

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE UZAKTAN LASER KAYNAĞI ve
KONVANSİYONEL YÖNTEMLERLE KARŞILAŞTIRILMASI**

SAMET GÜNCAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
İMAL USULLERİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. SELAHATTİN YUMURTACI**

İSTANBUL, 2013

T.C
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE UZAKTAN LASER KAYNAĞI ve
KONVANSİYONEL YÖNTEMLERLE KARŞILAŞTIRILMASI

Samet GÜNCAN tarafından hazırlanan tez çalışması 27.06.2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Selahattin YUMURTACI

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Selahattin YUMURTACI

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet KARAASLAN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Anıl AKDOĞAN

Yıldız Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Tez çalışması sırasında benden yardımlarını esirgemeyen ve değerli fikirleri ile bana yol gösteren saygıdeğer hocam Prof. Dr. Selahattin YUMURTACI' ya teşekkür ederim.

Uygulama bölümünde incelemelerde bulunduğum FORD OTOSAN firmasında vakit ayırıp bana yardım eden herkese teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde bana en büyük desteği veren aileme ayrıca teşekkür ederim.

Haziran, 2013

Samet GÜNCAN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT.....	xiii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı.....	3
1.3 Hipotez.....	3
BÖLÜM 2	
LASER IŞINININ ÖZELLİKLERİ.....	4
2.1 Laser Fiziği	4
2.2 Endüstriyel Laser Türleri	9
2.2.1 Nd:YAG Laseri.....	9
2.2.2 CO ₂ Laseri.....	10
2.2.3 Fiber Laserler	11
BÖLÜM 3	
LASER SİSTEMLERİ.....	13
3.1 Malzemelerin Laser ile İşlenmesinde Hareket Eksenleri	14
3.1.1 Tek Eksenli Sistemler	15
3.1.2 İki Eksenli Sistemler	15
3.1.3 Üç ve Daha Fazla Eksenli Sistemler	16
3.2 Optik Sistem Aygıtları ve Laser Işın Yönlendirilmesi	17

3.3 Laser Işını ve Malzeme Etkileşimi	19
---	----

BÖLÜM 4

LASER IŞINI İLE KAYNAK İŞLEMİ.....	22
4.1 Laser Işınının Etkisi	22
4.2 Laser İletim ve Nüfuziyet Kaynağı.....	23
4.2.1 Laser İletim Kaynağı	23
4.2.2 Laser Nüfuziyet Kaynağı	24
4.3 Metalik Malzemelerin Laser ile Kaynak Kabiliyeti	27
4.4 Laser Kaynağında İşlem Parametreleri.....	28
4.4.1 Laser Gücü	29
4.4.2 Laser Işını Odak Çapı	30
4.4.3 Odak Noktası	32
4.4.4 Kaynak Hızı	33
4.4.5 İşlemden Kullanılan Gaz	33

BÖLÜM 5

LASER KAYNAĞI AVANTAJLARI VE DİĞER KAYNAK YÖNTEMLERİ İLE KARŞILAŞTIRMA	35
5.1 Avantajları	35
5.2 Diğer Kaynak Yöntemleri ile Karşılaştırma	36
5.2.1 Koruyucu Gaz Ortamında Yapılan Ergitme Esaslı Kaynak Yöntemleri	36
5.2.2 Elektron Işın Kaynağı	38
5.2.3 Kaynak Yöntemlerine Göre Dikiş Şekilleri.....	38

BÖLÜM 6

UZAKTAN LASER KAYNAĞI VE OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDEKİ KULLANIMI.....	40
6.1 Uzaktan Laser Kaynağının Geliştirilmesi ve Prensibi	40
6.1.1 Uzaktan Laser Kaynağı Geliştirilmesi	40
6.1.2 Uzaktan Laser Kaynak Prensibi.....	42
6.1.3 Uzaktan Laser Kaynağında Sistem Gereksinimleri	57
6.1.4 Uzaktan Laser Kaynağının Otomotiv Endüstrisindeki Kullanım Alanları	64

BÖLÜM 7

ÖRNEK UYGULAMA İNCELEMESİ.....	67
7.1 Uzaktan Laser Kaynak Yönteminin Kazandırdıkları.....	68
7.1.1 Proses Zamanı.....	68
7.1.2 Gövde Tasarımı.....	69
7.1.3 Fabrika Kullanım Alanı	70
7.2 Sistem Donanımı.....	70
7.2.1 Çinko Buharlaşma Problemi	71
7.3 Uzaktan Laser Kaynağı Uygulamalarında Tasarım Kuralları	71

7.3.1 Kaynak Dikiş Lokasyonu.....	71
7.3.2 Sac Parçalar Arasında Boşluk Oluşturma	72
7.3.3 Kaynak Dikişinin Genişliği	72
7.4 Birleştirilen Parçalarda Uygulanan Testler	73
7.4.1 Statik ve Dinamik Yükleme Şartlarında Uygulanan Testler	73
7.4.2 Numune İç yapı İncelemesi	74
BÖLÜM 8.....	76
SONUÇ VE SENTEZ.....	76
KAYNAKLAR	79
ÖZGEÇMİŞ	82

SİMGE LİSTESİ

CO_2	Karbondioksit
D	Odaklanan laser ışınının demet çapı
E_1	Atomun başlangıç seviyesi
E_2	Atomun hareket edeceği seviye
f	Odaklama merceğinin odak uzaklığı
He	Helyum
I_E	Ergime için gerekli laser güç yoğunluğu
I_B	Buharlaşma için gerekli laser güç yoğunluğu
I_V	Buharlaşma için gereken kritik güç yoğunluğu
I_A	Plazmadan sakınmak için gereken kritik güç yoğunluğu
M^2	Laser ışın demetinin odaklanabilirliği
N_2	Azot
Nd^{3+}	Neodymium
W_0	Merceğin odak uzaklığında meydana gelen odak çapı
W_1	Merceğe çarpan laser ışın demetinin yarıçapı
Y^{3+}	Yttrium
ZnSe	Çinko Selenür
Θ	Uzak alan ıraksaması
λ	Dalga boyu

KISALTMA LİSTESİ

ALIMS	Advanced Laser Integrated Manufacturing System
CAD	Computer Aided Design
CNC	Computer Numerical Control
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	European Norm
ITAB	İsı Tesiri Altındaki Bölge
kW	Kilowatt
MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active Gas
Nd:YAG	Neodymium yttrium aluminum garnet
NC	Numerical Control
TEM	Transverse Electro-magnetic Mode
TIG	Tungsten Inert Gas
WIG	Wolfram Inert Gas
Yb:YAG	Ytterbium yttrium aluminum garnet

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	Kendiliğinden emisyon şematik gösterimi, a) uyarılma öncesi, b) uyarılma sonrası 4
Şekil 2.2	Yutma ile uyarılma şematik gösterim, a) uyarılma öncesi, b) uyarılma sonrası 5
Şekil 2.3	Tahrik edilmiş emisyon şematik gösterim, a) uyarılma öncesi, b) uyarılma sonrası 5
Şekil 2.4	Laser olayının şematik gösterimi 6
Şekil 2.5	Atom çarpmasıyla pompalama..... 8
Şekil 2.6	Bir Nd:YAG laser sisteminin temel elemanları 10
Şekil 2.7	CO ₂ laser kaynağı şeması 11
Şekil 3.1	Laser sistemleri ile gerçekleştirilen çalışma alanları..... 14
Şekil 3.2	(a) ve (b) parça dönel hareketli, laser kafası sabit, (c) parça düzlemsel hareketli, laser kafası sabit 15
Şekil 3.3	(a) parça hareketli, laser cihazı ve işlem optiği: sabit, (b) parça ve işlem optiği: hareketli, laser cihazı: sabit, (c) parça ve laser cihazı: sabit, işlem optiği: hareketli, (d) parça: sabit laser cihazı ve işlem optiği: hareketli, (e) parça, laser cihazı ve işlem optiği: hareketli..... 16
Şekil 3.4	Hareketli laser ve çalışma kafasına sahip 4 eksenli makine..... 17
Şekil 3.5	Üç boyutlu çalışma hacmi 19
Şekil 3.6	Farklı malzemeler için tipik işlem koşulları..... 20
Şekil 4.1	Isı iletim kaynağı ve nüfuziyet kaynağı karşılaştırılması..... 23
Şekil 4.2	Darbeleri laser ışını ile nokta kaynağında ergiyik bölge..... 25
Şekil 4.3	Sürekli laser kaynağının şematik gösterimi 26
Şekil 4.4	Kaynak hızının kaynak derinliğine etkisi..... 29
Şekil 4.5	Kaynak dikişi formu..... 30
Şekil 4.6	2W ₁ demet çapındaki TEM ₀₀ modlu laser ışınının odaklanması 31
Şekil 4.7	Odak yerine bağlı plazmanın oluşumu..... 32
Şekil 5.1	Kaynak yöntemlerine göre dikiş şekillerinin karşılaştırılması..... 39
Şekil 6.1	Sciaky uzaktan laser kaynağının resmi 42
Şekil 6.2	Farklı odak noktalarında kaynak dikişleri (laser gücü: 4 kW ; kaynak hızı: 4 metre/dakika; odak mesafesi 220 mm) 46
Şekil 6.3	Araç koltuk gövde yapısı 51
Şekil 6.4	Tepe etkisi (Humping Effect) şematik gösterimi (a.ön işlem,b.uzaktan kaynak işlemi) 56
Şekil 6.5	Tepe yüksekliği ile ışın geliş açısı arası ilişki 56
Şekil 6.6	Farklı laser türlerinde ışın kalitesi 57
Şekil 6.7	Galileo teleskobunun şematik gösterimi 60
Şekil 6.8	İki aynalı tarayıcı uzaktan laser sistemi 61

Şekil 6.9	İki yansıtıcı ayna ve F-Theta optik mercekli tarayıcı sistem	62
Şekil 6.10	Robot koluna monte edilen tarayıcı ünite ile kaynak	63
Şekil 6.11	Laser ışını etki bölgesi ve kaynak lokasyonları	64
Şekil 6.12	Kapı panel birleştirilmelerinde kullanılan farklı türden kaynak dikişleri	65
Şekil 7.1	Taban panel saclarının görünüşü	69
Şekil 7.2	Nokta direnç kaynağı ve uzaktan laser kaynağı uygulamaları	70
Şekil 7.3	Konumlama ekipmanı	71
Şekil 7.4	Kaynak dikiş merkezinin kenara olan mesafesi	72
Şekil 7.5	Kaynak dikiş genişliği	73
Şekil 7.6	Numune kapı imalatı	74
Şekil 7.7	Uygun birleşmiş test örnekleri	75
Şekil 7.8	Başarısız mikrografi test örnekleri	75

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 6.1	Kim vd. çalışmalarında kullandıkları laser sistemi özellikleri..... 45
Çizelge 6.2	Akihiko'nun yapmış olduğu çalışmada kullanılan laser parametreleri... 49
Çizelge 6.3	ZStE 260 Z ve St 05 Z malzemelerinin kimyasal kompozisyonları 52
Çizelge 6.4	OCANA vd. çalışmasında kullanılan malzeme çiftleri ve kalınlıkları ... 52
Çizelge 6.5	Gu ve Shulkin çalışmasında kullanılan işlem parametreleri 55
Çizelge 7.1	Taban panel saclarının kimyasal kompozisyonu..... 68

ÖZET

OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE UZAKTAN LASER KAYNAĞI ve KONVANSİYONEL YÖNTEMLERLE KARŞILAŞTIRILMASI

Samet GÜNCAN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Selahattin YUMURTACI

Endüstride giderek ağırlaşan rekabet koşulları, işletmeleri daha hızlı ve daha verimli üretim yöntemlerini ortaya koyma ve uygulama arayışlarına itmektedir. Kaliteden ödün vermeden, sürekli gelişim prensibi ile rekabet edebilir bir konuma gelebilmek ancak günümüz teknolojik olanaklarından yararlanarak mümkün olmaktadır.

Uzaktan laser kaynak yöntemi, yapılan teknolojik çalışmaların sonucunda ortaya çıkan bir birleştirme yöntemi olup, konvansiyonel birleştirme yöntemlerine göre sahip olduğu üstünlüklerden ötürü başta otomotiv endüstrisi olmak üzere farklı birçok endüstriyel uygulamada tercih edilmektedir. Laser ışınını uzun odak mesafesinde iş parçalarına odaklayabilmesi üretim sistemlerine serbestlik katmakta aynı zamanda hızlı bir yöntem olmasından ötürü zamandan tasarruf edilmesini sağlamaktadır.

Bu tez kapsamında, uzaktan laser kaynak yönteminin esasları, avantajları ve uzaktan kaynak yönteminin alt sistemleri ayrıntılı olarak incelenmiş, bunun yanında konvansiyonel birleştirme yöntemleri ile karşılaştırması yapılmıştır. Yöntemin endüstriyel uygulamasını incelemek amacı ile FORD OTOSAN firmasında kullanılan uzaktan laser kaynak sistemi ele alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: laser kaynağı, uzaktan kaynak, otomotiv

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ABSTRACT

REMOTE LASER WELDING in AUTOMOTIVE INDUSTRY and COMPARISON with CONVENTIONAL METHODS

Samet GÜNCAN

Department of Mechanical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Selahattin YUMURTACI

With the increasing competition in the industry, manufacturers are forced to improve their production by coming up with methods that promote faster and more efficient production. The only way to stay competitive is by improving your systems constantly without any reduction in quality and keeping up with the latest technological developments.

Remote laser welding method is a method that was created with the latest technological developments. With its unique advantages the method was widely accepted by various industries mainly the automotive industry. The possibility of focusing the laser precisely on needed locations of the part creates manufacturing flexibility and reduces production cost due to fast processing abilities.

