



**OTOMOTİV UYGULAMALARINDA LAZER
KAYNAK PARAMETRELERİNİN MİKROYAPI VE
MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Adnan KARAAĞAÇLI

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ÇAKMAKKAYA

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Haziran 2019

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**OTOMOTİV UYGULAMALARINDA LAZER KAYNAK
PARAMETRELERİNİN MİKROYAPI VE MEKANİK
ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

Adnan KARAAĞAÇLI

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ÇAKMAKKAYA

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Haziran 2019

TEZ ONAY SAYFASI

Adnan KARAAĞAÇLI tarafından hazırlanan "Otomotiv Uygulamalarında Lazer Kaynak Parametrelerinin Milroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi" adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 13/06/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ÇAKMAKKAYA

Başkan : Doç. Dr. Ahmet KESKİN
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Bolu Teknik
Bilimler Meslek Yüksekokulu

Üye : Doç. Dr. Yusuf KAYALI
Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ÇAKMAKKAYA
Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi

İmza

.....
.....
.....

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve
.....sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. İbrahim EROL
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

13/06/2019



Adnan KARAĞAÇLI

ÖZET
Yüksek Lisans Tezi

**OTOMOTİV UYGULAMALARINDA LAZER KAYNAK PARAMETRELERİNİN
MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

Adnan KARAAĞAÇLI
Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ÇAKMAKKAYA

Bu çalışmada, otomotiv endüstrisinde lazer kaynak uygulamaları, lazer kaynak çalışma prensibi ve lazer kaynak parametrelerinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır. Lazer kaynağın başta güç, hız ve ışın boyu gibi temel parametreleri esas alınarak malzemelerin kaynak dikişine ve kesitine etki ve nüfuziyeti araştırılmıştır. Ayrıca Vickers Sertlik Testi ile bu parametrelerin malzemenin sertliğine etkisi analiz edilmiştir. Çalışmanın içinde ayrıca otomotiv endüstrisinde araç üretimindeki hafif malzemeler olan alüminyum alaşımlar, magnezyum alaşımları, titanyum alaşımları ve galvanizli çeliklerdeki kullanımına yönelik beklentileri hakkında yapılan çalışmalar değerlendirilmiştir. Galvanizli çeliğin lazer kaynağı, kaynak konfigürasyonunu değiştirerek, kalıp bileşimini değiştirerek, ve çinkoyu buharlaştırarak, galvanizli çelik kalitesinde kaliteyi iyileştirme çabaları değerlendirilmiştir. Bu malzemelerin lazerle kaynaklanması sırasında karşılaşılan mikro yapı değişiklikleri ve kusurları anlatılmış ve sertlik, kesme ve çekme kuvvetleri gibi kaynakların mekanik özellikleri araştırılmıştır.

2019, xi + 82 sayfa

Anahtar Kelimeler: Lazer kaynağı, lazer kaynak parametreleri, mikroyapı, mekanik özellikler, vickers sertliği, kusurlar.

ABSTRACT
M.Sc. Thesis

**EFFECT OF LAZER WELDING PARAMETERS ON MICROSTRUCTURE AND
MECHANICAL PROPERTIES IN AUTOMOTIVE APPLICATIONS**

Adnan KARAAĞAÇLI

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Automotive Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Mehmet ÇAKMAKKAYA

In this study, the effect of laser welding applications, laser welding and laser welding parameters on microstructure and mechanical properties were investigated in automotive industry. The effect and penetration of the welds and cross sections of the materials on the basis of basic parameters such as power, speed and beam length were investigated. Furthermore, the effect of these parameters on the hardness of the material was analyzed with Vickers Hardness Test. In the study, the studies on the expectations for the use in aluminum alloys, magnesium alloys, titanium alloys and galvanized steel, which are light materials in the production of vehicles in the automotive industry, have been evaluated. Efforts to improve the quality of galvanized steel were evaluated by changing the welding configuration of the galvanized steel, changing the welding composition, changing the mold composition, and evaporating the zinc. The microstructure changes and defects encountered during laser welding of these materials are described and the mechanical properties of sources such as hardness, cutting and tensile forces are investigated.

2019, xi + 82 pages

Key Words: Laser welding, laser welding parameters, microstructure, mechanical properties, hardness vickers, defects.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım boyunca beni yönlendiren, çalışmalarımda yorum ve öngörleriyle daima bana ışık tutan, yardımlarını benden hiçbir zaman esirgemeyen, danışman hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ÇAKMAKAYA' ya teşekkürü borç bilirim.

Deney için kullandığım numunelerin lazer kaynak ile birleştirilmesinde bana gösterdikleri yardımlardan dolayı BURSA/Nilüfer'deki LAZERMİK KAYNAK' firmasındaki Selim BİLEN'e ve laboratuvar da metalografik çalışmalarım süresince bana destek olan Afyon Kocatepe Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliğinde görev alan Araş. Gör. Sinan ATLI' ya şükranlarımı sunarım.

Tüm yaşamım süresince her zaman ve şart altında maddi-manevi her türlü desteği bana sağlayan kıymetli aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

Adnan KARAAĞAÇLI

AFYONKARAHİSAR, 2019

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
RESİMLER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2 LİTERATÜR ÖZETİ	2
2.1 Lazer Kaynağı Tarihçesi, Tanımı, Türleri ve Otomotivde Uygulamaları	2
2.1.1 Lazer Kaynağı.....	2
2.1.2 Lazer Fiziği.....	3
2.1.2.1 Kendiliğinden Emisyon	3
2.1.2.2 Yutma.....	4
2.1.2.3 Tahrik Edilmiş Emisyon	4
2.1.3 Lazer Dalga Boyu Diyagramı.....	6
2.1.4 Lazer Türleri.....	6
2.1.4.1 Optik Pompalamalı Katı Lazerler	6
2.1.4.2 Sıvı Lazerler.....	7
2.1.4.3 Boyar Maddeli Lazerler	7
2.1.4.4 Dinamik Gaz Lazerleri.....	8
2.1.4.5 Kimyasal Lazerler	8
2.1.4.6 Yarı İletken Lazerler	8
2.1.4.7 Lazerlerin Yükselteç ve Osilatör Olarak Kullanılması	9
2.1.4.8 Kısa Güçlü Darbeler Üreten Lazerler	9
2.1.4.9 Ayarlanabilir Lazerler	10
2.1.4.10 Katı Hal Lazerleri	10
2.1.4.11 Gaz Lazerleri.....	12
2.1.4.12 Serbest Elektronlu Lazerler	13
2.1.5 Lazer Kaynak Yöntemi.....	13
2.1.6 Lazer Kaynak İşleminin Diğer Kaynaklara Olan Üstünlükleri	15
2.1.7 Otomotiv Endüstrisinde Lazer Uygulamaları.....	16

2.1.7.1 Markalama (İşaretleme) / Kazıma	18
2.1.7.2 Lazer Kaynak	18
2.1.7.3 Lazer Kesim	19
2.1.7.4 Lazer - Ultrasonik Testler	22
2.2. Lazer Kaynak Parametrelerinin Kaynak İşlemine Etkisinin İncelenmesi	23
2.2.1 Lazer Işını	24
2.2.2 Kaynak Parametreleri	26
2.2.3 İş Parçası	27
2.2.4 Lazer Kaynağında Kullanılan Gazlar	27
2.3 Otomotiv Endüstrisinde Lazer Kaynak Teknolojisinin Beklentileri	28
2.3.1 Alüminyum Alaşımlarının Lazerle Kaynaklanması	30
2.3.1.1 Mikroyapı	31
2.3.1.2 Sertlik ve Çekme Özellikleri	31
2.3.1.3 Kusurlar	32
2.3.2 Galvanizli Çeliklerde Lazer Kaynağı	35
2.3.2.1 Kimyasal Bileşimdeki Değişim	37
2.3.2.2 Çinko Kaplamanın Çıkarılması	38
2.3.3 Magnezyum Alaşımlarının Lazerle Kaynaklanması	39
2.3.3.1 Mikroyapı	39
2.3.3.2 Sertlik ve Çekme Özellikleri	40
2.3.3.3 Kusurlar	42
2.3.4 Titanyum Alaşımlarının Lazer Kaynağı	44
2.3.4.1 Mikroyapı	45
2.3.4.2 Sertlik ve Çekme Özellikleri	48
2.3.4.3 Kusurlar	50
2.3.5 Farklı Malzemelerin Lazer Kaynağı	52
2.3.5.1 Tek Lazer Işın Kaynağı	54
2.3.6 Genel Araştırma Sonuçları	55
3. MATERYAL ve METOT	58
3.1 Spektral Analiz Sonuçları	58
3.2 Malzemelerin CO ₂ Lazer Kaynağı ile Birleştirilmesi	58
3.3 Numunelerin Su Jeti ile Kesimi	60
3.4 Metalografik Çalışmalar	60
3.4.1 Kesme İşlemi	60

3.4.2 Bakalite Alma İşlemi.....	61
3.4.3 Zımparalama İşlemi.....	62
3.4.4 Dağlama İşlemi.....	63
3.4.5 Parlatma İşlemi.....	63
3.4.6 Vickers Sertlik Testi.....	63
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	66
4.1 Mikroyapı Görüntü Çalışmalarının Analizi.....	66
4.1.1 Kaynak İlerleme Hızı ve Lazer Gücü Parametrelerinin Kaynak Dikişine Etkisi.....	66
4.1.2 Kaynak İlerleme Hızı ve Lazer Gücü Parametrelerinin Kaynak Kesitine Etkisi.....	69
4.2 Vickers Sertlik Testi Ölçümleri.....	72
4.2.1 Hız Parametresi Sertlik Değerlerinin Grafikselleştirilmesi.....	73
4.2.2 Güç Parametresi Sertlik Değerlerinin Grafikselleştirilmesi.....	75
5. SONUÇLAR.....	77
6. KAYNAKLAR.....	78
ÖZGEÇMİŞ.....	82

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

CO	Karbondioksit(Lazer tipi)
E(1,2,3)	Lazer fiziği enerji seviyeleri
Nd:YAG	Neodime katkılanmış, İtrium-Alüminyum-Granat(Lazer tipi)
T	İş parçasının kalınlığı
W	Lazer gücü
V	Kaynak ilerleme hızı

Kısaltmalar

DH	Düşük hız
DG	Düşük güç
EB	Ergime bölgesi
EM	Esas metal
FZ	Füzyon zone(Füzyon bölgesi)
HAZ	Heat affect zone(Isı altındaki bölge)
HV	Hardness vickers(Sertlik değeri)
ITAB	Isı tesiri altındaki bölge
OG	Orta güç
OH	Orta hız
YG	Yüksek güç
YH	Yüksek hız

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Kendiliğinden emisyon.	4
Şekil 2.2 Yutma	4
Şekil 2.3 Tahrik edilmiş emisyon.	5
Şekil 2.4 Lazer olayının şematik gösterimi.	5
Şekil 2.5 Dalga boyları ve lazerin yeri	6
Şekil 2.6 a) Yarı iletken lazer görünümü, b) Yarı iletken lazer oluşumu.....	9
Şekil 2.7 Anahtar deliği sistematik şema gösterimi.	14
Şekil 2.8 İletimsel lazer kaynağı şema gösterimi.	15
Şekil 2.9 Bir otomobil aracında lazer uygulamalarının kullanım parçalarından bazıları.	17
Şekil 2.10 Lazer kesim tezgâhı ana parçaları.	21
Şekil 2.11 Lazer ışın cihazının şematik yapısı.	24
Şekil 2.12 Odak (focus noktası) görseli.	25
Şekil 2.13 Lazer frekansı.....	25
Şekil 2.14 Nozzle görseli.	26
Şekil 2.15 Lazer ışın gücü etkisi.	26
Şekil 2.16 AA7075-T561'in mikro sertlik profilleri.....	31
Şekil 2.17 Anahtar deliği çap ölçümü ve kare numarası (a) DP 590 çelik, (b) galvanize DP 590 çelik.	36
Şekil 2.18 Mikro sertlik profili (a) Fiber lazerle kaynaklı AZ31B-H24 alın derzleri. (b) Fiber lazer kaynaklı ekstrüde edilmiş AZ31 alın derzleri.	41
Şekil 2.19 Bir fiber lazerin ürettiği AZ31'in mikroyapısı.	42
Şekil 2.20 30 dakika boyunca 1050 ° C'de muamele edilen Ti-6Al – 4V β çözeltisi için şematik sürekli soğutma diyagramı.....	46
Şekil 2.21 Ti6Al4V kaynağındaki (a) FZ, (b) HAZ, (c) kaynak enine kesit, (d) ana metaldeki bölgelerin mikroyapıları.	47
Şekil 2.22 Ti ₆ Al ₄ V kaynağının ortalama mikro sertlik değerleri	48
Şekil 2.23 “Ön-tümsek” rejiminin eriyik havuzu akışının taslağı, sonuçta azalmaya neden olur.	51
Şekil 3.1 Vickers sertlik testi geometrik hesabının formülize edilmesi.	63
Şekil 3.2 Vickers sertlik test cihazı (a) ve nokta alınan yerin grafiksel görüntüsü (b). .	65
Şekil 4.1 St 6222 çeliği numunelerinde kaynak ilerleme hızı parametresinin kaynak dikişine etkisi; a) Yüksek, b) Orta, c) Düşük.	67

Şekil 4.2 St 6222 çeliği numunelerinde lazer gücü parametresinin kaynak dikişine etkisi; a) Yüksek, b) Orta, c) Düşük.....	67
Şekil 4.3 DP 600 çeliği numunelerinde kaynak ilerleme hızı parametresinin kaynak dikişine etkisi; a) Yüksek, b) Orta, c) Düşük.	68
Şekil 4.4 DP 600 çeliği numunelerinde lazer gücü parametresinin kaynak dikişine etkisi; a) Yüksek, b) Orta, c) Düşük.....	68
Şekil 4.5 St 6222 çeliği numunelerinde kaynak ilerleme hızı parametresinin kaynak kesitine etkisi; a) Yüksek, b) Orta, c) Düşük.	70
Şekil 4.6 St 6222 çeliği numunelerinde lazer gücü parametresinin kaynak kesitine etkisi; a) Yüksek, b) Orta, c) Düşük.	70
Şekil 4.7 DP 600 çeliği numunelerinde kaynak ilerleme hızı parametresinin kaynak kesitine etkisi; a) Yüksek, b) Orta, c) Düşük.	71
Şekil 4.8 DP 600 çeliği numunelerinde lazer gücü parametresinin kaynak kesitine etkisi; a) Yüksek, b) Orta, c) Düşük.	72
Şekil 4.9 Üzerinden 3 farklı akne bölgesinin alındığı örnek bir kaynak kesiti numunesi.	72
Şekil 4.10 Hız parametresinin mikrosertliğe etkisi; St 6222 çeliği numuneleri.....	74
Şekil 4.11 Hız parametresinin mikrosertliğe etkisi; DP 600 çeliği numuneleri.....	74
Şekil 4.12 Lazer gücü parametresinin mikrosertliğe etkisi; St 6222 çeliği numuneleri.	76
Şekil 4.13 Lazer gücü parametresinin mikrosertliğe etkisi; DP 600 çeliği numuneleri.	76

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1 HD-F/L Lazer ana parçalarının listesi.....	22
Çizelge 2.2 Fe-Al intermetalik bileşiklerin mekanik özellikleri.	53
Çizelge 3.1 St-6222 çeliğin malzeme bileşimi.	58
Çizelge 3.2 DP 600 çeliğin malzeme bileşimi.	58
Çizelge 3.3 Kullanılan kaynak parametre değerleri.	59



RESİMLER DİZİNİ

Sayfa

Resim 3.1 Sırasıyla; a) Yüksek, b) Orta ve c) Düşük parametreleriyle birleştirilmiş 2 farklı malzeme.	59
Resim 3.2 Sırasıyla; yüksek a) Yüksek, b) Orta ve c) Düşük parametreleriyle birleştirilmiş 2 farklı malzeme.	59
Resim 3.3 Değerlerin autocad programına girilmesi (a), kaynak parçalarının Su-Jeti ile kesimi (b), kesimden sonra parçaların durumu (c).	60
Resim 3.4 Kesim makinesinde örnek bir numunenin kesilmesi.	61
Resim 3.5 Polyester ve kürleyicisinin hazırlanması (a), hazırlanmış numunelere dökülmesi (b), bir numunenin yakın görünüşü (c) ve numunelerin hazır hali (d).	62
Resim 3.6 Parlatma sıvısı ile parlatma.	63

1. GİRİŞ

Günümüz teknolojisiyle birlikte halen gelişmekte olan özel bir birleştirme veya kesme yöntemi olan lazer teknolojisi yüksek enerjiye sahip ışınlar ile malzemelerin ergitilmesi prensibine dayanan bir birleştirme yöntemidir. Yüksek enerjili ışınlar istenilen oranlarda işlem yapılacak malzemeler üzerine yansıtılarak başarılı bir işlem yapılabilmektedir. Düşük ısı girdisi ile dar ITAB bölgesi, düşük distorsiyon olasılığı, derin nüfuziyet ve yüksek dayanım kabiliyetinden dolayı büyük öneme sahip olan lazer teknolojisi otomotiv sektöründe tercih edilme sebeplerinden başlıcalarıdır.

Yüksek hacimli araç üretiminde hafif malzemelerin (alüminyum alaşımlar, magnezyum alaşımları ve titanyumiller) kullanımına yönelik beklentiler tartışılmıştır. Galvanizli çeliğin lazer kaynağı, galvanizli çeliğin dirençli punta kaynağına, kaynak konfigürasyonunu değiştirerek, kalıp bileşimini değiştirerek, nabız lazeri kullanarak ve çinkoyu çıkararak, galvanizli çelik kalitesinde kaliteyi iyileştirme çabaları ile birleştirilmiştir. Bu tekniklerin endüstriyel kurulumda uygulanmasının fizibilitesi tartışılmaktadır. Bu malzemelerin lazerle kaynaklanması sırasında karşılaşılan mikroyapı değişiklikleri ve kusurları anlatılmış ve sertlik, kesme ve çekme kuvvetleri gibi kaynakların mekanik özellikleri incelenmiştir.

Bu çalışmada lazer kaynak parametrelerinin otomotiv endüstrisinde kullanılan St 6222 çeliği, Çift Fazlı çelikler (DP)'in metal alaşımları üzerindeki dayanım ve mikroyapı özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır.

Bu tez çalışmasının amacı; Lazer kaynağın başta güç, hız ve ışın boyu gibi temel parametreleri dikkate alınarak malzemelerin kaynak dikişine ve kesitine etkilerini araştırmak, bu parametrelerin ITAB ve EB' nde Vickers sertliği yönünden değerlendirilip ideal kaynak parametreleri için öneri sunmaktır.

Lazer kaynak parametrelerinin otomotiv endüstrisinde kullanılan temel metal ve alaşımları üzerindeki dayanım ve mikroyapı özellikleri üzerine etkisini değerlendirmektir.

2 LİTERATÜR ÖZETİ

2.1 Lazer Kaynağı Tarihçesi, Tanımı, Türleri ve Otomotivde Uygulamaları

2.1.1 Lazer Kaynağı

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation kelimelerinin baş harfleri birleştirilerek Lazer ışını ile kaynak (Laser beam welding), kesme ve işleme; konsantre edilmiş enerji ışınlarının (elektron ışın, plazma jet vb) kullanılma yöntemlerinden bir tanesidir. Lazer tek bir dalga boyuna sahip yapışık ve yüksek bir ışıktır, atomik enerjinin elektro manyetik enerjiye dönüşümünü sağlar (Tunç 2015).

Bilim ve Mühendislik tarihinde lazerin gelişimi heyecan verici bir bölümdür. Aşılmamış çeşitlilikteki alanlarda kullanılan cihazların geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Lazer tarihine 1917, Albert Einstein ile başlanabilir. Einstein teorik olarak uyarılmış ışınım kavramını geliştirmiştir. Uyarılmış ışınım kavramı lazerde kullanılan bir fenomendir. Uyarılmış ışınım ışığın yükseltilmesini sağlayıp, yüksek yoğunluktaki lazer ışığının elde edilmesini sağlar. Uyarılmış ışınım prosesinin esas doğası Einstein tarafından teorik olarak açıklanmıştır (Öner 2007).

Lazer kaynağı, lazer ışının yönlendirilmesi ile yüksek miktardaki enerjiyi küçük noktalara odaklayabilen, otomotiv, beyaz eşya, elektronik, kalıpcılık ve buna benzer yüksek adetlerde üretim yapılan pek çok sektörde yaygınlaşmaya başlayan görece yeni ve ileri kaynak yöntemidir (Püskülcü ve Koçlular 2009).

Lazer ışınının meydana gelmesi, dışarıdan maddeye sağlanan bir uyarıcı faktör sayesinde uyarılmış olan maddenin kendi etrafına fotonlar yayması prensibine dayanır. Maddeden yayılan bazı fotonların yansıma yapması nedeniyle aynı maddenin içindeki atomların bir kısmına çarpması sonucu yeni fotonların meydana gelmesine neden olur. Sürekli zincirleme olarak meydana gelen bu tepkimenin devam etmesi sonucunda yoğun ve aynı zamanda yönlendirilebilir lazer ışını meydana gelir.

Lazer ışınları, IR dalga boylarından, mor ötesi ışınlarına kadar, şiddeti arttırılmış, aynı frekansta ve aynı faza sahip ışınımın oluşturduğu ışın demetleridir. Böylece lazer sistemleri depolanan ışın demetlerini diğer ışın türlerine nazaran daha az kayıpla, daha uzun mesafelere taşıma kabiliyetine sahiptirler (Csele 2004). Lazerler bu özelliklerinden dolayı oldukça geniş bir uygulama sahasına sirayet etmiştir.

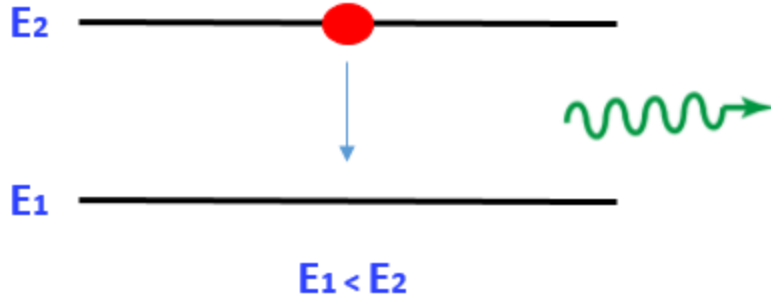
2.1.2 Lazer Fiziği

Bir maddenin E_1 ve E_2 ($E_1 < E_2$) 'den oluşan iki farklı enerji seviyesine sahip olduğunu farz edersek, atomu sahip olduğu düşük E_1 enerji mertebesinde daha büyük olan E_2 enerji mertebesine ulaştırmak istediğimizde uyarılmaya gereksinim duyulacaktır. Uyarılma ise aşağıda mevcut olan koşullardan birinin aracılığıyla ancak gerçekleşebilir:

- Isı verilerek
- Basınç uygulanarak,
- Hızlı Elektron bombardımanına tutularak,
- Hızlandırılmış parçacıkların bombardımanı ile,
- Bir ışık demetinin etkisi altında bırakılarak (Uzun (2010)).

2.1.2.1 Kendiliğinden Emisyon

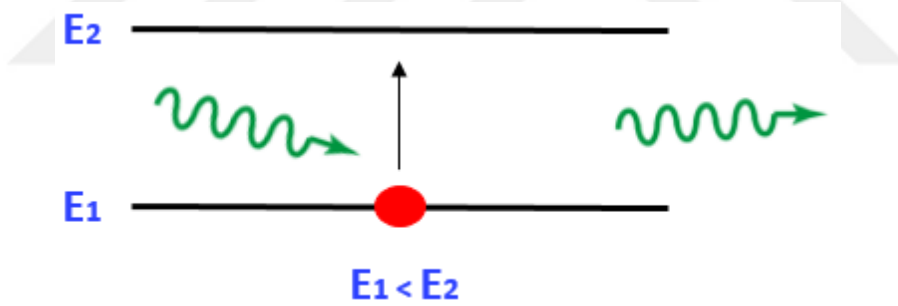
Yukarıdaki söz konusu uyarıcıların herhangi biri aracılığıyla uyarılan atom tekrar düşük enerji seviyesi olan E_1 'e inme eğilimi gösterir. E_1 ile E_2 enerjileri arasındaki fark ortama salındığı zaman, atomun enerjisi dışarıya foton şeklinde salınacaktır (Şekil 2.1). Bu gerçekleşen olaya kendiliğinden emisyon denilmektedir (Altıntaş 2018).



Şekil 2.1 Kendiliğinden emisyon (Tarakçıoğlu ve Özcan 2004).

2.1.2.2 Yutma

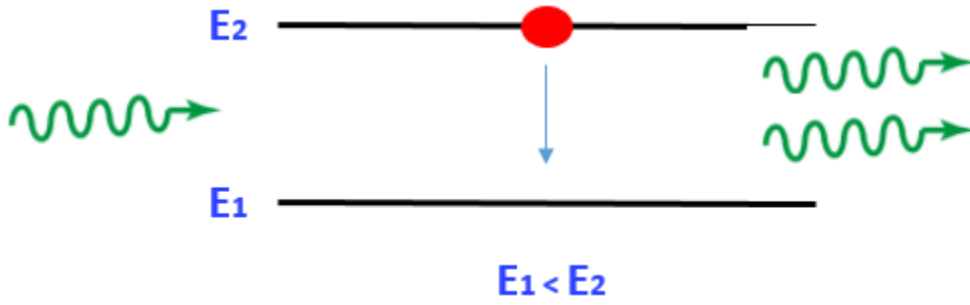
E_1 düşük enerji mertebesindeki atoma bir fotonun çarpması durumunda ise, atom çarpan fotonun enerjisini yutar. Atom fotondan elde ettiği bu enerjinin sayesinde E_2 yüksek enerji mertebesine ulaşır. Foton tarafından atoma aktarılan bu enerji atomun enerji seviyelerinde fark yaratacak ve foton şeklinde dışarıya salınacaktır (Şekil 2.2). Gerçekleşen bu olay da yutma olarak tanımlanır.



Şekil 2.2 Yutma (Tarakçıoğlu ve Özcan 2004).

2.1.2.3 Tahrik Edilmiş Emisyon

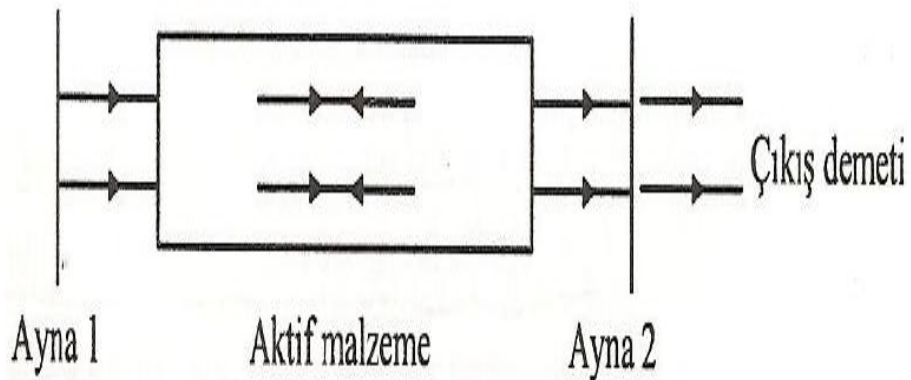
Lazer oluşumuna sebep olan son etken tahrik edilmiş emisyonudur. E_2 yüksek enerji mertebesinde bulunan atom foton çarpması sonucu E_1 düşük enerji seviyesine inmesi sonucu, tam bu sırada çarpan elektromanyetik dalganın enerjisine enerji seviyelerinin farkı(E_2-E_1) eklenmiş olacaktır ve ayrıca atoma giren her fotona karşı 2 tane foton dışarıya salınır (Şekil 2.3) (Tarakçıoğlu ve Özcan 2004).



Şekil 2.3 Tahrik edilmiş emisyon (Tarakçıoğlu ve Özcan 2004).

Lazer’ den ışın demeti sağlayabilmek için aşağıdaki üç koşulun mevcut olması gerekir:

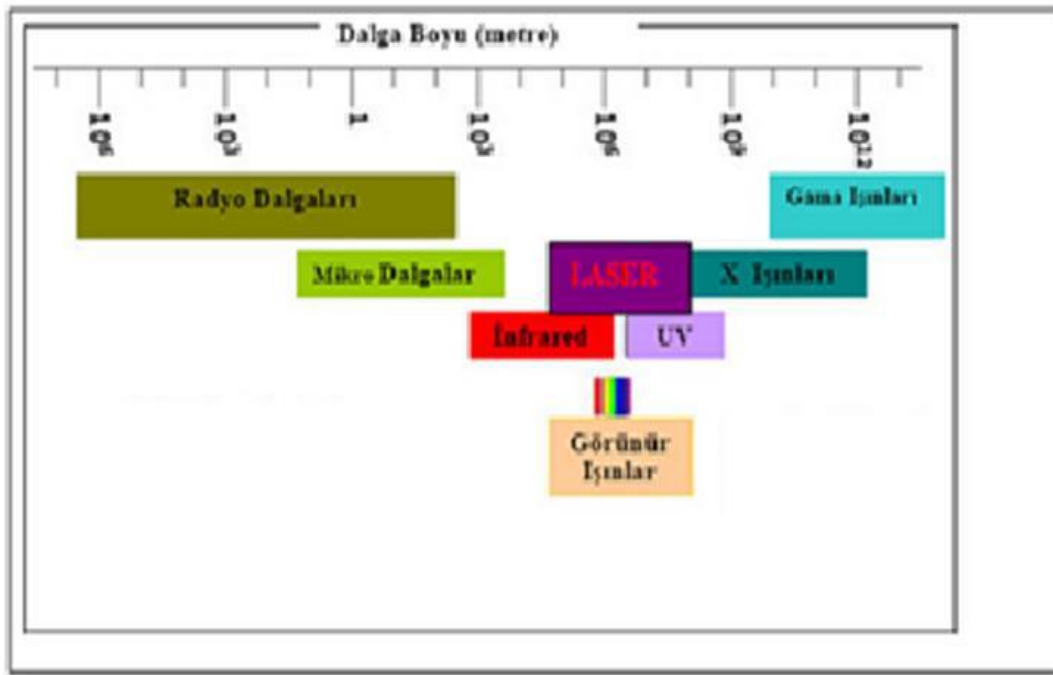
- Sistem, nüfus tersleme durumunda olmalı, şöyle ki uyarılmış atom sayısı tabandaki halinden çok daha fazla olması gerekir.
- Uyarılan sistemin hali yarı kararlı bir halde bulunmalıdır. Yarı kararlı bir haldeyken, uyarılmış ışımaya kendiliğinden ışımadan daha önce meydana gelir.
- Yayılan fotonların sistem içerisinde, öteki uyarılmış atomlardan ışımaya sebep olacak kadar uzun süre bekletilmelidir. Bu olay, yansıtıcı aynalar sayesinde gerçekleşir. Sistemin ucuna yerleştirilen yansıtıcı aynaların, bir ucu tamamen yansıtıcı diğer ucu ise yarı geçirgen olarak lazer demetinin çıkışını sağlayacak şekilde yarı geçirgen tasarlanır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 Lazer olayının şematik gösterimi (Tarakçıoğlu ve Özcan 2004).

