

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

5083 SERİSİ ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA LAZER
WOBBLE HAREKETİ İLE GÖZENEKLİLİĞİN AZALTILMASI

NUR BENUŞE YILDIZ

KOCAELİ 2023

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI ADI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

5083 SERİSİ ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA LAZER
WOBBLE HAREKETİ İLE GÖZENEKLİLİĞİN AZALTILMASI

NUR BENUŞE YILDIZ

Prof.Dr. Muharrem YILMAZ
Danışman, Kocaeli Üniv.

.....

Dr. Öğr. Üyesi Enbiya TÜREDİ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

.....

Dr. Öğr. Üyesi Emine GÜNDOĞDU İŞ
Jüri Üyesi, İstanbul Gedik Üniv.

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 05.07.2023

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

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

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

beyan ederim.

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

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

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

NUR BENUŞE YILDIZ

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

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

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

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

- ☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- ☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.
- ☒ Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

NUR BENUŞE YILDIZ

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması otomotivde ve yüksek hızlı tren imalatında kullanılan AA5083 alaşımını lazer kaynak yönteminde wobble hareketi ile birleştirilip mekanik ve metalürjik özelliklerinin incelenmesi amacıyla yazılmıştır.

Tez çalışmam boyunca bana yol gösteren, engin bilgi donanımları ile tecrübelerinden yararlanım çok kıymetli danışman hocam, Sayın Prof. Dr. Muharrem Yılmaz'a sonsuz teşekkür ve minnetlerimi sunarım.

Çalışmalarımın her evresinde bilgi ve tecrübesini benimle paylaşarak yardım ve katkılarını hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocam sayın Dr. Emine GÜNDOĞDU İŞ'e bana güveni ve desteğini hep hissettiri için çok teşekkür ederim.

Tez çalışmamda alüminyum malzemelerimi tedarik ettiğim Seykoç Alüminyum'a; kaynak uygulamalarımı yaptırım yer olan IPG Laser Photonics çalışanlarına özellikle Cankat KUŞ'a; sürekli darlaım Fatih ÖZTÜRK'e, Biltek Kalite çalışanlarına ve genel müdürü Mutlucan GİDEN'e, Doç. Dr. Mustafa TÜMER'e bana gösterdikleri sabır ve destekleri için teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca desteklerini eksik etmeyen, güvenen ve her zaman güç veren sevgili aileme, sevgili hayat arkadaşım Akın TEKİN'e tüm kalbimle teşekkür ederim.

Temmuz – 2023

Nur Benuşe YILDIZ

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ.....	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
TABLolar DİZİNİ.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	2
2.1. Alüminyum Alaşımlarının Otomotiv Sektöründeki Yeri	2
2.2. Alüminyum	4
2.2.1. Alüminyumun Tarihsel Gelişimi	5
2.2.2. Alüminyumun Elde Edilmesi	6
2.2.3. Alüminyumun Özellikleri	8
2.3. Alüminyum Alaşımları	9
2.3.1. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması	11
2.3.2. Alüminyum Alaşım Serilerinin Özellikleri ve Kullanım Alanları	14
2.4. Kaynak Teknolojisinde Alüminyum ve Alaşımları	17
2.4.1. Alüminyum Alaşımlarında Kullanılan Kaynak Yöntemleri.....	19
2.4.2. Lazer Kaynağı.....	21
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	31
3.1. Malzeme Özellikleri	31
3.2. Deney Parçalarının Boyutları.....	31
3.3. Kullanılan Lazer Kaynak Ekipmanları	32
3.4. Lazer Kaynak Parametrelerinin Belirlenmesi.....	33
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	35
4.1. Lazer Kaynak Sonrası Kaynak Dikişleri	35
4.2. Lazer Kaynak Dikişinde oluşan bölgeler	36
4.3. Radyografik Muayene İncelemeleri.....	37
4.4. Makro Test İncelemeleri	38
4.5. Mikroyapı Testleri	40
4.6. Sertlik Testleri.....	41
4.7. Çekme Testleri	42
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	45
KAYNAKLAR.....	47
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	53
ÖZGEÇMİŞ.....	54

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Birincil ve ikincil alüminyum üretim basamakları.....	7
Şekil 2.2.	Logaritmik olarak malzemelerin yoğunluklarının gösterimi	8
Şekil 2.3.	Logaritmik olarak malzemelerin çekme dayanımları.....	9
Şekil 2.4.	Alüminyum alaşımlarında sınıflandırma.....	12
Şekil 2.5.	Kaynak kabiliyetinin şematik gösterimi.....	18
Şekil 2.6.	Lazer ışını oluşumu	22
Şekil 2.7.	Fiber lazerlerin çalışma prensipleri	23
Şekil 2.8.	Odak ile toplayıcı lens	27
Şekil 2.9.	Koruyucu gazların kaynak sonuçları ile plazma oluşumuna etkileri.....	29
Şekil 2.10.	Lazer wobble hareketlerinin kaynak dikişi üzerinde görüntüleri.....	30
Şekil 3.1.	Lazer kaynaklı birleştirilecek parçaların ölçüleri.....	32
Şekil 3.2.	Fikstüre sabitlenmiş, kaynak edilmeye hazır parçalar.....	32
Şekil 3.3.	Lazer kaynak makinesi ve ekipmanları	33
Şekil 3.4.	Lazer kaynağı anındaki görüntü	34
Şekil 3.5.	Wobble hareketi olmadan lazer kaynaklı birleştirilen parça görüntüsü.....	34
Şekil 4.1.	50X Manuel spektrometre	35
Şekil 4.2.	Makro kaynak dikiş görüntüsü.....	37
Şekil 4.3.	Wobble hareketi olmadan kaynak edilen parçanın radyografik film görüntüsü	38
Şekil 4.4.	Wobble hareketi ve wobble çapına bağlı kaynak kep ve kök genişliği değişikliği	39
Şekil 4.5.	Kesit yüzeyinden sertlik ölçümü alınan yerler	41
Şekil 4.6.	Sertlik testi sonuçları numuneye göre ortalama değerler için sütun grafiği.....	42
Şekil 4.7.	Akma ve çekme mukavemetleri ortalama değerler için sütun grafiği	44

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1.	Alüminyumun fizikokimyasal ve mekanik özellikleri (-20°C).....	4
Tablo 2.2.	Dövme alüminyum alaşımlarının sınıfları.....	12
Tablo 2.3.	Döküm alaşımlarının sınıfları	13
Tablo 2.4.	Alüminyum alaşım serilerinin kullanım alanları.....	14
Tablo 2.5.	Alüminyum alaşım serileri özel alaşımları	17
Tablo 2.6.	Kaynak yöntemleri	19
Tablo 3.1.	AA5083 Alaşımının kimyasal içeriği.....	31
Tablo 3.2.	AA5083 alaşımının mekanik özellikleri	31
Tablo 3.3.	Deneysel çalışma parametreleri	34
Tablo 4.1.	Farklı wobble hareketleri ve wobble çapları ile yapılan lazer kaynakları sonrası dikiş görüntüleri	35
Tablo 4.2.	Wobble hareketiyle kaynak edilen parçaların radyografik film görüntüleri	37
Tablo 4.3.	Wobble hareketiyle kaynak edilen parçaların makro kesit görüntüleri.....	39
Tablo 4.4.	1,5 mm wobble çapında tüm wobble hareketleriyle ve wobble hareketi olmadan kaynak edilen parçaların mikro yapı görüntüleri	40
Tablo 4.5.	Sertlik testi sonuçları.....	42

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

°C	:Erime Isısı
J/kg K	:Özgöl Isı
W/m K	:Isıl İletkenlik
g/cm ³	:Yoğunluk
$\Delta l/l^{\circ}\text{C}$	:Isıl genleşme katsayısı
E (N/mm ²)	:Elastisite modülü
$\mu\Omega\text{cm}$	:Elektrik direnci
N/mm ²	:Çekme Mukavemeti

Kısaltmalar

Al	: Alüminyum
SAF	: Stabilized Aluminum Foam
Al ₂ O ₃	: Alüminyum Oksit
Cu	: Bakır
Mn	: Mangan
Mg	: Magnezyum
Si	: Silisyum
Zn	: Çinko
CO ₂	: Karbondioksit
YMK	:Yüzey Merkezli Kübik Kristal kafes yapısı
HMK	:Hacim Merkezli Kübik Kristal kafes yapısı
SPH	:Hegzagonal Sıkı Paket Kristal kafes yapısı

5083 SERİSİ ALÜMİNYUM ALAŞIMLARDA LAZER WOBBLE HAREKETİ İLE GÖZENEKLİLİĞİN AZALTILMASI

ÖZET

Alüminyum ve alaşımlarının düşük ağırlık, yüksek mukavemet ve iyi korozyon direnci özellikleri sayesinde otomotiv, savunma sanayi ve havacılık uygulamalarında kullanımı oldukça artmıştır. Ayrıca ülkemizde yüksek hızlı trenlerin gövde imalatında alüminyum malzemeler kullanılmaktadır. Ulaşım sanayide seri üretimde konvansiyonel kaynak yöntemleriyle kaynaklı birleştirilen alüminyum ve alaşımı malzemelerin avantajlarının yanında sahip olduğu yüksek termal iletkenlik, düşük yoğunluk ile kaynak sırasında gözeneklilik, çatlak oluşumu gibi kaynak hatalarını dezavantaj olarak getirmektedir. Konvansiyonel kaynak yöntemlerinin getiri zafiyetleri azaltmak amacıyla seri üretimde hızlı, mekanik özelliklerinden ödün vermeden düşük ısı girdisiyle kaynaklı birleşimi elde edilen lazer kaynak yönteminin kullanımı ülkemizde de yaygınlaşmaktadır.

Ön çalışmalarda 4,5 mm kalınlığında AA5083 alüminyum alaşımının lazer kaynağında odak noktası mesafesinin etkisini incelemek için +4, 0 ve -4 odak noktası mesafesinde dairesel (O) lazer wobble (salınım) hareketi ile ilave telsiz kaynak edilmiştir. Literatürde yapılan bazı çalışmalar inceleninde eksi (-) yönlü odak noktası mesafeleri ile yapılan kaynaklı birleştirmelerin daha derin nüfuziyetli kaynak dikiş özellikleri sergilei görülmüştür. Bundan dolayı dairesel salınım hareketinin dışında yatay sonsuz (∞) lazer wobble hareketi ile -4 odak noktası mesafesi ayarlanarak kaynak işlemi yapılmıştır. Kaynak işlemleri tamamlanan numunelerin mikro ve makro yapıları incelenmiş, radyografik testleri ve çekme testleri de yapılmıştır.

Ön çalışmaların sonuçları inceleninde 0 odak noktası mesafesi ile yapılan kaynaklı birleştirmenin çekme mukavemeti ve %uzama sonuçlarının erlerine göre daha yüksek değerde olduğu görülmüştür. Diğer kaynak dikişlerinde görülen görsel hatalar 0 odak noktası mesafesi ile yapılan kaynak dikişinde görülmemiştir. Yatay sonsuz (∞) wobble hareketi ile yapılan kaynak dikişi mikroyapıları inceleninde kaynak metali tane yapısının kar tanesine benzer dentritik yapılar oluştuğu görülürken dairesel wobble hareketinde ise kaynak metalinde mikroyapıların eşekslenli ve ince taneli olduğu görülmüştür. Ön çalışmalar ışığında odak noktası mesafesini 0 olarak sabit tutmanın görsel muayenede ve mekanik özelliklerde daha iyi sonuçlar vermesi sebebiyle çalışmada odak noktası mesafesi 0 olarak sabitlenerek devam edilmiştir.

Bu çalışmanın amacı lazer kaynağında wobble hareketinin AA5083 alaşımının kaynaklanabilirliği üzerinde etkisi dairesel (O), yatay sonsuz (∞), zigzag (I) ve sekiz (8) şeklindeki wobble hareketleri kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca wobble çapı da değiştirilerek minimum poroziteli kaynak dikişi elde etmek amaçlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: 5083 Alüminyum Alaşımı, Gözeneklilik, Lazer Wobble Hareketi.

POROSITY REDUCTION WITH LASER WOBBLE ACTION IN 5083 SERIES ALUMINUM ALLOYS

ABSTRACT

Due to their low weight, high strength, and good corrosion resistance properties, the use of aluminum and its alloys has become widespread in automotive, defense, and aerospace applications. Aluminum materials are also used in the manufacturing of high-speed train bodies in our country. However, along with the advantages of aluminum and alloy materials joined by conventional welding methods in mass production in the transportation industry, such as high thermal conductivity and low density, they bring disadvantages during welding, such as porosity and crack formation. In order to mitigate the weaknesses introduced by conventional welding methods, the use of laser welding, which achieves welded joints with low heat input while maintaining mechanical properties, is also gaining popularity in our country.

In preliminary studies, additional autogenous welds were performed with circular (O) laser wobble modes at +4, 0, and -4 focal point distances to examine the effect of focal point distance on laser welding of AA5083 aluminum alloy with a thickness of 4.5 mm. When examining some of the studies in the literature, it was observed that welded joints made with negative (-) focal point distances exhibited deeper penetration characteristics. Therefore, in addition to circular wobble mode, welding was performed by adjusting the focal point distance to -4 with horizontal infinite (∞) laser wobble mode. The micro and macro structures of the completed welded samples were examined, and radiographic and tensile tests were conducted.

Upon examining the results of the preliminary studies, it was observed that the welded joint made with a focal point distance of 0 exhibited higher tensile strength and elongation results compared to the others. The visual defects observed in the other weld seams were not present in the weld seam made with a focal point distance of 0. When the microstructures of the weld seam made with horizontal infinite (∞) wobble mode were examined, dendritic structures resembling snowflakes were observed. In the grain structure of the weld metal, whereas in the circular wobble mode, the microstructures in the weld metal were axisymmetric and fine-grained. In light of the preliminary studies, considering that keeping the focal point distance at 0 yielded better results in visual inspection and mechanical properties, the focal point distance was fixed at 0 and continued in the study.

The aim of this study was to investigate the effect of wobble mode on the weldability of AA5083 alloy in laser welding using circular (O), horizontal infinite (∞), zigzag (I), and eight (8) wobble modes. Additionally, by varying the wobble diameter, the goal was to obtain a weld seam with minimal porosity.

Keywords: 5083 Aluminum Alloy, Porosity, Laser Wobble Action.

1. GİRİŞ

Teknoloji ve bilimin yardımıyla dünyanın gelişmesi olacaktır. Teknolojinin gelişimindeki en önemli etkenler hız, ekonomi ve dayanıklılıktır. Bu faktörler, doğal kaynakların insan nüfusuyla ters orantılı olarak değişmesi nedeniyle önem arz etmektedir. Zira küresel ısınma, su, hava ve çevre kirliliği gibi sorunların ortaya çıkması ve tehlikenin farkına varılmasıyla birlikte, otomotiv, havacılık ve savunma sanayisi gibi birçok sektör, CO₂ emisyonlarını en aza indirme hedefiyle çalışmaktadır (Gülşah, 2016). Alüminyum, dünyadaki en yaygın metaldir. Ayrıca alüminyum geri dönüşüm yoluyla da kazanılabilmektedir. Alüminyum ve alüminyum alaşımları günümüz endüstrisinde çelikten sonra en çok kullanılan malzemelerdir. Bunun başlıca nedenleri arasında hafif olmaları, korozyon dayanımları, iyi ısı ve elektrik iletkenlikleri, ısıl işlem uygulanmış ya da uygulanmamış olarak yüksek mekanik dayanım özellikleri gelmektedir. Bu özellikler, tasarımcılar ve mühendisler tarafından sıklıkla tercih edilmelerinin temel nedenleri arasında yer almaktadır. Son zamanlarda özellikle enerji tasarrufu araştırmaları nedeniyle bagaj, otomobil, inşaat, havacılık, tren, uçak ve deniz araçlarının yapımında en popüler malzeme olmuşlardır. Alüminyum çelikten yaklaşık üç kat daha hafif bir malzemedir. Hafiflik alüminyumun en önemli özelliklerinden birisidir. Eskiden madenciliği pahalı olduğu için maliyetli bir metal olan alüminyum, teknolojinin gelişmesi ve üretim maliyetlerinin düşmesiyle günümüzde demir dışı metaller arasında en çok üretilen metal konumundadır (Başer, 2013; Gündoğdu, 2022; Kalyoncu, 2020).

Gözeneklilik oluşumu, oldukça hızlı bir yöntem olan lazer kaynağında çözülmesi gereken ciddi sorunlardan biridir. Hidrojen genellikle ergitme kaynağında, özellikle alüminyum alaşımlarında gözenekliliğin ana nedenidir ve ayrıca alüminyum alaşımlarının lazer kaynağında çok sayıda küçük hava deliği oluşumuna yol açabilir. Bununla birlikte, en karakteristik gözeneklilik, anahtar deliği lazer kaynağında oluşur ve kaynak metalinin üst ve orta kısımlarında büyük küresel ve uzunlamasına boşluklardan oluşur. Bu tür gözenekliliğin oluşum mekanizması tam olarak anlaşılamamıştır (Matsunawa, 2001; Katayama ve diğ., 2012).

Bu çalışmada 5083 serisi alüminyum alaşımlarda lazer wobble hareketiyle gözenekliliğin azaltılabilmesi amaçlanmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Alüminyum Alaşımlarının Otomotiv Sektöründeki Yeri

Döküm ve dövme alüminyum alaşımları korozyona karşı dirençli oldukları ve yapıya hafiflik kattıkları için otomobil, kamyon, tren ve deniz araçları gibi ulaşım araçlarında kullanılmaktadır. Hafif metallerin otomobillerdeki kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte alüminyum otomotiv sektörüne de girmiştir. Bu gelişmeyle birlikte, bugün ortalama bir araba çok çeşitli alüminyum parçalar kullanmaktadır. Örneğin, alüminyum silindir kafaları, jantlar, ekstrüzyon yöntemiyle alüminyumdan imal edilmiş radyatörler, dişli kutusu gövdeleri, koltuk kızakları, darbe çubukları vb. parçalar mevcuttur. Otomotiv sanayide araçların imalatında yaklaşık %25 alüminyum kullanılır. Araçların boş kütlesi ne kadar hafifleşirse, hareket etmek için o kadar az enerji ihtiyacı duyarlar. Günümüzde bir araçta ortalama 50 kg alüminyum ve alaşımı malzeme kullanılmaktadır. Bu miktar, yaklaşık 100 kg demir, çelik ve bakır tasarrufu sağlamaktadır. Hesaplamalar ve tecrübeler sonucunda, alüminyum kullanan bir otomobilin ekonomik ömrü boyunca, yeterince alüminyum kullanmayan bir otomobile göre 1500 litre daha az yakıt tükettiği tespit edilmiştir (Başer, 2013; Yükler, 2000; Yıldırım, 2006). Yapılan son araştırmalara göre Avrupa, otomotiv endüstrisindeki alüminyum uygulamalarının dünyada en hızlı büyüdüğü yer olmuştur. Ayrıca kullanılan alüminyumun geri dönüştürüldüğü de bilinmektedir. Gelecek dönemlerde yine alüminyumun kullanıldığı otomotiv parçalarının en fazla otomobil gövde panelleri olması beklenmektedir. Milyonlarca araç türü 200 kg'dan fazla alüminyum parça içermektedir (Ertuğ ve Kumruoğlu, 2016).

