

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



LAZER KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLEN AA5049
ALÜMİNYUM ALAŞIMININ MİKROYAPI VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ONUR BAYRAM

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Sare ÇELİK (Tez Danışmanı)

Prof. Dr. Hakan ÇETİNEL

Dr. Öğr. Üyesi Türker TÜRKOĞLU

BALIKESİR, EYLÜL – 2025

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Lazer Kaynağı ile Birleştirilen AA5049 Alüminyum Alaşımının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Onur BAYRAM

ÖZET

LAZER KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLEN AA5049 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ONUR BAYRAM

BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. SARE ÇELİK)

BALIKESİR, EYLÜL – 2025

Lazer kaynak yöntemi, yüksek yansıtıcılık ve ısı iletkenliğine sahip alüminyum alaşımlarının birleştirilmesinde tercih edilen hassas ve verimli bir kaynak teknolojisidir. Sınırlı ısı girdisi sayesinde dar bir ısıdan etkilenmiş bölge (ITAB) oluşturarak kaynak sonrası distorsiyonları azaltmaktadır. Bu tez çalışmasında, 3 mm kalınlığında AA5049 alüminyum alaşımı levhalar lazer kaynağı ile birleştirilmiş ve farklı kaynak parametrelerinin birleşim bölgesinin mikroyapısal ve mekanik özelliklerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir.

Deneysel çalışmalarda lazer gücü, besleme hızı ve yalpa frekansı olmak üzere üç temel kaynak parametresi değiştirilmiş ve bu kombinasyonlarla toplamda 18 farklı kaynaklı numune üretilmiştir. Her numune üzerinden çekme deneyi, üç nokta eğilme deneyi, mikrosertlik ölçümleri, optik mikroskop incelemeleri, SEM ve EDX analizleri gerçekleştirilmiştir.

Yapılan incelemeler sonucunda, kaynak parametrelerinin mikroyapı oluşumu ve mekanik performans üzerinde önemli etkileri olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle sertlik dağılımlarında ve mikro yapı geçişlerinde, parametre değişimlerinin etkisi açıkça belirlenmiştir. Çalışma sonunda, AA5049 alüminyum alaşımı için lazer kaynağıyla elde edilen birleşim bölgelerinin karakteristik davranışları ortaya konmuştur.

ANAHTAR KELİMELELER: AA5049 alüminyum alaşımı, çekme deneyi, lazer kaynağı, mikrosertlik, mikroyapı, SEM, üç nokta eğme deneyi

ABSTRACT

**INVESTIGATION OF THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL
PROPERTIES OF AA5049 ALUMINUM ALLOY JOINED BY LASER WELDING
MSC THESIS
ONUR BAYRAM
BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
MECHANICAL ENGINEERING
(SUPERVISOR: PROF. DR. SARE ÇELİK)
BALIKESİR, SEPTEMBER - 2025**

Laser welding is a precise and efficient joining technology commonly used for aluminum alloys, which are known for their high reflectivity and thermal conductivity. Owing to its limited heat input, it creates a narrow heat-affected zone (HAZ), thus reducing distortion and improving dimensional stability. In this thesis study, 3 mm thick AA5049 aluminum alloy plates were joined using laser welding, and the effects of various welding parameters on the microstructural and mechanical properties of the fusion zone were experimentally investigated.

Three main welding parameters laser power, welding speed, and wobble frequency were varied, resulting in a total of 18 different welded samples. For each sample, tensile testing, three-point bending tests, microhardness measurements, optical microscopy, SEM (Scanning Electron Microscopy), and EDX (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) analyses were conducted.

The results demonstrated that welding parameters have a significant effect on microstructure formation and mechanical performance. The influence of parameter variations was particularly evident in the hardness distribution and microstructural transitions. At the end of the study, the characteristic behavior of the fusion zones produced by laser welding of AA5049 aluminum alloy was revealed.

KEYWORDS: AA5049 aluminum alloy, tensile test, laser welding, microhardness, microstructure, SEM, three point bending test,

İÇİNDEKİLER

| | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| ÖZET | i |
| ABSTRACT | ii |
| İÇİNDEKİLER | iii |
| ŞEKİL LİSTESİ | v |
| TABLO LİSTESİ | vii |
| SEMBOL VE KISALTMALAR LİSTESİ | viii |
| ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR | ix |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 1.1 Tezin Amacı..... | 2 |
| 2. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI VE KAYNAK İŞLEMİ | 4 |
| 2.1 1xxx Grubu Alüminyumların Özellikleri ve Kullanım Alanları..... | 4 |
| 2.2 2xxx Grubu Alüminyumların Özellikleri ve Kullanım Alanları..... | 4 |
| 2.3 3xxx Grubu Alüminyumların Özellikleri ve Kullanım Alanları..... | 5 |
| 2.4 4xxx Grubu Alüminyumların Özellikleri ve Kullanım Alanları..... | 6 |
| 2.5 5xxx Grubu Alüminyumların Özellikleri ve Kullanım Alanları..... | 6 |
| 2.6 6xxx Grubu Alüminyumların Özellikleri ve Kullanım Alanları..... | 7 |
| 2.7 7xxx Grubu Alüminyumların Özellikleri ve Kullanım Alanları..... | 8 |
| 2.8 8xxx Grubu Alüminyumların Özellikleri ve Kullanım Alanları..... | 8 |
| 2.9 Lazer Kaynağında Alüminyum ve Alaşımlarda Oluşan Kusurlar | 9 |
| 2.9.1 Undercut (Kesme Boşluğu) | 9 |
| 2.9.2 Eksik Nüfuziyet ve Eriyen Malzemelerin Sarkması..... | 10 |
| 2.9.3 Hizalama Hatası | 11 |
| 2.9.4 Sıçrama | 11 |
| 2.9.5 Çatlaklar..... | 12 |
| 2.9.6 Porozite | 12 |
| 3. LAZER TEKNOLOJİSİ | 13 |
| 3.1 Lazerin Tarihçesi | 13 |
| 3.2 Lazer Çeşitleri | 14 |
| 3.2.1 Katı Lazerler | 14 |
| 3.2.2 Sıvı Lazerler..... | 14 |
| 3.2.3 Gaz Lazerler..... | 15 |
| 3.2.4 Yarı İletken Lazerler | 16 |
| 3.3 Lazer Cihazları..... | 17 |
| 3.3.1 CO ₂ Lazerler | 17 |
| 3.3.2 Nd:YAG Lazerler | 17 |
| 3.3.3 Disk Lazerler | 18 |
| 3.3.4 Fiber Lazerler..... | 18 |
| 3.4 Lazer Kaynak Yöntemi | 19 |
| 3.4.1 Lazer İletim Kaynağı | 22 |
| 3.4.2 Lazer Nüfuziyet Kaynağı..... | 22 |
| 3.4.3 Lazer Kaynağı Kesitinde Oluşan Bölgeler | 24 |
| 3.5 Lazer Kaynağının Avantajları ve Dezavantajları..... | 25 |
| 3.6 Lazer Kaynak Parametreleri | 27 |
| 3.6.1 Lazer Gücü ve İlerleme Hızı..... | 27 |
| 3.6.2 Odak Mesafesi | 28 |
| 3.6.3 Koruyucu Gaz..... | 29 |
| 4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI | 31 |

İÇİNDEKİLER (devam)

| | |
|---|-----------|
| 5. MALZEME VE YÖNTEM..... | 33 |
| 5.1 Malzeme..... | 33 |
| 5.2 Yöntem..... | 36 |
| 5.2.1 Kaynak Parametreleri | 36 |
| 5.2.2 Kaynak İşlemi ve Mekanik Testlere Hazırlık | 37 |
| 5.3 Çekme Deneyi..... | 40 |
| 5.4 Üç Nokta Eğme Deneyi | 41 |
| 5.5 Mikrosertlik Ölçümleri | 42 |
| 5.6 Optik Mikroskop Çalışmaları | 43 |
| 5.7 SEM ve EDX Analizleri | 44 |
| 6. BULGULAR..... | 45 |
| 6.1 Çekme Deneyi..... | 45 |
| 6.1.1 Lazer Gücünün Parametre Değerlendirmesi..... | 47 |
| 6.1.2 Besleme Hızının Parametre Değerlendirmesi..... | 48 |
| 6.1.3 Yalpa Frekansının Parametre Değerlendirmesi | 49 |
| 6.2 Üç Nokta Eğme Deneyi | 50 |
| 6.2.1 Lazer Gücünün Parametre Değerlendirmesi..... | 52 |
| 6.2.2 Besleme Hızının Parametre Değerlendirmesi..... | 53 |
| 6.2.3 Yalpa Frekansının Parametre Değerlendirmesi | 53 |
| 6.3 Mikrosertlik Sonuçları | 55 |
| 6.4 Optik Mikroskop Çalışması Sonuçları..... | 62 |
| 6.5 SEM ve EDX Analiz Sonuçları | 68 |
| 7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER..... | 74 |
| 8. KAYNAKLAR..... | 77 |
| ÖZGEÇMİŞ | 81 |

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

| | |
|---|----|
| Şekil 2.1: a) Kesme boşluğu b) Eksik nüfuziyet | 10 |
| Şekil 2.2: Sarkma, kesme boşluğu (undercut) ve eksik nüfuziyet gibi kaynak hataları | 10 |
| Şekil 2.3: Alın kaynak bağlantılarında doğrusal hizalama hatası | 11 |
| Şekil 2.4: (a) Kaynak sırasında eriyik fırlaması ve sıçrama oluşumu (b) yüzeydeki görünümü | 11 |
| Şekil 3.1: Sıvı Lazer Sistemi | 15 |
| Şekil 3.2: Gaz lazer sisteminin temel bileşenleri | 16 |
| Şekil 3.3: Yarı iletken diyot lazerin şematik gösterimi | 16 |
| Şekil 3.4: Nd:YAG lazerinde ışının üretilmesi ve fiber kablo yardımıyla kaynağın iletilmesinin şematik gösterimi | 18 |
| Şekil 3.5: Çeşitli lazer türlerinde ışının iletilmesinin şematik görüntüsü; a) Karbondoksit lazerleri, b) Katı lazerler | 19 |
| Şekil 3.6: Lazer kaynağının lazer gücü açısından diğer kaynak yöntemleriyle kıyaslanması | 20 |
| Şekil 3.7: Lazer Kaynak yönteminin prensibi | 20 |
| Şekil 3.8: Lazer ile yapılan proseslerin lazer gücüne göre değişimleri | 21 |
| Şekil 3.9: İletimsel lazer kaynağı uygulaması | 22 |
| Şekil 3.10: Lazer nüfuziyet kaynağı aşamaları | 23 |
| Şekil 3.11: Lazer ile yapılan kaynağın şematik kesit görüntüsü | 23 |
| Şekil 3.12: Lazer kaynağı sonucu oluşan kesit görüntüleri | 24 |
| Şekil 3.13: Lazer kaynak işleminde ilerleme hızı ve lazer çıkış gücünün kaynak performansı üzerindeki etkisi | 28 |
| Şekil 3.14: Odak uzaklığı ve ışın çaplarının şematik gösterimi..... | 29 |
| Şekil 3.15: Odak noktasının merkeze olan uzaklığının değişimiyle kaynak bölgesinde oluşan değişim | 29 |
| Şekil 3.16: Farklı koruyucu gazların penetrasyon üzerindeki etkisi..... | 30 |
| Şekil 5.1: Çalışmada kullanılan lazer kaynak makinesi..... | 34 |
| Şekil 5.2: Çalışmada kullanılan AlMg5Cr kaynak teli | 35 |
| Şekil 5.3: Kaynak makinesindeki parametre ekranı..... | 36 |
| Şekil 5.4: Kaynaklama işlemi | 38 |
| Şekil 5.5: Su jeti ile parça kesim işlemi | 39 |
| Şekil 5.6: Kullanılan su jeti makinesi | 39 |
| Şekil 5.7: Çekme numunesinin şematik gösterimi..... | 40 |
| Şekil 5.8: Çekme testleri yapılan numune görüntüsü | 40 |
| Şekil 5.9: Çekme testi esnasındaki numune görüntüsü..... | 41 |
| Şekil 5.10: Üç nokta eğme deneyi esnasındaki numune görüntüsü | 42 |
| Şekil 5.11: AA5049 alüminyum numunesinde mikrosertlik ölçüm hattı | 43 |
| Şekil 6.1: Lazer kaynağı ile kaynaklanmış numune görüntüsü..... | 45 |
| Şekil 6.2: Farklı parametrelerde yapılmış lazer kaynaklı numunelerin çekme mukavemeti değerleri | 46 |
| Şekil 6.3: Farklı parametrelerde yapılmış lazer kaynaklı numunelerin yüzde uzama değerleri | 47 |
| Şekil 6.4: Çekme testleri yapılan numuneler | 47 |
| Şekil 6.5: Farklı parametrelerde yapılmış lazer kaynaklı numunelerin eğilme mukavemeti değişimi..... | 51 |

ŞEKİL LİSTESİ (devam)

| | |
|--|----|
| Şekil 6.6: Farklı parametrelerde yapılmış lazer kaynaklı numunelerin yüzde deformasyon değişimi..... | 52 |
| Şekil 6.7: 10 Numaralı numunenin eğilme grafiği..... | 54 |
| Şekil 6.8: 1 Numaralı numunenin mikrosertlik değerleri..... | 55 |
| Şekil 6.9: 5 Numaralı numunenin mikrosertlik değerleri..... | 56 |
| Şekil 6.10: 6 Numaralı numunenin mikrosertlik değerleri..... | 57 |
| Şekil 6.11: 7 Numaralı numunenin mikrosertlik değerleri..... | 58 |
| Şekil 6.12: 9 Numaralı numunenin mikro sertlik değerleri..... | 59 |
| Şekil 6.13: 16 Numaralı numunenin mikrosertlik değerleri..... | 60 |
| Şekil 6.14: AL-MG Faz diyagramı | 62 |
| Şekil 6.15: 1 Numaralı numunenin mikroyapı görüntüsü (10x) | 63 |
| Şekil 6.16: 1 Numaralı numunenin mikroyapı görüntüsü (50x) | 64 |
| Şekil 6.17: 6 Numaralı numunenin mikroyapı görüntüsü (10x) | 65 |
| Şekil 6.18: 6 Numaralı numunenin mikroyapı görüntüsü (20x) | 66 |
| Şekil 6.19: 16 Numaralı numunenin mikroyapı görüntüsü (10x) | 67 |
| Şekil 6.20: a) ITAB-AM b) ITAB-EB | 68 |
| Şekil 6.21: 6 Numaralı numunenin SEM görüntüleri | 69 |
| Şekil 6.22: 16 Numaralı numunenin SEM görüntüleri | 70 |
| Şekil 6.23: 6 Numaralı numunenin EDX alınan bölge | 72 |
| Şekil 6.24: 6 Numaralı numunenin EDX analizi | 72 |

TABLO LİSTESİ

| | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| Tablo 2.1: Alüminyum alaşımlarının kaynak yapılabilirliği | 9 |
| Tablo 3.1: Lazer kaynağı ile MAG kaynağı maliyetlerinin kıyaslanması | 27 |
| Tablo 5.1: AA5049'nın kimyasal bileşiminin standart ile karşılaştırılması | 33 |
| Tablo 5.2: AA5049 alaşımının mekanik özellikleri | 33 |
| Tablo 5.3: Çalışmada kullanılan parametreler..... | 37 |
| Tablo 5.4: Kullanılan parametre değerleri..... | 37 |
| Tablo 6.1: Farklı parametrelerle üretilen kaynaklı numunelerin çekme deneyi sonuçları . | 46 |
| Tablo 6.2: Farklı parametrelerle üretilen kaynaklı numunelerin Üç nokta eğilme deneyi sonuçları..... | 51 |

SEMBOL VE KISALTMALAR LİSTESİ

| | |
|-------------|--|
| Al | : Alüminyum |
| MPa | : Megapaskal |
| Ar | : Argon |
| Mn | : Mangan |
| Si | : Silisyum |
| Mg | : Magnezyum |
| Zn | : Çinko |
| Fe | : Demir |
| Cu | : Bakır |
| SEM | : Taramalı elektron mikroskopu |
| EDX | : Enerji dağılım spektrometresi |
| ITAB | : Isı tesiri altında kalan bölge |
| TM | : Temel malzeme |
| ASTM | : American Society for Testing and Materials |
| PMV | : Predicted Mean Vote, Tahmini ortalama oy |
| mm | : Milimetre |
| AA | : Alüminyum alaşım |
| MIG | : Gaz metal ark kaynağı |
| MAG | : Korumalı metal ark kaynağı |

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim süresince edindiğim bilgi ve deneyimleri bir araya getirerek hazırladığım bu tez sürecinde, katkıları ve destekleriyle her zaman yanımda olan değerli hocalarıma teşekkürü bir borç bilirim. Başta, akademik rehberliği, bilgi birikimi ve sabrıyla bana her aşamada yol gösteren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Sare ÇELİK'e; ayrıca süreç boyunca teknik ve bilimsel katkılarıyla çalışmama değer katan Sayın Dr. Öğr. Üyesi Türker TÜRKÖĞLU'na içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu yolculukta en büyük desteği hiç şüphesiz ailemden gördüm. Varlıklarıyla bana güç veren, koşulsuz sevgileriyle her zaman yanımda olduklarını hissettiren, en zor anlarımda bile inançlarını yitirmeden beni destekleyen canım aileme en derin şükranlarımı sunuyorum.

Ayrıca bu süreçte manevi desteğiyle her zaman yanımda olan kıymetli abim Ogün BAYRAM'a, fikirleriyle çalışmama katkı sağlayan değerli arkadaşım Mert SAMSAİL'e ve sabrıyla, sevgisiyle bana güç vererek her aşamada yanımda olan nişanlım Ezgi ÇOBAN'a özel olarak teşekkür ederim.

Destek olan herkese en içten teşekkürlerimle.

Balıkesir, 2025

Onur BAYRAM

1. GİRİŞ

Modern mühendislik ve imalat süreçlerinde hafif, dayanıklı ve korozyona karşı dirençli malzemelere olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Bu bağlamda, alüminyum alaşımları, özellikle otomotiv, havacılık ve savunma sanayii gibi sektörlerde vazgeçilmez malzemelerden biri haline gelmiştir. Alüminyumun yüksek mukavemet/ağırlık oranı, kolay işlenebilirliği ve geri dönüştürülebilir yapısı, bu alaşımların geniş bir uygulama alanında kullanılmasını sağlamaktadır. Bununla birlikte, üretim süreçlerinde kullanılan birleştirme teknikleri, alüminyum alaşımlarının performansını doğrudan etkileyen kritik bir faktördür.

Lazer kaynağı, son yıllarda geleneksel birleştirme yöntemlerine kıyasla sunduğu hızlı, hassas ve minimal ısı girdisi avantajlarıyla ön plana çıkmaktadır. Özellikle alüminyum alaşımlarının birleştirilmesinde, lazer kaynağının etkileri üzerine yapılan araştırmalar, bu teknolojinin endüstriyel potansiyelini daha iyi anlamaya yönelik önemli veriler sunmaktadır. Ancak, farklı alüminyum alaşımlarının lazer kaynağı ile birleştirilmesi sırasında ortaya çıkan mikro yapısal değişimler ve mekanik özelliklerin nasıl etkilendiği hala detaylı bir şekilde araştırılmaya ihtiyaç duymaktadır.

İyi bir kaynak kalitesi elde edebilmek için doğru kaynak yönteminin seçilmesinin yanı sıra kaynak parametrelerinin de özenle belirlenmesi gerekmektedir. Yanlış seçilen kaynak parametreleri, birleşim bölgesinde istenmeyen durumlara yol açarak, birleşme yerine malzemenin delinmesine veya kesilmesine neden olabilir. Kaynak işlemi başarılı gibi görünse bile, tam nüfuziyetin sağlanamaması, çatlakların oluşması, gözenek veya sıçrama gibi kusurların ortaya çıkması gibi problemlerle karşılaşılabilir. Ayrıca, metalurjik yapıda ikincil faz oluşumları ya da malzemenin mukavemetini olumsuz etkileyen diğer yapısal değişimler de meydana gelebilir [1].

Bu çalışmanın temel amacı, lazer kaynağıyla birleştirilmiş AA5049 alüminyum alaşımının mikroyapı ve mekanik özelliklerindeki değişimleri analiz ederek, bu teknolojinin etkilerini derinlemesine incelemektir. Elde edilen bulgular, lazer kaynağı teknolojisinin alüminyum alaşımlarında nasıl daha verimli sonuçlar elde edilebileceği konusunda önemli bir yol haritası sunmayı hedeflemektedir. Aynı zamanda, bu çalışma, hafif ve dayanıklı yapısal bileşenlerin üretimine yönelik gelecekteki araştırmalara katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

Ergitmeye esaslı kaynak yöntemleriyle alüminyum alaşımlarının kaynaklanmasında, ergime ve ergime sonrasında oluşan katılaşma sonucunda gözenek içeren yapıya sahip bir kaynak metali oluşabilir. Bu süreçte, malzemenin iç yapısının etkilenmesiyle kaynak metalinin çevresinde bir alanda ısıdan etkilenmiş bölge meydana gelir. Bu bölgede oluşan metalurjik dönüşümler, kaynak sırasında ortaya çıkan kaynak çarpılması ve giren ısı miktarına bağlı gerilmeler, kaynaklı parçaların uzun vadeli performansını olumsuz yönde etkileyebilecek sorunlara yol açabilir.

Alüminyum alaşımlarının birleştirilmesi sırasında gerek ergime durumundan gerek ise malzemenin soğuyup katılaşma süreçleri problemler doğurabilir. Bu problemler arasında, ısıdan etkilenmiş bölgede oluşan metalurjik değişimler, malzeme yapısına bağlı gözenek ve kaynak çarpılmaları, gaz boşlukları ve gerilmeler öne çıkmaktadır. Tüm bu sorunlar göz önüne alındığında, alüminyum ve alaşımlarında lazer kaynak yöntemi, alternatif ve etkili bir çözüm olarak akla gelen ilk seçeneklerden biridir [2].

1.1 Tezin Amacı

Alüminyum alaşımları, hafiflik, yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve korozyon direnci gibi üstün özellikleri nedeniyle havacılık, otomotiv, savunma ve inşaat sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, bu alaşımların birleştirilmesi sırasında kullanılan kaynak yöntemleri ve süreç parametreleri, birleştirilen malzemelerin mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerinde kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle lazer kaynağı, hassas kontrol yetenekleri, minimal ısı girdisi ve yüksek hızda işlem gerçekleştirme avantajlarıyla öne çıkan bir yöntemdir. Ancak, lazer kaynağı ile birleştirilen farklı alüminyum alaşımlarının mikro yapısal ve mekanik davranışlarının tam anlamıyla anlaşılması için daha fazla bilimsel çalışmaya ihtiyaç vardır.

Bu tezin temel amacı, lazer kaynağı ile birleştirilmiş AA5049 alüminyum alaşımında meydana gelen mikroyapısal değişimleri ve bu değişimlerin malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde incelemektir. Tez kapsamında, farklı lazer kaynak parametrelerinin (lazer gücü, besleme hızı, yalpa frekansı vb.) birleştirilen alüminyum alaşımlarındaki mikro yapı, tane yapısı, faz dönüşümleri ve kaynak bölgesindeki hatalar (örneğin, çatlak, gözenek, tam nüfuziyet eksikliği) üzerindeki etkileri analiz edilecektir.

Bunun yanı sıra, kaynak bölgesinde oluşan ısıdan etkilenmiş bölge (ITAB) ve kaynak metali yapılarının malzemenin mekanik dayanımına, çekme mukavemetine ve sertlik özelliklerine olan katkıları da değerlendirilecektir. Elde edilen bulgular, lazer kaynağının alüminyum alaşımlarında etkin ve güvenilir bir birleştirme yöntemi olarak nasıl ve ne şekilde kullanılacağı konusunda önemli bilgiler sunacaktır.

Bu çalışmanın bir diğer amacı ise, endüstriyel uygulamalarda karşılaşılan problemlere çözüm sunarak, lazer kaynağının alüminyum alaşımlarında kullanılabilirliğini artırmak ve bu teknolojinin daha geniş bir yelpazede uygulanabilir olmasını sağlamaktır. Tez sonuçlarının, hafif ve dayanıklı yapısal bileşenlerin üretiminde, özellikle enerji verimliliği ve düşük maliyet hedefi olan endüstrilerde, bilimsel bir rehber oluşturması beklenmektedir.

2. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI VE KAYNAK İŞLEMİ

Alüminyum, alaşım elementlerinin eklenmesi ve/veya soğuk şekillendirme ile güçlendirilebilen düşük yoğunluklu bir metaldir. Alaşımlandırma yoluyla güçlendirme, iki mekanizmadan biriyle sağlanabilir: katı çözeltide güçlendirme veya çökeltiyle güçlendirme. Soğuk şekillendirme ile güçlendirilen alaşımlar, "ısıl işlemle güçlendirilemeyen" alaşımlar olarak bilinirken, çökeltiyle güçlendirilen alaşımlar "ısıl işlemle güçlendirilebilen" alaşımlar olarak adlandırılır. Isıl işlem yoluyla güçlendirme işlemi ise "temperleme" olarak adlandırılır [3].

2.1 1xxx Grubu Alüminyumların Özellikleri ve Kullanım Alanları

1XXX serisi alaşımlar, en saf alüminyum alaşımları olarak bilinir. En az %99,0 alüminyum içerirler. Isıl işlemle güçlendirilemezler. 68-185 MPa arasında değişen çekme mukavemetine sahiptirler.

Özellikleri ve Kullanım Alanları:

- Yüksek Korozyon Dayanımı: Yüksek saflık seviyesi, bu alaşımlara mükemmel korozyon dayanımı sağlar. Bu nedenle, kimyasal tanklar ve borular gibi özel uygulamalarda tercih edilirler.
- İyi Elektrik İletkenliği: Yüksek elektrik iletkenlikleri, otobüs barları gibi elektriksel uygulamalarda kullanılırlar.
- Düşük Mekanik Özellikler: Nispeten düşük mekanik özellikleri nedeniyle, genel yapısal uygulamalarda tercih edilmezler.

Kaynaklanabilirlik:

- İyi kaynaklanabilirler.
- Dar erime aralıkları nedeniyle, kabul edilebilir kaynak sonuçları elde etmek için özel önlemler alınmalıdır.
- Genellikle kendileriyle aynı seriye ait dolgu malzemeleri veya 4XXX serisi dolgu malzemeleri ile kaynaklanırlar [3].

2.2 2xxx Grubu Alüminyumların Özellikleri ve Kullanım Alanları

2XXX serisi alaşımlar, yüksek mukavemet ve performans özellikleri nedeniyle havacılık ve uzay endüstrisinde sıkça kullanılan alüminyum-bakır alaşımlarıdır. %0,7 ila %6,8 arasında değişen miktarda bakır içerirler. Isıl işlemle güçlendirilebilirler ve 185-425 MPa arasında değişen çekme mukavemetleri elde edilebilir.

Özellikleri ve Kullanım Alanları:

- Yüksek Mukavemet: Yüksek mukavemetleri, özellikle havacılık ve uzay endüstrisindeki yapısal bileşenler için idealdir.
- İyi Yorulma Dayanımı: Yüksek yorulma dayanımı, tekrarlanan yükler altında bile yüksek performans sağlar.
- Sıcaklık Dayanımı: Geniş bir sıcaklık aralığında iyi mekanik özelliklerini korurlar.

Kaynaklanabilirlik:

- Bazı 2XXX serisi alaşımlar, sıcak çatlak ve gerilim korozyon çatlaklarına eğilimli oldukları için ark kaynağı için uygun değildir.
- Ancak, diğerleri doğru kaynak teknikleri kullanılarak başarıyla kaynaklanabilir.
- Genellikle, yüksek mukavemetli 2XXX serisi dolgu malzemeleri ile kaynaklanırlar, ancak bazı durumlarda silikon veya silikon-bakır içeren 4XXX serisi dolgu malzemeleri de kullanılabilir [3].

2.3 3xxx Grubu Alüminyumların Özellikleri ve Kullanım Alanları

3XXX serisi alaşımlar, alüminyum-manganez alaşımlarıdır ve %0,05 ila %1,8 arasında manganez içerirler. Isıl işleme güçlendirilemezler, ancak orta düzeyde mukavemet, iyi korozyon direnci, iyi şekillendirilebilirlik ve yüksek sıcaklıklarda iyi performans özellikleri sunarlar.

Özellikleri ve Kullanım Alanları:

- Orta Düzey Mukavemet: Yapısal uygulamalar için yeterli olmayan orta düzeyde mukavemetleri vardır.
- İyi Korozyon Direnci: İyi korozyon direnci, özellikle dış mekân uygulamalarında avantaj sağlar.
- İyi Şekillendirilebilirlik: İyi şekillendirilebilirlikleri, çeşitli imalat yöntemlerine uyum sağlar.
- Yüksek Sıcaklık Dayanımı: Yüksek sıcaklıklarda iyi performans gösterirler.
- Tencere ve Tava Üretimi: İlk kullanım alanlarından biri tencere ve tava üretimidir.
- Isı Değiştiriciler: Araç ve güç santrallerinde kullanılan ısı değiştiricilerin önemli bir bileşenidir.

Kaynaklanabilirlik:

- İyi kaynaklanabilirler.
- 1XXX, 4XXX ve 5XXX serisi dolgu malzemeleri ile kaynaklanabilirler. Alaşımın bileşimi ve uygulama gereksinimlerine bağlı olarak uygun dolgu malzemesi seçilmelidir [3].

2.4 4xxx Grubu Alüminyumların Özellikleri ve Kullanım Alanları

4XXX serisi alaşımlar, alüminyum-silisyum alaşımlarıdır ve %0,6 ila %21,5 arasında silisyum içerirler. Bu seri hem ısıtılma işlemiyle güçlendirilebilen hem de güçlendirilemeyen alaşımları içeren tek seridir.

Özellikleri ve Kullanım Alanları:

- Düşük Erime Noktası: Silisyum ilavesi, alüminyumun erime noktasını düşürür ve erimiş haldeki akışkanlığını artırır. Bu özellikler hem kaynak hem de lehimleme işlemlerinde kullanılan dolgu malzemeleri için idealdir.
- Çok Yönlü Kullanım: Bu serideki alaşımlar, esas olarak dolgu malzemeleri olarak kullanılır. Ancak, bazıları yapısal uygulamalarda da kullanılabilir.
- Isıl İşleme Güçlendirme: Magnezyum veya bakır ilavesi, bazı 4XXX serisi alaşımların ısıtılma işlemiyle güçlendirilebilmesini sağlar. Ancak, bu ısıtılma işlemli dolgu malzemeleri genellikle yalnızca kaynak sonrası ısıtılma işlemi uygulanacak bileşenlerde kullanılır [3].

2.5 5xxx Grubu Alüminyumların Özellikleri ve Kullanım Alanları

5XXX serisi alaşımlar, alüminyum-magnezyum alaşımlarıdır ve %0,2 ila %6,2 arasında magnezyum içerirler. Isıtılma işlemiyle güçlendirilemezler, ancak yüksek dayanım ve iyi kaynaklanabilirlik özellikleri sunarlar.

Özellikleri ve Kullanım Alanları:

- Yüksek Dayanım: Isıtılma işlemi görmeyen alüminyum alaşımları arasında en yüksek dayanımı sağlarlar.
- İyi Kaynaklanabilirlik: Kolayca kaynaklanabilirler.
- Korozyon Dayanımı: İyi korozyon direnci, özellikle deniz suyu ve tuzlu ortamlarda avantaj sağlar.

Kullanım Alanları:

- Gemicilik: Gemi yapımında yaygın olarak kullanılırlar.
- Taşımacılık: Taşıt araçlarının yapımında kullanılırlar.

- Basınçlı Kaplar: Basınçlı kapların üretiminde kullanılırlar.
- Köprüler ve Binalar: Yapısal eleman olarak kullanılırlar.