2.1.3 Lazer Dalga Boyu Diyagramı

Dışarıdan verilen bir enerji ile elektronun kararlı bir yörüngesinden uyarılıp daha üst bir yörüngeye geçip, yeniden kararlı durumuna geçmesi esnasında elektron, aldığı enerjiyi tekrar dışarı yaymaktadır. Bu sırada oluşan ışımalarda dalga boyları meydana gelmektedir (Metiner H.(1995) Işıma anında dalga boyları ve lazerin yeri Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5 Dalga boyları ve lazerin yeri (Erdoğan 2007).

2.1.4 Lazer Türleri

2.1.4.1 Optik Pompalamalı Katı Lazerler

Lazer etkisinin oluşması için atomları uyararak yüksek enerji düzeylerine çıkmalarını sağlamanın yollarından biri lazerde kullanılan maddeye, bu maddenin yayacağı ışığın frekansından daha yüksek frekanslı ışık düşürmektir. Optik pompalama olarak adlandırılan bu sürecin verimi düşük olduğundan güçlü bir pompalama gerçekleştirilmesi gerekir. Optik pompalamalı lazerde uygun malzemedan yapılmış bir çubuk bulunur; bu çubuğun uçları düz ve birbirine paralel olacak biçimde parlatılmış ve

lazer ışığının yansıyabilmesi için ayna ile kaplanmıştır. Çubuğun yan çeperi saydamdır, böylece pompalayıcı lambadan gelen ışığın çubuğun içine girmesi sağlanır. Pompalayıcı lamba darbeli çalışan bir gaz boşalmalı lamba (fotoğrafçılıkta kullanılan elektronik flaş lambasının benzeri) olabilir; bu lamba çubuğun çevresine sarılmış olabileceği gibi, çubuğun yanına boylamasına yerleştirilmiş ya da ışığının bir ayna aracılığıyla çubuğa odaklanması sağlanmış olabilir. Pembe yakut kullanılmıştır. Sonraları birçok toprak elementleri kullanılmıştır. En yaygın kullanılan element neodimdir. Bu tür lazerden çok güçlü ışık çakımları biçiminde binlerce watt'lık güçler elde edilebilir (Tunç 2015).

2.1.4.2 Sıvı Lazerler

Katı lazerlerin bir sakıncası yüksek güçte çalışırken malzeme içinde oluşan ya da pompalama lambasından kaynaklanan çok büyük ısının etkisiyle zaman zaman kırılma ve hasar ortaya çıkmasıdır. Sıvı lazerlerde, kristal ya da camsı çubuk yerine saydam bir bölme içine konmuş uygun bir sıvı (ör. Neodim oksit ya da neodim klorürün selenyum oksiklorürdeki eriyiği) kullanılır. Sıvının içine konduğu bölme istenildiği kadar büyük yapılabilir, böylece yüksek güçlerin elde edilmesi olanaklı olur. Ne var ki inorganik sıvıların pek azı lazerlerde kullanılmaya elverişlidir (Tunç 2015).

2.1.4.3 Boyar Maddeli Lazerler

Organik boyarmaddelerin bir kısmı kendilerine düşen ışığı farklı bir renk ile yeniden yayımlayarak flüorışım özelliğine sahiptir. Boyarmaddelerin atomları uyarılmış durumda kalma süreleri çok kısadır ve yayımlanan ışığın dar bir şeritte toplanması mümkün değildir. Buna rağmen boyarmaddelerin lazerlerde kullanılmasının temel sebebi geniş bir frekans aralı özeğliğine sahip olmasıdır. Turuncu-sarı bir ışık yayan rodamin 6G gibi boyarmaddeler farklı bir lazer ile uyarılması durumunda lazer etkisi gösterir. Rodamin 6G, ışığı darbeler şeklinde değil de devamlı olarak bir demet olarak vermesinden dolayı ilk lazerin oluşturulmasında faydalanan bir boyarmaddedir. Bu şekilde frekansı kolayca ayarlanabilen bir lazer demeti elde etmek mümkün olmuştur.

Bir diğ er boyarmadde olan metiliumbelliferon ise, hidroklorik asitle karış tırılması durumunda ış ık tayfinin mor otesinden sarı renge kadar varan bölgede lazer etkisi gösterir. Sonuçta, tayfin bu bölgesinde arzu edilen dalga boyunda lazer ış ığı elde etmek mümkün olur.

2.1.4.4 Dinamik Gaz Lazerleri

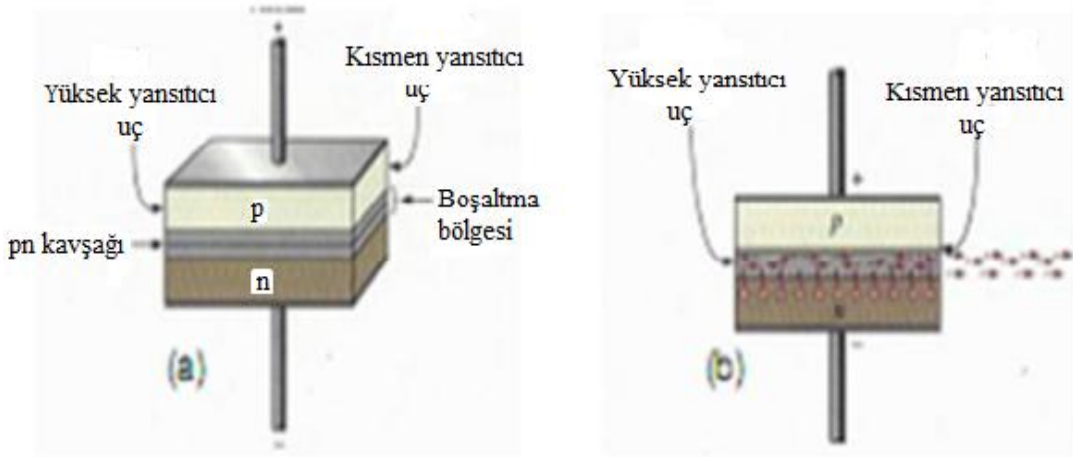
Sıcak bir gaz hızla soğutulursa, alçak enerji düzeylerinin birindeki moleküllerin sayısı daha hızlı azalıp yüksek bir düzeydeki moleküllerin sayısının altına düşebilir. Bu durumda lazer etkisi ortaya çıkar. Bu koşul, yanmakta olan ve azotla karış tırılmış karbon monoksitin bir jet (fiş ırma) memesinden çıkarken birden genleşmesi sırasında sağlanabilir. Böyle bir lazerden 30.000 W'ın üstünde yüksek g  ler elde edilebilmiştir ( elik 1998).

2.1.4.5 Kimyasal Lazerler

Kimyasal tepkimelerin bir kısmında, lazer etkisine neden olabilecek kadar k fi sayıda yüksek enerjiye sahip atomlar meydana gelebilir.  rnek olarak, hidrojen fl or r oluşturmak için hidrojen ve flüor elementlerinin tepkimeye girmesi durumunda ortamda bulunan CO₂ gazında lazer etkisi görülür. Bu tip lazer sistemlerde düşük miktarda kimyasal madde kullanıp, çok yüksek enerjiler elde etme imkanı olanaklıdır ( elik 1998).

2.1.4.6 Yarı İletken Lazerler

Yarı iletken lazerde farklı türden katkılanmış iki yarı iletken madde düz bir bitişim oluşturacak biçimde yan yana getirilmiştir. Bu şekilde oluşturulmuş sisteme yüksek şiddette bir elektrik akımı verilirse eklem bölgesinde lazer ış ığı meydana gelir. Yarı iletken lazerlerin; çıkış g  lerinin sınırlı olması, maliyetinin az olması, ufak boyutta olmaları ve yüksek verimliliğ e sahip olmaları sebebiyle kısa erimli iletişimde (telefon, televizyon vb.) ve uzaklık  l me aygıtlarında kullanılmaktadır ( ner 2007). Yarı iletken lazer oluşumu ve görünümü şekil 2.6' da gösterilmiştir.



Şekil 2.6 a) Yarı iletken lazer görünümü, b) Yarı iletken lazer oluşumu (Öner 2007).

2.1.4.7 Lazerlerin Yükselteç ve Osilatör Olarak Kullanılması

Lazerlerin çoğunda etkin malzeme uzun ve dar bir sütun biçimindedir, bunun iki ucuna birbirine bakan birer ayna yerleştirilmiştir. Aynalar kaldırılırsa bu aygıt, güçlü bir lazer demetini yükselterek daha da güçlü bir lazer demeti oluşturmak amacıyla kullanılabilir. Aynaların varlığı ise aygıtın bir osilatör (titreşim üretici) olarak çalışması sonucunu doğurur (Öner 2007).

2.1.4.8 Kısa Güçlü Darbeler Üreten Lazerler

Yükselteç olarak çalışan sütun ile iki uçtaki aynalar arasına yerleştirilen bir engelleyici (obtüratör) kapalıyken lazer etkisi oluşmaz. Lazer etkisinin oluşması için ihtiyaç duyulan şartlar yerine getirilmişken engelleyicinin birden açılması, sütunda depolanmış haldeki enerjinin, saniyenin çok küçük bir kesri kadar süren ve tepe gücü birkaç yüzbin kilowatt' a kadar çıkabilen aşırı güçlü bir ışık darbesi şeklinde ortaya çıkmasına neden olur. Gerçekleşen bu olay "Q anahtarlama" tanımlanmaktadır. Q anahtarı mekanik bir engelleyici olabilir; fakat genellikle normal durumda ışık geçirmeyen, bir elektrik darbesi uygulandığında ise saydam duruma geçen sıvı ya da katı bir optik engelleyici kullanılmaktadır. Normal şartlarda ışığı geçirmeyen, ancak üstüne lazer ışığı vurulduğunda saydamlaşan boyar maddelerden de engelleyici olarak faydalanılabilir (Öner 2007).

Bir lazer genelde birkaç farklı kipte birden (bir başka deyişle, farklı frekanslarda) titreşim yapar. Bu kipler kip kilitlenmesi denen bir metotla eş zamanda ayarlanabilir. Bu metotla daha güçlü ve daha kısa süreli darbeler sağlamak mümkündür. Oluşan bu darbeler ile çok hızlı delik açmak gibi uygulamalarda faydalanılır. İşlemin sağladığı bir avantaj da çok kısa sürede yapılmasından dolayı deliğin etrafındaki malzemenin hasar görmemesidir. Bu tür ışık darbeleri bilimsel araştırmalarda da kullanılmaktadır (Öner 2007).

2.1.4.9 Ayarlanabilir Lazerler

Bilimsel araştırmaların dikkatini çeken önemeli bir husus olan lazerin değişik frekanslara ayarlanabilmesi, lazer çeşitleri arasında çok geniş bir frekans aralığında çalışabilen boyar maddeli lazerler sayesinde. Aynalardan biri yerine sadece belli bir frekanstaki ışığı yansıtan bir ayna (ör. bir kırınım ağı) yerleştirilerek istenen dalga boyu tayin edilir. Kimi katı lazerlerde, sıcaklık ve kristalin yönlenişini değiştirip, dar bir frekans bölgesi içinde düzenlemek mümkündür. Bazı lazerler ise, harmonikler (gelen lazer demeti frekansının tamsayı katları frekanslı demetler) üretebilir. Bu niteliğe sahip lityum iyodat kristalinden faydalanılarak, kızılötesi ışıınımdan sudan daha rahat geçebilen yeşil lazer ışığı sağlanır.

2.1.4.10 Katı Hal Lazerleri

Kullanılan ilk gereç yakuttur (1960). Bu, % 0.05 oranında üçdeğereli krom iyonları (Cr^{+++}) içeren, saydam bir Al_2O_3 alümina kristalidir. Krom iyonlarının enerji düzeylerinin konumu nedeniyle nüfus evirtimine olanak verir. Uygulamada, yapay yakutlardan yontulmuş çubuklar kullanılır. Yayım dalga boyu, kızıl bölgede 694.3nm'dir. Başboş çalışmada bir yakut lazeri 30–40 kW, darbeli çalışmada ise 30 ile 100 MW arası güç sağlar. Neodimli cam, yakut lazerlerinden birkaç yıl sonra ortaya çıkmıştır. Burada, neodim iyonlarıyla (Nd^{+++}) katkılanmış biçimsiz bir malzeme (cam) söz konusudur. Bu, 1060 nm de (yakın kızılötesi) yayım yapan, 4 düzeyli bir malzemedir. Neodimli cam lazerleri yalnızca darbelidir. Bunların birbirinden oldukça farklı iki türü vardır. Askeri uzaklık ölçümde kullanılan küçük lazerler ve plazmaları,

çekirdek kaynaşmalarını incelemeye kullanılan yüksek güçlü lazerler. İkinci tür lazerler bir lazer yükselteçleri bataryası biçimindedir. YAG (İtriyum Alüminyum Granat) neodime katkılanmış ve aynı dalga boyu üzerinden yayım yapan bir itriyum ve alüminyum grenasıdır. Bu gereç sürekli ya da darbeli bir çalışmaya olanak verir. Erbiyum yâda holmiyum iyonları gibi başka malzemeler üzerinde de incelemeler yapılmaktadır.

Dalga boyu yaklaşık 170 nm 3900 nm arasında değişebilen katı hal lazerleri, Lazer kaynak uygulamalarında en sık tercih edilen ışıklardan biridir.

Sistemin ana elemanları şunlardır;

- Lazer Üretici: Nd:YAG (Lazer aracı olarak içerisinde neodinyum (Nd^{+3}) aktif elementini barındıran YAG (İtriyum Aluminium Garnet) suni kristali kullanılmaktadır. YAG kelimesinin açılımı İtriyum-Alüminyum-Granat' tır ve kimyasal formülü de $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 'dir. Daha önceleri $\text{Y}_3\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ (YGaG), $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (GdGaG) alaşımlarında kullanılmış, en düşük optik kayıplara YAG ile ulaşılmıştır. Dalga boyu 1,06 μm olan ışınım yaymaktadır. YAG'ın lazer üretiminde kullanılmasının sebebi; oldukça sert, dayanıklı, iyi optik özelliklere ve iyi ısı iletkenliğe sahip olmasıdır. Ayrıca Neodinyum oranı arttırıldıkça uyarılmış emisyon olayının zamanında bir azalma olduğu gözlenmiştir. Bunun sebebi Nd iyonlarının birbirleriyle reaksiyonudur.), Nd:CAM, alexandrite, zümrüt, Cr:safir, Ti:safir ve içerisinde üç değerlikli Nd^{+3} , Ho^{+3} , Gd^{+3} , Tm^{+3} , Er^{+3} , Pr^{+3} elementleri bulunan cam.
- Optik Pompalama Kaynağı
- Resonatör
- Odaklama Optik Elemanları: Arka Tam Yansıtıcı Ayna, Ön Kısmi Yansıtıcı Ayna, Mercekler (Çelen 2006).

2.1.4.11 Gaz Lazerleri

Genellikle ortam bir gaz karışımından meydana gelir. Karışımın içerisindeki bileşenlerden bir tanesi, uyarımı çarpışmalarla ötekine iletir. Helyum-neon lazerleri, çok yaygın olarak kullanılmakla birlikte, düşük güce (miliwatt düzeyinde) sahiptirler. Neon gazı bu tip lazerlerde yayım çizgilerini vermektedir. Kızıl bölgede 632,8nm olan dalga boyu en çok tercih edilenidir. Ayrıca 1150 ve 3390 nm’lik tayf çizgileri de kullanılabilir. İyon lazerleri, etkin malzemesi iyonlaştırılmış bir gaz olan gaz lazerleridir. Argon, en çok kullanılan gaz lazeridir. Bir elektrik boşalmasının elektronlarıyla çarpışarak iyonlaşan argon atomları sayesinde, bu tip lazerler ile çok sayıda tayf sayısı elde etmek mümkündür. (mavi-yeşil bölgede 488 nm, 496.5 nm ve 514.5 nm). Çok yüksek güç yayımlanır(onlarca watt). Karbondioksit lazerlerinde, CO₂ moleküllerinin temel elektron konumundaki titreşim dönme geçişlerinden faydalanılır. Karışım gazı, karbondioksit, azot ve helyumdan oluşur ve uyarıma azot moleküllerinden karbondioksit moleküllerine doğru oluşur. Sürekli ya da 24 darbeli olabilen yayım kızılaltı bölgede (10,6 µm ya da 9,6 µm) yapılır. Yüksek bir verime sahip olan CO₂ lazerlerinin verimi % 10 ile % 15 arasında değişir. Maksimum güç, sürekli çalışmada 400 W, kısa darbeli çalışmada ise 10 kW’ dir. HF/DF kimyasal lazerler ’de lazer yayımı verecek olan, titreşim yönünden uyarılmış HF ya da DF moleküllerini üretmek için flüor atomunun hidrojen (ya da izotopu döteryum) üzerindeki tepkimesinden yararlanılır. En güçlü lazerlerde, flüor atomu, F₂ flüor molekülünün (ya da NF₃ bileşiğinin) özel bir odada hidrojenle (ya da bir hidrokarbonla) yanmasıyla elde edilir. Yayım dalga boyları HFF lazer için 2.7 µm, DF lazer için ise 3.8 µm dolayındadır. DF lazer bugüne dek olan en güçlü sürekli lazerdir. ABD ’de yapılmış bir ilk örnek, 2.2 MW lik bir güç sağlanmıştır. Metal buharlı lazerler ’de (en yaygın olanı helyum kadmiyum lazeridir) etkin ortam, buhar halindeki kadmiyumdan oluşur. 100 miliwatt’a kadar olan güçlerde, 441.6 ve 325 nm’lik dalga boylarıyla sürekli çalışma sağlanabilir. En son gerçekleştirilmiş lazer tipi olan iyot lazerlerinde etkin ortam olarak atom halinde iyot kullanılır ve cam lazerinin dalga boyuna yakın, 1315nm’lik bir dalga boyu üzerinden yayım gerçekleştirilir. Bu tip bir lazer ile 1 TW’ lık bir güç sağlanmıştır (Çelik 1998).

2.1.4.12 Serbest Elektronlu Lazerler

Bunlar, bir hızlandırıcıdan yüksek enerjili elektron paketlerini, evirici olarak adlandırılan bir dizi mıknatısın oluşturduğu sabit, almalı bir magnetik alanın içinden geçirerek senkrotron, bağdaşık ve tek renkli yeğin bir ışıma kaynağı elde etmeye olanak verir. Elektronların enerjileri ya da magnetik alanın dönemi değiştirilerek, X ışınlarının dalga boylarından, uzak kızılötesinin dalga boylarına kadar değişen dalga boyları elde edilebilir (Oral ve Kumruoğlu 1997).

2.1.5 Lazer Kaynak Yöntemi

Lazer kaynağı yukarıda da belirtmiş olduğumuz gibi lazer kaynak ışınlarının kaynak edilecek malzeme üstüne aktarılması ile yüksek miktardaki enerjinin küçük noktalara odaklanıp istenilen malzemeleri ergitip birleştirilmesini ya da kaplanmasında kullanılan bir yöntemdir. Bu işlemin en üstün özelliği çok hassas ve yüksek kalitede bir birleştirme yeteneğine sahip olmasıdır. Ayrıca, lazer kaynak yönteminin en önemli özelliklerinden biride hassas bölgelerde milimetrik ayarlarla kaynak uygulama yeteneği ve otomasyona uyum sağlamasıdır. Kaynak edilecek bölgeye çok hassas bir şekilde odaklanması ve bölgeye gereğinden fazla ısı uygulanmaması sebebi ile bu uygulamada çok düşük bir ITAB genişliği elde edilmektedir. Lazer kaynağın bu yeteneği sayesinde hem malzeme tane yapısı deformasyondan büyük ölçüde korunmuş olur hem de ihtiyaç kadar enerji kullanılması sayesinde enerjiden de tasarruf edilip verim sağlanmaktadır.

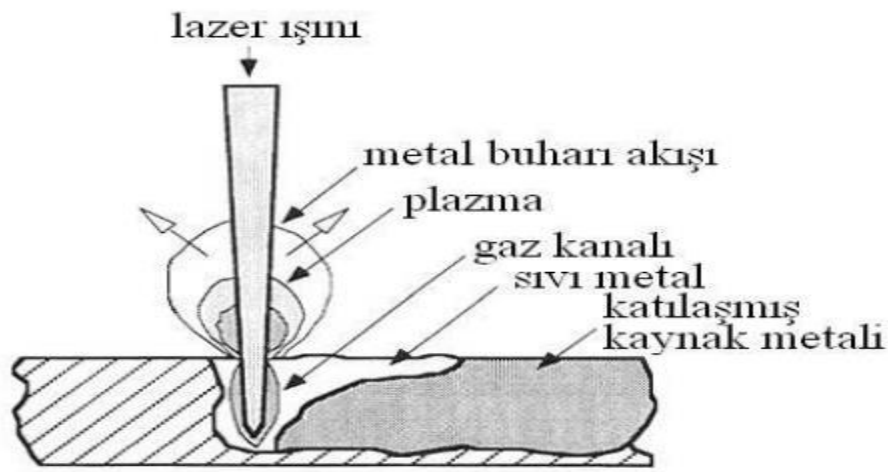
Lazer kaynağı işlemi farklı 2 yöntemden biri esas alınarak kullanılabilir.

- Derinlemesine nüfuz eden lazer kaynak (Key hole laser welding)
- İletimsel lazer kaynak

Key Hole yöntemi, derinlemesine nüfuz eden lazer kaynağının literatürde ki bir başka tanımlamasıdır. Anahtar deliğinin oluşması yeterli güç ve yoğunluğa sahip lazer ışının malzeme yüzeyine odaklanması sonucu meydana gelir. Adı geçen bölge esasen

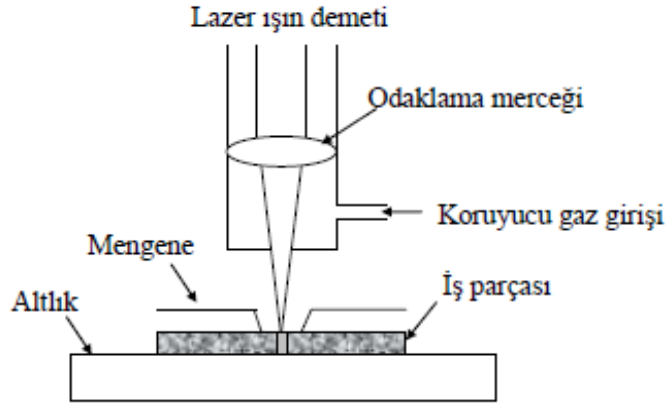
malzeme yüzeyinde ergitilmiş bir havuz şeklindedir. Ergitilmiş havuz içerisindeki malzeme kararlı ve dengeli bir durumdadır (Yavuz ve Çam 2003).

Genellikle kalın sac malzemeler için uygulanan bu yöntemde, iş parçasının ya da ışın demetinin sabit hızla hareket ettirilmesi ile kaynak işlemi uygulanır. Anahtar deliği sistematğinde 1:10 oranına en : boy değışikliğı vardır. Sistematğın detayları Lancaster tarafından bulunmuş ve geliştirilmiştir (Altıntaş 2018). Aşağıda Şekil 2.7’de anahtar deliği sistematğının şematik gösterimi görölmektedir.



Şekil 2.7 Anahtar deliği sistematik şema gösterimi (Altıntaş 2018).

İletimsel lazerler kaynağında ise, malzeme tarafından lazer ışınlarının enerjisi yutulur ve daha sonra malzemeye sabit bir kuvvet uygulayıp kaynak işleminin tamamlanması prensibi ile çalışmaktadır. Key hole mekanizmasında olduğu gibi bu tip lazerlerde de yüksek seviyede en boy oranı yakalanamaz. İletimsel lazerler, zayıf lazer gücü ile malzemenin buharlaşma olmadan malzemenin sadece ergitildiği işlemlerde kullanılmaktadır. Şekil 2.8’de iletim lazer kaynağının şematik gösterimi görölmektedir. Şekilde malzeme tarafından yutulan lazer ışınlarından ortaya çıkan ısı radyasyon ve konveksiyon ile yayılmadan önce iletim ile et kalınlığı boyunca iş parçasının merkezi yönünde yayılma gerçekleşir. Malzemenin erimesi lazer ışınlarının yutulması ile gerçekleşir ve ışınların uzaklaşması durumunda da parça tekrar soğuyup katı halini alır.



Şekil 2.8 İletimsel lazer kaynağı şema gösterimi (Altıntaş 2018).

2.1.6 Lazer Kaynak İşleminin Diğer Kaynaklara Olan Üstünlükleri

Gelişen teknoloji ile birlikte her geçen gün kullanım alanı genişleyen lazer kaynağın geleneksel kaynak türlerine göre kıyaslandığında ortaya çıkan bariz üstünlükleri aşağıda sıralanmaya çalışılmıştır.

- Birkaç mikron mertebesindeki bölgelere odaklanabilme kabiliyeti 10 W/cm'nin üzerindeki yüksek güç yoğunluğu sebebiyle tungsten gibi yüksek ergime sıcaklığı olan metaller kendiliğinden ergirler ve ısıya duyarlı civar bölgeler üzerindeki etki minimuma iner.
- Lazer ışını temassız olarak çalışır, yani takım ile iş parçası arasında hiçbir mekanik bağlantı oluşmaz ve iş parçasının istenmeyen alaşımlanması veya distorsiyonu giderilmiş olur.
- Kaynak süresi, iri taneli olma, tekrar kristalleşme ve segregasyon gibi uygun olmayan içyapı değişimlerine engel olacak ve hızlı üretimi sağlayacak kadar kısadır.
- Lazer ışının üretimi mikro plazma kaynağındaki gibi koruyucu gazların kullanılmasını, elektron ışını ile kaynaktaki gibi vakumun sağlanmasını gerektirmez.
- Seri imalat için, üretim hızı, otomatize edilebilmesi imkanı gibi üstünlükleri barizdir.

- Düşük ısı girdisi nedeniyle ITAB çok dar olur ve burada ısı sebebiyle gerçekleşecek metalürjik etkiler ve çarpılma zayıf olacaktır.
- Dolgu ilavesi olmaksızın 32 mm'ye kadar tek pasolu kaynak yapma olanağı sağlar.
- Elektrot kullanılmasına gerek yoktur. Bu sebeple elektrottan kaynaklanacak kirlenme engellenmiş olur.
- Vakum veya X-ışını için özel koruma ihtiyacı yoktur.
- Lazer ışını optik elemanlar kullanılarak kolaylıkla odaklanıp, doğrultulup yönlendirilebildiği için diğer kaynak yöntemleri ile ulaşılması zor olan yerlerde kaynak yapılabilmesini sağlar.
- Geniş bir malzeme aralığı ve bunların kombinasyonunu kaynaklamak imkanı sağlar.
- Lazer ışını, manyetik alandan etkilenip zarar görmez.

2.1.7 Otomotiv Endüstrisinde Lazer Uygulamaları

Günümüz de oldukça hızlı bir gelişim kaydeden Otomotiv teknolojisi; bu hızlı gelişimini diğer farklı sektörlerde paralel olduğu gibi devamlı artan gereksinimlere ve yenilikçi tasarım taleplerine borçludur. Sektördeki oyuncuların ana problemleri arasında da tasarım çeşitliliğinin müşteri çeşitliliğine göre planlanmasının yanı sıra, hızlı ve maliyeti düşük parçaların üretiminin sağlanmasıdır. Bu ve buna benzer temel problemleri çözme yollarının en etkili yollarından birisi olan günümüz lazer teknolojisi aynı zamanda Otomotiv sanayisinin gereksinimlerine bağlı olarak da devamlı bir gelişim içerisinde. Denilebilir ki, mevcut üretilmekte olan yeni taşıtların hemen hepsi üretim süreçlerinde lazer teknolojisi ile tanışmış ve muhakkak spesifik alanlarda bu teknolojinin işlemine tabi olmuştur. Lazer teknolojinin tercih edilme sebepleri arasında, otomotiv endüstrisinde çok esnek bir teknoloji olması ve çok farklı alanlarda aşırı hızlı, kaliteli iş ve maliyet konusunda etkin bir sonuç vermesidir. Lazer teknolojisi, Otomotiv alanında üretim süreçlerinde kullanılan tekniklerden; kesme, kaynak ve markalama işlemlerinde farklı konvansiyonel yöntemlerden daha belirgin çözümler sunmaktadır (Aydın ve Salman 2014).