Yarattığı avantajlara ek olarak, günümüzde artan küresel rekabet ve çevre bilinci, otomobil ve yedek parça sanayinde imalatçıları alüminyuma doğru yöneltmiştir. İşletme maliyetlerini düşürmeyi ve üretim verimliliğini korumayı amaçlayan bir üretim yöntemi ile çevre kirliliğini azaltan ve daha kolay geri dönüştürülebilen otomobiller, güvenlik ve konforu bir araya getiren malzemelerden üretilmeye başlanmıştır. Bu yaklaşıma göre arabaların ağırlığı üzerinde durulması gereken önemli bir husustur (Deveci, 2019). Her 100 kilogram araç ağırlığı, yakıt tüketimini 100 km'de 0,6 litre azaltmaktadır. Bu sayede egzoz gazlarının ve sarf malzemelerinin azalması sağlanmaktadır. Bu da otomobil kullanıcılarını doğrudan etkileyen önemli bir bulgu olarak karşımıza çıkmaktadır. Çünkü kullandıkları arabanın yakıtına ayrılan bütçeden tasarruf ederler. Araçlar ne kadar hafif

olursa, hareket etmek için o kadar az enerjiye ihtiyaç duyarlar. Atmosfere salınan emisyonların azaltılması, ekonomi ve çevre sağlığı açısından büyük avantajlara sahip olan bu durum, sürücüler tarafından yakıt giderlerinin düşmesiyle de desteklenmektedir (Ertuğ ve Kumruoğlu, 2016). Otobüs gibi sık hareket eden ve duran araçlarda aracın hafifliği daha da önem kazanmaktadır. Düşük özgül ağırlığı ve yüksek mukavemet sayesinde, alüminyumun yaygın kullanımı, orta sınıf arabanın ağırlığını yaklaşık 300 kg azaltmaya olanak tanımaktadır. Bu oran, sıfır brüt araç ağırlığına karşılık gelmektedir. Ayrıca alüminyum güvenlik ve konfordan ödün vermeden güvenle kullanılabilen bir malzemedir. Ayrıca alüminyumda hurda metalin yüksek değeri geri dönüşüm ve geri kazanımı sağlamaktadır (Bedir ve diğ., 2021).

Otomotiv sektöründe içi boş profil olarak alüminyum, çarpma kutularında kullanılır ve içine de alüminyum köpük yerleştirilir. Alüminyum köpüğü, otomotiv endüstrisinde alüminyumun yeni bir kullanımı olarak görülebilir. Stabilized Aluminum Foam (SAF) adı verilen yapı, erimiş bir alüminyum haznedan yapılan alüminyum "köpüğün" özel yöntemler kullanılarak çeşitli şekillerde istenilen şekle dönüştürülmesiyle düz ve üç boyutlu ürünlerin üretili yeni bir malzeme türüdür (Akarçay ve diğ., 2017). Bazı uygulamalarda, temel malzeme, seramik parçacıklar içeren bir metal matris kompozittir. Parçacık eklemenin amacı, köpük baloncuklarını stabilize etmek ve baloncukların çökmesini önlemektir. Bu yöntemle üretilen endüstriyel bileşenlerin mükemmel özelliklerinden bazıları şöyle sıralanabilmektedir (Ertuğ ve Kumruoğlu, 2016; Kenar, 2019);

- Yüksek mekanik enerji sönümleme kapasitesi,
- Ağırlığına göre çok yüksek mukavemet ve rijitlik,
- Değişen sıcaklık ve nem içeren ortamlarda dahi sabit kalan mekanik özellikler,
- Geri dönüştürülebilirlik,
- Duyarlılık,
- Çentik etkisi,
- Yüksek akustik ve ısı yalıtım özellikleri.

Otomobillerde en ağır parça motordur. Bu nedenle, alüminyum malzeme kullanmak motorda büyük miktarda ağırlık tasarrufu sağlayabilir. Birçok motorda alüminyum motor

kapakları bulunur ve bazılarında ayrıca alüminyum motor blokları bulunur. Motor parçaları genellikle enjeksiyon kalıplama ile yapılmaktadır. Bu parçalar kutulardan daha fazla güç gerektirmektedir. Alüminyum dizel motorlarda daha az kullanılır. Çünkü bu motorların benzinli motorlardan daha güçlü olması gerekli görülmektedir (Benedyk, 2010).

Sonuç olarak alüminyum hafif bir metal olduğu için otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır ve kullanımı sürekli artmaktadır. Alüminyum, otomotiv endüstrisinde radyatörler, motor parçaları, gövde panelleri ve yapısal parçalar yapmak için kullanılmaktadır.

2.2. Alüminyum

Alüminyum, dünyada en yaygın kullanılan demir dışı metaldir. Antik Roma ve Yunan uygarlıklarından bu yana (resim ve tıpta), insanlığa hizmet etmek için giderek daha fazla kullanılmış ve modern hayatımızın ayrılmaz bir endüstriyel malzemesi haline gelmiştir. Yeryüzünde en bol bulunan ikinci element olmasına rağmen, ekonomik olması nedeniyle 1800'lerin sonunda teknik uygulamalarda ortaya çıkan bir metal olmuştur (Güngör, 2013). Alüminyum ve alaşımlarının hayatımızın önemli bir parçası haline gelmesinin temel nedeni, bir metalde aranan birçok önemli özelliği tek bir malzeme altında sunmasıdır. Bu özellikler arasında hafiflik, sağlamlık, yüksek yeniden kullanılabilirlik, yüksek elektrik ve korozyon direnci, dayanıklılık, esneklik, işlenebilirlik ve yalıtım yer almaktadır. Bu özelliklerinin birleşmesi sonucunda uçaklar, hızlı trenler, yüksek performanslı otomobiller ve yüksek hızlı deniz araçları, ısıtma evleri, enerji iletimi ve depolanması gibi birçok alanda insanlığın hizmetine sunulmuştur (Uyan ve Körpe, 2022). Alüminyumun -20 derecedeki fizikokimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 2.1'de paylaşılmıştır.

Tablo 2.1. Alüminyumun fizikokimyasal ve mekanik özellikleri (-20°C) (Ünel, 2016)

Alüminyum	Demir	Titanyum	Bakır	Nikel	Özellikler
YMK	HMK	SPH	YMK	YMK	Kristal kafes yapısı
2,7	7,85	4,5	8,93	8,9	Yoğunluk (g/cm ³)
930	448	470	385	440	Özgül ısı (J/kg K)
660	1536	1670	1083	1455	Erime ısısı (°C)
235	79,6	15,5	389,4	92,1	Isıl iletkenlik (W/m K)

Tablo 2.1. (Devam) Alüminyumun fizikokimyasal ve mekanik özellikleri (-20°C) (Ünel, 2016)

Alüminyum	Demir	Titanyum	Bakır	Nikel	Özellikler
$33,9 \times 10^{-6}$	12×10^{-6}	$18,2 \times 10^{-6}$	$16,5 \times 10^{-6}$	1×10^{-6}	Isıl genleşme katsayısı ($\Delta l/l^\circ C$)
$6,7 \times 10^4$	21×10^4	$10,8 \times 10^4$	$12,4 \times 10^4$	21×10^4	Elastisite modülü E (N/mm ²)
2,65	9,7	55	1,67	6,8	Elektrik direnci ($\mu\Omega cm$)
65	235	245	210	300	Maksimum çekme mukavemeti (N/mm ²)

2.2.1. Alüminyumun Tarihsel Gelişimi

Kesin bir veri olmasa dahi insanlığın bilinenden çok daha önce alüminyuma maruz kalı tahmin edilmektedir. Yapılan araştırmalarca Roma imparatoru Tiberius'a gümüşe benzeyen ama gümüşten çok daha hafif olan bilinmeyen bir metalden bir bardağın ustalar tarafından verildiği bildirilmektedir (Uğurlu, 2022).

Alüminyum dünyadaki en yaygın metal olmasına karşın saflaştırılması zor bir element olduğundan keşfi 19. yüzyılda mümkün olmuştur. 1807'de İngiliz kimyager Humphry Davy, alüminyumun varlığına varsayımları sonucunda ulaşmış ve henüz keşfetmei metale "alüminyum" adını vermiştir. Ancak bu resmi keşif 1825 yılında Danimalı kimyager Hans Christian Orsted tarafından yapılmıştır (Güven, 2022).

Alman kimyager Friedrich Woehler, Hans Christian Orsted'in çalışmalarına devam etmiştir. 1827'den 1845'e kadar Friedrich, 18 yıl boyunca katılaştırmış erimiş alüminyum toplar elde etmek için deneylerini sürdürmüştür. 1856 senesine değin alüminyum üretimi kimyasal olarak devam etmiştir. Fakat bu üretim süresince büyük miktarlarda ürün kabul edecek şekilde tasarlanmamıştır. Kimyacılar bu süreci daha çok yeni bir maddenin keşfi gibi değerlendirmişlerdir. Ancak sonrasında Henri-Etienne Sainte-Claire Deville, alüminyum üretiminin kimyasal yöntemlerini endüstriyel uygulamalara entegre etmişlerdir (Kahraman, 2009). Woehler sürecini geliştirerek endüstriyel olarak ilk kez 1856'da Charles ve Alexandre Tissier bölgesinde alüminyum üretmiştir. Başlangıçta alüminyum, güzel görünümü, hafifliği ve hafifliği nedeniyle günlük hayatta ve kuyumculukta sanayide kullanımı yerine tercih edilmiştir. Öyle ki Friedrich Woehler, III. Napolyon'un oğlu Prens Louis Napolyon için alüminyum bir bebek çingırağı yapmıştır.

Bugün hala kullanılan Hall-Heroult eritme işlemi, 1886 yılında Fransız mühendis Paul Heroult ve Amerikalı öğrenci Charles Hall tarafından aynı anda birbirlerinden habersiz olarak ortaya konulmuştur. 1888'de Avusturyalı kimyager Karl Joseph Bayer, alkali bir çözeltiye boksit ekleyerek ve onu ısıtarak alümina yapmak için ucuz ve kullanışlı bir yöntem icat etmiştir. Hall-Heroult ve Bayer süreçleri, günümüzde kullanılmakta olan üretim proseslerinin temelini meydana getirmektedir (Avşar, 2011).

2.2.2. Alüminyumun Elde Edilmesi

Alüminyumun elde edilmesinde iki farklı yöntemden söz edilmektedir. Bunlar birincil alüminyum üretimi ile ikincil alüminyum üretimidir. Birincil alüminyum üretiminde ise temelde üç kademedен söz edilmektedir (Vatansever ve diğ., 2018);

- Boksit ve diğer alüminyum cevherlerinin topraktan çıkarılması,
- Cevherden alümina eldesi,
- Alüminadan, birincil alüminyum eldesi.

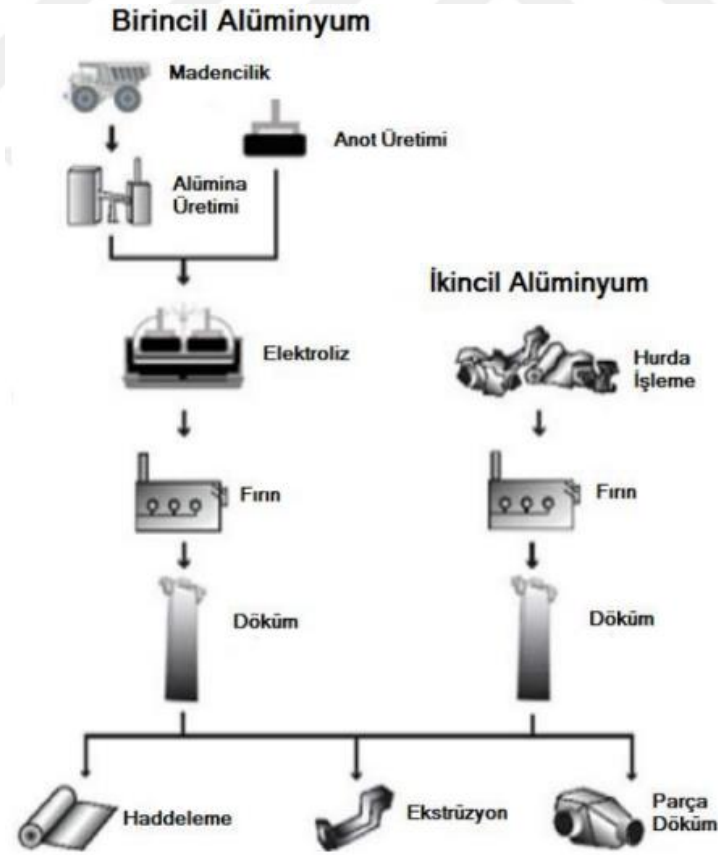
Birincil alüminyum üretiminin ana girdisi olan alüminanın üretili cevher boksittir. M. Pierre Berthier adını, 1821 yılında Fransa'nın güneyindeki Le Baux şehrinde bulunan bir cevher olduğu için almıştır. Boksit, açık ocak madeninde üretilir. Ortalama olarak, 4,5 ton boksit 2 ton alümina üretir ve 2 ton alümina yaklaşık 1 ton üretmektedir. Sonlandırma ile çıkarılan boksit, yaklaşık olarak P-alümina içerir. Boksitin rengi, içeri demir miktarına göre sarı, kahverengi, kırmızı ve kırık beyazdan griye değişim göstermektedir (Kırsavaş, 2021). Birincil alüminyum üretiminin aşamaları genel hatlarıyla aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir (Yılmaz ve diğ., 2012);

- Kırma ve ufalama,
- Çürütme,
- Dinlenme,
- Çökelme,
- Kalsinasyon.

Bir diğer bahsedilmesi gereken yöntem olan ikincil alüminyum üretiminde hurda alüminyumun geri kazanımı sağlanmaktadır. Alüminyum hurdalar özellikle içecek kapları, araba jantları ve benzeri alüminyumlar tedarik edilerek kolaylıkla imal

edilebilmektedir. İkincil alüminyum üretiminde alüminyum hurdası önce öğütülerek işlenir. Daha sonra yabancı maddeleri (örneğin boya, kaplama) ayırmak ve uzaklaştırmak için kimyasallarla reaksiyona sokularak saf alüminyum oluşturulur. Daha sonra elde edilen saf alüminyum eritilir ve bir külçe yapılır. İkincil alüminyum üretimi 7 aşamalı bir süreçtir. Bunlara atık toplama, atık ayırma, hazırlama ve ön arıtma, eritme, alaşımlama, metal arıtma, döküm, cüruf giderme ve cüruf işleme olarak aşamalandırılmıştır (Purcek ve diğ., 2014). Dünyada üretilen alüminyumun neredeyse yarısı geri dönüşüm ile elde edilmektedir. Geri dönüşümle üretilen alüminyuma ikincil alüminyum denir. İkincil alüminyum üretmek için gereken enerji, birincil alüminyum üretmek için gereken enerjinin yaklaşık %5'i kadardır. Buradan da anlaşılacağı gibi ikincil alüminyum üretimi, çeşitli şekillerde önemli avantajlar sunmaktadır. Bir ton alüminyumun geri dönüşümü ile 5.000 litreye varan petrol tasarrufu elde etmek mümkündür (Car, 2016).

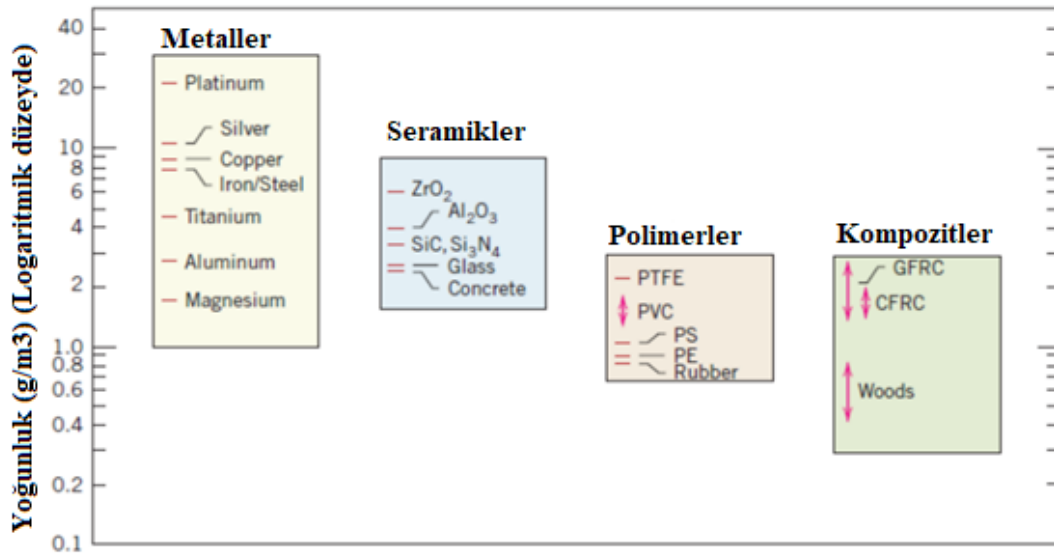
Birincil ve ikincil alüminyum üretim akış şemaları aşağıda görselde paylaşılmıştır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Birincil ve ikincil alüminyum üretim basamakları (Kırsavaş, 2021)

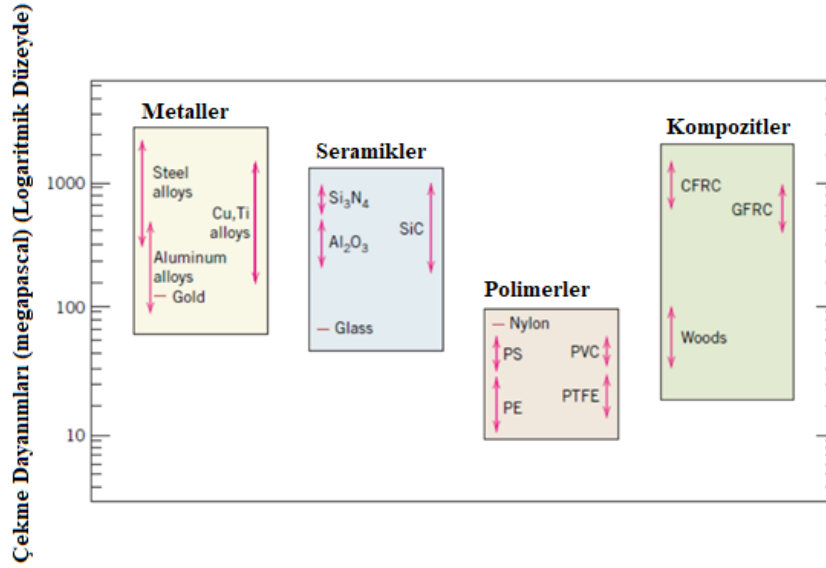
2.2.3. Alüminyumun Özellikleri

Alüminyum alaşımları, düşük yoğunluk, yüksek korozyon direnci ve kaynaklanabilirlik özelliklerinden dolayı metal endüstrisinde çeliğe bir alternatif haline gelmiştir. Alüminyumun yoğunluğu yaklaşık $2,7 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Çeliğin yaklaşık $1/3$ yoğunluğudur. Yapısal uygulamalarda çelikten sonra en çok kullanılan metalik malzeme olma özelliğini kazanmıştır (Şekil 2.2.) (Chung ve Kapoor, 2022).



Şekil 2.2. Logaritmik olarak malzemelerin yoğunluklarının gösterimi (Güven, 2022)

Korozyona dayanıklı bir metal olan alüminyum, mukavemeti, termal ve elektrik iletkenliği nedeniyle gıda, kimya, otomotiv ve gemi yapımı gibi sektörlerde en popüler metal alaşımdır. Genel olarak çelikten daha yumuşak olmasına rağmen, karakteristik mukavemet ve rijitliği göz önüne alınanda çelik malzemelerle rekabet edebilir düzeydedir. Alüminyumun mekanik özellikleri büyük ölçüde alüminyumun saflığına bağlıdır. Saf alüminyum, alaşımlı alüminyumdan çok daha yumuşak ve daha az dayanıklıdır. 0,25 Al'nin esneklik modülü 7100 kg/mm^2 'dir, ancak ultra saf alüminyum ile 6700 kg/mm^2 'dir. Çekme mukavemeti 90 MPa ila 650 MPa arasında olabilmektedir (Şekil 2.3). 0.2 Al'in sertlik değeri yaklaşık 24 brinelken, 0.9 Al'in sertlik değeri 15 brineldir. Alaşımların sertlik değeri 120 BHN'ye kadar çıkabilmektedir. Bu yüksek korozyon direncinin nedeni, metal yüzeyin sürekli olarak atmosferik bir alüminyum oksit tabakası ile kaplanmış olmasıdır. Bu oksit tabakasının kalınlığı, alaşımın saflığı arttıkça artmaktadır (Kabasakaloğlu, 2019; Güler, 2020).



Şekil 2.3. Logaritmik olarak malzemelerin çekme dayanımları (Güven, 2022)

Atmosfer şartlarında alüminyum ve alaşımlarının üzerinde doğal olarak oluşan bu seramik malzemeye alüminyum oksit (Al_2O_3) adı verilmektedir. Al_2O_3 çok sert bir seramik malzemedir ve alüminyum metal yüzeyini çevre ile temasını keserek korozyonun etkilerinden korumaktadır. Alümina, diğer seramik malzemelere göre yüksek sertliği (1400-1500HV) ve düşük maliyeti nedeniyle zırh uygulamalarında da kullanılmaktadır. Doğal olarak oluşan Al_2O_3 tabakası ince olduğu için endüstriyel koruma veya yüzey sertliği sağlamamaktadır (Özdemir, 2020).