Kaynaklanabilirlik:

- 5XXX serisi alaşımlar, genellikle 5XXX veya 4XXX serisi dolgu malzemeleri ile kaynaklanır.
- Magnezyum içeriği %3,0'dan fazla olan alaşımlar, 65°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kullanılmamalıdır, çünkü hassaslaşma ve gerilim korozyon çatlağına eğilimlidirler.
- Yaklaşık %2,5'ten daha az magnezyum içeren alaşımlar, genellikle 5XXX veya 4XXX serisi dolgu malzemeleri ile başarılı bir şekilde kaynaklanabilir.
- 5052 alaşımı, 4XXX serisi dolgu malzemeleri ile kaynaklanabilen en yüksek magnezyum içeriğine sahip alaşımdır.
- Daha yüksek magnezyum içerikli alaşımlar, genellikle 5XXX serisi dolgu malzemeleri ile kaynaklanmalıdır, çünkü 4XXX serisi dolgu malzemeleri ile kaynaklandıklarında kötü kaynak birleşme özellikleri ortaya çıkabilir [4].

2.6 6xxx Grubu Alüminyumların Özellikleri ve Kullanım Alanları

Yüksek mukavemetleri ve işlenebilirlikleri sayesinde imalat sektöründe sıkça kullanılan bir alüminyum alaşımı ailesidir. Bu alaşımlar, yaklaşık %1 oranında magnezyum ve silikon içerir. Bu katkı maddeleri, alaşıma çözümlenme ısıl işlemi ile güçlenme özelliği kazandırır ve böylece daha yüksek mukavemet değerlerine ulaşılır.

Özellikleri ve Kullanım Alanları:

- Yüksek Mukavemet: Çözümlenme ısıl işlemi sayesinde 125-400 MPa arasında değişen yüksek çekme mukavemetleri elde edilir.
- İşlenebilirlik: İyi bir şekillenebilirliğe sahiptirler. Özellikle ekstrüzyon yöntemi ile kolayca profil haline getirilebilirler.
- Kaynaklanabilirlik: Kaynak yapılabilirler ancak sıcak çatlak oluşumuna eğilimlidirler. Bu nedenle, dolgu malzemesi kullanarak kaynak yapmak önemlidir. 4XXX ve 5XXX serisi dolgu malzemeleri sıklıkla tercih edilir.
- Korozyon Dayanımı: Orta düzeyde korozyon dayanımına sahiptirler [3].

2.7 7xxx Grubu Alüminyumların Özellikleri ve Kullanım Alanları

En yüksek mukavemetli alüminyum alaşımları arasında yer alır. Yaklaşık %0,8 ila %12,0 arasında değişen miktarda çinko içerirler. Bu alaşımlar, yüksek performans gerektiren uygulamalarda, özellikle havacılık, uzay ve rekabetçi spor ekipmanlarında sıklıkla kullanılır.

Özellikleri ve Kullanım Alanları:

- Yüksek Mukavemet: Çözünme ısıl işlemi ile 470-600 MPa arasında değişen yüksek çekme mukavemetleri elde edilir.
- Hafiflik: Alüminyum temelli olmaları sayesinde, ağırlık açısından avantajlıdırlar.
- Korozyon Dayanımı: Orta düzeyde korozyon dayanımına sahiptirler. Ancak, korozyon direncini artırmak için genellikle anodik oksidasyon gibi yüzey işlemlerine tabi tutulurlar.

Kaynaklanabilirlik:

- 7XXX serisi alaşımların kaynaklanabilirliği, alaşımın bileşimine ve kalınlığına bağlı olarak değişir.
- Bazı alaşımlar (örneğin 7075) kaynaklanabilirken, diğerleri (örneğin 7050) kaynaklanma açısından daha zordur.
- Genellikle kaynaklanabilen 7XXX serisi alaşımlar, 5XXX serisi dolgu malzemeleri ile kaynaklanır [3].

2.8 8xxx Grubu Alüminyumların Özellikleri ve Kullanım Alanları

8XXX serisi, özel amaçlar için geliştirilmiş alüminyum alaşımlarını kapsar. Bu gruptaki alaşımlar genellikle demir (Fe) ve lityum (Li) gibi elementlerle alaşımlandırılmış olup, elektriksel iletkenlik, şekillendirilebilirlik ve ısıya dayanım gibi özellikleriyle öne çıkar.

Paketleme, elektrik kabloları ve batarya uygulamaları gibi alanlarda kullanılır.

Özellikleri ve Kullanım Alanları:

- İyi İletkenlik: 8011 gibi alaşımlar, yüksek elektrik ve ısı iletkenliği sayesinde kablo ve kondansatör üretiminde tercih edilir.
- İyi Şekillendirilebilirlik: Özellikle ince levha ve folyo üretiminde mükemmel şekillendirilebilirlik sunar.
- Korozyon Direnci: Ortam etkilerine karşı iyi düzeyde dayanıklılık gösterir.
- Özel Uygulamalar: Lityum içeren 8XXX serisi (örneğin 8090), havacılık ve batarya teknolojilerinde kullanılır.

Kaynaklanabilirlik:

- 8XXX serisi alaşımlar genel olarak kaynaklanması zor alaşımlar arasında yer alır.
- İnce kesitlerde ve düşük ısı girdili işlemlerde sınırlı kaynak uygulanabilirliği vardır.
- Kaynak yapılacaksa, uyumlu dolgu metalleri ve kontrollü kaynak parametreleri kullanılmalıdır.
- Folyo ve levha uygulamalarında genellikle kaynak yerine yapıştırma veya mekanik birleştirme yöntemleri tercih edilir[3].

Tablo 2.1: Alüminyum alaşımlarının kaynak yapılabilirliği [5]

| Alaşım | Bileşim | Uygulama Alanları | Kaynaklanabilirlik |
|---------------|----------------|--------------------------|---------------------------|
| 1000 serisi | Al | Kimyasal | İyi |
| 2000 serisi | Al-Cu | Havacılık | Çatlak oluşumu, porozite |
| 3000 serisi | Al-Mn | Bataryalar | İyi |
| 4000 serisi | Al-Si | Otomotiv-İnşaat | Çatlak riski düşük |
| 5000 serisi | Al-Mg | Otomotiv | Genel olarak poroziteli |
| 6000 serisi | Al-Mg-Si | Havacılık, Otomotiv | Çatlak oluşumu, porozite |
| 7000 serisi | Al-Zn | Otomotiv | Porozite (Zn den dolayı) |
| 8000 serisi | Al-Li | Havacılık | Porozite |

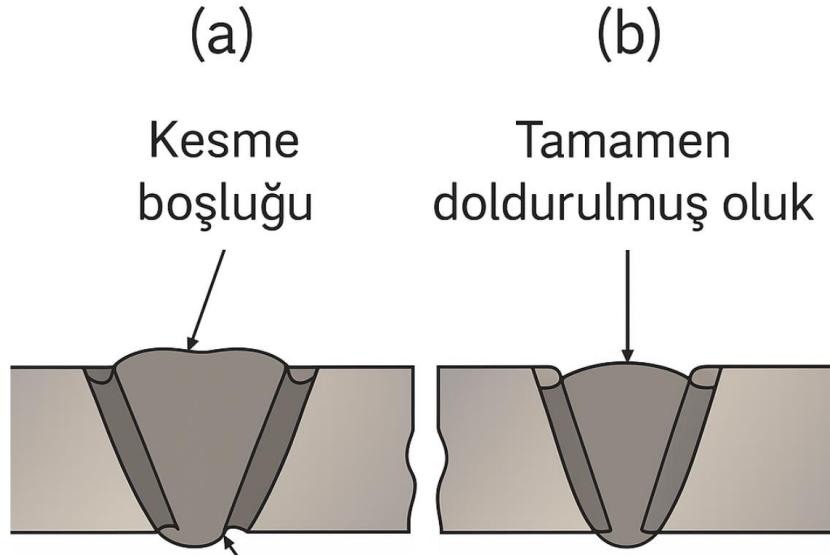
2.9 Lazer Kaynağında Alüminyum ve Alaşımlarda Oluşan Kusurlar

Kaynak kusurları, mekanik özelliklerde bozulmaya ve güvenilir birleştirme parçalarının oluşmasına neden olur; bu nedenle kusurların ortadan kaldırılması önemlidir. Kusurlar morfolojik ve metalurjik kusurlar olarak sınıflandırılabilir. Alüminyumun lazer ışını kaynağında ortaya çıkan ana kusurlar bu bölümde belirtilmiştir [6,7].

2.9.1 Undercut (Kesme Boşluğu)

Anahtar delik kaynağı elde etmek için gerekli olan 105 W/cm^2 üzerinde yüksek güç yoğunluğu kullanılması, kaynak metalindeki alaşım elemanlarının buharlaşma yoluyla kaybına ve eriyik havuzunun yüzeyinde undercut oluşumuna neden olabilir. Küçük nokta çapına sahip yüksek lazer gücü kullanıldığında, lazer ışını daha derine nüfuz eder ve metalin alt kısmında buharlaşmasına yol açar. Bu durumda, alaşım elemanlarının kaybı sonucunda kaynağın alt kısmında undercut meydana gelir (Şekil 2.1.a).

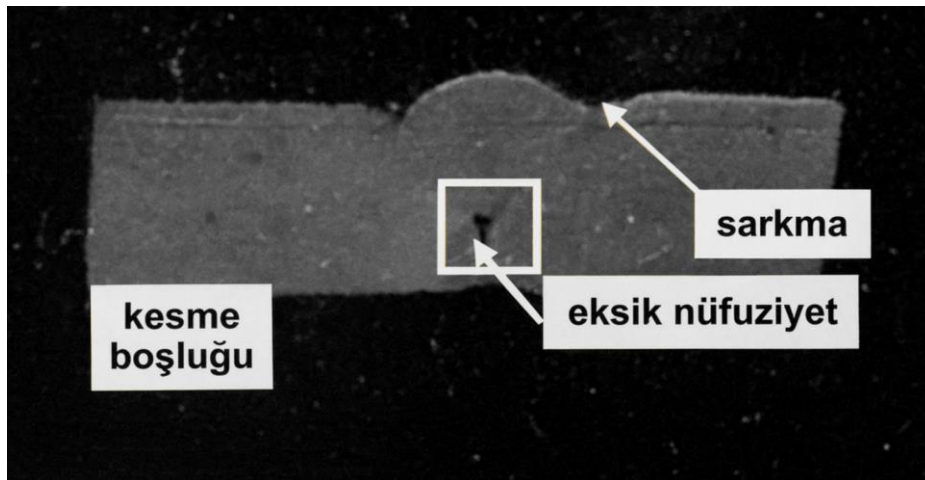
Yüksek güç yoğunluğunun yanı sıra, düşük kaynak hızı, montaj boşluklarının yetersizliği, koruyucu gazın aşırı akış hızı veya koruyucu gazın engellenmesi gibi durumlar da undercut ya da eksik dolgu kaynaklarının (Şekil 2.1.b) oluşumuna yol açabilir [8].



Şekil 2.1: a) Kesme boşluğu b) Eksik nüfuziyet [9]

2.9.2 Eksik Nüfuziyet ve Eriyen Malzemelerin Sarkması

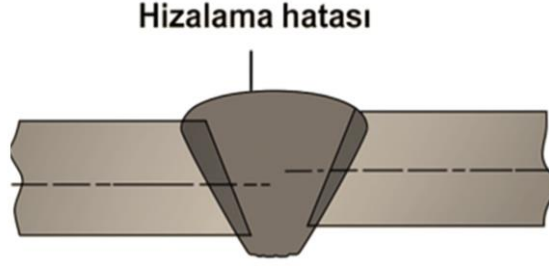
Alüminyum ve alaşımları düşük viskozite özelliklerine sahiptir. Ancak sıcaklık 850°C'ye ulaştığında, oda sıcaklığındaki su gibi davranırlar. Sonuç olarak, eriyik havuzunun kararsızlığı viskozite davranışından etkilenir. Kaynak sırasında eriyik malzemenin sarkması veya eksik nüfuziyet problemleri (Şekil 2.2) meydana gelir [7].



Şekil 2.2: Sarkma, kesme boşluğu (undercut) ve eksik nüfuziyet gibi kaynak hataları [9]

2.9.3 Hizalama Hatası

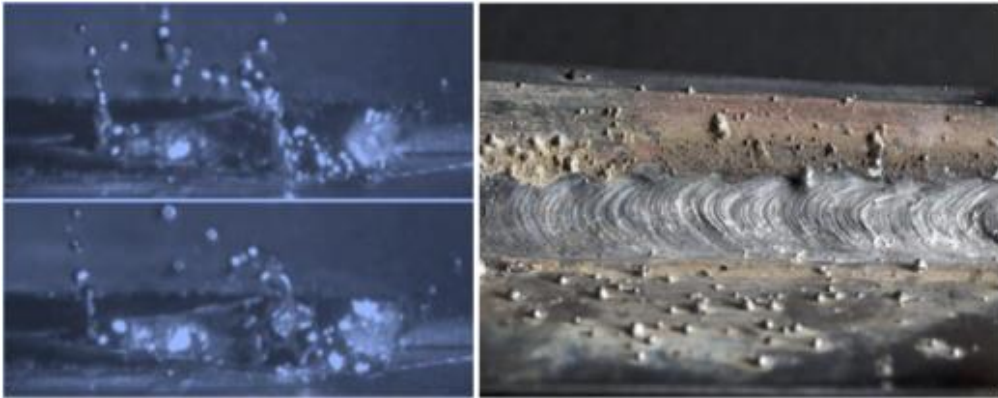
Bu durum genellikle kaynak öncesinde birleştirilecek malzemelerin düzgün sabitlenmediği durumlarda gözlemlenir. İş parçaları, punta kaynağı ile birbirine perçinlenmişse, kaynak sırasında ısı girdisi veya termal genişleme nedeniyle bu perçin kopabilir. Sonuç olarak, Şekil 2.3'te gösterildiği gibi doğrusal hizalama hatası meydana gelebilir.



Şekil 2.3: Alın kaynak bağlantılarında doğrusal hizalama hatası [10]

2.9.4 Sıçrama

Sıçrama, yüzey gerilimi basıncı nedeniyle erimiş havuzdan erimiş metalin atılmasıyla ilgili bir kusurdur. Bu kusur özellikle lazer gücü çok yüksek olduğunda ortaya çıkar. Ayrıca, kaynak hızının düşürülmesi ve birleştirme yüzeylerindeki kirlenme, kaynakta sıçramanın oluşmasına yol açar. Sıçrama ayrıca alt dolgu ve alt kesme gibi diğer kusurların oluşumundan da sorumludur [11]. Genel olarak, düşük kaynama sıcaklığına sahip Mg gibi alaşım elementleri nedeniyle, yüksek alaşımli alüminyum, daha saf alaşımlara göre sıçrama oluşumuna daha yatkındır. Kaynaktan sonra sıçramanın görüntüsü, Şekil 2.4.b'de gösterilmiştir.



Şekil 2.4: (a) Kaynak sırasında eriyik fırlaması ve sıçrama oluşumu (b) yüzeydeki görünümü [12]

2.9.5 Çatlaklar

Yüksek termal genleşme katsayısı, büyük katılaşma sıcaklık aralığı ve büzülme gibi özellikler göz önüne alındığında, alüminyum çatlak oluşumuna eğilimlidir. Katılaşma çatlağı (sıcak çatlak), soğuma sırasında büzülme ve erimiş havuzdaki kalıcı gerilmeler nedeniyle oluşan ana çatlak türüdür. Katılaşma sıcaklığının üzerinde, düşük erime noktasına sahip alaşım elementleri tane sınırlarına yerleşir, ardından sünek yapı nedeniyle soğuma sırasında metalin büzülmesiyle çatlaklar oluşmaya başlar. Daha fazla alaşım elementi ve daha yüksek ısı girişi, sıcak çatlak oluşumunu destekler. Ayrıca, daha düşük sıcaklıkta ötektik faz oluşturabilen çok sayıda alaşım elementi içeren ısıl işlemler alaşımların kaynağı sırasında likvasyon çatlağı gözlenebilir. Isı girişi arttığında, likat (eriyik) yeterli gerilim altında yırtılır ve likvasyon çatlakları gösterir [6].

2.9.6 Porozite

Alüminyumun lazer kaynağı sırasında iki ana tip porozite oluşur. Bunlardan biri, küresel şekle sahip ve kaynak havuzunda hidrojen çökmesi sonucu oluşan hidrojen porozitesidir. Ancak, yaklaşık 50-200 µm arasında daha küçük boyutları nedeniyle mikro porozite olarak da adlandırılırlar. Temizlik sırasında kontaminasyon, kaynak malzemelerinin kimyasal bileşimi veya koruyucu gazların saflığı hidrojen kaynakları olarak tanımlanabilir. Hidrojen gözenekleri, soğumanın en yavaş olduğu sıcak bölgelerde hidrojen kümelerinin fazlalığı nedeniyle kaynağın merkezinde yönelir [13].

Diğer bir porozite türü olan ana delik çökmesi, ana deliğın dinamik hareketiyle gazların hapsolmesinden kaynaklanır. Bu nedenle, gözenekler, kaynağın kökünde elipsoidal ve düzensiz şekillerde birikir ve boyutları 300-600 µm arasında değişir. Proses dengesizlikleri, ana delik kapanması veya büzülme ve yüksek derinlik-genişlik oranları, bu makro gözeneklerin oluşmasına neden olabilir. Bu gözenekleri ortadan kaldırmak için derinlik-genişlik oranının azaltılması gereklidir. Eğer güç yoğunluğu ve kaynak hızı aynı anda düşürülürse, gözenek oluşumu önlenir [14,15].

3. LAZER TEKNOLOJİSİ

3.1 Lazerin Tarihçesi

“Lazer” terimi, ilk kez 1960 yılında T.H. Maiman tarafından, “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” ifadesinden türetilmiştir. Türkçeye çevrildiğinde, uyarılmış ışının yayılımıyla ışığın güçlendirilmesi olarak tanımlanmaktadır. Lazerler, belirli bir dalga boyunda, tek renkli ve koherent (faz uyumlu) yoğun ışık elde etmek amacıyla geliştirilen optik sistemlerdir [1].

Lazer teknolojisine yönelik çalışmalarda, ışığın yayılması ve uyarılmış ışımaya kavramları ilk defa 1917 yılında Albert Einstein tarafından bilimsel olarak ifade edilmiştir. Takip eden yıllarda, 1951’de Charles Townes adlı araştırmacı, “Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation” olarak bilinen ve Türkçede “Mikrodalga ile Uyarılmış Işınının Güçlendirilmesi” anlamına gelen sistemi geliştirmiştir. 1958’e gelindiğinde ise Townes ile Schawlow, bugünkü lazerin temelini oluşturan ve “Optik Maser” adı verilen ışık üretim düzeneğini icat etmişlerdir.

1960’lı yıllarda lazer teknolojisi üzerine gerçekleştirilen araştırmalar ve keşifler, önemli bir gelişme sürecini beraberinde getirmiştir. Aynı yıl itibariyle Maiman, ilk yakut lazerini tasarlamış; Bir sene sonra ise Fox ve Li, spectrum rezonatörler üzerine çalışmalarını sürdürmüştür. 1963 senesinde Patel ile Kumar, kızılötesi bölgedeki ışını kullanarak günümüzde kesme, delme ve kaynak gibi sanayi alanlarında yaygın olarak tercih edilen CO₂ lazerini üretmişlerdir. Endüstride farklı alanlarda kullanılan Nd:YAG lazeri ise, 1964 yılında Geusic ve çalışma arkadaşları tarafından ortaya konmuştur. Sorokin ile Stevenson, lamba ile tetiklenen şerit formundaki yapıya sahip, uranyum ile zenginleştirilmiş kalsiyum florür lazerleri üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bu süreçte, birçok bilim insanı lazer ışını oluşturabilecek farklı malzemeler üzerinde yoğunlaşarak çeşitli deneyler yürütmüştür. Javan ve çalışma arkadaşları da neon helyum kullanarak ilk kez lazer ışınının önemini başarıyla gözlemlemiştir. [16].

1970’li yıllarda lazer teknolojisi önemli ilerlemeler kaydetmiş ve bu dönemde Gerry tarafından ilk dinamik gaz lazeri tasarlanmıştır. Lazerin işleyiş mekanizması, karbondioksit ile hidrojenin oksijenle reaksiyona girerek su ile beraber karbondioksit oluşturması esnasında meydana gelen enerjinin ışınım üretmek için kullanılması esasına dayanmaktadır. 1970’lerde yaşanan bu gelişmelerin ardından lazer teknolojisi, sanayi üretim süreçlerinde

giderek daha fazla yer edinmeye başlamıştır. Günümüzde lazer teknolojisi; tıp, uzay, savunma, havacılık, haberleşme ve bilgisayar tazında birçok alanda yaygın olarak kullanılmakta olup, bu teknolojinin gelişimi sonraki yıllarda ortaya çıkan farklı lazer türleriyle desteklenmiştir [17].

3.2 Lazer Çeşitleri

Lazerlerin sınıflandırılmasında pek çok farklı yöntem kullanılmaktadır, bunların en yaygın şekilde kullanılan hali, ışığın üretildiği aktif ortama bağlı olarak sınıflandırılmasıdır. Bu yaklaşıma göre lazerler; katı hâlde, sıvı ortamda, gaz formunda ve yarı iletken yapıda çalışan sistemler şeklinde dört temel kategoriye ayrılır [18,19].

3.2.1 Katı Lazerler

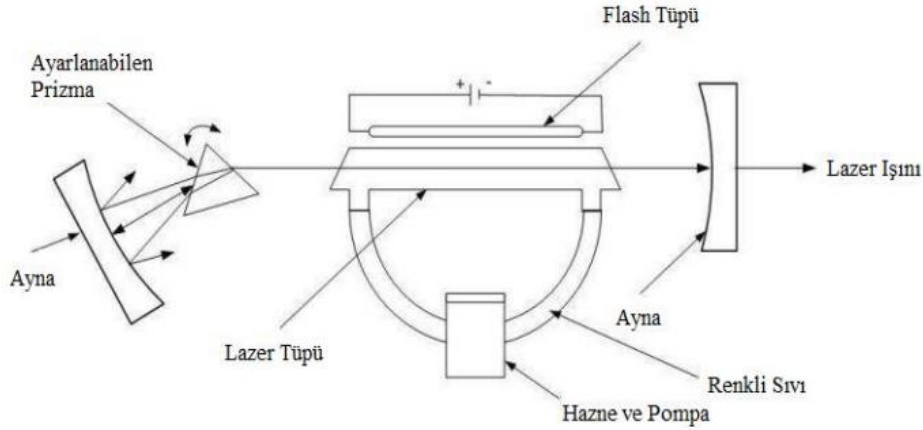
Katı hal lazerleri, aktif ortam olarak katı formdaki lazer malzemelerin kullanıldığı sistemlerdir. Katı hal lazerlerinde iletimi sağlayan bileşenler iyon ve kristal bileşenleridir. Çoğunlukla, erbiyum, neodimyum, iterbiyum gibi nadir toprak elementleri ya da titanyum ve krom gibi geçiş metalleri kullanılarak oluşturulurlar. Bunlara ek olarak; Al_2O_3 , $YLiF_4$, YAG, LiSAF gibi kristal yapılar yanında SiO_2 ve P_2O_5 gibi bazı bileşikler de lazer sistemlerinde kullanılmaktadır. Yüksek titreşim kapasitesine sahip olmaları ve kısa dalga boylarında çalışabilmelerinin sebebi atomları arasındaki mesafelerin küçük olmasıdır. Özellikle endüstriyel alanlarda yansıtıcı yüzeylerin lazerle işlenmesi konusunda katı hal lazerlerine önemli bir avantaj sağlamaktadır [19]. Diğer lazer çeşitlerine oranla verimlilikleri ve kullanım oranları daha fazladır [18].

3.2.2 Sıvı Lazerler

Sıvı lazerler, aktif ortam olarak saydam bir bölme içinde sıvı kullanan lazer türleridir. Bu sıvılar genellikle organik boya çözeltileri veya nadiren inorganik sıvılardır. Sıvı lazerlerin en önemli avantajlarından biri, sıvı ortamın kolayca şekillendirilebilmesi ve boyutlarını manuel belirleyerek güç seviyelerini çok daha fazla artırabilmektir. Bu lazerlerde aktif madde olarak, genellikle optik ışık yardımıyla pompalama yapılarak uyarılır. Bu yöntemde, bir ışık kaynağı sıvının üzerine tutulur ve sıvı molekülleri bu ışığı emerek enerji seviyelerini artırır. Enerjisi artan moleküller, daha sonra foton üretirler. Üretilen fotonlar, aynalar tarafından geri yansıtılır ve bu sayede ışığın şiddeti artar. Işığın şiddeti yükselmeye devam ettiği sırada aynadan geçen ışın demeti sıvı lazeri oluşturur. Sıvı lazerler, kontrol edilebilir bir prizma veya optik eleman sayesinde geniş bir dalga boyu aralığında ışık üretebilirler. Bu

özelliik, sıvı lazerleri kimyasal analiz, spektroskopi ve diğer bilimsel uygulamalar için çok uygun hale getirir [19].

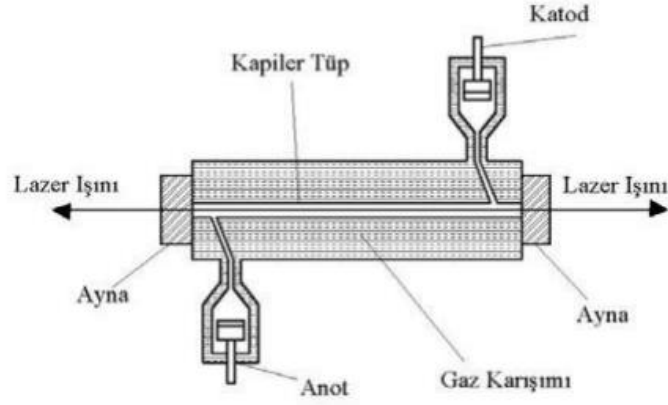
Günümüz teknolojisinde yarı iletken lazerlerde daha hassas ayarlar yapılabilmesi ve maliyetlerinin düşmesi sebebiyle sıvı lazerlere olan ilgi azalmıştır [20].



Şekil 3.1: Sıvı Lazer Sistemi [21]

3.2.3 Gaz Lazerler

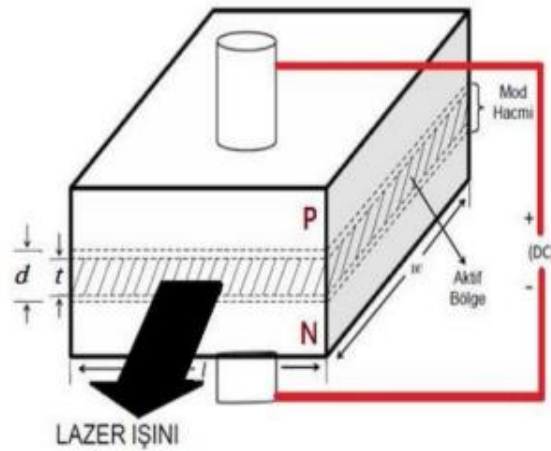
Gaz lazerleri, aktif ortam olarak gaz veya gaz karışımları kullanan lazerlerdir. Bu lazerlerde, gaz molekülleri veya atomları uyarılır ve bu uyarılma sonucu ışık üretilir. Gaz lazerleri, çeşitli uygulamalarda kullanılan yaygın bir lazer türüdür. Gaz lazerleri, kullanılan gaz karışımına göre farklı türlere ayrılır. En yaygın olanları helyum-neon (He-Ne) lazerleridir. Bunlar düşük güçlü ve görünür kırmızı ışık üretirler. İyon lazerleri de gaz lazerleri sınıfına girer ve en yaygın türü argon lazerleridir. Karbondioksit lazerler ise en yaygın gaz lazerlerinden biridir. Yüksek güçlü ve kızılötesi ışık üretirler. Gaz lazerleri, yüksek güç, kararlılık ve uzun ömür gibi avantajlara sahiptirler. Ancak, büyük boyut, düşük verimlilik ve yüksek maliyet gibi dezavantajları da vardır. Gaz lazerleri, endüstriyel uygulamalar, tıbbi uygulamalar, bilimsel araştırmalar ve eğitim gibi çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [19].



Şekil 3.2: Gaz lazer sisteminin temel bileşenleri [22]

3.2.4 Yarı İletken Lazerler

Yarı iletken lazer, çeşitli katkı maddeleriyle beraber iki yarı iletkenin bir araya getirilmesiyle oluşturulan devamında ise elektrik akımıyla uyarılarak lazer ışığı üreten sistemlerdir. Bu lazerlerde, iki farklı yarı iletken madde (genellikle n-tipi ve p-tipi) bir araya getirilerek bir "eklem" oluşturulur. Bu eklemde yüksek şiddette bir elektrik akımı geçirildiğinde, elektronlar ve boşluklar birleşerek fotonlar yayar. Yayılan fotonlar, lazer ortamında bulunan aynalar sayesinde geri yansıtılır ve bu da ışığın şiddetlenmesine yol açar. Belirli bir eşik değerine ulaşıldığında, lazer ışığı üretilir. Yarı iletken lazerler, diğer lazer türlerine göre daha düşük çıkış gücüne sahip olsalar da maliyet ve boyut avantajları nedeniyle birçok alanda kullanılmaktadırlar. Özellikle uzaklık ölçme ve iletişim teknolojilerinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar [19].



Şekil 3.3: Yarı iletken diyot lazerin şematik gösterimi [23]

3.3 Lazer Cihazları

Lazer ile yapılan işlemler endüstrinin farklı farklı dallarında kullanılmaktadır. Bu endüstri dallarının ihtiyaçlarının şekillenmesine göre lazer cihazları da farklılık göstermektedir.

Bu lazer cihazlarından en çok kullanılanları aşağıda açıklanmıştır.

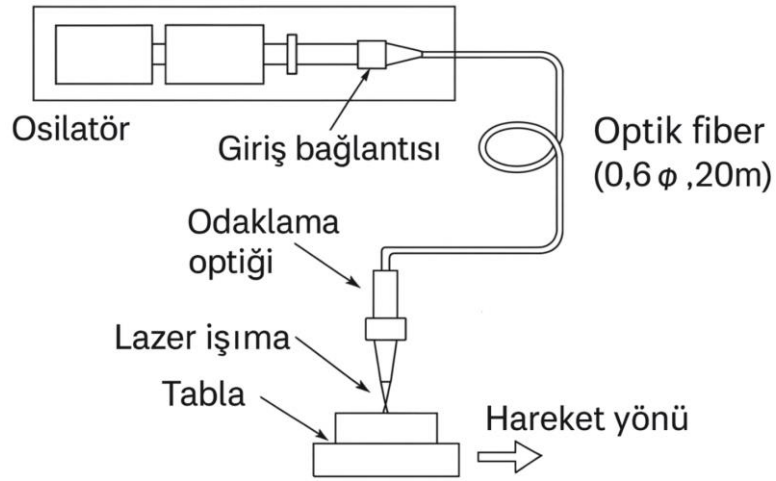
3.3.1 CO₂ Lazerler

CO₂ lazerler, endüstride yaygın olarak kullanılan bir gaz lazer türüdür. Karbondioksit, azot ve helyum gazlarından oluşan aktif ortamları sayesinde 10,6 µm dalga boyunda ışık üretirler. Bu dalga boyu, birçok malzeme tarafından kolayca emildiği için CO₂ lazerleri malzeme işleme uygulamaları için idealdir. %5-10 civarında verimliliğe sahip olsalar da yüksek güç çıkışları ve maliyet avantajları bu dezavantajı dengeler. 100 kW'a kadar çıkış gücüne sahip olabilseler de endüstriyel uygulamalarda genellikle 15 kW seviyelerinde çalışırlar. CO₂ lazerler, kesme, kaynaklama, markalama ve gravür gibi çeşitli malzeme işleme uygulamalarında yaygın olarak kullanılırlar. Metal, ahşap, plastik ve tekstil gibi farklı malzemelerin işlenmesinde etkilidirler. Yüksek güç çıkışı, maliyet avantajı ve geniş uygulama alanı gibi özellikleri sayesinde endüstride önemli bir yere sahiptirler [19,24].

