelerinin mekanik mukavemetini ve sertliğini önemli ölçüde iyileştirmiştir. Bu bulgular, AA 6082 alüminyum alaşımının endüstriyel uygulama kapasitesini artırarak daha geniş bir kullanım alanı sunmaktadır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışma kapsamında ekstrüzyon ile üretilen parçaların imalatında çokça tercih edilen haddelenmiş alüminyum alaşım ailesinin 6xxx serisine ait olan AA 6082 alaşım levhalarını ilave telli ve otojen kaynaklama ile haddeleme yönüne paralel (akma, çekme ve yorulma ömürlerinin dik yönde kesilene göre daha yüksek olması sebebi ile) olacak şekilde ilave telli ve otojen teknikleri kullanılarak kaynakladık. Son ürünler su jeti kesme imalat yöntemi hazırlanmıştır. Farklı kaynaklama ile oluşturulan dikişlerin, AA 6082 malzemesinin temel mekanik performans özellikleri üzerine etkileri servo-hidrolik yorulma test cihazı kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlara göre, numunelerin kırılmasıyla elde edilen veriler ışığında malzemelerin yorulma ömürleri detaylandırılmıştır. Bu analiz, Wöhler (S-N) diyagramı kullanılarak uygulanan gerilme değerleri ile kırılma döngüsü sayısının grafiksel olarak sunulmasıyla gerçekleştirilmiştir. Araştırmada, kaynaklama yöntemlerine bağlı olarak değişen yorulma dayanımlarının, malzemelerin hangi fiziksel, yüzeysel ve mekanik özelliklerinden kaynaklandığı detaylı bir şekilde incelenmektedir. Ayrıca, kullanılan kaynak tekniklerinin AA 6082 haddelenmiş alüminyum alaşımının performansı üzerindeki etkileri mikroyapısal analizler ve sertlik ölçümleri gibi yöntemlerle derinlemesine değerlendirilmiştir. Bunun yanı sıra, tez kapsamında üretilen numunelerin alaşımla bölgeleri SEM analizleri ile incelenmiş ve SEM sonuçlarına göre malzemelerin yorulma dayanımlarının neden değiştiği üzerine yorumlar yapılmıştır. Elde edilen tüm deneysel veriler bir arada yorumlanarak ilave telli ve otojen kaynaklama yöntemleriyle üretilen parçaların performans farklılıkları açıkça ortaya konulmuştur. Sertlik ölçüm sonuçlarına göre, eklemeli kaynak yöntemiyle üretilen AA 6082 numunelerinin kaynak bölgesinde sertlik değerleri sırasıyla 138,1 ve 134,8 olarak belirlenmiştir. Bu değerler, AA 6082 alaşımının ortalama sertlik değeri olan 115'in yaklaşık %20 üzerinde bir artış gösterdiğini ortaya koymaktadır. Yorulma deney sonuçlarına göre, eklemeli olarak üretilen AA 6082 numunesinin akma kuvveti 8456 N iken, eklemesiz kaynaklı numunenin akma kuvveti 8376 N olarak ölçülmüştür. Değerler birbirine oldukça yakın olmakla birlikte, eklemeli numunenin daha yüksek akma kuvvetine sahip olması, mekanik mukavemetinin daha yüksek olduğunu göstermektedir. Akma yer değiştirme değerleri incelendiğinde, eklemeli üretilen numunenin yer değiştirme miktarı 2,04 mm,

eklemesiz üretilen numunenin ise 1,84 mm olarak belirlenmiştir. Bu durum, eklemeli numunenin daha fazla deformasyon sergilediğini ve sünekliğinin eklemesiz numuneye göre daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, eklemeli üretim yönteminin malzemenin mekanik özellikleri üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu araştırma, özel alaşımlar ve kaynaklama tekniklerinin endüstriyel uygulamalarda nasıl daha verimli ve dayanıklı malzeme tasarımlarına dönüştürülebileceğine dair kapsamlı bir anlayış sunmayı amaçlamaktadır. Sonuçlar, malzeme mühendisliği ve üretim süreçlerinde yenilikçi stratejiler geliştirilmesine olanak sağlayarak bu alandaki bilimsel ve endüstriyel ilerlemelere katkı sağlamaktadır.