2.3. Alüminyum Alaşımları

Alüminyuma eklenen ana elementler, malzemenin karakteristik özelliklerini etkiler. Bu elementler, üç katkı maddesi biçiminde gelir (Ak, 2022);

1. Alüminyum ergitme işleminde eritilerek katı bir eriyik olarak,
2. Sınırlı erime gücüne sahip mekanik bir alaşım olarak, tam erime olmadan,
3. Alüminyum veya diğerleri ile intermetalik veya kimyasal bileşikler oluştururken bulunabilirler.

Malzeme özellikleri ve özellikleri üzerinde oluşan büyük farklılıklar genellikle ağ yapısından kaynaklanır. Bu farklılıkların ortaya çıkması %1-6 ek katkı maddeleri ile mümkün olmaktadır. Ayrıca, %1'in üzerindeki safsızlıklarda bile önemli etkiler meydana getirmektedir. Bu etkiler, katkı maddeleri ve çeşitli kombinasyonlar eklenerek elde

edilmektedir. Mukavemeti artırmak için ticari alaşımlarda en yaygın kullanılan elementler arasında (özellikle gerinim sertleşmesi soğuk veya sıcak işleme elde edildiğinde) bakır (Cu), mangan (Mn), magnezyum (Mg), silisyum (Si) ve çinko (Zn) yer almaktadır. Tüm bu elementler, alüminyumda önemli bir sabit çözünürlüğe sahiptir ve artan sıcaklıkla çözünürlük artmaktadır. Mukavemet ve sertlik, alaşım elementleri tarafından oluşturulan intermetalik bileşik fazlar ve katılaşma sırasında silikon tarafından oluşturulan bir bileşenin varlığı veya katılaşma sonrası ısıtma sırasında katı hal çökmesi ile de artmaktadır. Aşağıda alaşım oluşturan elementlerin etkileri sırasıyla açıklanmıştır (Doğan, 2006; Kanlıca, 2022).

Silisyum içeren alaşımlar çoğunlukla dökme alaşımlar sınıfında yer almaktadır. Dökme alaşımlar diğer işlenmiş alaşımlardan çok daha fazla silisyum içerirler. Silisyum, büyük ölçekli alüminyum dökme endüstrisinin ticari uygulanabilirliğini tam anlamıyla sağlayabilmektedir. Ötektik düzeyine kadar %4'lük bir silisyum içeriği atık kayıplarını azaltmaktadır ve bu da enine kesit kalınlığında daha fazla değişiklik, ayrıca çok daha karmaşık yapıların üretilmesine olanak tanımaktadır (Çolak, 2009). Daha yüksek yüzey ve iç kaliteye sahip dökümler elde etmek için de kullanılabilirler. Bu özelliklerin tümü, akışkanlığı artıran, çatlamayı azaltan ve çekintiyi minimize eden silisyum etkisinden kaynaklanmaktadır. Al-Si ikili alaşımları, katının erime bölgesi dar ve çözünme eğrisi dik olduğu için ısıtma işlemi tabi tutulamamaktadırlar. Bu alaşımı ısıtma işlemi sertleştirmek için belirli bir miktarda Mg eklenmektedir. Al-(7-12) Si alaşımları, yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemet ve aşınma direnci gerektiren uygulamalarda kullanılırlar. Al-Si alaşımlarında eş eksenli ve iğnesel olmak üzere iki farklı silisyum fazı bulunabilmektedir. İğnesel silisyum, darbe ve yorulma mukavemetini azaltırken çekme mukavemetini ve esnekliği de arttırmaktadır. Eş eksenli silisyum fazı, alaşıma yüksek mukavemet ve esneklik sağlamaktadır (Birol, 2018).

Alüminyum alaşımlarında kullanılan Mn, tipik olarak 5 ila 50 ppm arasında değişen konsantrasyonlarla birincil alüminyumun yaygın bir katkı maddesi olarak ifade edilmektedir. Dayanımı arttırmak ve tane yapısını kontrol etmek için kullanılır. Yapıya ekleninde tanelerin yeniden kristalleşmesini artırır ve lifli yapı oluşumunu destekler. Dağınık çökelti yapısıyla ise toparlanmayı etkili bir şekilde yavaşlatarak tane büyümesini engellemektedir (Doğan, 2006).

Bor, alüminyum ve alaşımları için tane inceltici olarak kullanılmaktadır. Vanadyum ise, titanyum, krom ve molibdeni çökelterek iletkenliği artırmak için kullanılmaktadır. Ticari tane arttırıcılar tipik olarak 5:1 oranında titanyumdan bor içermektedir. Bor tek başına %0,005-0,1 düzeyinde, katılaşma sırasında tane inceltici olarak kullanılabilir. Ancak ilave titanyum ile birlikte kullanımında daha etkili hale gelmektedir (Biol, 2018; Ak, 2022).

Alaşımlarda yaygın kullanılan bir diğer element olan Mg, tanecik sınırlarında esas olarak oldukça anodik bir faz (Mg_5Al_3 veya Mg_5Al_8) olarak biriktirilir ve bu da onu taneler arası ve gerilimli korozyon çatlağına duyarlı hale getirmektedir. Magnezyum ilavesi, tokluğu gereksiz yere azaltmadan alüminyumun mukavemetini büyük ölçüde arttırmaktadır. Magnezyum oranı arttıkça alaşımların çekme dayanımı da artar (Doğan, 2006).

Titanyumun rolü öncelikle alüminyum alaşımlı dökümler ve külçeler için tane inceltici olmasıdır. Tek başına kullanımında ise eriyik raf ömrü ve sık tekrar eritme, titanyumun etkinliğini azaltmaktadır. Tane inceltilebilirliği, eriyikte bor bulunduğunda veya çoğunlukla TiB_2 ile birleştirilen bor içeren bir baz karışım olarak eklenince artmaktadır (Çolak, 2009).

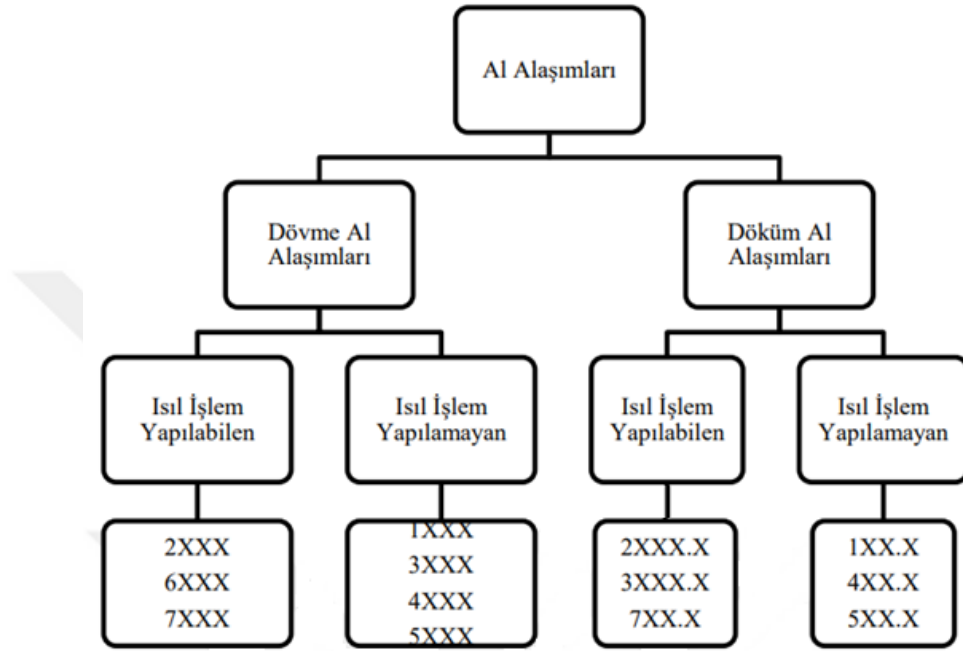
Ticari amaçla kullanılan bor alaşımlarında oldukça az miktarda stronsiyum (0.01-0.1 ppm) bulunmaktadır. Stronsiyumun alüminyum alaşımlarında kullanılma amacı, ötektik altı alüminyum-silisyum alaşımlarının ötektik özelliğini değiştirmektir (Biol, 2018).

Alüminyum alaşımlarında kullanılacak son element demirdir. Demir alüminyum alaşımlarındaki en yaygın katkı maddesi olma özelliğine sahiptir. Erimiş alüminyumda iyi çözünen demir, erimiş üretimin tüm aşamalarında kolayca çözünmektedir. Demirin katı içindeki çözünürlüğü çok düşüktür ($\sim 0.05\%$); bu nedenle, bu miktarın üzerindeki alüminyumun içeriğindeki demirin çoğu, alüminyum ve yaygın olarak diğer elementlerle intermetalik bir bileşiğin ikinci fazı olarak karşımıza çıkmaktadır (Doğan, 2006).

2.3.1. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Alüminyum alaşımları kendi aralarında döküm ve dövme alaşımlar olmak üzere iki gruba ayrılır ve bu alaşımların çoğu ısı işlem görebilirdir (Şekil 2.4). Dövme alaşımları, plastik

deforme olabilirlik açısından çok iyidir ve kolayca şekillendirilebilirler. Dökme alüminyum alaşımları ise dövme alaşımlardan daha iyi mekanik özelliklere sahip olabilse de bazı alaşımlara ısıtılma işlemiyle daha iyi mekanik özellikler kazandırılabilirler. Amerikan Alüminyum Derneği, alüminyum alaşımlarını kimyasal bileşimlerine göre sınıflandırmıştır (Polmear ve diğ., 2017).



Şekil 2.4. Alüminyum alaşımlarında sınıflandırma (Karayel, 2022)

2.3.1.1. Dövme Alüminyum Alaşımları

Alüminyum alaşımları nispeten düşük sıcaklıklarda kolay bir şekilde dövülmektedir. Dövme, iyi yüzey kalitesi, boyutsal kontrol ve yüksek mukavemet sağlamaktadır. Dövme ayrıca karmaşık şekillerin üretilmesine de izin vermektedir, ancak küçük parçaların büyük ölçekli işlenmesi için dökümden daha pahalı bir işlemdir. Bu nedenle, dövme daha çok büyük parçalar için kullanılmakta ve uçakların imalatında sıklıkla kullanılmaktadır. Amerikan Alüminyum Derneği'ne göre, Al dövme alaşımları dört harfle sınıflandırılmaktadır (Tablo 2.2) (Avcu, 2018).

Tablo 2.2. Dövme alüminyum alaşımlarının sınıfları (Karayel, 2022)

Ana Alaşım Elementleri	Sınıflar
Saf alüminyum	1XXX
Bakır	2XXX
Manganez	3XXX

Tablo 2.2. (Devam) Dövme alüminyum alaşımlarının sınıfları (Karayel, 2022)

Silisyum	4XXX
Magnezyum	5XXX
Silisyum-Magnezyum	6XXX
Çinko	7XXX
Kalay ve Lityum	8XXX
Diğer elementler	9XXX

2.3.1.2. Döküm Alüminyum Alaşımları

Döküm alüminyum alaşımlarının özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir (Güven, 2005);

- Düşük yoğunluk,
- Düşük erime noktası,
- Hidrojen dışındaki gazların çözünürlüğünün düşük olması,
- Mükemmel dökülebilirlik (ötektik bileşiklerde 0,7),
- İyi yüzey kalitesi,
- İşlenebilirlik,
- Korozyon direnci.

Yukarıda sıralanan özellikler döküm alüminyum alaşımlarının çoğunlukla otomotiv endüstrisinde kullanılabilirliğini artırmaktadır. Öyle ki dişliler, jantlar, tamponlar, koltuklar gibi geniş bir parça yelpazesi döküm alüminyum alaşımlarından yapılmıştır (Gökçe ve diğ., 2017).

Uluslararası kabul görmüş terminoloji, alaşımın elementine göre dört basamaklı bir sayısal dizi kullanır. Tablo 2.3'te gösterilen sıralamaya göre ilk sayı ana karıştırma elemanını temsil etmektedir. Son rakam nokta ile ayrılmıştır ve ürünün döküm veya ingot olduğunu göstermektedir. 0 rakamı döküm parçaları, 1 ve 2 rakamları döküm için eritilmiş ingot alaşımları ifade etmektedir (Yağcı ve diğ., 2021).

Tablo 2.3. Döküm alaşımlarının sınıfları (Ak, 2022)

Ana Alaşım Elementleri	Sınıflar
Saf alüminyum, saflık oranı %99'un üzerinde	1XXX
Bakır	2XXX
Silisyum, Magnezyum ve Bakır	3XXX

Tablo 2.3. (Devam) Döküm alaşımlarının sınıfları (Ak, 2022)

Silisyum	4XXX
Magnezyum	5XXX
Kullanılmaz	6XXX
Çinko	7XXX
Kalay	8XXX
Diğer elementler	9XXX

2.3.2. Alüminyum Alaşım Serilerinin Özellikleri ve Kullanım Alanları

Alüminyum ve alaşımları, mevcut olumlu özelliklerinden dolayı hayatın hemen her alanında kullanılmaktadır. Alüminyum alaşımları hafiflikleri, iyi mukavemetleri, yüksek korozyon dayanımları ve geri dönüşüm özelliklerinden dolayı ulaşımdan savunma sanayine, yat limanından mutfak araç ve gereçlerine kadar birçok alanda kullanılmaktadırlar. Bunların dışında çok iyi mukavemeti ve korozyon direncinden dolayı mimarlık sektöründe ve yapısal parça imalatında da kullanılmaktadır. Sektörlere göre alüminyum kullanımlarına ilişkin çalışma sonucunda elde edilen bilgiler tablo 2.4'te sunulmaktadır (Yürük, 2020).

Tablo 2.4. Alüminyum alaşım serilerinin kullanım alanları (Onur, 2014)

Kullanım Alanı	Oran
Ulaşım	%24
İnşaat	%25
Diğer	%7
Elektrik	%10
Ambalaj	%15
Genel mühendislik	%9
Mobilya ve eşya	%6
Demir çelik	%3
Kimya ve tarım	%1

Karmaşık üretim yöntemleri, tüketici ihtiyaçlarının çeşitlenmesi ve çeşitlenmesi, nüfus artışı ve zamanla yaklaşan doğal enerji kaynaklarının sınırlarının farkına varılması, bugüne kadar birçok endüstride üretim yöntemlerinde ve kullanılan hammaddelerde köklü değişiklikler yapılmasını gerektirmiştir. Endüstriyel kullanım tarihi yeni olmasına rağmen alüminyum alaşımları hızla üretime girmiştir (Onur, 2014). Alüminyum ve alaşımları geleneksel malzeme ve üretim yöntemlerinden farklı kriterlere tabidir. Alüminyumun benzersiz özellikleri, tasarımcılar ve mühendisler için yeni düşünce ve

yaklaşımlar gerektirir. Bu malzemelerin kullanımı, tasarım sürecinde ve üretim aşamasında bazı farklılıklar ve dikkate alınması gereken noktalar getirir.

Örneğin, alüminyumun hafif olması ve mükemmel mukavemet/yoğunluk oranı, yapısal mühendislik ve taşıt endüstrilerinde tercih edilirken, aynı zamanda yüksek mukavemetli çeliklerle rekabet edebilmek için doğru alaşımların kullanılmasını gerektirebilir. Üretim yöntemleri de alüminyum ve alaşımlarının özelliklerine uygun olarak ayarlanmalıdır. Örneğin, döküm, dövme veya haddeleme gibi özel işlemler kullanılabilir. Alüminyum ve alaşımlarının rekabet edebilmesi için bu malzemelerin özellikleri ve gereklilikleri dikkate alınmalıdır. Tasarım ve üretim süreçleri, bu özelliklere uygun olarak optimize edilmelidir. Bu şekilde, alüminyum ve alaşımları, geleneksel malzemelerle rekabet edebilen ve çeşitli endüstrilerde etkili bir şekilde kullanılabilen malzemeler olabilir. Şekillendirme sırasında özgül mukavemet, özgül sertlik ve süreksiz süneklik cinsinden ifade edildiğinde, alüminyum alaşımları geleneksel malzemelere benzer, bazen daha iyi performans gösterirler. Alüminyumun bu özellikleri otomotiv ve imalat sektörlerinde tercih edilmektedir. Ayrıca bu durum alüminyumu ulaşım endüstrisi için en iyi alternatif malzeme haline getirerek, ulaşım endüstrisinin hafifliği ve ulusal ve uluslararası araç emisyon düzenlemeleri nedeniyle yakıt tasarrufu ve maliyetleri düşürmesini sağlamıştır (Dündar, 2003). Alaşımlar seri bazında aşağıdaki gibi incelenebilmektedirler (Korkut, 2019);

- 1XXX serisi: Alüminyum içeriği %99'dan daha yüksektir. Korozyon direnci, elektriksel ve termal iletkenliği kusursuz düzeydedir ancak buna rağmen mekanik özellikleri düşüktür. Mukavemetinin artırılması için gerinim sertleştirme işlemi uygulanabilmektedir. Ağırlıklı olarak elektrik ve kimya endüstrilerinde kullanılmaktadır ve kaynak yapılabilir.
- 2XXX serisi: Ana alaşım elementi olan bakır %6,3 oranına kadar içermektedir. Başta Mg olmak üzere başka alaşım elementleri de vardır. Bu seri, çökeltme sertleşmesi göstermektedir. Ayrıca er alüminyum alaşımları kadar iyi korozyon direnci yoktur ve alaşıma bağlı olarak, kaynaklanabilirlik düzeyi zayıf ila orta arasında değişmektedir. Bu serinin en iyi yanı, 150°C'ye (300°F) kadar sıcaklıklara dayanabilmeleri, sürünme dayanımlarıdır. Uçak gövde ve mekanik elemanları, araç gövde panelleri gibi yüksek mukavemet istenen ürünlerin imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır. 2024

alüminyum serisi, en yaygın alüminyum türüdür ve uçak tasarımında etkin bir şekilde endüstride kullanılmaktadır.

- 3XXX serisi: Bu serinin ana alaşım elementi mangandır. Çok iyi korozyon direncine, üst düzey deformasyon özelliğine ve kaynaklanabilirliğe sahiptir. Genellikle ısıtıl işlem görmez, fakat serinin yaklaşık beşte biri 1XXX serisinden daha güçlü alüminyum alaşımları içerir. Tipik akma dayanımı 250 MPa'ya kadardır. İşme kapları, kimyasal kaplar, endüstriyel çatılar, kıvrımlı boruların imalatında kullanılır.

- 4XXX serisi: Ana alaşım elementi silisyumdur (genellikle Si'nin oranı değişiklik gösterir). Bu seri eğer bakır içeriyorsa çökeltme sertleşebilmektedir. Aynı zamanda bu seri, düşük termal genleşme katsayısına, yüksek aşınma direncine ve korozyon direncine sahip alaşımlardır. Bu alüminyum alaşımları önemli düzeyde karbon grisi silikon içerinden, mimari uygulamalarda gereklidirler ve anodize kaplamalarda kullanılırlar. Piston gibi yüksek sıcaklığa dayanıklı parçaların imalatında, kaynaklı yapılarda, levha imalatında, ayrıca kaynak teli ve lehim olarak kullanılırlar.

- 5XXX serisi: Ana bileşen magnezyumdur. Alaşım serisinde Mg oranı arttıkça sertlik ve mukavemet artar ancak süneklik küçülür. Çözeltiye %5,1'e kadar Mg eklenmesi gerilimi artırır. 260 MPa akma dayanımına kadar soğukta sertleştirilebilir. Mükemmel kaynaklanabilirliğe ve orta güce sahiptir. Deniz suyuna ve kimyasallara karşı yüksek korozyon direncine sahiptir. Bu özelliklerinden dolayı da denizcilik sektöründe birçok kullanım alanı vardır.