The thesis examines the remote laser welding method principles, advantages, the subsystems that create the remote welding system, and comparison with the conventional methods in detail. Furthermore remote laser welding systems at Ford Otosan were examined.

Key words: laser welding, remote welding, automotive

**YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

1.1 Literatür Özeti

Günümüzde giderek etkisini gösteren rekabet ortamı işletmeleri yeni imalat yöntemleri bulmaya teşvik etmektedir. İmalat prosesini ve performansını artıran yeni yöntemler ile seri üretime uygun, daha hızlı ve daha kaliteli ürünler ortaya çıkmaktadır.

Laser konvansiyonel yöntemlere karşı barındırdığı üstün özellikler sayesinde imalat sanayinin vazgeçilmezleri arasında yer almıştır. Laser ile kesme, birleştirme, delme, kaplama, sertleştirme, alaşımlama ve ergitme gibi işlemler çok farklı malzeme türlerinde rahatlıkla gerçekleştirilebilmektedir. Laserin uygulandığı malzemelerin çok çeşitli olması da sağladığı önemli avantajlardan bir diğeridir.

Çok küçük çaplı bir odaklama etkisinde çevreyi etkilemeden ve laser ışın enerjisinde çok fazla bir güç kaybı olmadan çalışma ortamına laser ışınının aktarılması ile yüksek işlem hızı ve çalışma kapasitesine ulaşılmaktadır. Kesme veya sertleştirme işlemi sonrasında yapılacak ilave işlemlerin indirgenmesi veya bu işlemlere hiç gerek duyulmaması, laserin geleneksel yöntemlere göre olan üstünlüklerine örnek olarak verilebilir[1].

Laserin sağladığı bu avantajlar yanında yatırım maliyetinin yüksek olması, kullanım yaygınlığını kısıtlamaktadır. Laserin kullanıldığı proseslerde toplam maliyet oranı mevcut yöntemdeki maliyet oranından düşük ise tercih edilmektedir.

Uzaktan laser kaynağı da, laserin üretim teknolojisindeki yeni bir uygulaması olarak öne çıkmakta olup, uzaktan laser kaynağı özellikle otomotiv sektöründe nokta direnç

kaynağının yerini almıştır ve kullanımı hızla artmaktadır. Otomotiv sektöründe özellikle gövde parçalarının birleştirilmesinde kullanılan uzaktan laser kaynağı, elektrod soğutma sistemlerine, elektrod uç formu düzeltilmesine ve periyodik olarak elektrod değişimine olan ihtiyacı ortadan kaldırmakta, sağladığı üretim kapasitesi ve yapısal dayanım avantajları ile de öne çıkmaktadır.

Hatwig vd.[9] yaptıkları çalışmada, uzaktan laser kaynak ve kesme işlemlerinde laser ışınının izleyeceği yolun otomatik olarak hesaplamasını sağlayan bir program üzerinde çalışmışlardır. Bu yöntem ile kaynak ve kesme bölgelerinde manuel olarak yapılan işlemlere göre sisteme daha fazla esneklik kazandırmışlar ve otomatik laser yolu programlaması ile işlem verimini %30'a kadar artırmışlardır.

Kim vd.[8] çalışmalarında disk laseri kullanarak uzaktan laser kaynak sistemini incelemişlerdir. Robot kolu ile birlikte kullanılan uzaktan kaynak sisteminde, kaynak parametrelerine bağlı olarak dikiş şekli, penetrasyon derinliği, odak çapı gibi değerleri ortaya çıkarmışlardır. Bununla birlikte ışının iş parçasına geliş açısı da ayrıca incelenmiştir.

Mori vd.[10] Nissan firmasında uzaktan laser kaynağı yöntemini kullanarak gerçekleştirdikleri araç gövde uygulamalarından örnekler vermişler ve sistemin nasıl çalıştığını anlatmışlardır.

Akihiko[11] çalışmasında uzaktan laser kaynak kafasının özelliklerinden bahsetmiş, tarayıcı ünite optik elemanlarının görevlerini sıralamış ve deneysel çalışma amacı ile tasarlanan uzaktan laser kaynak kafası ile yapılan incelemeleri özetlemiştir.

Higuchi[12] çalışmasında uzaktan laser kaynağı sisteminin Amerikan otomotiv endüstrisindeki gelişimini detaylandırmış ve gelecek dönemlerde yapılacak çalışmalar ile ilgili bilgiler vermiştir.

OCANA vd.[14] çalışmalarında otomotivde kullanılan ince galvanize sacların uzaktan laser kaynağı ile birleştirilmesini ele almışlardır. Kaynak parametrelerinin kaynak dikişine ve formuna olan etkisi incelenmiştir ve parametreleri optimize etmek amacı ile bir dizi deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir.

Gu ve Shulkin[18] çalışmalarında bindirme kaynağı ile uzaktan laser kaynağı kullanarak birleştirilen çinko kaplamalı sac parçaları incelemişler ve çalışmalarında çinko buharlaşma sorununu çözmek için tepe etkisi (*humping effect*) adını verdikleri bir teknikten yararlanmışlardır.

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının amacı, uzaktan laser kaynak sistemini ve sistemin getirilerini açıklamak ve konvansiyonel birleştirme yöntemleri ile farklılıklarını ortaya koymaktır. Bununla birlikte, uzaktan laser kaynağının otomotiv endüstrisindeki yeri ve uygulama örnekleri incelenecektir.

1.3 Hipotez

Laser kaynağı yönteminde, laser ışınının kullanılmadığı her an, imalat verimini düşürmekte ve maliyetleri artırmaktadır. Uzaktan laser kaynağı, laser ışınının kullanımını maksimize ederek imalat sistemlerine esneklik kazandırmakta ve kaliteden ödün vermeden iş parçalarının birleştirilmesine olanak tanımaktadır.

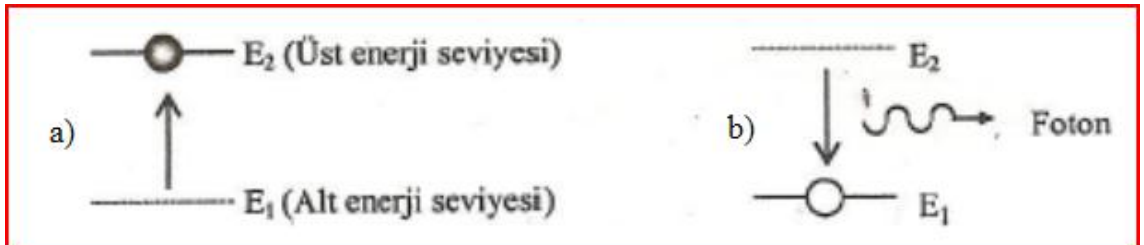
LASER IŞINININ ÖZELLİKLERİ

2.1 Laser Fiziği

Laser kelimesi, İngilizce ‘Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation’ cümlesindeki kelimelerin baş harflerinden oluşmuştur ve ‘ Işınlandırmanın Uyarılmış Yayımı ile Işığın Kuvvetlendirmesi’ olarak Türkçeye çevrilebilir.

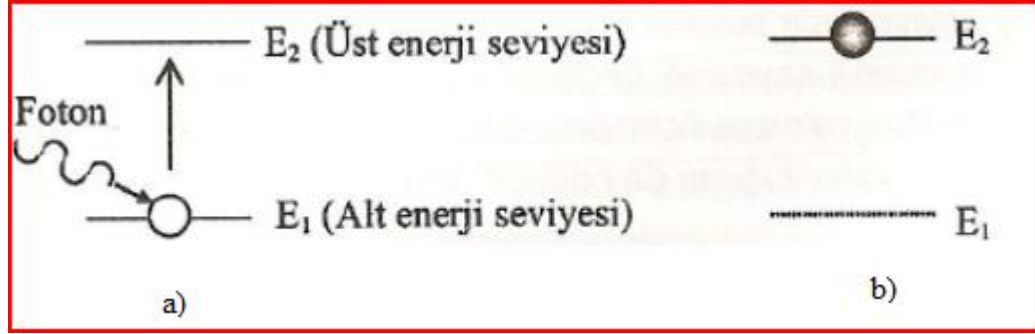
Laser ışın oluşumunun temelinde atomların, iyonların ve moleküllerin farklı enerji seviyelerine hareketleri bulunmaktadır. Bu hareketlerin sonucunda foton yayını meydana gelir ve bu fotonların tümü yönlendirilme ile laser ışını oluşturur. Bir madde için sonsuz sayıda enerji seviyeleri bulunmaktadır. Foton yayını açıklamak amacı ile atomun bulunabileceği enerji seviyeleri E_1 ve E_2 olarak özetleyebiliriz. E_1 ile gösterilen atomun başlangıçtaki enerji seviyesi, E_2 ile gösterilen enerji seviyesi de atomun hareket edeceği enerji seviyesi olarak belirtilir.

E_2 enerji seviyesinde bulunan atom tekrar E_1 enerji seviyesine geri dönmek isteyecektir. Atom E_1 enerji seviyesine tekrar inerken, $E_2 - E_1$ büyüklüğündeki enerji farkını ortama bırakarak eski konumuna geri döner. Bu esnada ortamda elektromanyetik dalga yayını gözlenir. Bu olaya kendiliğinden emisyon adı verilmektedir.



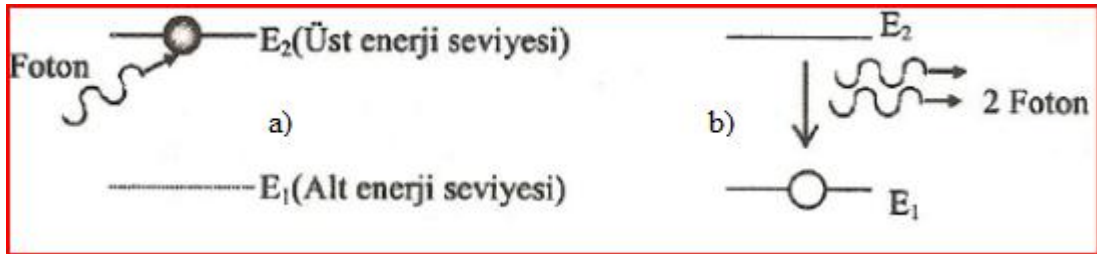
Şekil 2.1 Kendiliğinden emisyon şematik gösterimi, a) uyarılma öncesi, b) uyarılma sonrası

Laser fiziğini oluşturan diğer bir unsurda yutma olarak adlandırılmaktadır. Başlangıçta E_1 enerji seviyesinde bulunan bir atoma, fotonun çarpması sonucu, fotonun sahip olduğu enerji atoma aktarılır. Aktarılan (yutulan) enerji, atomu E_2 enerji seviyesine yükseltir. Atoma çarpan fotonun enerjisi $E_2 - E_1$ enerji farkına dönüşmektedir.



Şekil 2.2 Yutma ile uyarılma şematik gösterim, a) uyarılma öncesi, b) uyarılma sonrası

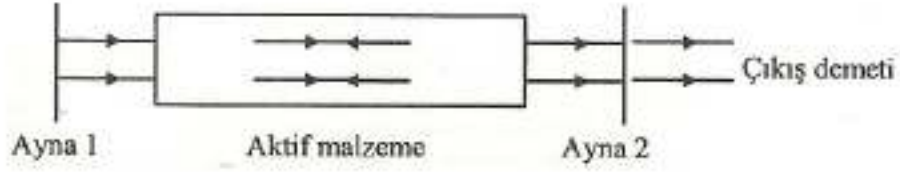
Laser fiziğini açıklamada bahsedilen iki unsur dışında, tahrik edilmiş emisyon adı verilen bir unsur daha bulunmaktadır. Tahrik edilmiş emisyonda, E_2 enerji seviyesinde bulunan atoma kendi atomik frekansında bir foton çarptığında E_1 enerji seviyesine geçerek ortama aynı fazda ve aynı yönde iki foton yayacaktır. Bu teknikte, emisyon için gereken her bir fotona karşılık, iki foton yayılmaktadır[3].



Şekil 2.3 Tahrik edilmiş emisyon şematik gösterim, a) uyarılma öncesi, b) uyarılma sonrası

Laser materyalinden ışın demeti elde etmek için aşağıdaki üç şartın sağlanması gerekir:

- Sistemde taban durumundakinden daha fazla uyarılmış durumda atom olmalıdır.
- Sistemin uyarılmış durumu yarı kararlı bir durum olmalıdır. Böyle durumlarda uyarılmış ışımaya kendiliğinden ışımadan önce olur.
- Yayılan fotonlar diğer uyarılmış atomlardan ışımaya yaptırmaya yetecek kadar uzun süre sistem içinde tutulmalıdır. Bu durum, sistemin ucuna yansıtıcı aynalar yerleştirme ile mümkündür[3].



Şekil 2.4 Laser olayının şematik gösterimi

Laser Cihazının Temel Elemanları

Bir laser ışını elde etmek için aşağıda belirtilen dört ana elemana ihtiyaç vardır.

- a) Aktif Ortam,
- b) Uyarma Mekanizması,
- c) Geri Besleme Mekanizması,
- d) Çıkış Bağdaştırıcısı.

a) Aktif Ortam

Aktif ortam, en alt enerji düzeyinde bulunan atomların sayısından, uyarılmış durumdaki atomların sayısının fazla olmasını sağlamak amacı ile kullanılmaktadır. Bu ortamda, uyarılmış atomların yüzdesi arttıkça, emisyon olasılığı da artmaktadır. Aktif ortamda iki durumun bulunması şarttır. İlk durumda, aktif ortamdaki atomlar foton yaymak üzere, kendiliğinden uyarım yapabilecek uyarılmış emisyon seviyelerinde bulunmaları gerekir. İkinci olarak, foton yayarak alt seviyelere düşen elektronların sayısından uyarılmış atomların sayısı fazla olmalı, yani elektronların uyarılmış seviyeye pompalanmaları gerekir[3].