3.3.2 Nd:YAG Lazerler

Nd:YAG lazerler, katı hal lazerleri sınıfında yer alır ve lazer üretim maddesi "neodmiyum:itriyum alüminyum garnet" kristal çubuğudur. Bu lazerlerin verimliliği %5'in altındadır ancak diyot lazerlerle enerji pompalanmasıyla bu oran %5 seviyelerine kadar çıkabilir. 1,06 µm dalga boyunda çalışan Nd:YAG lazerlerin ulaşabildiği en yüksek güç değeri 4 kW ayarındadır. Fakat darbe ile bu güç 10 kW civarına kadar yükselebilir. CO₂ lazerleri daha verimli olsalar da dalga boyu düşük olduğundan dar bir alana etki yaparak metallarda daha az yansıma oluşmasını sağlarlar. Ayrıca fiber kablolar ile beraber çalışabildiği için kullanım alanları artmaktadır [19].

Nd:YAG darbeleri lazer kaynağı, hassas ısı kontrolü sayesinde diğer yöntemlere göre birçok avantaj sunar. Özellikle gemi yapımı, savunma ve havacılık gibi sektörlerde, kaynak parametrelerinin hassas kontrolü kritik önem taşır. Nd:YAG lazerleri, oldukça fazla derinlik-genişlik oranı, daha az ITAB genişliği, kalıntı gerilmelerin ve süreksizliklerin azaltılması gibi özellikleriyle öne çıkar. Bu sayede daha kaliteli ve güvenilir kaynaklar elde edilir. Yüksek hassasiyet ve kontrol imkânı sayesinde, Nd:YAG darbeleri lazer kaynağı, özellikle yüksek mukavemetli malzemelerin kaynağında tercih edilen bir yöntemdir [25].



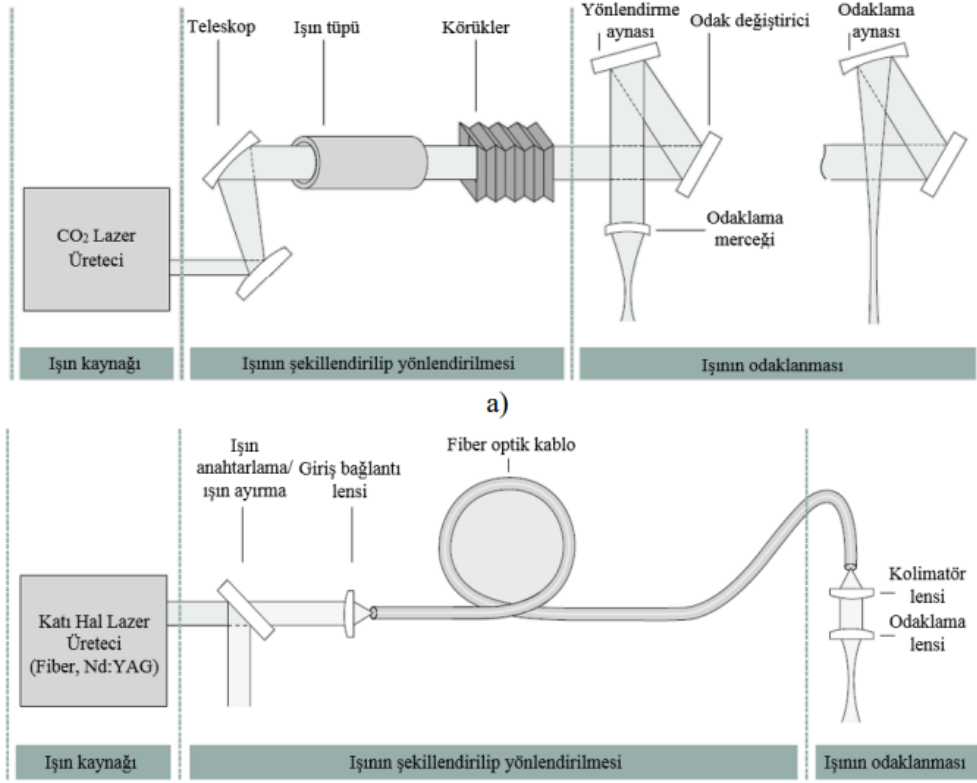
Şekil 3.4: Nd:YAG lazerinde ışının üretilmesi ve fiber kablo yardımıyla kaynağın iletilmesinin şematik gösterimi [26]

3.3.3 Disk Lazerler

Diyot pompalı yüksek güçlü disk lazerleri de katı hal lazerleri sınıfında yer alır. Ancak geleneksel katı hal lazerlerinden farklı olarak aktif ortamı silindirik çubuk yerine disk şeklindedir. Nb:YAG maddesinin disk şeklinde olması, daha iyi ısı dağılımı sağlayarak lazerin verimliliğini artırır. Bu lazerlerin dalga boyu $1,03 \mu\text{m}$ 'dir. Diğer lazerlere oranla kısa dalga boyları daha küçüktür. Bu sayede daha küçük alana odaklanabilirler. 16 kW'a kadar çıkış gücüne sahip disk lazerlerin verimliliği %50 seviyelerindedir. Bu yüksek verimlilik, disk lazerlerini endüstriyel uygulamalar için cazip hale getirir [27].

3.3.4 Fiber Lazerler

Fiber lazerler, aktif ortamında erbiyum ve iterbiyum gibi malzemelerin kullanıldığı, $1,07 \mu\text{m}$ dalga boyunda ışık üreten lazer türleridir. Nd:YAG ve CO₂ lazerlere kıyasla daha yüksek verimliliğe sahiptirler, yaklaşık %30 verimle çalışırlar. Mükemmel doğrusallık ve küçük odak çapı sayesinde kalın malzemelerin kaynağında yaygın olarak kullanılırlar. CO₂ lazerlere göre aynı koşullar altında çok daha hızlı malzeme işleyebilme kabiliyetine sahip olmalarıyla beraber bunun yanında maliyetleri de daha düşüktür. Fiber lazerin çalışma yapılacak malzemeye erişmesi farklı yollarla gerçekleşmektedir. Katı hal lazerlerinde fiber optik kablolar kullanılırken, gaz lazerlerde yansıtıcı ayna yardımıyla malzemeye erişilir. Bu özellikleri sayesinde katı lazerler daha çeşitli çalışma koşullarında fayda sağlamaktadır [19].



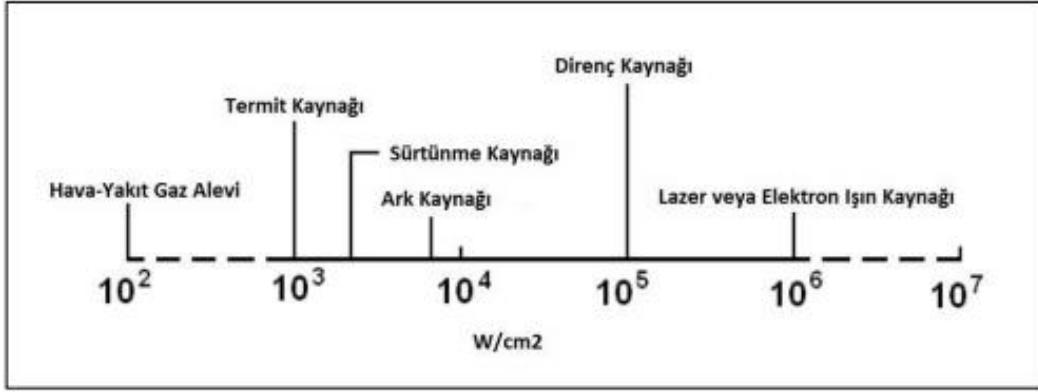
Şekil 3.5: Çeşitli lazer türlerinde ışının iletilmesinin şematik görüntüsü; a) Karbondoksit lazerleri, b) Katı lazerler [28]

3.4 Lazer Kaynak Yöntemi

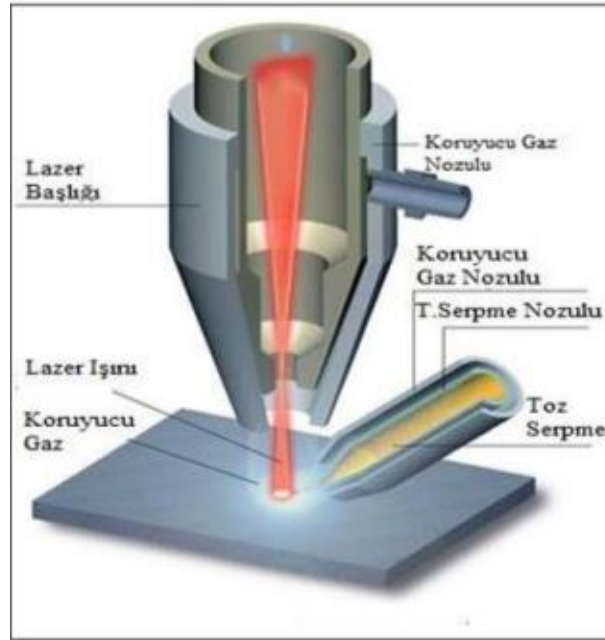
1960'lardan itibaren yüksek güçlü lazerlerin geliştirilmesiyle birlikte, malzeme birleştirme teknolojilerinde önemli bir dönüm noktası yaşanmıştır. Lazer kaynağı, farklı kalınlık ve türdeki malzemeleri bir araya getirmek için kullanılan, yüksek hassasiyet ve hız gerektiren bir yöntem olarak öne çıkmıştır [29].

Lazer kaynağı, yüksek enerji yoğunluğu sayesinde malzemeleri eritip birleştirerek güçlü ve dayanıklı bağlantılar oluşturur. Bu yöntemin yüksek hız, hassasiyet ve güvenilirlik gibi özellikleri, üretim süreçlerinde verimliliği artırırken, ürün kalitesini de önemli ölçüde yükseltmektedir [30].

Lazer kaynağının en önemli avantajlarından biri, yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmasıdır. Farklı kaynak yöntemleriyle karşılaştırıldığında, lazer kaynağının güç yoğunluğu oldukça yüksektir. Bu karşılaştırmanın görsel temsili Şekil 3.6'de sunulmuştur.



Şekil 3.6: Lazer kaynağının lazer gücü açısından diğer kaynak yöntemleriyle kıyaslanması [31]



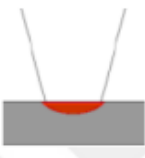
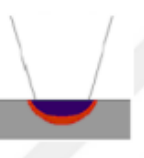
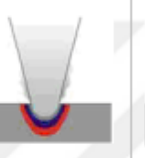
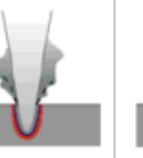
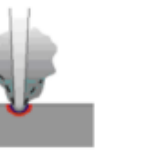
Şekil 3.7: Lazer Kaynak yönteminin prensibi [32]

Lazer kaynağında enerji transferi, geleneksel kaynak yöntemlerinden oldukça farklı bir mekanizmaya sahiptir. Lazer ortamında üretilen ışın, çeşitli yönlendirme aynaların yardımıyla sistemine erişimi sağlanır. Odaklama sonucunda, lazer ışını dar bir alana yoğunlaştırılarak malzemenin bölgesel olarak erimesine ve buharlaşmasına neden olur. Lazer enerjisi malzemeye nüfuz ederken, buharlaşan malzeme ve koruyucu gaz birleşerek yoğun bir plazma oluşturur. Plazma içerisinde meydana gelen ısı, erime sürecindeki malzemeye aktarılır ve iş parçasına iletilir.

Malzeme içinde, yüksek sıcaklık ve basınç farklarından dolayı sıvı haldeki metalin yer değiştirdiği, akışkan özellik gösteren bir kanal oluşur. Ardından, lazer ışını hareket ettirilerek kaynak işlemi gerçekleştirilir. Eriyik, ısınan buharın basıncıyla yüzeye doğru yükselirken, yüzey gerilimi, viskozite ve çekim kuvveti gibi faktörler bu hareketi dengeler. Lazer ışınının ilerleme yönüne bağlı olarak metal erirken, önceden erimiş bölge hızla katılaşır.

Bu işlem sonucunda, homojen düzende bulunan, düzgün yapılmış kaynak elde edilir. Bu kaynak dikişi az miktarda ısı girdisiyle yapıldığı için, ısıdan etkilenmiş bölge (ITAB) oldukça dar bir alanda oluşmuştur. Çoğunlukla kalın sacların kaynağında, kaynak çukuru yardımıyla parçaların birleştirilmesi sağlanır [32,33].

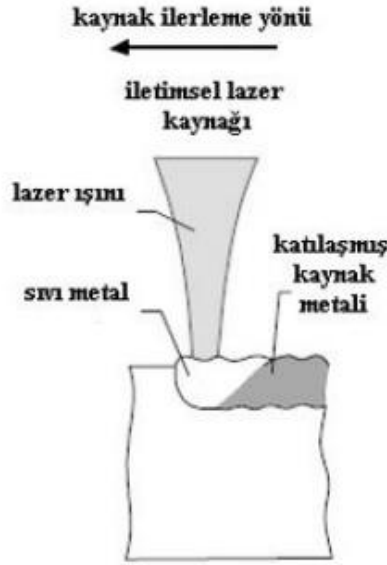
Lazer ışını ile gerçekleştirilen üretimlerde, ışının malzeme ile etkileşime girip yüzeyde kalmasından dolayı ortaya çıkan ısı enerjisi kullanıldığı için lazerin ve malzemenin özellikleri büyük önem taşımaktadır. Lazer ışınının yoğunluğuyla beraber malzemenin soğurulmasının da etkili olmasıyla beraber ısınma, erime, buharlaşma gibi süreçler meydana gelir. Şekil 3.8’de, farklı lazer güç yoğunluklarının uygulandığı işlemler ve bu süreçler üzerindeki etkileri gösterilmektedir.

| | | | | | |
|------------------|---|---|---|---|---|
| |  |  |  |  |  |
| Prosesin tanımı | Serleştirme, lehim | Isı iletim kaynağı | Derin nüfuziyet kaynağı | Delme | Malzeme kaldırma |
| Lazer Etkisi | Isıtma | Ergitme | Ergitme, buharlaştırma | Buharlaştırma | Buharlaştırma, iyonizasyon |
| Güç Yoğunluğu | 30 W/mm ² | 1 kW/mm ² | 10 kW/mm ² | 1 MW/mm ² | 10 MW/mm ² |
| Etkileşim Süresi | Saniye | Milisaniye | Milisaniye | Milisaniye | Nanosaniye |

Şekil 3.8: Lazer ile yapılan proseslerin lazer gücüne göre değişimleri [27]

3.4.1 Lazer İletim Kaynağı

İletim kaynağı, ince parçaların birleştirilmesinde kullanılan bir lazer kaynağı yöntemidir. Bu yöntemde lazer ışınının enerji yoğunluğu düşüktür, bu sayede erime parçanın yüzeyine yakın bölgelerde gerçekleşir ve kaynak derinliği fazla olmaz. İletim kaynağının nüfuziyet kaynağından en önemli farkı, oluşan kaynak havuzunun kapalı olmasıdır. Lazer ışını parçanın yüzeyinden soğurularak parçanın içerisinde dağılır. Kaynak işleminin gerçekleşmesi için lazer ışınının enerjisi, parça sıcaklığını malzemenin ergime sıcaklığının üzerine çıkarmayacak bir seviyede olmalıdır. Bu sayede buharlaşma minimum olur ve ergime ile parçaların birleşmesi sağlanır. Lazer ışını ile parçanın sıcaklığı ne kadar artırılsa ergime o kadar fazla olur ve buna bağlı olarak kaynak derinliği artar. Birleştirilecek parçaların birleştirilme şekline göre lazer ışını, parça üzerine darbeli modda punta kaynağı şeklinde ya da sürekli modda birleştirilecek yüzeylerde doğrusal olarak ilerletilmek suretiyle gönderilir [34].



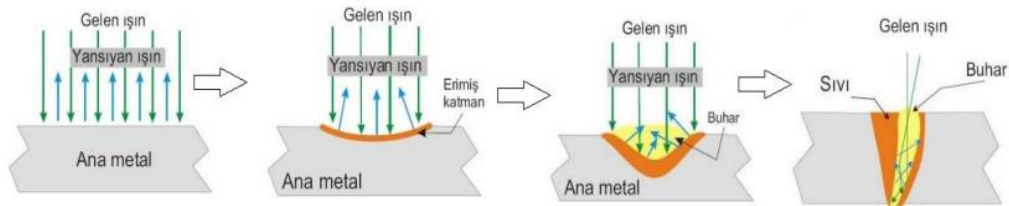
Şekil 3.9: İletimsel lazer kaynağı uygulaması [16]

3.4.2 Lazer Nüfuziyet Kaynağı

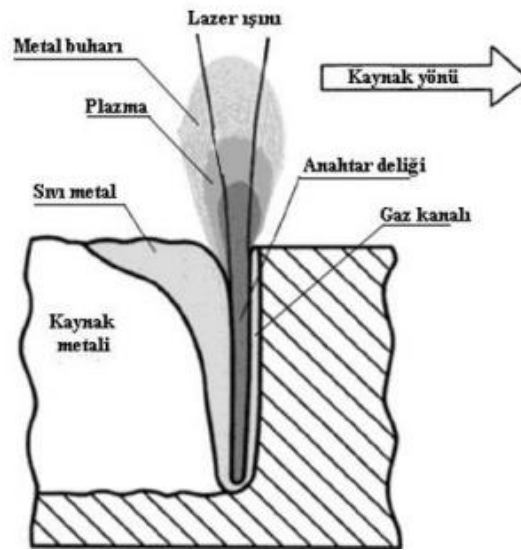
Lazer nüfuziyet kaynağı, lazer ışınının yüksek enerji yoğunluğuna sahip olduğu durumlarda kullanılan bir kaynak yöntemidir. Bu yöntemde yüksek enerji nedeniyle erime, parça yüzeyleriyle sınırlı kalmayıp daha derinlere iner ve parçada açık bir kaynak havuzu oluşmasına sebep olur. Kaynağın parça kesitinde oluşturduğu kaynak metali şeklinden dolayı İngilizcede "keyhole" (anahtar deliği) olarak adlandırılan bu yöntem, Türkçede

nüfuziyet kaynağı olarak ifade edilmektedir. Yüksek enerjili ışın sebebiyle bu yöntemle yapılan kaynaklar daha derin olmakta ve bu sebeple kalın parçaların birleştirilmesi için daha uygun bir yöntemdir.

Nüfuziyet kaynağında kaynak oluşumunun fiziksel aşamaları, iletim kaynağından farklıdır. Yüksek güç yoğunluğundaki lazer ışını parça üzerine odaklandığında, ergime ile birlikte buharlaşma da gözlenir. Ergimiş sıvı malzeme ile oluşan buharın basıncı, malzemedeki anahtar deliği şeklinde bir kanal oluşturur. Buharlaşan malzemenin oluşturduğu plazma da lazer ışını soğurarak kanalın yan duvarlarına etki eder ve parçanın yan duvarlarını eriterek kanalın genişlemesine yol açar. Buharlaşan malzemenin buhar basıncı, oluşan plazmanın etkisi ve yüzey gerilimi ile ergimiş sıvı malzeme parça üzerinde ileri yönde hareket ederek açık bir kaynak havuzu oluşturur. Kaynak havuzu lazer ışını uzaklaştıkça soğuyarak katılaşır ve sonuç olarak iki parça birleşmiş olur.



Şekil 3.10: Lazer nüfuziyet kaynağı aşamaları [34].



Şekil 3.11: Lazer ile yapılan kaynağın şematik kesit görünüşü [16]

3.4.3 Lazer Kaynağı Kesitinde Oluşan Bölgeler

Lazer kaynağı yönteminde kullanılan farklı parametreler, kaynak bölgesinde değişimlere neden olarak malzemenin mekanik özellikleri ve mikro yapısı üzerinde etkili olmuştur.

Kaynak sonucu meydana gelen bölgeler;

- Temel malzeme (TM)
- Isı tesiri altındaki bölge (ITAB)
- Ergime Bölgesi (EB)

Malzemelerin kaynaklanması sırasında uygulanan ısıdan etkilenen ve kaynak temasının gerçekleştiği tüm alan, kaynak bölgesi şeklinde isimlendirilmiştir. Bu bölge, ergime bölgesi ve ısıdan etkilenmiş bölge olmak üzere iki ana kısımdan oluşmaktadır.

- Ergime Bölgesi (EB)

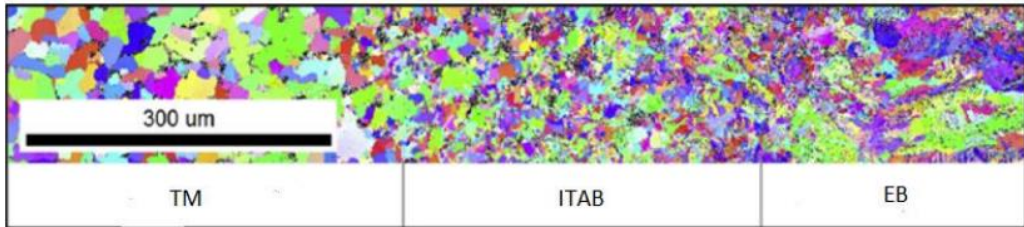
Bu bölge, malzemenin kaynaklanması esnasında uygulanan ısının etkisiyle eriyen, işlemin sonucunda katılarak kaynaklı bir bağlantı oluşturan alandır.

- Isı tesiri altındaki bölge (ITAB)

Isı tesiri altındaki bölge, kaynak bölgesine oldukça yakın bölümlerde yer almakta olup, yapılan işlem esnasında meydana gelen mikro ve mekanik özelliklerinde değişimlere yol açılan bölgedir. Isı etkisiyle tane büyümesi gözlemlenirken, bu bölgede plastik deformasyon oluşmamaktadır.

- Temel (esas) malzeme (TM)

Temel malzeme bölgesi, kaynak bölgesinden deformasyona uğramayacak kadar uzak olup, ısıl etki çok az da olsa hissedilebilir. Ancak bu ısıl etki, mikro yapı ve mekanik özelliklerde belirgin bir değişime neden olacak kadar güçlü değildir [35].



Şekil 3.12: Lazer kaynağı sonucu oluşan kesit görüntüleri [36]

3.5 Lazer Kaynağının Avantajları ve Dezavantajları

Lazer kaynağı, lazer ışınının benzersiz özelliklerinden dolayı diğer kaynak yöntemlerine göre birçok avantaja sahiptir. Lazer ışınının uzun mesafelerde yayılmadan doğrusal bir şekilde iletilebilmesi, tek bir noktaya odaklanarak kontrollü enerji aktarımı yapılabilmesi gibi özellikler, lazer kaynağını özellikle hassas ve yüksek kaliteli kaynak uygulamaları için ideal hale getirir [1].

Lazer kaynağı, lazer ışınının benzersiz özelliklerinden dolayı diğer kaynak yöntemlerine göre birçok avantaja sahiptir. İşte lazer kaynağının bazı temel avantajları:

- Çevre Dostu: Lazer kaynak işlemleri, duman, gaz veya atık üretimi açısından oldukça temizdir. Bu yönüyle çevreye duyarlı üretim süreçlerinde tercih edilen bir yöntemdir.
- Düşük Distorsiyon: Enerjinin yüksek yoğunlukta ve sınırlı bir alana uygulanması sayesinde, ısıdan etkilenen bölge oldukça dar kalmakta; bu da iş parçasında termal bozulma ve şekil değişikliklerinin minimum düzeyde olmasını sağlamaktadır.
- Yüksek Hız ve Düşük Isı Girdisi: Lazer kaynağı, diğer yöntemlere kıyasla çok daha yüksek hızda işlem yapılmasına olanak tanır. Aynı zamanda düşük ısı girdisiyle çalışması hem enerji verimliliğini artırır hem de malzeme yapısının zarar görmesini önler.
- Malzeme Tasarrufu: Lazerle yapılan birleştirme işlemleri çoğu zaman ilave kaynak teli ya da dolgu malzemesi gerektirmez. Bu durum hem maliyetleri düşürür hem de süreç sadeleşir.
- Otomasyon Kolaylığı: Lazer kaynak sistemleri, robotik ve CNC kontrollü üretim hatlarına kolayca entegre edilebilmektedir. Bu özellik, seri üretimde hassasiyetin ve verimliliğin artırılmasına katkı sağlar.
- Temassız Kaynak: Lazer kaynağında enerji aktarımı fiziksel temas olmaksızın gerçekleştirilir. Bu durum, özellikle ulaşılması zor geometrilerde ya da çok küçük parçaların birleştirilmesinde büyük avantaj sağlar.
- Daha Az Alaşımın ve Distorsiyon: Lazer kaynağında enerji aktarımı fiziksel temas olmaksızın gerçekleştirilir. Bu durum, özellikle ulaşılması zor geometrilerde ya da çok küçük parçaların birleştirilmesinde büyük avantaj sağlar.
- Manyetik Alanlardan Etkilenmez: Elektron ışını kaynağı gibi bazı kaynak yöntemleri manyetik alanlardan etkilenebilirken, lazer kaynak sistemleri bu tür

dış etkenlerden etkilenmeden stabil biçimde çalışabilir. Ayrıca vakum ortamına ya da radyasyon kalkanlarına ihtiyaç duymazlar.

- Ulaşılması Zor Yerlerde Kaynak İmkânı: Lazer ışını optik elemanlar kullanılarak kolaylıkla odaklanıp, doğrultulup yönlendirilebildiği için diğer kaynak yöntemleri ile ulaşılması zor olan yerlerde kaynak yapılabilmesini sağlar. Bu sayede tasarımlarda kısıtlamaları azaltır.
- Malzeme Çeşitliliği: Lazer kaynağı, pek çok farklı metal ve alaşım üzerinde kullanılabilir. Çelik, alüminyum, titanyum gibi malzemeler hem kendi içinde hem de birbirleriyle birleştirilebilir. Isının sadece küçük bir bölgeyi etkilemesi sayesinde, farklı yapıya sahip malzemeler bile sorunsuz şekilde kaynaklanabilir. Bu avantajlar, lazer kaynağını özellikle hassas ve yüksek kaliteli kaynak uygulamaları için ideal hale getirir [19].

Lazer kaynağı, sunduğu avantajların yanı sıra bazı dezavantajlara da sahiptir. İşte lazer kaynağının bazı dezavantajları:

- Yüksek Yatırım Maliyeti: Lazer kaynağı ve lazer kaynağı için kullanılan ekipmanlar, konvansiyonel kaynak yöntemlerine nazaran daha yüksek yatırım maliyetine sahiptir. Özellikle Nd:YAG lazerlerde güvenlik önlemleri için alınan ek malzemeler bu kaynağın maliyetini daha da artırabilir.
- Sıcak Çatlama ve Sıvı Çatlama Riski: Yüksek hızlı kaynağa bağlı hızlı soğuma sebebiyle kaynaklı parçada sıcak çatlama, sıvı çatlama görülebilir. Kaynaklı bölgenin kaynak dikişi çok sert olup kırılma mikroyapıları görülebilir.
- Sıçrama Riski: Yüksek güçlerde parçada sıçramalar görülebilir. Bu sıçramalar lazer sistemine zarar verebilir.
- Güvenlik Riskleri: Lazer ışınlarının yansıtıcı özelliğinden dolayı ek tedbirler alınmalıdır. Işınların göz ya da cilt üzerinde herhangi bir bölgeye ulaşması bazı sağlık problemlerine yol açabilir.
- Enerji Verimliliği: Lamba pompalı Nd:YAG lazerler %1-2 arasında enerji verimliliği sağladığı için lazer kaynağının dezavantajı olarak görülebilir. Ancak fiber lazerler ya da doğrudan diyot lazerler ile bu oran %30'a kadar çıkmıştır.

Bu dezavantajlar, lazer kaynağının kullanım alanlarını ve uygulama şekillerini etkileyebilir. Ancak teknolojinin gelişmesiyle birlikte bu dezavantajların da zamanla azalması beklenmektedir [37].

Tablo 3.1 : Lazer kaynağı ile MAG kaynağı maliyetlerinin kıyaslanması [17]

| Karşılaştırma Kriterleri | MAG Kaynağı | Lazer Kaynağı |
|---|-------------------------------|-------------------------------------|
| Kullanılan kaynak donanımı | 300-A | 2 kW CO ₂ Lazer + Modülü |
| Yatırım maliyeti (£) | 850 | 150.000 |
| Sarf malzemesi | 4 mm parça, 1 metre çelik tel | Koruyucu Gaz 5 £/saat |
| Kaynak hızı | 1 mm/s | 10 mm/s |
| Proses süresi | 1.000 s | 100 s |
| Sermaye amortismanı yılda 1800 saat için yıllık %20 (£) | 0,026 | 0,46 |
| Sarf malzemesi maliyeti (£) | 0,5 | 0,11 |
| İşçilik maliyeti günlük | 6,66 | 0,55 |
| Güç sarfıyatı 0,06 kWh (£) | 0,066 | 0,16 |
| Kaynak temizliği (£) (MAG kaynağı süresinin %40'ı) | 2,22 | - |

3.6 Lazer Kaynak Parametreleri

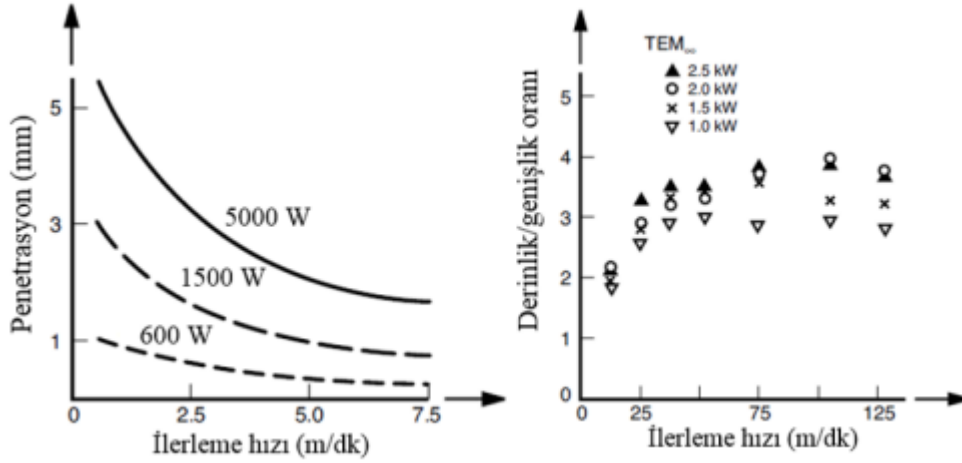
Lazer kaynak parametreleri, kaynak dikişinin kalitesi, nüfuziyet derinliği, mikro yapı oluşumu ve mekanik özellikler üzerinde doğrudan etkili olduğundan, prosesin başarısı açısından kritik öneme sahiptir. Lazer gücü, odak noktası konumu, ilerleme hızı ve koruyucu gaz debisi gibi parametrelerin uygun şekilde seçilmesi; sıçrama, porozite ve çatlak gibi kaynak hatalarının önlenmesini sağlar. Ayrıca, bu parametreler malzemenin alaşım türüne ve kalınlığına göre optimize edilmelidir. Yanlış parametre seçimi, kaynak bölgesinde gevrek yapılar oluşmasına veya ergime hatalarına yol açarak kaynak bütünlüğünü zayıflatabilir. Bu nedenle, her bir parametrenin sistematik olarak değerlendirilmesi hem kalite hem de maliyet açısından verimli bir kaynak prosesi için gereklidir.