- 6XXX serisi: En önemli alaşım elementleri magnezyum ve silisyumdur. Magnezyum ile Silisyum kombinasyonu, Mg_2Si çökeltme sertleşmesini sağlamaktadır. Bu seri, 2xxx ve 7xxx alaşımları kadar dayanıklı olmasa da orta derecede sağlamlığa, iyi şekillendirilebilirliğe, kaynaklanabilirliğe, işlenebilirliğe ve nispeten iyi korozyon direncine sahiptir. Plaka, levha ve ekstrüzyon çıktısı olarak bulunmaktadır. Aynı zamanda 5000 serisi ile paralel alanlarda kullanılmaktadır.

- 7XXX serisi: Çinko ana alaşım elementidir (Zn oranı %1-8 arasında değişebilir) ve genellikle Mg, Cu ve az miktarda Mn ve Cr ile birlikte mukavemet için kullanılmaktadır. Isıl işleme karşı ve yüksek mukavemete sahiptirler. Bu seri, en güçlü alüminyum alaşımıdır. Gerilme korozyonunun veya film oluşumunun problem olduğu durumlarda kullanılır. Çoğunlukla uçak sanayinde kullanılırlar. Bakır alaşımları çökeltme ile

sertleştirilebilir. Kaynaklanabilirlik, alaşıma ve yöntemle bağlı olarak zayıftan çok iyiye değişiklik göstermektedir.

- 8XXX serisi: Ana alaşım elementi lityumdur ve kalay da eklenebilir. Demir ve nikel, elektriksel iletkenlikte önemli bir kayıp olmaksızın mukavemet katar ve 8017 gibi yüksek iletkenlikli alaşımlarda kullanılır. Özellikle uçak ve uzay yapılarında kullanılan bu malzeme, iyi yorulma direncine ve iyi eğilme özelliklerine sahiptir. Ancak üretim maliyetleri diğer alaşımlara göre yüksektir. Havacılık endüstrisinde kullanılır.

Yukarıda özellikleri verilen alaşım serilerinin özel adları aşağıda paylaşılmıştır (Tablo 2.5.).

Tablo 2.5. Alüminyum alaşım serileri özel alaşımları (Korkut, 2019)

Alaşım Serisi	Alaşımlar
1XXX	1050, 1060, 1100, 1145, 1200, 1230, 1350
2XXX	2011, 2014, 2017, 2018, 2124, 2219, 2319, 2010, 2030, 2060, 2240, 2420
3XXX	3003, 3004, 3105, 3830, 3850, 3900
4XXX	4032, 4043, 4145, 4643
5XXX	5005, 5049, 5052, 5083, 5754
6XXX	6013, 6052 ve 6061
7XXX	7075, 7050, 7049, 7100, 7110
8XXX	8006, 8111, 8079, 8500, 8510, 8520

2.4. Kaynak Teknolojisinde Alüminyum ve Alaşımları

Alüminyum ve alüminyum alaşımları, ergitme kaynak yöntemleri kullanılarak kaynaklanabilir. Kaynak kabiliyetinden bahsedebilmek için Şekil 2.5'te verilen çembere bağlı zincirlerin birbirine bağlanması gerekmektedir. Alüminyum malzemelerin çeliğe kıyasla kaynaklanması sırasında, malzemeye özgü bazı özellikler dikkate alınmalıdır. Alüminyum malzemelerin termal iletkenliği, yapısal çeliklere kıyasla daha yüksektir. Bu nedenle, kaynak penetrasyonu genellikle daha düşüktür ve kaynak havuzu daha sonra gazdan arındırılmalıdır. Bu süreçte, yetersiz erime ve gözeneklerin oluşması gibi sorunlar ortaya çıkabilir. Bu nedenle, alüminyum malzemelerin kaynağı sırasında uygun kaynak parametreleri ve prosedürleri kullanılması önemlidir. Kaynak işlemi, malzemenin özelliklerine uygun olarak optimize edilmeli ve uygun gaz koruması sağlanmalıdır. Ayrıca, doğru ekipman ve kaliteli kaynak elektrotları veya tel malzemeler kullanılması da önemlidir. Profesyonel kaynakçılar ve mühendisler, alüminyum malzemelerin kaynağı

sırasında bu faktörleri dikkate alır ve uygun önlemleri alarak yüksek kaliteli ve güvenilir kaynak bağlantıları elde ederler (Yalçın, 2010; Pakdil, 2005).



Şekil 2.5. Kaynak kabiliyetinin şematik gösterimi

Kaynak edilecek parçaların ön tavlama ve kalın profil malzemelerinin kaynak sırasında da tavlama ile bu tür kaynak hatalarının önüne geçilebilir. Kaynağa başlamadan önce yüzeydeki alüminyum oksit tabakası, paslanmaz çelik fırça ile zımparalanarak veya fırçalanarak kaynak bölgesinden tamamen uzaklaştırılmalıdır. Kaynak yüzeyleri ve kaynağa yakın bölgeler yani kaynak ağzına en az 50 mm yakın alanların temiz, yağsız ve kuru olması lazımdır. İyi bir depolama ve mekanik işlemlerden sonra kaynak yüzeylerinin özel bir solüsyon ile temizlenmesi bu tür hazırlık çalışmalarını kolaylaştırmaktadır. Ayrıca alüminyum malzemeleri kaynaklamak için kullanılan el aletleri de sadece bu malzemeler için kullanılmalıdır. Geleneksel alüminyum döküm malzemeler kaynak yapılırken, iç gazlar nedeniyle kaynakta ve kaynağa bitişik ana metalde aşırı gözeneklilik oluşmaktadır. Ayrıca toz metalurji parçalar da kaynak sırasında iç yapıdaki gözeneklilik nedeniyle kaynak sonrasında kaynak metalinde ve ısı tesiri altındaki bölgede gözeneklere sahip olabilir. Alüminyum alaşımının kaynaklanabilirliğinin belirlenmesinde, alaşımın bileşimi, alaşımın şeklinden çok daha önemlidir (Yalçın, 2010; Şafak, 2011).

Modifiye metal alaşımlarından ısıtılma işlemi görmemiş 1XXX, 3XXX ve 5XXX serileri, gaz altı kaynak yöntemiyle kaynaklanması en kolay olanlardır. Seri 6XXX ısıtılma işlemi görmemiş ürünlerin de kaynaklanması kolaydır. 4XXX serisi ve yüksek mukavemetli seri alaşımların yanı sıra ısıtılma işlemi görmüş 2XXX serisi de gazaltı kaynağı yapılabilir, ancak özel teknikler gerekebilir ve bir şekilde düşük mukavemet elde edilebilir. Güçlü, ısıyla

işlenebilir 7XXX serisi alaşımlar 7075, 7079 ve 7178 kaynaklanabilir ancak sıcak noktaları kırılıgandır; bu nedenle kaynak yapılması önerilmemektedir. Buna karşılık, 7005 ve 7039 alaşımları, kaynak için özel olarak geliştirilmiştir ve iyi kaynak özelliklerine sahiptir (Senyen, 2001).

2.4.1. Alüminyum Alaşımlarında Kullanılan Kaynak Yöntemleri

Aşağıda alüminyum ve alüminyum alaşımlarda kullanılan kaynak yöntemleri paylaşılmıştır (Tablo 2.6).

Tablo 2.6. Kaynak yöntemleri (Tımaç, 2006)

Yöntem	Uygulama
Katı faz (Füzyon)	
Sürtünme Kaynağı	Dairesel, kare ya da dikdörtgen kesitli çubukların ve içi boş elemanların alın birleştirmeleri; levha ve haddelenmiş kesitlerin alın alına birleştirme kaynağı farklı metallerin kaynağı; yüksek fiyatlı ekipman gereklidir.
Sürtünen Elemanla Birleştirme Kaynağı (Sürtünme Karıştırma Kaynağı)	Hadde ve döküm alaşımlarından üretilmiş levhaların, profillerin ve boruların tek ya da çift taraflı alın kaynağı, bindirme ve köşe kaynağı, farklı metallerin kaynağı, otomatizasyona yatkınlık, yüksek kaynak bağlantı mukavemeti.
Ultrasonik Kaynak	Folyo, ince ve kalın kesitli sacların bindirme birleştirmeleri; elektrik iletim hatlarındaki Al-Cu birleştirmek]
Soğuk Basınç Kaynağı	Bindirme ve alın birleştirmeleri; örneğin. Al- Cu, Al- Çelik, Al sac ve teller.
Sıcak Basınç Kaynağı	Bindirme bağlantıları, eğik kenar hazırlıklı alın birleştirmeleri.
Saplama Kaynağı	
Kondenser, Kapasitör Deşarjı ile Saplama Kaynağı	En çok saplama yarıçapı 6 mm, örneğin, izolasyon pimleri, tava tutucuları, otomobil kaporta pimleri, elektrik temas elemanları. Saplama çapları 5 ile 12 mm arasında değişir.
Elektrik Direnç Kaynağı	
Nokta, Kabartı ve dikiş kaynağı	İnce sac işlerinde bindirme bağlantılarında; otomotiv, uzay ve havacılık, mutfak eşyaları yapım endüstrilerinde kullanılır; yüksek yatırım maliyeti gerektirir, yüksek verim sağlar.

Tablo 2.6. (Devam) Kaynak yöntemleri (Tımaç, 2006)

Yöntem	Uygulama
Kombine Bağlantı (Nokta Kaynağı+ Yapıştırma)	Bindirme bağlantılarında nokta kaynağı ve yapıştırmanın birlikte kullanımı; Otomotiv endüstrisinde kullanılır, çok iyi yorulma mukavemeti verir.
Yüksek Frekans Endüksiyon Kaynağı	Alın birleştirmeleri; saçtan dikişli boru kaynağı, yüksek yatırım maliyeti ve yüksek üretim hızına sahiptir.
Yakma Alın Kaynağı	Sac, çubuk ve içi boş kesitli parçaların alın birleştirilmeleri; örneğin, Al-Cu gibi farklı metallerin kaynağı; yüksek yatırım maliyeti, seri üretim miktarları.
Ergitme Kaynağı	
TIG Kaynağı	Yüksek kaliteli kaynak yöntemi, ergimeyen elektrod kullanılarak yapılan bir kaynak yöntemidir. Bu yöntemde kaynak metalinin oluşturulması için tel kullanılabilir veya kullanılmayabilir. Kaynak işlemi el ile, mekanize veya otomatik olarak uygulanabilir. Dolgu oranı genellikle düşük olsa da, TIG kaynağında kızgın tel kullanımıyla dolgu oranı artırılabilir. Bu yöntem, doğru veya ters kutuplama ile gerçekleştirilebilir. Ergimeyen elektrod kullanılan bu kaynak yöntemi, genellikle yüksek kaliteli kaynak bağlantıları sağlar. Ergimeyen elektrod, kaynak işlemi sırasında erimez ve bağlantı noktasında kalır. Bu sayede, kaynak bağlantısı daha dayanıklı ve güvenilir olabilir.
MIG Kaynağı	Her pozisyonda kullanılabilen ergiyen elektrodla gerçekleştirilen bir kaynak yöntemidir. Bu yöntem el ile, mekanize veya otomatik olarak uygulanabilir. Yüksek dolgu oranı sağlar ve dolgu oranını artırmak için iki tel (twin wire) kullanılabilir. Ayrıca, yöntem doğru veya ters kutuplama ile gerçekleştirilebilir.
Örtülü Elektrod Kaynağı	Sınırlı bir şekilde uygulanan bir kaynak yöntemidir. Bu yöntemle gerilmemiş veya hafif gerilmeli bağlantılar oluşturulur. Ancak, ekonomik değerini yitirmiş bir yöntemdir.

Tablo 2.6. (Devam) Kaynak yöntemleri (Tımaç, 2006)

Yöntem	Uygulama
Gaz Ergitme (Oksi-asetilen) Kaynağı	Düşük kalitede kaynak metali sağlar ve gerilmesiz bağlantılar oluşturur. Bu yöntem, alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynak uygulamalarında ekonomik değerini büyük ölçüde kaybetmiş, ancak tamir amaçlı kullanılabilen bir konuma gelmiştir.
Elektron Işın Kaynağı	Yüksek kaliteli; kaliteli, hızlı ve hassas bir kaynak yöntemidir. Bu yöntem, uzay, havacılık ve elektronik ekipman elemanlarının üretiminde sıklıkla kullanılır. Ancak, yüksek yatırım maliyeti ve vakum kamarası gereksinimi bulunmaktadır.
Lazer Işın Kaynağı	Yüksek kaliteli; hızlı ve hassas bir kaynak yöntemidir. Uzay, havacılık ve elektronik ekipman elemanlarının üretiminde sıklıkla kullanılır. Bu yöntem yüksek yatırım maliyeti gerektirebilir, ancak vakum kamarası gerektirmez.

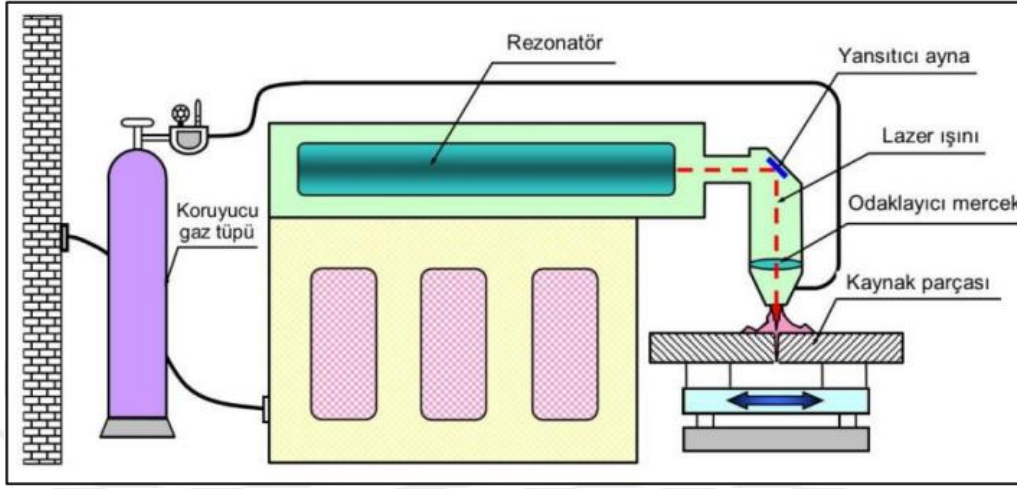
2.4.2. Lazer Kaynağı

Lazer kaynağı, mevcut kaynak yöntemleri arasında en yeni yöntemlerden biridir. Uygulama alanında büyük yenilikler getiren lazer kaynağı akademik olarak en çok merak edilen ve araştırılan yöntemdir. Lazer ışını kaynağının avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir (Aydın ve Karaağaç, 2018);

- Yüksek ilerleme hızı,
- Düşük ısı üretimi,
- Dar kaynak dikişi,
- Dar ısı etki alanıdır.

Yukarıda sıralanan avantajların yanı sıra yöntemin dezavantajları ise yüksek yatırım maliyetleri, sınırlı kaynak yerleri, kalın parçaların kaynağında dar kaynak metali ve düşük penetrasyondur. Lazer ışınının optik rezonatörüne gönderilen enerjinin bir kısmı, etkin maddenin etkisiyle zamana ve hacme bağlı olarak ışına dönüştürülerek lazer ışınının oluşması sağlanmaktadır. Burada kullanılan etken madde katı, sıvı ve gaz halinde olabilmektedir. Bu kaynak yönteminde lazer ışınının ısısı iş parçasına yönlendirilerek

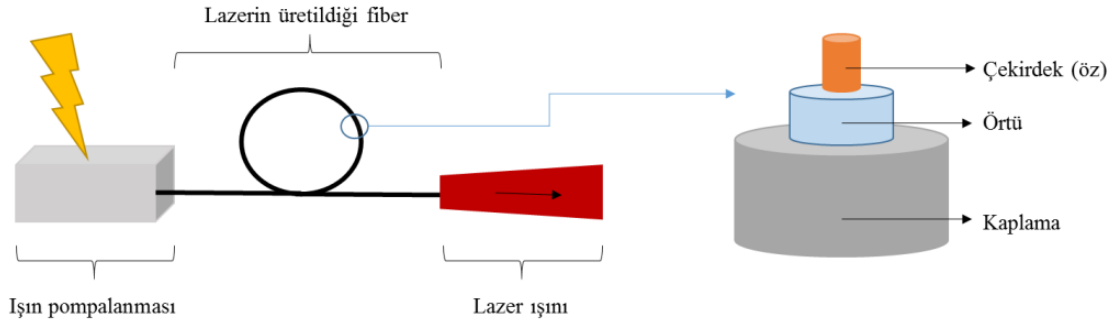
birleştirme yapılır. Montaj sırasında meydana gelen dar kaynak, parçalara hassas bir şekilde yaklaşmayı gerektirmektedir (Şekil 2.6) (Yüce, 2018).



Şekil 2.6. Lazer ışını oluşumu (Kaya, 2022)

2.4.2.1. Isı İletimli/Fiber Kaynak

Fiber lazerler 1960'ların başında doğmuş ve 1980-1990'larda düşük güçlü optik amplifikatörler olarak kullanılmıştır. 2000 yılında ilk olarak 100 W'lık bir fiber lazer üretilmiş ancak bu lazerlerin malzeme taşıma süreçlerindeki yetenekleri günümüzde dahi geliştirilmeye devam etmektedir. Buna rağmen ticarileşmenin büyümesine bağlı olarak günümüzde 10 kW'a kadar farklı güçlerde fiber lazerler üretilmektedir. Bu yeni geliştirilen lazerlerin er yöntemlere göre birçok avantajı vardır (Atmaca, 2021). Bu lazerler diyot veya lamba pompalı çubuk lazerlerden daha yüksek verimliliğe sahiptirler, kompakt tasarımları sayesinde kurulumları kolaydır, ince fiberlerin kullanımı sayesinde iyi ışın kalitesine sahiptirler ve bu nedenle küçük bir odak uzaklığı çapları vardır. Ayrıca pompa diyotları diyot pompa lazerlere göre daha uzun ömürlü olduğundan yatırım maliyetleri daha uygundur. Bu yüksek güçlü lazerler, kısa bir dalga boyuna sahip oldukları ve hemen hemen tüm metalleri ve alaşımları absorbe ettikleri ve fiber transfer sistemi hızlı yerleştirme için gereken esnekliği sağladığı için çeşitli malzeme ve yapıların derin penetrasyonlu kaynağı için kullanılabilirler. Ayrıca sacları birleştirmek için kullanılacak yüksek kaynak hızı nedeniyle yüksek güçlü CO₂ lazerlerinden daha verimlidirler. Bu lazerlerin çalışma prensipleri Şekil 2.7'de şematize edilmiştir (Quintino ve diğ., 2007).



Şekil 2.7. Fiber lazerlerin çalışma prensipleri (Atmaca, 2021)

2.4.2.2. Derin Nüfuziyet Kaynağı

Derin penetrasyon kaynağı, geleneksel kaynak yöntemlerine kıyasla proses hızını artıran, gerekli kaynak mukavemetini elde etmek için daha fazla dikiş penetrasyonundan yararlanan ve genellikle kaynak işleminin maliyetini azaltan bir dikiş kaynağı tekniğidir (Katayama ve diğ., 2011). Bu kaynak modu ile elde edilen kaynak dikişleri anahtar deliği (key hole) şeklinde penetrasyon verir. Derin nüfuziyet kaynağında malzeme kalınlığı boyunca tam nüfuziyet derinliği elde edilebilirliği ile ısı iletim kaynağından ayrılır. Bu ayırım ile yüzeysel ergitme talepleri ve yüzey kaplama talepleri için ısı iletim kaynağı, tam penetrasyon isteninde derin nüfuziyet kaynağı tercih edilmektedir (Majumdar ve Manna, 2003; Wang ve diğ., 2010).

2.4.2.3. Lazer Kaynağının Avantaj ve Dezavantajları

Son zamanlarda lazer kaynağı üzerinde yapılmış olan gelişmelerle birlikte, bu kaynak yönteminin diğer birleştirme yöntemlerine göre birçok avantajı ortaya çıkmıştır ve aşağıdaki gibi sıralanmaktadır (Erçel, 2022; Gündoğdu İş, 2022);

- Büyük penetrasyon derinliği,
- Dar ITAB genişliği,
- Yüksek malzeme işleme hızı,
- Kullanışlı ve basit çalışma fonksiyonu,
- Çeşitli sanayi ve tamir işlerinde kullanımı,
- Etkilidir.