Aynı zamanda, farklı malzeme kombinasyonlarının özelliklerinin dikkatli bir şekilde analiz edilmesi ve uygun seçimlerin yapılması, kaynaklı birleştirmelerin hizmet ömrünün uzatılmasında etkili olacaktır.

6. KAYNAKLAR

Akça, H. (2006). *Tig Yöntemiyle Kaynak Edilen Alüminyum ve Alaşımlarının Mikro Yapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Alüminyum, <http://tr.wikipedia.org/wiki/Al%C3%BCminyum> (son erişim tarihi: 11.03.2025)

American Alumni Association (AAA), <http://aaa.net.bd/> (son erişim tarihi: 11.03.2025)

ASM Handbook, (1991). Volume IV, *Heat Treating*.

Avşar, M. (2011). *Yaşlandırma Parametrelerinin AA 6061 Alüminyum Alaşımının Mekaniksel Özelliklerine ve Şekillendirmeye Olan Etkisinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi. Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Cam, G., Gucluer, S., Cakan, A. and Serindag, H. T. (2009). Mechanical Properties of Friction Stir Butt-Welded Al-5086 H32 Plate. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 40 (8), 638–642.

Cirik, E. (2007). *Anodik Oksidasyon İşleminin 7075-T6 Alüminyum Alaşımının Yorulma Davranışına Olan Etkisinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Çimenoglu, H. ve Kayalı, E. S. (1986). *Malzemelerin Yapısı ve Mekanik Davranışları. İTÜ Metalürji Müh. Bölümü Basım*, İstanbul.

Demirtaş, H. (2009). *6061 Alüminyum Alaşımlarında Ara Verilerek Yapılan Yaşlandırma İşleminin Malzeme Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi. Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Doruk, E. (2015). *AA 6082 Alüminyum Alaşımının Yorulma Davranışı Üzerine Temper Durumunun Etkisi* [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Doruk, E. ve Pakdil, M. (2016). Effect of Tempering Conditions on The Fatigue Behavior of an AA 6082 Aluminum Alloy. *Materials Testing*, 58(6), 542–546.

Er, M. (2006). *Yüksek Frekanslı, Genlik Ayarlı Eğilme Yorulması Test Cihazı Tasarımı ve 1100-H14 Alüminyum Levhasının Eğilme Yorulması Davranışının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Eryürek, İ. B. (1993). *Hasar Analizi. İTÜ Makine Fakültesi Makine Malzemesi ve İmalat Teknolojisi Anabilim Dalı*.

Fakioğlu, A. (2012). *Yaşlandırılan AA 7075 Alüminyum Alaşımlarının Yorulma Davranışlarının İncelenmesi* [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Fouladi, S., Ghaşemi, A. H., Abbasi, M., Abedini, M., Khorasani, A.M. and Gibson, I. (2017). The Effect of Vibration During Friction Stir Welding On Corrosion Behavior, Mechanical Properties, and Machining Characteristics of Stir Zone. *Metals*, 7(10), 1–14. <https://doi.org/10.3390/met7100421>

Güleryüz, K. (2011). *Deformasyon Yaşlanmasının AA 7075 Alaşımının Mekanik Özelliklerine ve Aşınma Davranışına Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi. Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Hüseyinoğlu, M. ve Tosun, N. (2009). *Effect of Minimum Quantity Coolant on Surface Roughness in Milling of 7075 Al Alloy* [Sözlü sunum]. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, Karabük, 13–15.