3.6.1 Lazer Gücü ve İlerleme Hızı

Lazer kaynağında lazer gücü, kaynak işleminin başarısı ve elde edilecek kaynak dikişinin özellikleri üzerinde kritik bir role sahiptir. Yapılan çalışmalarda da gözlemlendiği üzere, lazer gücündeki artış doğrudan kaynak dikişinin nüfuziyet derinliğini etkilemektedir. Bu nedenle lazer gücü, tercih edilecek kaynak türünün belirlenmesinde önemli bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır ancak, lazer gücünün tek başına kaynak işleminin karakterini tam olarak belirleyemeyeceği unutulmamalıdır. Kaynak işleminin nihai sonucu, uygulanan kaynak hızıyla birlikte değerlendirilmelidir. Sabit bir lazer gücü altında dahi, kaynak hızındaki değişiklikler ışının malzeme üzerindeki etkileşim süresini ve dolayısıyla elde edilecek nüfuziyet miktarını önemli ölçüde değiştirebilmektedir [34].

Diğer tüm işlem parametreleri sabitken, lazer gücünün artırılması kaynak dikişinde daha fazla nüfuziyet sağlar ve dikişin derinlik/genişlik oranını yükseltir. Buna karşılık, ilerleme

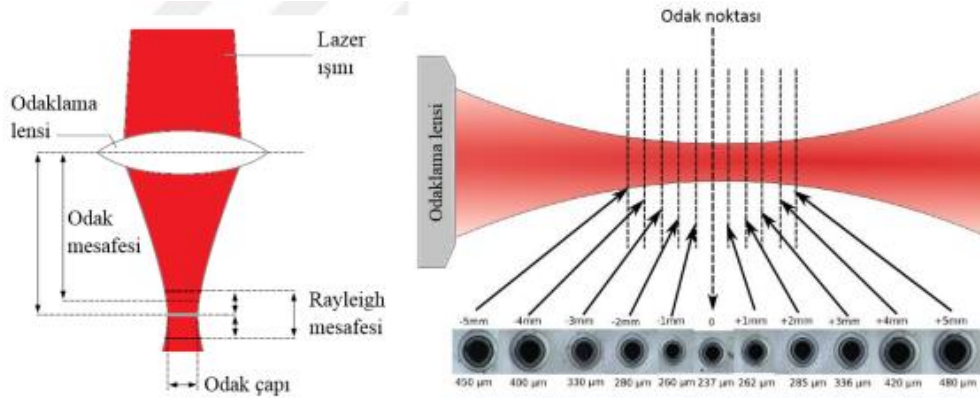
hızı arttığında ise tam tersi bir etki görülür; hız yükseldikçe nüfuziyet azalır ve kaynak derinliği düşer.



Kaynak hızı düşük olduğunda, diğer parametreler sabit tutulduğunda geniş bir eriyik havuzu meydana gelir. Buna karşılık, yüksek kaynak hızları daha az yerel deformasyona yol açsa da açısal bozulmaların artmasına neden olabilir [39].

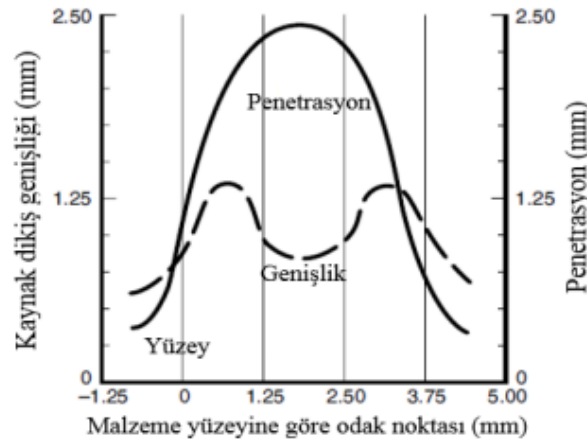
3.6.2 Odak Mesafesi

Lazer kaynak süreçlerinde, lazer ışınının malzeme yüzeyinde ulaştığı yoğunluk ve odak noktası büyüklüğü (spot çapı), kaynak işleminin etkinliği açısından kritik öneme sahiptir. Odak mesafesi, lazer ışınının optik mercekler vasıtasıyla kaynak bölgesine ne kadar keskin bir şekilde odaklanacağını belirleyen temel bir parametredir. Kaynak uygulamaları genellikle, son odaklama merceğinin odak noktasında gerçekleştirilmektedir. Lazer spotunun çapı ise, kullanılan lazer kaynağının orijinal ışın çapı ve odaklama merceklerinin optik özellikleriyle doğrudan ilişkilidir. Bu bağlamda, odak mesafesinde meydana gelen herhangi bir değişiklik, lazer spotunun boyutunu etkileyerek enerji yoğunluğunu dolaylı olarak değiştirir ve sonuç olarak kaynak işleminin karakteristiklerini belirleyici bir faktör haline gelir.



Şekil 3.14: Odak uzaklığı ve ışın çaplarının şematik gösterimi [40]

Lazer kaynağı uygulamalarında odak mesafesinin ayarlanması, lazer ışınının parça yüzeyine, yüzeyin altına veya yüzeyin üzerine odaklanması şeklinde üç farklı konfigürasyonda gerçekleştirilebilmektedir. Bu farklı odak konumlarının her biri, elde edilen kaynak sonuçları üzerinde belirleyici etkilere sahiptir. Negatif odak noktası, lazer ışınının odak noktasının iş parçasının yüzeyinin üzerinde konumlandırıldığı durumu ifade etmektedir. Şekil 3.15'te detaylı bir şekilde gösterildiği üzere, lazer ışınının belirli bir derinliğe kadar parça malzemesinin içine odaklanması, kaynak nüfuziyetinin kontrollü bir şekilde artmasına olanak tanımaktadır.



Şekil 3.15: Odak noktasının merkeze olan uzaklığının değişimiyle kaynak bölgesinde oluşan değişim [38]

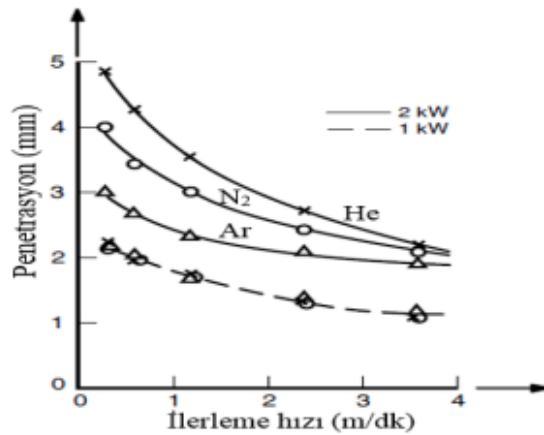
3.6.3 Koruyucu Gaz

Lazer kaynakta önemli rol oynayan parametrelerden biri de koruyucu gazdır. Koruyucu gazın kaynak üzerindeki etkisi iki temel noktada öne çıkar: İlki, plazma oluşumunu azaltarak

lazer ışınının malzemeye daha iyi nüfuz etmesini sağlamak; ikincisi ise, ergimiş metalin havadaki gazlarla temasını engelleyerek yüzeyde oksitlenmeyi önlemektir.

Koruyucu gazın sadece türü değil, çıkış hızı, parçaya uygulandığı açı ve kullanılan gaz nozulunun tasarımı da kaynak kalitesini doğrudan etkileyen faktörler arasındadır. Örneğin, gaz çıkış hızı yeterince yüksek değilse, kaynak bölgesinde tam koruma sağlanamaz ve yüzeyde oksitlenme meydana gelebilir. Öte yandan, gaz hızı fazla olduğunda ise oluşan basınç, ergimiş metali yönlendirerek kaynak bölgesinde şekil bozulmalarına neden olabilir [34].

Lazer kaynak uygulamalarında, kullanılan ana malzeme türüne bağlı olarak farklı koruyucu gazlar tercih edilmektedir. Bu bağlamda, sıklıkla argon (Ar) ve helyum (He) gazları ön plana çıkmaktadır. Helyumun argon gazına kıyasla daha yüksek bir iyonizasyon enerjisine sahip olması, kaynak bölgesinde plazma oluşumunu engellemede daha etkin bir rol oynamasını sağlamaktadır. Bu özellik, özellikle derin nüfuziyetin hedeflendiği kaynak işlemleri için helyumu ideal bir seçenek haline getirmektedir. İyonizasyon seviyesi helyum ve argon arasında bir değerde bulunan azot (N_2) gazı da plazma baskılamada kullanılabilirlikle birlikte, bu durumda nitrür oluşumu riski ve buna bağlı olarak malzemenin potansiyel kırılabilirlik artışı dikkate alınması gereken önemli bir faktördür. Şekil 3.16'da sunulan veriler incelendiğinde, lazer kaynağındaki çelik malzemenin farklı koruyucu gazlar kullanılarak gerçekleştirilen işlemlerde, düşük lazer gücü seviyelerinde gaz türünün nüfuziyet derinliği üzerinde sınırlı bir etkisi olduğu görülmektedir. Ancak, lazer gücünün artmasıyla birlikte, kullanılan koruyucu gazın seçimi penetrasyon derinliği üzerinde belirgin ve önemli farklılıklar yaratmaktadır.



Şekil 3.16: Farklı koruyucu gazların penetrasyon üzerindeki etkisi

4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Lazer kaynağı ile ilgili farklı alüminyum alaşımlarının birleştirilmesi üzerine yapılan bazı çalışmalarda kaynak parametrelerinin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Özellikle farklı lazer güçleri, besleme hızları ve odak konumu gibi parametrelerin çekme mukavemeti, sertlik dağılımı ve porozite oluşumu gibi çıktılarına etkisi vurgulanmaktadır.

X. Cao ve arkadaşlarının 2003 yılında yayınladığı çalışmada, AA6111, AA5754, AA5083 gibi farklı alüminyum alaşımlarının lazer kaynağı sonrası mikroyapısal değişimleri detaylı olarak incelenmiştir. Çalışmada, yüksek lazer gücünün daha derin nüfuziyet sağlasa da porozite ve çatlak oluşumlarını artırabileceği belirtilmiştir. Bununla birlikte, kaynak bölgesinde tane büyümesi ve ITAB bölgesindeki sertlik düşüşlerinin mekanik dayanımı olumsuz etkilediği vurgulanmıştır [6].

Pastor ve arkadaşlarının 1999 tarihli araştırmalarında AA5182 ve AA5754 alaşımlarının Nd:YAG sürekli dalga lazer kaynağı altında kaynaklandığı ve magnezyum kaybının %30'a kadar çıktığı bildirilmiştir. Bu çalışmada 1.5–2.5 kW aralığında lazer gücü ve 1.5–2,0 m/dk besleme hızları kullanılmıştır [13].

2023 yılında E. B. Demir tarafından yapılan bir yüksek lisans tezinde, AA6063 alüminyum alaşımı lazer kaynağıyla birleştirilmiş ve Taguchi yöntemiyle parametre optimizasyonu yapılmıştır. Bu çalışmada en yüksek çekme mukavemeti 195 MPa olarak elde edilmiş ve optimum kaynak parametresi olarak 1200 W lazer gücü, 4 mm/s besleme hızı ve 0 mm odak uzaklığı raporlanmıştır [5].

D. Wu ve arkadaşlarının 2017 yılında gerçekleştirdikleri çalışmada 5083 alaşımının fiber lazer ile kaynağı sırasında sıçrama (spatter) oluşumuna odaklanılmıştır. 4 kW lazer gücü ve 30 mm/s kaynak hızıyla yapılan deneylerde, odak noktasının +1 mm yukarı kaydırılmasının sıçrama miktarını %65 artırdığı belirtilmiştir [11].

U. Özdemir'in 2012 tarihli doktora tezinde lazerle kaynaklanmış alüminyum bağlantılarda kırılma tokluğu değerleri 14–28 MPa aralığında ölçülmüştür. Sertlik profillerinde lazer gücünün artışıyla düzensizlikler görüldüğü ifade edilmiştir [16].

C. Yüce'nin 2018 yılında gerçekleştirdiği araştırmada ise elik ve alüminyum alaşımlarının lazerle birleştirilmesinde en iyi kaynak kalitesinin 1500 W lazer gücü ve 1,2 m/dk besleme hızında elde edildiği raporlanmıştır. Bu çalışmada parametre optimizasyonunun birleştirme performansı üzerindeki doğrudan etkisi vurgulanmaktadır [19].

5. MALZEME VE YÖNTEM

5.1 Malzeme

Bu tez çalışmasında lazer kaynak işlemleri için kullanılan malzeme, Alüminyum 5xxx serisi içerisinde yer alan AA5049 alaşımıdır. AA5049, özellikle magnezyum katkılı olması nedeniyle iyi bir korozyon direnci ve kaynak kabiliyeti sunan bir alaşımdır. Mekanik özellikleri ve denizel ortamlara karşı dayanıklılığı sayesinde otomotiv, gemi inşası ve yapısal uygulamalarda sıkça tercih edilmektedir.

Bu alaşımın seçilme nedeni, lazer kaynak yöntemine uygunluğu ve kaynak sonrası mekanik özelliklerini koruma eğiliminde olmasıdır. Ayrıca, plastik şekil verme yeteneği yüksek olduğundan hem imalat hem de kaynak sonrası işlemlerde avantaj sağlamaktadır. AA5049 alaşımının lazer kaynağına verdiği tepkinin incelenmesi, özellikle ince kesitli ve hassas uygulamalar için önemli sonuçlar sunma potansiyeli taşımaktadır. Bu bağlamda, çalışmada kullanılan malzeme hem uygulama alanları hem de literatürdeki önemi açısından tercih edilmiştir.

Alaşımın kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 5.1 ve Tablo 5.2 'de verilmiştir.

Tablo 5.1: AA5049'nın kimyasal bileşiminin standart ile karşılaştırılması [41]

| Alaşım | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Zn | Ti | Others (Each) | Others (Total) | Al |
|--------------------|------|------|------|---------------|-------------|------|------|------|------------------|-------------------|--------|
| AA5049 (EN) | 0,40 | 0,50 | 0,10 | 0,50– 1,10 | 1,6– 2,5 | 0,30 | 0,20 | 0,10 | 0,05 | 0,15 | Kalan |
| AA5049 (Numune) | 0,32 | 0,41 | 0,05 | 0,60 | 2,10 | 0,10 | 0,05 | 0,03 | 0,02 | 0,04 | ~96,28 |

Tablo 5.2: AA5049 alaşımının mekanik özellikleri

| Malzeme | Akma mukavemeti (MPa) | Çekme mukavemeti (MPa) | Uzama (%) | Sertlik Değeri (HV) |
|---------|-----------------------------|------------------------------|-----------|---------------------------|
| AA5049 | 112 | 200 | 23 | 50-70 |

Lazer kaynak işleminde kullanılan 3 mm kalınlığındaki alüminyum levhalar lazer kesim makinesinde 150x200 boyutlarında kesilmiştir. Belirtilen boyutlarda toplam 36 adet numune kaynak işlemine hazır hale gelmiştir.

Bu tez çalışmasında kullanılan kaynak ekipmanı, OTEKSO firmasına ait OTK-3000W model lazer kaynak makinesidir. Makine, 3000 W (3 kW) lazer gücüne sahiptir ve bu yüksek güç seviyesi sayesinde özellikle kalın kesitli metallerde derin nüfuziyetli kaynak yapma imkânı sunmaktadır. Lazer ışınının dalga boyu 1064 nm olup, bu değer fiber lazer kaynak sistemlerinde yaygın olarak kullanılan kızılötesi (IR) bölgededir. Makine trifaze 380V, 50Hz elektrikle çalışmakta olup, bu da sanayi tipi güçlü bir enerji beslemesine ihtiyaç duyduğunu göstermektedir. Toplam güç tüketimi 16 kW olup, bu değer makinenin çalışma sırasında ne kadar enerji harcadığını belirtmektedir. Kasım 2023 üretim tarihine sahip olan bu makine, modern fiber lazer teknolojisine dayalı olarak yüksek verimlilik, hassasiyet ve düşük bakım ihtiyacıyla öne çıkmaktadır. Bu özellikleri sayesinde, lazer kaynak işlemlerinde tekrarlanabilirlik ve kalite açısından güvenilir sonuçlar elde edilmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 5.1: Çalışmada kullanılan lazer kaynak makinesi

Çalışmada kullanılan kaynak teli AlMg5Cr (%5 magnezyum ve az miktarda krom içeren alüminyum alaşımı) olup, çapı 1,60 mm'dir. Bu tel, özellikle 5xxx serisi alüminyum alaşımlarıyla yüksek uyumluluk gösterdiğinden, AA5049 gibi magnezyum esaslı

malzemelerde tercih edilmektedir. AlMg5Cr telinin içerdiği magnezyum, kaynak bölgesinde mukavemeti artırırken aynı zamanda iyi bir korozyon direnci sağlar. Krom elementi ise tane sınırı stabilitesini artırarak çatlak oluşumunu engellemeye yardımcı olur. Ayrıca telin 1,60 mm çapta olması, lazer kaynak sırasında düzgün bir ergime ve kararlı bir kaynak banyosu oluşmasına olanak tanımış, bu sayede daha homojen dikişler elde edilmiştir. Tüm bu özellikler, lazer kaynak işlemi sırasında hem mekanik hem de metalürjik açıdan güvenilir sonuçlar alınmasını sağlamıştır.



Şekil 5.2: Çalışmada kullanılan AlMg5Cr kaynak teli

Bu çalışmada koruyucu gaz olarak kullanılan Argon UN 1006, (saf argon) lazer kaynak işlemlerinde yaygın olarak tercih edilen inert bir gazdır. Argon, kimyasal olarak tepkisiz yapısı sayesinde kaynak bölgesini atmosferik gazların (özellikle oksijen ve azot) olumsuz etkilerinden korur. Bu sayede, yüzeyde oksitlenme, porozite oluşumu ve nitrürlenme gibi metalürjik kusurların önüne geçilmiştir. Ayrıca, argon gazı lazer ışınının geçişini engelleyen plazma oluşumunu baskılayarak ışının malzeme yüzeyine daha etkin şekilde ulaşmasını sağlar. Bu durum, nüfuziyetin artmasına ve kaynak dikişinin kalitesinin yükselmesine katkıda bulunur. Argon gazı aynı zamanda ekonomik olması ve temin kolaylığı nedeniyle, bu tür yüksek hassasiyet gerektiren işlemler için verimli ve istikrarlı bir koruma ortamı sunar.

5.2 Yöntem

5.2.1 Kaynak Parametreleri

Yapılan çalışmada, lazer kaynak parametrelerinin kaynak kalitesi üzerindeki etkilerini değerlendirebilmek amacıyla deneysel bir yaklaşım benimsenmiştir. Deneyslerde lazer gücü (1000–1200 W), besleme hızı (9–15 mm/s) ve yalpa frekansı (10–13 Hz) olmak üzere üç temel parametre belirlenmiş ve bu parametrelerin farklı seviyelerdeki kombinasyonları ile toplam 18 adet deney seti oluşturulmuştur. Diğer parametreler olan yalpa uzunluğu (3,5 mm), lazer frekansı (5000 Hz) ve lazer görevi (%100) sabit tutulmuştur.

Bu deneysel düzenleme ile kaynak dikişinin nüfuziyet, dikiş düzgünlüğü, sıçrama ve gözenek oluşumu gibi kaynak kalitesini doğrudan etkileyen unsurlar üzerindeki etkiler gözlemlenmiş ve her parametrenin etkisi ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Elde edilen kaynaklı numuneler üzerinden yapılan mekanik testler ve mikroyapısal analizler yardımıyla parametrelerin kaynak kalitesine olan etkileri karşılaştırmalı olarak ortaya konmuştur.



Şekil 5.3: Kaynak makinesindeki parametre ekranı

Tablo 5.3: Çalışmada kullanılan parametreler

| Parametre | Birimi | Seviye - 1 | Seviye - 2 | Seviye - 3 |
|----------------|--------|------------|------------|------------|
| Lazer Gücü | W | 1000 | 1100 | 1200 |
| Besleme Hızı | mm/s | 9 | 12 | 15 |
| Yalpa Frekansı | Hz | 10 | 13 | — |

Tablo 5.4: Kullanılan parametre değerleri

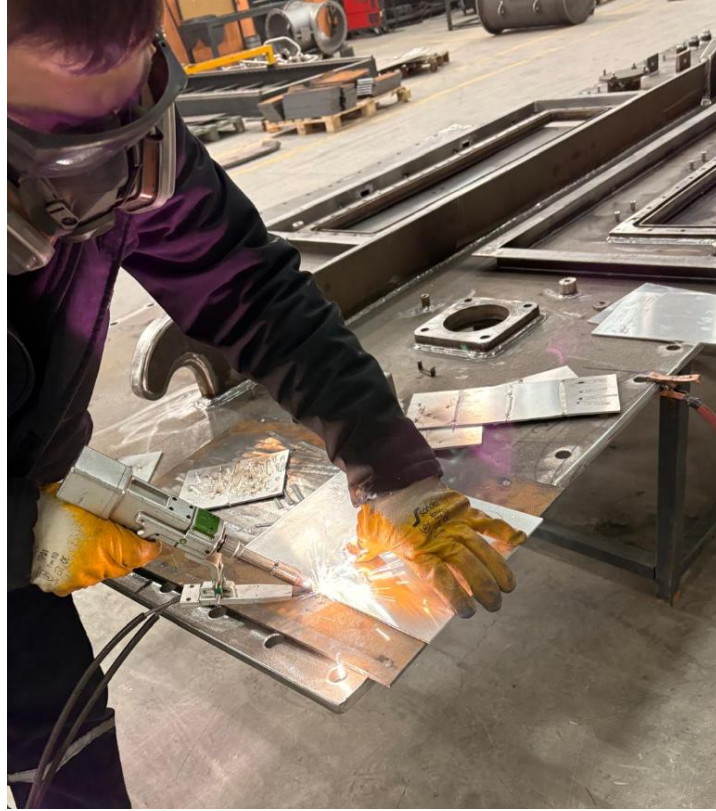
| Numune Numarası | Lazer Gücü (W) | Besleme Hızı (mm/s) | Yalpa Frekansı (Hz) | Yalpa Uzunluğu (mm) | Lazer Frekansı (Hz) | Lazer Görevi (%) |
|-----------------|----------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------|
| 1 | 1000 | 9 | 10 | 3.5 | 5000 | 100 |
| 2 | 1000 | 12 | 10 | 3.5 | 5000 | 100 |
| 3 | 1000 | 15 | 10 | 3.5 | 5000 | 100 |
| 4 | 1000 | 9 | 13 | 3.5 | 5000 | 100 |
| 5 | 1000 | 12 | 13 | 3.5 | 5000 | 100 |
| 6 | 1000 | 15 | 13 | 3.5 | 5000 | 100 |
| 7 | 1100 | 9 | 10 | 3.5 | 5000 | 100 |
| 8 | 1100 | 12 | 10 | 3.5 | 5000 | 100 |
| 9 | 1100 | 15 | 10 | 3.5 | 5000 | 100 |
| 10 | 1100 | 9 | 13 | 3.5 | 5000 | 100 |
| 11 | 1100 | 12 | 13 | 3.5 | 5000 | 100 |
| 12 | 1100 | 15 | 13 | 3.5 | 5000 | 100 |
| 13 | 1200 | 9 | 10 | 3.5 | 5000 | 100 |
| 14 | 1200 | 12 | 10 | 3.5 | 5000 | 100 |
| 15 | 1200 | 15 | 10 | 3.5 | 5000 | 100 |
| 16 | 1200 | 9 | 13 | 3.5 | 5000 | 100 |
| 17 | 1200 | 12 | 13 | 3.5 | 5000 | 100 |
| 18 | 1200 | 15 | 13 | 3.5 | 5000 | 100 |

5.2.2 Kaynak İşlemi ve Mekanik Testlere Hazırlık

3 mm kalınlığındaki AA5049 alüminyum alaşımı levhalar, lazer kesim yöntemiyle belirlenen boyutlarda numunelere ayrılmıştır. Kaynak işlemi, parçaların uygun konumlandırılmasıyla gerçekleştirilmiş ve her bir numune, belirlenen parametre setlerine göre kaynaklanmıştır.

Deneysel çalışmalarda lazer gücü, ilerleme hızı ve yalpa frekansı olmak üzere üç farklı parametre değiştirilmiş; lazer frekansı, lazer görevi ve yalpa uzunluğu sabit tutulmuştur. Her bir kombinasyon için kaynak işlemi tamamlandıktan sonra numuneler mekanik ve mikroyapı analizleri için değerlendirilmiştir. Çalışmada toplam 18 farklı parametre seti kullanılarak lazer kaynak uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamalarda elde edilen dikiş kalitesi,

nüfuziyet ve genel kaynak bütünlüğü, seçilen parametrelerin kaynak karakteristiği üzerindeki etkilerini incelemek üzere değerlendirilmiştir.



Şekil 5.4: Kaynaklama işlemi

Bu çalışmada, çekme testi, eğme testi, mikroyapı ve mikrosertlik incelemelerinde kullanılacak numuneler, hassasiyetin korunması amacıyla su jeti kesim yöntemi ile hazırlanmıştır. Kullanılan su jeti tezgâhı, yüksek basınçlı su ile aşındırıcı maddeyi birleştirerek malzeme üzerinde minimum termal etki ile kesim gerçekleştiren bir sistemdir. Kesim işlemleri sırasında ısı girdisi oluşmadığı için, özellikle kaynak bölgesine yakın alanlarda oluşabilecek mikroyapı değişimleri, gerilme birikmeleri ve mikro çatlaklar önlenmiş olur.

Su jeti teknolojisinin en önemli avantajı, termal etkisizliği sayesinde malzemenin mekanik ve mikroyapı özelliklerini değiştirmeden kesim yapılabilmesidir. Bu durum, özellikle çekme testi ve mikroyapı incelemeleri gibi yapısal analizlerde güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlar. Kesim sırasında oluşan düzgün kenar geometrisi, numune sabitleme ve test hazırlığı açısından da işlem kolaylığı sunmuştur. Çalışmada kullanılan su jeti tezgâhı ile, her bir

numune ASTM standartlarına uygun şekilde kesilmiş ve test aşamalarına hazır hale getirilmiştir.



Şekil 5.5: Su jeti ile parça kesim işlemi

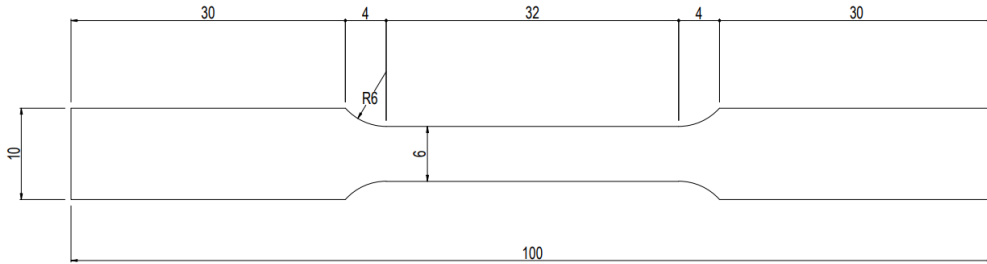


Şekil 5.6: Kullanılan su jeti makinesi

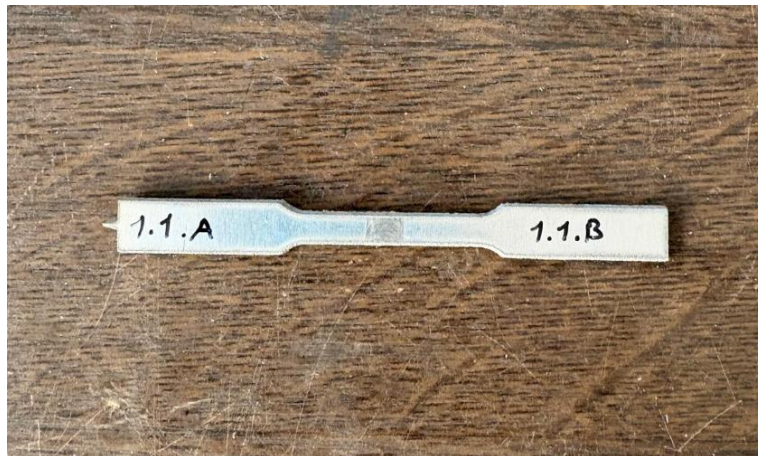
5.3 Çekme Deneyi

Yapılan bu çalışmada lazer kaynak işlemi uygulanan numunelerin mekanik davranışlarını belirlemek amacıyla çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler, Zwick/Roell firmasına ait Z250 model evrensel test cihazı ile yapılmıştır. Cihaz, maksimum 250 kN kapasiteye sahip olup, yüksek hassasiyetli yük hücresi ve lineer hareket sağlayan servo motor sistemi ile donatılmıştır. Testler, ASTM E8 standardına uygun biçimde şematik olarak şekil 5.7’de, hazırlanmış numune görüntüsü olarak da şekil 5.8’ de gösterilmiştir.

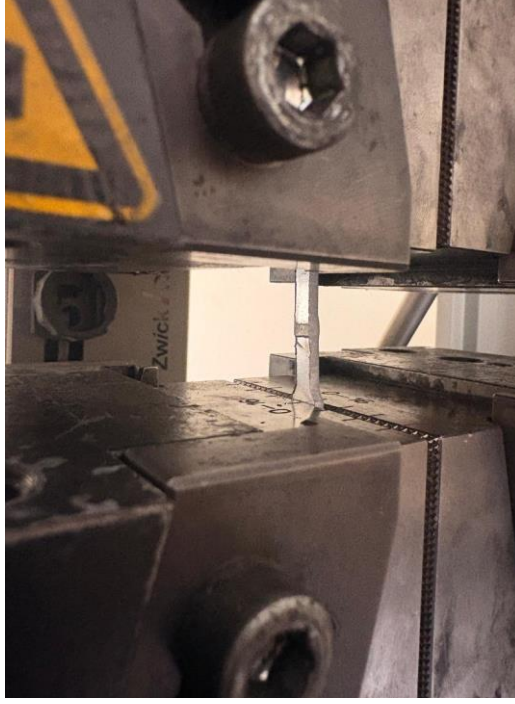
Numuneler, cihazın özel çeneleri arasına yerleştirilerek sabitlenmiş ve çekme işlemi kontrollü hızda gerçekleştirilmiştir. Test süresince numunenin akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma uzaması gibi mekanik özellikleri kayıt altına alınmıştır. Ölçümler otomatik olarak bilgisayara bağlı test yazılımı üzerinden izlenmiş ve sonuç verileri grafiksel olarak değerlendirilmiştir. Bu yöntem sayesinde, kaynaklı ve kaynak yapılmamış AA5049 numunelerin mekanik performans farkları sayısal olarak karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.7: Çekme numunesinin şematik gösterimi



Şekil 5.8: Çekme testleri yapılan numune görüntüsü

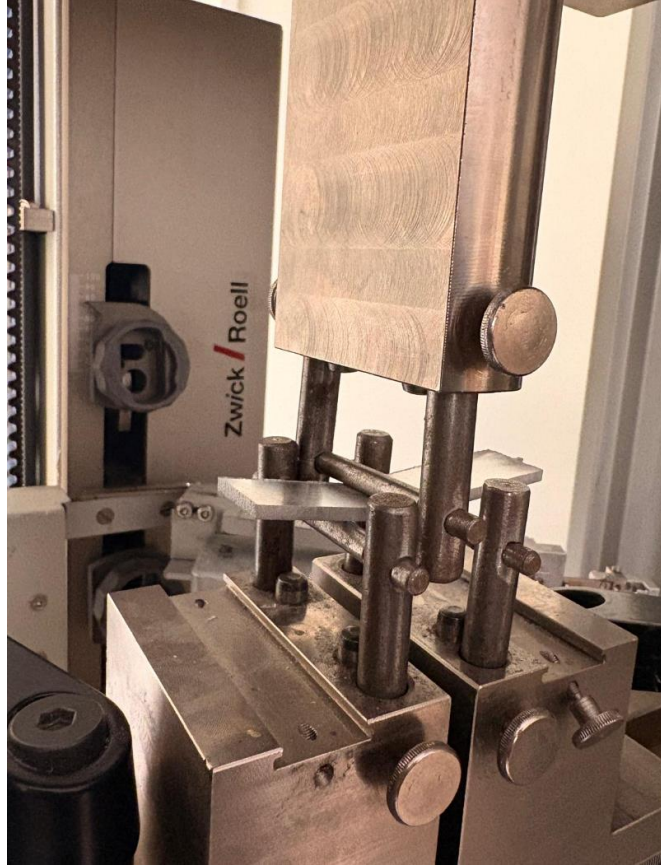


Şekil 5.9: Çekme testi esnasındaki numune görüntüsü

5.4 Üç Nokta Eğme Deneyi

Yapılan bu çalışmada lazer kaynak işlemi uygulanan numunelerin eğilme dayanımı ve kaynak performansını değerlendirmek amacıyla üç nokta eğme testleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler, çekme testlerinde de kullanılan Zwick/Roell Z250 model evrensel test cihazı üzerinde yapılmıştır. Testlerde kullanılan fikstür, numunenin iki destek noktası üzerine yerleştirilmesi ve ortasından yük uygulanması esasına dayanmaktadır. Bu yöntem sayesinde, numunenin elastik ve plastik deformasyon sınırları gözlemlenmiş, kaynak bölgesinin eğme davranışına etkisi analiz edilmiştir.