Lazer kaynak yönteminin dezavantajları ise (Erçel, 2022);

- Lazer ışınının darlığından kaynaklanan düzlemsel kaynaklar,
- Lazere maruz kalındığında sağlık ve iş güvenliği sorunları ortaya çıkabilmektedir,
- Yüksek yatırım maliyetidir.

2.4.2.4. Lazer Kaynağı İşlem Parametreleri

Lazer kaynak yöntemi malzemeye enerjinin aktarımı açısından er yöntemlerden oldukça farklıdır. Lazer ışını, kılavuz aynaları ve odaklama mekanizması aracılığıyla malzemeye yönlendirilir. Odaklanan lazer ışını, malzemenin belirli bir noktasında yoğunlaşarak erimesine ve buharlaşmasına neden olur. Malzeme lazer enerjisini absorbe ettiğinde, buharlaşmış malzeme ve koruyucu gazdan oluşan bir plazma oluşur. Plazma içindeki ısı, eriyen malzeme aracılığıyla iş parçasına iletilir. Bu süreçte, malzemede sıcaklık ve basınç seviyelerindeki aşırı yüksek farklar nedeniyle şiddetli döngüler oluşur ve sıvı fazlı bir buhar kanalı (anahtar deliği) oluşur. Sonrasında lazer ışını veya iş parçası hareket eder ve iş parçası tarafından çekilir (Karaaslan ve diğ., 2001). Isıtılmış buharın basıncı ile eriyik iş parçasının yüzeyine yükselir ve aynı zamanda viskozite, çekim kuvveti ve yüzey geriliminden kaynaklanan sürekli genleşmeler hariç tutulur. Bu sayede lazer ışını yönünde metal eritilir ve kalan alaşım katılaşır. Katılaşmadan sonra homojen bir yapıya sahip dar bir kaynak oluşur. Katılaşmadan sonra homojen bir yapıya sahip dar bir kaynak oluşur. Isı oluşumu minimum seviyede gerçekleştiği için kaynakta Isıdan Etkilenen Bölge (ITAB) çok dar sınırlar içinde kalır. Malzemelerin kaynak dikişi oluşturarak yapılan kaynak işlemi, özellikle kalın levhaların kaynatılması için uygun bir yöntemdir. Lazer kaynak yöntemi söz konusu olduğunda, iş parçasının fiziksel özellikleri, kaynağın kalitesini belirlemek için büyük önem taşımaktadır. Özellikle oluşan kaynağın kalitesi malzemenin yansıtma ve soğurma özelliklerinin yanı sıra ısı transfer katsayısı ile belirlenir. Östenitik paslanmaz çeliğin termal iletkenliği diğer karbon çeliklerinin 1/3'ü kadar olmasına rağmen, termal genleşme katsayıları yarı yarıya kadar büyüktür (Uzun ve Keleş, 2012; Gündoğdu İş, 2020).

Bu bilgiler ışığında lazer kaynak işlem parametrelerinin aşağıdaki gibi sıralanması mümkündür (Erçel, 2022);

- Lazer gücü,
- Kaynak genişliği,

- Güç yoğunluğu,
- Odak noktası
- Kaynak hızı,
- Kullanılan koruyucu gazlar
- Wobble hareketi.

2.4.2.5. Lazer Gücü

Endüstriyel kaynak işleminde gücü 1 kw'dan 10 kw'a kadar olan lazer enerji kaynakları kullanılmaktadır. Literatürde lazer gücünün yüksek dayanımlı çeliklerin kaynaklı numuneleri üzerindeki etkisini araştıran birçok çalışma bulunmaktadır. Mevcut çalışmalarda kompozit numunelerin lazer gücü ITAB ve EB özellikleri belirlenmiş ve incelenen malzemeler için ideal güç değeri belirlenmiştir. Çalışmalar, lazer gücü değişiminin kaynak kalitesini, mekanik özellikleri ve iç yapıyı etkileyen çok önemli bir parametre olduğunu bulmuştur (Alpar ve diğ., 2021).

2.4.2.6. Spot Genişliği

Literatürde yapılan araştırmalar sonucunda, spot genişliğinin yeterli ısı iletimine izin verecek kadar fazla, kaynağın genişliği ile orantılı olduğunu göstermektedir. Malzeme kalınlığı boyunca odaklanmış ışının genişliğidir. Odak noktası mesafesi istenen penetrasyon derinliğine ulaşmak için önemlidir (Alpar ve diğ., 2021; Miyachi, 2020).

2.4.2.7. Güç Yoğunluğu

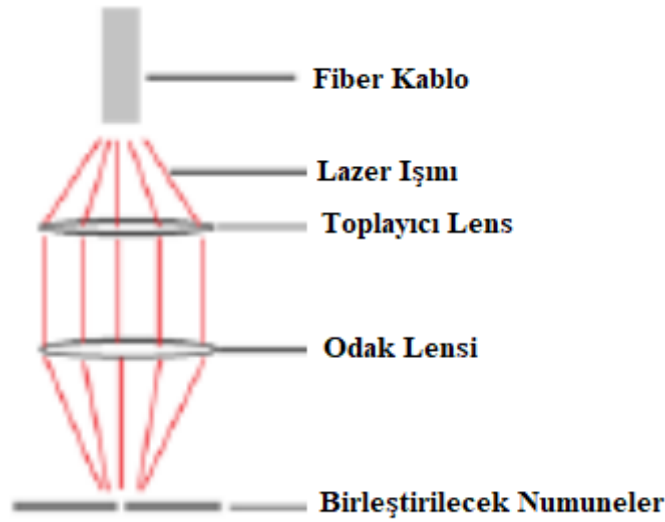
Lazer ışınının odaklanması sırasında odak noktasının spot boyutuna ve uygulanan lazer gücüne bağlı olarak belirli bir güç yoğunluğu elde edilmiştir. Güç yoğunluğu, lazer spot çapı ile ters orantılıdır (Reijonen, 2015). Güç yoğunluğu 104 W/cm²'ye kadar ise soğurulan enerji, dalga boyuna, doğrudan malzemenin özelliklerine ve yüzeyin durumuna bağlıdır. Metalik malzeme gelen ışının sadece küçük bir kısmını soğursa da yüzeyden kalan ışının çoğunu yansıtmaktadır. Ancak paralel polarize ışık absorpsiyonu arttırmak için eğik olarak iletilirse geliş açısı artırılarak istenilen değerler elde edilebilmektedir. Absorpsiyonu biraz artırmak için, odağı artırarak veya gücü artırarak güç yoğunluğunu 105 W/cm²-106 W/cm²'ye çıkarmak yeterlidir. Bu artış sonucunda yüzeyde erime ve lokal buharlaşma başlar ve bu da absorpsiyonu bir ölçüde artırır. Güç yoğunluğunu 106

W/cm^2 'ye çıkararak, gücü arttırmaya veya yoğunlaştırmaya devam ederek, lazer ışınının çapına eşit bir boşluk ile bir buhar kanalı veya anahtar deliği oluşturulmaktadır (Demir, 2020).

Literatürde farklı güç seçenekleri ile kaynak işlemlerinde penetrasyon oranları incelenmiştir. Kaynaktaki penetrasyon, kaynaklı birleştirmenin mukavemetini doğrudan etkilei için farklı güç değerleri ile yapılan kaynaklı birleştirmelerin dayanımları karşılaştırılmıştır. Ortak bir araştırma sonucu olarak lazer gücünün kaynağın kalitesini, mukavemetini ve iç yapısını etkileyen önemli bir parametre olduğu belirlenmiştir (Alpar ve diğ., 2021). Alüminyumun lazer kaynağında güç yoğunluğu çok düşük olduğunda, penetrasyon yetersiz olabilir. Güç yoğunluğu çok yüksek olduğunda ise, kaynakta delme, sıçrama, yetersiz doldurma ve kaynak akması gibi hatalar gözlemlenebilir. Gerekli güç yoğunluğu, malzeme alaşımına ve malzeme kalınlığına bağlı olarak seçilir. Eriyik malzemelerin fırlamasını önlemek için güç yoğunluğu $107 W / cm^2$ 'yi geçmemelidir (Cao ve diğ., 2003; Katayama, 2013).

2.4.2.8. Odak Noktası

Lazer kaynağının kalitesini etkileyen diğer bir parametre ise lazer ışınının lazer kafasından çıktıktan sonra kaynak yapılacak malzeme üzerinde odaklandığı nokta, ışının odak uzaklığı ve çapıdır. Odak noktası kaynaklanacak parçanın üstünde, altında veya yüzeyinde lazer ışını noktasının konumlandırılmasını ifade eder. Odak noktası konumunun negatif ve pozitif değerleri, lazer ışınının sırasıyla malzeme yüzeyinin altına ve üstüne odaklanmasını ifade etmektedir. Lazer kafası, başa gelen ışını toplayan bir toplayıcı (kolimatör) mercek ve toplanan ışığı kaynak yapılacak malzemeye odaklayan bir odaklama merceği kullanmaktadır. Şekil 2.8'de bir odaklama ve yakınsama merceği gösterilmektedir. Malzemenin yakınındaki odak merceğinin kaynak sırasında oluşabilecek sprey veya buharlardan zarar görmemesi için odak uzaklığı değeri mümkün olduğu kadar uzak tutulur (Erçel, 2022; Franco, 2017). Bununla birlikte, lazer ışınının daha ileriye odaklanması, güç yoğunluğunda bir azalmaya ve anahtar deliği penetrasyonunda dengesizlik oluşturması nedeniyle gözeneklilik seviyesinde bir artışa neden olur (Ion, 2000).



Şekil 2.8. Odak ile toplayıcı lens (Erçel, 2022)

2.4.2.9. Kaynak Hızı

Endüstri, lazer kaynağı için 10 kW'lık güç kaynaklarını kullanmaktadır. Lazerin gücü, kaynak yapılacak malzemeye nüfuz edecek şekilde ayarlanmalıdır. Kuvvet gereğinden fazla ise, yapıştırılan malzemenin katılaşmasına veya yırtılmasına neden olabilir. Optimum penetrasyon için kaynak hızı parametresi lazer gücü ile birlikte optimize edilmelidir. Seri üretim süreçlerinde genellikle yüksek hız gerektiğinden, kaynak hızı genellikle yüksek güç kullanılarak optimum penetrasyon için ayarlanır. Kaynak hızı, yapılan kaynak işleminin ilerleme hızıdır. Aşağıdaki denklemde de gösterili üzere kaynak hızı (mm/s), lazer gücü (kW) ve ısı gücü (kJ/mm) belirlenmektedir. Zayıf penetrasyon, lazer gücü ve kaynak hızı optimize edilmeinde ortaya çıkmaktadır (Fahlström, 2015; Alpar ve diğ., 2021).

$$Isı Girdisi (Q) = \frac{Lazer Gücü (P)}{Kaynak Hızı (v)} \quad (2.1)$$

Penetrasyon derinliği ve genişliği kaynak hızı ile ilgilidir. Daha yüksek kaynak hızı, daha yüksek enerji kullanımına yol açar ve enerjinin çoğunun anahtar deliği oluşumu tarafından tüketilmesine neden olur. Bu nedenle, kalan enerji penetrasyon derinliğini artırmak için yetersizdir. Bununla birlikte, daha yavaş kaynak hızı, daha kararlı bir

anahtar deliği ve penetrasyon derinliği daha yüksek kaynak dikişi sağlar (Reijonen, 2015).

Farklı kalınlıklardaki 1XXX, 5XXX, 6XXX ve 7XXX serisi alüminyum alaşımlarının kaynak hızı değişken tutularak yüksek güçlü fiber lazer ile birleştirilmiş ve penetrasyon derinliğinin en yüksek 5XXX serisi alaşımlarda olduğu görülmüştür. Ancak 5XXX serisi alüminyum alaşımlarında penetrasyon derinliği yüksek olmasına rağmen kaynak metalindeki gözeneklilik miktarının da fazla olduğu incelenmiştir (Katatama ve diğ., 2009).

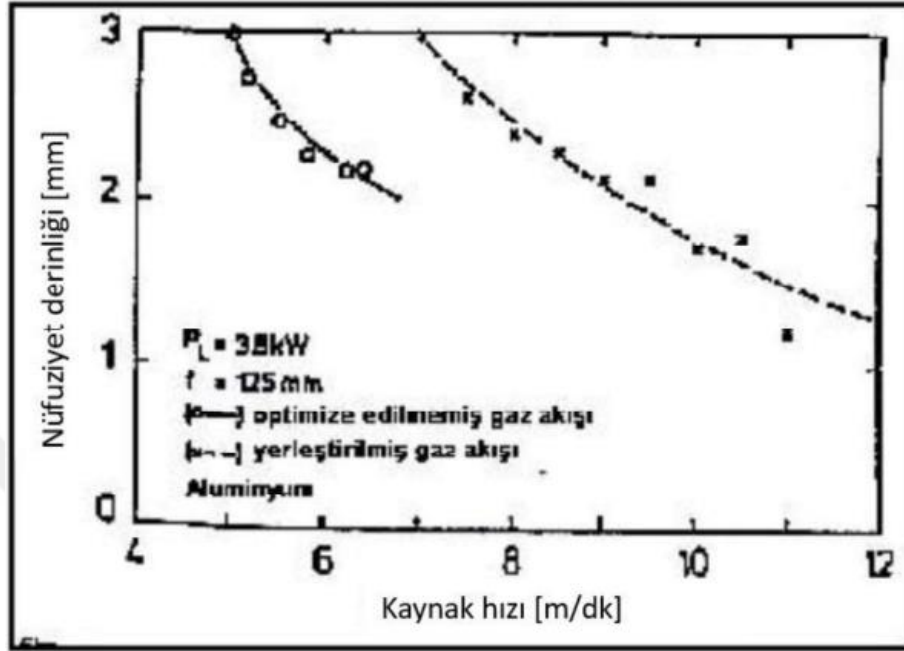
2.4.2.10. Koruyucu Gaz

Koruyucu gaz kullanmanın temel amacı, kaynak edilecek malzemelerin yüzeyini ve kökünü oksidasyondan korumaktır. Koruyucu gazların görevleri ayrıca ısı dağılımının, plazma bulutunun kontrol edilmesini ve optik mercekle kaynak buharından ve sıçramadan korumasıdır. Alüminyum alaşımlarının kaynağı sırasında buharlaşan metal tepki verir bir plazma oluşturur. Bu plazma aynı zamanda kaba gözeneklerin oluşumunu önlemek ve kaynak penetrasyonundaki azalmayı ortadan kaldırmak için bastırılmalıdır (Cao ve diğ., 2003).

Alüminyum lazer kaynak uygulamalarında koruyucu gaz görevi ile çoğunlukla argon ile helyum tercih edilmektedir. Helyumun ikamesi olarak ise genellikle azot tercih edilmektedir. Gereksinim duyulması hâlinde ise bu gazların bir karışımı da kullanılabilir. Helyumun erlerine kıyasla daha fazla tercih edilmesinin nedeni de yüksek iyonizasyonudur. Aynı zamanda helyum ile argonun birlikte oksitlenmeyi önlemesi ve kaliteli kaynak havuzu oluşturmaları bir avantajdır. Koruyucu gazların debi kullanım aralıkları 10-40 l/dk'dır. Kaynak hızı yükseldikçe de debi yükseltilmelidir. Koruyucu gazlarda akışın meydana getirdiği kaynak nüfuziyet etkisi aşağıda gösterilmiştir (Şekil 2.9) (Güç, 2021). Yetersiz koruyucu gaz kullanıldığında gözeneklilik, kökte oyuklar ve dikiş pürüzlülüğü sorunları ortaya çıkarabilir (Franco, 2017).

Lazer kaynağı ile birleştirilen 2 mm kalınlığında AA5083 alaşımının ilave tel ile kaynağı sonrasında metalürjik olarak inceleninde kaynak metalinde dentritik taneler olduğu görülmüştür. Aynı çalışmada %5 ve %30 He karışımı koruyucu gaz kullanılarak yapılan birleştirmelerin en yüksek çekme mukavemetine sahip olduğu belirtilmiştir. En düşük

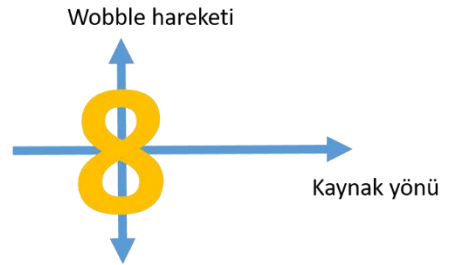
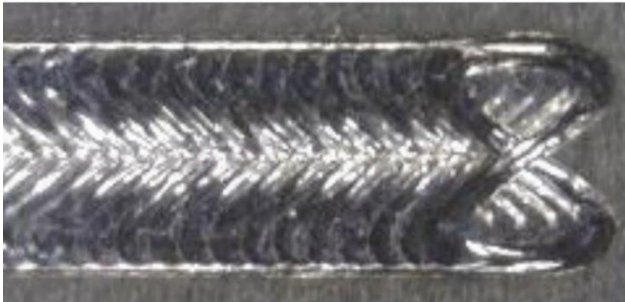
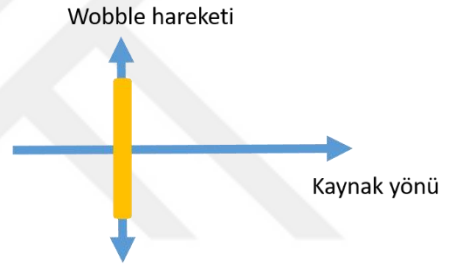
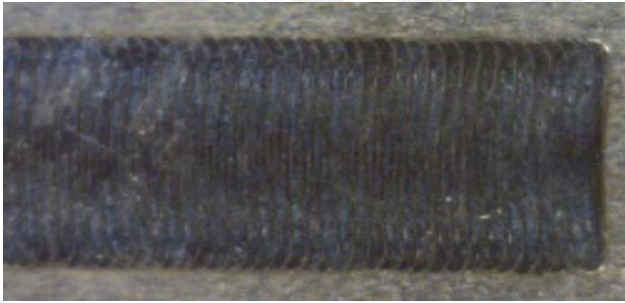
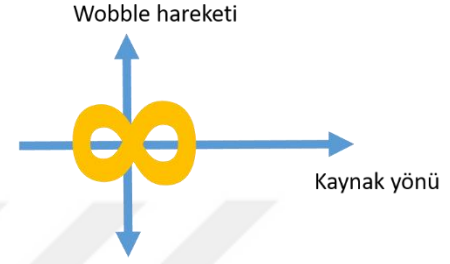
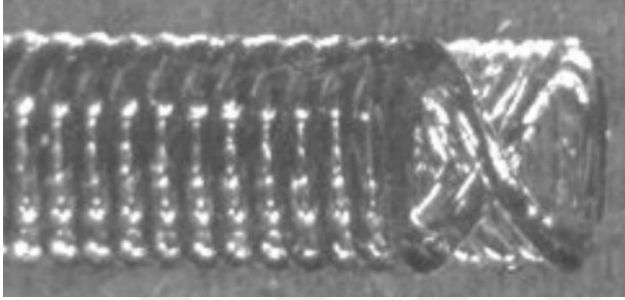
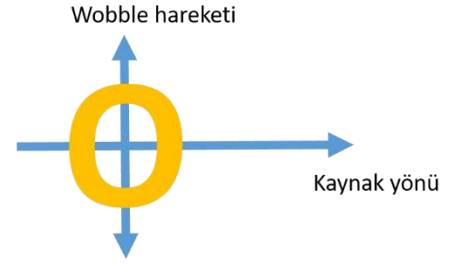
mukavemeti ise saf argon koruması ile yapılan birleştirmelerde olduğu görülmüştür (Vyskoč ve diğ., 2018).



Şekil 2.9. Korumucu gazların kaynak sonuçları ile plazma oluşumuna etkileri (Güç, 2021)

2.4.2.11. Wobble Hareketi

Wobble teknolojisi, giriş lazer ışınının iç aynalar yardımıyla şekillendirilmesine olanak sağlar. Lazer kaynağında farklı şekillendirme kullanmak, erimiş havuza hidrodinamik karıştırma sağlar ve anahtar deliği kaynağını iyileştirir (Miller, 2016). Geleneksel lazer kaynağıyla karşılaştırıldığında, wobble hareketleriyle kaynak, lazer ışınının aynı bölgede tekrarlanan hareketi nedeniyle sıcaklık gradyanını azaltır. Ayrıca, wobble hareketinin önemli etkileri, uygun frekans ve genlik kullanarak anahtar deliği kararsızlığını düzenleyerek gözeneklilik seviyesinin azaltılması ve kaynak kalitesinin iyileştirilmesidir. Yaygın olarak kullanılan lazer wobble hareketleri Şekil 2.10'da gösterili gibi dairesel, doğrusal, sekiz ve sonsuz şekillerdir (Samson ve diğ., 2017; Zhang ve diğ., 2003).