Jaffery, H. I. S., Ali, L., Khan, M., Alam, K., Ahmed, R. and Rehman, M. (2013, September 24-25). *Statistical Analysis of the Effect of Machining Parameters on Fatigue Life of Aerospace Grade Aluminium Alloy (AA 6082 T6)*, Proceedings of the 11th International Conference on Manufacturing Research (ICMR2013), Cranfield University.

Karcı, A., (2002). *2024-T3 Al alaşımın Tek Aşırı Yük Altında Yorulma Davranışı*, Yüksek Lisans Tezi. Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Kaufman J. G. and Altenpohl D. G. (1998). *Aluminum: Technology, Applications, and Environment, Hardcover*.

- Kaya, I. (2005). *Metallurji ve Malzeme Mühendisi Al 7075 Alaşımının Şekillenme ve Isıl İşleme Özelliklerinin İyileştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kayalı, E. S., Ensari, C. ve Dikeç, F. (1978). Metalik Malzemelerin Mekanik Deneyleri. *İ.T.Ü. Metallurji ve Malzeme Bölümü*.
- Kıratlı, N., Yetgin, H. S. ve İnci, M. (2006). The Examination of Metallurgical Properties of Welded 6351 Aluminum Alloys with Inert Gas Methods. *Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11, 165-168.
- Kumru, N. (2007). *Etial-141, 145 ve 160 Tipi Döküm Alüminyum ile Plaka Tipi Alüminyum Malzemeler İçin Yorulma Makinası Tasarımı ve Eğilmeli Yorulma Davranışlarının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi. Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Li, J., Peng, Z., Li, C., Jia, Z. Chen, W., and Zheng, Z. (2008). Mechanical Properties, Corrosion Behaviors and Microstructures of 7075 Aluminium Alloy with Various Aging Treatments, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 18, 755–762.
- Lipinska, M., Kooijman, A., Snizek, L., Szachogluchowicz, I., Torzewski, J., Gonzalez-Garcia, Y. and Lewandowska, M. (2024). The Influence of Microstructure Evolution on the Mechanical and Electrochemical Properties of Dissimilar Welds from Aluminum Alloys Manufactured Via Friction Stir Welding. *Metallurgical and Materials Transactions A-Physical Metallurgy and Materials Science*, 55(11), 4373–4390.
- Ma, Z., Pilchak, A., Juhas, M. and Williams, J. (2008). Microstructural Refinement and Property Enhancement of Cast Light Alloys Via Friction Stir Processing, *Scripta Materialia*, 58, 361–366. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2007.09.062>
- Mitchell, I. (2004). *Residual Stress Reduction During Quenching of Wrought 7075 Aluminum Alloy*, Yüksek Lisans Tezi. The Faculty of Worcester Polytechnic Institute.
- Msomi, V. and Moni, V. (2022). The Influence of Materials Positioning on Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded AA 5083/AA 6082 Dissimilar Joint. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 8(2), 2087–2101.
- Mzad, H. (2022). Experimental Investigation of the Mechanical Behavior of Honeycomb Sandwich Composite under Three-Point Bending Fatigue. *Materials Physics and Mechanics*, 48(2), 217–231.
- Naderi, M., Abbasi, M. and Saeed-Akbari, A. (2013). Enhanced Mechanical Properties of a Hotstamped Advanced High-Strength Steel Via Tempering Treatment. *Metall. Mater. Trans. A*, 44, 1852–1861. doi: 10.1007/s11661-012-1546-1
- Onaran, K., (1999). Malzeme Bilimi. *Bilim Teknik Taymevi*.
- Öcalır, Ş. (2019). *Farklı İki Malzemenin Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilmesinde Kaynak Parametrelerinin Bağlantının Mekanik Özelliklerine ve Korozyon Direncine Etkilerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi. Tarsus Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Önal, G. ve Avcı, A. (2009). Yüzey Çatlaklı 5086 Al-Mg Alaşımının Eksenel Yorulma Çatlak İlerleme Davranışı. *Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Teknik-Online Dergi* 8 (3), 144–147.
- Öz, Ö. (2007). *Yaşlandırma ısı işleminin AA7075 malzemeli dikdörtgen plağın burkulma yükü üzerine etkisi*, Yüksek Lisans Tezi. Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Zonguldak.
- Özdemir, N. Ö. (2009). *Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Yorulma Mekaniği ve Uygulamaları, Bitirme Çalışması*. Karadeniz Teknik Üniversitesi.
- Özerkan, H. B. (2018). Tornalamada Oluşan Yüzey Pürüzlülüğünün Yorulma Ömrüne Etkisinin Teorik Değerlendirilmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(2), 189–198, (2018).
- Pakdil, M., Çam, G., Koçak, M. ve Erim, S. (2011). Microstructural and Mechanical Characterization of Laser Beam Welded AA 6056 Al-alloy”. *Materials Science and Engineering: A*, 528(24), 7350–7356.