Lazer teknolojisi, Otomotiv sanayisinde ilk kez otomatik vites elemanlarının basit silindirik kısımlarının birleştirilmesi işlemi için kullanıldı. Ancak, günümüzde açılır tavanları kesmek, kapı kaynakları, üç boyutlu parçaların kesimi, kapı yaylarını tavlama, plastik parçaları kazıma işaretleme, ön panel ve hava yastığı elemanlarının, rulmanların, yakıt tankının ve diğer birçok parçanın izlenebilirlik bakımından işaretleme işlemlerine değin birçok üretim sürecinde çok etkin olarak kullanılmaktadırlar. (Şekil 2.9) İşlem yeteneğinin diğer geleneksel yöntemlere göre hız ve hassasiyet bakımından büyük ölçüde iyi olması kesme, kazıma ve işaretleme işlemleri için otomotiv endüstrisinde lazer teknolojisinin tercih edilmesinin ana nedenlerinden biridir.



Şekil 2.9 Bir otomobil aracıda lazer uygulamalarının kullanım parçalarından bazıları (Aydın ve Salman 2014).

Buna ek olarak lazer teknolojisinin tercih edilmesinin önemli etkenleri arasında, işlem yapılan malzemenin temas etmeden işlenmesi, bant sistemleri ile uyumlu çalıştırılıp parça sabitlenmeye gereksinim duyulmadan işlemin yapılabilmesi, yüksek verimli fiber lazer teknolojilerinin gelişimi ile enerji tüketiminin düşük olduğu ve bakımsız 7/24 işlemler yapılabilmesi, kompakt yapıları sayesinde üretim hatlarında düşük taban alanı kaplaması gibi nedenlerde yer almaktadır.

Günümüzde lazer teknolojisinde güç parametresinin çok yüksek kW seviyelere ulaşması

sayesinde lazer ile gerek kaynak, kesim, gerekse pirinçle lehimleme işlemleri yapılabilmektedir. Bu sayede çok farklı sistemler kullanmak yerine kullanışlı tek bir sistem kullanmak daha avantajlı olduğundan ve aynı zamanda cihazların maliyeti ve kapladığı alan göz önüne alındığında da lazer sisteminin otomotiv üreticileri tarafından tercih edilmesine neden olmaktadır. Markalama, kazıma, kesim, ve kaynak gibi işlemler otomotiv sanayisinde lazer sistemlerinin en çok kullanıldığı alanlardır. Gelişen teknoloji ile birlikte bu alanlara başta test sistemleri gibi çok değişik uygulama sahaları ile otomotiv alanında daha fazla yer edineceği aşikârdır.

2.1.7.1 Markalama (İşaretleme) / Kazıma

Lazer markalama sistemi, genellikle otomotiv sanayisinde araçlardaki farklı metal parçalarını işaretleme yahut kazımak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Sistem, temelde güç parametresinin çok geniş Watt seviyelerinde farklı dalga boylarında, işleme tabi tutulacak malzemenin cinsine göre istenilen değişik hızlara göre üreticiler tarafından kullanılabilir. Lazerin işaretleme için seçilmesinin hızlı ve verimli olması dışındaki temel nedeni, uygulama sonrası işlemin kalıcı olması ve dış etkilere silinmemesidir (Aydın ve Salman 2014).

Bu tip lazer sistemleri ile markalama ve kazıma işlemlerinin gerçekleştirildiği parçalar temel olarak; rulmanlar, rulman yatakları, yakıt enjektörü ve tankı, krank mili, kauçuk contalar, hız göstergeleri, profiller, araç içi düğme yüzeyleri, etiketler gibi parçalar olup bir çok değişik markalama tekniği kullanılarak izlenebilirlikleri sağlanır. Lazerin işaretleme için seçilmesinin hızlı ve verimli olması dışındaki temel nedeni, uygulama sonrası işlemin kalıcı olması ve dış etkilere silinmemesidir (Aydın ve Salman 2014).

2.1.7.2 Lazer Kaynak

Otomotiv sanayisinde yaygın olarak kullanılmakta olan karbondioksit lazerler ve fiber lazerlerin yüksek güç lazer parametreleri sırasıyla; 3-5 kW ile 2-10 kW değerlerinde olmaktadır. Kaynak işlemleri için kullanılmakta olan bu sistemler, optik aynalar yardımıyla lazer ışını mikron seviyesinde odaklanarak işlem yapılacak malzeme üstüne gönderilmesi vasıtasıyla işlem sağlanır. Kullanılan bu sistemler haricinde hassas ve daha az ısı gücü gerektiren kaynak işlemleri için, darbeli çalışan ve kW seviyesinde en

üst tepe güce sahip lazer sistemleri de tercih edilmektedir. Lazer gücü, işlem hızı, odaklanan spot noktasının büyüklüğü, işlem sırasında varsa kullanılan gazın miktarı ve yönü gibi faktörler, lazer kaynak sırasında kaynak derinliği ve genişliğini belirleyen esas etmenlerdir. Temassız bir işlem olan lazer kaynak işlemi, otomotiv endüstrisinde kullanıcılara, kolaylıkla kontrol edilebilen otomasyon teknikleri olarak sunulabilmektedir. Bunun yanı sıra, kaynak işlemi ile sinterleme uygulaması sağlanarak, seri üretime başlamadan önceki mertebede 3 boyutlu prototipleme sağlanabilmektedir. Düşük alana yüksek enerji uygulanabilirliği ile termal olarak etkilenen bölgenin minimize edilmesini sağlayan lazer kaynak işlemi bu özelliği ile geleneksel yöntemlerden biri olan electron beam welding(elektron demeti kaynağı) 'den tamamen ayrılır. Oturma paneli iskeletleri, alüminyum kapı içi parçalar, pencere çerçeveleri, frenler, şanzıman gibi elemanlar lazer kaynak işleminin yapıldığı ana elemanlar olup gelişen teknoloji ile lazer sistemleri her geçen gün diğer konvansiyonel kaynak uygulamalarının yerine geçmektedir (Aydın ve Salman 2014).

2.1.7.3 Lazer Kesim

Lazer teknolojisi, lazer kaynağı robot kollara entegre edilerek çok farklı değişik eksenli kesim uygulamalarında uzun zamandır kullanılmaktadır. Kullanılan lazer teknolojisi, lazer gücü, ışın kalitesi, optik düzenek gibi çok farklı parametreler, lazer kesim işleminin daha hızlı ve temiz bir şekilde yapılabilmesinde çok önemli işlev görmektedirler. Otomotiv sanayisinde ortalama güç parametresinin 100 W ile başlayıp kW seviyelerine kadar esnek kullanımından dolayı kesim işlemleri için CO₂ ve fiber lazer sistemleri yaygın olarak tercih edilmektedir. Lazer kesim, lazerle teknolojisi ile yapılan diğer uygulamalarda olduğu gibi geleneksel yöntemlere nazaran; yüksek verimlilik, hızlı işlem, ince hassasiyet, daha esnek uygulama avantajı gibi imkânları üreticilere sunmaktadır.

Günümüzde Lazer kesim yöntemi ile;

- Kapı kaplaması ve kapı panelleri,
- Tavan bölgesi,

- Hava yastıkları,
- Lüks arabaların makaralı güneşlikleri,
- Kompozit malzemeler,
- Yan direkler,
- Hidroform tüpler,
- Sızdırmazlık lastikleri
- ve daha bir çok otomotiv endüstrisinde kullanılan parçanın kesimi, kolaylıkla yapılabilir.

Bu uygulamalara ek olarak metal malzeme üzerindeki kaplamaların kaldırılması, bazı lehimleme işlemleri için, tarama ve tanımlama işlemleri, holografik projeksiyon uygulamaları, mikro işleme gibi işlemlerde de yaygın olarak kullanılmakta ve teknolojik yeniliklere bağlı olarak da kullanım sahası günden güne artmaktadır (Aydın ve Salman 2014).

Lazer Kesim Tezgâhı Bileşenleri

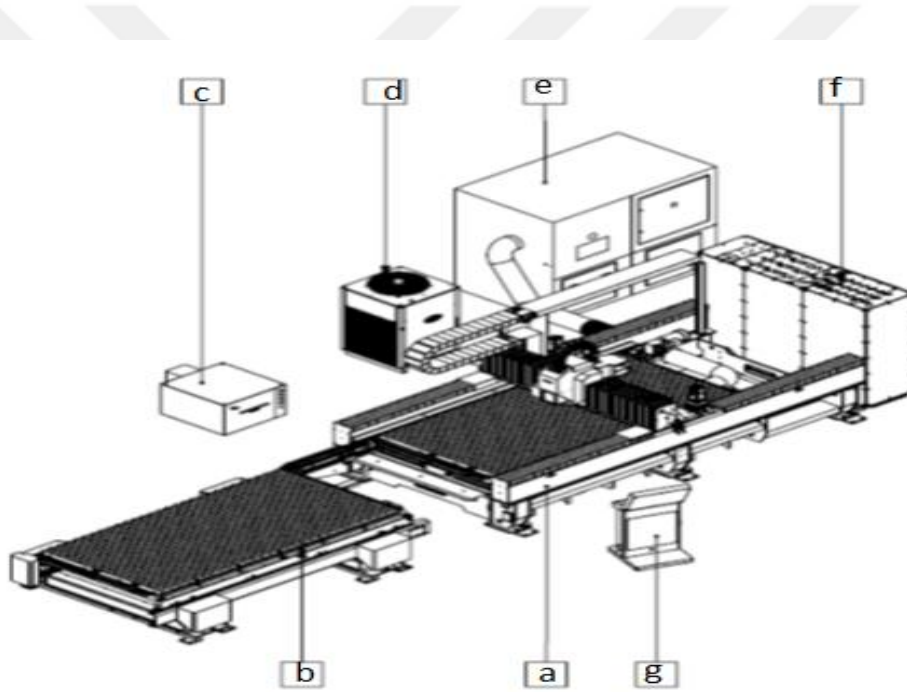
Günümüzde lazer kesim tezgâhları ince sac malzemelerin kesim işlemlerinde insan iş gücü ihtiyacını minimum seviyeye düşürmek ve fabrikasyona yani imalata geçilmesi hedef güdümlenerek tasarlanmıştır. Lazer kesim tezgâhlarının otomotiv sanayisi, imalat, makine sanayi ve tarım makinaları imalatında da kullanılmasına ihtiyaç duyulmuştur. Yukarıda da belirtildiği gibi daha verimli ve hızlı bir şekilde sac levhaların lazer ışını ile kesilmesini sağlamak ve insan gücünü en aza indirmek lazer kesim tezgâhlarının tasarlanmasının temel sebeplerindendir.

Bu tezgâhlar, teknoloji ve fizik biliminin gelişmesine paralel olarak köklü değişimler yaşamış ve halen devamlı bir gelişme kaydetmektedir. Günümüzde bilgisayar çağında olmamız, sac metal levhaların kesme işlemlerinde de bir çığır açılmasına neden olmuştur. Bütün bu gelişmelerin sonucu olarak lazer ile yassı sac levha kesim tezgâhları kaçınılmaz olarak günümüzdeki yerini almıştır.

Lazer ile yassı sac levha kesim tezgâhları kısaca HD-F / HD-FL lazer makinesi olarak

adlandırılabilirler. Düz sacların kesiminde kullanılan yüksek hızlı 2D kesim tezgâhlarıdır ve uçan optik prensibi ile çalışmaktadırlar. Bunun anlamı; sacın üzerinde bulunduğu kesim tablası sabit durur, kesim kafası X ve Y yönlerinde hareket ederek kesim işlemini yapar. Bu yöntem sayesinde çok yüksek (3G) ivmelenme değerlerine ulaşılır ve direkt enkoder ölçüm sisteminin de yardımıyla maksimum hassasiyette parça kesimleri gerçekleştirilir (Çelenk 2018).

Lazer kesim tezgâhları çok değişik temel gruptan oluşmaktadır (Şekil 2.10). Bu temel kısımlar ayrıca cihaz sisteminin karmaşıklığını önlediği gibi, bakım kolaylığı ve kullanım avantajı sağlamaktadır (Çizelge 2.1).



Şekil 2.10 Lazer kesim tezgâhı ana parçaları (Çelenk 2018).

Çizelge 2.1 HD-F/L Lazer ana parçalarının listesi (Çelenk 2018).

HD-F(L)* Lazer	
a)	Makine gövdesi
b)	Mekik tabla
c)	Lazer güç kaynağı
d)	Soğutucu
e)	Toz toplama ünitesi
f)	Elektrik panosu
g)	Kontrol Ünitesi

2.1.7.4 Lazer - Ultrasonik Testler

Otomotiv endüstrisinde üretilen ve işlenen parçalar hassas ve çok uzun bir test aşamasına tabi tutulmaktadır. Yapılan bu testlerin genel amacı, araç standardizasyonunun yanı sıra araç son kullanıcıya ulaşmadan önce olası bir komplikasyonun mümkün olduğunca önlenmeye çalışılmasıdır. Lazer-ultrasonik testler çok fazla süre ve iş gücü gerektirdiğinden üreticiye zaman ve maliyet ağırlığını beraberinde getirmektedir. Günümüzde teknolojinin gelişmesi ile hemen her sahada kullanılmakta olan lazerler test sistemlerinde de yerini almaktadır. Otomotiv sanayisinde gelinen son aşamada lazer-ultrasonik test sistemlerinin uygulamaya konulması yönündedir. Lazer ile oluşturulan ultrasonik dalgaların malzeme ile etkileştikten sonra algılanmasına dayanan lazer-ultrasonik testler, teknik, uzak mesafeden işlem görebilmesi (mesafe lazerin gücüne göre değişiklik gösterebilmektedir), yüzey modifikasyonu gerektirmemesi, hareket eden sıcak ve karmaşık yapıdaki çok farklı geometrik şekillere uygulanabilmesi sayesinde diğer geleneksel test yöntemlerinden ileri seviyede bir teknolojidir. Otomotiv endüstrisinde, Lazer-ultrasonik testlerin genel olarak kullanım alanları arasında şunlar sıralanabilir;

a) Daha çok yapılan kaynakların sağlamlılığı; lazer yöntemi ile yapılan kaynak işlemi sonrasında, kaynak yapılan bölgede oluşabilecek boşlukların algılanmasında,

b) Boya kalınlığı tespitinde; özellikle kurumamış boya üzerine yapılabilmesi ve işlemin hareket eden parçalar üzerine bir dakika altında uygulanabilmesi,

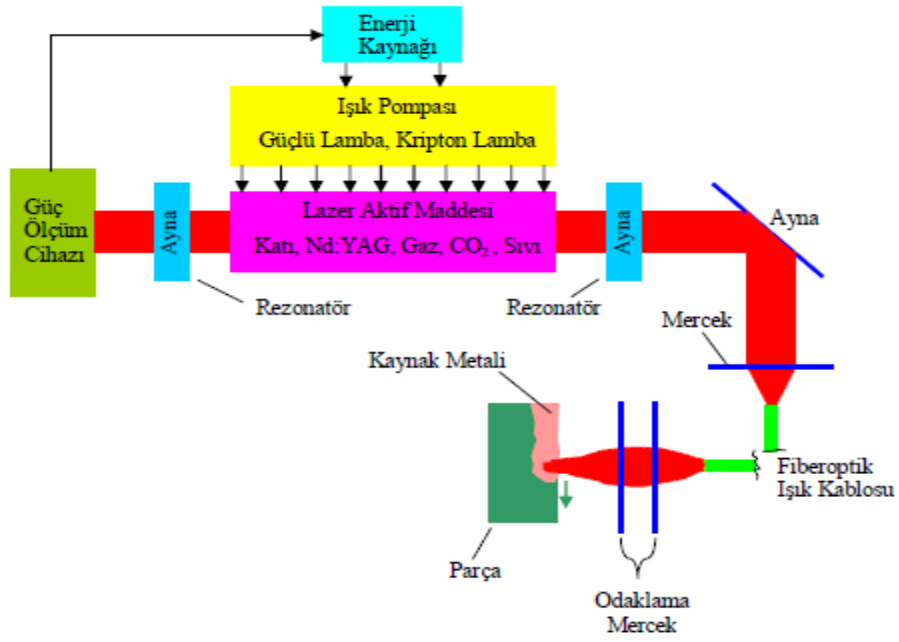
c) Yapıştırıcı bağ dayanıklılığı ölçümlerinde; parçaların ağırlığını azaltmak için ek yerlerinde kullanılan ve kalınlığı kullanıldığı bölgenin her yerinde aynı olması gereken yapıştırıcıların kalınlık ve sağlamlık ölçümlerinde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Aydın ve Salman 2014).

2.2. Lazer Kaynak Parametrelerinin Kaynak İşlemine Etkisinin İncelenmesi

Lazer kaynağı uygulamalarında kaynak kalitesini etkileyen esas parametreler şu şekilde belirtilebilir:

- Kullanılan lazerin dalga boyu ve merceklerin lazer demetini yutma oranı,
- Kullanılan lazerin Işının;
 - ✓ gücü,
 - ✓ leke çapı,
 - ✓ Lazer ışınının odak uzaklığı ve odak noktası,
- Lazerin çalışma modu(Sürekli dalga veya darbeli),
- Korumucu gaz (karışım oranı, akış hızı, basınç, meme boyutu ve pozisyonu),
- Kaynak karakteristiği (kaynak hızı, birleştirme geometrisi ve aralık toleransı).
- İş parçasının;
 - ✓ Kimyasal bileşimi,
 - ✓ Fiziksel geometrisi,
 - ✓ Kalınlık derecesi,
 - ✓ Yüzey durumu,

Yukarıdaki parametrelerin herhangi birinin göz ardı edilmesi durumunda lazer kaynağının kalitesinde bozulmaya neden olacaktır. Aşağıda Şekil 2.11’de lazer ışın cihazının şematik yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2.11 Lazer ışın cihazının şematik yapısı (Özden ve Gürsel 2004).

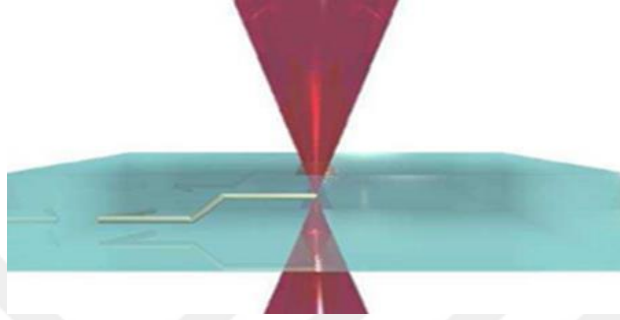
2.2.1 Lazer Işını

Lazer ışınının birçok endüstriyel türleri bulunmaktadır.

- CO₂ lazeri,
- katı hal (Nd:YAG) lazeri,
- iyon lazeri,
- yarı-iletken diyot lazerler,
- fiber lazerler,
- excimer lazeri bunlardan bazılarıdır (İnt. Kyn. 1).

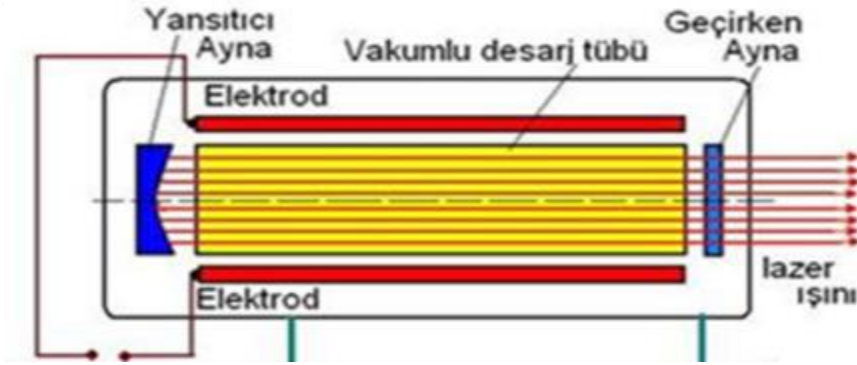
Bu ışın türlerinden CO₂ ve katı hal (Nd:YAG) lazerleri daha çok kaynak ve kesme uygulamalarında kullanılmaktadır. CO₂ lazeri, makro ölçüde kaynak işlemlerinde (1-15 mm kalınlıklar için) kullanılmaktayken; Nd: YAG katı hal lazeri ise metelsel malzemelerin mikro kaynak ve kesme uygulamalarında (0.2-4 mm kalınlıklar için) kullanılmaktadır.

Mercek Odağı (Focus) : Kullanılan merceğin odak noktası kesim işlemlerinde çok etkili parametrelerden bir tanesidir. Lazer kesme başlığından (nozzle) lazer ışınının odak noktası olarak tanımlanır. Malzeme cinsi ve kalınlığına bağlı olarak focus' un iyi belirlenmesi sağlıklı bir kesim işlemi açısından önemlidir. Şekil 2.12'de focus ayarını gösteren görsel sunulmaktadır.



Şekil 2.12 Odak (focus noktası) görseli.

Frekans: Lazer ışın demetinin genişliği olarak tanımlanır. Şekil 2.13'te frekans ile ilgili görsel yer almaktadır.



Şekil 2.13 Lazer frekansı.

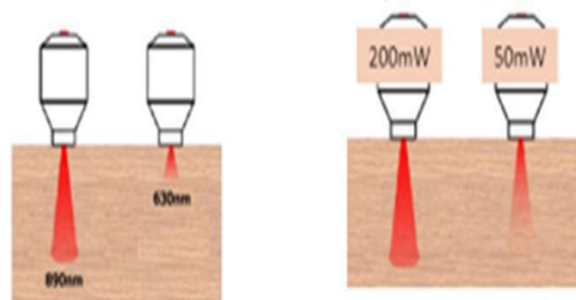
Nozzle: Lazer çıkış memesidir. Kesilecek malzeme kalınlıklarına göre nozzle çıkış ucundaki çap değişmektedir. Şekil 2.14'te nozzle görseli görülmektedir.



Şekil 2.14 Nozzle görseli.

2.2.2 Kaynak Parametreleri

Kullanılan iş parçası ve kaynak parametrelerini temelde lazer kaynak işlemini etkileyen en önemli parametreler olarak ikiye ayırabiliriz. Lazer gücü ve kaynak hızı ise kaynak parametrelerinin en etkili 2 farklı parametresidir. Bunun sebebi, lazer kaynağı için en önemli özellik olan malzemenin içerisindeki nüfuziyet derinliği, lazer gücü ve kaynak hızının belirlenmesine dayanır. İlerleme hızı; Lazer kesim başlığının aksel yer değiştirme miktarıdır. Birimi zamanda kat edilen yolu gösterir ve birimi “m/dak”dır. Kesilecek malzemeye ait fiziksel ve kimyasal özellikler ilerleme hızının belirlenmesinde etkilidir. Güç; Lazer kesim işleminde meydana gelen lazer ışın demetinin yoğunluğu olarak tanımlanmaktadır. Şekil 2.15’te kaynak gücüne bağlı olarak nüfuziyetteki değişim görülmektedir. Lazer gücünün yükseltilmesi ve kaynak hızının düşürülmesine bağlı olarak nüfuziyet derinliğinin de o oranda arttığı bilinmektedir.



Şekil 2.15 Lazer ışın gücü etkisi.

Kaynak hızı ve güç yoğunluğunu tespit etmek için ilk olarak üretim hızı için uygulanması gereken en aşağı hız seviyesi, kaynağın hızı seçilir ve akabinde ulaşmak istenen nüfuziyet derinliğine bağlı olarak bu derinliği gerçekleştirebilecek lazer kaynak gücü saptanır. Kaynak hızı ve güç yoğunluğunun doğru belirlenmemesi sonucunda hem kaynak dikişinde bozukluk hem de kaynağın nüfuziyetinde arzu edilen değerlere ulaşamamasına neden olacaktır.

2.2.3 İş Parçası

Lazer kaynağında iş parçasının fiziksel, kimyasal özellikleri ve yüzey kalitesi de kaynak dikişi ve kaynak kalitesi için son derece önemlidir. Bu parametreler, iş parçasının lazer ışınları vasıtası ile yayılan ısıyı yutma özelliklerini etkilemektedir. Bu da kaynak dikişinin morfolojik özelliklerini etkileyerek kaynak kalitesini belirleyecektir. Bilindiği gibi metaller ışığı geçirmezler ve yüzeylerine çarpan ışınları büyük oranda yansıtırlar. Lazer kaynağında, lazer üreteçleri tarafından iş parçasına aktarılan ısı, yutulan enerji üzerinden hesaplanmaktadır ve maksimum yutma lazer ışınlarının iş parçası yüzeyine 90°'lik açı ile çarpması ile oluşur (Altıntaş 2018).

Bir üst bölüm olan kaynak parametreleri (2.2.2) bölümünde ifade edildiği gibi bir iş malzemesinin lazer ışın demetlerini yutması serbest elektron sayılarıyla ilişkilidir. Metal parçasının lazer ışınlarını yutması sonucunda ısınma meydana gelir. Isınan metalde ise serbest elektron sayısı artacak ve bu artışa bağlı olarak ışınların malzeme tarafından yutulma miktarı da artacaktır.

2.2.4 Lazer Kaynağında Kullanılan Gazlar

Kaynak işlemlerinin hepsinde olduğu gibi lazer kaynağında kullanılan koruyucu gazlar ın da kaynak dikişi ve kalitesi üstünde oldukça önemli bir etkidir. Lazer kaynağında kullanılan koruyucu gazların temel görevi kaynak bölgesi ve havuzundaki oksidasyonu önlemeye çalışmaktır. Koruyucu gazların lazer kaynağındaki bir diğer önemli görevi ise, plazma oluşumuna engel olmak ya da minimuma indirip kaynak nüfuziyetinin daha

fazla artışını gerçekleştirmektedir. Buna ek olarak lazer ışın demetlerinin bir engelle takılmadan kaynak bölgesine kadar iletilmesi de görevleri arasındadır.

Helyum ve Argon gazları en yaygın kullanılan koruyucu gazlar arasındadır. Bu koruyucu gazlar ihtiyaca bağlı olarak hem ayrı hem de karışım halinde de kullanılabilirler. Helyum gazının yüksek bir iyonizasyon enerjisine sahip olmasından dolayı sık tercih edilmesiyle beraber, Helyumun Argon ile birlikte ortak karışımında kullanılması oksitlenmeyi engelleyerek koruma görevi yapar ve aynı zamanda kaynak dikişinde de kaliteyi arttırmaktadır.

Ayrıca Kullanılan gaz basıncının değişmesi mercek ömrü, kesilen ürüne ait kalite göstergeleri (yüzey kalitesi, ısı tesiri altındaki bölge boyutu, vd.) üzerinde de etkili olmaktadır.

2.3 Otomotiv Endüstrisinde Lazer Kaynak Teknolojisinin Beklentileri

Yüksek kaynak yoğunluğu ve uygulanabilirlikten dolayı lazer kaynağı araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Kaynakta ara yüzey reaksiyonunun sınırlı tutması bu kaynak yönteminin önemli bir özelliğidir. Düşük enerji girişi nedeni ile kaynak bölgesinde ısıdan etkilenme az olduğundan bağlantının yüksek dayanımı için en iyi birleştirme yöntemi lazer ışın kaynağıdır. Lazer, tek renkli, oldukça düz, yoğun ve aynı fazlı paralel dalgalar halinde genliği yüksek bir ışık demeti şeklinde tanımlanır. Başka bir ifade ile yapay radyasyon tetiklemesiyle gerçekleştirilen ışık kuvvetlendirilmesidir (Akkurt, Şık, Ovalı 2011).

Otomotiv endüstrisindeki güçlü ilgi çeken hafif araçların dikkate alınması da önemlidir. Şu anda, çoğu üretici, alternatif malzemeler kullanmak yerine, maliyet kısıtlamaları nedeniyle farklı derecelerde gelişmiş yüksek mukavemetli çelik kullanımıyla verimli şasi tasarımına dayanmaktadır. Bununla birlikte, verimli tasarıma bir sınırlama getirildikten sonra ve alternatif malzemelerin fiyatları azaldıkça, alüminyum alaşımları, magnezyum alaşımları ve titanyum alaşımları gibi hafif malzemeler geleneksel malzemelerin yerini alacaklardır.

Bu bölümde yüksek hacimli araç üretiminde hafif malzemelerin (alüminyum alaşımlar, magnezyum alaşımları ve titanyumiller) kullanımına yönelik beklentiler incelenmiştir. Galvanizli çeliğin lazer kaynağı, kaynak konfigürasyonunu değiştirerek, kalıp bileşimini değiştirerek ve çinkoyu buharlaştırarak, galvanizli çelik kalitesinde kaliteyi iyileştirme çabaları ile birleştirilmiştir. Bu tekniklerin endüstriyel kurulumda uygulanmasının fizibilitesi araştırılmıştır. Bu malzemelerin lazerle kaynaklanması sırasında karşılaşılan mikro yapı değişiklikleri ve kusurları anlatılmış ve sertlik, kesme ve çekme kuvvetleri gibi kaynakların mekanik özellikleri incelenmiştir.

Galvanizli çelikten dirençli punta kaynağı ile ilgili problemlere rağmen, çinko kaplama kaplanmamış çelik levhalara kıyasla korozyona karşı üstün direnç sağladığından, değişiklik kaçınılmazdı. Galvanizli çelikten üretilen parçaların üretiminin, büyük Avrupalı otomobil üreticilerinin, 2002'den beri süren korozyon koruması için gönüllü garantiler sağlamasına izin verdiğini bildirmiştir.

Galvanizli çeliğe ek olarak, otomotiv endüstrisinde alternatif ağırlıktaki malzemelere olan ilgi artmaktadır. Bir aracın toplam ağırlığının azaltılması, performans kaybına uğramadan yakıt ekonomisini arttırmanın en etkili yoludur. En çok gelecek vaat eden hafif malzemeler, yüksek mukavemet-ağırlık oranına bağlı olarak alüminyumdur.