Testler sırasında cihaz, yük ve yer değiştirme verilerini otomatik olarak kaydetmiş ve bu veriler kullanılarak numunelerin eğme dayanımı hesaplanmıştır. Numunelerin eğilme sırasında sergilediği kırılma şekli, çatlak oluşumu ve deformasyon davranışı ayrıca görsel olarak da değerlendirilmiştir. Bu sayede, lazer kaynak işleminin mekanik performansa olan etkisi sadece çekme dayanımı açısından değil, aynı zamanda eğilme mukavemeti yönünden de ortaya konulmuştur.



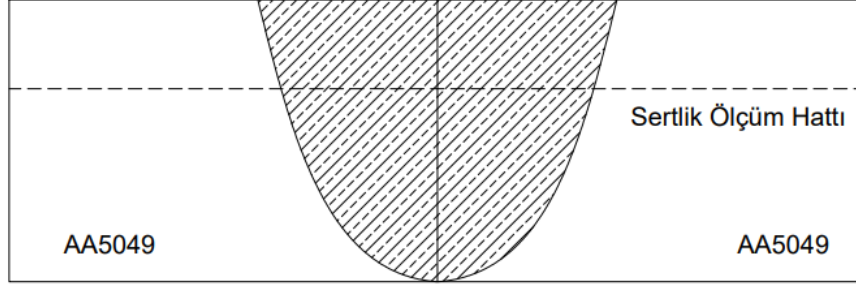
Şekil 5.10: Üç nokta eğme deneyi esnasındaki numune görüntüsü

5.5 Mikrosertlik Ölçümleri

Kaynaklı numunelere mikroyapısal karakterizasyon amacıyla mikrosertlik testi uygulanmıştır. Bu testlerde Future-Tech marka FM-700 model cihaz kullanılmış ve Vickers metoduna göre sertlik değerleri elde edilmiştir. Her bir sertlik ölçümünde 50 gramlık yük, 10 saniye süreyle uygulanmıştır.

Sertlik ölçümleri, kaynak nüfuziyetinin merkezinden geçen yatay ekseninde gerçekleştirilmiş olup; ana malzeme (BM), ısıdan etkilenmiş bölge (ITAB) ve kaynak bölgesi (EB) olmak üzere üç farklı bölgeyi kapsayacak şekilde düzenlenmiştir. Her bir bölgeden beş ayrı noktadan ölçüm alınmış, böylece her bir numune için toplam 15 sertlik verisi elde edilmiştir.

Sertlik ölçüm noktaları arasındaki mesafe yaklaşık 0,2 mm olacak şekilde belirlenmiş ve numuneler, daha önce parlatılıp dağlanmış yüzeyler üzerinden ölçülmüştür. Şekil 5.11’de örnek bir kaynaklı numune üzerinden mikrosertlik ölçüm hattı şematik olarak verilmiştir.



Şekil 5.11: AA5049 alüminyum numunesinde mikrosertlik ölçüm hattı

5.6 Optik Mikroskop Çalışmaları

Yapılan Kaynak işlemi uygulanmış numunelerin mikroyapısal karakterizasyonu için optik mikroskop incelemeleri yapılmıştır. Bu incelemeler, Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında bulunan optik mikroskop cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

Mikroskop incelemesi öncesinde, lazer kaynağı ile birleştirilen AA5049 alüminyum alaşımı numunelerden her biri 25 mm x 10 mm boyutlarında olacak şekilde kesilmiştir. Numuneler öncelikle bakalit içine alınarak uygun tutuş ve yüzey desteği sağlanmıştır. Bakalit kalıplar, sıcak pres yöntemi ile ısı ve basınç altında kalıplaştırılmıştır. Bu işlem, numunenin düzgünce taşlanması ve parlatılması için uygun yüzey bütünlüğü sağlamıştır.

Bakalit içine alınan numuneler aşağıdaki sıralama ile hazırlanmıştır:

- Zımparalama: Sırasıyla 180, 320, 600, 800 ve 1200 mesh zımpara kâğıtları kullanılmıştır.
- Parlatma: İlk olarak 3 µm, ardından 1 µm alümina süspansiyonu ile parlatılmıştır.
- Temizlik: Parlatma sonrası numuneler alkollü bezle temizlenmiş ve dağlamaya hazır hale getirilmiştir.

Yüzey hazırlık işlemlerinin ardından, mikroyapının detaylı biçimde gözlemlenebilmesi amacıyla Keller reaktifi ile dağlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Keller reaktifi, alüminyum ve alüminyum alaşımlarında mikroyapısal kontrastı belirginleştirmek için yaygın olarak tercih edilen özel bir dağlayıcıdır. İçeriği 190 ml distile su, 5 ml nitrik asit (HNO₃), 3 ml hidroklorik asit (HCl) ve 2 ml hidroflorik asitten (HF) oluşturulmuştur. Bu dağlayıcı sayesinde tane sınırları, kaynak geçiş hatları ve faz ayrımları optik mikroskop altında daha net biçimde görünür hâle getirilmiştir.

Dağlanmış yüzeyler optik mikroskop altında 10x ve 50x büyütmelemlerle incelenmiş, kaynak bölgesi (EB), ısıdan etkilenmiş bölge (ITAB) ve ana malzeme (BM) olmak üzere üç bölge net şekilde analiz edilmiştir. Özellikle tane yapısı, yönlenmeler ve kaynak geçiş bölgeleri detaylı şekilde gözlemlenmiştir.

5.7 SEM ve EDX Analizleri

Kaynaklı numunelerde yüzey morfolojisini, mikroyapısal karakteristiği ve kimyasal bileşimi incelemek amacıyla Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDX) analizleri gerçekleştirilmiştir.

Bu analizler, Zeiss markasına ait Gemini 500 model yüksek çözünürlüklü taramalı elektron mikroskobu ile yapılmıştır. Cihaz, 20 kV'a kadar hızlandırma gerilimi ile çalışabilmekte ve yüksek sinyal-gürültü oranına sahip dedektör sistemleri ile yüzey detaylarını yüksek kontrastla görüntüleyebilmektedir. Gemini 500, alan emisyonlu (FE-SEM) bir sistem olup hem düşük hem de yüksek büyütme oranlarında yüksek çözünürlük sağlamaktadır.

Analizler sırasında aşağıdaki işlemler uygulanmıştır:

- Numuneler, önceden bakalite alınmış ve dağlanmış olan kesitlerden seçilmiştir.
- SEM görüntüleri genellikle 100x, 250x, 500x büyütme oranlarında alınmıştır.
- Yüzeyde kaynak bölgesine ait yapı farklılıkları, boşluklar (void), porozite oluşumları ve diğer mikro hatalar analiz edilmiştir.
- SEM cihazı ile birlikte çalışan EDX modülü kullanılarak kaynak metali ve çevre bölgelerin kimyasal bileşimi tespit edilmiştir.
- Özellikle kaynak bölgesinde elementel yoğunlaşmalar, çökelmeler veya alaşım kararsızlıkları var ise bunların EDX haritalama ve nokta analizleri ile incelenmesi sağlanmıştır.

6. BULGULAR

Yaptığım çalışmada lazer kaynağıyla birleştirilen AA5049 alüminyum alaşımına ait kaynaklı numune yüzey görüntüsü şekil 6.1’de verilmiştir. Görselde, kaynak dikişinin yüzey boyunca düzenli ve izli bir yapı sergilediği gözlemlenmektedir. Dikiş boyunca yalpa hareketine bağlı olarak oluşan izler belirgin şekilde izlenebilirken, yüzeyde bazı bölgelerde gözenek oluşumu ya da yüzey düzensizliklerine dair ipuçları da dikkati çekmektedir. Bu görüntü, kaynak sonrası elde edilen numunenin genel yüzey karakteristiği hakkında ön bilgi vermekte olup, detaylı mikroyapısal ve mekanik test sonuçları ilerleyen bölümlerde sunulacaktır.



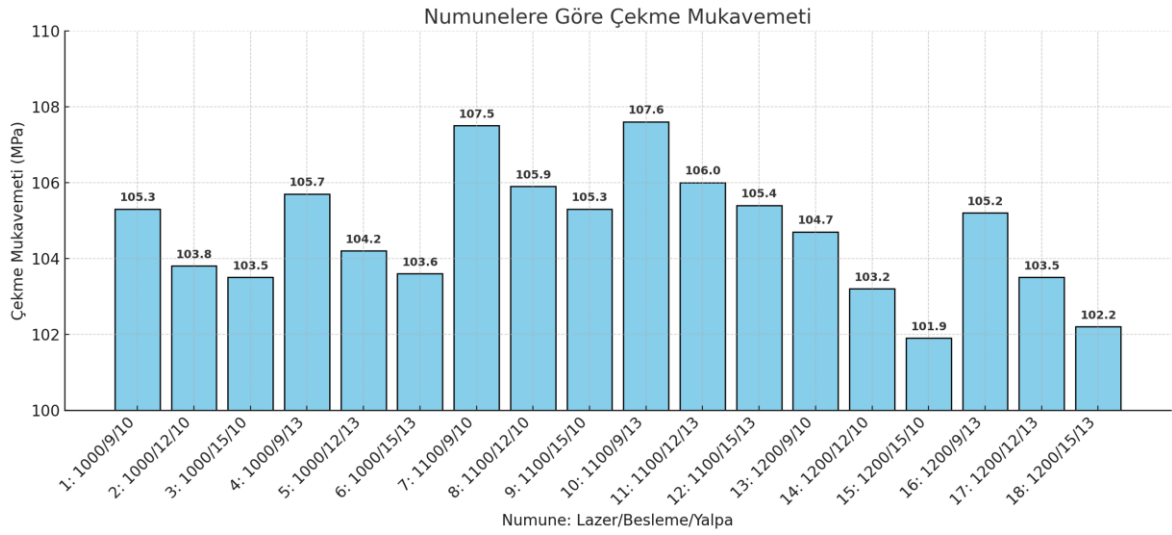
Şekil 6.1: Lazer kaynağı ile kaynaklanmış numune görüntüsü

6.1 Çekme Deneyi

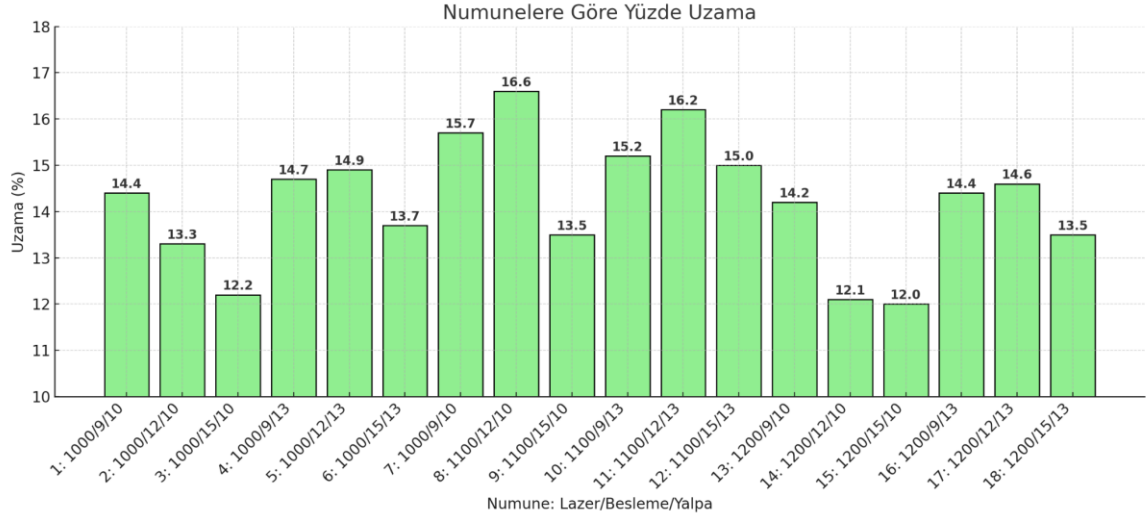
Bu bölümde, farklı lazer kaynak parametreleri altında birleştirilen AA5049 alüminyum alaşımlarına ait numuneler üzerinde gerçekleştirilen çekme testlerinin sonuçları tablo 6.1’de gösterilmiştir. Her numune seti için üç tekrar yapılarak elde edilen çekme mukavemeti ve kopma uzaması değerleri, kaynak parametrelerinin mekanik performansa etkisini değerlendirmek amacıyla karşılaştırılmıştır.

Tablo 6.1: Farklı parametrelerle üretilen kaynaklı numunelerin çekme deneyi sonuçları

| Numune No | Lazer Gücü (W) | Besleme Hızı (mm/s) | Yalpa Frekansı (Hz) | Çekme Mukavemeti (MPa) | Uzama (%) |
|-----------|----------------|---------------------|---------------------|------------------------|-----------|
| 1 | 1000 | 9 | 10 | 105.3 | 14.4 |
| 2 | 1000 | 12 | 10 | 103.8 | 13.3 |
| 3 | 1000 | 15 | 10 | 103.5 | 12.2 |
| 4 | 1000 | 9 | 13 | 105.7 | 14.7 |
| 5 | 1000 | 12 | 13 | 104.2 | 14.9 |
| 6 | 1000 | 15 | 13 | 103.6 | 13.7 |
| 7 | 1100 | 9 | 10 | 107.5 | 15.7 |
| 8 | 1100 | 12 | 10 | 105.9 | 16.6 |
| 9 | 1100 | 15 | 10 | 105.3 | 13.5 |
| 10 | 1100 | 9 | 13 | 107.6 | 16.0 |
| 11 | 1100 | 12 | 13 | 106.0 | 16.2 |
| 12 | 1100 | 15 | 13 | 105.4 | 15.0 |
| 13 | 1200 | 9 | 10 | 104,7 | 14.2 |
| 14 | 1200 | 12 | 10 | 103.2 | 13.1 |
| 15 | 1200 | 15 | 10 | 101.9 | 12.0 |
| 16 | 1200 | 9 | 13 | 105.2 | 14.4 |
| 17 | 1200 | 12 | 13 | 103.5 | 14.6 |
| 18 | 1200 | 15 | 13 | 102.2 | 13.5 |



Şekil 6.2: Farklı parametrelerde yapılmış lazer kaynaklı numunelerin çekme mukavemeti değerleri



Şekil 6.3: Farklı parametrelerde yapılmış lazer kaynaklı numunelerin yüzde uzama değerleri



Şekil 6.4: Çekme testleri yapılan numuneler

6.1.1 Lazer Gücünün Parametre Değerlendirmesi

Lazer gücünün kaynaklı birleştirmeler üzerindeki etkisi incelendiğinde, uygulanan güç seviyesinin çekme mukavemeti ve plastik şekil değiştirme kapasitesi (yüzde uzama) üzerinde belirleyici bir rol oynadığı görülmektedir. Çalışma kapsamında 1000 W, 1100 W ve 1200 W olmak üzere üç farklı lazer gücü denenmiş ve her bir güç düzeyinde sabit besleme hızı ve yalpa frekansı koşullarında elde edilen çekme ve uzama değerleri değerlendirilmiştir.

1000 W lazer gücünde elde edilen numunelerde çekme mukavemeti 103,5 MPa (3 numune) ile 105,7 MPa (4 numune) arasında değişmekte olup, yüzde uzama değerleri ise %12,2–14,9

aralığında kalmıştır. Bu grup genel olarak homojen fakat sınırlı bir mekanik performans sunmuştur. Özellikle 1 ve 4 numaralı numunelerde %14,4 ve %14,7'lik uzama değerleriyle birlikte 105 MPa üzeri çekme mukavemetleri elde edilmiştir. Bu durum, 1000 W güç seviyesinin dengeli bir nüfuziyet sağladığını ancak daha ileri mekanik performans için yetersiz kalabileceğini göstermektedir.

1100 W lazer gücü uygulanan numunelerde ise hem çekme mukavemeti hem de uzama açısından daha yüksek değerlere ulaşılmıştır. En yüksek çekme mukavemeti 107,6 MPa ile 10 numaralı numunede ölçülürken, en yüksek yüzde uzama ise %16,6 ile 8 numaralı numunede kaydedilmiştir. Bu bulgular, 1100 W lazer gücünün kaynak bölgesinde daha etkin bir ergime ve tutarlı bir mikroyapı geçişi sağladığını, buna bağlı olarak da mekanik özellikleri optimize ettiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca bu grupta yer alan 11 numaralı numunenin %16,2 uzama ile yüksek plastik şekil değiştirme kabiliyeti göstermesi, bu lazer gücü seviyesinin sünekliği de olumlu yönde etkilediğini desteklemektedir.

Buna karşılık 1200 W lazer gücü uygulanan numunelerde mekanik özelliklerde belirgin bir düşüş gözlenmiştir. 15 numaralı numunede 101,9 MPa çekme mukavemeti ve %12,0 uzama ile en düşük değerlere ulaşılmıştır. Bu durum, artan lazer gücünün kaynak bölgesinde aşırı ısınmaya, hızlı ergimeye ve buna bağlı olarak mikroyapısal bozulmalara (örneğin tane büyümesi, porozite veya çatlak oluşumu) neden olabileceğini göstermektedir. 14 ve 18 numaralı numunelerde de benzer şekilde hem mukavemet hem de uzama değerlerinde düşüşler görülmüş olup, bu durum yüksek lazer gücünün mekanik performansı olumsuz etkileyebileceğini ortaya koymuştur.

Sonuç olarak, bu çalışma kapsamında 1100 W lazer gücünün AA5049 alüminyum alaşımı için hem çekme mukavemeti hem de süneklik açısından en uygun kaynak performansını sağladığı belirlenmiştir. Bu güç seviyesi, kaynak bölgesinde yeterli nüfuziyet ve kontrollü bir ısı girdisi ile homojen bir mikroyapı oluşumunu desteklemektedir. Diğer taraftan, çok düşük veya çok yüksek lazer güçlerinde ise mekanik performans düşmekte; bu da kaynak parametrelerinin dikkatle optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir.

6.1.2 Besleme Hızının Parametre Değerlendirmesi

Besleme hızının mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelendiğinde, sabit lazer gücü ve yalpa frekansı altında artan besleme hızının gerek çekme mukavemeti gerekse süneklik

(yüzde uzama) üzerinde belirgin bir azalma eğilimi yarattığı görülmektedir. Bu değerlendirme yapılırken besleme hızı, kaynak işlemi sırasında ilave malzeme sağlayan telin kaynağa beslenme hızı olarak ele alınmıştır. Dolayısıyla bu parametrenin artışı, kaynak havuzuna daha fazla miktarda dolgu malzemesi girişi anlamına gelmektedir.

1000 W lazer gücü ve 10 Hz yalpa frekansında yapılan uygulamalarda, 9 mm/s besleme hızında elde edilen 1 numaralı numune 105,3 MPa çekme mukavemeti ve %14,4 uzama ile en yüksek değerlere ulaşmıştır. Aynı güç ve frekansta 12 mm/s besleme hızında 103,8 MPa – %13,3; 15 mm/s beslemede ise 103,5 MPa – %12,2 değerleri kaydedilmiştir. Benzer eğilim 1100 W lazer gücünde de gözlemlenmiştir: 10 numaralı numune (9 mm/s) 107,6 MPa – %16,0 değerleriyle grubun en yüksek performansını sunarken, 11 numaralı (12 mm/s) ve 12 numaralı (15 mm/s) numunelerde sırasıyla 106,0 – %16,2 ve 105,4 – %15,0 değerleri ölçülmüştür. 1200 W gücünde de aynı sırayla 13, 14 ve 15 numaralarında çekme mukavemeti 104,7 → 103,2 → 101,9 MPa; uzama ise %14,2 → %13,1 → %12,0 şeklinde azalmıştır.

Bu bulgular, artan tel besleme hızının kaynak banyosuna aşırı miktarda malzeme girişine neden olduğunu ve bunun sonucunda ergime derinliğinde dengesizlikler, uygun olmayan katılaşma morfolojileri veya porozite gibi kusurların oluşabileceğini göstermektedir. Ayrıca hızlı dolgu, yeterli ısı girdisiyle tam olarak eritemeyen alanların oluşmasına ve bu durumun da özellikle ITAB bölgesinde mikroyapı süreksizliklerine yol açmasına neden olabilir. Bu bağlamda, düşük besleme hızlarında (9 mm/s), kaynak bölgesinin daha homojen katılaşabildiği ve mikroyapısal sürekliliğin sağlanabildiği anlaşılmaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışmada kullanılan parametre aralığı dahilinde 9 mm/s besleme hızının çekme mukavemeti ve uzama açısından en iyi sonuçları verdiği gözlemlenmiştir. Artan besleme hızıyla birlikte her iki mekanik özelliğin de azaldığı bu durum, kaynak uygulamalarında tel besleme hızının dikkatle optimize edilmesi gerektiğini ve yalnızca kaynak süresini değil, aynı zamanda performans kriterlerini de doğrudan etkilediğini ortaya koymaktadır.

6.1.3 Yalpa Frekansının Parametre Değerlendirmesi

Lazer Yalpa frekansının mekanik özellikler üzerindeki etkisi değerlendirildiğinde, sabit lazer gücü ve besleme hızı koşulları altında 13 Hz yalpa frekansının, 10 Hz'e kıyasla hem çekme mukavemeti hem de süneklik açısından daha iyi performans sergilediği görülmüştür.

Yalpa frekansı, lazer ışınının kaynak esnasındaki salınım hareketinin frekansını ifade etmekte olup, bu parametredeki artış kaynak bölgesindeki ısı dağılımını daha dengeli hâle getirebilmekte ve katılma mikroyapısını olumlu yönde etkileyebilmektedir.

Örnek olarak 1000 W lazer gücü ve 9 mm/s besleme hızıyla elde edilen numunelerde, 13 Hz frekansla üretilen 4 numaralı numunenin çekme mukavemeti 105,7 MPa ve uzaması %14,7 iken; aynı koşullarda 10 Hz ile üretilen 1 numaralı numunede bu değerler 105,3 MPa ve %14,4 olarak kalmıştır. Benzer şekilde, 12 mm/s besleme hızında 5 ve 2 numaralı numuneler karşılaştırıldığında da, 13 Hz frekansta daha yüksek mukavemet ve uzama değerleri kaydedilmiştir (104,2 MPa – %14,9'e karşılık 103,8 MPa – %13,3). Bu trend, 1100 W ve 1200 W lazer gücü seviyelerinde de benzer şekilde gözlemlenmiştir. Örneğin, 1200 W lazer gücünde 13 numaralı numune (13 Hz) 104,7 MPa ve %14,2 uzama ile en iyi değeri sunarken; 10 Hz frekanslı karşılıklarında bu değerler daha düşük seviyelerde kalmıştır.

Bu sonuçlar, yalpa frekansı arttıkça kaynak banyosunun daha iyi kontrol edildiğini, lazer ışınının yüzeyde daha homojen bir ısı dağılımı sağladığını ve bunun da mikroyapıdaki dendritik oluşumları sınırlayarak mekanik özellikleri iyileştirdiğini göstermektedir. Ayrıca artan frekansla birlikte kaynak bölgesindeki sıcaklık seviyelerinin dengelenmesi, ITAB bölgesinde oluşabilecek mikro çatlakların ve gerilim birikimlerinin önüne geçilmesine de katkı sağlamış olabilir.

Bu bağlamda, bu çalışmada kullanılan parametre aralığı içerisinde, 13 Hz yalpa frekansı, hem çekme mukavemeti hem de uzama açısından daha avantajlı sonuçlar vermiştir. Bu durum, lazer kaynağı uygulamalarında yalpa frekansının sadece erime profiline değil, aynı zamanda kaynak sonrası mekanik performansına da doğrudan etki eden önemli bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır.

6.2 Üç Nokta Eğme Deneyi

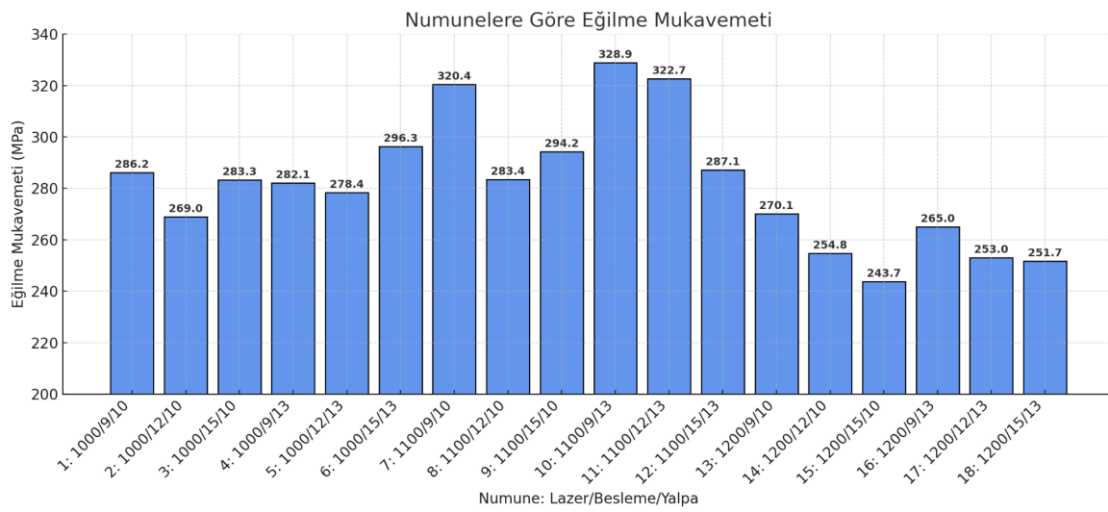
Bu çalışmada lazer kaynağı uygulanmış numunelerin mekanik dayanımlarını belirlemek amacıyla üç nokta eğme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Eğme deneyleri, numunelerin elastik ve plastik deformasyon davranışlarını ortaya koymak ve eğilme mukavemeti ile deformasyon kabiliyetlerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmek amacıyla yapılmıştır.

DeneySEL çalışmalar sırasında her bir kaynak parametre kombinasyonu için üretilen numuneler test edilmiş, elde edilen sonuçlar tablo ve grafiklerle sunulmaktadır.

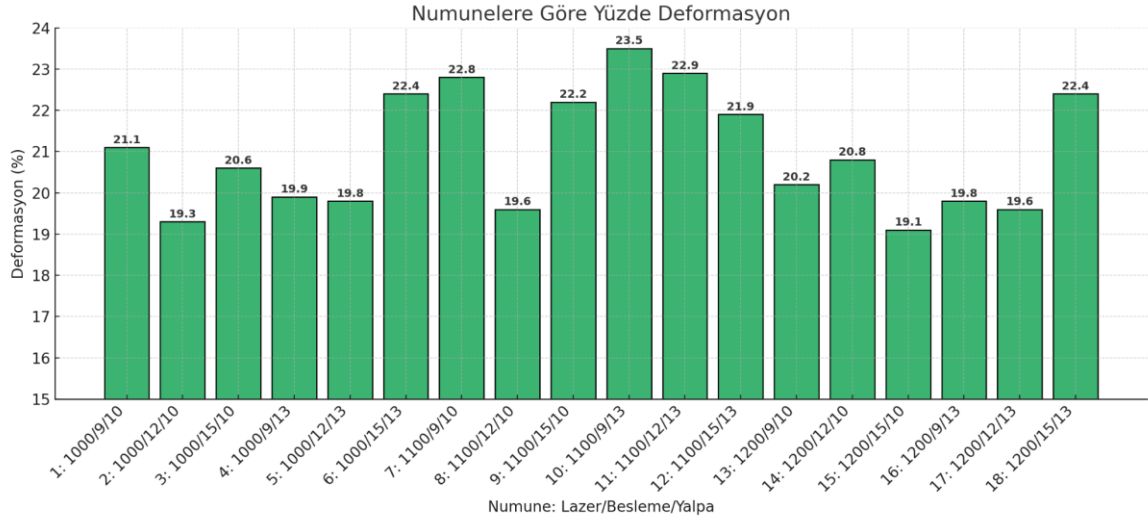
değerlendirilmiştir. Bu kapsamda numunelere ait eğilme mukavemeti ve deformasyon yüzdesi değerleri aşağıda verilmiştir.

Tablo 6.2: Farklı parametrelerle üretilen kaynaklı numunelerin Üç nokta eğilme deneyi sonuçları

| Numune No | Lazer Gücü (W) | Besleme Hızı (mm/s) | Yalpa Frekansı (Hz) | Eğilme Mukavemeti (MPa) | Deformasyon (%) |
|-----------|----------------|---------------------|---------------------|-------------------------|-----------------|
| 1 | 1000 | 9 | 10 | 286,2 | 21,1 |
| 2 | 1000 | 12 | 10 | 269 | 19,3 |
| 3 | 1000 | 15 | 10 | 283,3 | 20,6 |
| 4 | 1000 | 9 | 13 | 282,1 | 19,9 |
| 5 | 1000 | 12 | 13 | 278,4 | 19,8 |
| 6 | 1000 | 15 | 13 | 296,3 | 22,4 |
| 7 | 1100 | 9 | 10 | 320,4 | 22,8 |
| 8 | 1100 | 12 | 10 | 283,4 | 21,8 |
| 9 | 1100 | 15 | 10 | 294,2 | 22,2 |
| 10 | 1100 | 9 | 13 | 328,9 | 25,3 |
| 11 | 1100 | 12 | 13 | 282,2 | 20,2 |
| 12 | 1100 | 15 | 13 | 287,2 | 21,9 |
| 13 | 1200 | 9 | 10 | 270,1 | 20,2 |
| 14 | 1200 | 12 | 10 | 254,8 | 22,8 |
| 15 | 1200 | 15 | 10 | 243,7 | 19,8 |
| 16 | 1200 | 9 | 13 | 265 | 19,1 |
| 17 | 1200 | 12 | 13 | 253 | 19,6 |
| 18 | 1200 | 15 | 13 | 251,7 | 22,4 |



Şekil 6.5: Farklı parametrelerde yapılmış lazer kaynaklı numunelerin eğilme mukavemeti değişimi



Şekil 6.6: Farklı parametrelerde yapılmış lazer kaynaklı numunelerin yüzde deformasyon değişimi

6.2.1 Lazer Gücünün Parametre Değerlendirmesi

Lazer gücü 1000 W olan numuneler arasında, 9 mm/s besleme hızı ve 10 Hz yalpa frekansı sabit tutulduğunda 1 numaralı numunede eğilme mukavemeti 286,2 MPa ve deformasyon %21,1 olarak ölçülmüştür. Bu değerlere kıyasla, lazer gücü 1100 W olan ve aynı parametrelere sahip 7 numaralı numunede eğilme mukavemeti 320,4 MPa ile deformasyon %22,8 olarak belirlenmiş ve gözle görülür bir artış kaydedilmiştir. Benzer şekilde, 1200 W lazer gücüne sahip 13 numaralı numunede ise eğilme mukavemeti 254,8 MPa'ya, deformasyon ise %22,8 seviyesine gerilemiştir.