Şekil 2.10. Lazer wobble hareketlerinin kaynak dikişi üzerinde görüntüleri

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. Malzeme Özellikleri

Bu çalışma kapsamında AA5083 malzemeler kullanılmıştır. Malzemeler Seykoç Alüminyum firması desteğiyle tedarik edilmiştir. Kullanılan alaşımın kimyasal içeriği Tablo 3.1’de verilmiştir. AA5083 alaşımının genel özellikleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.1. AA5083 Alaşımının kimyasal içeriği

Kimyasal Analiz ile AA5083	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Diğer	Al
%	0.40	0.40	0.10	0.40- 1.0	4.0- 4.9	0.05- 0.25	0.25	0.15	0.15	Kalan

Tablo 3.2. AA5083 alaşımının mekanik özellikleri

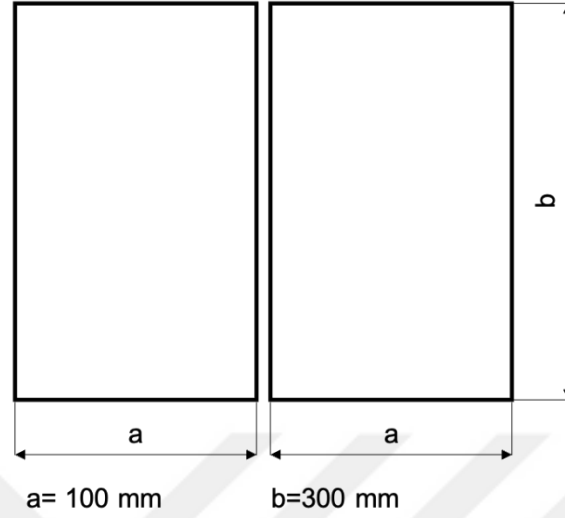
Sertlik	70 HB	Ergime Noktası	591°C
Yoğunluk	2.66 g/cc	Isıl İletkenliği	117W/m.K
Akma Mukavemeti	228 MPa	Katılaşma Sıcaklığı	591°C
Çekme Mukavemeti	317 MPa	Çözünme Sıcaklığı	638°C
% Uzama	%12 min.	Yaşlandırma Sıcaklığı	413°C
Elastisite Modülü	72 GPa	Poission Oranı	0.33

3.2. Deney Parçalarının Boyutları

Lazer kaynak ile ilave telsiz birleştirilecek malzemelerin boyutu 300x100x4.5 mm olacak şekilde yapılması planlanan 13 kaynaklı parça için 26 adet parça giyotin makas ile kesilmiştir. Lazer kaynağı yapılacak parçaların giyotin sonrası birleşme yüzeylerindeki deformasyonu azaltmak için freze ile işlenerek kaynağa hazır hale getirilmiştir. Kaynaklı birleştirilecek parçaların boyutları Şekil 3.1’de verilmiştir.

Lazer kaynağında ilave telsiz alın kaynağı yapılacak parçalar herhangi bir kaynak ağzı açılmamıştır. Yüzey pürüzlülükleri temizlenmiş parçalar paslanmaz çelikten yapılmış, birleşme merkezinde kaynak altlığı görevini görecek bir kanala sahip fikstüre

sabitlenmiştir. Bu kanal kaynak esnasında koruyucu kök gazı beslemesine olanak sağlar. Parçaların fikstüre sabitlenmiş hali Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Lazer kaynaklı birleştirilecek parçaların ölçüleri



Şekil 3.2. Fikstüre sabitlenmiş, kaynak edilmeye hazır parçalar

3.3. Kullanılan Lazer Kaynak Ekipmanları

Lazer kaynağında ilave telsiz alın kaynağı yapılacak parçalar herhangi bir kaynak ağzı açılmamıştır. Kullanılan fiber lazer 1070 μ m dalga boyuna, 100 mm kolimatör lensine,

0,1 mm proses fiberine, 200 mm odak lensine sahiptir. Lazer ışının spot çapı 0.2 mm dir. Robota bağlı lazer kaynak makinası ve ekipmanları Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



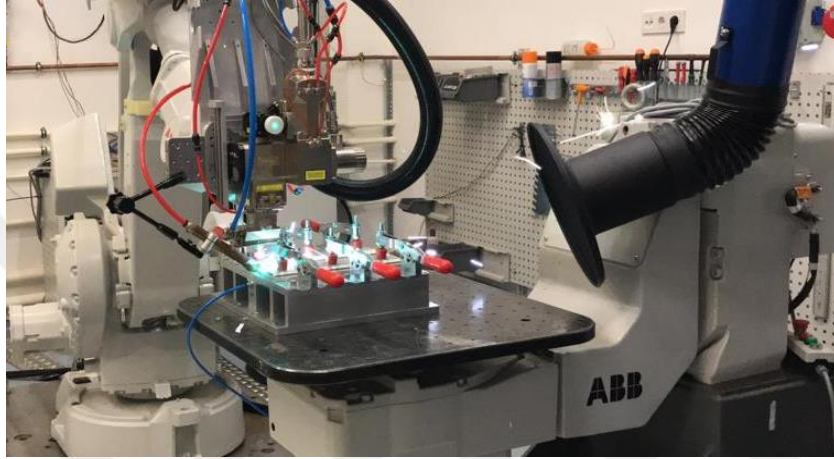
Şekil 3.3. Lazer kaynak makinesi ve ekipmanları

3.4. Lazer Kaynak Parametrelerinin Belirlenmesi

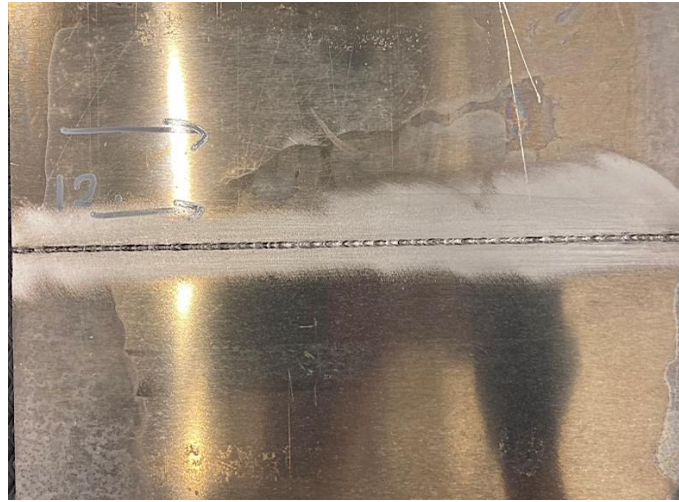
Parametreler belirlenirken literatürdeki çalışmalar göz önüne alındı. Daha önce odak noktası değişikliği ve 8 şeklinde lazer wobble hareketi incelenmiş olmasına rağmen tüm wobble hareketlerinin kaynak sonrası mekanik ve metalürjik özelliklerin etkisinin incelenmesine dair yeterli çalışma bulunmamıştır. Ön çalışmalarda focal length point (odak noktası uzaklığı) de çalışma aralığı belirlemek amacıyla ikinci değişken olarak tutulmuştur. Mekanik testler ve metalürjik incelemeler yapılarında aynı wobble hareketleriyle odak noktası değişikliğinin mekanik özelliklerde et kalınlığı ince malzemelerde ayırt edilebilir bir değişiklik doğurmadığı görülmüştür.

4.5kW gücünde bir ışın lazeri ile 100 Hz frekans, 1.5mm ışın çapı, 1,2m/dk hız ve koruyucu gaz olarak %100 Ar gazı sabit tutuldu. Ön çalışmalarda değişken tutulan focal length position değeri çalışmamızda kullanılan 4,5 mm kalınlıktaki malzeme kalınlığı göz önüne alınarak focal length position uygulamada 0 olarak sabit tutulmuştur. Bu sabitlemelerden sonra planlanan çalışma, tezin de konusu olan wobble hareket şeklinin değişiminin, kaynağın mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisini belirlemek için 4 farklı wobble hareketi değişken olarak alındı. Yapılan deneysel çalışmalarda wobble hareketi türü dışında wobble çapı da ayrıca değişken parametre olarak alınmış ve çalışmalar Tablo

3.3’te verilen parametrelerde gerçekleştirilmiştir. Lazer kaynak sisteminde koruyucu gaz lazer ışınının gönderili başlığın arkasından beslenir. Kaynak yönü boyunca önce lazer ışını ve onu takiben koruyucu gaz verilmiştir. Yapılan lazer kaynaklı birleştirmelerin görüntüsü Şekil 3.4’te ve kaynak işlemi wobble hareketsiz tamamlanmış numune görüntüsü Şekil 3.5’te verilmiştir. Tablo 3.3’te görüldüğü gibi toplamda 13 farklı parametre ile kaynaklar tamamlanmıştır. Belirlenen parametreler ile hem wobble hareketi türünün hem de wobble çapının kaynak metaline etkisi irdelenmiştir.



Şekil 3.4. Lazer kaynağı anındaki görüntü



Şekil 3.5. Wobble hareketi olmadan lazer kaynaklı birleştirilen parça görüntüsü

Tablo 3.3. Deneysel çalışma parametreleri

Numune No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13	13
Wobble çapı	1	1	1	1	1.5	1.5	1.5	1.5	2	2	2	2	-
Wobble hareketi	O	∞	8	Z	O	∞	8	Z	O	∞	8	Z	-

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Lazer Kaynak Sonrası Kaynak Dikişleri

Kaynak dikişleri görsel muayene edildiğinde genel olarak bir problem görülmemiştir. Dikiş yüzeyleri inceleninde bir problem görülmemiştir. Şekil 4.1’de verilen makro büyüteç ile kaynak dikişleri kaynak sonrası inceleninde wobble hareketi olmadan yapılan kaynak dikiş yüzeyinde düzensizlik ve porozite görülmüştür. wobble hareketi kullanılarak kaynaklanan 12 adet numunede de yüzey gözenekliliğine rastlanmamıştır. Bu çalışmanın poroziteyi azalttığına dair olumlu ilk sonucu olmakla beraber mekanik ve metalografik incelemeleriyle desteklenmiştir.



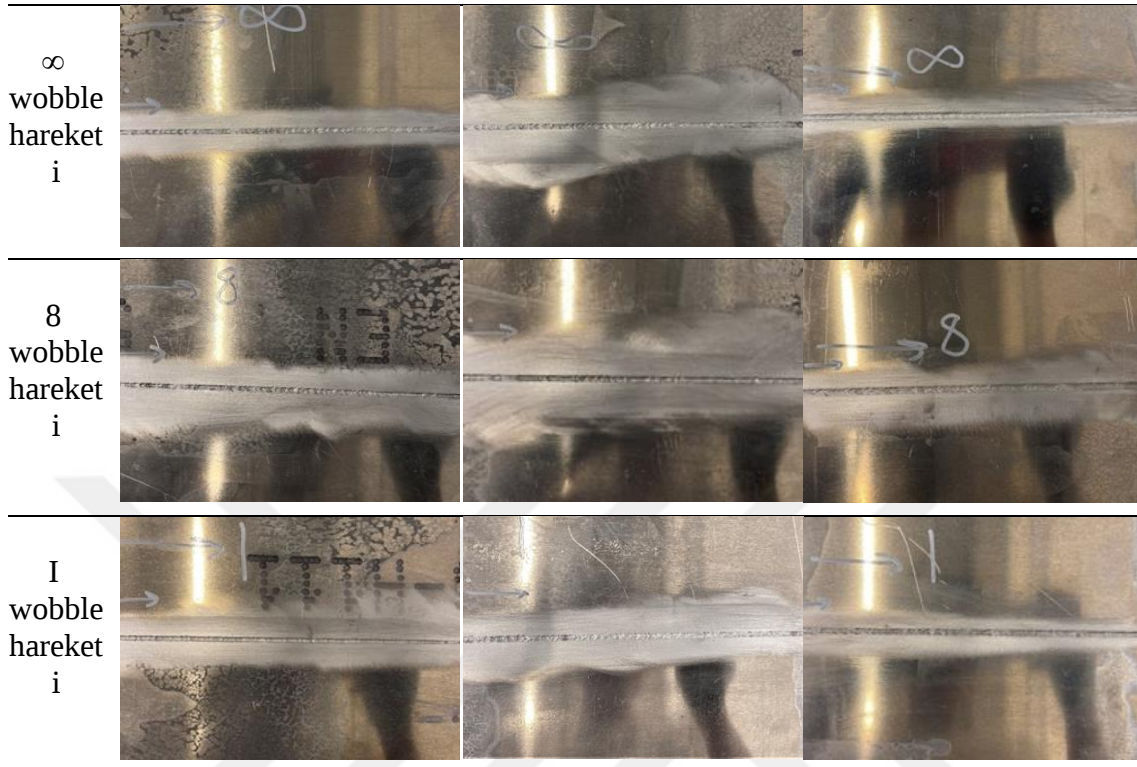
Şekil 4.1. 50X Manuel spektrometre

Aşağıdaki Tablo 4.1’de 3 farklı wobble çapı ve 4 farklı wobble hareketi kullanılarak lazer kaynakları yapılan 12 adet numuneye ait dikiş yüzeylerinin görüntüsü paylaşılmıştır.

Tablo 4.1. Farklı wobble hareketleri ve wobble çapları ile yapılan lazer kaynakları sonrası dikiş görüntüleri

	1 mm Wobble Çapı	1,5 mm Wobble Çapı	2 mm Wobble Çapı
O wobble hareketi			

Tablo 4.1. (Devam) Farklı wobble hareketleri ve wobble çapları ile yapılan lazer kaynakları sonrası dikiş görüntüleri

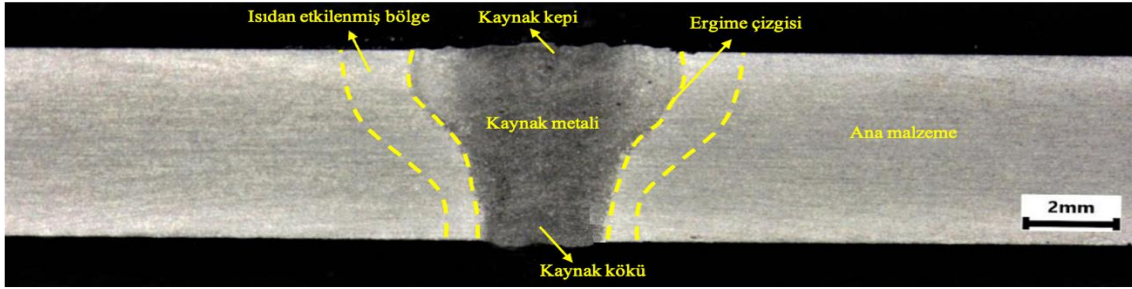


4.2. Lazer Kaynak Dikişinde oluşan bölgeler

Tüm kaynak yöntemleriyle yapılan birleştirmeler sonucu makro kesiti inceleninde; ana malzemeler, ısı tesiri altındaki bölge ve kaynak metali olmak üzere farklı metalürjik ve mekanik özelliklere sahip 3 bölge oluşur. İlave tel kullanılmaksızın yapılan kaynaklı birleştirmelerde kaynak metali, birleştirilen ana malzemeler de aynı malzemeler ise, kimyasal özellikleri ana malzeme özelliklerine benzer oluşur. Şekil 4.2’de lazer kaynak ile ilave metalsiz birleştirilmiş AA5083 ana malzemesinin makro görüntüsü verilmiş ve oluşan bölgeler gösterilmiştir. Lazer kaynak yöntemiyle elde edilen kaynaklı bölge geleneksel kaynak yöntemlerine göre daha ince ısı tesiri altındaki bölge ile avantaj sağlamaktadır.

Kaynak dikişlerinde ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) nin silik bir alan sağladığı görülmektedir. ITAB kaynak sırasında ısı etkisiyle faz değişimi ya da tane boyutu değişimi söz konusu bölgedir. Bu durum mikro yapı incelemelerinde daha net ayırt edilebilir görülmektedir. Makro görüntüler inceleninde lazer wobble hareketleri ile ilave

telsiz kaynak edilen parçalarda ITAB'ın geniş olması, kaynak metalinde yer yer hacimsel mikro gözenekler görülmüştür.



Şekil 4.2. Makro kaynak dikiş görüntüsü

4.3. Radyografik Muayene İncelemeleri

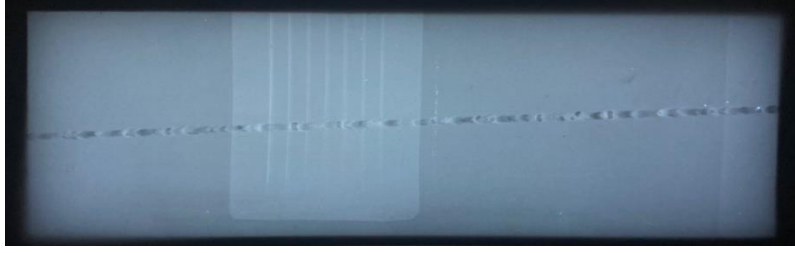
Kaynak dikişi boyunca iç kusurları değerlendirmek için X-Ray radyografik testler yapılmıştır. Radyografik film görüntüleri Tablo 4.2'de paylaşılmıştır.

Radyografik film sonuçları inceleninde 2mm wobble çapı ile yapılan farklı wobble hareketlerinin tümünde diğerlerine göre daha az gözeneklilik miktarı olduğu incelenmiştir. Her wobble çapı grubu içinde en az gözeneklilik miktarının yatay sonsuz (∞) wobble hareketi ile elde edildiği görülmüştür. Wobble hareketi olmadan kaynak edilen parçanın radyografik film sonucu şekil 4.3'te verildiği gibi ret olarak incelenmiştir.

Tablo 4.2. Wobble hareketiyle kaynak edilen parçaların radyografik film görüntüleri

	1 mm Wobble Çapı	1,5 mm Wobble Çapı	2 mm Wobble Çapı
O wobble hareket			
∞ wobble hareket			
8 wobble hareket			
I wobble hareket			

Wobble hareketlerinin tümünün wobble hareketsiz parçaya göre daha az gözeneklilik sağladığı görülmüştür.



Şekil 4.3. Wobble hareketi olmadan kaynak edilen parçanın radyografik film görüntüsü

4.4. Makro Test İncelemeleri

Kaynaklı parçaların tümüne makro ve takiben mikro görüntü testleri için numune hazırlanmıştır. Numune hazırlığında sırasıyla 240, 400, 600, 1000, 1200, 2000 μ luk zımparalardan geçilmiştir. Sonrasında kadife çuha kullanılmış, 0,5 μ luk Alümina parlatma sıvısı ile parlatma işlemleri tamamlanmıştır. Makroyapı ve mikroyapı incelemelerinde kontrast farkını yakalamak için numuneler %10'luk NaOH çözeltisiyle 15 sn dağlanmıştır. Tablo 4.3'te dağlama sonrası Nikon SMZ745T cihazıyla 50X büyütme ile makro görüntüleri alınan numunelerin görselleri paylaşılmıştır. Şekil 4.4'te ayrıca wobble hareketi olmadan aynı parametreler ile kaynak edilmiş numunenin makro görüntüsü paylaşılmıştır.