Audi'nin alüminyum ağırlıklı bir alan çerçevesi kullanarak A8'in imalatında vücut ağırlığını %40 azaltabildiğini açıkladı. Ford'un F-150 gibi yüksek hacimli araçlar tamamen alüminyum gövde ve kargo kutusu kullanmaya başladı. 2015 yılı itibari ile alüminyum kaynaklı dirençli nokta kaynağının birleştirilmesi, elektrot ucu aşınmasının galvanizli çelik kaynağından daha kötü olması nedeniyle bir zorluk oluşturmaktadır. Yapılan çalışmalar, çeliğin kaynağına kıyasla, alüminyumun üç kat daha yüksek bir elektrik akımı gerektirdiğini, bunun da elektrotun ömrünün on katı oranında azaldığını göstermiştir (Hong and Shin 2016).

Sonuç olarak, daha iyi performans gösteren alternatif birleştirme yöntemleri bulmak için büyük miktarda araştırma yapılmıştır. Mevcut birçok birleştirme işlemi arasında, yüksek

enerji yoğunluğu ve anahtar deliği lazer kaynağının küçük ısı etkilenen bölgesi, bu yöntemi en cazip yöntem olarak kılmaktadır. Ayrıca, teknolojik gelişmeler sayesinde, lazer anahtar deliği kaynağında kullanılmak üzere yeterli güç kaynağına sahip lazer ekipmanı elde etmek daha kolay hale gelmiştir. Yeni fiber lazerlerin lamba ordiod pompalı çubuk lazerlerden daha verimli olduğu ve kompakt bir tasarıma ve iyi ışın kalitesine sahip olduğu anlaşılmıştır. Çok kilowatt'lık güç seviyeleri, birkaç tek modlu fiber lazerin çıktısını birleştirerek elde edilebilir. Fiber lazerlerin Nd: YAG ve CO₂ lazerlere kıyasla saatte en yüksek kaynak hızını ve en düşük maliyeti verdiği görülmüştür.

Çeşitli malzemelerde lazer kaynağı uygulamaları;

Yapılan literatür araştırmaları ile lazer kaynağı yönteminin; yüksek dayanımlı çelikler, galvanizli çelikler, paslanmaz çelikler, magnezyum alaşımları, alüminyum alaşımları, titanyum alaşımları ve daha birçok çeşitli metalik malzemelerde uygulanabilirliği araştırılmıştır. Bu çalışmada lazer kaynağı ile ilgili yapılan çalışmalar malzeme tiplerine göre sınıflandırılmış olup aşağıda bölümler halinde aktarılmıştır.

2.3.1 Alüminyum Alaşımlarının Lazerle Kaynaklanması

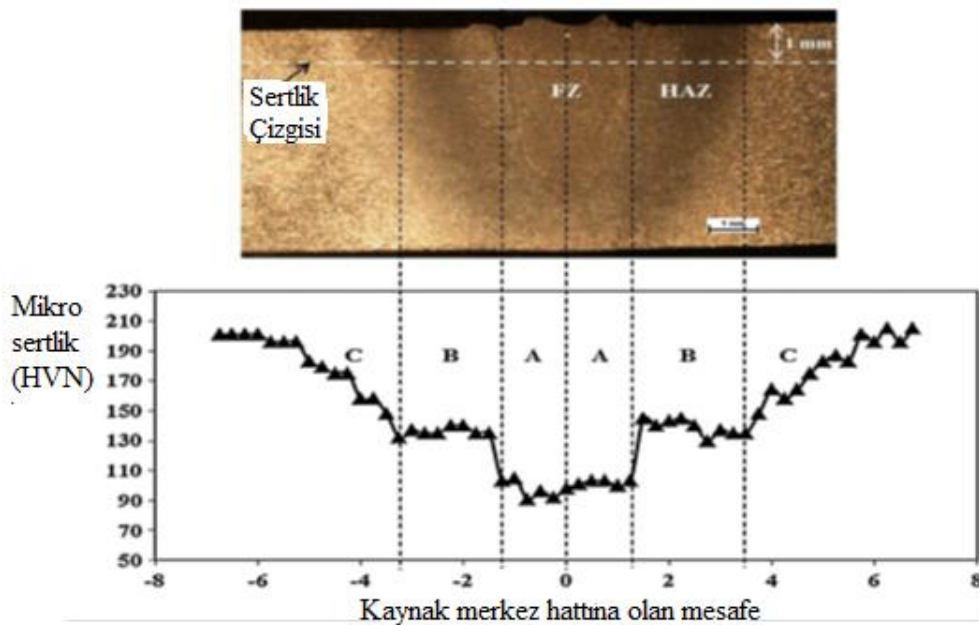
Alüminyum kullanımı endüstride demir ve çelikten sonra ikinci sırayı almakta olup, alüminyumun üretim miktarı 1900'li yıllardan 1980'li yıllara kadar büyük bir artış göstermiştir. Alüminyum alaşımları düşük yoğunlukları, yüksek ısı ve elektrik iletkenleri, korozyon özelliklerinin iyi olmasının yanı sıra kolay eritilebilmesi ve dökülebilmesi özellikleri nedeniyle birçok endüstriyel uygulamada öne çıkmaktadır (Ertürk 2010).

Metal inert Gas (MIG) ve Tungsten Inert Gas (TIG) kaynağının, yavaş işleme hızları, gözeneklilik, yüksek büzülme, büyük ısıdan etkilenen bölgeler ve yüksek kalıntı gerilme gibi doğal eksiklikleri nedeniyle, lazer kaynağına olan ilgi artmıştır. Düşük ısıdan etkilenen bölge ve yüksek işlem hızı gibi lazer kaynağının sayısız avantajlarına rağmen, alüminyum metal, bu metalin yüzeyindeki lazer ışınının daha düşük emilimi

nedeniyle lazerle kaynak yapmak çok zordur. Genellikle yapılan lazer kaynak işlemlerinde işlem parametreleri, katılaşma çatlama, alaşım elementlerinin kaybı ve gözeneklilik meydana gelebilir (Hong and Shin 2016).

2.3.1.1 Mikroyapı

Lazer kaynak işlemi, alüminyum alaşımlı kaynak eklemlerinin mikro yapısını olumsuz etkiler. Daha yüksek kaynak hızları daha hızlı soğutma oranlarına ve dolayısıyla daha ince taneli yapıya yol açmaktadır. Kaynak kesitinin enine kesiti boyunca farklı soğutma oranı dağılımı nedeniyle HZ'de ki FZ ve sütunlu tanelerde ince taneler gözlemlenmiştir. Buna karşılık, daha düşük kaynak hızlarında, mikro yapı, daha düşük soğutma hızına bağlı olarak sütunlu tanecikler içerecektir (Şekil 2.16) (Hong and Shin 2016).



Şekil 2.16 AA7075-T561'in mikro sertlik profilleri ($P = 3,5 \text{ kW}$, $V = 0,6 \text{ m / dak}$) (Hong and Shin 2016).

2.3.1.2 Sertlik ve Çekme Özellikleri

Alüminyum alaşımlı kaynak derzlerinin mekanik özellikleri, gerilme sertleşmesi, çökelti fazlarının çözünmesi ve mikroyapıdaki değişimlerden etkilenebilir. Alüminyum alaşımlarının lazerle kaynağında, sütunlu taneler HAZ' da kaynak yönüne yaklaşık

olarak normalde büyüyebilir. Çekme testi sırasında bu sütunlu taneler, bitişik tanelerden dolayı dönmeye ve uzamaya direnç gösterir. Isıdan etkilenen bölgedeki sütunlu tanelerde oluşan değişimin, baz metalin (AA5083-H321) değerinin % 54'üne kadar bir süneklik düşüşüne yol açtığını keşfetti. HAZ' daki sütunlu tanecik oryantasyonunun kaynak hızından etkilendiği kabul edilmiştir. Kaynak hızı azaltıldığında, sütunlu taneler kavisli ve kaynak doğrultusuna paralel hale geldikten sonra uzunlamasına yönde sünekliği arttığı saptanmıştır (Hong and Shin 2016).

Sonuç olarak, yapılan çalışmalarda akma dayanımı ve magnezyum konsantrasyonu arasındaki korelasyona dayanarak AA5182 ve AA5754 için % 14 ve % 6'lık akma mukavemeti azalması öngörülmüştür. Lazer kaynağı sırasında magnezyum kaybının kaynak sertliğinde azalmaya yol açabileceği düşünülmüştür (Hong and Shin 2016).

Çökelti fazlarının çözünmesinin, 2000, 6000 ve 7000 serisi alaşımlar dahil olmak üzere, çöktürme ile sertleştirilmiş alüminyum alaşımlarının sertliğini azaltabileceği anlaşılmıştır. Lazer kaynaklı AA7075-T651'in optik görüntüsü ve karşılık gelen mikro sertlik profili şekil 2.16' da gösterilmektedir. Lazer anahtar deliği kaynağı sırasında kimyasal bileşimdeki değişimi azaltmak için, olaydaki lazer ışını gücünü ve kaynak hızını ayarlayarak işlem koşullarını optimize etmeniz önerilir. Magnezyum tükenmesini en aza indirmek için daha yüksek bir kaynak hızı kullanılması önerilmektedir.

Alüminyum alaşımın yüzey durumu da lazer emilimi üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Kaynak sırasında lazer enerjisi bağlantısını geliştirmek amacıyla iş parçasının yüzey pürüzlülüğünü arttırmak için paslanmaz çelik, fırça ve nitrik asit solüsyonu kullanılması önerilmiştir (Hong and Shin 2016).

2.3.1.3 Kusurlar

a) Katılaşma ve Tasfiye Çalışması

Alüminyumun lazer kaynağında aşağıdaki kusurların ortaya çıkabileceği görülmüştür: sarkma dikişleri, alt kesikler, sıcak çatlaklar, hidrojen gözenekleri, boşluklar, düzensiz

kökler ve pürüzler. Çeşitli kusurlara ek olarak, alüminyum alaşımları, yüksek termal genleşme (çeliğin yaklaşık iki katı) ve katılaşma üzerine hacimdeki büyük değişiklik nedeniyle lazer kaynağı sonrası katılaşma çatlağına karşı çok hassastır. Katı sıcaklığın yakınında, alaşımlar sünekliliğin düşük olduğu bir sıcaklık aralığından geçer. Bu sıcaklık aralığında, katılaşma çatlaması, malzeme dayanıklılık sınırını aşan termal çekme gerilmelerine maruz kaldığında meydana gelir (Hong and Shin 2016).

AA7075'in lazer kaynağında enine katılaşma çatlamasının mekanizmasını ve olası çözümünü araştırmak için deneysel ve sayısal bir çalışma yapılmıştır. Enine çatlamının, boylamsal sıcaklık sınırının uzunluğu ile ilişkili olduğu anlaşılmıştır. Boylamsal sıcaklık dağılımı ile hassas bölgede daha büyük bir enine plastik gerilim oluşmuştur.. Enine çatlama riskini en aza indirmek için düşük bir kaynak hızı ve düşük lazer gücü kullanılması önerilmektedir. Benzer şekilde yapılan bir diğer çalışmada, AA6061-T6 alüminyum alaşımının lazer kaynağındaki artık gerilmeleri tahmin etmek için sayısal bir model geliştirilmiştir. Modeli kullanarak, kaynakta minimum artık gerilmelere neden olan kaynak parametreleri tespit edilebilmiştir. Bu nedenle, hassas bölgeyi en aza indirmek ve böylece orta çizgi katılaşma çatlaması riskini azaltmak için, küçük bir giriş aralığının kullanılması önerilir (Hong and Shin 2016).

Yapılan çalışmalarda lazer kaynağı için uygun bir sıcak çatlama kriteri önerilmiştir. Sıcak çatlama kriterine göre, katılaşma hızından etkilenen interdendritik boşlukta bir azalma ile katılaşma çatlaması olasılığı artmıştır. Bu nedenle, daha yüksek katılaşma hızına yol açan daha yüksek kaynak hızı, katılaşma çatlağı olasılığını arttırır. Alüminyumda HAZ çatlamasına katkıda bulunan temel parametrelerin soğutma hızından ve tepe sıcaklığından etkilendiği öne sürülmüştür. Bu önermeye dayanarak, AA2024 alüminyum alaşımının PW lazer kaynağında darbe şekillendirme kullanarak katılaşma çatlamasından kaçınmanın mümkün olduğu anlaşılmıştır. Bu yöntem, ısı yükte bir düşüşe ve daha düşük bir katılaşma oranına yol açan nabız düşürme şeklini dikkatlice kontrol etmektir. Soğutma oranının değiştirilmesi, AA7075-T651 alaşımının tanecikli parçalanmasına karşı direnci artıran bir lazer arklı hibrit kaynak sistemi kullanarak, daha yavaş soğutma gerçekleşmiştir (Hong and Shin 2016).

Katılma çatlaması, çift ışınlı bir lazer sistemi kullanılarak da bastırılabilir. Bu yöntemin önceliği, bir arka lazer ışını kullanılarak bir birincil lazer ışını tarafından yaratılmış olan gerginliklerin giderilmesidir. Nd: YAG ve diyet lazer darbelerini spesifik bir gecikmeyle üst üste koyarak ve senkronize ederek AA6082 alüminyum alaşımlı kaynaklarda katılma çatlağı azaltılabilmektedir. Çift ışınlı sistem, 0,5 mm kalınlığında AA6082 alüminyum levhaların tam nüfuziyetiyle çatlağı alın kaynağı üretebilmiştir (Hong and Shin 2016).

b) Gözeneklilik

AA5083 ve A356 alaşımlarının Nd: YAG lazer kaynağında iki çeşit gözeneklilik bulunmuştur. 50-200 µm aralığında olan mikro gözenekler, alüminyumdaki hidrojen çözünürlüğüne atfedilmiştir. Alüminyumdaki hidrojen çözünürlüğü, sıvı (0.65 ml / 100 g) ve katı alaşım (0.034 ml / 100 g) arasında önemli ölçüde farklıdır. Bu nedenle, hidrojen reddedildi ve çözünürlüğün azalması nedeniyle katılma sırasında gözeneklilik oluştu. Kutsuna ve Yan (1999), hidrojen kaynaklı gözenekliliğin küçük boyutlu olduğuna dikkat çektiler, çünkü lazer kaynağı ile bağlantılı yüksek soğutma hızı büyümeyi önlemektedir. Alüminyum alaşımlarının lazerle kaynağında hidrojen kaynaklı gözeneklilik, kaynak elimine edilerek baskılanabilir ve A5052 alüminyum alaşımının taban metalindeki hidrojen içeriğinin, metal yüzeyini fırçalayarak gözenekliliğin % 10,4'ten % 3,6'ya düşürülmüştür. Koruyucu gaz olarak tamamen hidrojen içermeyen koruyucu bir gaz kullanılması, kaynak metalindeki hidrojen içeriği, koruyucu gazı Ar +% H₂'den saf Ar' ya değiştirilerek gözeneklilik % 10.7'den % 5.2'ye düşürülmüştür.

300-600 µm arasında değişen daha büyük gözeneklerin anahtar deliği kapanmasına, küçülmesine ve süreç kararsızlıklarına atfedilebildiği bildirilmiştir. Matsunawa ve diğ. (2000), AA5083 alaşımının CO₂ lazer kaynağında bir X-ışını transmisyon görüntüleme sistemi ile gözeneklilik oluşum sürecini gözlemlemiş, burada anahtar deliğinin tabanında oluşan büyük kabarcıklar, yüzdürme sırasında katılma duvarında sıkışmıştır. Haboudou ve diğerleri (2003), 0–0.9 mm arasında ayarlanan noktalar arasındaki mesafeyle çift lazer ışınlarının kullanılmasının anahtar deliği stabilitesini artırdığını belirtmişlerdir. Tek ışınlı lazer kaynağının aksine, koaksiyal kamera

görüntüleri, çift lazer ışın kaynağı için anahtar deliği sönümlerinin (çökme) görünmediğini ortaya çıkardı. A356'nın yüzey gözenekliliği, çift lazer ışınları kullanılarak % 8'den % 0.5'e düştü (Hong and Shin 2016).

c) Alaşım Elementlerinin Kaybı

Alüminyum alaşımlarının lazerle kaynağında, düşük kaynama noktası sıcaklığı (1373 K) nedeniyle magnezyumun buharlaşması daha belirgindir. Magnezyumun azalmasından kaçınılmalıdır, çünkü yoğunlaşma kuvvetinin ve sertliğinin azaltılmasına neden olarak, gerilme direncinin düşmesine neden olabilir.

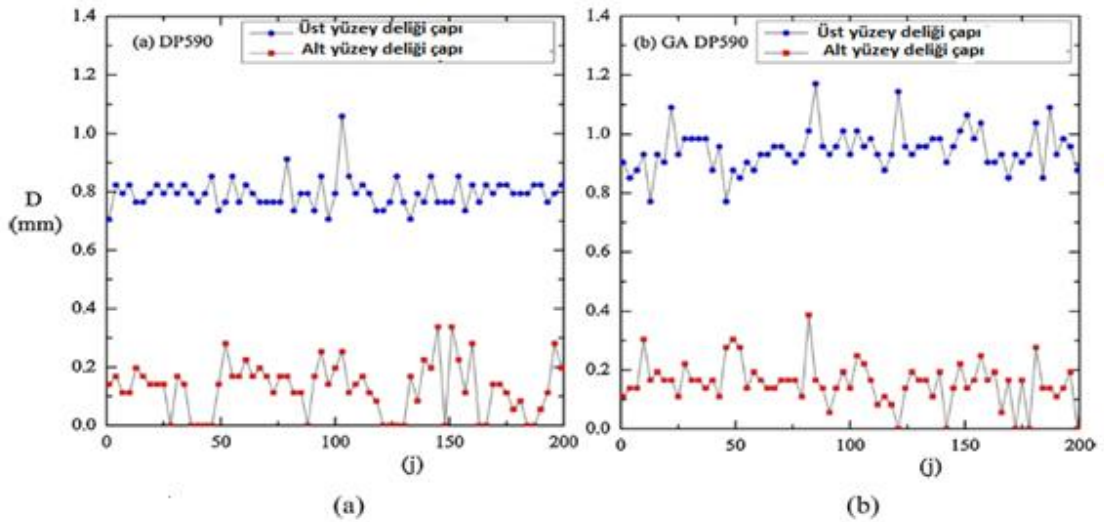
Yeterli koruyucuda AA5083'ün CO₂ lazer kaynağında ciddi bir magnezyum kaybına neden olduğu görülmüştür. Daha spesifik olarak, magnezyum kaybı, üst yüzeyden anahtar deliğinin ortasına kadar, % 13 ila % 10 arasında, yeterli koruyucu gaz içinde değişmiştir. Magnezyumun diğer alaşımlardan daha düşük kaynama noktasına sahip olması nedeniyle, lazer kaynağı sırasında buharlaşmaya daha yatkındır. Diğer yandan, yeterli koruyucu gazla magnezyum kaybı, tabana göre % 2.5 ila % 3 aralığındadır. Koruyucu gazın (helyum) varlığı, basınç ve düşük sıcaklık ile buharlaşma oranını baskılar ve bu nedenle, magnezyum alaşımlarının ve oksijenin yeniden birleşmesini önler (Hong and Shin 2016).

2.3.2 Galvanizli Çeliklerde Lazer Kaynağı

Lazer kaynağı, araç ağırlığı azaltma, estetik olarak hoş yüzey kaplamaları ve kaynağın temassız doğası gibi otomobil montajında birçok avantajı vardır. Ancak, çinko kaplı çelik levhaların punta kaynağı problemlerine benzer şekilde, düşük buharlaşma Galvanizli çeliğin çinko kaplamasının sıcaklığı, lazer tur kaynağında problem yaratır. Çürüyen yüzeydeki buharlaştırılmış çinko kaplama, anahtar deliği stabilitesinin bozulmasına neden olabilir bundan dolayı sıçrama ve boşluk oluşumu da kaçınılmaz olacaktır. Anahtar deliği hareketinin üst yüzey görüntüleri analiz edildi; çinko kaplı çeliğin, anahtar deliği çapı değişikliği açısından kaplanmamış çelikten (Şekil 2.17'deki üstteki mavi zikzaklar) daha fazla kararsızlık gösterdiği ortaya çıktı. Çinkonun doyma

basıncının 1800 K ile 2000 K arasında değişen sıcaklıklarda yaklaşık 50 bar ila 100 bar arasında değiştiğini anlaşılmıştır. Kim ve diğerleri (2016), lazer ışınının anahtar deliği konumuna göre ses kaynaklarının elde edilmesinde kritik bir faktör olduğunu ortaya koymuştur. Lazer ışını ön anahtar deliği duvarına yerleştirildiğinde, çinko kaplama doğrudan ısıtılarak çinko buharının 2939 K kritik nokta sıcaklığına ulaşması sağlanabilir. Kritik nokta sıcaklığında Martynyuk (1983) çinkonun ilgili kritik nokta basıncını 2460 bar olarak rapor etti. Büyük buhar basıncı, buharlaşma geri tepme basıncı, hidrostatik basınç ve kılcal basınç arasındaki karmaşık anahtar deliği basınç dengesini kesinlikle bozar (Hong and Shin 2016).

Her ne kadar çinko kaplamanın kararsızlığına çözümler bulmak için çok fazla araştırma yapılmış olsa da, lazer tipinin etkilerini analiz etmek için sadece birkaç çalışma yapılmıştır. Hiraga ve diğerleri (2002), lazer kaynağının dalga boylarının iş parçası üzerindeki lazer ışını emilimini ve ayrıca plazma erimesini etkilediğini bulmuşlardır. Tanand Shin (2014), bu şekilde yoğunlaşmadan oluşan metal parçacıklarının, aksi takdirde alt tabaka tarafından absorbe edilecek olan olay lazer ışını absorbe edeceğini ve saçacağını bildirmiştir. Metal partikülleri tarafından absorpsiyon ve saçılma miktarı, fiber lazerler gibi daha düşük bir dalga boyuna sahip lazerler için daha düşüktür (Hong and Shin 2016).



Şekil 2.17 Anahtar deliği çap ölçümü ve kare numarası (a) DP 590 çelik, (b) galvanize DP 590 çelik (Kim *et. al.* 2015).

Mei ve diğerleri (2013), CO2 lazere kıyasla, fiber lazer kaynağının daha yüksek gerilme mukavemetine ve sertliğe neden olduğunu bulmuştur. Bu sonuç, CO2 lazerin daha uzun dalga boyuna bağlanabilir, bu da lazer enerjisinin iş parçasına değil plazmaya emilimini artırır. CO2 lazerlerine kıyasla, fiber lazerler otomotiv endüstrisi için daha fazla enerji verimli olduğundan ve Jeong ve diğerleri (2004), fiber optik kablolar aracılığıyla yüksek optik güç iletilebilir. Bu nedenle, fiber lazer sisteminin ana çerçevesi uzaktan yerleştirilebilir, bu da üretim hattı kurulumunda esnekliği artırır (Hong and Shin 2016).

2.3.2.1 Kimyasal Bileşimdeki Değişim

Çinko buharının basınç artışı azaltmak için kaynak konfigürasyonunu değiştirmek yerine, araştırmacılar yabancı unsurları tanıtarak çinkonun kimyasal bileşimini değiştirmeye çalıştılar. Örneğin, Dasgupta ve Mazumder (2006), bileşimi değiştirmek için iki zımparalanmış plaka arasına bakır eklenmesini önermiştir.. Çeliğe kıyasla düşük bir erime sıcaklığına ($T_{\text{erime, Cu}} = 1358 \text{ K}$) sahip olan ilave bakır, kaynak işlemi sırasında çinko ile alaşım oluşturur. Çinko ve bakır alaşımı, kaynak havuzundaki çinkonun şiddetli davranışlarını önler, sonuçta gözenekliliği % 10'dan % 2'ye indirir. Kaynak sırasında spektroskopik ölçümlerden elde edilen çinko spektrum yoğunluğunun azaltılması, bakır ile alaşımı yapıldığı zaman çinko buharındaki azalmayı doğrular. Bu yöntemin olumsuz tarafı, bakırın eklenmesi, kaynağın mekanik özelliklerini değiştirecektir. Çekme dayanımı, korozyon yorgunluğu, kırılma vb. Mekanik arıza modlarını test etmek için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır (Hong and Shin 2016).

Bakır yerine Li ve diğerleri (2007), çinko kaplı levhaların arayüzünde alüminyum folyo kullanılmasını önermiştir. Füzyon bölgesinde alüminyum ilavesi, düşük erime sıcaklığı ($T_{\text{erime, Al}} = 933 \text{ K}$) ve yüksek buharlaşma sıcaklığı ($T_{\text{buharlaşma, Al}} = 2792 \text{ K}$) nedeniyle kaynak işlemine stabilite katmaktadır. İki çelik plaka arasına bir 25 cm alüminyum levha sokuldu. İlk kesme testi, füzyon bölgesinde azalmış gözeneklilik, daha fazla kaynak penetrasyonu ve daha iyi termal iletkenlik gibi birçok faktöre bağlı olarak kesme mukavemetinde (yaklaşık% 83.3) bir gelişme görüldü. Bununla birlikte, alüminyum folyo ve çinko kaplama arasında gevşek bir temas olması, kaynak havuzunun tutarsız stabilitesine yol açmıştır. Ses kaynakları üretmek için metal levhayla

temas halindeki kelepçelerden yeterli kuvvet gerekliydi. Alternatif olarak Li ve diğerleri (2007), proses stabilitesi için sıkıştırma kuvvetine bağımlılığı önlemek amacıyla, yüzeyin üzerine alüminyum uygulamak için bir soğuk sprej teknolojisini kullanmayı teklif etmişlerdir (Hong and Shin 2016).

2.3.2.2 Çinko Kaplamanın Çıkarılması

Tüm düşünülen tekniklerin dışında, en sezgisel çözüm, asidin kaplanmasını önleyerek sorunun temel nedenini ortadan kaldırır. Çinko kaplamanın çıkarılması, üst üste binen çelik levhaların kaynağı sırasında darbeleri, kirliliği ve gözenekliliği önemli ölçüde azaltacaktır. AWS WZC / D19.0-72 (1972) kılavuzunda, votka eklemli galvanizli çeliklerin kaynağı için mekanik olarak çinkonun düz ileri çözümü önerilmektedir. Daha gelişmiş bir yaklaşım olarak, Ma ve diğerleri (2013), Tarafından çinko lazer ablasyonu önerilmiştir. Bu teknik hem ön ısıtma hem de kaynaklama için 4 kW fiber lazerin çift geçişini içerir. Ön ısıtma işlemi için, daha geniş bir ışın çapına ve azaltılmış yoğunluğa izin vermek için lazer ışını odaklanmıştır. Ön ısıtma hızının ve odaklanmamış lazer ışını ofset mesafesinin optimizasyonundan sonra, ses kaynakları elde edildi. Çelik sacların kesitinin Enerji Dağılımlı Spektroskopisi (EDS) ölçümleri, çürüyen yüzeydeki çinkonun eritildiğini veya kısmen buharlaştığını doğruladı (Hong and Shin 2016).

Benzer şekilde yapılan bir çalışmada gaz tungsten ark kaynağı ve fiber lazer kaynağı kullanılarak bir hibrid işlem önerilmiştir. Bu yöntemde, çinko kaplamanın çinko okside dönüştürülmesi için metal plakaların ön ısıtılması için yardımcı bir gaz tungsten ark kaynağı kullanılmıştır ve levhaları kaynaklamak için bir fiber lazer kullanılmıştır. Kim ve diğerleri (2008), arayüzde üretilen çinko oksidin, çinkodan çok daha yüksek bir erime sıcaklığına (Terime, $ZnO = 2248 \text{ K}$) sahip olduğunu ve bunun da buhar basıncında bir azalmayı sağladığını belirtmiştir. Doğal olarak, gaz tungsten ark kaynağı ve fiber lazer kaynağının hibridizasyonuna benzer şekilde, çinko giderimi için yüksek güçte bir diyot lazeri ve füzyon için bir Nd: YAG lazeri kullanan iki odaklı bir çift lazer kurulumu önerilmiştir (Hong and Shin 2016).

Çinko kaplamanın çıkarılması çelik plakalarda daha fazla kaynaklanabilirlik sağlasa da, korozyona karşı hassasiyeti artırır. Pennington (1987), çürüyen yüzeyde çinko kaplamanın çıkarılmasından sonra nikel kaplamanın eklenmesini önermiştir. Ön ısıtma işlemi sırasında, katılaştığı zaman tabakayı kaplamak için lazer ışını içine ince nikel tozu enjekte edildi. Daha yüksek bir erime sıcaklığına sahip olan çinko, nikelden farklı olarak (T_{erime} , Ni = 1728 K) çeliğe yekpare davranır (Hong and Shin 2016).

2.3.3 Magnezyum Alaşımlarının Lazerle Kaynaklanması

Lazer kaynağı, magnezyum alaşımlarının, yüksek penetrasyon derinliği, dar füzyon bölgesi ve gaz tungsten ark kaynağı, elektron ışın kaynağı ve sürtünme karıştırma kaynağı ile karşılaştırıldığında yüksek verimden dolayı en çok ilgi çeken kaynak olmuştur. Ancak, lazer kaynağının bu avantajlarına rağmen, magnezyumun lazer kaynağı, oksit kapanımları, gözenek oluşumu, alaşım elementlerinin kaybı ve sıvılaşma ve katılaşma çatlaması gibi birçok sorunla karşılaşır. Burada en yaygın magnezyum alaşımları olan AZ31 ve AZ91 kaynakları ele alınmıştır.