Sakin, R. ve Er, M., (2010). 1100-H14 Alüminyum Alaşımının Düzlemsel Eğme Gerilmeli Yorulma Davranışının İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25 (2), 213–223.

Sharma, D. and Bhushan, R. K. (2022). Microstructure analysis of AA6082/Si3N4 and AA6082/SiC composites. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 94(2), 154–162.

Shi, Y., Han, Z. and Fu, J. (1998). Effects of Weld Strength Undermatch on Fracture Toughness of HAZ Notched Weldments in A HSLA Steel. *International Journal of Fracture*, 91, 349–358. <https://doi.org/10.1023/A:1007411221854>

Soyano, H. and Matsumine, H. (2023). Nipple Shield Made from a Thermoplastic with Aluminum Properties. *Plastic and reconstructive surgery*, 11(3), 4855.

Surendarnath, S., Ramesh, G., Ramachandran, T., Dharmalingam, R. and Murugapoopathi, S. (2023). Dry Sliding Wear Behavior of Aluminum Alloy 6082-SiC Composites Through Ex-Situ Casting Process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J-Journal of Engineering Tribology*, 237(8), 1680–1689.

The Aluminium Association, (1988). Aluminium Statistical Review.

Tunc, O., Kacar, I., and Ozturk, F. (2021). Investigation of forging performance for AA6082. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 117(5-6), 1645–1661.

Ün, H. (2007). Malzeme bilgisi ders notları” Pamukkale Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü.

Vusa, V. R. and Budarapu, P. R. (2023). Impact Analysis of Thin-Walled Cylindrical Tubes. *International Journal of Computational Methods*, 20(06), 2143007.

Weissbach, W. (1998). Malzeme Bilgisi ve Muayenesi. (Anık, Selahaddin; Anık, E. S., ve Vural, M, Çev.), Birsen Yayınevi.

Yeni, Ç., Sayer, S., ve Pakdil, M. (2009). Comparison of Mechanical and Microstructural Behaviour of TIG, MIG and Friction Stir Welded 7075 Aluminium Alloy. *Kovove Materialy*, 47(5), 341–347.

Yılmaz, E. (2010). *Etial 180 alüminyum alaşımının işlenmesinde kesici takım geometrişi ve kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkileri*, Yüksek Lisans Tezi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Yorulma, <http://tr.wikipedia.org/wiki/Yorulma> (son erişim tarihi: 12.03.2025)

Zeytin, H. K., Teymur, B. ve Arısoy, O. (1999, Ekim14-15). *Alüminyum Alaşımları Otomotiv Endüstrisinde Uygulamaları ve Geleceği*, Uluslararası Döküm Kongresi.

Zhou, Z. W., Gong, H. Y., You, J., Liu, S. B. and He, J. L. (2021). Research on Compression Deformation Behavior of Aging AA 6082 Aluminum Alloy Based on Strain Compensation Constitutive Equation and PSO-BP Network Model. *Materials Today Communication*, 28, 102507.