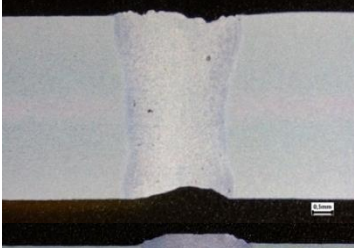
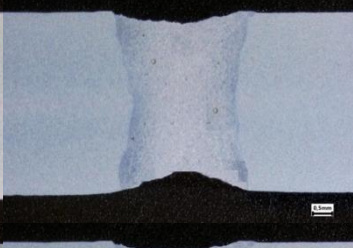
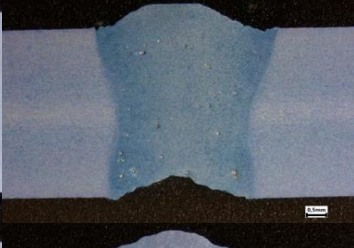
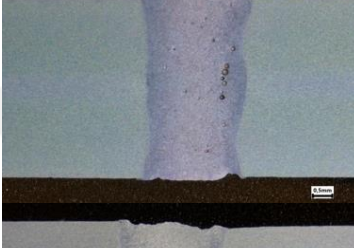
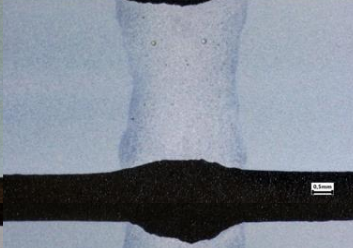
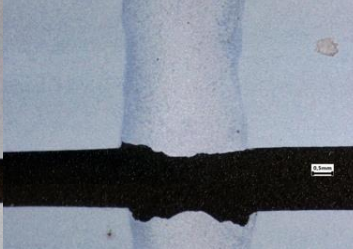
Makro ölçekte, kaynak dikişinde gözlenen gözeneklenme, lazer wobble hareketi ve wobble çapı gibi değişkenler dikkate alınmasa da alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynağında normal bir durumdur. Makro kesit incelemelerinde kaynak dikişi genişliğinin farklı olduğu görülmüştür. Makro kesitlerden anlaşılabileceği üzere wobble çapı arttıkça dikiş genişliği artmaktadır.

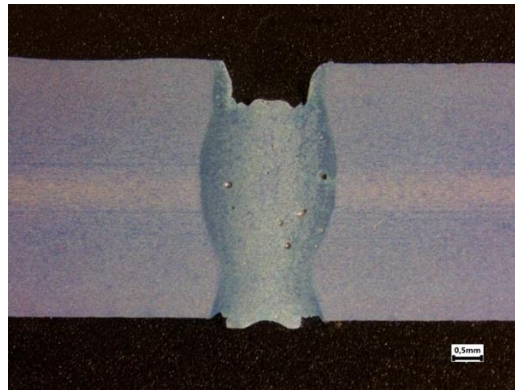
1 mm ve 2 mm wobble çapı ile elde edilen kaynak dikişlerinin gözenek miktarı 1,5 mm wobble çapı ile yapılan kaynak dikişlerinin gözenek miktarından fazla olduğu görülmüştür. Gözeneklerin Şekil 4.4'te paylaşılan wobble hareketi olmadan yapılan kaynak dikişine göre daha az olduğu söylenebilir. Varolan gözeneklilik esas metal ile kaynak metali arasında alaşım elementlerinin burharlaşmasından dolayı oluşan konsantrasyon farkıdır.

2mm wobble çapı ile yapılan kaynak dikişlerinin kep yüksekliklerinin 1 ve 1,5 mm wobble çapıyla yapılan kaynak dikişlerine göre fazla olduğu görülmüştür. wobble

hareketi kullanılmadan yapılan kaynak dikiş kesitinde yetersiz kep yüksekliği ve kökte akma olduğu incelenmiştir.

Tablo 4.3. Wobble hareketiyle kaynak edilen parçaların makro kesit görüntüleri

	1 mm Wobble Çapı	1,5 mm Wobble Çapı	2 mm Wobble Çapı
O wobble hareketi			
∞ wobble hareketi			
8 wobble hareketi			
I wobble hareketi			



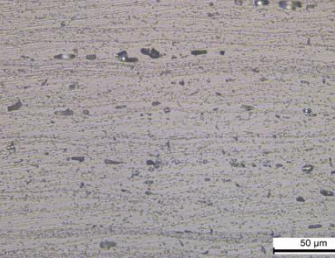
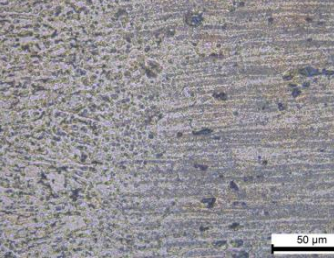
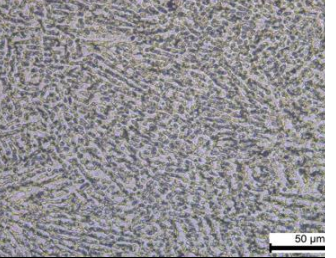
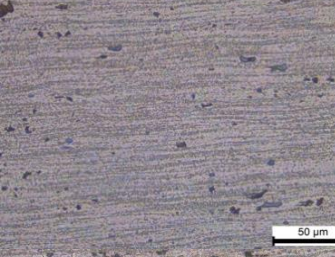
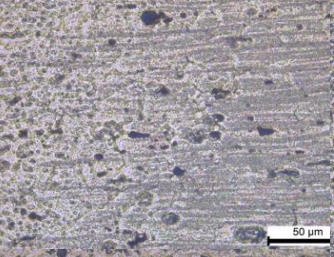
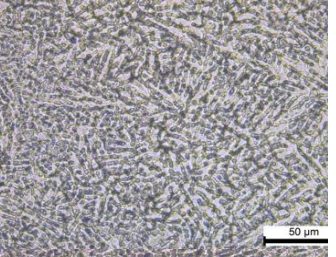
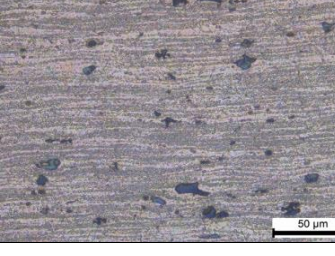
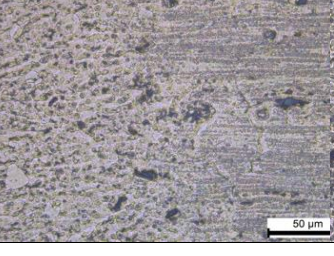
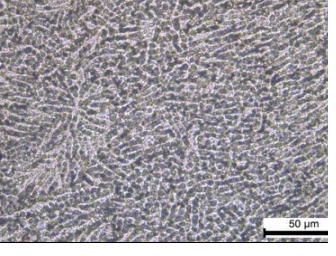
Şekil 4.4. Wobble hareketi ve wobble çapına bağlı kaynak kep ve kök genişliği değişikliği

4.5. Mikroyapı Testleri

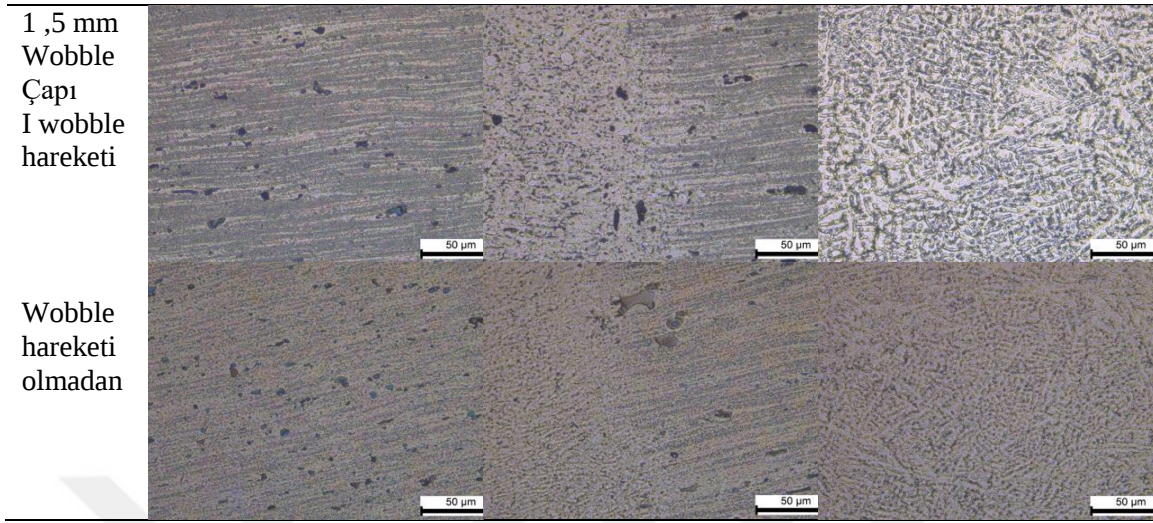
Kaynaklı parçaların makroyapı incelemeleri sonrası her wobble şekline ait farklı wobble çapları inceleninde en az gözenekliliğin 1,5mm wobble çapında yapılan kaynaklı parçalarla elde edildiği görülmüştür. Bu yargı ile 1,5 mm wobble çapı kullanılarak yapılan 4 farklı wobble hareketine ait parçaların ve wobble hareketsiz kaynaklanan parçanın; ana malzeme, ITAB ve kaynak metali bölgelerinden optik mikroskop yardımıyla mikroyapı görüntüleri alınmıştır. İlgili 5 numunenin mikroyapı görüntüleri Tablo 4.4'te verilmiştir.

O, ∞ ve 8 wobble hareketleri ile kaynaklanan parçaların kaynak metali mikro yapıları benzer olup kar tanesine benzer dendritik yapıda olduğu görülmektedir. I wobble hareketi ile kaynak edilen parçanın kaynak metali mikro yapısı diğerlerine göre daha kaba tanelidir. Wobble hareketi olmadan kaynaklanan parçada kaynak metali mikro yapısının diğerlerine göre daha ince taneli ve iğnesel yapıda olduğu görülmektedir.

Tablo 4.4. 1,5 mm wobble çapında tüm wobble hareketleriyle ve wobble hareketi olmadan kaynak edilen parçaların mikro yapı görüntüleri

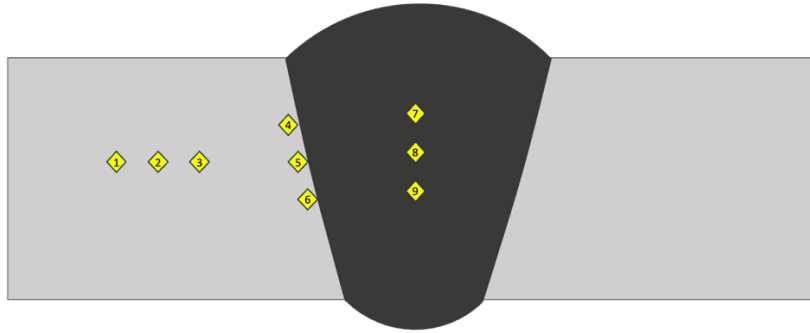
	Ana Malzeme	ITAB	Kaynak Metali
1,5 mm Wobble Çapı O wobble hareketi			
1,5 mm Wobble Çapı ∞ wobble hareketi			
1,5 mm Wobble Çapı 8 wobble hareketi			

Tablo 4.4. (Devam) 1,5 mm wobble çapında tüm wobble hareketleriyle ve wobble hareketi olmadan kaynak edilen parçaların mikro yapı görüntüleri



4.6. Sertlik Testleri

Makro ve mikro yapı görüntüleri alınmış 5 parçanın her birinden Emco Test Dura Scan cihazı ile 5kg yük altında Vickers sertlik ölçümleri alınmıştır. Her parça için ana malzeme, ITAB ve kaynak metali bölgelerinin her birinden Şekil 4.5'te verilen yerlerden 3'er adet sertlik ölçümleri alınmıştır. Tablo 4.5'te 5 parçaya ait sertlik sonuçları verilmiştir.

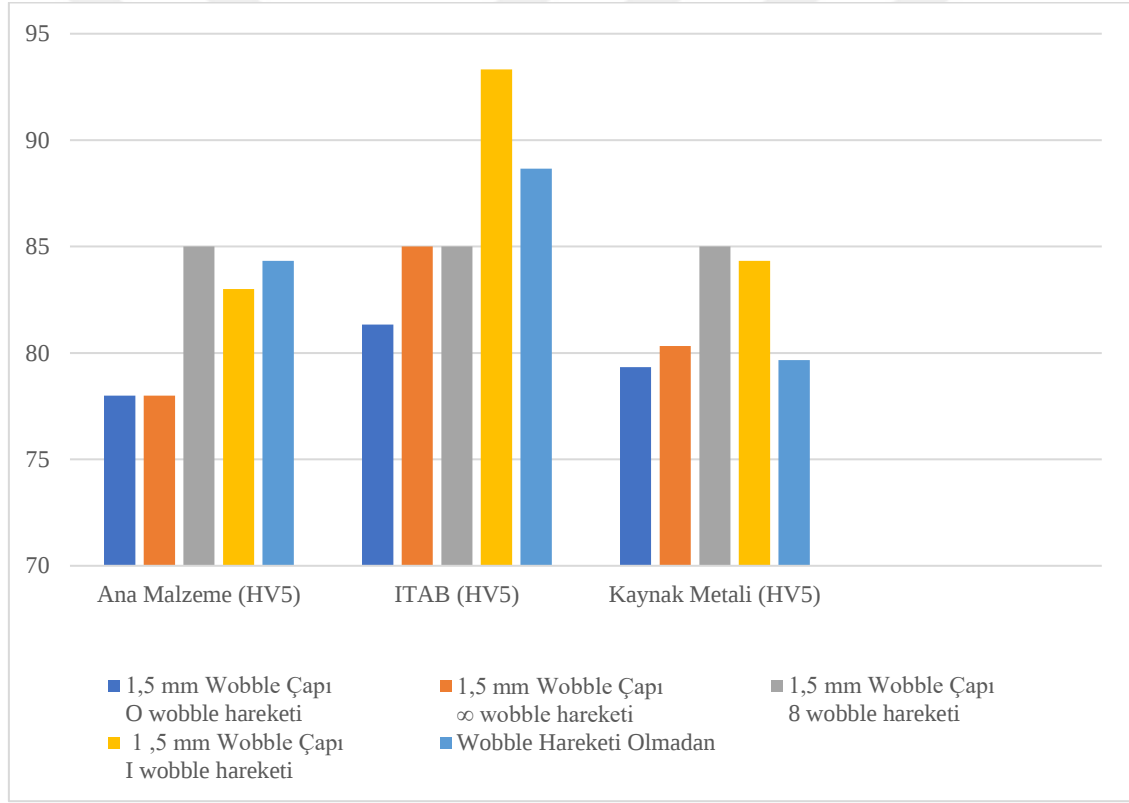


Şekil 4.5. Kesit yüzeyinden sertlik ölçümü alınan yerler

Tablo 4.5'te verilen sertlik sonuçları inceleninde tüm wobble hareketlerinde ITAB bölgesinde sertlik değerlerinin daha yüksek elde edildiği görülmüştür. Sertlik sonuçlarına göre ITAB'da en yüksek sertlik artışı I wobble hareketi ile yapılan kaynak dikişinde olduğu incelenmiştir. Tüm wobble hareketlerinde kaynak metali sertlik sonuçları ana malzeme sertlik sonuçlarına benzer sonuçlar vermiştir.

Tablo 4.5. Sertlik testi sonuçları

Numune Özellikleri	Ana Malzeme (HV5)	ITAB (HV5)	Kaynak Metali (HV5)
1,5 mm Wobble Çapı O wobble hareketi	78 – 81 – 75	81 – 78 – 85	81 – 80 – 77
1,5 mm Wobble Çapı ∞ wobble hareketi	78 – 79 – 77	87- 83 – 85	78 – 80 – 83
1,5 mm Wobble Çapı 8 wobble hareketi	85 – 83 – 87	87 – 88 – 80	85 – 86 – 84
1 ,5 mm Wobble Çapı I wobble hareketi	82 – 82 – 85	96 – 93 – 91	82 – 85 – 86
Wobble hareketi olmadan	81 – 87 – 85	88 – 89 – 89	80 – 79 – 80



Şekil 4.6. Sertlik testi sonuçları numuneye göre ortalama değerler için sütun grafiği

4.7. Çekme Testleri

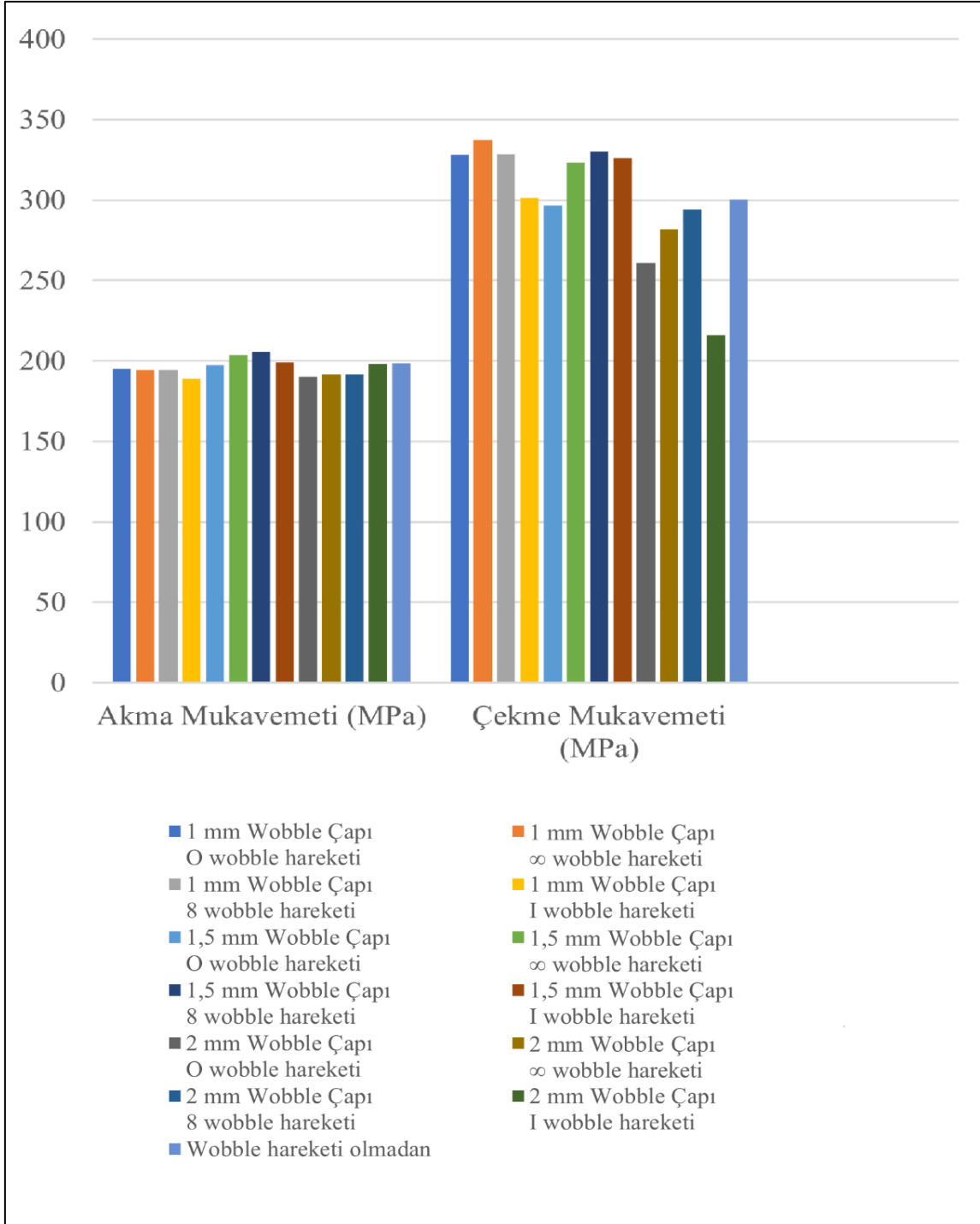
Kaynaklı parçaların her birinden 3'er adet çekme numunesi alınmış ve Zwick/Roell Z600 marka çekme cihazı ile yapılmıştır. Tablo 4.6'da kaynaklı parçalara ait çekme testleri sonucu elde edilen akma ve çekme mukavemetleri verilmiştir. Wobble hareketinin

değişiminin etkisi oldukça açıktır. Kaynaklı malzemelerin çekme ve akma mukavemetleri ana malzemenin çekme ve akma mukavemeti değerlerinden düşüktür.

Wobble hareketinin wobble hareketsiz parçaya göre çekme mukavemetini arttığı görülmüştür. Tüm wobble çaplarında uygulanan wobble hareketlerinden O ve I wobble hareketleri ile yapılan kaynak dikişlerinin çekme mukavemetlerinin daha düşük olduğu görülmüştür.