2.3.3.1 Mikroyapı

AZ31'in ana metalinde altıgen, yakından paketlenmiş α -Mg bulunur. Fiber lazerin ürettiği magnezyum alaşımı AZ31B-H24 kaynağının füzyon bölgesinin (FZ) çok sayıda eşdeğer dendritik yapı ve boşaltılan ötektik β -Mg17Al12 çökeltilerinin interdendritik ve taneler arası bölgelerde mevcut olduğu anlaşılmıştır. Benzer mikroyapıların diyoit lazerleri gibi diğer lazerlerin kullanımı ile gözlemlenebilmiştir. Lazer kaynağı ile ilişkili denge dışı hızlı soğutma, baz metalinkinden daha ince tanecikler ile eşdeğer dendritlerin oluşmasına yol açar. Tanecik boyutu, kaynak merkezindeki eş eksenli tanelerden, FZ / ısıdan etkilenen bölge (HAZ) sınırının yakınındaki sütunlu tanelere geçiş yapar. β -Mg17Al12 intermetalik ötektik bileşiklerin magnezyum matrisinde homojen olarak dağıldığı gözlemlenmiştir (Hong and Shin 2016).

Ortalama dendritik tane boyutu, ısı giriş koşullarına bağlıdır. Wang ve diğerleri bir fiber lazer kullanarak 5 ve 10 mm kalınlığında çekilmiş bir AZ31B magnezyum alaşımı

üzerinde alın kaynağı deneyleri yapılmıştır. Deney, daha yüksek ısı girişinin FZ'de iri tanecik için daha uzun süre beklediğinden dolayı daha büyük ortalama tane boyutlarına sahip dendritlere yol açtığını bildirdi. Örneğin, 45, 37 ve 30 μm 'lik ortalama tane büyüklüğü sırasıyla 85.7, 62.5, 44 μm 'lik ısı girdisine karşılık geldiği tespit edildi. Lazer gücünde azalma veya daha hızlı bir kaynak hızı, daha hızlı bir soğuma süresine ve daha sonra da daha ince tanecik boyutlarına yol açar. Daha ince tane boyutları, malzeme sertliğinin artmasına neden olur. Buna karşılık daha kısa katılma süresinin, gevrek $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ çökeltilerinin konsantrasyonunda bir azalmaya yol açtığına işaret etmiştir (Hong and Shin 2016).

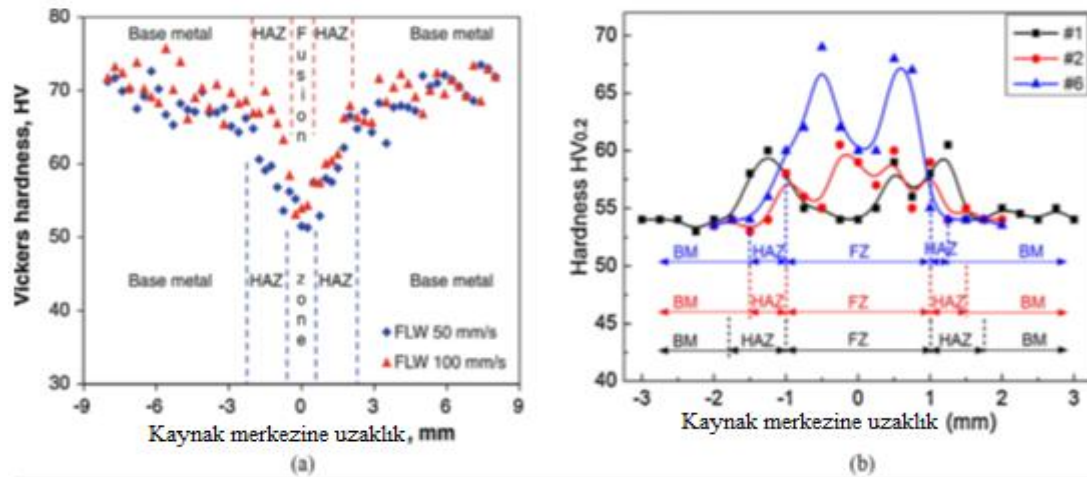
Yapılan bir çalışmada fiber lazerin ürettiği dövme magnezyum alaşımı AZ31B-H24 kaynaklarının ortalama tane büyüklüğü ve ikincil dendrit kol aralığını analiz edilmiştir. Analiz, FZ' de ortalama tane boyutunun ve ortalama ikincil dendrit kol aralığının kaynak hızındaki artışla azaldığı görüldü. Kaynak hızı, ortalama tane büyüklüğü ve ortalama ikincil dendrit kol aralığı üzerinde lazer gücüne göre daha etkili olduğu saptandı. Daha sonra FZ' de tane arıtmanın, lazer-ark hibrit kaynağında bir dolgu teli kullanılarak geliştirilmiştir. Bunun aksine, HAZ' da $\alpha\text{-Mg}$ tane boyutunda önemli bir fark olmadığını bildiren çalışmalarda olmuştur (Hong and Shin 2016).

2.3.3.2 Sertlik ve Çekme Özellikleri

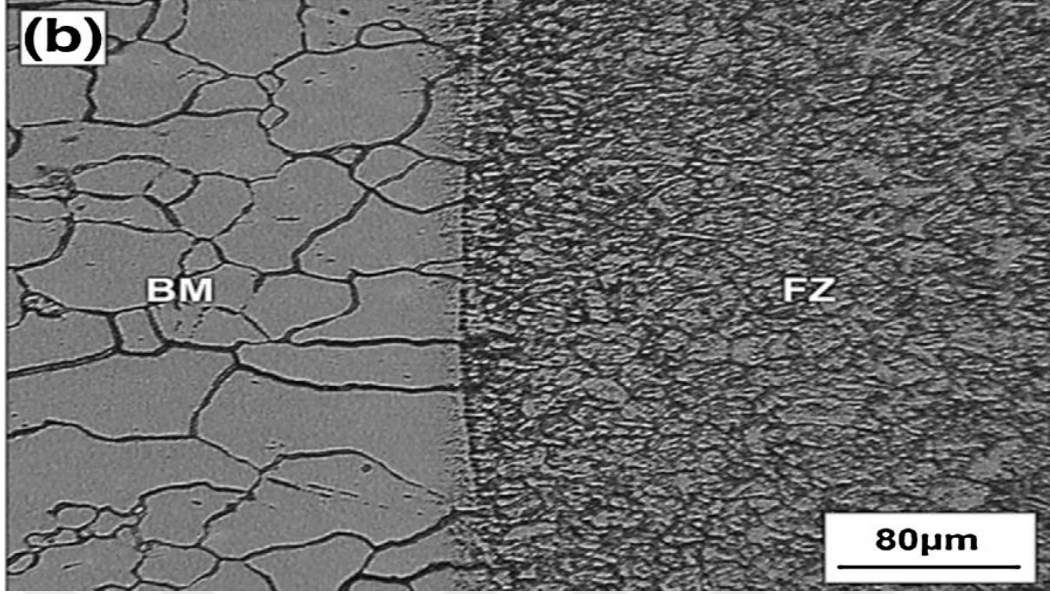
Chowdhury ve diğerleri (2012), AZ31B-H24 magnezyum alaşımı eklemleri kaynaklı 2 mm kalınlığındaki fiber lazerin mikro sertliğinin, ana malzemeden daha düşük sertlik sergilediğini bildirmiştir. Sertlik değeri, ana metalin 73 HV'sinden, Şekil 2.18 (a) 'da gösterildiği gibi, kaynağın merkezinde yaklaşık 54 HV'ye kademeli olarak azalmıştır. Baz metalden kaynak bölgesine ortalama sertlikte azalma, Kısmi tavllanmış H24'teki mikroyapının deforme olmuş ve uzatılmış tanelerden dönüşümü, dendritik katılma yapısına işaret etmektedir. Çekme testi sonuçları, alın kaynağı sonrası hem mukavemet hem de uzamada bir azalma göstermiştir. Ana malzeme ile karşılaştırıldığında, en yüksek çekme mukavemeti sırasıyla % 89 ve % 91 oranında azaltılarak 50 mm / s ve 100 mm / s kaynak hızlarında azaltılmıştır.

Kısmen tavllanmış H24 magnezyum alaşımasının tersine, ekstrüde edilmiş AZ31B'nin baz metal çöğünlukla a-Mg'den oluşur (Hong and Shin 2016).

Yaklaşık olarak 54 HV'de ekstrüde edilmiş AZ31B'nin (Şekil 2.18 (b)) baz metal sertliği, kısmen tavllanmış AZ31B-H24'ün 73 HB' sinden çok daha düşüktür. Bu nedenle Wang ve diğerleri (2011), fiber ekstrüde edilmiş AZ31B kaynaklı FZ' nin ortalama sertliğinin baz metalin 54 HV' sinden biraz daha yüksek olduğunu bildirmişlerdir. Şekil 2.18 (b) 'de gösterilen ortalama sertlik # 1 durumundan artmıştır ($P = 2 \text{ kW}$, $V = 1.4 \text{ m / dak}$, $Q = 85.7 \text{ J / mm}$) ila 6 ($P = 6 \text{ kW}$, $V = 7.8 \text{ m / dak}$, $Q = 46.1 \text{ J / mm}$). # 6 durumunun düşük ısı girdisi Q , tanelerin büyümesi için azaltılmış katılaşma süresi ile sonuçlanır (Hong and Shin 2016).



Şekil 2.18 Mikro sertlik profili (a) Fiber lazerle kaynaklı AZ31B-H24 alın derzleri $P = 2 \text{ kW}$, $V = 3, 6 \text{ m / dak}$ (Chowdhury ve ark. (2012), © Springer 2012). (b) Fiber lazer kaynaklı ekstrüde edilmiş AZ31 alın derzleri # 1: $P = 2,0 \text{ kW}$, $V = 1,4 \text{ m / dak}$, # 2 $P = 2,5 \text{ kW}$, $V = 2,4 \text{ m / dak}$, # 6 $P = 6,0 \text{ kW}$, $V = 7,8 \text{ m / dak}$ (Hong and Shin 2016).



Şekil 2.19 Bir fiber lazerin ürettiği AZ31'in mikroyapısı ($P = 6.0$ kW, $V = 7.8$ m / dak) (Wang *et al.* 2011).

Bu nedenle, daha yüksek ortalama sertliğe yol açar. Şekil 2.19' te gösterildiği gibi, FZ, baz metalinkinden daha ince taneciklere sahip eşmerkezli dendritlerden oluşmaktadır. Benzer şekilde Coelho ve diğerleri (2008), 2 mm kalınlığında haddelenmiş magnezyum AZ31B'ye izin vermek için bir Nd: YAG lazeri kullanmış ve HAZ ve füzyon bölgesinin baz metalin 53 HV' sine kıyasla 57 HV biraz daha yüksek bir mikro sertlik değeri gösterdiğini gözlemlemiştir. Wahba ve diğerleri (2012), CW disk lazer kaynaklı kalıplı AZ91D magnezyum alaşımının 1.3 mm kalınlığında mikro sertliğini ölçtü. Baz malzemeden FZ' ye olan ortalama sertlik 63.5 ± 1.2 HV 200 gf' den 77.6 ± 1.6 HV 200 gf'ye yükseldi. Mikroyapı analizi, tanelerin iyileştirilmesini ve sert intermetalik bileşiklerin daha yüksek hacimli bir fraksiyonunu göstermiştir.

2.3.3.3 Kusurlar

a) Oksit Kapanımları

Magnezyumun oksidasyona güçlü bir eğilimi olduğu iyi bilinmektedir. İş parçası sıcaklığındaki artışa bağlı olarak lazer kaynağı sırasında oksidasyon oranı önemli ölçüde olduğu görülmüştür. Cao ve diğerleri (2006), magnezyumun oksidasyon hızının 450°C 'nin üzerindeki sıcaklıklarda yoğunlaştığı görülmüştür. Lazer kaynağı sırasında

erimiş havuz ve buhar bölgesi arasındaki arayüzde oksit filmler kolaylıkla oluşturulmaktadır. Kaynaktaki oksijen içeriğindeki artış ölçülmüştür. CO2 lazer kaynaklı bir AZ31 tabakasının EDS' si, baz metalle karşılaştırıldığında füzyon bölgesinde oksijen içeriğinde % 14.1'lik bir artış göstermiştir.

Lazer kaynağı sırasında oksidasyonu en aza indirmek için, iş parçasını bir koruyucu gaz kullanarak çevreleyen havadan korumak önemlidir. En uygun koruyucu gazı tanımlamak için AZ91'de helyum, argon ve azot kullanılarak plaka üstü boncuklu lazer ışını kaynağı gerçekleştirilmiştir. Helyum gazı, yüzey kalitesine, kaynak derinliğine ve en boy oranına göre en etkili koruyucu gaz olduğu saptandı. Helyum gazı da plazmanın oluşumunu baskılamakta etkili olmuştur. Helyum gazı, plazma oluşumunu sınırlayan yüksek iyonizasyon potansiyeline (24.5 eV) sahip olduğu görülmüştür (Hong and Shin 2016).

b) Gözeneklilik

Gözenek oluşumunu önlemek için, kaynak yapılmadan önce oksit tabakasının iş parçasından çıkarılması önemlidir. Oksit tabakası, paslanmaz çelik fırçalar, alüminyum yünü ve zımpara kullanılarak mekanik olarak çıkarılabilir. Alternatif olarak, önerilen lazer ışını, önce bir öncü lazer ile numuneyi önceden ısıtmak ve daha sonra ikincil bir lazer kullanarak bir kaynak yapılması önerilmiştir. Bu işlemin önemi, önde gelen lazer ışınının, kaynaklamadan önce magnezyum hidroksitin ayrıştırılmasında da etkili olmasıdır, bu da ayrı bir temizleme işlemine duyulan ihtiyacı ortadan kaldırır. Ayrıca numuneyi bir plazma arjektörü kullanarak ön ısıtmanın gözenekliliğin önlenmesinde etkili olduğu saptanmıştır.

Magnezyum alaşımlarının lazer kaynağında bir başka olası gözenek nedeni, anahtar deliğinin dengesizliğidir. Magnezyum alaşımlarının lazer kaynağında sabit bir anahtar deliğinin korunması, alüminyum alaşımlarına kıyasla nispeten kolaydır.

Gözenekliliği daha da azaltabilen hibrid fiber lazer-MIG kaynağı kullanmak tercih edilmiştir. Ark bölgesinin genişliğini ve derinliğini artırmak, katılaşmayı uzatır, bu da

kabarcıkların kaçması için daha uzun bir süre sağlar. Bununla birlikte, arkın düşük güç yoğunluğu ve termal iletimin doğası nedeniyle, arkın kalın malzemeler üzerinde sınırlı bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Hibrid kaynak kullanılarak 8 mm kalınlığında numuneler için gözeneksiz kaynakların elde edilmesi mümkün görünmemektedir.

2.3.4 Titanyum Alaşımlarının Lazer Kaynağı

Titanyum malzemeler Fiziksel ve kimyasal bakımdan birçok metale göre üstün özellikler gösterir aynı zamanda çelik ve kobalt alaşımlı malzemelere göre de daha hafiftir. Özgül ağırlığı 4.51 gr/cm^3 ve ergime sıcaklığı 1680°C olan titanyum, oda sıcaklığında sıkı dizilimli hegzagonal kafes yapısına sahip bir mikro yapısı vardır. Yüzeyinde oksitlenmeyi önleyen ve korozyon etkili kimyasal maddelerle reaksiyona girmeyi engelleyen bir oksit tabakası oluşturması sayesinde titanyum malzemeler korozif etkilere karşı dirençli malzemeler olarak öne çıkmaktadır (Aydın ve Karaağaç 2018).

Titanyum, otomobil montajında kullanılması düşünülen başka bir malzemedir. Titanyumun yüksek maliyeti, titanyumun yüksek mukavemet-ağırlık oranına ve iyi korozyon direncine rağmen, otomobillerde az sayıda bileşime uygulanmasını kısıtlamıştır (Faller and Froes 2001). Titanyum ve oksijen atomlarını ayırmak için gereken büyük miktarda enerji nedeniyle titanyum maliyeti çok yüksek olmaktadır. Titanyum alaşımları, yalnızca faydaların en üst düzeye çıkarılabileceği bileşenlerde kullanılır. Faller (2002)' ye göre titanyumun, rotlar, valfler ve eksantrik milleri gibi dönen ve pistonlu kütlelerde kullanıldığını, yüksek sıcaklıklarda karakteristik yüksek sertliğin motorun yüksek hızlarda çalışmasına izin verdiği belirtilmiştir. Titanyum ayrıca egzoz sistemleri, süspansiyon bileşenleri ve fren sistemleri gibi çeşitli otomobillerin farklı alanlarında da kullanılmaktadır.

Titanyum alaşımlarının birleştirilmesi için başlıca konvansiyonel kaynak yöntemleri gaz metal ark kaynağı (GMAW), elektron ışın kaynağı (EBW) ve gaz tungsten ark kaynağıdır (GTAW). Geleneksel yöntemlerin, zayıf kaynak kalitesi ve yüksek ısı girdisi gibi, daha büyük bozulmalara neden olan, doğal sakıncalara sahip olduklarını

anlaşılmıştır. Lazer kaynağının en büyük avantajı, kaynağın vakum olmayan bir ortamda gerçekleştirilebilmesidir. Lazer kaynağı TIG kaynağına kıyasla karşılaştırıldığında, lazer kaynağının daha düşük bozulmalara neden olduğu saptanmıştır. Ayrıca, Nd: YAG lazerin ürettiği kaynağın ortasındaki ortalama tane büyüklüğünün, GTAW kaynak malzemelerine göre 10 kat daha küçük olduğu bulunmuştur.

Kaynağın tane boyutu, kaynak mekanizmasıyla ilişkili soğutma hızından etkilenir. Daha düşük toplam ısı girişi, daha hızlı işlem süresi ve lazer ışını kaynağına bağlı küçük ışınli odak karakteristiği, daha hızlı bir soğutma hızına yol açar ve sonuç olarak kaynakta daha ince bir mikro yapıya neden olur. Küçük lazer kaynağı çapı da HAZ' ın genişliğini en aza indirir. HAZ genişliklerinin GTAW, EBW ve lazer ışın kaynağı derzleri için sırasıyla 4.0, 1.5 ve 0.2 mm olduğunu bildirmişlerdir. Balasubramanian ve diğerleri (2013), çeşitli titanyum alaşımları arasında bu makale iki fazlı $\alpha + \beta$ üzerine odaklanacaktır. Ti6Al4V asit otomotiv endüstrisinde en çok kullanılan titanyum alaşımıdır (Hong and Shin 2016).

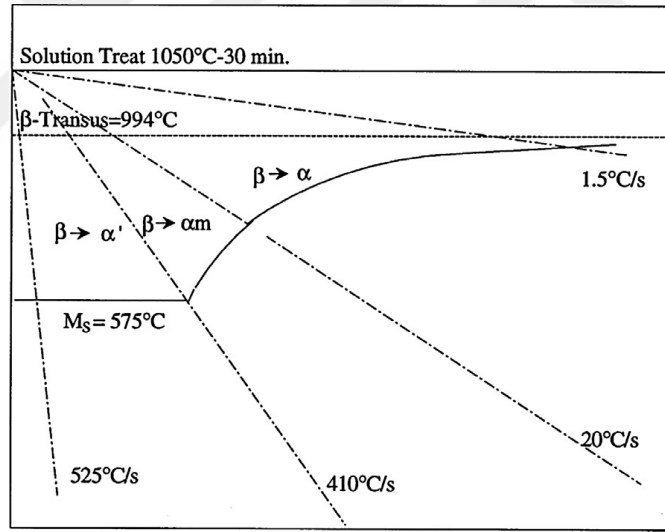
2.3.4.1 Mikroyapı

Ti6Al4V'nin lazer kaynağında, temel problemler FZ ve HAZ' da sert ve kırılgan martensit yapılarının oluşmasından kaynaklanır. Dar, odaklanmış ışın karakteristiği ve lazer kaynağının yüksek enerjisi, baz metalden eriyik havuzuna kadar büyük bir termal gradyan oluşturur. Yapılan çalışmalarda sıcaklığın mekansal ve zamansal dağılımının eşit olmayan bir mikro yapı ürettiği saptanmıştır. Ek olarak, lazer ışını kaynağının yüksek kendiliğinden sönme hızı, B'den martensit α fazına dönüşecek mikroyapıyı destekler (Hong and Shin 2016).

Ti6Al4V tabanı, bir orijinal, eş eksenli α fazı ve bir granül β fazından oluşur. β fazı vanadyum ile stabilize edilirken, orijinal α fazı alüminyum tarafından stabilize edilir. Lazer kaynağı işlemindeki ısıtma döngüsü ilerledikçe, vanadyum vücut merkezli kübik β fazından dışarı yayılır ve altıgen yakın paketlenmiş α fazını doyurur ve daha sonra β dendritik taneler büyür. Daha sonra vücut merkezli kübik β fazı tanelerinin, sıcaklıklar

995°C'nin β transus sıcaklığının üzerinde olduğu zaman, ısı akışı yönünde büyüdüğünü gözlemlenmiştir. β fazı, 1654 ° C' lik sıvılaşma sıcaklığında tam erime gerçekleşene kadar ısıtma işlemi sırasında artar. FZ, katılaşma üzerine tam difüzyonlu β fazı transformasyonuna uğrayacaktır. HAZ vanadyum difüzyonu yoluyla β fazının homojenizasyonunu sağlayacaktır(Hong and Shin 2016).

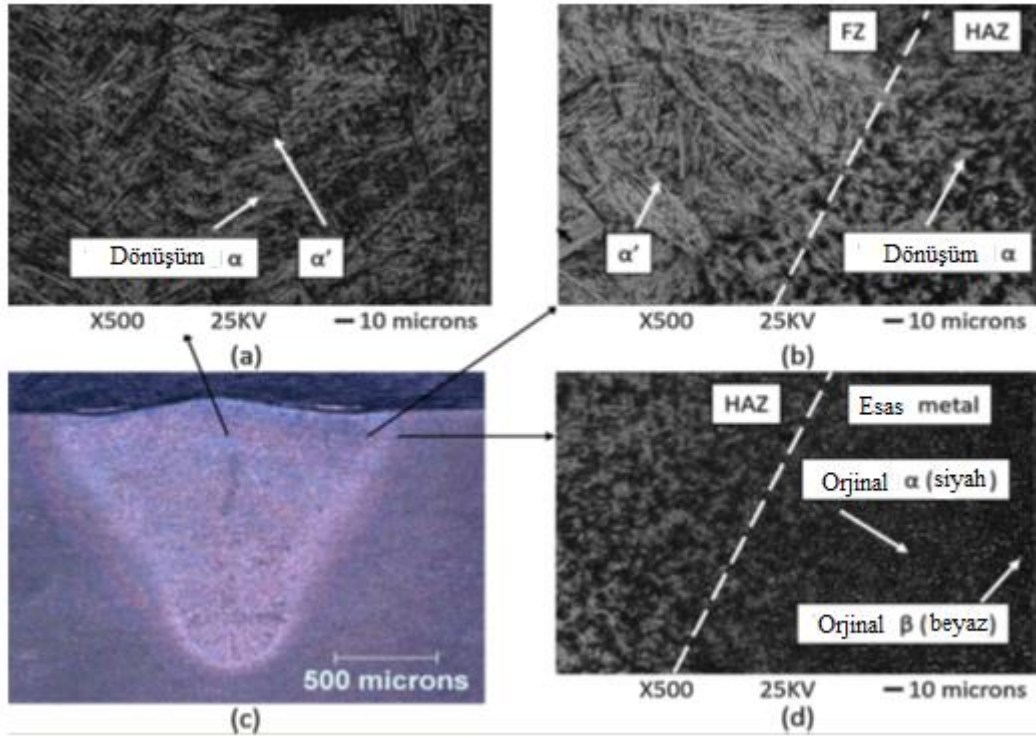
Soğutma çevrimi sırasında, FZ ve HAZ martensitik α' fazına ve dönüştürülmüş α fazına dönüşüm yaşarlar. Benzer transformasyon, β transus sıcaklığının yukarisından bastırılarak elde edilebilir. Martensit oluşumu derecesi, katılaşma işlemi sırasında soğutma oranı tarafından yönetilecektir. Soğuma hızı 410°C / s'den yüksek olduğunda martensite tam dönüşüm sağlanacağı deneylerle anlaşılmıştır. Sürekli soğutma diyagramında gösterildiği gibi (Şekil 2.20), soğutma oranı 410°C / s ve 20°C / s arasında olduğunda mikro yapı kısmi dönüşüme α fazına geçecektir.



Şekil 2.20 30 dakika boyunca 1050 ° C'de muamele edilen Ti-6Al – 4V β çözeltisi için şematik sürekli soğutma diyagramı (Ahmed and Rack 1998).

Esas (baz) metaller, HAZ ve FZ arasındaki sınırlar, Şekil 2.21 (c) 'de gösterildiği gibi mikro yapıdaki fark ile tanımlanabilir. Şekil 2.21 (d)' deki SEM görüntüsünde gösterildiği gibi, ana metal eşdeğer orijinal α faz ve granüler β fazından oluşur. Şekil 2.21 (a) 'da gösterildiği gibi füzyon bölgesi, asiküler morfolojili α' martensit fazının yanı sıra gri blok dönüştürülmüş α fazını içerir. Şekil 2.21' de gösterilen HAZ'ın (b) olduğunu gösterdi. ve (d) FZ'ye kıyasla daha karmaşık bir yapı sergilemektedir. HAZ

mikro yapısı, birincil α , bloklu α , martensitik α' ve granüler β fazının heterojen bir karışımından oluşur. Daha sonra yapılan bir çalışmada, mikro odak X ışını kırınım sistemi (Micro-XRD) kullanılarak HAZ'deki orijinal β fazının varlığı doğrulanmıştır. Kabir ve diğerleri (2010), HAZ'ın baz metalin yakınındaki (995 ° C'lik β transus sıcaklığının üzerinde soğutulmuş) ve FZ'nin yakınında (1605°C'nin sıvılaştırma sıcaklığının altında soğutulmuş) bölge tarafından ayırt edilebildiğini bildirmişlerdir. FZ'nin yakınındaki bölge esas olarak küçük bir miktar birincil α ile C'den oluşur; baz metal yakınındaki bölge ise birincil α , taneler arası β fazı ve α' 'den oluşur (Hong and Shin 2016).



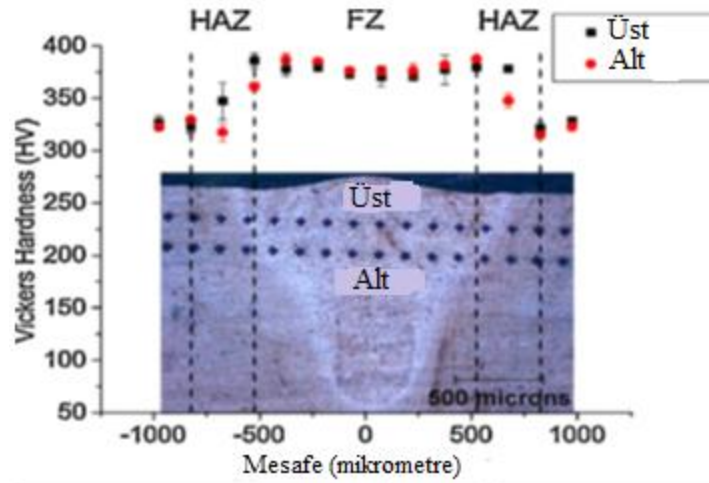
Şekil 2.21 Ti6Al4V kaynağındaki (a) FZ, (b) HAZ, (c) kaynak enine kesit, (d) ana metaldeki bölgelerin mikroyapıları (Hong and Shin 2016).

Lazer kaynak işlemi koşullarının, kaynağın mikro yapısını etkilediği bilinmektedir. Yapılan çalışmalarda α' martensit fazının sadece hızlı kaynak hızlarında gözlemlendiği görülmüştür. Daha hızlı kaynak hızları, lazer ışını ve iş parçası arasındaki etkileşim süresini azaltır ve daha sonra soğutma hızını artırır. Ek olarak, α' martensite fazının ortalama genişliği, kaynak hızı 2 m / dak ila 8 m / dak arasında arttıkça, 1.399 μm 'den 1.09 μm 'ye kadar daha da ince hale gelmiştir. Bir diğer benzer bir çalışmada, FZ ve

HAZ' daki tane boyutlarının PW Nd: YAG lazerin ortalama gücünde bir artışla büyüdüğü gözlemlenmiştir. Bu, daha yüksek bir soğutma oranıyla sonuçlanan daha yüksek toplam ısı girdisinden kaynaklanır. Sonuç olarak kaynak hızının artırılması penetrasyon derinliğinin ve HAZ genişliğinin azaldığı gözlemlenmiştir.

2.3.4.2 Sertlik ve Çekme Özellikleri

Kaynaktaki sertlik dağılımı mikroyapı tarafından belirlenir ve FZ ve HAZ' daki sertleşme α martensit fazının oluşumuna bağlanır. α martensit fazının varlığı, sertlik ve süneklik pahasına sertliği artırır. Hong ve Shin (2016)' e göre, α martensite fazındaki artıştan dolayı HAZ'daki sertliğin kaynak merkezine doğru hızla arttığını bildirmiştir. HAZ'ın küçük genişliği nedeniyle çok yüksek bir uzaysal mikro sertlik derecesi yaratılır. Yapılan benzer çalışmalarda 1.2 kW gücünde ve 2.5 m / dk kaynak hızında bir CW fiber lazer tarafından oluşturulan Ti6Al4V kaynak bağlantısının, 340 HV'den 410 HV' ye kadar tepe sertliğinde bir artışla sonuçlandığı gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, bir PW Nd: YAG lazer kullanılarak FZ' deki Vickers sertliğinde ortalama 45 HV' lik bir artış olduğu görülmüştür. Costa ve diğerleri (2007), kaynak kökü yakınında ölçülen sertlik değerlerinin yüzeye yakın ölçülenlerden daha yüksek olduğunu bildirmişlerdir.



Şekil 2.22 Ti₆Al₄V kaynağının (P = 1000 W, V = 2.66 m / dk) ortalama mikro sertlik değerleri (% 95 güven aralığını gösteren hata çubuklarıyla,) (Hong and Shin (2016)).