Işın demeti, aktif ortamın bir ucundan girer ve ışık tayfının yoğunluğu artmış olarak aktif ortamın diğer ucundan çıkar. Aktif ortam laserlerde optik kazanç sağlar. Aktif ortam;

- Gaz,
- Sıvı,
- Katı – hal,
- Yarı İletken.

materyallerden herhangi biri olabilir. Bahsedilen aktif ortamlara örnek vermek gerekirse; katı hal için yakut kristali, sıvı aktif ortam olarak boya laserleri, gaz aktif ortamlarına örnek olarak helyum ve neon gazları karışımı verilebilir.

b) Uyarma Mekanizması

Aktif ortamda en alt enerji seviyesinde bulunan elektronların sayısından, uyarılmış durumda bulunan (yüksek enerji seviyesinde) atomların sayısının fazla olması için bir uyarma mekanizması oluşturulması gerekmektedir. Uyarma mekanizması, düşük enerji seviyesinde bulunan bir atomun enerji kaynağı vasıtası ile pompalanması sonucu oluşmaktadır.

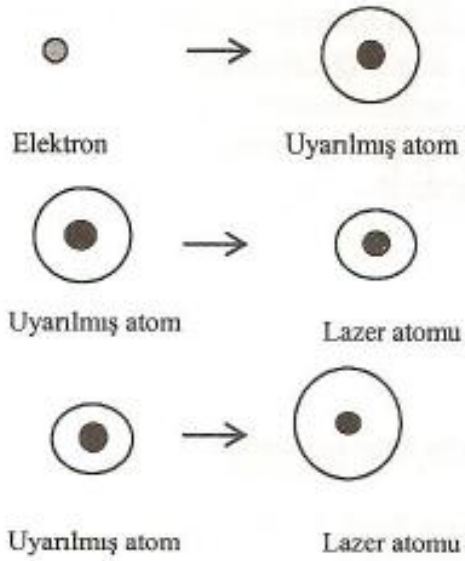
Pompalama, lasere ilave enerji verilerek nüfus terslemesinin elde edilmesi işlemi olarak tanımlanabilir. Laser olayında aşağıda belirtilen pompalama yöntemlerinden biri kullanılmaktadır:

- Optik pompalama
- Elektron çarpmasıyla pompalama
- Atom çarpmasıyla pompalama.

Optik pompalama yönteminde laser ortamı (genellikle gaz veya katı malzeme) ışık kaynağı tarafından ışıklandırılır. Laser ortamındaki elektronlar, enerjisi kendisine uygun olan fotonların enerjilerini yutar ve atom içerisinde daha yüksek enerji seviyelerine atlarlar. Böylece atomlar uyarılır ve yeni fotonlar bırakmaya hazır duruma gelirler.

Elektron çarpmasıyla pompalama yönteminde, atomların birbirleri ile etkileşimi ön çökmektedir. Elektron tabancası ortamın içine odaklanırsa, ortamda bulunan elektronlar ve atomlar vurulabilir. Çarpan elektronlar yeterli enerjiye sahipse, kendi enerjisini çarptığı atoma aktararak düşük enerji seviyesinde bulunan atomu uyarabilmektedir. Eğer ortamdaki atomlar yeteri kadar uyarılmış vaziyette ise nüfus terslemesi denen olay meydana gelmektedir.

Atom çarpması yönteminde ise; genellikle elektron boşalmasından sonra ortaya çıkan elektronun, atoma çarparak onu uyarılmış duruma getirmesi ile başlar. Uyarılan atom, laser ortamında bir başka atoma çarparak enerjisini aktarır. Bunun sonucunda, çarpılan laser atomu, uyarılmış duruma geçer. Eğer yeteri kadar uyarılmış atom var ise, nüfus terslemesi meydana gelir[6].



Elektron uyarılmış atoma çarparak elektronlarının yüksek enerji seviyesine geçmesini sağlar.

Uyarılmış atom lazer atomuna çarparak kendi enerjisini lazer atomuna aktarır.

Uyarılmış atom lazer atomuna çarparak kendi enerjisini lazer atomuna aktarır.

şekil 2.5 Atom çarpmasıyla pompalama[6]

c) Geri Besleme Mekanizması

Geri besleme mekanizması, uyarılmış emisyon yöntemi ile daha fazla yükseltme işlemine gerçekleştirmek amacıyla eş güdümlü olarak ışığın bir kısmını aktif ortama geri gönderir. Geri gönderilen ışığın miktarına, uyarılmış sinyalin uzunluğuna, eşgüdümlü olarak üretilen lazer ışığının miktarına, uyarılmış atomların çokluğuna ve uyarılmış sinyallerin kuvvetine bağlı olarak yükseltme oranı değişir. Geri besleme mekanizması genellikle iki ayna içerir. Aynalar aktif ortamın iki ucuna aktif ortamdan çıkan ışınlara dik gelecek şekilde yerleştirilirler. Geri besleme mekanizması aktif ortamdan geçecek eş güdümlü ışığın yansımısını sağlar[3].

d) ıkış Bağdaştırıcısı

ıkış bağdaştırıcısı, yansıtıcı iki ayna arasındaki lazer ışığının bir kısmının aktif ortamdan lazer ışın demeti olarak dışarı çıkmasına olanak sağlamaktadır. Geri besleme mekanizmasındaki aynalardan biri, ışığın bir kısmının lazer dalga boyunda aktif ortamdan çıkmasını sağlar. Yansıtıcı aynalardan dışarıya çıkılmasına müsaade edilen ışının oranı, Helyum Neon lazerlerde %1'den az, katı hal lazerlerinde ise %80'den fazladır[6].

2.2 Endüstriyel Laser Türleri

Endüstriyel laser türleri üç başlık altında toplanabilir. Özellikle malzeme işlemlerinde (kesme, delme vb.) kullanılan laser türleri, katı hal laserlerinden Nd:YAG laseri, fiber laser ve bir gaz laseri olan CO₂ laseridir.

2.2.1 Nd:YAG Laseri

Etkin laser iyonları olan Y³⁺ ve Nd³⁺ aktif laser ortamında yüzde 0,5 ile yüzde 3 oranında bulunmaktadır. Bu laser türünde, darbeli laser üretmek için flaş lamba, sürekli laser üretmek için ise ark lambası kullanılmaktadır[1].

Nd: YAG laserlerinin geliştirilmesi ile birlikte endüstrisindeki kullanım alanları gittikçe artmıştır. Nd:YAG laser sistemlerinde laser ışını üretmek için silindirik bir çubuk şeklindeki kristalin iki ucu parlatılıp yansıma önleyici bir madde ile kaplanır. Daha sonra bu kristal metal bir kap içerisine sabitlenir. Kullanılan laserlerde uyarıcı olarak; flaş lamba, ark lambası, akkor filamanlı lamba ve laser diyot kullanılır. Uyarılma yolu ile oluşan laser ışınları resonatörde bulunan ve her iki uçta yer alan, biri yarı geçirgen diğeri ise tam geçirgen aynalar yardımı ile yönlendir ve ışın demeti olarak sistemden dışarı atılır. Dış yüzeyinden çok yüksek enerjili ışık ile uyarılan Nd:YAG kristali, 1064 nm dalga boyunda laser ışını üretir.

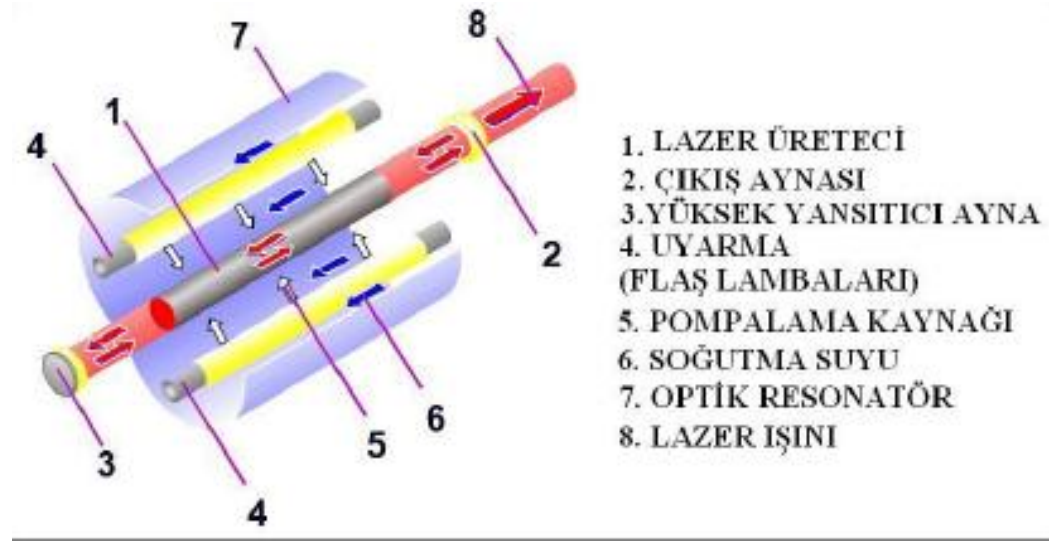
Kaynak uygulamalarında kullanılan Nd:YAG laserlerinin ortalama çıkış güçleri 0,3 ile 3 kW arasındadır. Maksimum 5 kW değerinde çıkış güçleri ile işlem yapılabilir. Nd:YAG laserleri çeşitli işletme türlerinde çalışırlar. Bunlar; sürekli mod, darbeli mod ve Q-anahtarlama'dır.

Bu işletme türleri laser ışınının uyarım çeşidine göre değişir. Sürekli mod için ark lambası ile uyarım yapılması gerekirken, darbeli modda çalışma için flaş lamba kullanılması gerekmektedir. Q anahtarlama için ise özel bir yöntem gerekir.

Darbeli pompalama yaklaşık olarak 0,1 ms' den başlayan ve sürekli moda kadar uzanan bir darbe genişliği sağlar. Kaynak uygulamaları için kullanılan genel darbe süreleri 0,1-20 ms aralığındadır[5].

Q anahtarlama ise laser markalama işlemlerinde kullanılmaktadır. Çok kısa aralıklarla laser darbeleri ve çok yüksek güç yoğunluklu laser ışını ile malzeme yüzeyinde buharlaşma gerçekleşir.

Yüksek güç değerine sahip Nd:YAG laserleri çeşitli malzeme işleme uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 2.6 Bir Nd:YAG laser sisteminin temel elemanları[5]

2.2.2 CO₂ Laseri

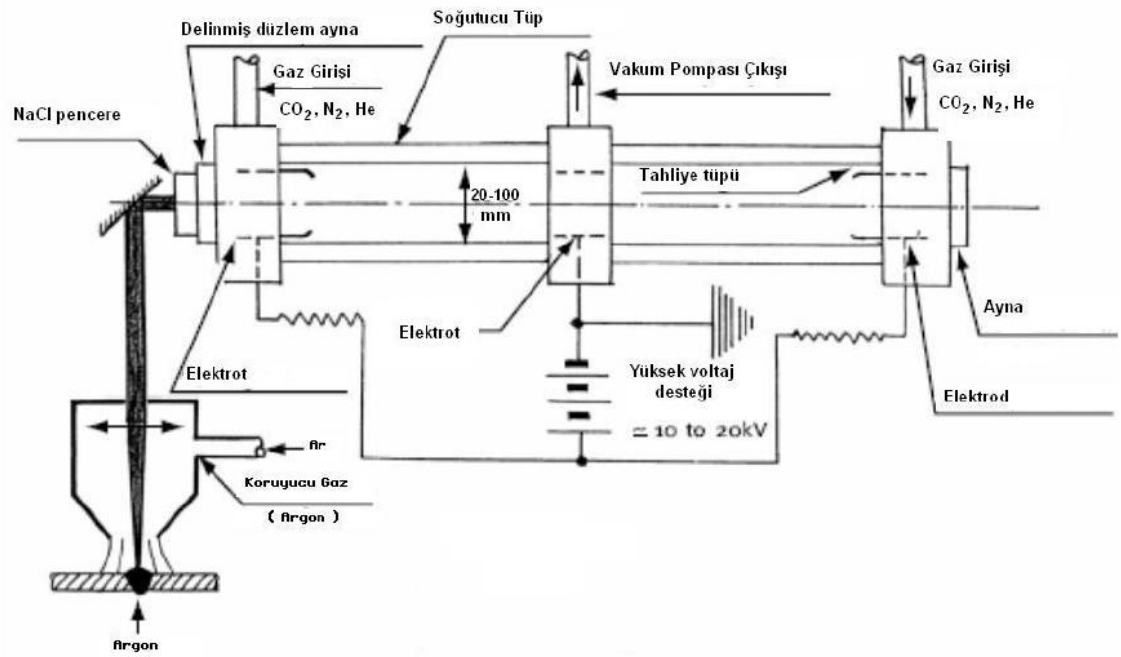
Yüksek ve devamlı güç (50 kW'a kadar) elde edilebilen bir laser sistemi olan CO₂ laseri, diğer sistemler arasında verimi en yüksek olan sistemdir. Çıkış verimi; çıkış laser gücünün elektriksel giriş gücüne oranı olarak tanımlanır ve yüzde 10'a kadar çıkmaktadır. Laserin üretimi bir doğru akım kaynağı ile sağlanabilir. Özellikle plastik malzemelerin işlenmesinde bu tip laserler yaygın olarak kullanılır.