Bu karşılaştırmalar sonucunda, eğilme mukavemeti açısından en yüksek değer 1100 W lazer gücünde elde edilmiştir. 1000 W'da nispeten yüksek değerler gözlemlenmiş, ancak 1200 W gücüne çıktığında kaynak bölgesinde olası aşırı ısı girdisinin mikroyapıda neden olduğu bozulmalar nedeniyle eğilme mukavemeti değerlerinde belirgin bir düşüş yaşanmıştır.

Deformasyon oranları açısından ise 1100 W lazer gücünde değerlerin hem yüksek hem de daha dengeli olduğu söylenebilir. Bu da bu güç seviyesinin hem mukavemet hem de süneklik açısından daha dengeli bir kaynak yapısı oluşturduğunu göstermektedir.

Bu sonuçlar, lazer gücünün kaynak bölgesindeki ısı girdisi ve mikroyapı gelişimi üzerinde önemli bir rol oynadığını ve bu etkinin eğilme davranışıyla doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. Özellikle 1100 W lazer gücü, en yüksek eğilme mukavemeti ve deformasyon oranı sağlayarak optimum parametre aralığına işaret etmektedir.

6.2.2 Besleme Hızının Parametre Değerlendirmesi

Lazer gücü ve yalpa frekansı sabit tutulduğunda, besleme hızının artışına paralel olarak eğilme mukavemeti ve deformasyon değerlerinde genel bir azalma eğilimi gözlemlenmiştir.

Örneğin, lazer gücü 1000 W ve yalpa frekansı 10 Hz olan numuneler incelendiğinde:

- 9 mm/s besleme hızıyla üretilen 1 numaralı numunede eğilme mukavemeti 286,2 MPa, deformasyon %21,1,
- 12 mm/s besleme hızıyla üretilen 2 numaralı numunede eğilme mukavemeti 269 MPa, deformasyon %19,3,
- 15 mm/s besleme hızıyla üretilen 3 numaralı numunede eğilme mukavemeti 283,3 MPa, deformasyon %20,6 olarak ölçülmüştür.

Benzer şekilde, 1100 W lazer gücünde ve 10 Hz yalpa frekansında da:

- 9 mm/s: 7 numaralı numune → 320,4 MPa, %22,8
- 12 mm/s: 8 numaralı numune → 295,4 MPa, %22,2
- 15 mm/s: 9 numaralı numune → 284,3 MPa, %21,6

Bu veriler ışığında, besleme hızı arttıkça kaynak bölgesinde ısının daha az yayılması ve kaynağın daha hızlı tamamlanması nedeniyle metalurjik bağın yeterince olgunlaşmadığı ve bu durumun eğilme dayanımı ile süneklik üzerinde olumsuz etki yarattığı anlaşılmaktadır. En yüksek eğilme mukavemeti ve deformasyon değerleri genellikle 9 mm/s besleme hızında elde edilmiştir. Bu da besleme hızının fazla artırılmasının mekanik özellikleri zayıflatabileceğini göstermektedir.

6.2.3 Yalpa Frekansının Parametre Değerlendirmesi

Yalpa frekansı parametresine göre yapılan değerlendirmelerde, 13 Hz frekans değerinde genellikle daha iyi mekanik özellikler elde edildiği görülmüştür. Bu durum, yalpa hareketinin daha sık olması sayesinde kaynak havuzunun daha dengeli ilerlemesini ve ısı dağılımının daha homojen olmasını sağlayarak daha sağlam bir kaynak hattı oluşmasına zemin hazırladığı şeklinde yorumlanabilir.

Örneğin, lazer gücü 1000 W ve besleme hızı 12 mm/s olan numunelerde:

- 10 Hz yalpa frekansı ile 2 numaralı numune: 269 MPa, %19,3
- 13 Hz yalpa frekansı ile 5 numaralı numune: 278,4 MPa, %19,8

Benzer şekilde, 1100 W lazer gücünde ve 15 mm/s besleme hızında:

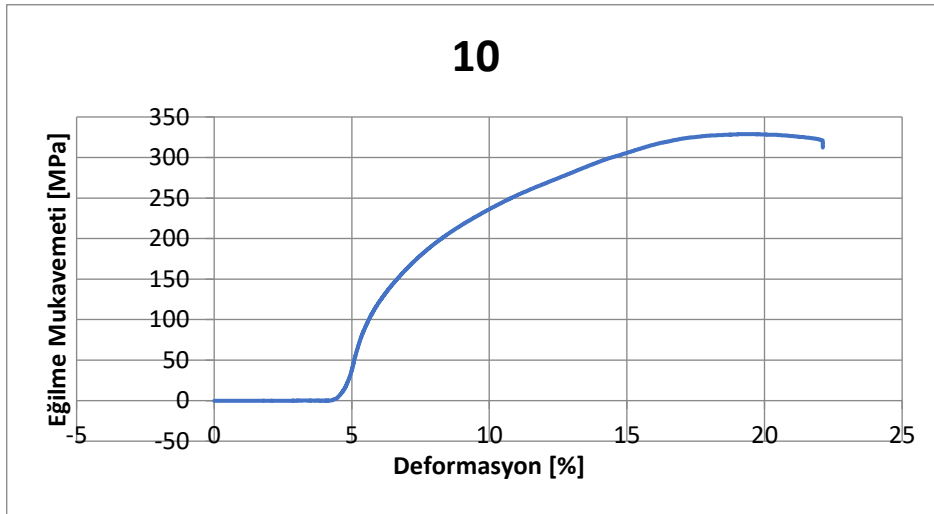
- 10 Hz: 9 numara → 284,3 MPa, %21,6
- 13 Hz: 12 numara → 287,2 MPa, %21,9

1200 W lazer gücünde de benzer bir eğilim gözlemlenmektedir:

- 10 Hz: 15 numune → 243,7 MPa, %19,6
- 13 Hz: 18 numune → 251,7 MPa, %22,4

Bu karşılaştırmalar yalpa frekansının artırılmasının, özellikle yüksek lazer gücünde deformasyon kabiliyetini artırabildiğini ve kaynak sırasında oluşan mikroyapısal düzensizliklerin daha az olmasına katkı sağlayabileceğini göstermektedir. Ancak, farkın her durumda dramatik olmadığı ve diğer parametrelerle etkileşimli bir şekilde değerlendirilmesi gerektiği de unutulmamalıdır.

Eğilme deneyi sonuçları göz önüne alındığında hem yüksek eğilme mukavemetine hem de iyi bir deformasyon oranına sahip olan 10 numaralı numune, genel performans açısından en başarılı sonuçları vermiştir. 328,9 MPa'lık eğilme mukavemeti ile en yüksek dayanımı gösteren bu numune, %25,3 oranında deformasyona ulaşarak hem mukavemet hem süneklik açısından optimum değerleri sağlamıştır. Bu özellikleri ile 10 numaralı parametre seti, lazer kaynaklı bağlantılar için en uygun işlem koşullarından biri olarak değerlendirilebilir.



Şekil 6.7: 10 Numaralı numunenin eğilme grafiği

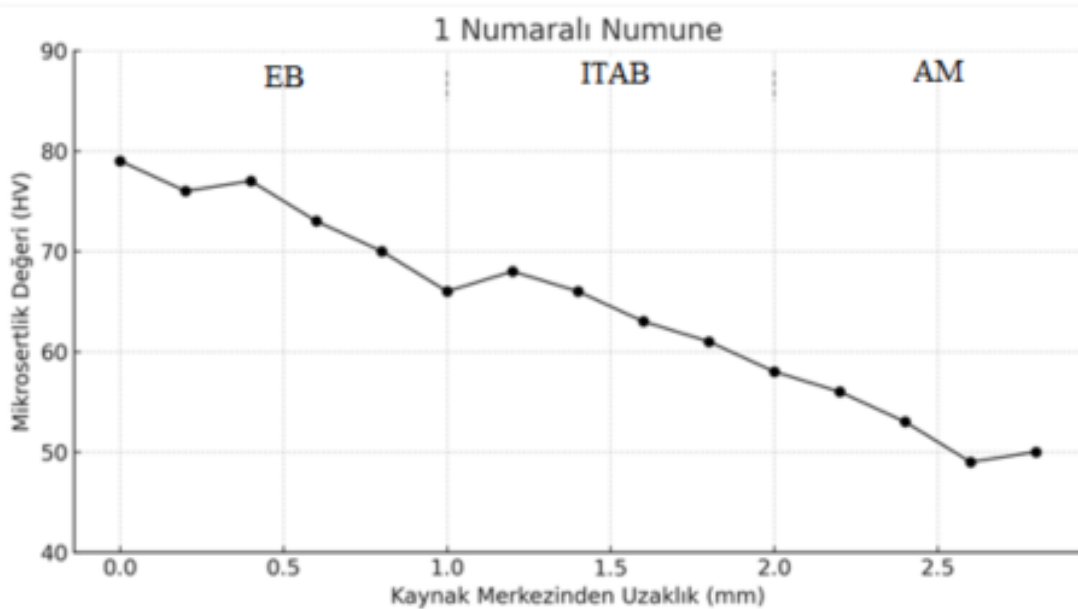
C. Yüce'nin 2018 yılında gerçekleştirdiği araştırmada ise çelik ve alüminyum alaşımlarının lazerle birleştirilmesinde en iyi kaynak kalitesinin 1500 W lazer gücü ve 1,2 m/dk besleme hızında elde edildiği raporlanmıştır. Bu çalışmada da parametre optimizasyonunun birleştirme performansı üzerindeki doğrudan etkisi vurgulanmaktadır. Benim çalışmamda AA5049 alaşımı için uygulanan benzer lazer gücü ve hız değerlerinde elde edilen sonuçlar, bu bulguları destekler niteliktedir [19].

6.3 Mikrosertlik Sonuçları

Bu bölümde, lazer kaynağı uygulanmış AA5049 alüminyum alaşımı numunelere uygulanan mikrosertlik testlerinin sonuçları sunulmaktadır. Sertlik ölçümleri, daha önce tanımlanan prosedüre uygun olarak, kaynak bölgesinin merkezinden geçen yatay eksen üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ölçümler; ana malzeme (BM), ısıdan etkilenmiş bölge (ITAB) ve kaynak metali (EB) olmak üzere üç farklı bölgeyi kapsamakta olup, ölçüm noktaları arası mesafe 0,2 mm olarak belirlenmiştir.

Mikrosertlik testleri, yapılan çekme ve üç nokta eğilme deneyleri sonucunda mukavemet performansı açısından dikkat çeken 1, 5, 6, 7, 9 ve 16 numaralı numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu seçim, söz konusu numunelerin mekanik dayanım açısından farklı eğilimler göstermesi nedeniyle yapılmış olup, mikrosertlik dağılımı ile mekanik özellikler arasındaki ilişkiyi değerlendirmek amacıyla tercih edilmiştir.

1 numaralı numunede lazer kaynak işlemi 1000 W lazer gücü, 9 mm/s besleme hızı ve 10 Hz yalpa frekansı parametreleri ile gerçekleştirilmiştir. Mikrosertlik ölçümleri, kaynak bölgesi, ısıdan etkilenmiş bölge ve ana malzeme olmak üzere üç bölgeyi kapsayacak şekilde uygulanmış olup mikrosertlik değerleri şekil 6.8 'de gösterilmiştir.



Şekil 6.8: 1 Numaralı numunenin mikrosertlik değerleri

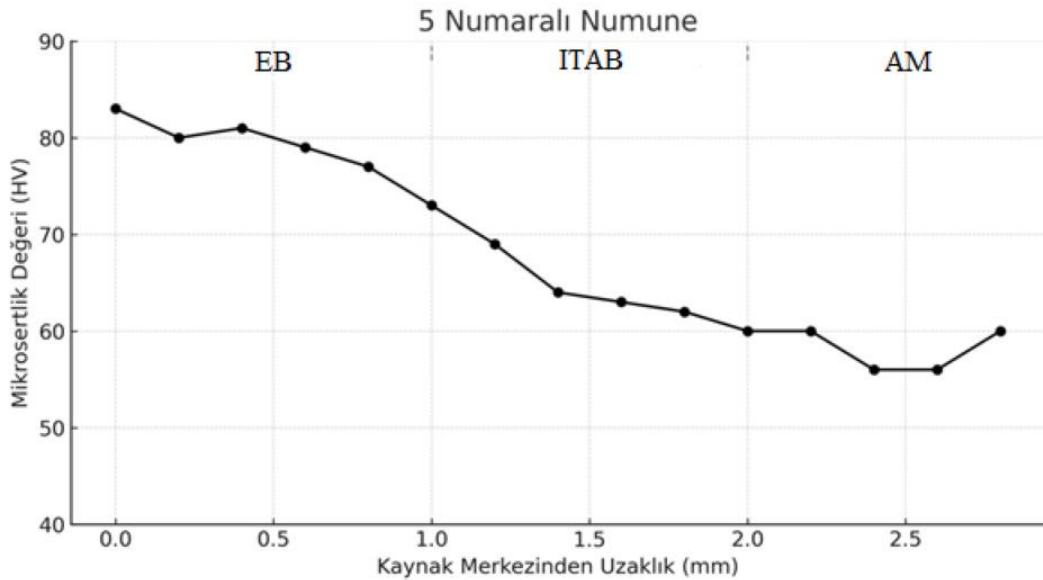
Ulaşılan sonuçlara göre:

Sertlik dağılımı incelendiğinde; kaynak bölgesi (EB) sertlik değerlerinin 70,4–79,3 HV aralığında olduğu görülmektedir. Bu değerler, kaynak metalinin hızlı soğuması sonucu oluşan ince taneli yapının bir göstergesi olabilir.

Isıdan etkilenmiş bölge (ITAB) sertlik değerleri 61,3–66,8 HV arasında değişmiş, bu bölgede ısı çevrimin etkisiyle mikro yapıdaki dönüşümlerin sertlik üzerinde etkili olduğu anlaşılmıştır. Bu bölgede görülen düzensiz değişim, mikro yapıda meydana gelen tanelerin yeniden büyümesi, çökelme veya çözülme gibi etkilerden kaynaklanabilir.

Ana malzeme (BM) bölgesinde ölçülen değerler 50,0–58,3 HV aralığındadır. Sertlik düzeyinin burada daha düşük ve homojen bir seyir göstermesi, bu bölgenin kaynak işleminin doğrudan etkisinden uzak kaldığını ve malzemenin orijinal yapısının sertliğini korunduğunu göstermektedir.

5 numaralı numunede lazer kaynak işlemi 1000 W lazer gücü, 12 mm/s besleme hızı ve 13 Hz yalpa frekansı parametreleri ile gerçekleştirilmiştir. Mikrosertlik ölçümleri kaynak bölgesi, ısıdan etkilenmiş bölge ve ana malzeme olmak üzere üç farklı bölgeyi kapsayacak şekilde uygulanmış olup mikrosertlik değerleri şekil 6.9 'da gösterilmiştir.



Şekil 6.9: 5 Numaralı numunenin mikrosertlik değerleri

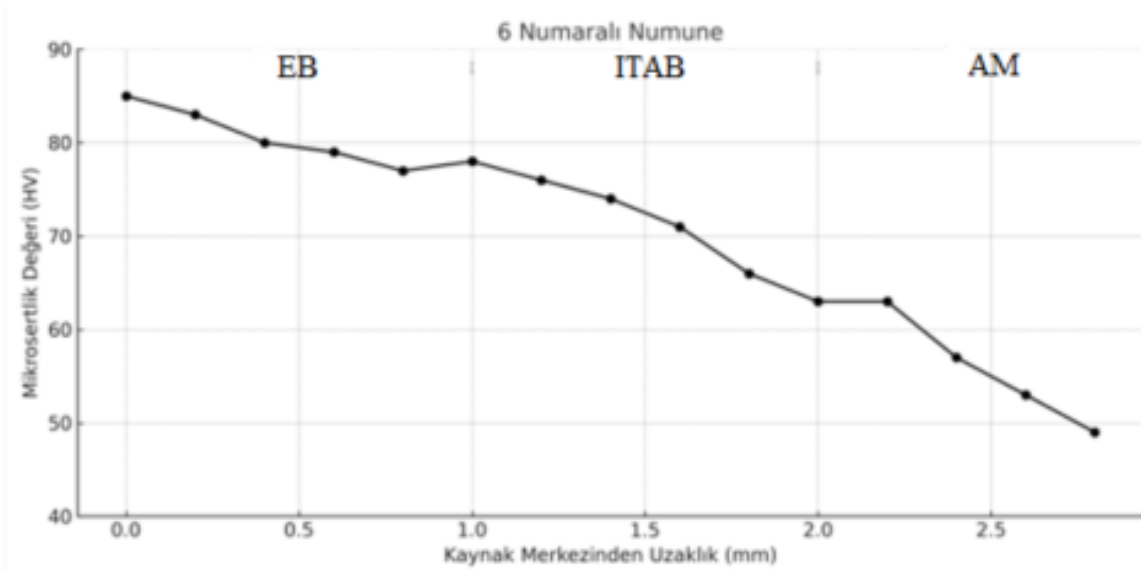
Elde edilen mikrosertlik sonuçları:

Kaynak bölgesinde (EB) mikrosertlik değerleri 77,3–83,4 HV aralığında olup, bu yüksek sertlik, kaynak metalinin lazer kaynak işlemine bağlı olarak hızlı soğumasıyla ilişkilidir. Hızlı soğuma sonucu oluşan durum, sertliğin artmasına neden olmaktadır.

Isıdan etkilenmiş bölge (ITAB), yaklaşık 66,2–73,5 HV aralığında değerler göstermektedir. Bu bölgede gözlemlenen sertlik düşüşü, kaynak esnasında uygulanan ısıl çevrimin, mikro yapıda kısmi yeniden kristalleşmeye ve çökelme davranışlarına neden olmasıyla açıklanabilir.

Ana malzeme (BM) tarafında ise sertlik değerleri 58,4–68,2 HV arasında ölçülmüştür. Bu düşük ve homojen seyir, ana malzemenin kaynak bölgesinden ısıl olarak etkilenmediğini ve orijinal yapısını koruduğunu göstermektedir.

6 numaralı numunede lazer kaynak işlemi 1000 W lazer gücü, 15 mm/s besleme hızı ve 13 Hz yalpa frekansı parametreleriyle uygulanmıştır. Mikrosertlik ölçümleri ana malzeme, ısıdan etkilenmiş bölge ve kaynak bölgesi boyunca uygulanmış olup mikrosertlik değerleri şekil 6.10 'da gösterilmiştir.



Şekil 6.10: 6 Numaralı numunenin mikrosertlik değerleri

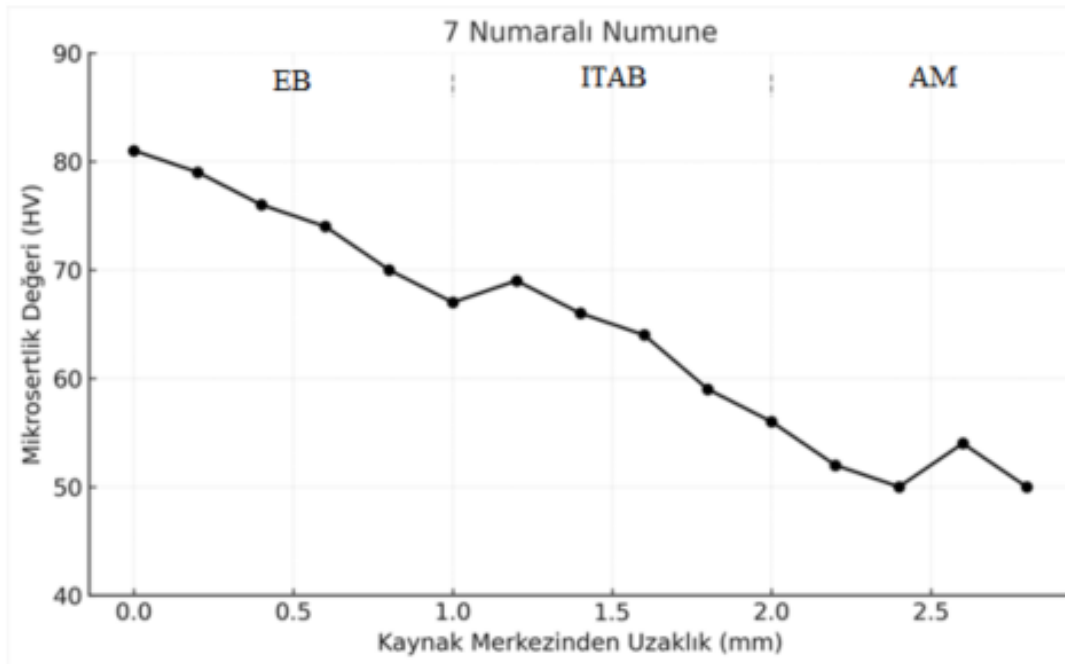
Elde edilen sonuçlara göre:

Kaynak bölgesinde (EB) sertlik değerleri yaklaşık 77,3–85,3 HV aralığında ölçülmüştür. Bu yüksek sertlik, lazer kaynağının neden olduğu yüksek soğuma hızına bağlı olarak ortaya çıkan ince taneli yapı ile ilişkilendirilmektedir. Hızlı soğuma, tane büyümesini sınırlandırarak sertliği artırmıştır.

Isıdan etkilenmiş bölge (ITAB) ise 66,3–78,3 HV aralığında değişen değerlere sahiptir. Bu bölgede, kaynak işlemi sırasında oluşan ısı girdisinin malzeme yapısında kısmi çökeltme ve yeniden kristalleşme gibi mikroyapısal dönüşümlere neden olduğu değerlendirilmektedir. Bu dönüşümler, sertlik profilinde kademeli bir düşüş şeklinde yansımaktadır.

Ana malzeme (BM) tarafında ise sertlik değerleri 49,0–63,2 HV arasında ölçülmüştür. Bu bölge, kaynak işleminin doğrudan etkisinin dışında kaldığı için daha düşük ve homojen sertlik değerleri sergilemektedir. Sertlik profilinin sonuna doğru oluşan bu düşüş, baz metalin orijinal mikroyapısını koruduğuna işaret etmektedir.

7 numaralı numunede lazer kaynak işlemi 1100 W lazer gücü, 9 mm/s besleme hızı ve 10 Hz yalpa frekansı ile gerçekleştirilmiştir. Mikrosertlik ölçümleri ana malzeme, ısıdan etkilenmiş bölge ve kaynak bölgesi boyunca uygulanmış olup mikrosertlik değerleri şekil 6.11 'de gösterilmiştir.



Şekil 6.11: 7 Numaralı numunenin mikrosertlik değerleri

Elde edilen mikrosertlik değerlerine göre:

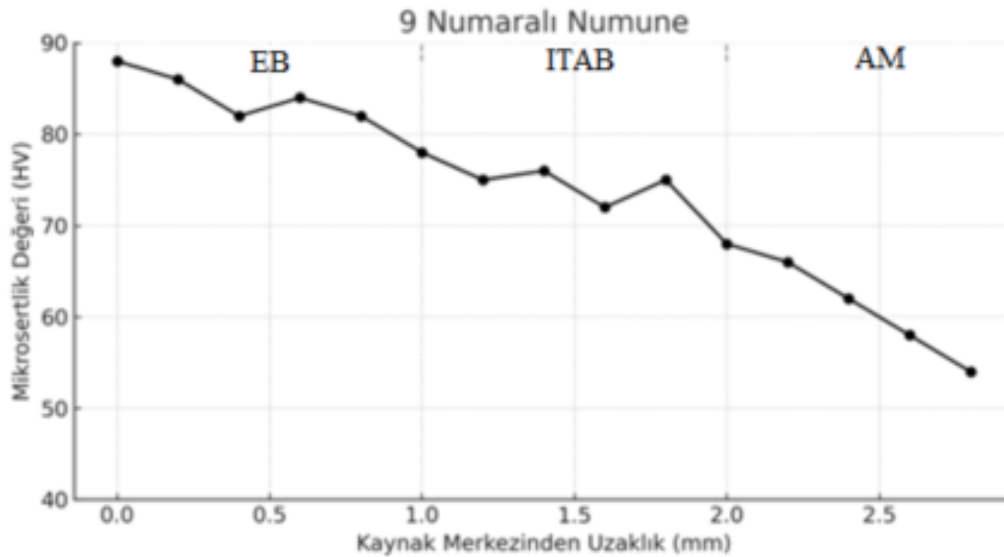
Kaynak bölgesi (EB)'nde ölçülen sertlik değerleri yaklaşık 77,2–81,3 HV aralığında değişmektedir. Bu bölgede lazer kaynağının neden olduğu yüksek soğuma hızı, ince taneli

yapı oluşumunu teşvik etmiş ve böylece mikrosertlik değerlerinin nispeten yüksek çıkmasına neden olmuştur.

Isıdan etkilenmiş bölgede sertlik değerleri 59,5–67,2 HV arasında değişmektedir. Bu bölgede, ısı girdisinin etkisiyle kısmen yeniden kristalleşme oluşmuş, bu da sertlikte düşüğe neden olmuştur. ITAB içinde yer yer küçük artışlar gözlenmesi, mikroyapısal dönüşümlerin düzensizliğini işaret etmektedir.

Ana malzeme bölgesinde ise sertlik değerleri 50,8–59,0 HV aralığında kalmaktadır. Bu değerler, kaynak bölgesinden uzaklaştıkça ısı etkinin azaldığını ve baz malzemenin yapısının korunduğunu göstermektedir. Aynı zamanda bu bölgede düşük ve homojen bir sertlik profili oluşmuştur.

9 numaralı numunede lazer kaynak işlemi 1100 W lazer gücü, 15 mm/s besleme hızı ve 10 Hz yalpa frekansı ile gerçekleştirilmiştir. Mikrosertlik ölçümleri kaynak bölgesi, ısıdan etkilenmiş bölge ve ana malzeme boyunca uygulanmış olup mikrosertlik değerleri şekil 6.12 'de gösterilmiştir.



Şekil 6.12: 9 Numaralı numunenin mikro sertlik değerleri

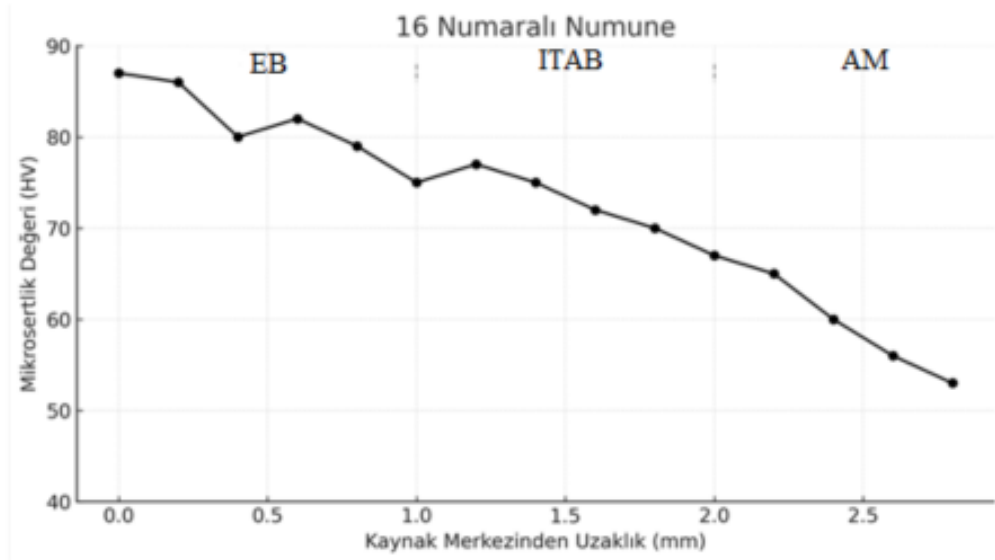
Ulaşılan sertlik değerlerine göre:

Kaynak bölgesi (EB)'nde ölçülen sertlik değerleri 82–88 HV aralığında değişmektedir. Bu bölgedeki yüksek sertlik değerleri, kaynak metalinin lazer ışını etkisiyle maruz kaldığı ani ısınma ve hızlı soğuma sonucu oluşan ince taneli mikroyapının bir sonucudur.

ITAB bölgesinde, sertlik değerlerinin 75–78 HV civarına kadar düştüğü gözlemlenmiştir. Bu bölgede hem ısı etkileri hem de mikro yapıdaki geçiş nedeniyle yumuşama eğilimi görülmektedir. Yine de bazı noktalarda lokal sertlik artışları dikkat çekmekte ve bu durumun, ITAB bölgesindeki heterojen ısı etkilerden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Ana malzeme tarafında ise sertlik değerleri 54–68 HV aralığına kadar düşmektedir. Bu düşüş, kaynak bölgesinden uzaklaştıkça lazerin etkisinin azaldığını ve malzemenin doğal yapısının hâkim olduğunu göstermektedir.

16 numaralı numunede lazer kaynak işlemi 1200 W lazer gücü, 9 mm/s besleme hızı ve 13 Hz yalpa frekansı ile gerçekleştirilmiştir. Mikrosertlik ölçümleri kaynak bölgesi, ısıdan etkilenmiş bölge ve ana malzeme boyunca uygulanmış olup mikrosertlik değerleri Şekil 6.13 'de gösterilmiştir.



Şekil 6.13: 16 Numaralı numunenin mikrosertlik değerleri

Elde edilen verilere göre:

Kaynak bölgesi sertlik değerleri 79–87 HV aralığındadır. Bu yüksek sertlik, lazer ışınının etkisiyle oluşan hızlı soğuma sonucu ince taneli mikroyapıların oluştuğunu göstermektedir. Ayrıca artan lazer gücünün, daha yüksek sıcaklık gradyanı oluşturduğu ve bu nedenle daha belirgin sertlik artışına yol açtığı düşünülmektedir.

ITAB bölgesinde sertlik değerleri 70–75 HV aralığında değişmektedir. ITAB bölgesi, kaynak metalinden temel metale geçişin yaşandığı ve termal döngüye maruz kalan bölge

olduğu için, bu alanda kademeli bir yumuşama gözlenmiştir. Mikro yapıdaki dönüşümler, bu düşüşün ana nedenidir.

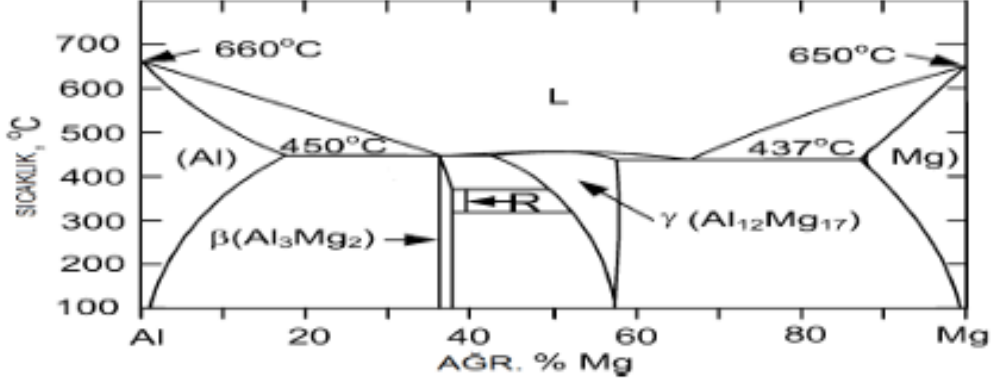
BM bölgesinde ise sertlik değerleri 53–67 HV aralığına kadar düşmüştür. Bu bölge kaynak işleminden etkilenmeyen, temel alüminyum yapının hâkim olduğu bölgedir. Sertlik seviyesinin düşük ve nispeten homojen olması, ısı etkilerden uzak kalındığını göstermektedir.