Kabir ve diğerkleri (2010), kaynak hızının artmasıyla kaynağın ortalama sertliğinde bir artış gözlemlemiştir. Bu eğilim daha hızlı soğutma oranı tarafından üretilen daha büyük hacimli α martensit fazı ile ilgilidir. Hong ve Shin (2016), çoklu fizik modelinden gelen termal geçmişi kullanarak kaynakların kaynak geometrisini ve mikro sertliğini tahmin etmişlerdir. Deney ve simülasyon sonuçlarına göre FZ ve HAZ sınırlarında maksimum sertlik tutarlı bir şekilde ölçülmüştür. Bir fiber lazerin 1000 W güç seviyesinde üretildiği kaynak kesitinin mikro sertlik dağılımı ve 2.66 m / dk kaynak hızı Şekil 2.22' de gösterilmiştir.

Gerilme özellikleri, kaynak mikro yapısı, gözeneklilik ve kaynak profili tarafından büyük ölçüde etkilenir. Balasubramanian ve diğerkleri (2013), bir CO2 lazerin ürettiği alın kaynaklı numunelerin 3500 W güç düzeyinde ve 50 mm / s' lik bir kaynak hızında enine çekme testi gerçekleştirmiştir. Lazer ışını kaynaklı eklemin akma dayanımı ve gerilme mukavemeti, sırasıyla ana malzeme 969 ve 1002 MPa' dan biraz daha düşük olan 959 ve 982 MPa idi. Balasubramanian ve diğerkleri (2013), akma dayanımı ve gerilme mukavemetindeki hafif azalmanın eklemin akustik morfolojisine atfedilebileceğini bildirmişlerdir. Daha sonraki çalışmalar ise lazer kaynaklı Ti6Al4V alaşımındaki mikroyapının heterojenliğinin çatlak büyümesini ve yorgunluk hasarını artırdığı gözlemlenmiştir. Casalino ve diğerkleri (2015), alın kaynağı konfigürasyonunda fiber lazerle kaynaklanmış 2 mm kalınlığındaki Ti6Al4V plakalarının çekme testi sonuçlarını rapor etmiştir. Çekme testine tabi tutulan kaynakların kırılmış yüzeyi keskin kenarlı homojen olmayan bir yüzey sergiler ve α martensitin rastgele yönelimleri çatlak yolunu saptırdığı görülmüştür. Benzer çatlak yayılma davranışı da başka çalışmalar tarafından da doğrulanmıştır. Tersine, ana metalin gerilme testi, tekdüze bir sünek kırığı ile sonuçlanmıştır.

Kırılma yüzeyinde mikro gözenekler ve alüminyum oksitlerin varlığı bulunmuştur ve bu da süneklik kaybına yol açtığı saptanmıştır. Casalino ve diğerkleri (2015), gözenekliliğin varlığının muhtemelen kaynaklanmış örneklerin nihai gerilme mukavemetindeki ve nihai sünekliklerinde ki azalmanın sırasıyla % 20 ve % 60 ila % 70 oranında olduğunu belirtmiştir.

Gao ve diğerleri (2014)'ne göre, V- ve H-şekilli kesit profilleri ile alın kaynakları arasındaki gerilme mukavemetini karşılaştırmıştır. Kaynaklar, bir PW Nd: YAG lazeri kullanılarak 2 mm kalınlığında Ti6Al4V tabakaları üzerinde gerçekleştirildi. V-şekilli kaynaklı eklem için, plastik suş, HAZ ve baz metal sınırı boyunca muntazam bir şekilde dağıtılmıştır. V-şekilli kaynaklı eklem bir cinsinin eşit olmayan dağılımı, daha düşük gerilme mukavemetine yol açan yüksek lokal gerilimi arttırmıştır. H şekilli kaynaklı bağlantılardan V şekilli kaynaklı bağlantılar.

4.1.4.3 Kusurlar

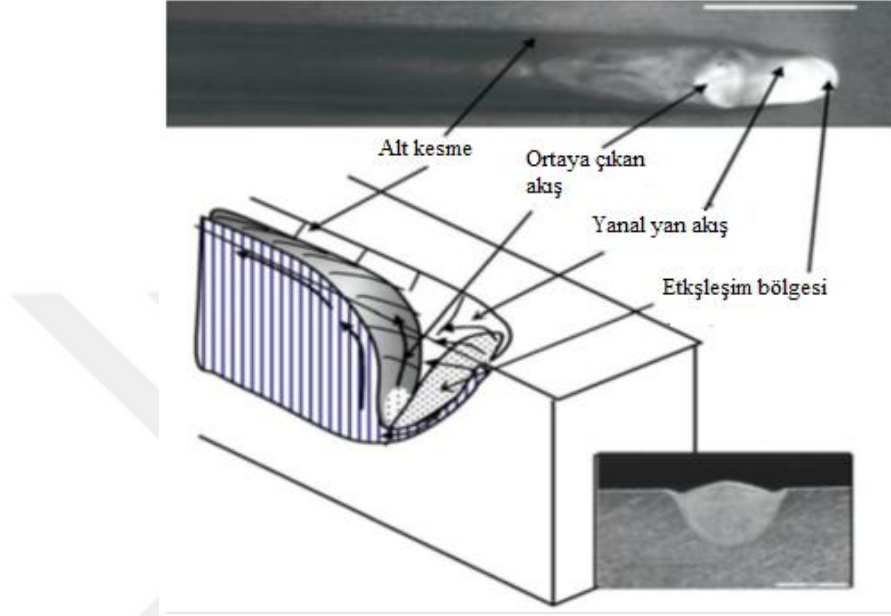
a) Alt kesmeler

Lazer kaynağında, gözeneklilik ve alt kesme, stres konsantrasyonları olarak hareket edebildikleri ve daha sonra yorulma çatlaklarını başlatabildikleri için oldukça istenmeyen bir durumdur. Genel amaçlı füzyon kaynağı için geliştirilen AWS D17.1 / D17.1M: 2010-AMD1 (2012) standardına göre, Alt kesim, A sınıfı bir kaynak için $0,07 T'$ ye (T parçası iş parçasının kalınlığıdır) eşit veya daha az olmalıdır (Hong and Shin 2016).

Ahn ve diğerleri (2016)'ne göre, alt kesimin derinliğinin artan lazer gücü ile yaklaşık 0.15 mm'ye kadar arttığını bildirmiştir. Alt kesimin ana sebebi, yüksek buharlaşma gücüne sahip olup, bu da güçlü buharlaşma ve erimiş malzemenin dışarı atılmasına neden olmuştur. Aslında, 1.5 kW'ın üzerindeki lazer gücüyle üretilen bir alt kesme, AWS D17.1 standardı tarafından belirlenen sınırdan daha büyüktü. Kaynak hızına göre kesme derinliğinin ilk önce arttığı ve maksimum değere ulaştığı ve daha sonra kaynak hızıyla azaldığı görülmüştür. Benzer şekilde Kabir ve diğerleri (2010), kesme derinliğinin 1,5 m / dk'lık bir kaynak hızında en büyük olduğunu ve daha sonra kaynak hızındaki bir artışla azaldığını bildirmiştir.

Bu fenomenin çözülmesi için, kaynak hızı iki rejime ayrılarak açıklanmaya çalışıldı. Düşük kaynak hızı rejiminde (azami alt kesme derinliğine ulaşmadan önce) merkezi ortaya çıkan akış, ön anahtar deliği duvarından yayılan yan akışlarla çarpışır. İki akışın

çarpması, ortaya çıkan eriyiğin numune yüzeyine ulaşmasını önler. Şekil 2.23' de gösterildiği gibi, Fabbro (2010), bu fenomeni ön-tümsek rejiminde ortaya çıkmış olarak tanımlamıştır. Daha yüksek kaynak hızı rejiminde (maksimum alt kesme derinliğine ulaştıktan sonra), merkeze akan akış tarafından yan akım aşırı derecede güçlenir.



Şekil 2.23 “Ön-tümsek” rejiminin eriyik havuzu akışının taslağı, sonuçta azalmaya neden olur.

Daha sonra ısı radyasyonu izleme sinyaline dayalı olarak Nd: YAG lazerin tepe gücü ve darbe süresini kontrol eden uyarlamalı bir kontrol sistemi geliştirilmiştir. Uyarlamalı kontrol sistemi, geleneksel bir dikdörtgen puls şekli ile yapılanlara kıyasla, alt kesme derinliğini bir buçuk oranında azaltabilmiştir.

b) Gözeneklilik

Lazer kaynağı sırasında anahtar deliği stabilitesi, anahtar deliği çökmeleriyle oluşan gözenekliliğin önlenmesinde önemlidir. Wang ve diğerleri (2007), koruyucu gazın kaynak işlemini stabilize etmeye ve plazma bulutunun boyutlarını azaltmaya yardımcı olduğunu belirtti. Sayısal modellemelerine göre, etkili koruyucu bölge (0.83 veya daha yüksek hızlarda yardımcı gaz kütlesi fraksiyonlu bölge), eşdeğer gaz akışı kullanıldığında argon gazından daha büyüktür. Buna ek olarak, Taguchi analizini kullanan Casalino ve diğerleri (2005), helyumun, araştırmalarında göz önüne alınan

parametreler için argondan daha düşük bir seviyede kusur verdiğini bulmuştur. Zhang ve diğerleri (2011), Ti6Al4V lazer kaynağı sırasında yardımcı gazın anahtar deliği ve erimiş havuzun stabilitesi üzerindeki etkisini araştırmak için sayısal bir model geliştirmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, lazer / malzeme etkileşim bölgesi üzerinde yardımcı gaz akışının çarpması, erimiş havuz yüzeyinin ön kısmının içbükey olmasına yardımcı olur. Anahtar deliği etrafındaki içbükey şekil, anahtar deliği açıklığı etrafındaki erimiş havuzu azaltır ve böylece anahtar deliği açıklığını genişletir ve stabilize eder.

Gözeneklilik, katılma sırasında kaynak havuzunda tutulan gaz kabarcıkları tarafından da üretilebilir. Gao ve diğerleri (2014), PW lazer kaynağında örtüşen faktörü artırmanın eriyik havuzundan kaçan kabarcıklara yardımcı olabileceğini bildirmişlerdir. Daha sonra yapılan çalışmalarda katılma sırasında Ti6Al4V'nin hidrojen çözünürlüğünün azalmasından dolayı FZ' de hidrojen gözeneklerinin oluşabileceği belirtilmiştir. Ayrıca titanyum alaşımlarının genellikle sekonder faz dispersoitlerin yokluğu ve tane sınırlarında safsızlıklar nedeniyle FZ katılma çatlamasına karşı duyarlı olmadığını belirtmişlerdir.

2.3.5 Farklı Malzemelerin Lazer Kaynağı

Alüminyum alaşımları, magnezyum alaşımları, titanyum alaşımları ve çelik kombinasyonları gibi farklı metallerin kaynağı, intermetalik bileşiklerin oluşumu nedeniyle her zaman zor ve bazen imkansız bir görev olmuştur. Pres sertleştirilmiş çeliklerin lazer kaynağı, çelik levhalar genellikle Al-Si alaşımları ile kaplandığı için benzer olmayan metallerin birleştirilmesine benzer zorluklarla karşılaşılır. Bununla birlikte, fiber lazerler, Nd: YAG lazerler ve CO2 lazerleri kullanan birçok yeni çalışma, bazı başarılarla gerçekleştirilmiştir. Bu bölüm, benzer olmayan malzemelerin lazer kaynağı üzerinde yapılan araştırmayı açıklamaktadır (Hong and Shin 2016).

Son yıllarda, çelik, alüminyum ve magnezyum hibridlerden oluşan parçalar, ağırlık tasarrufu amacıyla otomobillerde giderek daha fazla kullanılmaktadır. Preslenmiş sert çeliklerin A sütunları, B sütunları ve tavan rayları gibi yapısal elemanlarda

kullanılmaktadır. Hafif malzemeler ön ve arka çamurluklarda, başlıkta ve bagajda kullanılır. Malzeme bölümünde belirtildiği gibi, bu hafif parçaların çoğu, vidalama veya perçinleme gibi mekanik vasıtalarla gövde iskeletine bağlanır. Bununla birlikte, daha fazla ağırlık azaltımı, doğrudan çelik ve alüminyum veya magnezyum kaynağı ile sağlanabilir (Hong and Shin 2016).

Yan ve diğerleri (2010), metallerin termal özellikleri farklı olduğu ve arayüzde kırılğan bir intermetalik bileşik katmanının oluşabileceği için alüminyum veya magnezyumun çeliğe kaynaklanmasının zor olduğunu bildirmişlerdir. Daha sonra farklı malzemeler arasındaki termal genleşme farkının yüksek kalıntı gerilmeleri ile sonuçlandığı anlaşılmıştır. Buna ek olarak, alüminyumun çeliğe kaynatılmasında, $FeAl_3$, $FeAl_2$ ve Fe_2Al_5 gibi kırılğan alüminyum açısından zengin fazların hızlı ısıtma ve soğutma işlemlerinde önemli gelişmelerde kaydedilmiştir. Daha sonra Fe_3Al , $FeAl$, $FeAl_2$, Fe_2Al_5 ve $FeAl_3$ intermetalik fazların ikili Al-Fe faz diyagramına göre erimiş Al-Fe karışımında kolaylıkla oluştuğu anlaşılmıştır. Zhou ve diğerleri (2016), Fe-Al bileşiğinin $FeAl$, $FeAl_3$, Fe_2Al_5 ve Fe_3Al sırasına göre ilk prensip düzlem-dalga psödopotansiyel yöntemine göre kolaylıkla oluştuğunu bildirmişlerdir. İntermetalik fazların tipik sertliği Çizelge 2.2'de gösterildiği gibi rapor edilmiştir (Hong and Shin 2016).

Çizelge 2. 2 Fe-Al intermetalik bileşiklerin mekanik özellikleri (Hong and Shin 2016).

İntermetalik	$FeAl_3$	Fe_2Al_5	$FeAl$	Fe_3Al
bileşik türü				
Vickers	892	1013	470	330
sertliği 1 kfg				
yük (HV)				

Gevrek intermetalik fazların, özellikle alüminyum açısından zengin intermetalik fazların oluşumu sonucunda, kaynak bölgesinin çatlaklara daha meyilli olduğu sonucuna varılmıştır. Difüzyon sürecini kontrol etmenin farklı metallerin lazer kaynaklarında önemli olduğu, çünkü intermetalik oluşumun yönetildiğini anlaşılmıştır.

2.3.5.1 Tek Lazer Işın Kaynağı

Benzer olmayan malzemeler çeşitli ortak konfigürasyonlarda lazerle kaynaklanabilir. En yaygın ortak konfigürasyonlar, alın ve bindirme kaynağıdır. Yapılan araştırmalarda, alın kaynağı konfigürasyonunda, intermetalik formasyonun, lazer ışınının sadece alüminyum eritmek üzere hassas bir şekilde hizalanmasıyla en aza indirilebileceği ve böylece lehimlenmiş bir eklem oluşturacağı öne sürülmüştür. Üst üste binen kaynak için, difüzyon işleminin, üstelik üst üste gelenin hangi maddeden etkilendiğini açıkça vurgulamak önemlidir. Örneğin, Sierra ve diğerleri (2007), DC 04-6016 alüminyum için 500 µm'ye kadar nüfuzla hatasız bir üst üste binme kaynağı elde edebilmişlerdir. Bununla birlikte, çelik üzerinde alüminyum bir konfigürasyon, daha kalın intermetalik bileşikten dolayı her zaman arayüzde çatlaklara neden olmuştur. Eklem çekme kesme testi, yüksek kırılma ve sertlik ile ilişkili olan intermetalik bölgede bir kırılma sergilemiştir.

İntermetalik tabakanın kalınlığını azaltmak için turbanın kaynak konfigürasyonunda alüminyumun arka tarafına bir bakır ısı alıcının yerleştirilmesi önerilmiştir. FEM termal analizi, bir destek bloğu eklemenin, alüminyum alaşımlarının erimiş zamanını azalttığını ve böylece intermetalik tabakanın büyümesini baskıladığını göstermiştir. Birleştirme dayanımı, alüminyuma bir bakır destek bloğu ilave edilerek, yaklaşık 40 MPa'dan 70 MPa'ya kadar geliştirildi. Ayrıca, koruyucu gaz tedariki pozisyonunun, soğutma koşullarını ve intermetalik tabakanın büyümesini etkilediği saptanmıştır.

Daha sonraki çalışmalarda çinko kaplı DC04 çeliğinin 6016 alüminyum alaşımına birleştirilirken, çinko tabakanın varlığının sıvı alüminyum yayılmasını ve Fe-Al intermetalik oluşumun bastırılmasını desteklediği keşfedildi. Bu, alüminyum ve çinko arasındaki yüksek reaktiviteye bağlıdır. 1 mm kalınlığında bir tabakanın derz dayanımı, 110 MPa' dan 230 MPa' ya çinko kaplama ile geliştirilmiştir. Sierra ve diğerleri (2008) düşük karbonlu çelik DC 04'ün çinko kaplama ve 6016-T4 alüminyumunu tur kaynak

konfigürasyonuna birleştirilmesinde bir temizleme akısının kullanılmasının etkisini analiz etmiştir. Akı, galvanizli çelik ile alüminyum alaşımı arasında ek bir termal bariyer sağladığı, böylece intermetalik büyümeyi engellediği gözlemlendi. Ayrıca çinko buharlaşmasının bastırılmasıyla FZ' de gözenekler önlenmiştir. Bir akış kullanıldığında, mukavemet 150 N / mm'den 250 N / mm'ye yükseldi, bu da 6016-T4 baz malzemesinin 260 N / mm nihai gerilme mukavemetine yakındır(Hong and Shin 2016).

İntermetalik formasyon, aynı zamanda, üst üste binme konfigürasyonunda Al-Si kaplı presle sertleştirilmiş çeliğin lazer kaynağı için de bir sorundur. Al-Si kaplamanın erime havuzuna dağıldığını ve füzyon hattı boyunca Fe-Al intermetalik faz oluşumuna yol açtığı bilinmektedir. Al-Si kaplamanın difüzyonu, çekme kayma mukavemetinin kaplanmamış çelikten 17.3 kN'den 13.4 kN' ye düşürülmesine neden olduğu (Hong and Shin 2016).

2.3.6 Genel Araştırma Sonuçları

Literatür araştırmaları sonucunda, otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan malzemelerin lazer kaynağı ile birleştirilmesine yönelik yapılmış çalışmalar ve bundan çıkan sonuçlar göz önüne alınmıştır. Dikkate alınan çalışmalarda kullanılan bütün malzemelerin lazer kaynağı ile birleştirilmeleri sonucunda erime bölgesinde martenzit dönüşümü nedeniyle sert bir yapı oluştuğu ısıdan etkilenen bölgede (ITAB) erime bölgesine nazaran daha yumuşak bir yapı oluştuğu görülmüştür. Farklı özellikteki DP sacların birleştirilmesi sonucunda akma sınırı ve pekleşme hızının yüksek mukavemetli ve düşük mukavemetli sac malzemeler arasında çeşitli farklar olduğu gözlemlenmiştir. DP saclar üzerinde yapılan kaynak çalışmalarında enerji girişinin azalmasına bağlı olarak kaynaklı alanının yapısının daha iri taneli olduğu ve bu iri tanelerin mekanik özelliklere olumsuz etkilerinin olduğu anlaşılmıştır. Bir diğer sac türleri arasında olan TRIP-HSLA-DP metallerinin kaynaklı birleştirilmelerinde ise düşük dayanımlı olan malzemelerde süneklik oluşumunun daha fazla miktarda olduğu saptanmıştır. Çekme ve yorulma testleri ile Ti alaşımlı metallerin lazer kaynağında orta seviyedeki bindirme faktörünün düşük ve yüksek bindirme faktörüne göre oldukça daha iyi sonuçlar verdiği literatürden görülmektedir. Darbeli lazer kaynağında, kaynak dikişi nüfuz derinliği ve

genişliğini etkileyen en önemli parametrenin maksimum darbe gücü olduğu belirlenmiştir. Darbeli lazer kaynağında doğru kaynak dikişini yakalayabilmek için maksimum darbe gücünün düşük tutulması gerekirken doğru nüfuz derinliğini yakalayabilmek için de yüksek darbe sürelerine ulaşması gerektiği tespit edilmiştir. Al alaşımlarının lazer kaynağıyla birleştirilmesiyle tüm enine çekme testlerinde, kırılmanın taneler arası kırılma şeklinde ve ergime bölgesinde gerçekleştiği saptanmıştır. Kırılma, ergime bölgesinden ana metale doğru gevrek kırılmadan sünek kırılmaya doğru bir hal aldığı gözlemlenmiştir (Aydın ve Karaağaç 2018).

Geleneksel kaynak yöntemleriyle yapılamayan farklı malzemelerin lazer kaynağı ile birleştirme işleminin son derece başarılı bir şekilde kaynak edilebildiği saptanmıştır. Çinko kaplamalı DP çeliklerdeki çinkonun alüminyum alaşımı ve galvaniz kaplı DP çeliklerde lazer nüfuziyet kaynağında iki metali birleştirilmesinde çok önemli bir etken olduğu anlaşılmıştır. Ti-Al alaşımlarının, Al alaşımında meydana gelen gözenekler, lazer ışınının Ti tarafına gönderilip sıvı fazda bir karıştırma olmadan Al tarafına ısı aktarılması yoluyla büyük oranda engellenmiştir (Aydın ve Karaağaç 2018).

- ✓ Lazer kaynak ile birleştirilen numunelerde yoğun gaz boşlukları tespit edilmiştir. Söz konusu boşluklar buharlaşma ve sıçramalardan kaynaklanmaktadır. Bu olumsuzlukları uygun parametrelerin seçimi ile minimize edilebilir (Akkurt, Şık, Ovalı 2011).
- ✓ Seçilmiş olan farklı grup lazer birleştirme parametreleri yorumlandığında, ortaya çıkan en büyük olumsuzluklardan olan sıçramaların sadece lazer gücünden değil, lazer hızı ve buna bağlı olarak yüksek ısı girdisinin neden olduğu yorumlanabilir (Akkurt, Şık, Ovalı 2011).
- ✓ Galvanizli çeliğin lazer kaynağı sırasında çinkonun buharlaşması, anahtar deliği stabilitesinin, sıçramanın ve boşluk oluşumunun bozulmasına neden olduğu anlaşılmıştır. Çinko buharının olumsuz etkisi çinko kaplamanın ön-çıkarılması, kaynak konfigürasyonunun değiştirilmesi, kimyasal bileşimin değiştirilmesi ve darbe lazer ışınları kullanılarak azaltılabilir (Hong and Shin 2016).
- ✓ Magnezyum alaşımları, oksit dökümünde önceden var olan gözeneklerin oksitle kaplanmasına ve birleştirilmesine karşı duyarlıdır. Gözeneklerin büyümesini

baskılamak için lazer ve magnezyum alaşımlı iş parçası arasındaki etkileşim süresi en aza indirilmelidir (Hong and Shin 2016).

- ✓ Alüminyum alaşımlı kaynak malzemeleri katılaşma ve sıvılaştırma çatlamasına ve hidrojen kaynaklı gözeneklere karşı hassastır. Katılaşma oranını azaltmak, alüminyum alaşımlı kaynakların katılaşmasını önlemek için etkilidir (Hong and Shin 2016).
- ✓ Lazer kaynağıyla ilişkili yüksek soğutma hızı, Ti6Al4V kaynaklarının indirgenme indüktansına yol açan faz dönüşümüne neden olduğu gözlemlenmiştir (Hong and Shin 2016).

Çelikten alüminyum alaşıma veya çelikten magnezyum alaşıma kadar farklı metallerin lazerle kaynaklanması, kırılğan intermetalik fazların oluşması nedeniyle zor olduğu anlaşılmıştır (Hong and Shin 2016).

3. MATERYAL ve METOT

3.1 Spektral Analiz Sonuçları

Lazer kaynak işlemi için St.6222 çeliği ve DP 600 yüksek mukavemetli çelik olan 2 farklı malzeme seçildi. Seçilen malzemelerin spektral analizi üniversitemizin Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (TUAM) 'nde yapılarak kimyasal bileşimi Çizelge 3.1'de ve Çizelge 3.2'de gösterildiği gibi olduğu gözlenmiştir.

Çizelge 3.1 St-6222 çeliğin malzeme bileşimi.

C%	Mn%	P%	Cr%	Ni%
0.057	0.195	0.016	0.085	0.057
Cu%	As%	S%	Mo%	Fe%
0.203	0.017	0.012	0.031	99.298

Çizelge 3.2 DP 600 çeliğin malzeme bileşimi.

C%	Si%	Mn%	P%	S%	As%
0.152	0.339	1.766	0.018	0.019	0.012
Al%	Cu%	Ti%	Cr%	Mo%	Fe%
0.122	0.030	0.010	0.365	0.043	96.902
Cb%	Sb%	V%	Nb%	W%	
0.069	0.024	0.013	0.018	0.072	

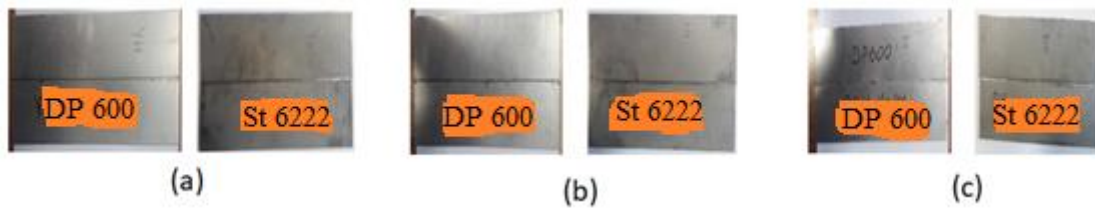
3.2 Malzemelerin CO₂ Lazer Kaynağı ile Birleştirilmesi

DP-600 ve St 6222 olan iki farklı malzeme çeliği de, lazer kaynağın en önemli 2 parametresi olan kaynak ilerleme hızı ve lazer güç parametreleri dikkate alınarak kaynak işlemi yapıldı (Çizelge 3.3).

Çizelge 3.3 Kullanılan kaynak parametre değerleri.

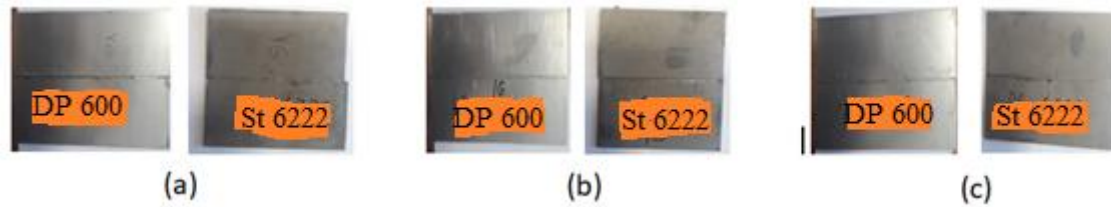
Numune Grubu	Kaynak İlerleme Hızı (m/dk)	Lazer gücü(kW)	Darbe Enerjisi(Joule)	Işın Güç Yoğunluğu (kW/mm ²)	Odaklanma uzaklığı (mm)
Yüksek	4				
Hız Orta	3	47			
Düşük	2		7	5.6	50
Yüksek		56			
Güç Orta	3	47			
Düşük		38			

Kaynak ilerleme hızı parametresi ile birleştirilen parçaların görüntüsü Resim 3.1’de görülmektedir.



Resim 3.1 Sırasıyla; a) Yüksek, b) Orta ve c) Düşük parametreleriyle birleştirilmiş 2 farklı malzeme.

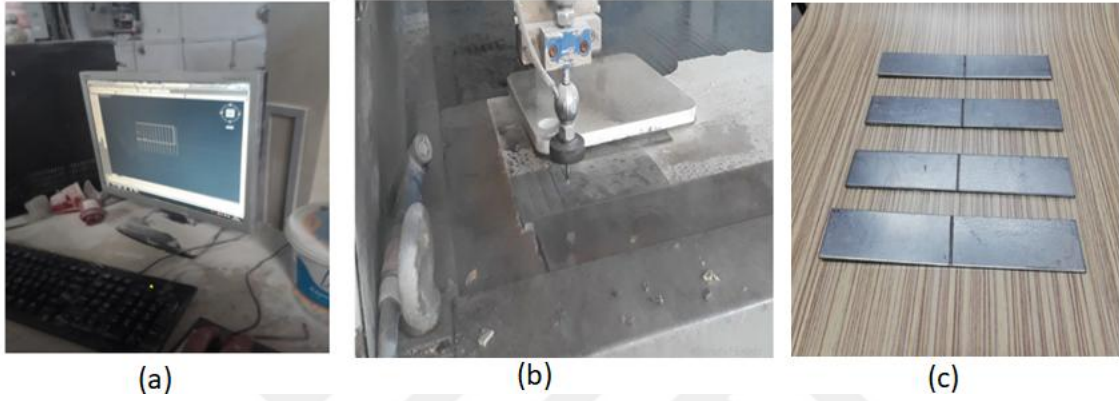
Lazer gücü parametresi ile birleştirilen parçaların görüntüsü Resim 3.2’de görülmektedir.



Resim 3.2 Sırasıyla; yüksek a) Yüksek, b) Orta ve c) Düşük parametreleriyle birleştirilmiş 2 farklı malzeme.

3.3 Numunelerin Su Jeti ile Kesimi

Numunelerin, kesim aşamasında kaynak yapısının herhangi bir deformasyona uğramaması için hassas kesim olan Su-Jeti ile kesimi yapıldı. Numuneler kesim cihazının bilgisayarının Autocad programında hepsi 25mm-150mm boyutlarında Resim 3.3’ de kesilerek deney aşamasına hazır hale getirildi.