Gaz laser sistemlerinde laser ışını üretmek için bir gaz karışımından yararlanılmaktadır. CO₂, N₂, He gazlarının karışımı sızdırmaz bir tüp içerisine konarak sabitlenir. Bu gaz karışımı bileşenleri makineye ayrı ayrı tüplerde veya önceden belli oranlarda karıştırılmış olarak verilir. Sonrasında bu tüpün çeşitli yerlerine sabitlenen elektrodlar yardımı ile uyarılarak laser ışını üretilir. Uyarılma işlemi CO₂ moleküllerinin uyarılması, elektronların ve N₂ moleküllerinin çarpışması ile gerçekleşir. Laser ışını CO₂ molekülleri ile oluşturulurken N₂ molekülleri de ışının verimini arttırmaktadırlar. Helyum gazı ise, gaz içerisinde ısı transferinin devam etmesine ve CO₂ moleküllerine taban enerji konumlarına geri dönmelerinde yardımcı olmaktadır.

Yüksek güçte CO₂ laserler, tüp içerisindeki gazın aşırı ısınma problemleri nedeniyle yüksek hızda gaz sirkülasyonuna ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle bu tip laserlerde

kompleks türbin pompaları ile tüp içerisinde yüksek debili ve hızlı gaz akışı sağlanması gerekmektedir. Bu kompleks sistemler hem laserin maliyetini yükselmekte hem de arıza riskini artırmaktadır[18].

CO₂ laser üretici 10,6 µm dalga boyunda laser ışını üretir ve fiber optik kablolar ile taşınımı mümkün değildir. Bu nedenle CO₂ laser sistemlerinde yansıtıcı aynalar kullanılarak laser ışını iş parçasına iletilir. Yüksek hızdaki soğutucu gaz uygulamaları ile laser gücü 50 kW ve üzerine çıkabilmektedir.



Şekil 2.7 CO₂ laser kaynağı şeması[4]

2.2.3 Fiber Laserler

Fiber laserler endüstride yoğun olarak kullanılan CO₂ ve Nd:YAG laserlerine alternatif olarak ortaya çıkan bir laser türüdür. Diğer endüstriyel laserlere olan üstünlüklerinden ötürü kullanım alanlarını artırmaktadırlar.

Fiber laser ışınlarının üretiminde kullanılan kristallerde, uyarılma yüzeyi ile kristalin iç bölümleri arasındaki mesafe birkaç yüz mikronun altında kalmakta, bundan ötürü kristal yapı üzerinde önemli bir termal stres oluşmamaktadır[18].

Fiber laserler, diğer endüstriyel laser türlerine göre çok daha verimlidir. CO₂ laserlerinde verim %10, Nd:YAG laserlerinde ise %2 civarındadır. Fiber laserlerde ise bu değer %25'e kadar çıkmaktadır ve aynı zamanda güvenilirlik, yoğunluk ve performans

parametreleri açısından da diğer endüstriyel laserlere göre avantajlar barındırmaktadırlar.

Yeni üretilen fiber laserlerde güç 20 kW'a kadar çıkmaktadır. Bununla birlikte, dalga boyları 1030 nm civarındadır. Düşük dalga boyundan ötürü laser ışınının fiber optik kablolar ile taşınımı mümkündür.

BÖLÜM 3

LASER SİSTEMLERİ

Endüstride laser ile yapılan işlemler, ürünlerin fiyat, kalite ve üretim hızı gibi faktörleri ciddi oranda iyileştirdiğinden ve otomasyon sistemlerine olan yatkınlıklarından ötürü tercih edilmektedirler. Konvansiyonel yöntemler ile gerçekleştirilmesi oldukça zahmetli veya imkansız olan parçalar, CNC makinalarına entegre edilmiş laser sistemleri ile oldukça hızlı, yüksek kaliteli ve ucuz olarak imal edilmektedir. Yalnızca kesme veya kaynak uygulamalarında gösterdiği üstün özellikleri ile değil, aynı zamanda sertleştirme, markalama, alaşımlama ve kaplama gibi işlemlerde gösterdikleri performanslarından ötürü de laser sistemleri tercih edilmektedirler.

Laser türlerinden CO₂ laserleri kesme, birleştirme ve yüzey işlemleri gibi endüstride geniş bir yelpazede kullanılırken, Nd:YAG laseri de ince ve hassas parçaların lehimlenmesinde, kaynak edilmesinde, kesme işlemlerinde, metalsel ve metal dışı malzemelerin markalanmasında yaygın biçimde kullanılmaktadır[1]. Bu iki laser türüne ek olarak son dönemde ortaya çıkan fiber laserler, düşük laser çıkış güçleri ile daha kaliteli parçaların üretilmesine olanak sağlamışlardır.



Şekil 3.1 Laser sistemleri ile gerçekleştirilen çalışma alanları[1]

Laser kaynak sistemlerinden türetilen uzaktan kaynak sistemleri birkaç alt başlıktan meydana gelmektedir. Bunları sıralayacak olursak;

- Yüksek güç ve ışın kalitesine sahip bir laser türü,
- Uzun odak mesafesi (1,6 metreye kadar) ve ışını odaklanması amacıyla kullanılan optik sistem kurulumu,
- xyz eksenlerinde hareket edebilen ve hızlı bir şekilde tarama ve pozisyonlama özelliğine sahip olan laser ışını,
- Büyük çalışma istasyonlarında gereksinim duyulan ve xy eksenlerinde hareket edebilen iş parçası hareket tablaları,
- Robot ve tarayıcının hareketlerini ve parametre seçimlerini düzenlemek amacı ile geliştirilmiş çevrimdışı programlama yazılımı.

3.1 Malzemelerin Laser ile İşlenmesinde Hareket Eksenleri

Malzemelerin laser ile işlemlerinde kullanılan cihazlar çeşitli hareket eksenlerinde çalışırlar. Bu hareket eksenlerinde laser cihazı, parçanın kendisi veya daha gelişmiş cihazlarda laser cihazı ve parça aynı anda hareket edebilirler.

Laser cihazı veya işlem gören parçanın hareket eksenleri, parçanın karmaşıklığına bağlı olarak değişmektedir.

Laser cihazları NC ve CNC sistemlerine entegre edilen programlar ile çalışmaktadır.

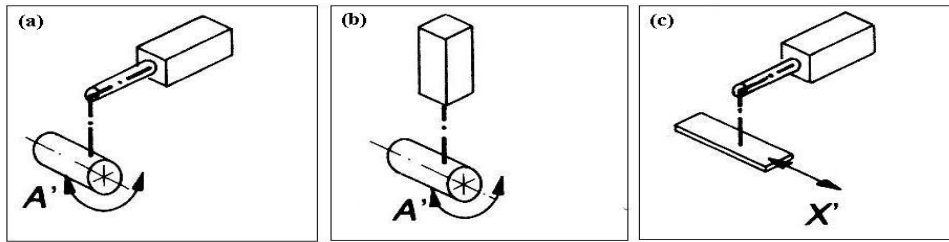
Hareket eksenleri temel eksenler olarak X, Y ve Z şeklinde tanımlanırlar. Dönme eksenleri ise laser cihazında veya işlem gören parçada olup sırasıyla A, B, C harfleri ile tanımlanırlar ve X, Y, Z ana eksenleri üzerinde yer almaktadır. A dönüş eksenini X ana

ekseni üzerinde, B dönüş eksenini Y ana eksenini üzerinde ve C dönüş eksenini Z ana eksenini üzerinde kabul edilmektedir[1].

Eğer laser cihazı sabitken sadece işlem gören parça hareket ediyorsa, parçanın hareketleri X' , Y' , Z' ve bu eksenlerin dönme hareketleri A' , B' ve C' şeklinde ifade edilmektedir[1].

3.1.1 Tek Eksenli Sistemler

Yalnızca parçanın dönme ve düzlemsel hareketlerinin olduğu sistemlerdir. Parçanın veya laser cihazının pozisyonu elle ayarlanabilmektedir.

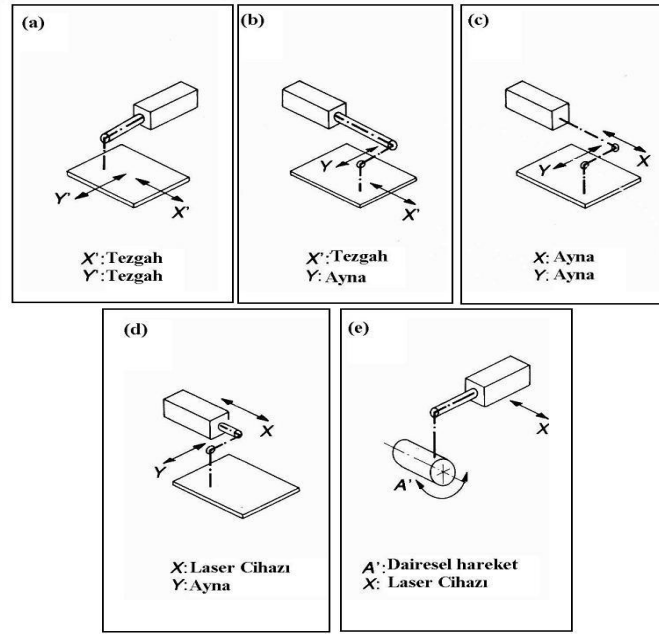


Şekil 3.2 (a) ve (b) parça dönel hareketli, laser kafası sabit, (c) parça düzlemsel hareketli, laser kafası sabit[1]

3.1.2 İki Eksenli Sistemler

İki eksenli laser sistemleri daha çok iş parçalarının düz yüzeylerinde uygulanacak kesme işlemlerinde kullanılmaktadır. İki eksenli sistemler sahip oldukları fonksiyonel özellikleri sayesinde işlem kolaylığı sağlamaktadır. Bu sistem özellikle laser kesme işleminde oldukça yaygın olarak uygulanmaktadır. Uçak ve makine parçaları, takım malzemeleri, demir dışı malzemelerin işlenmesi bu sistem ile mümkündür. Kesme işleminin yanında kaynak, delme, sertleştirme, alaşımlama ve markalama gibi işlemlerde yapılmaktadır.

Laser cihaz kafası ve parça dönel ve düzlemsel hareketleri yerine getirebilmektedir. Silindirik parçalar aynı anda hem dönme eksenlerinde, hem de düzlemsel yönde işlenebilmektedir.

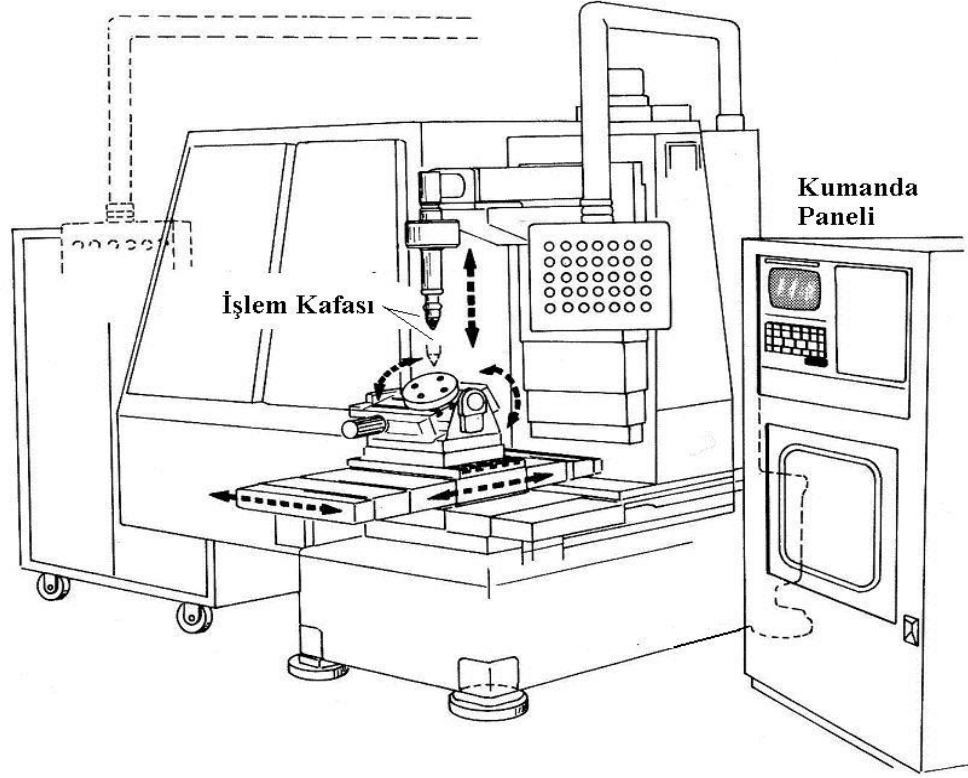


Şekil 3.3 (a) parça hareketli, laser cihazı ve işlem optiği: sabit, (b) parça ve işlem optiği: hareketli, laser cihazı: sabit, (c) parça ve laser cihazı: sabit, işlem optiği: hareketli, (d) parça: sabit laser cihazı ve işlem optiği: hareketli, (e) parça, laser cihazı ve işlem optiği: hareketli[1]

3.1.3 Üç ve Daha Fazla Eksenli Sistemler

Üç eksenli sistemlerin seçilmesi ve kullanılmasında seçim kriteri olarak parça boyutu ve parça ağırlığı öne çıkmaktadır. Bu kriterler çalışma alan büyüklüğü ve laser çalışma sisteminin alt yapısını oluşturmaktadır. Ayrıca yapılacak işlemin gereksinimleri de önemlidir. Örneğin; laser ile kesme işlemleri kaynak işlemlerine göre daha yüksek hızlarda gerçekleştirilmektedir.

X', Y' tezgah eksenlerine sahip ve ayrıca yanal yönlerde hareket edebilen laser cihazı Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Burada tezgah eksenine dik yönde çalışma kafası yerleştirilmiştir.