Alüminyum–magnezyum esaslı 5xxx serisi alaşımlarda, özellikle magnezyum oranı %3,8–5,0 arasında olan AA5049 gibi alaşımlarda, Mg içeriğinin artmasıyla birlikte Al–Mg ikili faz diyagramında şekil 6.14’ de gözlemlendiği üzere β fazı (Al_3Mg_2) oluşumu gözlenebilmektedir. Bu faz, Al matriksi içerisinde ara faz (intermetalik) bileşik olarak çökebilir [42].

AA5049 alaşımı, katı çözelti sertleşmesi ile dayanımı artırılmış bir yapıya sahiptir. Ancak magnezyum içeriği %3’ün üzerine çıktığında, özellikle soğuma sırasında veya kaynak gibi ısı işlemlere maruz kaldığında, Al_3Mg_2 bileşiğinde farklı noktalar gözlemlenebilir. Bu durum kaynaklı bölgede yerel kimyasal bileşim farklılıkları ve buna bağlı olarak faz değişim bölgelerinde bulunan sertlik değerlerinde ani değişiklikler meydana getirebilir [42].

Bu çalışmada elde edilen mikrosertlik profillerinde, kaynak merkezinden uzaklaştıkça genelde düşen bir eğilim izlenmiş olsa da bazı bölgelerde ani iniş-çıkışlar gözlenmiştir. Bu dalgalanmalı yapı, homojen olmayan mikrosegregasyonlar veya yer yer yoğunlaşan Al_3Mg_2 bileşiğinde görülen ara faz oluşumu ile açıklanabilir. Al_3Mg_2 sert bir intermetalik faz olmakla birlikte, sertlik ölçüm ucu bu partiküllere denk geldiğinde ölçülen değer noktasal olarak yüksek çıkabilir. Tersine, Al_3Mg_2 ’nin zayıf yapıştığı bölgeler, mikro çatlaklara veya gözeneklere neden olarak sertlikte ani düşüşlere neden olabilir [42].

U. Özdemir’in doktora tezinde lazerle kaynaklanmış alüminyum profillerinde lazer gücünün artışıyla düzensizlikler görüldüğü ifade edilmiştir. Benim mikrosertlik ölçümlerimde de benzer şekilde bazı numunelerde EB bölgesindeki sertlik değerlerinin düzensiz dağıldığı ve merkezde ani artışlar gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu durumun, yüksek enerji yoğunluğu nedeniyle oluşan farklılaşmış mikroyapılarla ilişkili olduğu düşünülmektedir [16].



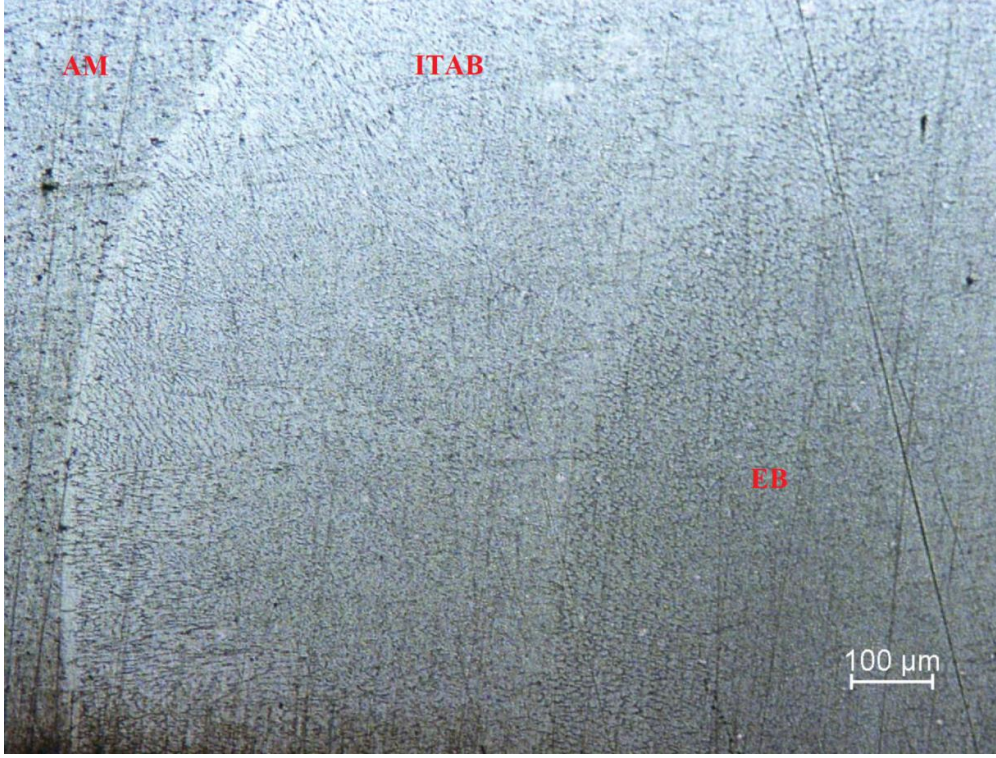
Şekil 6.14: AL-MG Faz diyagramı [42]

6.4 Optik Mikroskop Çalışması Sonuçları

Bu bölümde, lazer kaynağı ile birleştirilmiş AA5049 alüminyum alaşımı numunelerin mikroyapı özellikleri, optik mikroskop kullanılarak detaylı şekilde incelenmiştir. İnceleme için seçilen 1, 6 ve 16 numaralı numuneler, önceki bölümlerde elde edilen çekme ve üç nokta eğme deneyleri sonuçları dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu seçimde amaç, farklı mekanik performans düzeylerine sahip numuneler üzerinden mikroyapısal karşılaştırmalar yaparak, kaynak parametrelerinin mikroyapıya etkisini net biçimde ortaya koymaktır.

Her bir numune, kaynaklı birleşim boyunca ana malzeme ısıdan etkilenmiş bölge ve kaynak metal olmak üzere üç ana bölge üzerinden değerlendirilmiştir. Bu sayede, farklı lazer parametreleriyle gerçekleştirilen kaynak işlemlerinin bölgesel mikroyapı farklılıklarına etkisi gözlemlenmiş ve bu değişimlerin mekanik performansla olan ilişkisi kurulmuştur.

Şekil 6.15 'de bulunan 1 numaralı numuneye ait 10x büyütme ile elde edilen optik mikroskop görüntüsünde, kaynak bölgesi, ısıdan etkilenmiş bölge ve ana malzeme net şekilde ayırt edilebilmektedir. Görüntünün merkezinde daha koyu ve homojen yapıya sahip olan bölge kaynak metalini temsil ederken, bu bölgeyi çevreleyen ITAB'da tane büyümesi ve yapısal değişim izlenmektedir. En dışta ise daha ince ve düzgün taneli yapı ile ana malzeme yer almaktadır. Üç bölge arasındaki bu mikroyapısal geçişler, kaynak sırasında oluşan ısı dağılımı ve soğuma hızının etkisini açıkça yansıtmaktadır.



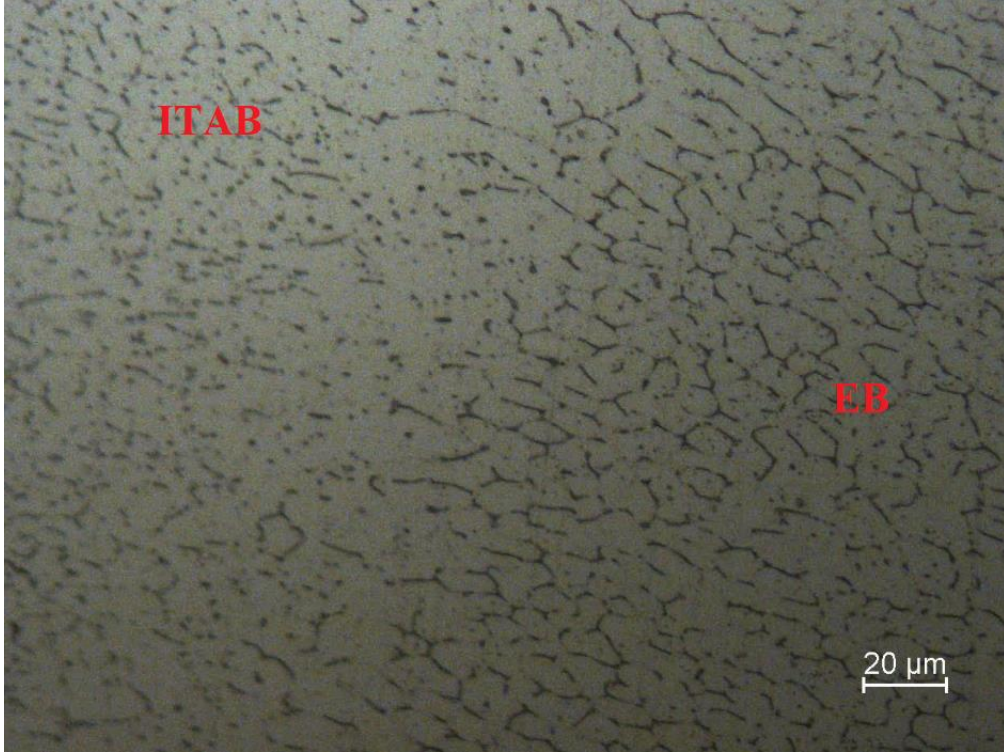
Şekil 6.15: 1 Numaralı numunenin mikroyapı görüntüsü (10x)

Şekil 6.16' da 50x büyütme ile elde edilen görüntüde, lazer kaynağı uygulanmış 1 numaralı AA5049 alüminyum alaşımı numunenin erime bölgesi (EB) ve ısıdan etkilenmiş bölge net bir şekilde gözlemlenmektedir. EB bölgesinde, daha küçük ve yoğun dendritik yapılara benzer oluşumlar dikkat çekmektedir. Bu yapıların, hızlı soğuma etkisiyle oluşmuş olabileceği düşünülmektedir. ITAB bölgesine doğru ilerledikçe, tanelerin daha düzensiz ve nispeten büyümüş yapılar sergilediği görülmektedir. Bu durum, ısı etkileriyle meydana gelen mikroyapısal değişimlerin bir sonucu olabilir. Gözlenen bu yapı farklılıkları, sertlik dağılımındaki değişimle de örtüşmektedir.

Kaynak bölgesindeki düzgün dendritik yapı, parametrelerin nispeten dengeli bir enerji girdisi sağladığını ve iyi bir penetrasyon ile kontrollü bir soğuma süreci gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Ancak bu numunenin diğerlerine göre mekanik özellikleri daha düşük olduğu için, ITAB'da meydana gelen tane büyümesi ve mikroyapı homojenliğindeki olası zayıflıklar yapısal dayanımı sınırlamış olabilir.

2023 yılında E. B. Demir tarafından yapılan yüksek lisans tezinde, AA6063 alüminyum alaşımı lazer kaynağıyla birleştirilmiş ve taguchi yöntemiyle parametre optimizasyonu yapılmıştır. Bu çalışmada en yüksek çekme mukavemeti 195 MPa olarak elde edilmiş ve optimum kaynak parametresi olarak 1200 W lazer gücü, 4 mm/s besleme hızı ve 0 mm odak

uzaklığı raporlanmıştır. Benim çalışmamda da 1000–1200 W lazer gücü aralığında, 9–15 mm/s besleme hızları ile kaynak uygulamaları yapılmış, benzer eğilimler gözlenmiştir. Özellikle düşük besleme hızlarında daha yüksek nüfuziyet sağlandığı, ancak buna bağlı olarak kaynak bölgesinde termal etkilerin daha belirgin hale geldiği anlaşılmıştır [5].

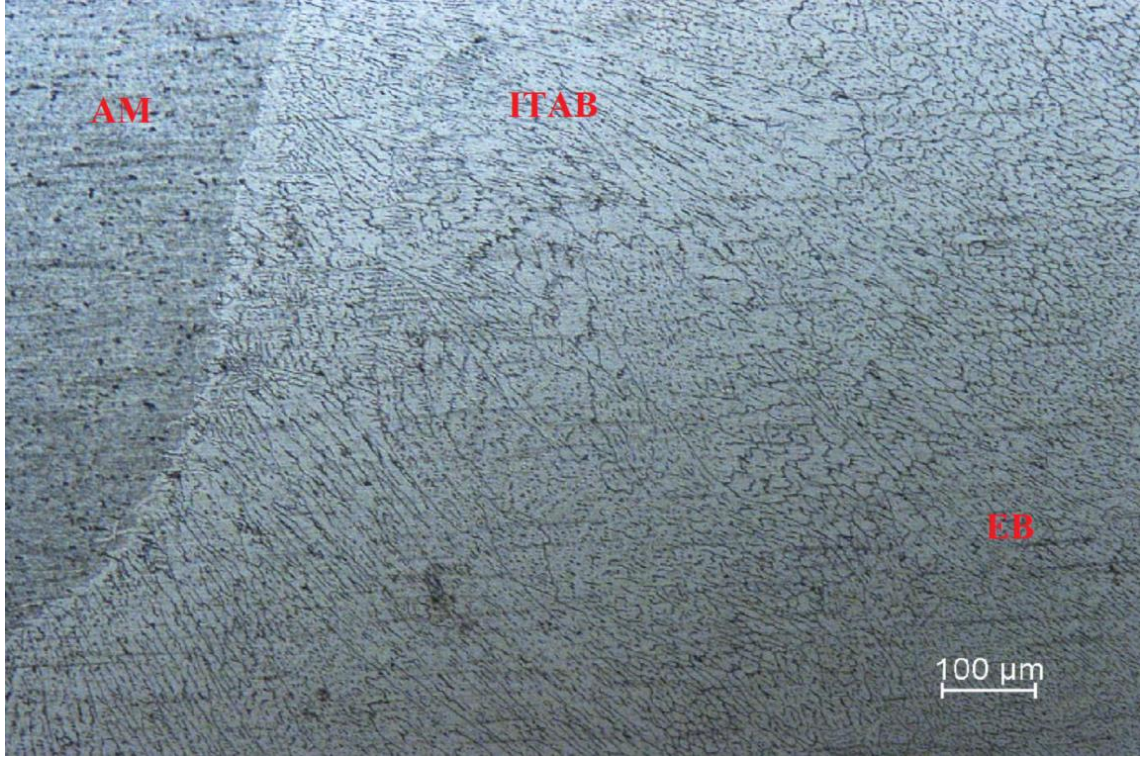


Şekil 6.16: 1 Numaralı numunenin mikroyapı görüntüsü (50x)

Şekil 6.17 ‘de bulunan görüntüde 10x büyütme optik mikroskop görüntüsü, 6 numaralı numunenin kaynak bölgesi, ITAB ve ana malzeme bölgelerini net şekilde göstermektedir.

- Sol kısım (koyu gri alan): Ana malzeme bölgesidir. Tane yapısı daha homojen ve net çizgilerden yoksundur.
- Orta geçiş bölgesi: ITAB olarak değerlendirilir. Burada tane yapılarında yönelme ve büyüme gözlenmektedir. Bu bölge, ısı girdisi nedeniyle yeniden kristalleşme ve yapısal dönüşüm göstermektedir.
- Sağ taraf (daha açık gri ve yoğun doku): Kaynak bölgesidir (EB). Bu alanda yönelmiş dendritik yapılar ve hızlı katılaşmanın izleri açıkça görülmektedir.

Genel olarak bu görüntü, kaynak işlemi sırasında ısı etkisiyle oluşan mikroyapı geçişlerini ve malzeme içi farklı bölgelerin sınırlarını başarılı şekilde yansıtmaktadır. 6 numaralı numunede mikroyapı geçişlerinin daha düzgün ve net oluştuğu görülmektedir.

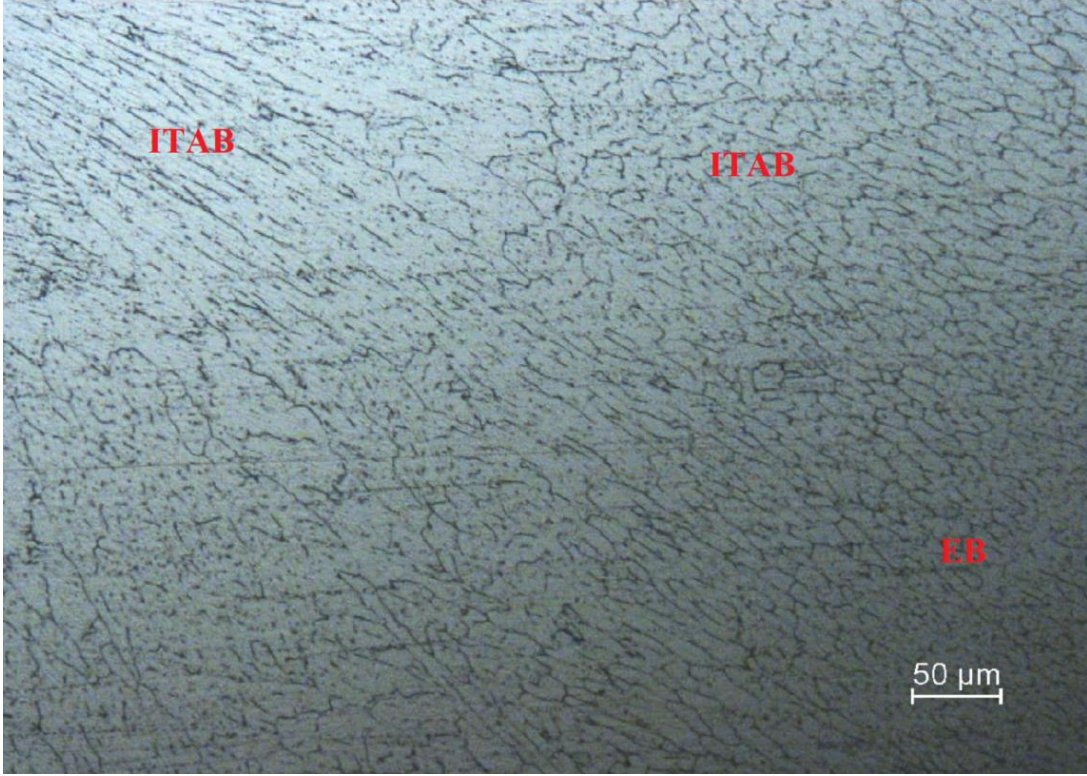


Şekil 6.17: 6 Numaralı numunenin mikroyapı görüntüsü (10x)

Şekil 6.18 'de 6 numaralı numuneye ait 20x büyütme görüntü, 6 numaralı numuneye ait kaynak metal ve ısıdan etkilenmiş bölge geçişlerini daha detaylı biçimde ortaya koymaktadır. Görüntüde özellikle:

- Sol üst kısımda daha yönlenmiş, ince ve uzamış taneler görülmekte olup bu bölge ITAB olarak değerlendirilebilir. Burada ısıl etkiyle yeniden kristalleşme başlamış ve tane yapılarında deformasyon izleri gözlemlenmektedir.
- Sağ alt bölge ise daha yoğun ve homojen görünümlü bir dokuya sahip olup bu kısım kaynak bölgesi olarak tanımlanabilir. Bu bölgede hızlı soğuma nedeniyle oluşan ince dendritik yapıların varlığı dikkat çekmektedir.

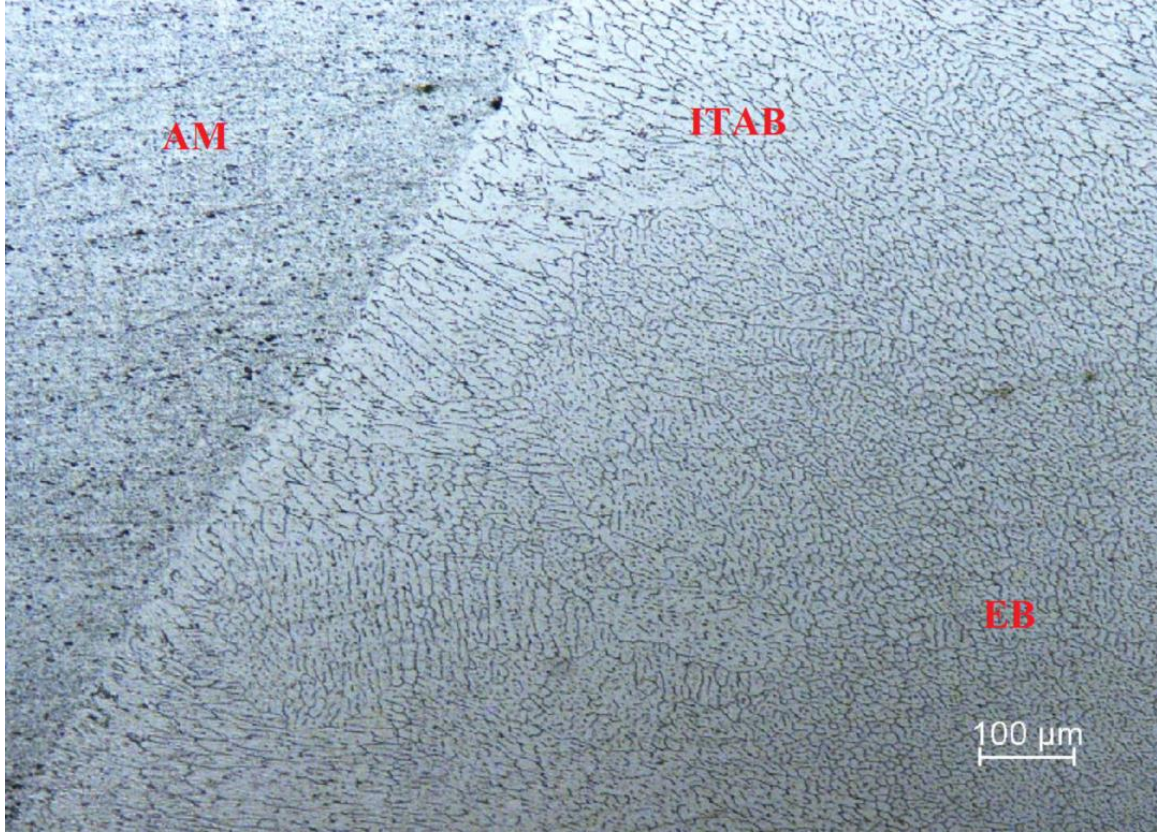
Bu görüntüde en dikkat çekici unsur, farklı ısıl bölgelerin sınırlarının oldukça net şekilde izlenebilir olmasıdır. Birden fazla geçiş çizgisi (termal etki sınırı) görünmekte olup bu durum, kaynak işleminde ısının nüfuz derinliğinin ve ısı dağılımının malzeme içinde belirgin değişimlere neden olduğunu göstermektedir. Mikroyapısal geçişler, kaynak kalitesi ve mekanik özellikler açısından önemli bilgiler sunmaktadır.



Şekil 6.18: 6 Numaralı numunenin mikroyapı görüntüsü (20x)

Şekil 6.19’de 16 numaralı numuneye ait 10x büyütmede elde edilen mikroyapı görüntüsü sunulmaktadır. Görselde kaynak bölgesi, ısıdan etkilenmiş bölge ve ergime bölgesi arasında geçişin belirgin şekilde izlenebildiği görülmektedir.

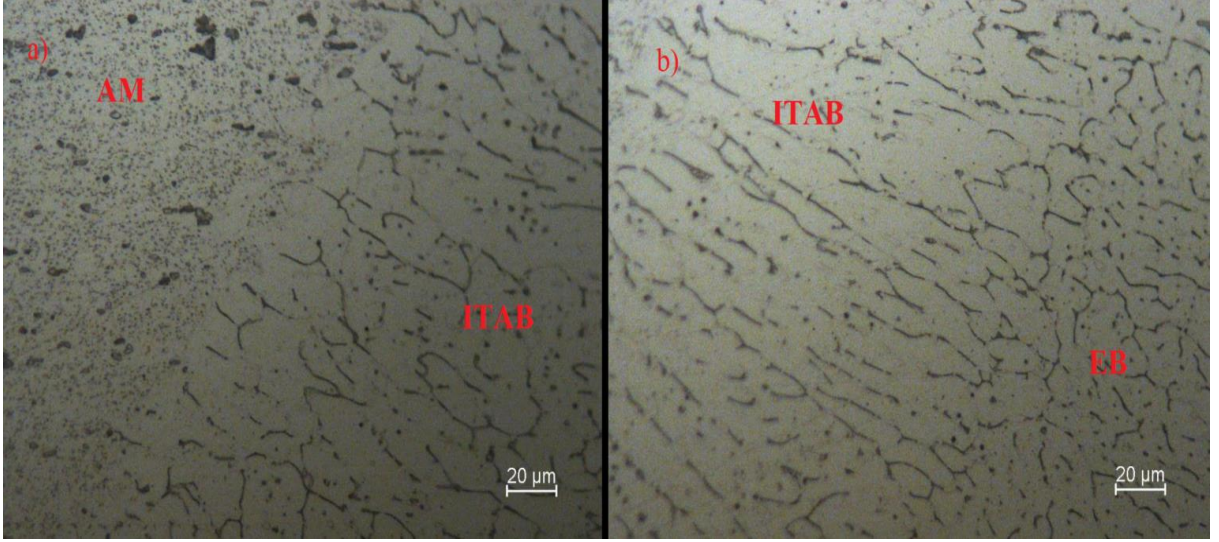
- Sol tarafta yer alan daha homojen ve düzgün yapılı bölge ana malzemedir. Burada tane yapılar nispeten daha sıkı ve deformasyona uğramamış şekilde gözlemlenmektedir.
- Orta geçiş bölgesi olan ITAB, kaynak ısısından etkilendiği için yeniden kristalleşmeye başlamış ancak erimeye uğramamıştır. Bu bölgede taneler yönlendirilmiş ve uzamış bir yapı sergilemektedir. Tane sınırları daha belirgin ve düzensizdir.
- Sağ alt tarafta yer alan alan kaynak bölgesi (EB) olup, burada kaynak sonrası hızlı katılaşmaya bağlı olarak daha ince ve dendritik yapılar gözlenmektedir. Mikro yapı bu bölgede daha yoğun ve düzensiz bir hal almıştır.



Şekil 6.19: 16 Numaralı numunenin mikroyapı görüntüsü (10x)

Şekil 6.20 a) görselinde sağdan sola doğru bir geçişte, kaynak bölgesine yakın olan ITAB'dan, homojen yapıya ana malzeme (BM) mikroyapısına geçiş izlenmektedir. ITAB'da yer yer büyümüş taneler ve hafif yönlendirme dikkat çekerken, ana malzeme tarafında daha küçük, düzgün ve eş boyutlu taneler hakimdir. Ana malzemede yüksek sıcaklık etkisi söz konusu olmadığından, orijinal mikroyapı korunmuştur. ITAB ile ana malzeme arasındaki bu geçiş, ısı girdisinin malzeme yapısına olan etkisini net şekilde ortaya koymaktadır.

Şekil 6.20 b) görselinde, soldan sağa doğru ilerledikçe tane boyutlarında belirgin bir büyüme gözlemlenmektedir. Isıdan etkilenmiş bölgede (ITAB), taneler ince ve yönlendirilmiş yapıdayken, kaynak bölgesine (EB) geçişte tanelerin daha iri, düzensiz ve dentritik bir yapıya dönüştüğü görülmektedir. Bu durum, kaynak bölgesinde sıvılaşma ve yeniden katılaşma sonrası oluşan hızlı soğuma etkisinin bir sonucudur. EB'deki daha kalın ve dallanmış taneler, lazer kaynaklı katılaşma yapısının tipik bir göstergesidir. Bu mikro yapı, kaynak bölgesinde yüksek sıcaklıkların etkisiyle yeniden kristalleşmenin gerçekleştiğini gösterir.

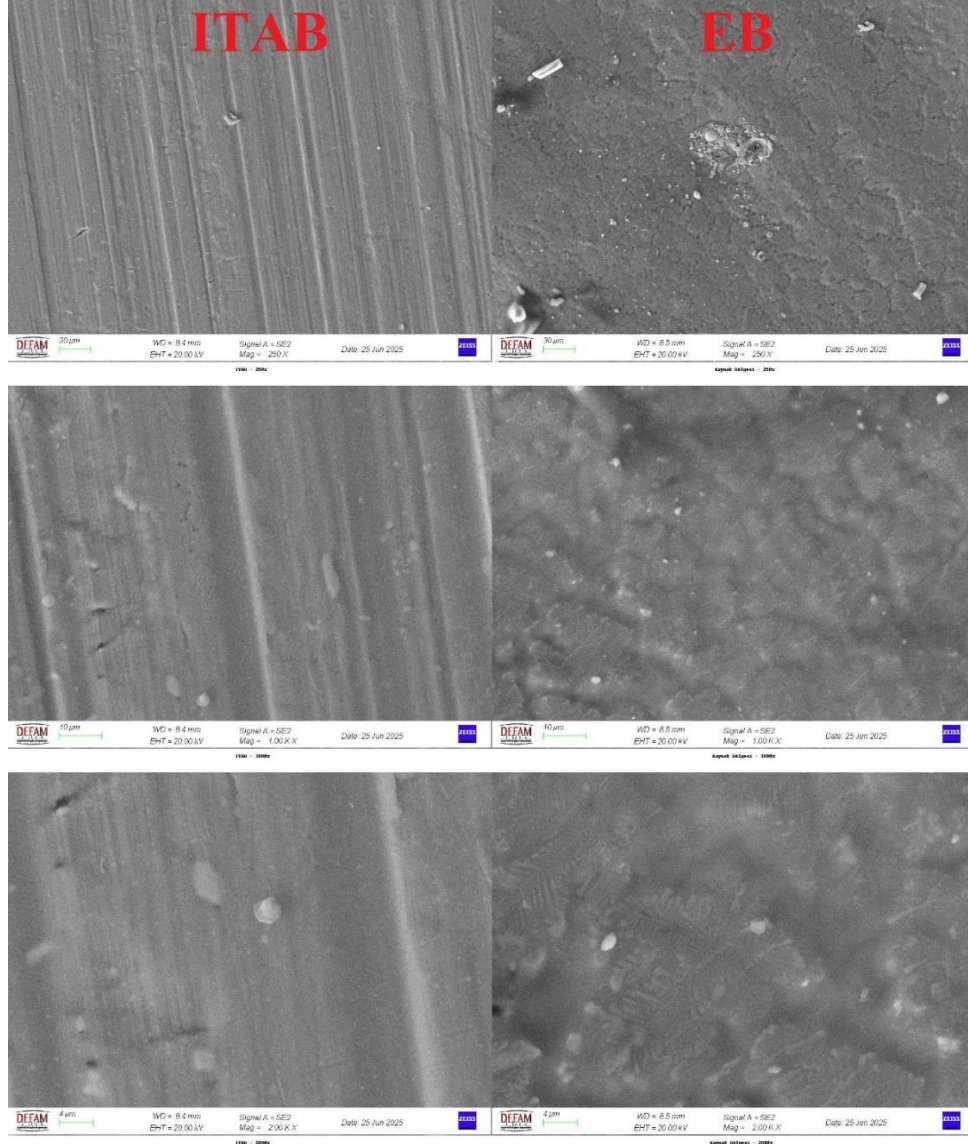


Şekil 6.20: a) ITAB-AM b) ITAB-EB

6.5 SEM ve EDX Analiz Sonuçları

Bu çalışmada, lazer kaynağı ile birleştirilmiş AA5049 alüminyum alaşımından elde edilen numunelerin mikroyapısal özelliklerini belirlemek amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri gerçekleştirilmiştir. İki farklı numuneye ait SEM görüntüleri üzerinden yapılan değerlendirmelerde numunenin yüzey morfolojisi incelenmiş; özellikle kaynak bölgesi (EB) ve ısıdan etkilenmiş bölge (ITAB) büyütme altında ayrı ayrı görüntülenerek analiz edilmiştir. Bu incelemeler sayesinde, kaynak işleminin mikroyapıya etkileri detaylı şekilde gözlemlenebilmiştir.