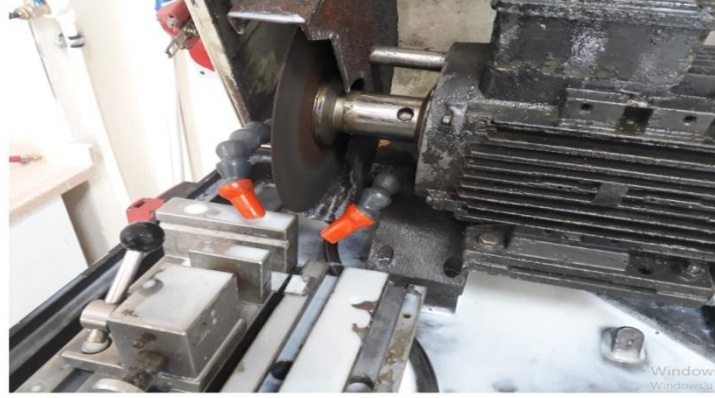


Resim 3.3 Değerlerin autocad programına girilmesi (a), kaynak parçalarının Su-Jeti ile kesimi (b), kesimden sonra parçaların durumu (c).

3.4 Metalografik Çalışmalar

3.4.1 Kesme İşlemi

Parçaların her bir parametresinden örnek almak için Kesim Makinesi ile kaynak bölgelerinden 20mm-10mm (yatay’da konulmak üzere), 10mm-5mm(dikey’ de konulmak üzere) boyutlarında kesilerek bakalite alma işlemi için hazır hale getirildi (Resim 3.4).



Resim 3.4 Kesim makinesinde örnek bir numunenin kesilmesi.

3.4.2 Bakalite Alma İşlemi

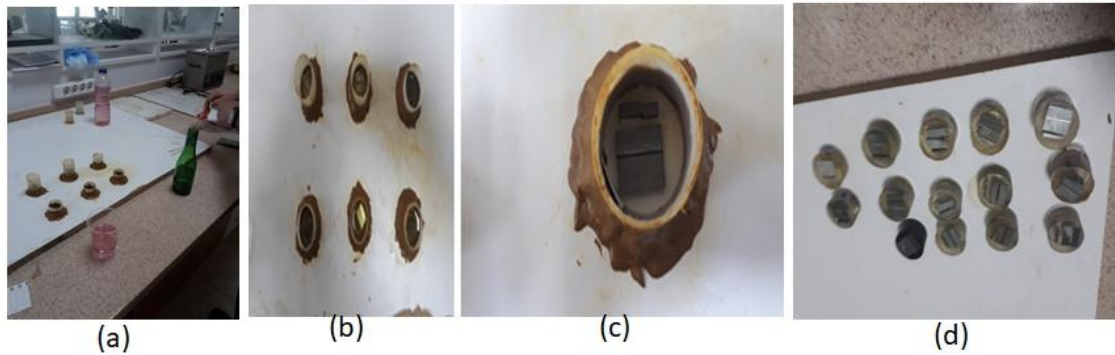
Bakalite alma işleminin öncelikli amacı şekilsiz ve tutulması zor parçaların mikroskop altında incelenebilmesi için uygun hale getirilmesidir. Bakalite alma işleminin, zımparalanacak ve parlatılacak parçayı daha iyi tutmak ve numunenin kenarlarına koruma sağlamak ve diğer bir neden ise günümüzde sıklık ile tercih edilen otomatik kafalı zımparalama ve parlatma cihazlarına bu numunelerin yerleştirilebilmesi gibi faydaları da vardır.

3.4.2.1 Soğuk Bakalite Alma (Sıvı tipi)

Bu tip bakalite alma bileşikleri tipik olarak iki bileşenli sistemlerdir (1-reçine ve 1-sertleştirici). Soğuk bakalite alma işlemi basınç ve ısı gerektirmez ve çok sayıda örneği sıcak bakalite alma işleminden daha hızlı şekilde bakalit alma işlemi için uygun bir yöntemdir. Tipik sertleşme süreleri, daha yüksek ekzotermik sıcaklık üreten daha hızlı kürlleme reçineleri ile dakikalar arasında değişmektedir ve bu da montaj malzemesinin kürlenme sırasında kenardan çekilmesine neden olmaktadır. Soğuk bakalite alma malzemeleri, polyesterler, epoksi akrilikler olarak sınıflandırılmıştır. Poliesterler şeffaftır. Epoksi neredeyse saydam ve saman rengi ve akrilikler ise opaktır. Her üç sınıflamanın soğuk bakalite alma malzemeleri; reçine ve sertleştirici içeren iki bileşenli sistemlerdir. Hem reçine hem de sertleştirici sıvı olabilir veya biri sıvı olabilir ve diğeri katı olabilir.

Reçinenin ve sertleştiricinin karıştırılması, ekzotermik polimerizasyon üretir ve bu nedenle bu işlem, tatmin edici bir kütleme ve sıcaklığın izin verilen bir seviyeye sınırlandırılmasında kritik öneme sahiptir. Sıcaklık artışı, daha uzun kuruma süresiyle azaltılabilir.

Polyester reçine + Sertleştirici: Resim 3.5'te bakalit numnelerin hazırlanma aşamaları görülmektedir.



Resim 3.5 Polyester ve kürleyicisinin hazırlanması (a), hazırlanmış numunelere dökülmesi (b), bir numunenin yakın görünüşü (c) ve numunelerin hazır hali (d).

3.4.3 Zımparalama İşlemi

Zımparalama işlemi sırasında;

- Malzeme yüzeyde kesme yoluyla meydana gelmiş hasarın onarılır.
- Zımparalama işlemi esnasında bir diğer zımparalama kağıdında giderilmek üzere yüzeyde ince aşınma izleri kalabilir.
- Zımparalama işleminin en son aşamasında, yüzeyde sadece zımpara hasarı varsa, bu hasar son zımparalama kademesinden kalmış olmalıdır.
- Bu tür kusurlar parlatma aşamasında onarılır.

Bütün numuneler; 120-240-300-400-600-800-1000-1200 numaralı aşındırıcı kağıt grit sırası ile yapıldı.

3.4.4 Dağlama İşlemi

Dağlama işlemi içeriği etil alkol (96-98 ml) ve nitrik asit (2-4 ml) Nital ile yaklaşık 10-15 saniye bekletilerek yapıldı.

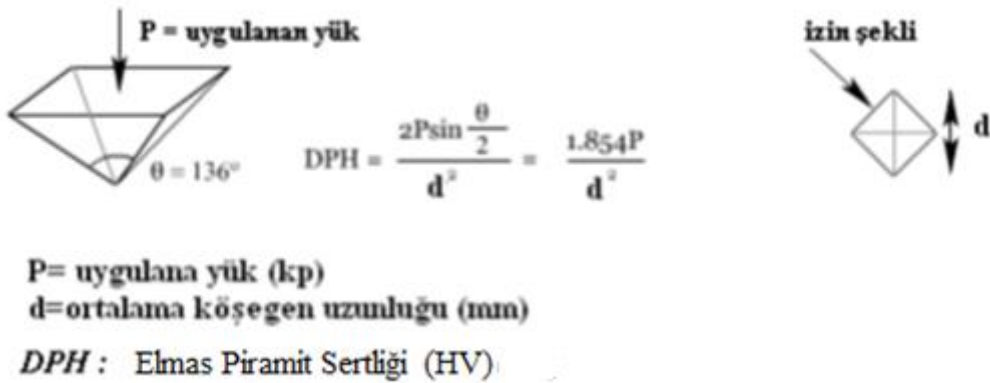
3.4.5 Parlatma İşlemi

Bütün numuneler; dağlama işlemi yapıldıktan hemen sonra, ayna parlaklığında çizik içermeyen düz bir yüzey elde edebilmek amacıyla parlatma işlemine tabi tutuldu (Resim 3.6).



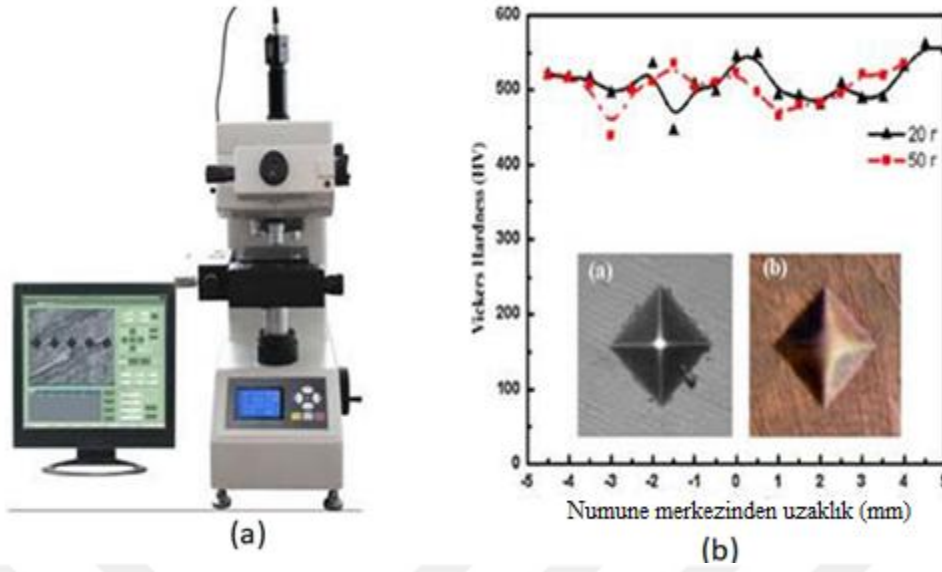
Resim 3.6 Parlatma sıvısı ile parlatma.

3.4.6 Vickers Sertlik Testi



Şekil 3.1 Vickers sertlik testi geometrik hesabının formülize edilmesi.

- Vickers sertlik ölçme yöntemi, sertliği ölçülecek malzeme parçasının yüzeyine, tabanı kare olan piramit şeklindeki bir ucun belirli bir yük altında daldırılması ve yük kaldırıldıktan sonra meydana gelen izin köşegenlerinin ölçülmesinden ibarettir.
- Vickers sertlik değeri, piramit şeklindeki dalıcı ucun belirli bir yük altında ve belirli bir süre uygulanması ile malzeme yüzeyinde meydana getirdiği izin büyüklüğü ile ilgili bir değerdir.
- Meydana gelen iz taban köşegeni (d) olan kare bir piramittir ve tepe açısı dalıcı ucun tepe açısının aynıdır $= (136^\circ)$. Vickers sertlik değeri, kg olarak ifade edilen deney yükünün (mm^2) olarak ifade edilen iz alanına bölümüdür.
- Vickers sertlik değeri işareti ile beraber bazen uygulanan yük ve yükün uygulama zamanını belirten sayısal işaretlerde ilave edilir. Örneğin; VSD /30 /20, /30 kg.'lık yükün 20 saniye süre ile uygulanması sonucu elde edilen Vickers sertlik değerini gösterir.
- Deneyden sonra Vickers sertlik değerini bulmak için kare şeklindeki izin köşegenlerini hassas, bir şekilde ölçmek gerekir. Bu ölçme, alete ilâve edilmiş metalürji mikroskobu sayesinde yapılmaktadır; numune üzerinde meydana getirilen izin görüntüsü mikroskop yardımıyla ölçme ekranına aktarılır. Ölçme ekranındaki hareketli iki cetvel yardımıyla köşegenlerin uzunlukları hassas bir şekilde ayrı ayrı ölçülüp ortalaması alınır.
- Vickers sertliği ölçüsü, geniş çubuklardan saçlara kadar her ölçüde malzeme çeşidine uygulanabilir. Genel olarak numunelerin alt ve üst yüzeyleri, yük bindiği zaman numune hareket etmeyecek veya kaymayacak şekilde düz olmalıdır. Kalınlık olarak da, piramit dalıcı ucun, numunenin öbür yüzeyinde bir çıkıntı meydana getirmeyecek derecede kalın olması yeterlidir.



Şekil 3. 2 Vickers sertlik test cihazı (a) ve nokta alınan yerin grafiksel görüntüsü (b) (İnt. Kyn. 2).

Teste tabi tutulacak numunelerde dikkat edilmesi gereken bazı hususlar:

- Yük darbesiz bir şekilde yapılmalıdır.
- Malzemenin yüzeyi parlak olmalı ve hasarlı olmamalıdır.
- Darbe ve çarpmalar elmas uca zarar vermemelidir.
- Parça üstündeki elmas ucu iz merkezinin parçanın kenarına veya başka bir izin kenarına olan mesafesi en az 3d kadar olması gerekir.
- Piramid uç P yükü ile deney parçasına düşey olarak batırılmalı, iz köşegenleri 0,002 mm hassaslıkla ölçülmelidir.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1 Mikroyapı Görüntü Çalışmalarının Analizi

Kaynak Dikişi: Görüntüsü alınan numunelerin kaynak dikişlerinin her birinin üstünden dikişin genişliğini ifade eden 4 tane değer seçildi. Seçilen değerler, işlem kolaylığı amacıyla μm 'den, mm 'ye çevrilerek bu 4 değerın ortalaması alındı ve L_{ort} olarak ifade edildi.

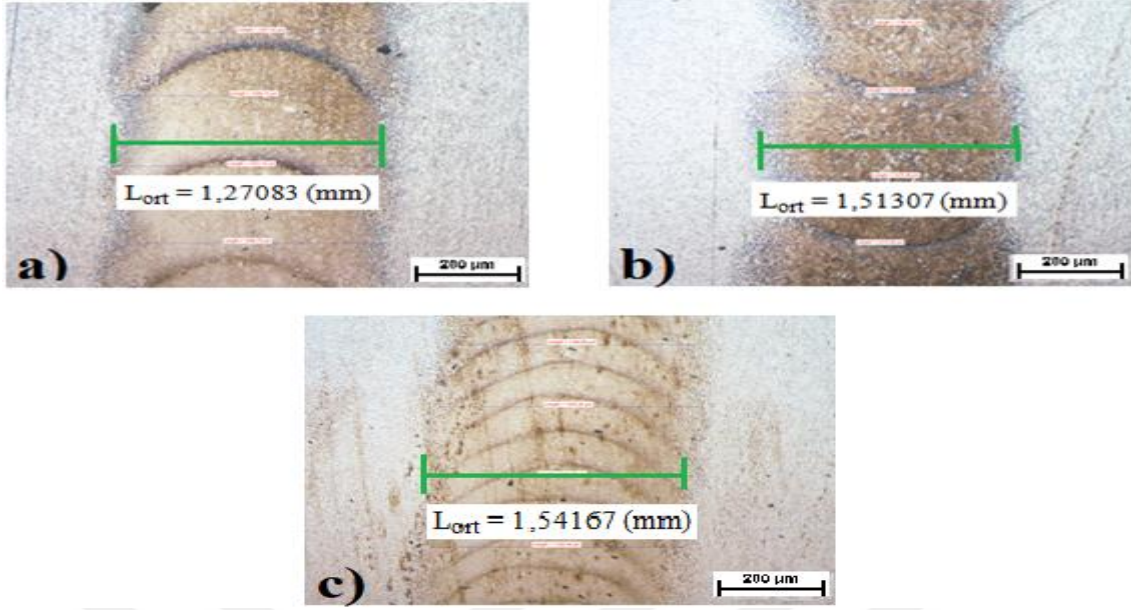
Kaynak Kesiti: Numunelerin kaynak kesitlerinden ise kaynağın ne kadar nüfuz ettiğini tespit etmek için derinliği ölçüldü. Kaynak kesitlerinde, görüntüler üzerinde ölçülen derinliği görselde daha belirgin hale getirmek için her bir görüntüde derinlik çizgisi paint programıyla kalın bir çizgi ile belirtildi ve bu ölçülen değer $L_{\text{nüfuziyet}}$ olarak ifade edildi.

4.1.1 Kaynak İlerleme Hızı ve Lazer Gücü Parametrelerinin Kaynak Dikişine Etkisi

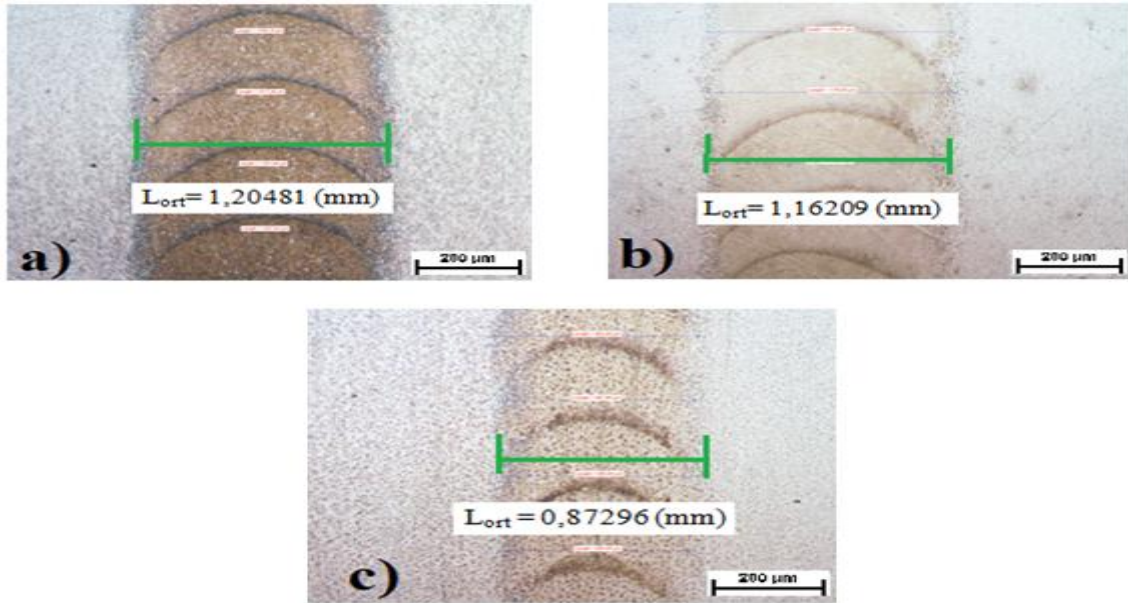
Hız ve güç parametrelerinin St 6222 çeliği numuneleri üzerinde kaynak dikişine etkisi Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de görülmektedir.

Şekil 4.1'de yüksek hızdan, düşük hıza doğru kaynak dikişinin genişliğinde bir artış görülmektedir. Bunun sebebi yüksek hız parametresinde lazer ışını ile kaynak edilen numunenin temas süresi azalacağı için yapılan kaynağın dikişinin azalmasıdır. Ayrıca yüksek hızdan düşük hıza doğru kaynak derzlerinin sıklığının bariz bir şekilde arttığı numunelerde görülmektedir.

Lazer gücünün artışına bağlı olarak kaynak dikişinin genişliğine bıraktığı etki doğru orantılıdır. Yüksek lazer gücünden, düşük lazer gücüne doğru kaynak dikişinin genişliğinin azaldığı Şekil 4.2'den görülebilmektedir. Kaynak derzlerinin sıklığında ise bir değişim yaşanmamıştır



Şekil 4.1 St 6222 çeliği numunelerinde kaynak ilerleme hızı parametresinin kaynak dikişine etkisi; a) Yüksek, b) Orta, c) Düşük.

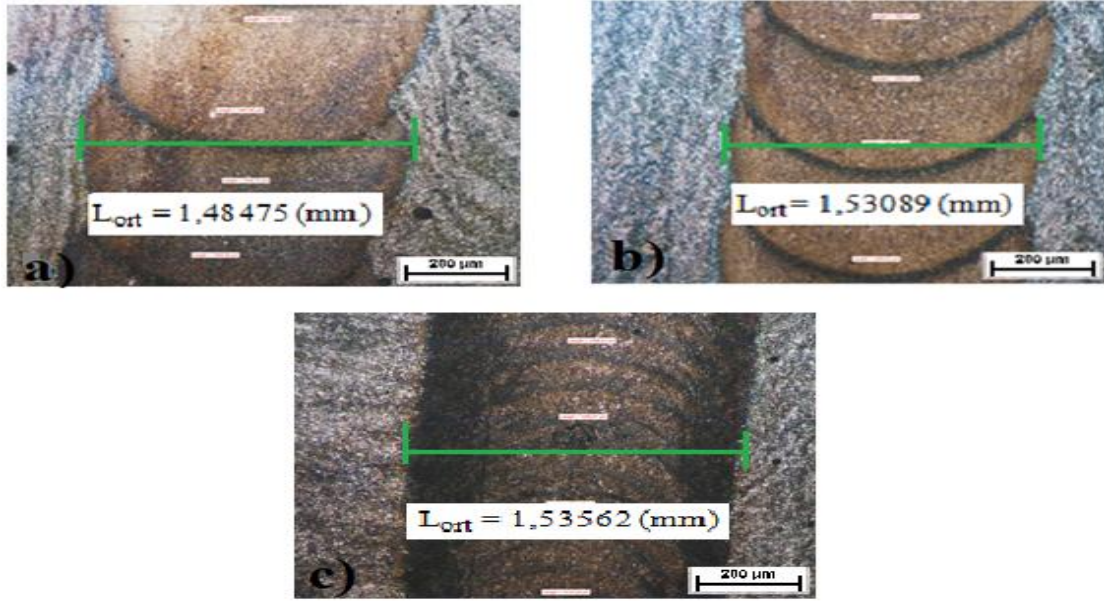


Şekil 4.2 St 6222 çeliği numunelerinde lazer gücü parametresinin kaynak dikişine etkisi; a) Yüksek, b) Orta, c) Düşük.

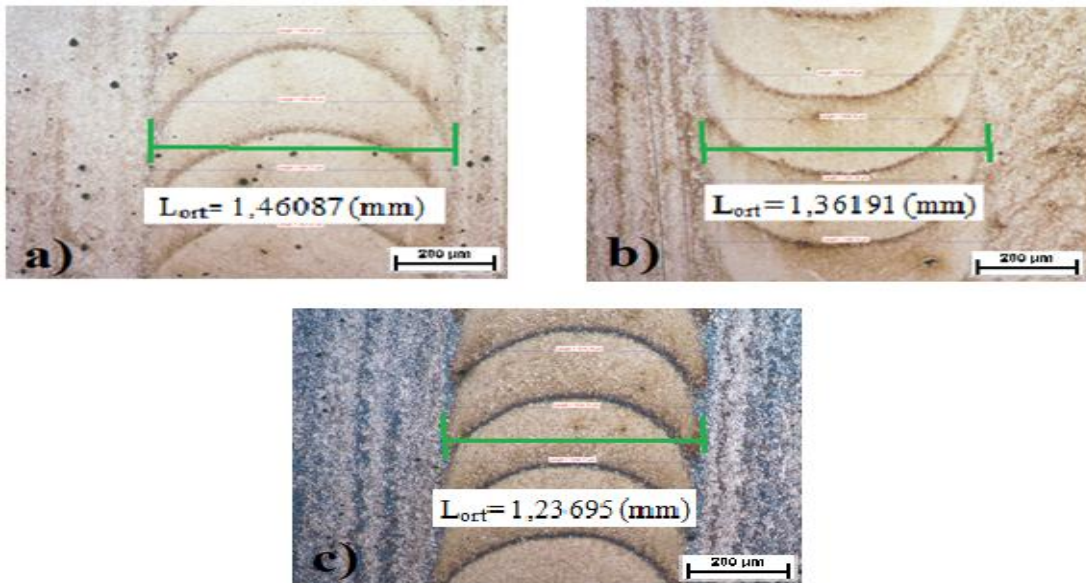
Hız ve güç parametrelerinin DP 600 çeliği numuneleri üzerinde kaynak dikişine etkisi şekil 4.3 ve şekil 4.4'te görülmektedir.

Şekil 4.1’de olduğu gibi Şekil 4.3’te de yüksek hızdan, düşük hıza doğru kaynak dikişinin genişliğinin arttığı görülmektedir. Yüksek hızdan düşük hıza doğru kaynak derzlerinin sıklığında bir artış görülmektedir.

Şekil 4.4’te lazer gücü ile kaynak dikişi genişliğinin doğru orantılı olduğu görülmektedir (Şekil 4.2’deki gibi).



Şekil 4.3 DP 600 çeliği numunelerinde kaynak ilerleme hızı parametresinin kaynak dikişine etkisi; a) Yüksek, b) Orta, c) Düşük.



Şekil 4.4 DP 600 çeliği numunelerinde lazer gücü parametresinin kaynak dikişine etkisi; a) Yüksek, b) Orta, c) Düşük.

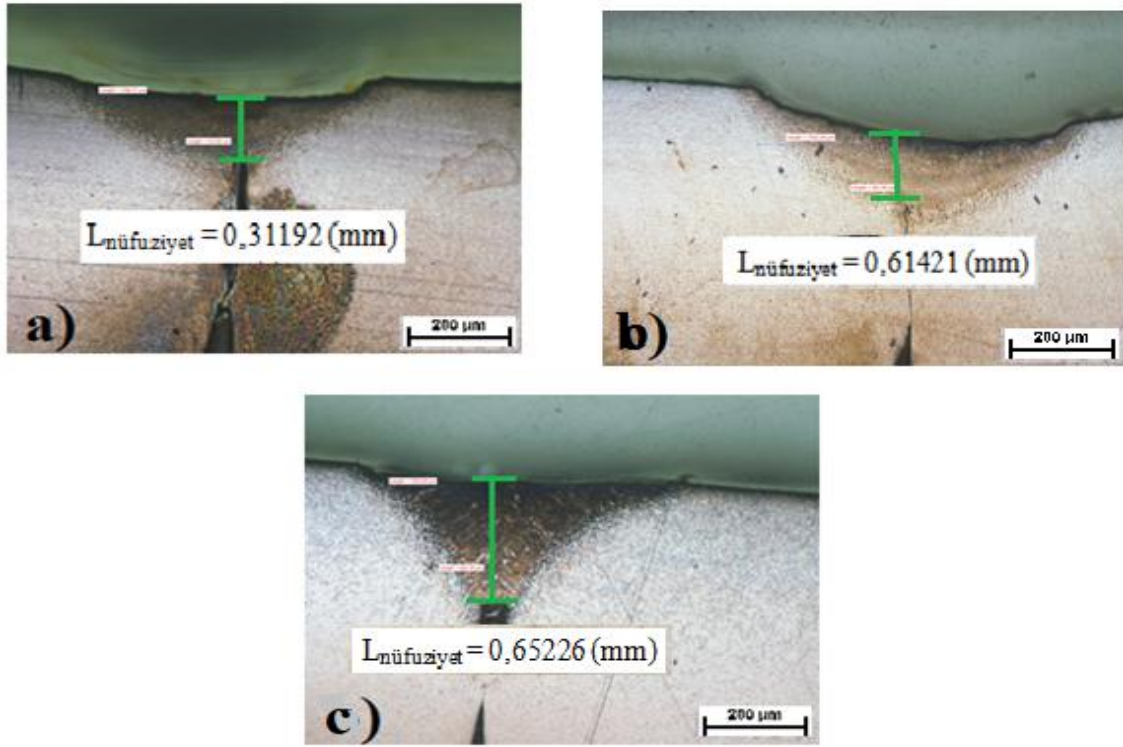
4.1.2 Kaynak İlerleme Hızı ve Lazer Gücü Parametrelerinin Kaynak Kesitine Etkisi

Hız ve güç parametrelerinin St 6222 çeliği numuneleri üzerinde kaynak kesitine etkisi Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da görülmektedir.

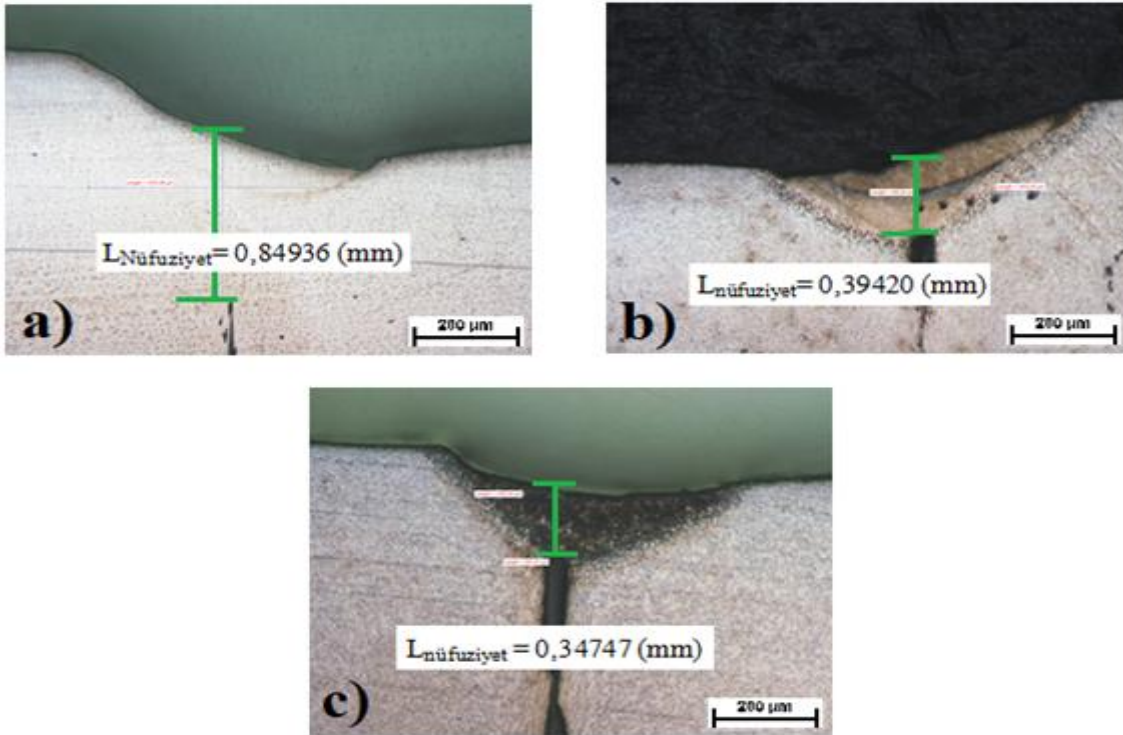
Şekil 4.5’te kaynak ilerleme hızının kaynak kesitindeki nüfuziyete olan etkisinin ters orantılı olduğunu görmekteyiz. Malzemenin cinsine bakılmaksızın kaynak ilerleme hızının yükek bir değerde seçilmesi sonucu her halükarda hem kaynak dikişinde hemde kaynak kesitinde bir azalma görülecek ve yapılan kaynağın istenilen kalitedeki özellikleri vermeyeceği anlaşılmaktadır.