Şekil 3.4 Hareketli laser ve çalışma kafasına sahip 4 eksenli makine[1]

3.2 Optik Sistem Aygıtları ve Laser Işın Yönlendirilmesi

Laser sistemlerinde ve özellikle geliştirilen uzaktan kaynak sistemlerinde optik sistem elemanları ve bu elemanların işlem esnasında kontrolleri, kaliteli, hızlı ve güvenilir bir kaynak işlemi için oldukça önemlidir. Optik sistemler laser ışınının iş parçasına iletimi sırasında, ışının taşınımı ve odaklanması amacı ile kullanılan bir dizi optik elemandan meydana gelmektedir.

Sistemdeki bu elemanlar;

- Kolimatörler
- Laser ışın genişleticisi
- Mercekler
- Aynalar
- Fiber optik kablolar olarak sıralanabilir.

Sistemde kullanılan optik elemanları incelemenden önce, laser ışınının ıraksaması (genişlemesi) hakkında bilgi vermek gerekmektedir. Bir laser ışınında ıraksama, ışın

dalgalarının belli bir açı ile uzayda dağılımı bir başka deyişle genişlemesi anlamına gelmektedir. Işının ıraksaması, ışın kalitesini belirlemede göz önüne alınan değerlerden biridir.

Teoride her ışın ilerlediği yol boyunca bir miktar ıraksamaya uğramaktadır. Bu ıraksama sebebi difraksiyon etkilerinden kaynaklanır. Difraksiyon, ışık ışınlarının saydam olmayan bir objenin keskin kenarından ötürü bükülmesi ve istenmeyen doğrultulara sapması olarak tanımlanır. Difraksiyon, ışının mükemmel olarak yönlendirilmesini veya sonsuz küçük nokta boyutlarına odaklanmasını olanaksız kılmaktadır. Öte yandan difraksiyon etkisi hesaplanabilir bir değerdir. Sonuç olarak, teoride ışının yönlendirilmesi ve odak noktası, difraksiyon etkisi göz önüne alınarak tahmin edilebilmektedir.

Işının ıraksamasını formüle etmek için uzak alan ıraksaması denilen bir terim kullanılmaktadır ve ‘ Θ ’ simgesi ile belirtilmektedir. Uzak alan ıraksamasının formülü aşağıdaki gibidir.

$$\Theta = \lambda / \pi \cdot r_T \quad (3.1)$$

Θ : Uzak alan ıraksaması

λ : dalga boyu

r_T : ışının belli bir kesitindeki ışın yarıçapı

Uzak alan ışın ıraksaması ışın çapının yönlenebilme miktarını tanımlar. Işın ıraksamasını iyileştirmek için ise, denklem 3.1’den faydalanılır.

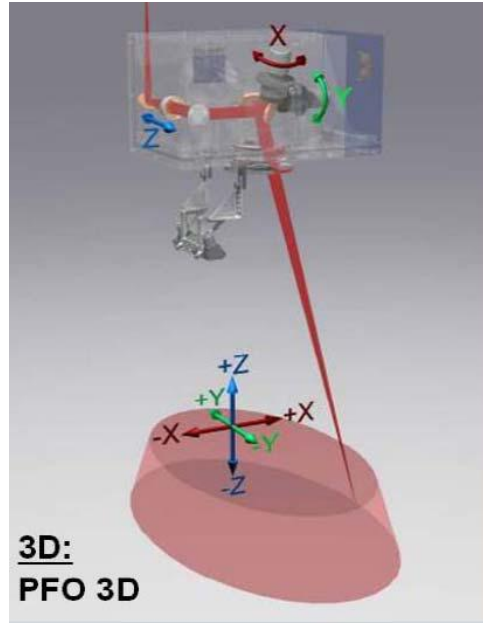
Eğer uzak alan ıraksaması Θ ve kesit ışın yarıçapı r_T olan bir yönlendirilmiş ışını ele alırsak; ışın yarıçapı arttığı takdirde, uzak alan ıraksaması azalacaktır. Bu özellikten ötürü uzaktan laser sistemlerinde laser ışın genişleticisi kullanılmaktadır. Laser ışın genişletici, ışının çapını artırarak ıraksamasını dolayısıyla uzayda yayılımını azaltır bu sayede laser ışını yansıtıcı aynalar vasıtasıyla daha emniyetli taşınabilir.

Rezonatörden çıkan laser ışını ilk olarak yansıtıcı optikler veya fiber optik kablolar yardımı ile uzaktan laser kafasına taşınmaktadır. Uzaktan laser kaynağı optik kafası konvansiyonel laser kaynak optik kafalarına göre çeşitli üstünlüklere sahiptir.

- Çalışma mesafesi daha gelişmiştir.

- Odak noktası pozisyonu yönlendirici ayna ve mercekler ile belirlenmektedir.
- Tek bir noktadan belirlenen çalışma bölgesi daha geniştir.
- Kaynak esnasında ışının iş parçasına gelme açısı sabit değildir.
- Çalışma pozisyonları arasında hareket kabiliyeti vardır[11].

Fiber optik kablolar veya mercek sistemleri ile laser kafasına gönderilen laser ışını, kafa içerisinde bulunan yansıtıcı aynalar vasıtası ile kırılır ve iş parçasına yönlendirilir.



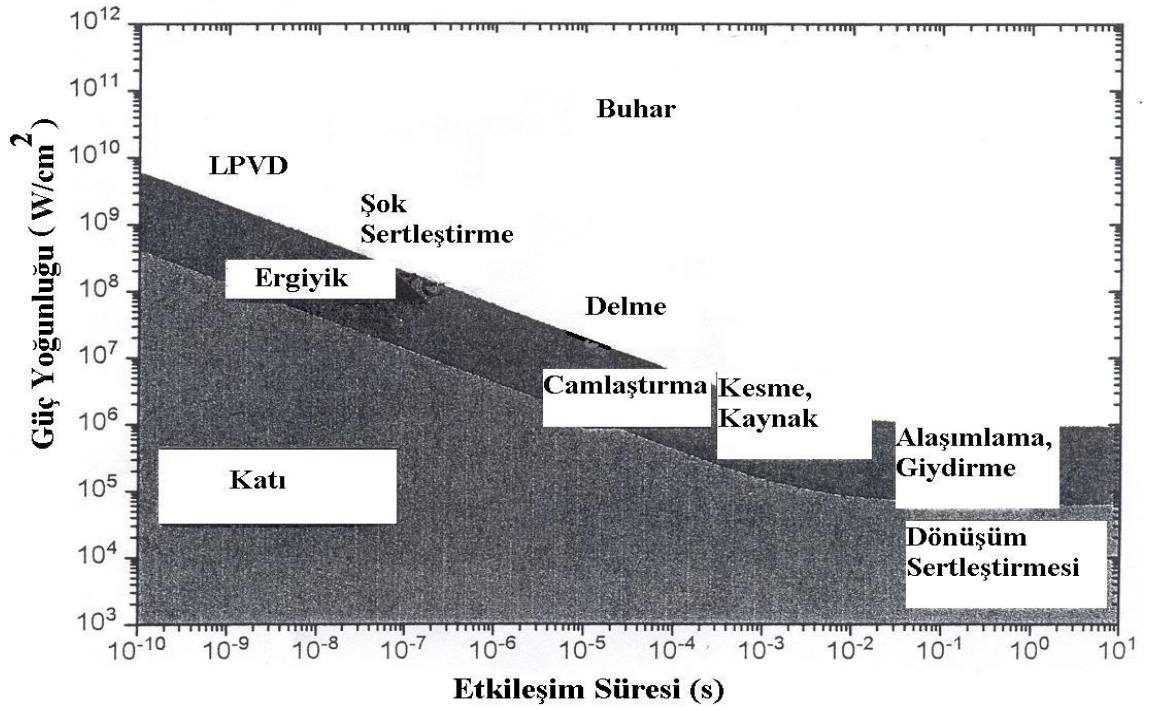
Şekil 3.5 Üç boyutlu çalışma hacmi[15]

3.3 Laser Işını ve Malzeme Etkileşimi

Laser ışını dağılmadan yol alabilme, tek renklilik ve ardışıklık gibi karakteristik özelliklere sahiptir. Odaklanma laser ışınının malzeme yüzeylerinde yüksek güç yoğunluğu üretmesine olanak sağlar.

Laser ile malzeme işlemleri genel olarak laser ışınının ısı etkisi ile gerçekleştirmektedir. Isıl etki sayesinde malzemede ısıtma, eritme ve buharlaştırma işlemleri gerçekleştirilir. Malzemeye gönderilen ışının malzeme tarafından soğurulan miktarı, ısı kaybından daha büyük olduğunda, malzemenin yüzeyindeki ısınma devam eder. Kritik güç yoğunluğu I_E (ergime için gerekli laser güç yoğunluğu) aşıldığında yüzey ergimesi ve devamında I_B (buharlaşma için gerekli laser yoğunluğu) kritik gücü

aşıldığında da, ışın gönderilen yüzeyde yoğun bir buharlaşma başlar[1]. Bu oluşumlardaki güç yoğunlukları malzemeler üzerinde farklı ısı işlemleri mümkün kılar.



Şekil 3.6 Farklı malzemeler için tipik işlem koşulları[1]

Şekil 3.6’da görüldüğü üzere, farklı güç yoğunluklarında farklı malzeme işlemleri gerçekleştirilir.

Güç yoğunluğunun artırılması, bölgesel buharlaşmaya sebep olur. Buharlaşmış malzeme ve hareketli buharın basıncı ergiyik fazı uzaklaştırarak, laser ışınının malzemeye daha çok nüfuz etmesine olanak tanır. Bu yöntem ile laser kaynak işlemi gerçekleştirilir.

Güç yoğunluğu artırılmaya devam ederse, malzemede delme işlemi gerçekleştirilir.

Malzeme içerisinde ilerleyen yüksek güç yoğunluğuna sahip laserin oluşturduğu buhar, yüksek bir kinetik enerjiye ve iyonlaştırma derecesine sahiptir.

Malzemede buharlaşma başladıktan sonra buhar kanalı oluşumu gözlenir. Buhar kanalında yoğun mavi renkte bir parlaklık görülür ve buna plazma adı verilir. Plazma, elektronların iyonizasyonu başlatacak enerji seviyelerine gelmeleri ve ivmelenmeleri ile oluşmaktadır.

Plazma oluşumu zamana ve güç yoğunluğu değerlerine bağlı olarak gerçekleşir ve yüksek güç yoğunluğunda daha kısa zaman, daha düşük güç yoğunluğunda ise daha uzun zamana ihtiyaç duyar. Artan güç yoğunluğu ve azalan işlem hızı ile plazmanın yoğunluğu artmaktadır. Böylece plazma, laser ışınını yüksek derecede soğurup, ışın şeklinde soğurduğu bu enerjiyi tekrar vermektedir.

Laser ile malzeme işlemlerinde oluşumu gözlenen plazma, laser ışınını büyük oranda soğurmaktadır ve ışının yansıma miktarını artırmaktadır. Bu sebeple malzemeye laser ışınından aktarılması gereken enerji azalmakta ve elde edilmek istenen derinlik miktarı ve ergiyen yüzey alanı daralmaktadır.

Plazma laser ışını tarafından aşılabildiğinde kararlı bir kaynak dikişi elde edilir. Plazmanın malzemedeki etkisini azaltmak amacı ile plazmanın etki bölgesine düşük reaktif derecedeki gazlar veya soygazlar gönderilir. İşlem gazı olarak argon, helyum, azot ve bunların karışımı gazlar uygulanır.

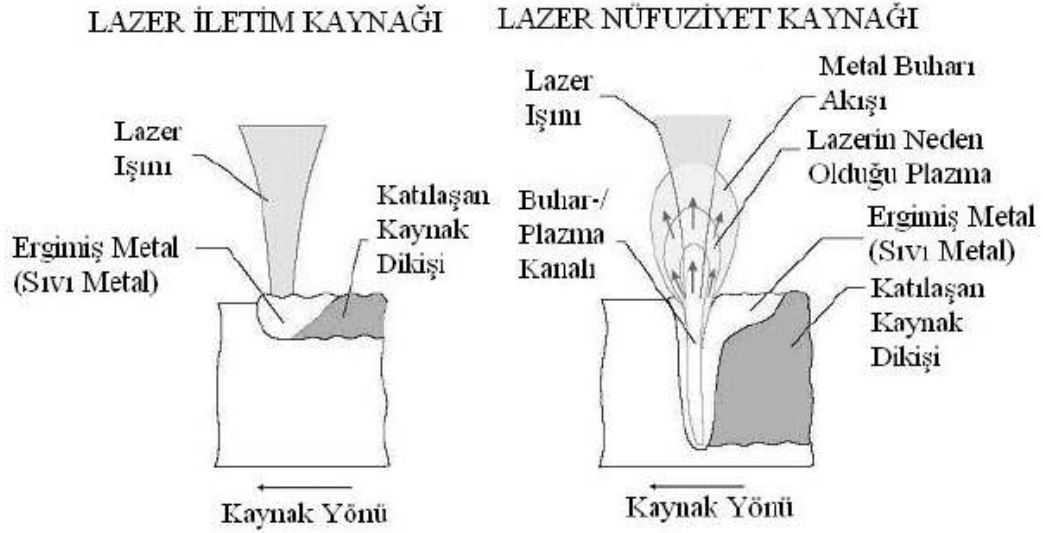
LASER IŞINI ile KAYNAK İŞLEMİ

4.1 Laser Işınının Etkisi

Laser kaynak yöntemi ergitme esaslı kaynak yöntemlerinden biridir ve konvansiyonel ergitme yöntemlerine göre ısı girdisi daha düşüktür. Kaynak konstrüksiyonundaki serbestlik daha fazla olup dar bir ITAB oluşumu gözlenir ve ITAB’ da görülen farklı doku oluşumlarının sayısı azalmaktadır.