Tablo 4.6. Sertlik testi sonuçları

	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)
1 mm Wobble Çapı O wobble hareketi	192 – 194 – 199	321 – 321 – 342
1 mm Wobble Çapı ∞ wobble hareketi	190 – 193 – 200	328 – 344 – 340
1 mm Wobble Çapı 8 wobble hareketi	190 – 194 – 199	312 – 322 – 352
1 mm Wobble Çapı I wobble hareketi	188 – 189 – 189	309 – 305 – 290
1,5 mm Wobble Çapı O wobble hareketi	193 – 201 – 198	288 – 297 – 305
1,5 mm Wobble Çapı ∞ wobble hareketi	203 – 207 – 201	309 – 337 – 324
1,5 mm Wobble Çapı 8 wobble hareketi	200 – 215 – 203	330 – 315 – 346
1,5 mm Wobble Çapı I wobble hareketi	199 – 191 – 207	325 – 309 – 344
2 mm Wobble Çapı O wobble hareketi	190 – 191 – 189	267 – 254 – 262
2 mm Wobble Çapı ∞ wobble hareketi	190 – 191 – 194	280 – 277 – 289
2 mm Wobble Çapı 8 wobble hareketi	190 – 194 – 192	298 – 285 – 300
2 mm Wobble Çapı I wobble hareketi	204 – 194 – 197	321 – 299 – 298
Wobble hareketi olmadan	198 – 201 – 197	289 – 314 – 298



Şekil 4.7. Akma ve çekme mukavemetleri ortalama değerler için sütun grafiği

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Wobble hareket şekillerinin ve wobble çapının değişikliği ile alüminyum AA5083 malzemesinin kaynak kalitesi üzerinde etkileri incelenmiştir. Tahribatsız testleri ve mekanik ve mikroyapısal analizler incelenerek gözeneklilik miktarına göre değerlendirilmiştir.

- Aynı parametrelerle wobble hareketi kullanılmadan kaynak edilen parçaların kaynak dikişi wobble hareketleri ile yapılan dikişlere kıyasla daha düşük kep, yanma oluğu, kök sarkması gibi daha fazla görsel hataya sahiptir.
- Radyografik test sonuçlarıyla dikiş görselleri desteklenmiş olup wobble hareketi kullanılmadan kaynak edilen parçanın gözenek miktarı en fazla çıkmıştır.
- 8 ve ∞ wobble hareketleri ile yapılan kaynak dikişlerinde her wobble çapı grubunda en az gözenek miktarına sahip olduğu incelenmiştir.
- Makro testlerde yapılan incelemeler, kaynak damla geometrilerinden kaynaklı olarak wobble hareketinin değişkenlik göstermesi sonucunda kaynak dikiş profilinin de değişkenlik gösterini ortaya koymuştur.
- I wobble hareketinin her wobble çapında kep düşüklüğü ve diğer wobble hareketlerine göre daha yüksek miktarda gözeneklilik getiri görülmüştür.
- Makro kesit incelemelerinde her wobble çapı grubunda 8 wobble hareketinin en düşük gözeneklilik miktarına sahip olduğu incelenmiştir.
- 1,5 mm wobble çapında tüm wobble hareketlerinde 1 ve 2 mm wobble çapı ile yapılan uygulamalara göre daha az gözenekliliğe sahip olduğu görülmüştür.
- Radyografik test, makro yapı sonuçlarına göre 1,5 mm wobble çapı ile yapılan kaynaklarında daha düşük miktarda gözenekliliğe sahip olması sonucu incelenen mikroyapı görüntülerine göre, farklı wobble hareketleri altında farklı tane boyutları incelenmiştir. Ana malzemede daha düzenli ve homojen bir yapı elde edilmiş ve haddeleme yönünde uzayan taneler incelenmiştir. Kaynak bölgelerinde soğuma sırasında oluşan dentritik yapılar gözlenmiştir. ITAB ise bu düzenli yapının biraz bozulduğu ve alaşımsızlaşma görülmüştür.
- Mikro yapıları incelenen parçalara sertlik testi uygulanmış ve sertlik testinde tüm numunelerde ana malzeme ve kaynak metali sertlik sonuçlarının benzer, ITAB'da daha yüksek sertlik sonuçları elde edilmiştir.

- Çekme testi sonuçlarına göre, wobble hareketi kullanılarak yapılan deney numunelerinin hiçbirinde kaynak bölgesinde görülebilecek mekanik uyumsuzluk ve aşırı derecede mukavemet düşüşü ile karşılaşılmamıştır. Wobble hareketi olmadan kaynak edilen parçanın çekme mukavemeti erlerine göre düşük elde edilmiştir.

- Gözeneklilik her koşulda wobble hareketi kullanımında azalmıştır. En düşük gözeneklilik miktarının sekiz (8) wobble hareketi ile elde edildiği görülmüştür. Test sonuçlarının neredeyse tümünde kaynak kepinde az da olsa bir düşüklük görülmüştür. Bunun lazer gücü ile ve ilave telsiz kaynaklanması ile ilgili olduğu düşünülmüştür.

Bu çalışma, uygulanan wobble hareketi ne olursa olsun, alüminyum ve alaşımlarının kaynaklı imalatında tercih edildiği birçok sanayi dalında kullanılabileceğini göstermiştir. Bu yöntemin lazer kaynak yöntemine göre hızlı ve performans artırıcı olduğu düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Ak, G. (2022). A356 Alüminyum Alaşımlarında Kullanılan Al-10Sr-1Ti-0.2B Dörtlü Master Alaşımı, Al-5Ti-1B ve Al-15Sr Master Alaşımlarının Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Eskişehir Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 766513.
- Akarçay, E., Bayram, A., & Kara, F. (2017). Ticari Araç Kapı Menteşelerinin Alüminyum Alaşımları ile Hafifletilmesi ve Test Edilmesi. *2nd International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2017)*, Çukurova University, Congress Center, October 25-27, 2017, Adana.
- Alpar, T., Çelenk, O., & Çavdar, K. (2021). Yüksek Mukavemetli Çeliklerde Lazer Kaynağı Uygulamaları. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 26(3), 1139-1158.
- Atmaca, E. S. (2021). Fiber Lazer Kaynak Yöntemi ile Birleştirilen DP600 ve TRIP800 Çeliklerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 700760.
- Avcu, E. (2018). Bilyalı Dövme Parametrelerinin AA7075 Alüminyum Alaşımının Yüzey Altı Özelliklerine Etkileri. *Gazi University Journal Of Science Part C: Design and Technology*, 6(4), 741-752.
- Avşar, M. (2011). Yaşlandırma Parametrelerinin Aa6061 Alüminyum Alaşımının Mekaniksel Özelliklerine ve Şekilendirmeye Olan Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 285325.
- Aydın, K., & Karaağaç, İ. (2018). Lazer Kaynağı ve Lazer Kaynağının Başlıca Uygulamaları. *El-Cezeri*, 5(2), 693-705.
- Başer, T. A. (2013). Alüminyum Alaşımları ve Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı. *Mühendis ve Makina*, 51-58.
- Bedir, F., Durak, E., & Delikanlı, K. (2021). Alüminyum Alaşımlarının Otomotiv Endüstrisinde Uygulanılabilirliği ve Mekanik Özellikleri. *Mühendis ve Makine*, 47, 555.
- Benedyk, J. C. (2010). Aluminum Alloys For Lightweight Automotive Structures. *In Materials, Design and Manufacturing For Lightweight Vehicles* (Pp. 79-113). Woodhead Publishing.
- Birol, B. (2018). Doğrusal Katılaştırılmış Yüksek Mg İçeren Al-Mg Esaslı Çoklu Ötektik Alaşımların Mekanik, Elektriksel ve Termal Özelliklerine Katılma Hızının Etkisinin İncelenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi. Tübitak 3001 Proje No.215m342.

- Cao, X., Wallace, W., Immarigeon, J. P., & Poon, C. (2003). Research and Progress In Laser Welding Of Wrought Aluminum Alloys. I. Metallurgical Microstructures, Defects, and Mechanical Properties. *Materials and Manufacturing Processes*, 18(1), 23-49.
- Car, E. (2016). İkincil Alüminyum Üretimine Genel Bir Bakış. Teknik Yazı. Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği Metalurji Mühendisleri Odası.
- Chung, Y. W., & Kapoor, M. (2022). *Introduction To Materials Science and Engineering*. Crc Press.
- Çolak, M. (2009). Etial 160 Alaşımının Dökümünde Makro ve Mikro Porozite Oluşumunun Modellenmesi. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 245168.
- Deveci, O. C. (2019). Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Alüminyum Alaşımı Malzemelerin Sürtünme ve Aşınma Karakteristiklerinin DeneySEL Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Doğan, E. (2006). 1050 Ve 8006 Alüminyum Alaşımlarının Deformasyon ve Yeniden Kristalleşme Davranışı. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 172134.
- Dündar, M. (2003). Alüminyumun Yaygın Kullanımı İçin Potansiyel Uygulamalar, II. *Alüminyum Sempozyumu ve Sergisi*, Seydişehir, Konya, Türkiye.
- Erçel, F. S. (2022). Lazer Kaynak Yorulma Davranışının Modelleme ve Testler ile İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 755777.
- Ertuğ, B., Kumruoğlu, L. C. (2016). Alüminyum Alaşımlarının Otomotiv Endüstrisinde Uygulama Alanları. *Metal Dünyası*, 5(130), 13-16.
- Fahlström, K. (2015). *Laser Welding Of Boron Steels For Light-Weight Vehicle Applications* (Doctoral Dissertation, University West).
- Franco, D. F. (2017). Wobbling Laser Beam Welding Of Copper, Lisboa.
- Gökçe, A., Fındık, F., & Kurt, A. O. (2017). Alüminyum ve Alaşımlarının Toz Metalurjisi İşlemleri. *Mühendis ve Makina*, 58(686), 21-47.
- Güç, G. (2021). Lazer Kaynak ile İşlenmiş Ferritik Paslanmaz Çeliklerin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 666252.
- Güler, B. (2020). Microstructural Origins of Strain Heterogeneity in Formability of Aluminum Alloys. Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri

Enstitüsü, Ankara, 618730.

- Gülşah, G. T. (2016). Magnezyum-Alüminyum Alaşımlarının Kontrollü Atmosferde Gravity Döküm Yöntemi ile Üretilmesi ve Alaşım Elementlerinin Özelliklere Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin, 427766.
- Gündoğdu İş, E. (2022). Yüksek Hızlı Trenlerde Kullanılan Alüminyum Alaşımının Lazer ve MIG Kaynak Yöntemleri ile Birleştirilerek Mekanik ve Metalurji Özelliklerinin Karşılaştırılması. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 716373.
- Gündoğdu İş, E., Topuz, P., Akman, E., Yılmaz, M. (2020). Effect Of Laser Welding Speed On Pore Formation in AA6061 T6 Alloy. *Materials Testing*, 62, 979-984.
- Güngör, B. (2013). AA5083-H111 ve AA6082-T651 Alüminyum Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma (FSW) ve Robotik CMT-MIG Kaynak Yöntemleri ile Kaynağında Mekanik ve Metalurjik Özelliklerin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 342552.
- Güven, B. (2022). Kaynak Ağzı Açısı ve Geometrisinin Zırh Uygulamalarında Kullanılan AA5083 ve AA6061 Alüminyum Alaşımlarının Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi. Başkent Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 773372.
- Güven, O. (2005). Alüminyum Silisyum Magnezyum Döküm Alaşımlarının Yapı İncelemesi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ion, J. C. (2000). Laser Beam Welding Of Wrought Aluminium Alloys. *Science and Technology Of Welding and Joining*, 5(5), 265-276.
- Kabasakaloğlu, T. S. (2019). Laser Welding Characterization Of 5083 Aluminum Alloys. Yüksek Lisans Tezi, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 597264.
- Kahraman, B. (2009). Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan 5754 Alüminyum Alaşımı Sacların Direnç Nokta Kaynağı (RSW) ve Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (FSW) Yöntemleri ile Birleştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 232760.
- Kanlıca, M. M. (2022). Etial 177 Alüminyum Alaşımlarının Kum ve Alçı Kalıba Dökümünde Tane İnceltici İlavesi ve Mekanik Titreşim Altında Katılaşmanın Döküm Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yozgat Bozok Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yozgat, 726867.
- Karaaslan, A., Yumurtacı, S., & Sözmez, N. (2001). Lazer Işını ile Birleştirilmiş Farklı Malzemelerin Kaynak Dikişlerinde Sertlik Değişimleri. *II. Makine Malzemesi ve*

- Karayel, E. (2022). Tel Eklemeli İmalat Yöntemiyle Üretilen Alüminyum Alaşımlarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Katayama, S., Nagayama, H., Mizutani, M., & Kawahito, Y. (2009). Fibre Laser Welding of Aluminium Alloy. *Welding International*, 23(10), 744-752.
- Katayama, S., Kawahito, Y., & Mizutani, M. (2012). Latest Progress In Performance and Understanding Of Laser Welding. *Physics Procedia*, 39, 8-16.
- Katayama, S. (2013). Handbook Of Laser Welding Technologies. Editör S. Katayama. *Woodhead Publishing Limited*.
- Katayama, S., Yohei, A., Mizutani, M., & Kawahito, Y. (2011). Development Of Deep Penetration Welding Technology With High Brightness Laser Under Vacuum. *Physics Procedia*, 12, 75-80.
- Kaya, İ. (2022). Farklı Alüminyum Alaşımlarının Orta Frekans Kaynak Makineleri ile Direnç Nokta Kaynak Kabiliyetinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 751860.
- Kenar, O. (2019). Yüksek Basıncılı Döküm Prosesi ile Üretilen Alüminyum Otomotiv Parçalarında Kalıp Tasarım Değişikliklerinin Parça Döküm Kalitesi Üzerine Etkilerinin Araştırılması. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 549612.
- Kırsavaş, Ç. (2021). Farklı Yapay Yaşlandırma Sürelerinin 6XXX Serisi Alüminyum Alaşımlarının Mekanik Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ, 692848.
- Korkut, S. (2019). Alüminyum Alaşımları. Erişim Tarihi:18.Mart.2023 Url: <https://www.serdorkut.com/2017/05/08/Aluminyum-Alasimlari/#:~:Text=Yüksek%20mukavemet%20istenen%20uçak%20gövdesi,Tasarımında%20etkin%20bir%20şekilde%20kullanılmaktadır>
- Majumdar, J. D., & Manna, I. (2003). Laser Processing Of Materials. *Sadhana*, 28, 495-562.
- Matsunawa, A. (2001). Problems and Solutions in Deep Penetration Laser Welding. *Science and Technology Of Welding and Joining*, 6(6), 351-354.
- Miller, A. (2016). *Shop Floor Lasers*. Laser Greenhorns (1st Ed.).
- Miyachi, A. (2020). *Laser Welding Fundamentals*.

- Onur, A. (2014). AA6XXX Serisi Alüminyum Alaşımlarının Yaşlandırma İşlemine Bağlı Olarak İşlenebilirliğinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik, 364043.
- Özdemir, M. A. (2020). The Effect Of Deep Rolling Process Parameters on Subsurface Hardness Distribution in Deep Rolling Of En AA6061 Aluminium Alloys. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 650742.
- Polmear, I., Stjohn, D., Nie, J. F., & Qian, M. (2017). *Light Alloys: Metallurgy of The Light Metals*. Butterworth-Heinemann.
- Purcek, G., Yanar, H., Saray, O., Karaman, I., & Maier, H. J. (2014). Effect of Precipitation on Mechanical and Wear Properties of Ultrafine-Grained Cu–Cr–Zr Alloy. *Wear*, 311(1-2), 149-158.
- Quintino, L., Costa, A., Miranda, R., Yapp, D., Kumar, V., & Kong, C. J. (2007). Welding With High Power Fiber Lasers—A Preliminary Study. *Materials & Design*, 28(4), 1231-1237.
- Reijonen, J. (2015). The Effect Of Focal Point Parameters in Fiber Laser Welding of Structural Steel. Unpublished Master's Thesis, Lappeenranta University of Technology.
- Senyen, C. (2001). Alüminyum Alaşımlarının Kaynağında Dikkat Edilecek Hususlar. *Kaynak Teknolojisi III. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı*, 253-265.
- Şafak, A. (2011). Uçak Endüstrisinde Kullanılan Alüminyum Alaşımlarının Elektrik Direnç Nokta Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmesi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 283334.
- Tımaç, G. (2006). Uçak Endüstrisinde Kullanılan Alüminyum Alaşımlarının TIG Kaynak Yöntemi ile Kaynaklanabilirliğinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Uyan, P., & Körpe, N. Ö. (2022). Alüminyum Köpük Üretiminde Alüminyum Döküm Cürufu İlavesinin Mekanik Özelliklere ve Mikroyapıya Etkisi. *El-Cezeri*, 9(3), 996-1004.
- Uzun, R. O., & Keleş, Ö. (2012). Lazerle Kaynak İşleminde Kaynak Parametrelerinin Kaynak Kalitesi Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27(3).
- Vatansever, F., Ertürk, A. T., & Karabay, S. (2018). Alüminyum-Silisyum Alaşımlarının Mikroyapısal ve Mekanik Özelliklerinin T6 Isıl İşlemi ile İyileştirilmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 20(60), 797-803.

- Vyskoč, M., Sahul, Miroslav ve Sahul, Martin (2018). Effect Of Shielding Gas on The Properties of AA5083 Aluminum Alloy Laser Weld Joints, *Journal Of Materials Engineering and Performance*, 27(6), 2993–3006.
- Wang, Q. J., Zhu, D., Cao, J. (2010). Tribology and Surface Engineering: Scientific and Technological Bases For Energy Efficiency. *Intelligent Energy Field Manufacturing: Interdisciplinary Process Innovations*, 575– 610.
- Yağcı, T., Cöcen, Ü., Çulha, O., & Korkmaz, A. (2021). Alüminyum Döküm Alaşımlarına Dair Son Yıllardaki Akademik ve Endüstriyel Gelişmelere Genel Bakış ve Değerlendirme. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 26(3), 1191-1210.
- Yalçın, E. D. (2010). AA7075 ve AA5754 Alüminyum Alaşımların Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi ile Kaynak Edilebilirliğinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 276131.
- Yıldırım, H. (2006). Alüminyum Malzemenin Otomotiv Sektöründeki Uygulamaları. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 172165.
- Yılmaz, R., Özyürek, D., & Kibar, E. (2012). Yeniden Çözeltiye Alma Parametrelerinin 7075 Alüminyum Alaşımlarının Sertlik ve Aşınma Davranışlarına Etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27(2).
- Yüce, C. (2018). Yüksek Mukavemetli Çelikler ile Alüminyum Alaşımlarının Lazer Kaynağı ile Birleştirilmesinde Kaynak Parametrelerinin Bağlantı Üzerine Etkilerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 522361.
- Yükler, İ. (2000). Alüminyum Alaşımlar ve Isıl İşlemleri. İstanbul, 150, 200.
- Yürük, A. (2020). MIG ve Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemleri ile Birleştirilen Farklı Alüminyum Alaşımlarının Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerinin Karşılaştırılması. Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 655296.
- Zhang, X., Chen, W., Bao, G. (2003). Improvement of Weld Quality With Beam-Weavinglaser Welding. *International Congress on Applications Of Lasers & Electro- Optics*.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- Gürol, U., Baykal, H., **Yıldız, N.B.**, Yılmaz, C., Danışkan, Ö., Koçak, M. (2023.) Su altı elektrodları ile yapılan kaynaklı birleştirmelerin mikro yapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 37(4), 2211-2223.
- Yıldız, N.B.**, Gürol, U., Baykal, H., Koçak, M. (2023). Investigation of The Microstructural and Mechanical Properties Of Ah36 Sheet Metal Joined By Underwater Welding. *Mühendis ve Makina*, 64(710), 1-16.



ÖZGEÇMİŞ

Nur Benuşe YILDIZ, Lise eğitimini İstanbul Kartal Anadolu Lisesi’nde tamamladı. 2019 yılında Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2020 yılında Gedik Eğitim Vakfı tarafından eğitimleri verilen Uluslararası Kaynak Mühendisi diplomasını almaya hak kazandı. Lisans mezuniyeti sonrası özel sektörde Ar-Ge mühendisi olarak çalıştı. 2022 yılından itibaren halen Beyçelik Gestamp Şasi fabrikasında kaynak mühendisi olarak çalışmaktadır.