Şekil 4.6’da ise lazer gücü parametresinin artışına bağlı olarak kaynak kesiti nüfuziyetinin bariz bir şekilde arttığı görülmektedir. Lazer güç parametresinin nüfuziyet derinliğine yarattığı etki lazer hız parametresine göre çok daha belirleyicidir.

Genel çerçeveye baktığımızda kaynak ilerleme hızının kaynak kesitinde nüfuziyete olan etkisinin ters orantılı olduğunu görmekteyiz. Kaynak ilerleme hızı arttıkça nüfuziyetin azalmasına bağlı olarak kaynak edilen numunelerin istenilen sağlamlıkta olamayacağı kırılmalı olacağı sonucuna varılabilir. Bu nedenle genel değerlendirmede; malzemenin cinsine bakılmaksızın kaynak ilerleme hızının yükek bir değerde seçilmesi sonucu her halükarda hem kaynak dikişinde hemde kaynak kesitinde bir azalma görülecek ve yapılan kaynağın istenilen kalitedeki özellikleri vermeyeceği anlaşılmaktadır.



Şekil 4.5 St 6222 çeliği numunelerinde kaynak ilerleme hızı parametresinin kaynak kesitine etkisi; a) Yüksek, b) Orta, c) Düşük.

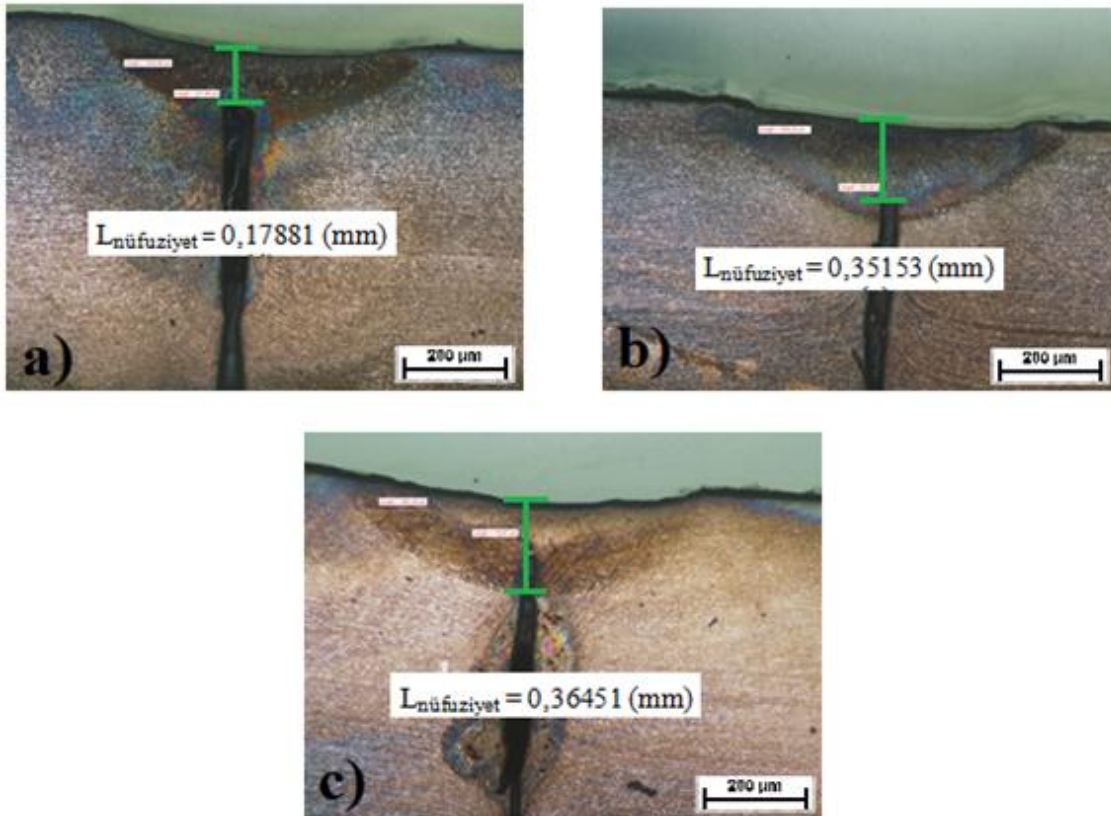


Şekil 4.6 St 6222 çeliği numunelerinde lazer gücü parametresinin kaynak kesitine etkisi; a) Yüksek, b) Orta, c) Düşük.

Hız ve güç parametrelerinin DP 600 çeliği numuneleri üzerinde kaynak kesitine etkisi Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de görülmektedir.

Şekil 4.7’ de yüksek hızdan düşük hıza doğru kaynak kesitindeki nüfuziyetin arttığı görülmektedir.

Şekil 4.8’deki numunelerde lazer gücü parametrelerinin kaynak kesitinde yarattığı nüfuziyet etkisinin doğru orantılı olduğu görülmektedir. Lazer güç parametresinin nüfuziyet derinliğine yarattığı etki lazer hız parametresine göre çok daha belirleyicidir. Örneğin, DP 600 çeliğinde; 0,36451 mm değerinde olan maksimum nüfuziyete düşük hız parametresinde ulaşılabilirken, yüksek lazer gücü parametresinde ulaşılan maksimum nüfuziyet değeri 1,01192 mm’ye kadar çıkabilmiştir. St 6222 çeliğinde de aynı paralellik söz konusudur. Lazer gücü kaynak yapılacak malzemenin nüfuziyetin de dikkate alınması gereken temel parametre olarak görülmelidir.



Şekil 4.7 DP 600 çeliği numunelerinde kaynak ilerleme hızı parametresinin kaynak kesitine etkisi; a) Yüksek, b) Orta, c) Düşük.

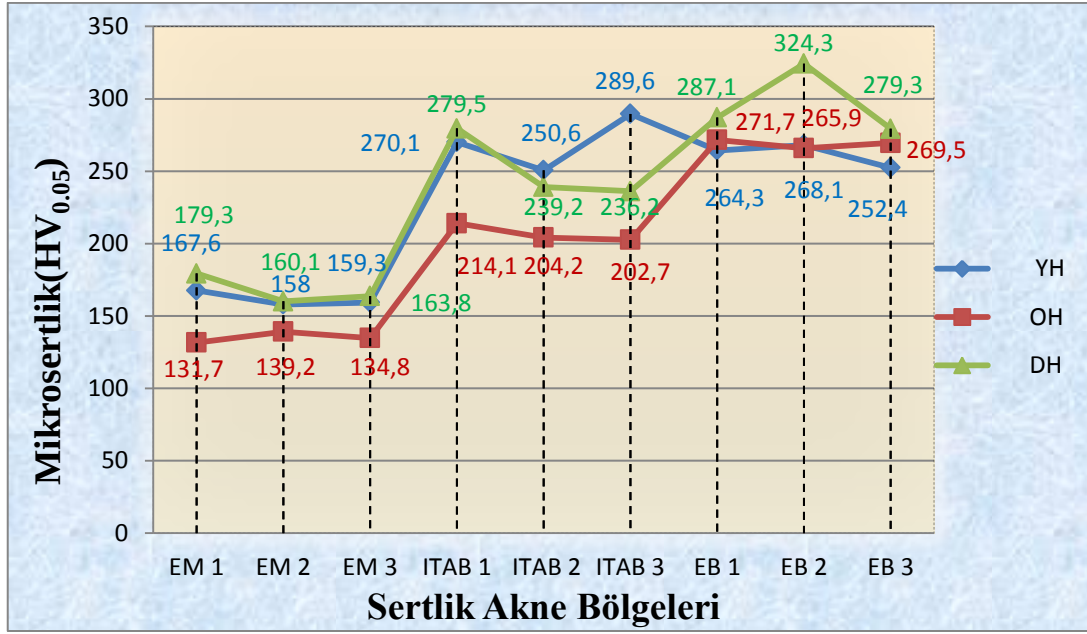
Mikrosertlik değerleri Alçak Yük Vickers Sertlik Test Cihazı ile 0.05 kg’lık yük ile 10 saniye bekletilerek alınmıştır. Bakalit numunelerinin herbirinin kaynak kesiti üzerinden Esas Metal (EM), Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB) ve Ergime Bölgesi (EB) olmak üzere 3 farklı bölgenin her birinden 3 ayrı nokta alınarak vickers sertlik değerleri lld (şekil 4.9’daki gibi). Alınan her numunenin parametre değerleri ayrı bir grafik altında aşağıdaki gibi sunulmuştur.

4.2.1 Hız Parametresi Sertlik Değerlerinin Grafikselsel Yorumlanması

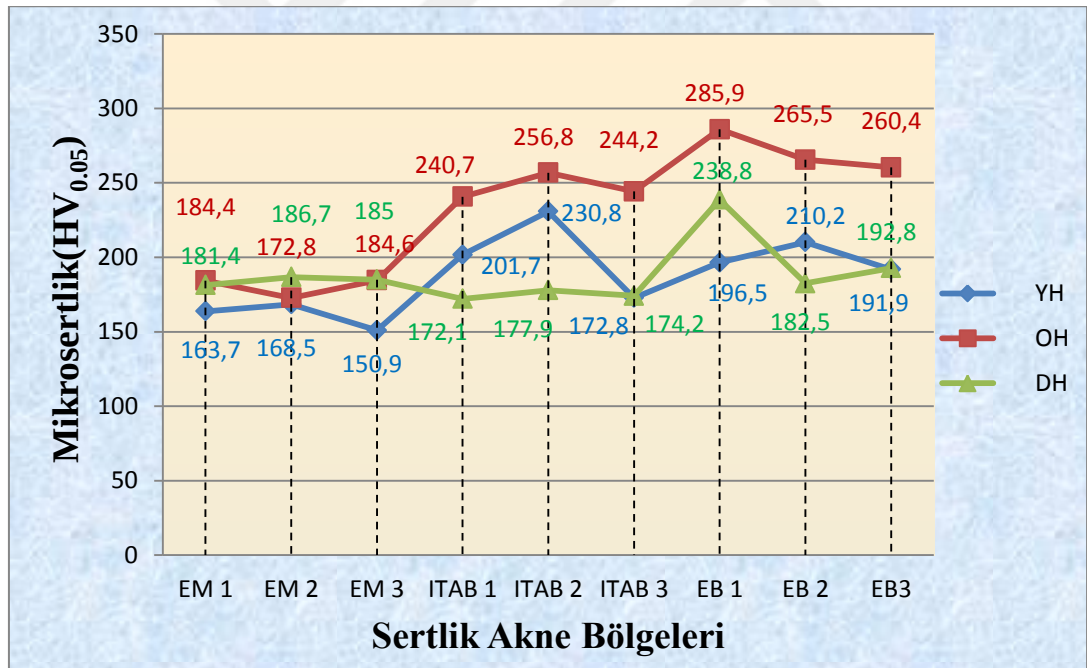
Kaynak ilerleme hızı parametresinin her iki farklı malzemenin üzerinden alınan mikrosertlik değerleri şekil 4.10 ve şekil 4.11’de gösterilmektedir.

şekil 4.10’da St 6222 eliği zerineki yüksek, orta ve düşük hızda sertlik değerlerinin EM’ den ITAB’a ve EB’ne doğru aşırı bir şekilde arttığı görülmektedir. Hızın farklı değerlerine rağmen sertlik değerlerinin kararlı bir şekilde artışı malzemenin kimyasal faz bileşiminden olduğu düşünülmektedir.

şekil 4.11’de DP 600 eliği numuneleri zerineki yüksek hız sertlik değerlerinde ITAB bölgesinden EB’ ne doğru ciddi bir artışın olmadığı sertlik değerlerinin ITAB ve EB’de düzensiz olduğu hatta ITAB’ a göre düşüş bile yaşandığı görülmektedir. Yüksek hız ve düşük hızda kaynak edilen numunelerdeki ITAB ve EB bölgelerinin sertliğini olumsuz etkilediği söylenebilir. Bu durumun çeliğin çift fazlı yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir (Aydın ve Karaağaç 2018). Öte yandan orta hızdaki sertlik değerlerinin daha yüksek ve her akne bölgesinde kararlı olduğu görülmektedir.



Şekil 4. 10 Hız parametresinin mikrosertliğe etkisi; St 6222 çeliği numuneleri.



Şekil 4. 11 Hız parametresinin mikrosertliğe etkisi; DP 600 çeliği numuneleri

4.2.2 Güç Parametresi Sertlik Değerlerinin Grafiksel Yorumlanması

Lazer gücü parametresinin her iki farklı malzemenin üzerinden alınan mikrosertlik değerleri Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te gösterilmektedir.

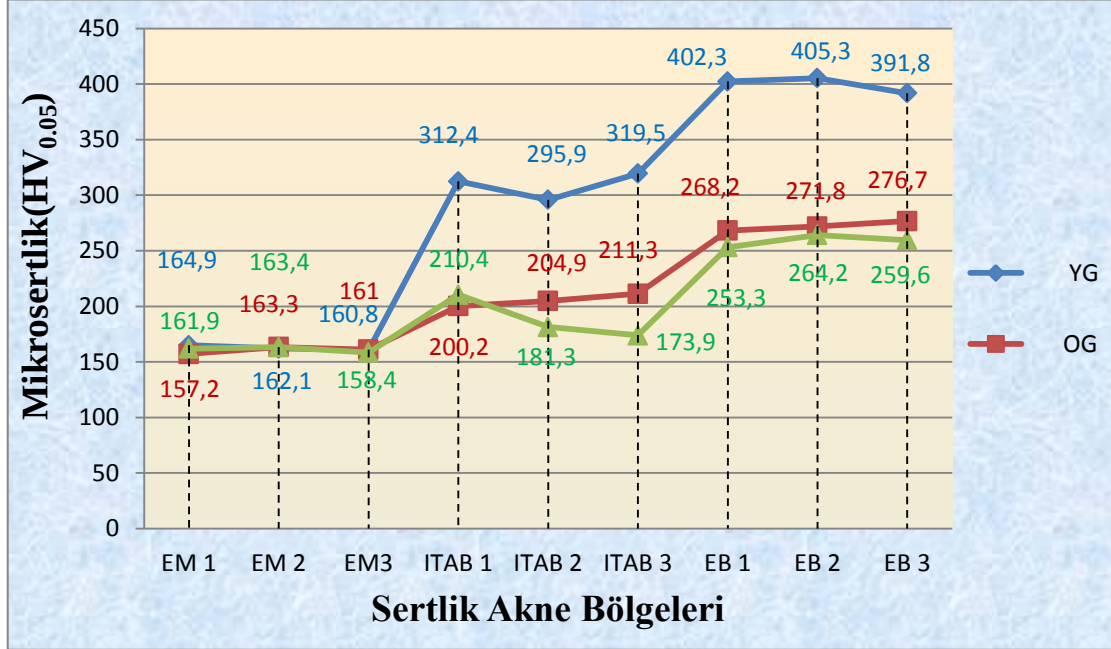
Yüksek güç parametresinde sertlik değerlerinin EM bölgesinden yüksek bir artışla ITAB' a ve EB' ne geçtiği görülmektedir(Şekil 4.12 ve Şekil 4.13). ITAB ve EB' de 3 ayrı noktanın da birbirine yakın olması kararlılığı göstermektedir. Ayrıca yüksek güç parametresi sayesinde her 2 malzemenin ITAB ve EB' deki sertliğin EM bölgesi olan malzeme sertliğine göre yaklaşık 2-3 katı gibi değerlere ulaştığı görülmektedir.

Orta güç parametresinden alınan sertlik değerlerinin EM bölgesinden ITAB ve EB' ne doğru düzenli bir artış olduğu görülmektedir(Şekil 4.12 ve Şekil 4.13). Ancak yüksek hız parametresine göre sertlik değerlerinde bir azalma olduğu görülmektedir. Her iki numunene olan DP 600 ve St 6222 veri değerlerinin birbirinden farklı olması ise kendi iç kimyasal yapılarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

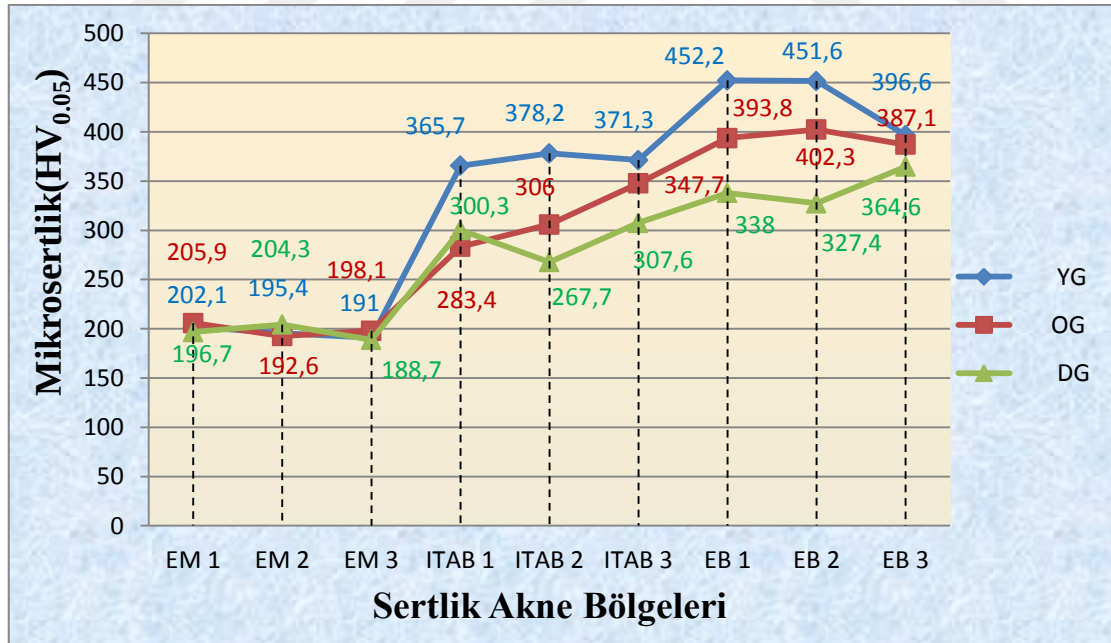
Düşük güç parametresinin ise numunelerin sertlik değerlerinde ciddi değişimlere sebep olduğu görülmektedir(Şekil 4.12 ve Şekil 4.13). Genel olarak ITAB ve EB' ndeki değerlerin seçilen diğer 2 parametreye göre azaldığı görülmektedir. Örneğin, DP 600 için EB' nde; yüksek güç maksimum değeri 452,2 HV_{0.05} ve orta güç maksimum değeri 402,3 HV_{0.05} iken, düşük güçte bu değer 364,6 HV_{0.05}' ya düşmektedir(Şekil 4.13). Düşük güç parametresinde ITAB ve EB' nde ani iniş ve çıkışların olması seçilen güç değerinin bu malzemenin sertliğinde olumsuz etkiler yarattığı görülmüştür.

Dikkate alınan çalışmalarda kullanılan bütün malzemelerin lazer kaynağı ile birleştirilmeleri sonucunda erime bölgesinde martenzit dönüşümü nedeniyle sert bir yapı olduğu ısıdan etkilenen bölgede(ITAB) erime bölgesine nazaran daha yumuşak bir yapı olduğu görülmüştür. Farklı özellikteki DP sacların birleştirilmesi sonucunda akma sınırı ve pekleşme hızının yüksek mukavemetli ve düşük mukavemetli sac malzemeler arasında çeşitli farklar olduğu gözlemlenmiştir. DP saclar üzerinde yapılan kaynak çalışmalarında enerji girişinin azalmasına bağlı olarak kaynaklı alanının

yapısının daha iri taneli olduğu ve bu iri tanelerin mekanik özelliklere olumsuz etkilerinin olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 4. 12 Lazer gücü parametresinin mikrosertliğe etkisi; St 6222 çeliği numuneleri.



Şekil 4. 13 Lazer gücü parametresinin mikrosertliğe etkisi; DP 600 çeliği numuneleri.

5. SONUÇLAR

Kaynak ilerleme hızı parametresinden elde edilen sonuçlar;

- Yüksek hızdan, düşük hıza doğru kaynak dikişinin genişliğinde bir artış görülmüştür.
- Düşük hızdan yüksek hıza doğru kaynak derzlerinin sıklığının bariz bir şekilde azaldığı gözlemlendi.
- Hız arttıkça parça ile temas süresi azalacağından nüfuziyet azalmaktadır .
- Kaynak ilerleme hızının yüksek bir değerde seçilmesi sonucu her halükarda hem kaynak dikişinde hemde kaynak nüfuziyetinde bir azalma görülecek ve kaynağın istenilen kalitedeki özellikleri olumsuz etkileyeceği sonucuna varıldı.
- Yüksek hızın kaynak edilmiş malzemenin sertlik yapısında düzensizliklere, yavaş hızın ise malzeme sertliğinde düşüşe sebebiyet verdiği görülmüştür.

Lazer gücü parametresinden elde edilen sonuçlar;

- Lazer gücünün artışına paralel olarak kaynak dikişinin genişliğinde ve kaynak nüfuziyetin de ciddi bir artış gözlemlenmiştir.
- Yüksek gücün numunelerin sertliğinde yüksek bir artışa sebep olduğu ve bu artışın ITAB ve EB' inin her birinin kendi içinde kararlılık gösterdiği anlaşılmıştır.
- Düşük güç parametresinin sertlik değerlerinin ise diğer güç parametrelerine göre azaldığı aynı zamanda hem ITAB ve EB' ne geçişte hem de bu bölgelerin kendi içlerinde de düzensizliğe sebep olduğu anlaşılmıştır.
- Lazer gücünün artmasıyla dayanımın arttığı sonucuna varıldı.

6. KAYNAKLAR

- Akkurt, A., Şık, A., Ovalı, İ. (2011). AA2024 Alüminyum Alaşımlarının Lazer Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Mekanik Özelliklere Etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **18**: 37-45.
- Altıntaş, H.İ. (2018). Plastik Enjeksiyon Kalıplarının Onarım Kaynağında Tungsten Elektrod İle Koruyucu Gazaltı Kaynağı ve Lazer Kaynak Parametreleri ve Etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Aydın, K. Karaağaç, İ. (2018). Lazer Kaynağı ve Lazer Kaynağının Başlıca Uygulamaları. *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, **5**: 693-705.
- Ahmed, T. Rack, H.J., (1998). Phase transformations during cooling in $\alpha + \beta$ titanium alloys. *Materials Science Engineering A*, **243**: 206–211.
- Ahn, J., Chen, L., Davies, C.M., Dear, J.P., (2016). Parametric optimisation and microstructural analysis on high power Yb-fibre laser welding of Ti-6Al-4V. *Optimisation Lasers Engineering*, **86**: 156–171.
- Balasubramanian, T.S., Balakrishnan, M., Balasubramanian, V., Manickam, M.A.M. (2011). Effect of welding processes on joint characteristics of Ti-6Al-4V alloy. *Science and Technology of Welding Joining*, **16**: 702–708.
- Casalino, G. Mortello, M., Campanelli, S.L., (2015). Ytterbium fiber laser welding of Ti6Al4V alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, **20**: 250–256.
- Costa, A., Miranda, R., Quintino, L., Yapp, D., (2007). Analysis of beam material interaction in welding of titanium with fiber lasers. *Materials and Manufacturing Processes*, **22**: 798–803.
- Csele, M. (2004). “Fundamentals of Light Sources and Lasers”, Wiley-Interscience, ABD.
- Chowdhury, S.H., Chen, D.L., Bhole, S.D., Powidajko, E., Weckman, D.C., Zhou, Y. (2012). Fiber laser welded AZ31 magnesium alloy: the effect of welding speed on

microstructure and mechanical properties. *Metallurgical and Materials Transactions. A*, **43**: 2133–2147.

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.

Çelenk, O. (2018). Kompozit-Alüminyum Hibrit Yapının Lazer Kesim Tezgahı Y-Eksenine Uygulanması. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

Çelik, S. (1998). Lazerler, tıpta ve özellikle göz tedavisindeki uygulamaları Proje-1. *Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği ödev ve makale dizini*, **4**: 16-22.

Erdoğan, Ş. (2007). Lazerle Delmede İşleme Parametrelerinin Delik Kalitesine Olan Etkisinin Deneysel Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Ertürk, S.Ö. (2010). Al Alaşımlarının Basınçlı Dökümünde Yolluk Sisteminden Kaynaklanan Gaz Problemlerinin Simülasyon Tekniği İle İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Faller, K. (2002). Management justification to select titanium automotive components. SAE Technical Paper, 2002-01-0363.

Faller, K., Froes, F.S., (2001). The use of titanium in family automobiles: current trends. *The Journal of The Minerals, Metals and Materials Society*, **53**: 27–28.

Gao, X.L., Zhang, L.J., Liu, J., Zhang, J.X., (2014). Effects of weld cross-section profiles and microstructure on properties of pulsed Nd:YAG laser welding of Ti₆Al₄V sheet. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **72**: 895–903.

Hong, K.M., Shin, Y.C., (2016). Analysis of microstructure and mechanical properties change in laser welding of Ti₆Al₄V with a multiphysics prediction model. *Journal of Materials Processing Technology*, **237**: 420–429.

- Kaluç, E., (2004). Kaynak Teknolojisi El Kitabı, Ergitme Esaslı Kaynak Yöntemleri, Yayın No: MMO/2004/356,31, Kocaeli.
- Komaç, E., (2009). TIG Kaynak Yöntemi, Askaynak, İstanbul 66.
- Kabir, A.S.H., Cao, X., Medraj, M., Wanjara, P., Cuddy, J., Birur, A., (2010). Effect of welding speed and defocusing distance on the quality of laser welded Ti-6Al-4V. In: Proceedings of the Materials Science and Technology Conference, Houston, TX, pp. 2787-2797.
- Kim, J., Oh, S., Ki, H., 2015. A study of keyhole geometry in laser welding of zinc-coated and uncoated steels using a coaxial observation method. *Journal of Materials Processing Technology*, 225:451-462.
- Hong, K.M., Shin, Y.C. (2016). Prospects of laser welding technology in the automotive industry: A review, Center for Laser-based Manufacturing. School of Mechanical Engineering, Purdue University, West Lafayette, in USA.
- Metiner H. (1995). “Lazerin çalışma prensipleri”, Aselsan, Ankara, 1-3, 4-5.
- Ma, J., Kong, F., Carlson, B., Kovacevic, R., (2013). Two-pass laser welding of galvanized high-strength dual-phase steel for a zero-gap lap joint configuration. *Journal of Materials Processing Technology*, 213: 495-507.
- Oral, C., Kumruoğlu, C.L. (1997). Lazer İle Kesimin, Malzemelere Termal Etkisi. Alternative Methods for Precision Sheet Metal Fabricating Conference, June 1996, San Jose, CA by Leonard Migliore.
- Öner U. (2007). Lazerle kesme parametrelerinin kesme aralığı ve yüzey kalitesine üzerindeki etkisinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Özden, H, Gürsel, K., (2004). “Gemi İnşaatı ve Deniz Yapılarında Lazer Işın İmalat Yöntemlerinin Uygulanması”. Gemi Mühendisliği ve Sanayimiz Sempozyumu, İstanbul, 240-251, 2004
- Püskülcü, G, Koçlular, F. (2009). Lazer Kaynak Yöntemi ve Uygulaması. *Mühendis ve Makine*, 50: sayı:599.
- Sierra, G., Peyre, P., Deschaux-Beaume, F., Stuart, D., Fras, G., (2007). Steel to

aluminium key-hole laser welding. *Materials Science and Engineering, A*, **447**: 197–208.

Tarakçıoğlu, N., Özcan, M. (2004). Lazerler ve materyal işleme uygulamaları, 1.baskı”, Atlas Yayın, İstanbul, 3-128.

Tunç, M. (2015). CO₂ Lazer Kesim Tezgahlarında Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkilerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.

Uzun, R.O. (2010). Lazerlerle Kaynak İşleminde Kaynak Parametrelerinin Kaynak Kalitesi Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Wang, Z., Gao, M., Tang, H., Zeng, X., (2011). Characterization of AZ31B wroughtmagnesium alloy joints welded by high power fiber laser. *Materials Characterization*, **62**: 943–951.

Yavuz, H., Çam, G. (2003). Lazer – Ark Hibrit kaynak Yöntemi. *Mühendis ve Makine*, **46**: 14-19.

Aydın, Y.O., Salman, H.S. (2014). Otomotiv Endüstrisinde Lazer Uygulamaları. Fiber LAST Fiber Lazer Sistemleri ve Teknolojileri Müh. Bil. San. Ve Tic. A.Ş. ODTÜ Teknokent Galyum Blok Z-3 06800 ANKARA.

Yan, S., Hong, Z., Watanabe, T., Jingguo, T., (2010). CW/PW dual-beam YAG laserwelding of steel/aluminum alloy sheets. *Optics and Lasers in Engineering*, **48**: 732–736.

İnetrnet Kaynakları

1. http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/71097/51177/lazer_kaynağı.pdf
12.05.2019
2. <https://www.mazlumboru.com> 08.04.2019

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Adnan KARAAĞAÇLI
Doğum Yeri ve Tarihi : Antakya/Hatay 15.12.1993
Yabancı Dili : İngilizce, Arapça
İletişim (Telefon/e-posta) : 0 535 020 60 91/karaagaccli_2121@hotmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Jan ve Suphi Beyluni Lisesi (2008-2011)
Lisans : Cumhuriyet Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi,
Otomotiv Mühendisliği (2012-2016)
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı (2017-2019)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl: Loko Bakım Atölyesi-Sivas (2014-2015),
TÜDEMSAŞ-Sivas (2014-2015).