Laser ışını ile kaynak işlemi temel olarak iki gruba ayrılmaktadır. Bunlar; **iletim kaynağı** ve **nüfuziyet kaynağı** olarak gruplandırılır. Bu iki kaynak yöntemi oluşturdukları kaynak dikişleri ve malzemeye ısı girdileri bakımından farklılıklar göstermektedir.

Düşük güç yoğunluğu ile gerçekleştirilen işlemlerde iletim kaynağı kullanılmaktadır. Bu durumda malzemedeki etkin derinlik değeri düşüktür. Daha derin kaynak dikişleri elde etmek için nüfuziyet kaynağı kullanılmaktadır. Yüksek güç yoğunluğu ile derin bir kaynak banyosu oluşmakta ve güçlü buharlaşma etkisi ile malzemeye yüksek oranda ısı girdisi sağlanmaktadır. Metal buharı, ergiyik metali bulunduğu bölgeden yan duvarlara iterek yukarıya doğru ilerlemesini sağlar ve bu durumda laser ışını malzemede daha derin noktalara ulaşır.



Şekil 4.1 Isı iletim kaynağı ve nüfuziyet kaynağı karşılaştırılması[5]

4.2 Laser İletim ve Nüfuziyet Kaynağı

4.2.1 Laser İletim Kaynağı

Laser iletim kaynağı ışının sahip olduğu enerjinin yüzeye taşınması ve yüzeyin enerji absorpsiyonu ile gerçekleşmektedir. Laser ışınının malzeme tarafından soğurulması büyük oranda laserin dalga boyuna ve malzemenin optik özelliklerine bağlıdır.

Yüzeyde oluşan ergiyik banyosunda enerji, ısı iletimi ve konveksiyon ile yayılmaktadır. İletim kaynağında darbeli kaynak ile yarı küresel şekilli bir banyo elde edilir. Eğer laser ışını yüzeyde hareketli ise, ergiyik banyo uzunlamasına büyümektedir.

İletim kaynağında nüfuziyet kaynağından farklı olarak, kaynak banyosu aralıksızdır. Laser ışını kaynak banyosunu kesmemektedir ve ergiyik banyonun içine girmediğinden daha kolay bir kaynak işlemi gerçekleşmektedir.

Isıl iletkenliği yüksek olan alüminyum ve benzeri malzemelerde enerji yayılımı için ısıl iletkenlikten faydalanılır. Nüfuziyet kaynağında görülen burgaç olayları ısı iletim kaynağında gözlenmemektedir ve yarı küresel şekilli bir kaynak bölgesi elde edilir.

Isıl iletkenliği daha düşük olan çelik ve benzeri malzemelerde ise ısı taşınımı ergiyik banyodaki burgaç olayları ile gerçekleşir. Bu sebeple kaynak bölgesi geometrisi yarı küresel şekilden farklı olmaktadır.

İletim kaynağı yöntemi, malzemede kaplama, alaşımlama veya bölgesel ergitme gibi yüzeysel işlemler için yaygın olarak kullanılmaktadır.

4.2.2 Laser Nüfuziyet Kaynağı

Laser ile gerçekleştirilmek istenen derin kaynak işlemlerinde nüfuziyet kaynak yöntemi kullanılmaktadır. Dar bir odak çapına sahip laser ışını birleştirilecek bölgeyi ergime sıcaklığının üzerine ısıtarak, erimiş metal içerisinde buharla çevrelenmiş bir ergime bölgesi oluşturur. Laser ışını, malzeme yüzeyinden daha derin noktalara, oluşan buhar kanalı aracılığı ile ulaşır. Malzeme içine ulaşan enerji yüksek olduğundan, ısı iletkenlik ısının yayılımı için daha düşük bir rol oynamaktadır. Bununla birlikte, oluşan türbülans ile laser ışınının oluşturduğu kaynak geometrisine ve kaynak dikiş genişliğine katkısı büyüktür.

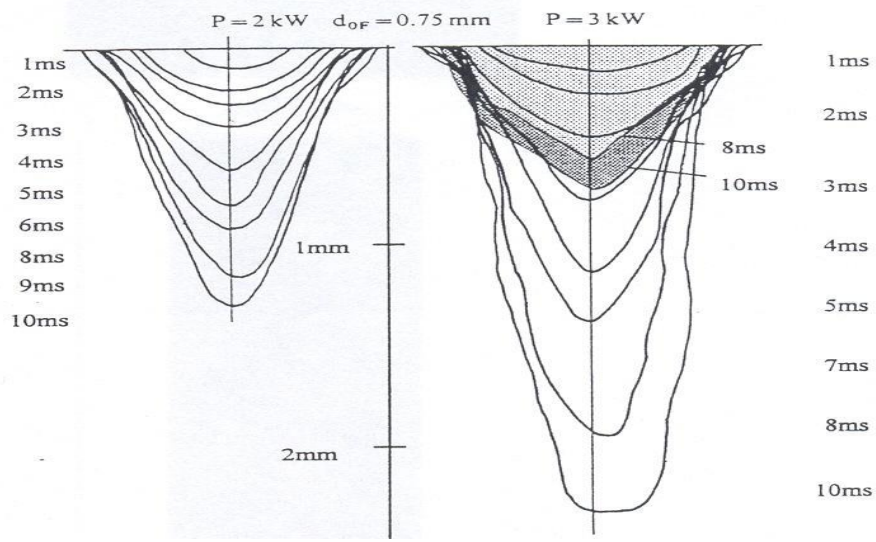
Laser nüfuziyet kaynağının farklı uygulamaları 3 başlıkta incelenebilir.

4.2.2.1 Darbeli Laser Işını ile Nokta Kaynağı

Darbeli laser ışını ile nokta kaynağı ilk olarak elektrik direnç nokta kaynağına alternatif olarak ortaya çıkmış bir nüfuziyet laser kaynak çeşididir. Elektrik direnç nokta kaynağı ile gerçekleştirilebilen kaynak işlemleri, bu laser kaynak çeşidi ile daha hızlı ve daha verimli olarak yapılabilmektedir.

Darbeli laser ışını ile nokta kaynağında, esas olarak birbiri ardına sıralanmış nokta kaynakları ile işlem yapılır. Laser ışını malzeme yüzeyine ulaşır ve ışının bir kısmı malzeme tarafından soğurulur. Soğurulan ışının enerjisi ile malzemede kaynak bölgesinde ergime başlar. İlk olarak kaynak bölgesi yarı dairesel şekilli bir biçimde görülür.

Laser ışını ile nokta kaynağında laser güç yoğunluğu ve etkileşim süresi kaynak bölgesinin şeklini ve kaynak derinliğini doğru orantılı olarak etkilemektedir. Kaynak yoğunluğu ve etkileşim sürelerinin artması ile kaynak derinliği artmaktadır ve kaynak dikiş formu yarı dairesel şeklini kaybeder. Laser güç yoğunluğunun artması, kaynak bölgesinde buhar oluşumunun ve bunu takip eden türbülans olaylarının başlamasına sebep olur. Ergiyen malzeme kaynak bölgesinden uzaklaşır ve laser ışını malzemede daha çok yol alır.



Şekil 4.2 Darbeli laser ışını ile nokta kaynağında ergiyik bölge[1]

Laser ışınının etkisinden sonra katılaşma başlar. Katılaşma kenarlardan kaynak bölgesinin içine doğru oluşmaktadır. Bu oluşumdan ötürü, katılaşma cephelerinin birleşme bölgelerinde çatlak oluşumuna dikkat etmek gereklidir[1].

4.2.2.2 Darbeli Laser Işını ile Dikiş Kaynağı

Darbeli laser ışını ile dikiş kaynağı, laser darbelerinin birbiri ardına ve üst üste malzemeye uygulanması ile oluşan bir kaynak şeklidir. Laser çıkış gücü darbe aralıklarının belirlenmesinde ve kaynak hızında etkin rol oynamaktadır. Kaynağın geometrisi ise sadece uygulanan laser gücüne bağlı olarak değişmektedir.

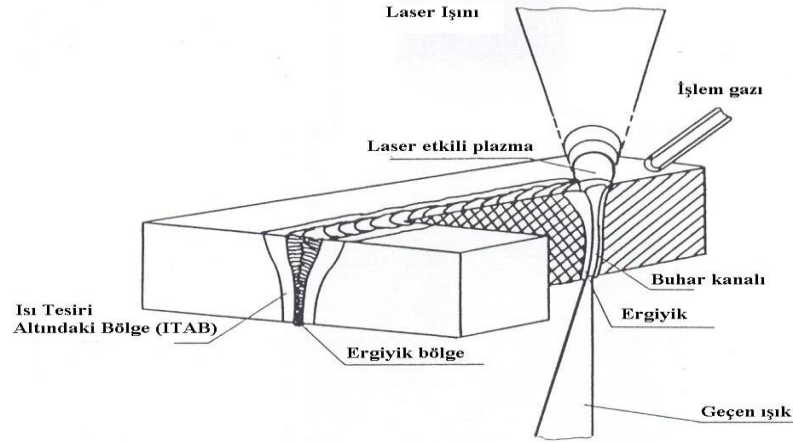
Ortalama laser gücünün artırılması ile kaynak banyosu yeterince sürekli bir ergiyik banyoya dönüşmektedir. Bu sayede ortalama bir laser gücü ile görülebilecek gözenek oluşumları engellenir. Bu durumda kaynağın geometrisi, darbe şekli ve laser gücü ile değişiklik göstermektedir.

4.2.2.3 Sürekli Laser Işını ile Kaynak

Sürekli laser ışını ile kaynakta buhar kanalı oluşumu gözlemlenir. Malzemede kaynak bölgesinde buhar kanalının oluşumu, gerekli olan kritik güç yoğunluğu I_V 'nin aşılması ile gerçekleşmektedir. Buhar kanalı oluşumu esnasında gözlemlenen plazma oluşumunun önlenmesi de kritik güç yoğunluğu I_A 'dan daha düşük yoğunlukta bir laser

güç yoğunluğu ile mümkündür. I_V ve I_A laserin dalga boyuna ve işlem gören malzemeye göre değişir.

Sürekli laser kaynağında yüksek güç yoğunluğuna sahip laserin malzemeye nüfuz etmesi sonucunda malzemedan buhar kanalı oluşumu başlar. Malzeme ergitilir ve ergiyik bölgenin ardında kalan kısım katılaşılarak malzemelerde kaynak işlemi gerçekleştirilir.



Şekil 4.3 Sürekli laser kaynağının şematik gösterimi[1]

Kaynak işlemi sırasında plazmada ortaya çıkan çekme kuvvetleri, enerji yayını ve oluşan burgaç, kaynak derinliğini etkileyerek, eş dağılımlı olmayan bir kaynak dikiş kökü oluşturmaktadır[1]. Dikiş kökünde oluşabilecek gözenek gibi süreksizlikler işlem parametrelerinin doğru seçimi ile engellenebilmektedir.

Bununla birlikte, kaynak hızı da sürekli laser kaynağında dikkat edilmesi gereken bir diğer parametredir. Kaynak hızı işlem esnasında sürekli olarak artırılmaz. Kaynak hızı sürekli olarak artırılır ise, sistem daha yüksek güç yoğunluklarına gereksinim duymaktadır, ayrıca dikiş kökünde süreksizlikler gözlenebilir.

İlave malzeme kullanımı sürekli laser kaynağında herhangi bir soruna yol açmamaktadır. Bununla birlikte, ilave malzemenin ergitilmesi ve kaynak banyosunda iyi bir karışım elde edilmesi için yeterli bir süre gerekmektedir. Bunu sağlamak için, kaynak hızını ve ilave malzemenin kaynak banyosuna eklenme hızının düşmesi gerekmektedir.

4.3 Metalik Malzemelerin Laser ile Kaynak Kabiliyeti

Kaynak kabiliyeti, genel olarak ele alınan malzemenin kaynak işlemine olan elverişliliği olarak tanımlanabilir. Eğer bir malzemenin kaynak kabiliyetinin yüksek olduğundan bahsediliyorsa, bundan anlaşılması gereken, ele alınan malzemenin seçilen kaynak yöntem ile herhangi bir önlem almadan, tasarlanan birleştirme konstrüksiyonuna uygulanabilmesidir.

Bir parçanın kaynak kabiliyeti, parçanın kaynak ediliş yöntemine, malzemesine ve kaynak konstrüksiyonuna bağlı olarak değişmektedir. Bu üç önemli etkene bağlı olarak, kaynak kabiliyetini açıklamada üç ana etkenden bahsedilir. Bunlar; malzeme yatkınlığı, oluşturulan konstrüksiyonun kaynak emniyeti ve birleştirmenin seçilen yöntem ile olabilirliği.

Kaynağa yatkınlık, ele alınan malzemenin özelliklerine bağlı olarak gelişmektedir. Burada malzemenin kimyasal bileşimi, üretim yöntemine bağlı olarak gelişen metalurjik faktörler ve malzemenin fiziksel özellikleri öne çıkmaktadır. Elbette malzemenin bu özelliklerinden bahsederken, kaynağa yatkınlığın seçilen yöntem ile de ilişkili olduğu unutulmamalıdır.

Kaynak emniyeti, ele alınan malzemenin birleştirme konstrüksiyonunda işlevini yerine getirirken, aynı zamanda kaynak dikişinin de beklenen emniyeti sağlaması olarak tanımlanabilir. Kaynak emniyetine etkileyen diğer unsurlar ise; zorlama durumları ve çeşitleri, et kalınlıkları ve kesit değişimleri, işletme koşullarındaki sıcaklıklardır.

Kaynak olanağı ifadesi ise, ele alınan malzemenin seçilen yöntem ile kaynağında, konstrüksiyonun seçilen yöntem ile olan uyumu olarak görülebilir. Kaynak olanağının ortaya çıkarılması için dikkate alınması gereken bazı faktörler vardır. Bunlar; kaynak için ön işlemler, kaynak işleminin yapılışı ve izlenecek sıra, kaynak sonu işlemler olarak sıralanır.