Ayrıca, kaynaklı birleştirme işleminin uygulandığı tüm numuneler aynı alaşım grubuna ait olduğundan, kimyasal bileşim analizi temsili olarak 6 numaralı numune üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, 6 numaralı numunenin kaynak bölgesine enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX) analizi uygulanarak, kaynak sırasında oluşabilecek olası elementel segregasyonlar ve homojenlik durumu değerlendirilmiştir. Elde edilen SEM ve EDX bulguları, kaynaklı bölgelerdeki mikroyapısal farklılıkların anlaşılmasına katkı sağlamıştır.



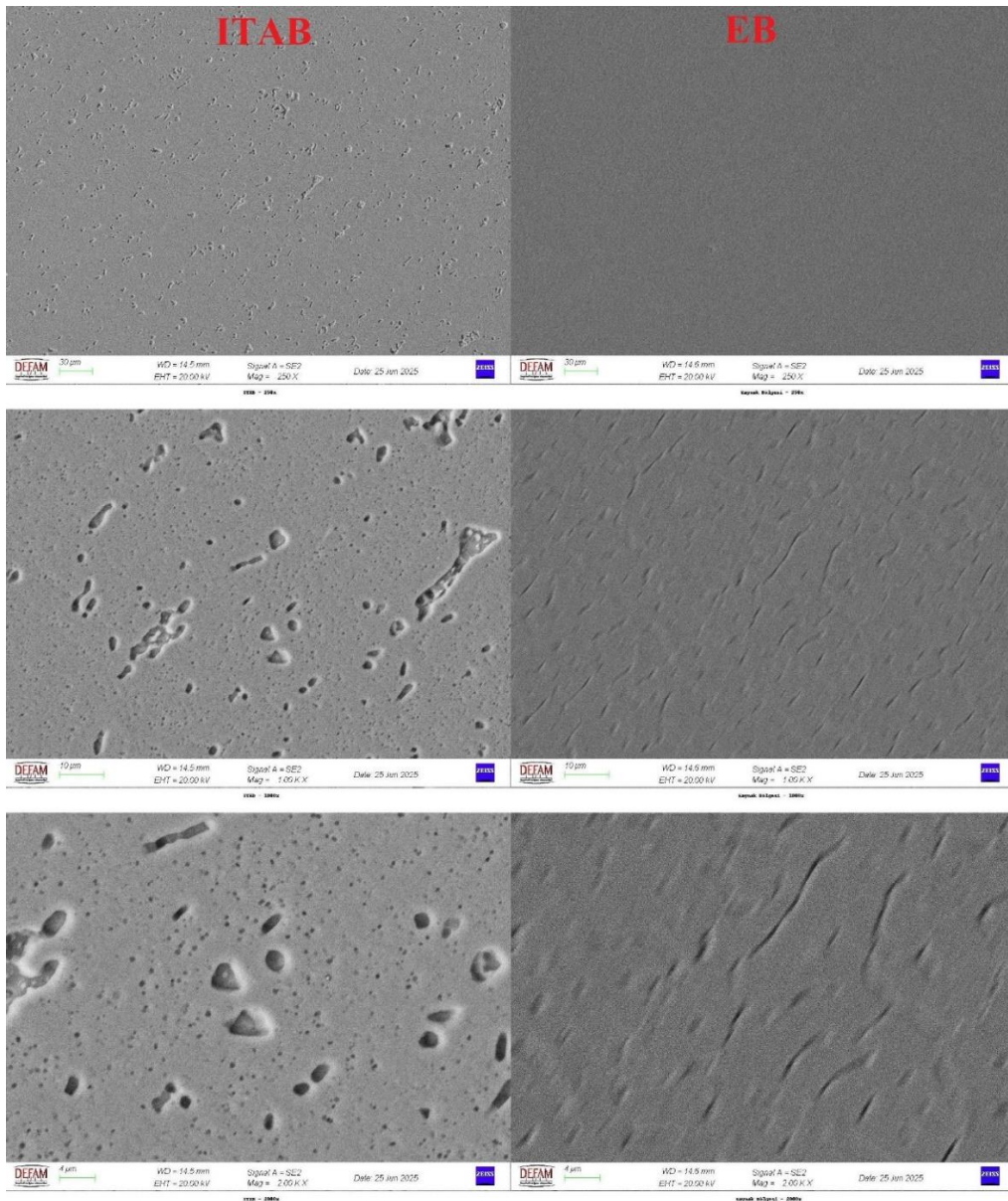
Şekil 6.21: 6 Numaralı numunenin SEM görüntüleri

Bu çalışmada elde edilen SEM görüntüleri, ITAB ve EB bölgelerine ait yüzey morfolojilerini farklı büyütmelerle göstermektedir. ITAB bölgesinde, özellikle düşük büyütmelerde ($250\times$ ve $1000\times$), paralel yönlenmiş ve düzgün çizgisel aşındırma izleri belirgindir. Bu yapı, ITAB bölgesinde metalin ergimeden, yalnızca ısı etkisiyle mikroyapısal değişime uğradığını ve mekanik parlatma sonrası homojen bir yüzey oluşturduğunu göstermektedir. Daha yüksek büyütmelerde ($2000\times$), bu homojenliğin bozulmadığı, yüzeyin görece olarak pürüzsüz kaldığı ve mikroyapı bileşenlerinin net olarak seçilemediği görülmektedir.

Buna karşılık EB bölgesinde, ısı girdisinin daha yüksek olduğu ve tam ergime gerçekleştiği için yüzey morfolojisi oldukça farklıdır. $250\times$ büyütmede EB bölgesinde dağınık ve belirgin mikroyapı desenleri, mikro-gözenekler ve erimeye bağlı izler dikkat çekmektedir. $1000\times$ ve

2000× büyütmelerde ise bu yapı daha karmaşık hale gelmekte, dendritik oluşumlar ve hızlı katılaşmaya bağlı mikroyapısal desenler belirginleşmektedir. Ayrıca EB bölgesinde gözenek oluşumu, sıçrama izleri veya çökelmiş partiküller gibi ergimeye bağlı düzensizlikler gözlemlenebilmektedir. Bu yapıların, mekanik özellikler üzerinde potansiyel olumsuz etkileri olabileceği düşünülmektedir.

Sonuç olarak, ITAB ve EB bölgelerinin SEM görüntüleri, lazer kaynağının ısıl etkisinin mikroyapı üzerinde oluşturduğu değişimleri açıkça ortaya koymakta; EB bölgesinin karmaşık ve düzensiz yapısı, ITAB bölgesine kıyasla daha yüksek sıcaklık gradyanları ve hızlı soğuma etkilerinin bir sonucu olarak değerlendirilebilmektedir.

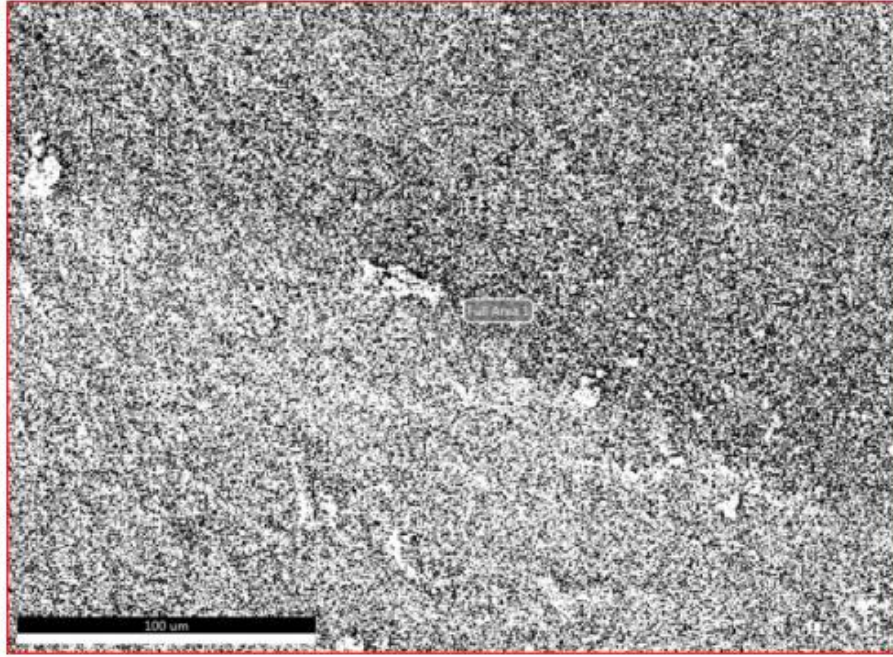


Şekil 6.22: 16 Numaralı numunenin SEM görüntüleri

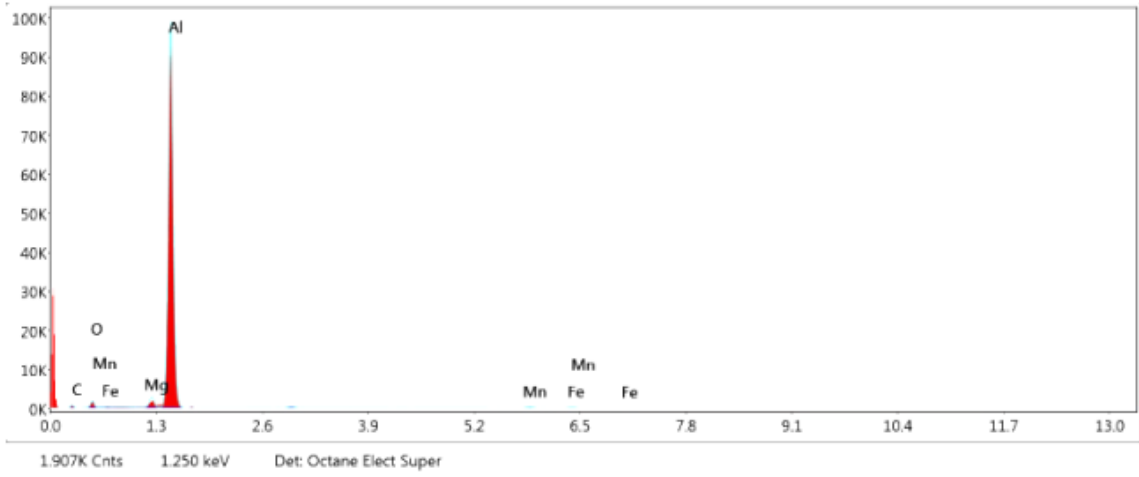
16 numaralı numunenin ITAB ve EB bölgelerinden elde edilen SEM görüntüleri, malzemenin mikroyapısal farklılıklarını 2500×, 10000× ve 20000× büyütme oranlarında detaylı olarak yansıtmaktadır. ITAB bölgesine ait görüntülerde, özellikle yüksek büyütmelerde (10k ve 20k), yaygın ve farklı boyutlarda mikro boşlukların ve gözeneklerin varlığı dikkat çekmektedir. Bu boşlukların, lazer kaynağı sırasında bu bölgenin ısı etkiye maruz kalması ancak tam ergimeye uğramaması nedeniyle oluştuğu ve mikroyapısal bütünlüğü olumsuz yönde etkileyebileceği düşünülmektedir. Ayrıca bazı alanlarda ergimeden katılma izleri veya mikroskobik çatlak benzeri yapılar da gözlemlenmektedir.

Buna karşılık EB bölgesine ait SEM görüntülerinde yüzey daha homojen bir yapı sergilemektedir. Özellikle 250× büyütmede düzgün bir yüzey görünümü hâkimken, 1000× ve 2000× büyütmelerde bu yüzey üzerinde belirli yönlenmeler ve ince yapısal çizgiler seçilebilmektedir. Bu durum, EB bölgesinde tam ergime ve hızlı katılma sonucu oluşan düzgün ve yoğun mikroyapının bir göstergesi olabilir. Öte yandan, bazı lokal alanlarda ince çizgisel yapılar ve izler gözlemlense de ITAB'daki kadar yaygın boşluk veya düzensizlik bulunmamaktadır.

Sonuç olarak, 16 numaralı numunede ITAB bölgesi, mikroyapı bütünlüğü açısından EB'ye kıyasla daha fazla düzensizlik göstermektedir. Bu da kaynak sonrası oluşan termal gradyan ve soğuma hızlarının bölgesel olarak mikroyapıya etkisini ortaya koymaktadır. ITAB bölgesindeki gözlenen boşluklar, malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz etkileyebilecek potansiyel zayıf noktalar olarak değerlendirilebilir.



Şekil 6.23: 6 Numaralı numunenin EDX alınan bölge



Smart Quant Results

| Element | Weight % | Atomic % | Net Int. | Error % | Kratio | Z | A | F |
|---------|----------|----------|----------|---------|--------|--------|--------|--------|
| C K | 11.55 | 22.15 | 195.03 | 12.17 | 0.0125 | 1.1406 | 0.0948 | 1.0000 |
| O K | 5.20 | 7.49 | 494.80 | 9.98 | 0.0128 | 1.0932 | 0.2255 | 1.0000 |
| MgK | 2.05 | 1.95 | 927.32 | 3.81 | 0.0171 | 1.0116 | 0.8168 | 1.0094 |
| AlK | 79.12 | 67.55 | 37340.43 | 2.20 | 0.6838 | 0.9744 | 0.8868 | 1.0002 |
| MnK | 1.18 | 0.49 | 178.37 | 7.33 | 0.0102 | 0.8265 | 0.9903 | 1.0574 |
| FeK | 0.90 | 0.37 | 124.62 | 9.28 | 0.0080 | 0.8394 | 0.9964 | 1.0660 |

Şekil 6.24: 6 Numaralı numunenin EDX analizi

6 numaralı numunenin kaynak bölgesine ait EDX (Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi) analizine ait görüntü ve sonuçlara göre, analiz edilen bölgedeki temel elementin yüksek oranda alüminyum (Al) olduğu açıkça görülmektedir. Elde edilen spektrumda Al tepe noktası oldukça belirgindir ve Smart Quant sonuçlarına göre, Al elementinin ağırlıkça oranı %79,12, atomik oranı ise %67,55 olarak ölçülmüştür.

Ayrıca; C, O, Mg, Mn ve Fe elementlerinin de düşük oranlarda bulunduğu görülmektedir. Özellikle karbon (%11,55 ağırlıkça) ve oksijen (%5.20 ağırlıkça) oranları, yüzeyde olası birikintiler, dağlama artıkları veya analiz edilen bölgedeki mikroyapısal etkileşimlerden kaynaklanıyor olabilir. Magnezyum (%2.05) ve manganez (%1.18) gibi elementler ise AA5xxx serisi alüminyum alaşımlarında yaygın olarak kullanılan katkı elementleri arasında yer alır ve mekanik özelliklerin geliştirilmesine katkı sağlar. Demir (Fe) elementi ise %0,90 gibi oldukça düşük bir oranda tespit edilmiştir ve bu, genellikle alaşıma dışarıdan bulaşmış olabilecek iz miktarlarda bir içerik olarak yorumlanabilir.

Genel olarak bu EDX analizi, numunenin büyük oranda Al esaslı bir yapı içerdiğini, ek olarak alaşım elementi olarak Mg ve Mn gibi elementler barındırdığını ortaya koymakta; bu da kaynak bölgesinde uygun bir alaşım oluştuğunu ve yapısal tutarlılığın sağlandığını göstermektedir. Ancak, karbon ve oksijen oranlarının yüzey temizliği veya dağlama sonrası oluşabilecek kontaminasyon ihtimalleri açısından değerlendirilmesi önerilir.

7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, lazer kaynak yöntemiyle birleştirilen AA5049 alüminyum alaşımı levhalar üzerinde lazer gücü, besleme hızı ve yalpa frekansı değişkenlerinin kaynak bölgesinin mekanik ve mikroyapısal özelliklerine etkileri detaylı biçimde incelenmiştir. Her biri farklı parametre setleriyle hazırlanmış 18 adet numune üzerinde yapılan çekme deneyi, üç nokta eğilme deneyi, mikrosertlik ölçümleri, optik mikroskop, SEM ve EDX analizleri ile kaynaklı birleşimlerin performansı çok yönlü olarak değerlendirilmiştir.

Çekme deneyi sonuçları değerlendirildiğinde, lazer gücünün etkisine bakıldığında, diğer parametreler sabit tutulduğunda 1100 W lazer gücüyle üretilen numunelerde hem çekme mukavemeti hem de yüzde uzama bakımından en yüksek değerlere ulaşıldığı görülmüştür. Özellikle 10 numaralı numune 107,6 MPa ile en yüksek çekme mukavemetine sahipken, 8 numaralı numune 16,6 % uzama değeri ile sünekliğin en iyi olduğu örnek olarak öne çıkmıştır. Bu durum, 1100 W lazer gücünün ergitme derinliği ile mekanik performans arasında optimum bir denge sunduğunu göstermektedir.

Besleme hızı parametresi değerlendirildiğinde, tel besleme hızının artmasıyla birlikte çekme mukavemeti ve uzama değerlerinde genel bir düşüş eğilimi gözlenmiştir. Diğer değişkenler sabit tutulduğunda 9 mm/s besleme hızına sahip numunelerin hem mukavemet hem de süneklik açısından daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durum, düşük besleme hızlarında ergitmenin daha kararlı olması ve kaynak bölgesinde daha homojen bir yapı oluşmasıyla ilişkilendirilebilir.

Yalpa frekansı değişkeni incelendiğinde, 13 Hz frekans değerine sahip numunelerde hem çekme mukavemeti hem de uzama açısından daha dengeli ve yüksek performans elde edilmiştir. Özellikle kaynak banyosunun daha kararlı hareket etmesi ve ısının daha dengeli dağılması, bu frekans değerinin etkili olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, 13 Hz yalpa frekansı parametresi mekanik özellikler üzerinde olumlu bir etki yaratmıştır.

Üç nokta eğme testleri sonucunda elde edilen verilere göre, lazer gücü, besleme hızı ve yalpa frekansı değişkenlerinin eğilme mukavemeti ve yüzde deformasyon üzerindeki etkileri belirgin şekilde gözlemlenmiştir. Özellikle 1100 W lazer gücü ile üretilen numunelerin büyük çoğunluğunda hem eğilme dayanımı hem de deformasyon kapasitesinin yüksek olduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde, düşük besleme hızı (9 mm/s) kullanılan

numunelerde eğilme mukavemetinin arttığı ve deformasyon değerlerinin daha dengeli olduğu görülmüştür. Bu durum, daha düşük hızlarda kaynak banyosunun daha kontrollü ilerlemesiyle açıklanabilir. Ayrıca 13 Hz yalpa frekansı uygulanan numunelerde, kaynak bölgesindeki ısıl dağılımın daha homojen olması sayesinde eğilme mukavemetinde iyileşmeler gözlemlenmiştir. Genel olarak, bu parametre kombinasyonlarında malzemenin plastik şekil değiştirme kapasitesi korunurken, yüksek eğilme mukavemeti değerlerine ulaşılmış ve bu da kaynak kalitesinin mekanik olarak başarılı olduğunu ortaya koymuştur.

Mikrosertlik ölçümleri, kaynak bölgesinde en yüksek sertlik değerlerinin (~80 HV) oluştuğunu, ITAB bölgesinde sertliğin orta düzeyde (~60–63 HV) kaldığını, ancak beklenenden farklı olarak en düşük sertlik değerlerinin (~55–58 HV) ana malzeme bölgesinde ölçüldüğünü göstermiştir. Bu durum, ITAB bölgesinde lokal ara faz oluşumu veya kalıntı gerilmelerin etkili olabileceğini düşündürmektedir. Mikrosertlik ölçümlerinde gözlenen ani iniş-çıkışlar, Al-Mg faz diyagramına göre yapıda oluşabilecek β fazı ara faz oluşumu durumuna bağlanabilir. Bu intermetalik fazın ölçüm noktasına denk gelmesi, lokal sertlik değerlerinde sapmalara neden olmuştur.

Optik mikroskop ve SEM analizlerinde kaynak bölgesinde daha homojen ve ince taneli bir yapı, ITAB bölgesinde ise yönlenmiş ve kısmen deformasyona uğramış mikro yapılar tespit edilmiştir. Kaynak bölgesinde hızlı soğumanın etkisiyle ince taneler oluşmuş, bu durum hem mikrosertlik artışı hem de mekanik dayanım açısından destekleyici niteliktedir.

EDX analizinde, kaynak bölgesinde ana alaşım elementi olan Al'ın yanı sıra Mg, Mn ve Fe gibi elementler de belirli oranlarda tespit edilmiştir. Özellikle Mg içeriğinin %2'nin altına düşmemesi, lazer kaynağı sırasında bu uçucu elementin büyük oranda korunabildiğini göstermektedir.

AA5049 alaşımının ya da diğer magnezyum içeren alüminyum alaşımların lazer kaynağı ile birleştirilmesini konu alan çalışmaların geliştirilebilmesi için aşağıdaki önerilerin uygulanması tavsiye edilebilir:

- Çalışma sonuçları, sadece lazer gücü değil, besleme hızı ve yalpa frekansının da kaynak kalitesi üzerinde belirleyici etkilere sahip olduğunu göstermektedir. Parametreler arası etkileşimlerin daha net analiz edilebilmesi için istatistiksel analiz yöntemleri (ANOVA, regresyon vb.) kullanılabilir.

- Besleme hızının azaltılması, çekme dayanımında ve kaynak geometrisinde pozitif etkiler yaratmış olup, uygulamada optimize edilmesi gereken kritik bir parametre olarak öne çıkmaktadır.
- Yalpa frekansının etkisi bu deney setinde sınırlı gözükse de daha geniş aralıklarla yapılan yeni çalışmalarla bu etkinin netleştirilmesi önerilir.
- Gelecek çalışmalarda kaynak dikişi geometrisinin ve ısıl etkili bölgenin daha detaylı karakterize edilmesi (örneğin EBSD, XRD analizleri ile) önerilmektedir.
- Uygun parametre kombinasyonlarının tespitiyle lazer kaynak yöntemi, AA5049 gibi yüksek yansıtıcılığa sahip alüminyum alaşımlarında etkin ve kontrollü bir birleştirme yöntemi olarak kullanılabilir.

8. KAYNAKLAR

- [1] **Güneş, C.** (2012). *Benzinli Enjektörlerin Lazer Kaynağı ve Lazer Kaynak Parametreleri*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [2] **Özcan, M.** (2003). *Değişik Malzemelerin İşlenmesinde Kullanılan Nd:YAG Lazerleri için Etkin Bir Güç Kaynağının Tasarımı ve Uygulaması*, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [3] **Anderson, T.** (t.y.). *Understanding the Alloys of Aluminum*, <http://www.alcotec.com> (Erişim tarihi: 11 Mart 2025).
- [4] **Anderson, T.** (t.y.). *Trouble Shooting for Aluminum Welding*, <http://www.alcotec.com> (Erişim tarihi: 11 Mart 2025).
- [5] **Demir, E.B.** (2023). *Elektrikli Araç Batarya Taşıyıcılarında Kullanılan AL6063 Malzemesinin Lazer Kaynağı ile Birleştirilmesi, Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerinin Taguchi Methoduyla Optimize Edilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- [6] **Cao, X., Wallace, W., Poon, C. and Immarigeon, J.-P.** (2003). Research and Progress in Laser Welding of Wrought Aluminum Alloys. II. Metallurgical Microstructures, Defects, and Mechanical Properties, *Materials and Manufacturing Processes*, 18(1), 23-49.
- [7] **Forsman, T.** (2000). *Laser Welding of Aluminium Alloys*, Doktora Tezi, Luleå University of Technology, Luleå,
- [8] **Christopher, D.** (1992). *Laser Welding: A Practical Guide* (2. Baskı), Woodhead Publishing, Cambridge
- [9] **Bošnjak, S.M., Gnjatović, N.B., Momčilović, D.B., Milenović, I.L. and Gašić, V.M.** (2015). Failure Analysis of the Mobile Elevating Work Platform, *Case Studies in Engineering Failure Analysis*, 3, 80-87.
- [10] **TWI. (t.y.)**. *A General Review of Geometric Shape Imperfections – Types and Causes – Part 1*, <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/a-general-review-of-geometric-shape-imperfections-types-and-causes-part-1-067> (Erişim tarihi: 20 Mart 2025).
- [11] **Wu, D., Hua, X., Li, F. and Huang, L.** (2017). Understanding of Spatter Formation in Fiber Laser Welding of 5083 Aluminum Alloy, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 113, 730-740.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- [12] **Katayama, S.** (2013). Introduction: Fundamentals of Laser Welding, 140-141, *Handbook of Laser Welding Technologies* (2. Baskı), S. Katayama (Ed.), Woodhead Publishing, Cambridge, ABD
- [13] **Pastor, M., Zhao, H., Martukanitz, R.P. and DebRoy, T.** (1999). Porosity, Underfill and Magnesium Loss During Continuous Wave Nd:YAG Laser Welding of Thin Plates of Aluminum Alloys 5182 and 5754, *Welding Journal*, 78, 207-216.
- [14] **Fabbro, R. and Chouf, K.** (2000). Keyhole Modeling During Laser Welding, *Journal of Applied Physics*, 87, 4075-4083.
- [15] **Katayama, S., Mizutani, M. and Matsunawa, A.** (2003). Development of Porosity Prevention Procedures During Laser Welding, *Proceedings of the 1st International Symposium on High-Power Laser Macroprocessing*, 4831, 281-289.
- [16] **Özdemir, U.** (2012). *Lazer Kaynaklı Alüminyum Alaşım Bağlantılarının Kırılma Mekanikliği ve Mukavemet Açısından İncelenmesi*, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [17] **Steen, W. and Mazumder, J.** (2010). *Laser Material Processing* (4. Baskı), Springer, Londra.
- [18] **Jelínková, H.** (2013). *Lasers for Medical Applications: Diagnostics, Therapy and Surgery*, Woodhead Publishing (Elsevier), Cambridge.
- [19] **Yüce, C.** (2018). *Yüksek Mukavemetli Çelikler ile Alüminyum Alaşımınının Lazer Kaynağı ile Birleştirilmesinde Kaynak Parametrelerinin Bağlantı Üzerine Etkilerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa,
- [20] **Potter, K.S. and Simmons, J.H.** (2021). *Optical Materials* (2. Baskı), Elsevier.
- [21] **Şen, O.** (2009). *Sezyum (Cs) Atomik Gazı ile Mikrodalga ve Lazer Işınımının Rezonans Etkileşimi*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [22] **Çelen, S.** (2006). *Paslanmaz Çeliklerin Lazer Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Bağlantının Dayanım ve Korozyon Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [23] **Özdemir, A.Ö.** (2019). *Yarı-İletken Diyot Lazerler için Mikro Bölgesi, Elektronik Sıcaklık Kontrollü Lazer Haznesi Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- [24] **Kellens, K., Rodrigues, G.C., Dewulf, W. and Duflou, J.** (2014). Energy and Resource Efficiency of Laser Cutting Processes, *Physics Procedia*, 56, 854-864.
- [25] **Torkamany, M.J., Malek Ghaini, F. and Poursalehi, R.** (2014). Dissimilar Pulsed Nd:YAG Laser Welding of Pure Niobium to Ti-6Al-4V, *Materials and Design*, 53, 915-920.
- [26] **Kawano, S., Nakahigashi, S., Uesugi, K., Nakamura, H., Kono, W., Fukuya, K. and others** (1998). Weldability of Helium-Containing Stainless Using a YAG Laser, *Journal of Nuclear Materials*, 258-263, 2018-2022.
- [27] **Çavuşoğlu, N.** (2011). *DC04 Kalite Çelik ile 6061-T6 Alüminyum Alaşımları Sacların Lazer Bindirme Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Kaynaklı Birleştirmenin Mekanik ve Metalürjik Özellikleri Üzerine Etkisi*, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [28] **Buchfink, G.** (2007). *The Laser as a Tool – A Light Beam Conquers Industrial Production* (1. Baskı), Vogel Buchverlag, Würzburg
- [29] **Xu, W., Westerbaan, D., Nayak, S.S., Chen, D.L., Goodwin, F., Biro, E. and Zhou, Y.** (2012). Microstructure and Fatigue Performance of Single and Multiple Linear Fiber Laser Welded DP980 Dual-Phase Steel, *Materials Science and Engineering A*, 553, 51-58. doi:10.1016/j.msea.2012.05.091
- [30] **Chen, H., Pinkerton, A.J., Li, L., Liu, Z. and Mistry, A.T.** (2011). Gap-Free Fibre Laser Welding of Zn-Coated Steel on Al Alloy for Light-Weight Automotive Applications, *Materials and Design*, 32(2), 495-504. doi:10.1016/j.matdes.2010.08.034.
- [31] **Koleva, E. and Mladenov, G.M.** (2011). Experience on Electron Beam Welding, 95-133, *Practical Aspects and Applications of Electron Beam Irradiation*, M. Nemtanu ve M. Brasoveanu (Eds.), Transworld Research Network, Trivandrum, Hindistan.
- [32] **J. Beersiek**, On-line Monitoring of Keyhole Instabilities During Laser Beam Welding, 1. Baskı, Prometec GmbH, Aerchan, 1999.
- [33] **Karaaslan, A., Yumurtacı, S. ve Sönmez, N.** (2001). Lazer Işını ile Birleştirilmiş Farklı Malzemelerin Kaynak Dikişlerinde Sertlik Değişimleri, *II. Makine Malzemesi ve İmalat Teknolojisi Sempozyumu*, Manisa, Türkiye.
- [34] **Akman, E.** (2006). *Ti6Al4V Titanyum Alaşımlarının Atımlı Nd:YAG Lazeri Kullanılarak Kaynak Edilmesi ve Kaynak Parametrelerinin Belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- [35] **Çetin, Ş.** (2019). *Lazer Kaynağı ile Birleştirilmiş Yüksek Mukavemetli Çelik Sacların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- [36] **Palanivel, R., Dinaharan, I. and Laubscher, R.F.** (2020). Microstructure and Mechanical Behavior of Nd:YAG Laser Beam Welded High Strength Low Alloy Steel Joints, *International Journal for Light and Electron Optics*, 208, Makale No: 164050. doi:10.1016/j.ijleo.2019.164050
- [37] **Olsen, F.O.** (2009). *Hybrid Laser-Arc Welding*, Woodhead Publishing (CRC Press), Boca Raton.
- [38] **Kannatey-Asibu, E.** (2009). *Principles of Laser Materials Processing*, John Wiley & Sons, Inc.
- [39] **Schubert, E., Klassen, M., Zerner, I., Walz, C. and Sepold, G.** (2001). Light-Weight Structures Produced by Laser Beam Joining for Future Applications in Automobile and Aerospace Industry, *Journal of Materials Processing Technology*, 115(1), 2-8.
- [40] **Prakash, S. and Kumar, S.** (2017). Experimental and Theoretical Analysis of Defocused CO₂ Laser Microchanneling on PMMA for Enhanced Surface Finish, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 27, Makale No: 025003.
- [41] **TS EN 573-3.** (2008). *Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları – Biçimlendirilebilen Mamullerin Kimyasal Bileşimi ve Şekli – Bölüm 3: Kimyasal Bileşim*, Türk Standardı.
- [42] **Bilgin, M., Karabulut, Ş. ve Özdemir, A.** (2017). Alüminyum Magnezyum Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Kaynak Edilebilirliğinin Değerlendirilmesi, *Fen Bilimleri Dergisi, Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 5(2), 191-209.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Onur BAYRAM

Doğum tarihi ve yeri :

e-posta :

Öğrenim Bilgileri

| Derece | Okul/Program | Yıl |
|-----------|--|------|
| Y. Lisans | Balıkesir Üniversitesi/Makine Mühendisliği | 2025 |
| Lisans | Celal Bayar Üniversitesi/Makine Mühendisliği | 2021 |
| Lise | Rahmi Kula Anadolu Lisesi | 2016 |