Kaynak kabiliyetinde bahsedilen bu ana unsurlar, ele alınan kaynak için temel unsurlardır. Bunlarla birlikte kaynağa yatkınlık, kaynak emniyeti ya da olabilirliğe etki eden başka diğer yan unsurlar da vardır.

Malzemelerin kimyasal bileşimleri, dayanımları açısından ana etkindir. Buna bağlı olarak sertleşme, yaşlanma, gevrek kırılma, sıcak çatlama eğilimi gibi oluşumların da temel etkeni kimyasal bileşimdir.

Laser ile kaynak yönteminde, proses değişkenlerinin optimizasyonu bahsedilen ısıl etkinin minimuma inmesi için büyük önem taşır. Bu değişkenler;

- Kaynak birleşme konstrüksiyonu,
- Kaynak termal çevrimi,
- Gaz akışı ve kompozisyon,
- Ön tavlama,
- Malzemeyi oluşturan alaşım kompozisyonundaki değişiklikler,
- ITAB'a etkileyen termal etkiler olarak sıralanabilir.

Laser ile kaynak işleminde malzemelerin yüksek sıcaklıkta yapılarında meydana gelen oluşumlar önemlidir. Çelik malzemelerdeki oluşumlara bakacak olursak, ergiyen bölge ve ITAB tamamen martenzitik dokudadır. Kaynak metalinden ana metale doğru gidildikçe martenzitik doku heterojen yapı göstermektedir, çünkü kaynak dikişi sınırından uzaklaşıldıkça düşen sıcaklık ile birlikte karbon yayılımı azalmakta ve karbon içeriği bölgesel farklılık göstermektedir. Buna bağlı olarak ana malzemeye geçiş bölgesinde yeniden kristalleşme, toparlanma oluşumları gözlenebilir.

Alüminyum malzemelerin laser ile kaynağında önemli bir parametre olarak laser gücü öne çıkar. Alüminyumun laser ışınını soğurma derecesi çelik ile karşılaştırıldığında çok daha düşük olduğundan kaynak işlemi için daha yüksek laser güçlerine gereksinim duymaktadır. Laser ile alüminyum kaynağı ve geleneksel yöntemler kullanılarak yapılan kaynakların ısı etkisi altındaki bölgeleri karşılaştırıldığında ise; laser ile elde edilen ITAB genişliği, geleneksel yöntemlerde gözlenen ITAB genişliğinden çok daha küçüktür.

4.4 Laser Kaynağında İşlem Parametreleri

Laser ile kaynak işleminde işlem parametreleri malzemelere göre değişkenlik göstermektedir. Malzemelerin tipi ile birlikte istenilen kaynak özelliklerini sağlamak için uygun kaynak yöntemi seçilmesi ve parametrelerin optimize edilmesi gerekmektedir.

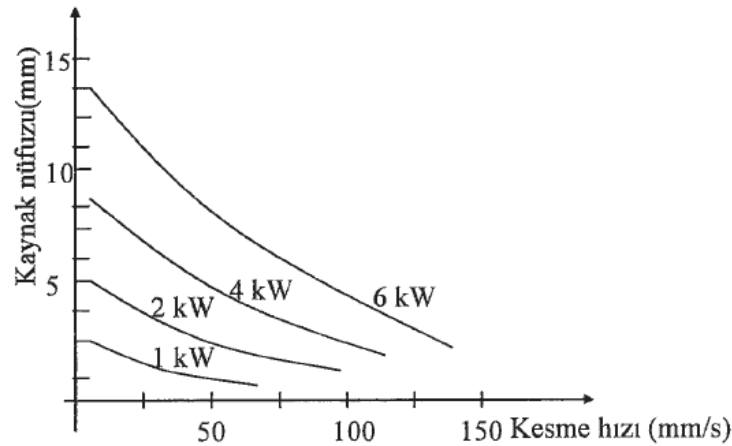
Laser kaynak işlem parametrelerini inceleyecek olursak; toplamda 5 başlık altında toplayabiliriz. Bu parametreler;

- Laser gücü
- Laser ışını odak çapı
- Odak noktası
- Kaynak hızı
- İşlemden kullanılan gaz olarak özetlenebilir.

4.4.1 Laser Gücü

Belirli bir malzeme ve istenilen kaynak nüfuziyet derinliğinin elde edilmesi için ilk olarak laser gücünün ve kaynak hızının belirlenmesi gerekmektedir. Kaynak bölgesinin sıcaklığı ne kadar yüksek isteniyorsa, kaynak hızı da o denli düşük olmalıdır. Kaynak hızı, kaynak bölgesinin geometrisi ve kaynağın kalitesi için oldukça önemlidir. İş parçalarının kalınlıkları arttıkça, kaynak hızı azalırken, laser gücü ve dolayısıyla enerji miktarı yükselmektedir.

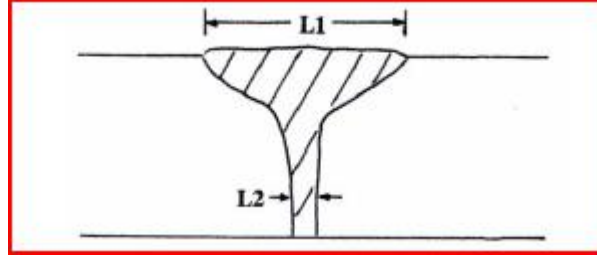
Alaşımlı çeliklerin düşük ısı iletimlerine sahip olmaları nedeniyle, alaşımsız yapı çeliklerinden daha düşük hızlarda laser kaynağı uygulanmaktadır[1].



Şekil 4.4 Kaynak hızının kaynak derinliğine etkisi[3]

Şekil 4.4'te, belirli bir paslanmaz çelik malzemesi için sabit laser gücü altında kaynak hızının kaynak derinliğine olan etkisi görülmektedir. Kaynak hızı arttıkça, kaynak derinliği azalmaktadır.

Kaynak derinliğinin yanında kaynak dikişinin genişliğide ayrıca ölçülebilir ve kaynak hızı ile arasında bağlantı kurulabilir. Genel olarak nüfuziyet kaynağında genişlik değeri, dikişin üst noktasından derine inildikçe azalmaktadır. Bu nüfuziyet türü, kaynak formunun genel görüntüsüdür.



Şekil 4.5 Kaynak dikişi formu[5]

Özellikle nüfuziyet laser kaynak uygulamalarında göz önünde bulundurulması gereken diğer bir konuda gözenekliliktir. Kaynak kalitesinin değerinin belirlenmesinde önemli bir parametre olan gözeneklilik, kaynak işlemi koşullarına bağlı olarak değişir.

4.4.2 Laser Işını Odak Çapı

Laser ışını odak çapı, laser kaynağındaki en önemli parametrelerden biridir ve ışının güç yoğunluğunu belirtmektedir.

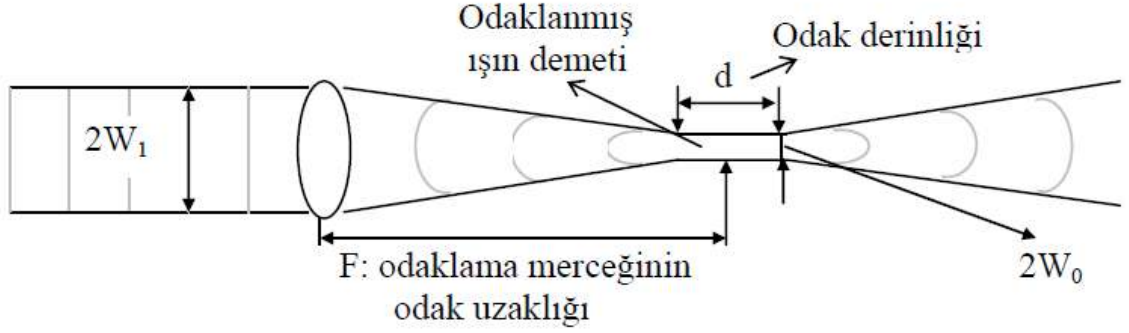
Laser ışın kesitinde sabit bir güç yoğunluğu bulunmamaktadır. Işın kesitinde güç yoğunluğu dağılımını tanımlamak amacıyla çaprazlama elektromanyetik mod (Transverse Electro-magnetic Mode: TEM) adı verilen ve birimi olmayan bir değerden yararlanır. TEM laserin yapısına ve laser etkin ortamının türüne bağlı olarak değişir. Laser ışın demetinin odaklama kalitesi TEM değerine bağlıdır.

Teoride, ideal bir laser ışınının kesitindeki güç dağılımı Gauss güç formundadır. Gerçek bir laser ışınında kesitten sapmalar meydana gelmektedir. Bu sapma değerleri, ışının kalitesini ortaya çıkarmaktadır. Işın kalitesini ölçmek amacı ile yararlanılan değer M^2 ile ifade edilir.

Burada M değeri, gerçek ışının ıraksaması ile ideal Gauss formundaki ışın arasındaki oran olarak tanımlanmaktadır.

$$M = \frac{\text{Gerçek ışın ıraksaması}}{\text{İdeal Gauss ışın ıraksaması}} = \frac{\Theta \text{ Gerçek Işın}}{\Theta \text{ Gauss Işını}} \quad (4.1)$$

TEM 0,0 , $M^2 = 1$ olan ışın demeti ideal bir ışın demetidir ve çok küçük bir odak çapında odaklanarak en yüksek güç yoğunluğunu sağlamaktadır.



Şekil 4.6 $2W_1$ demet çapındaki TEM₀₀ modlu laser ışınının odaklanması[22]

Şekil 4.6’ da görülen $2W_1$ demet çapındaki bir ışının merceğe çarpan yarıçapı ile merceğin odak uzaklığında oluşan odak çapının yarıçapı arasındaki ilişki formül 4.2’ de belirtilmiştir.

$$W_0 = \frac{\lambda f}{\pi W_1} \quad (4.2)$$

W_0 : Merceğin odak uzaklığında meydana gelen odak çapı,

λ : Işın demetinin dalga boyu,

f: Odaklama merceğinin odak uzaklığı,

W_1 : Merceğe çarpan laser ışın demetinin yarıçapı.

Formül 4.2, teorik olarak muhtemel odak çapını hesaplamak amacı ile kullanılmaktadır. Ancak pratikte daha yaygın olan hesaplama yöntemi M^2 değeri kullanılarak yapılan hesaplama ve M^2 değeri, ışının odaklanabilirliğini temsil etmektedir.

$$d_{min} = \frac{4f\lambda M^2}{\pi D} \quad (4.3)$$

d_{min} : Odaklanan laser ışınının odak çapı,

M^2 : Laser ışın demetinin odaklanabilirliği,

f: Odaklama merceğinin odak uzaklığı

λ : Dalga boyu

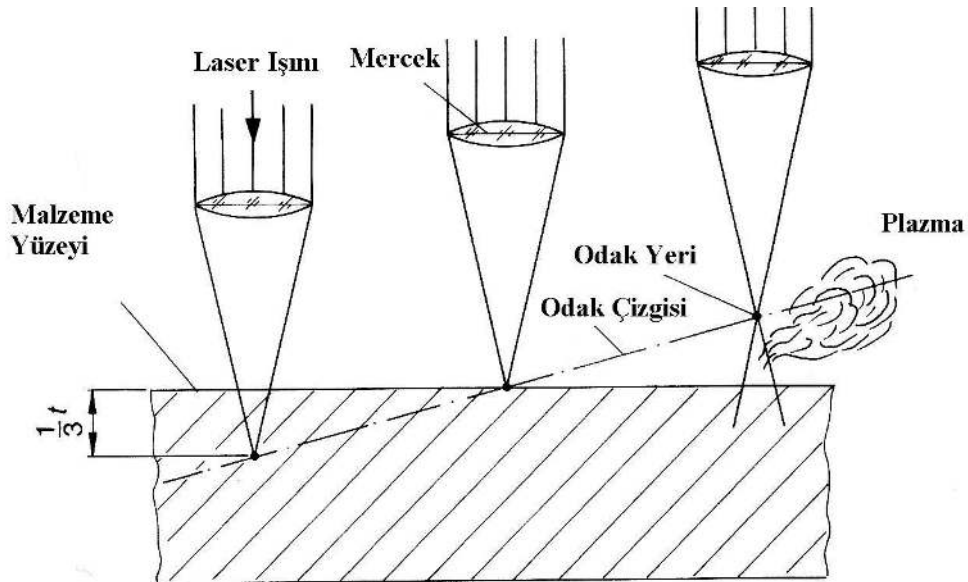
D: Odaklanan laser ışınının demet çapı.

4.4.3 Odak Noktası

Laser ile kaynakta, ışının mercekler yardımı ile odaklanması gerekmektedir. Kaynak işlemi son odaklama merceğinin odak noktasında yapılmaktadır. Odaklandırılmış ışın demetinin çapı çok küçüktür. Mercek ile iş parçası arası mesafe arttıkça ışının malzeme üzerindeki izdüşüm çapı artar. Buna bağlı olarak kaynak bölgesi genişler ancak kaynak derinliği azalır.

Nüfuziyet kaynağında odak noktası malzeme kalınlığının $1/3$ 'ü kadar bir yerde bulunmalıdır[1]. Odak noktası malzeme içerisine doğru ilerledikçe nüfuziyet değeri artmaktadır. İşlemden odak noktası seçimi, kaynak dikişinin formunu doğrudan etkilemektedir. Laser ışınının malzeme içerisinde odaklandığı birleştirmelerde plazma etkisine dikkat etmek gerekir.

Odaklaması yanlış yapılmış bir laser ışını, malzemenin buharlaşmasına neden olabilir. Buharlaşma ile birlikte ortamda plazma oluşumu gözlenir. Plazma istenilen laser gücünün iş parçasına ulaşmasını engellediğinden kontrol altında tutulması gerekmektedir. Plazma oluşumunu sınırlandırmak için iş parçası ile odaklama merceği arasındaki uzaklık değiştirilerek plazma alevi elde edilir. Bu yöntem yalnızca düşük laser gücü ile işlem yapıldığında geçerlidir.



Şekil 4.7 Odak yerine bağlı plazmanın oluşumu[1]

Odak noktası belirlenmesine ek olarak odaksal düzlemin kaynak edilecek birleştirmeye bağlı pozisyonu da dikkat edilmesi gereken diğer bir konudur. Farklı kalınlıklardaki bileşenlerin kaynak işlemi esnasında, metalurjik özellikler bakımından laser ışınının profilini taşımak avantaj sağlamaktadır. Alın altına birleştirmelerde farklı kalınlıktaki parçalardan kalın iş parçasına laser ışın profilini ötelemek fayda sağlamaktadır. Bu yöntem ile kalınlığı az olan parçada tahribat olmadan birleşme bölgesinde tam nüfuziyet elde edilebilmektedir. Kalınlık parametresi dışında farklı ısı iletim katsayılarına sahip parçaların laser kaynağında da kullanılabilen bir yöntemdir.

4.4.4 Kaynak Hızı

Kaynak hızı, laser kaynağı uygulanacak malzemelere ve istenilen kaynak derinliği değerine göre belirlenmektedir. Kaynak hızı, kaynak dikişinin şekline ve kaynak kalitesine önemli oranda etki yapan parametrelerden biridir.

Kaynak hızı arttıkça, kaynak banyosuna aktarılan ısı miktarı azalmaktadır. Buna bağlı olarak, kaynak derinliği azalacak ve soğuma hızı artacaktır. Derin kaynak dikişleri için laser kaynağına etkiyen diğer parametreler sabit tutulursa, düşük kaynak hızına ihtiyaç duyulmaktadır. Derin kaynak istenilmeyen durumlarda, kaynak hızı artırılarak istenilen derinlik değerlerine ulaşılır.

Kaynak hızı, kaynak derinliği ile birlikte ITAB’ da görülen farklı dokuların oluşumuna da etki etmektedir. Yüksek kaynak hızlarında, soğuma hızının artmasından ötürü kırılğan faz oluşumları azalmaktadır[19].

4.4.5 İşlemde Kullanılan Gaz

Laser kaynağında işlem gazının iki önemli rolü vardır. Bunlardan ilki, derin kaynak sırasında görülen plazma oluşumunu kaynak bölgesinde uzaklaştırmak, ikinci olarak kaynak metalini koruyarak oksitlenmesini engellemektir. Kaynak metalinde oluşan oksitlenme, laser ışınını yüksek oranda tutar ve kaynak bölgesinde renk değişimine sebep olur.

Laser kaynağı esnasında ortaya çıkan plazma, laser ışınının yutulmasına ve etrafa saçılmasına böylece iş parçasına uygulanan güç yoğunluğunun azalmasına yol açmaktadır. Güç yoğunluğu azalması, ışın demetinin nüfuziyet derinliğinin azalmasına

ve sonuç olarak kaynak şeklinin bozulmasına neden olur. Bunu önlemek için laser gücü artırılabilir ancak bu da iş parçasında deformasyona yol açarak işlem veriminin azalmasına neden olur.

Koruyucu gaz kullanmak kaynak yüzeyinde meydana gelen plazmanın uzaklaştırılmasına ve ışın demetinin enerjisini iş parçasına aktarmasına olanak sağlar.

Koruyucu gaz olarak genelde Argon ve Helyum kullanılmaktadır. Azot gazı da Helyum'un birçok özelliğine sahiptir ve genellikle kullanılan bir gazdır ve Helyum'a göre daha ucuzdur. Bununla birlikte kaynak dikiş yüzeyini bir miktar bozar.

Helyum gazı, işlem esnasında oluşan plazmanın kaynak bölgesinden uzaklaştırılmasında en etkili gaz türüdür. Diğer koruyucu gazların plazma ile etkileşimi esnasında iyonlaşması ve plazma gazını besleme olasılığı, Helyum gazına göre çok daha yüksektir.

Laser ile kaynak işleminde koruyucu gazların kaynak bölgesine uygulanması laser kafası ile eş merkezli gaz besleyicileri ile yapılabilir. Bu yöntemden farklı olarak, laser kafası yanında yer alan özel bir düzenek ile de işlem gazı kaynak bölgesine taşınabilir.

LASER KAYNAĞI AVANTAJLARI ve DİĞER KAYNAK YÖNTEMLERİ ile KARŞILAŞTIRMA

5.1 Avantajları

Laser ışını ile kaynak yöntemi, konvansiyonel kaynak yöntemleri ile karşılaştırıldığında birçok üstün özelliklere sahiptir. Yöntemin getirdiği avantajların ana sebebi, laser ışınının sahip olduğu yüksek enerji ve güçlü ısı kaynağıdır. Laser kaynağında, ışının sahip olduğu yüksek enerjiye rağmen düşük bir ısı girdisi söz konusudur ve buna bağlı olarak dar bir ITAB oluşumu gözlemlenmektedir.

Laser kaynağının konvansiyonel yöntemlere olan üstünlükleri aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Laser ışını ile kaynakta parçalar düşük ısı girdisi ile birleştirilir. Bunun sonucu olarak termal gerilme değerleri düşüktür ve distorsiyonlar azalmaktadır.
- Laser kaynağı otomasyon sistemleri ile uyumlu olarak çalışmaktadır. Robotik sistemler ile birlikte kullanılan laser kaynak yöntemi ile yüksek kaynak hızlarına ulaşılır ve üretime esneklik kazandırır.
- İş parçalarında laser kaynağı sayesinde yapısal dayanımdan ödün vermeden, tasarımda iyileştirmeler ve hafifletme çalışmaları yapılabilmektedir. Konvansiyonel yöntemler ile kaynak edilemeyen bağlantılar, robotik sistemler ile birlikte kullanılan laser sistemleriyle mümkün olmaktadır.
- Katı hal laserlerinde, laser ışını fiber kablolar ile taşındığından, üretim hattında birden çok istasyonda laser ışını ile kaynak işlemi yapılabilmektedir.

- Işının odaklanması amacı ile kullanılan optik sistemler, kaynak dikişlerinin şekil ve oryantasyonlarında serbestlik sağlamaktadır.
- Laser kaynağı ile farklı kalınlıklara sahip malzemeler birleştirilebilir ve derin bir kaynak nüfuziyeti elde edilebilmektedir.

5.2 Diğer Kaynak Yöntemleri ile Karşılaştırma

Laser ışını ile kaynak yöntemi, diğer kaynak yöntemleri ile karşılaştırıldığında, kaynağın uygulanışı, malzemede görülen oluşumlar ve ilave malzeme gereksinimleri konularında çeşitli farklılıklar göstermektedir. Bununla birlikte, tüm kaynak yöntemlerinden aşağıdaki özellikler beklenir.

- Yüksek yapısal dayanım,
- Kullanılan malzemede tasarruf,
- İyi bir gerilim dağılımı,
- Hızlı ve güvenilir bir kaynak işlemi.

Kaynak yöntemleri genel itibarı ile ergitme esaslı ve katı hal kaynak yöntemleri olarak ikiye ayrılır. Laser ışını ile kaynak yöntemi de ergitme esaslı kaynak yöntemleri arasında yer alır. Yöntemler arasındaki farklılıkları belirlemek amacı ile çeşitli ergitme esaslı kaynak yöntemlerini incelemek gerekir.

5.2.1 Koruyucu Gaz Ortamında Yapılan Ergitme Esaslı Kaynak Yöntemleri

Birleştirme, birleştirilecek parçaların, ilave malzemeli veya ilave malzeme olmadan ergitme yöntemi ile kaynak edilmesi olarak özetlenebilir. Kaynak işlemi sonrasında cüruf oluşumu gözlemlenmez ve koruyucu gaz ortamında kaynak yapıldığından kaliteli bir kaynak dikişi elde edilir. Koruyucu gaz ortamında yapılan kaynak yöntemleri elektrodun, koruyucu gazın ve arkın türüne göre sınıflandırılmaktadır.

5.2.1.1 MIG/MAG Kaynağı

Metal Inert Gaz (MIG) veya Metal Aktif Gaz (MAG) kaynak yöntemlerinde iş parçası ile kaynak torcu arasında bir ark oluşturularak birleştirme işlemi gerçekleştirilir. MIG kaynak yönteminde koruyucu gaz olarak soygaz (Argon, Helyum) kullanılmaktadır. MAG kaynak yönteminde ise CO₂ aktif koruyucu gaz olarak kullanılır.

Ergiyen elektrod olarak çıplak bir metal tel kullanılmaktadır ve oluşan ark, koruyucu gaz ile korunur. Kullanılan tel bir makaradan torç içerisine sürekli ve otomatik olarak beslenmektedir. Koruyucu gaz ve çıplak tel elektrod, kaynak banyosunda cüruf örtüsünün oluşmamasını sağlar, kaynak işleminden sonra cüruf temizlenmesine ihtiyaç duyulmaz.

MIG/MAG kaynak yöntemleri ile alaşımlı ve alaşımsız çelikler, alüminyum, bakır ve nikel alaşımlarının kaynağı mümkündür.

5.2.1.2 TIG(WIG)

Tungsten Inert Gaz (TIG) veya Wolfram Inert Gaz (WIG) kaynak yöntemi ergimeyen elektrod ile iş parçası arasında bir ark oluşturularak koruyucu gaz ortamında gerçekleştirilen bir kaynak yöntemidir. Arkın korunması amacı ile soygaz kullanılmaktadır.

Yöntemde doğru akım veya alternatif akım kullanılır. Doğru akım ile düşük ve yüksek alaşımlı çelikler kaynak edilebilmektedir. Alüminyumun kaynağında ise işlem esnasında oluşan oksit tabakasını ortadan kaldırmak için alternatif akım kullanılır. İlave metal gereken durumlarda, çubuk veya tel halinde kaynak banyosuna ayrıca beslenmektedir.

TIG kaynağı ile yapılan birleştirmelerde yüksek kalitede kaynak dikişleri elde edilir ve cüruf oluşmadığından kaynaktan sonra ek işleme gereksinimi yoktur. Ancak, ergiyen elektrodla yapılan kaynak yöntemlerine göre daha yavaş ve daha pahalıdır.

5.2.1.3 Plazma Kaynak Yöntemi

TIG kaynağının özel bir şekli olan kaynak yöntemidir. İş parçası ile elektrod arasında plazma oluşturularak kaynak işlemi gerçekleştirilir.

Tungsten elektrod, yüksek hıza sahip bir soygaz demeti ile birlikte yoğun sıcak bir ark demeti oluşturur. Yöntemde bakır bir ağızlık kullanılır ve bu ağızlık elektrod ile birlikte koruyucu gazın oluşturduğu ark demetinin çapını düşürerek, plazma arkının sıcaklığını yükseltir. Plazma arkının iş parçası üzerine odaklanmasını sağlar. Bu özelliği sayesinde birleştirmede anahtar deliği formuna ulaşır.

Dezavantajları olarak, yüksek ekipman maliyeti ve diğer kaynak yöntemlerine göre daha büyük torç gereksinimi olarak özetlenebilir.

5.2.2 Elektron Işın Kaynağı

Elektron ışın kaynağı, koruyucu gaz ortamında değil vakum ortamında yapılan ergitme esaslı bir kaynak yöntemidir. Yöntemde kullanılan ekipmanlar, elektron ışın üreteç sistemi ve vakum odasından meydana gelmektedir.

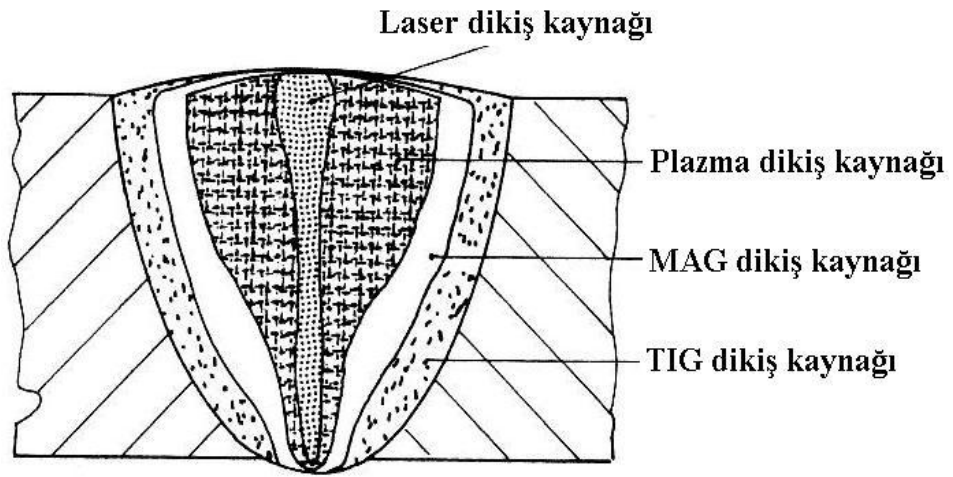
Kaynak için gereken ısıнын, parça yüzeyine yüksek hassasiyette odaklanmış ve yönlenmiş yüksek yoğunlukta elektron demeti ile sağlandığı bir ergitme kaynak çeşididir. Yüksek yoğunlukta ışına sahip olmasından ötürü kaynakta derin bir nüfuziyet gözlenebilir. Bununla birlikte, dar bir ITAB, düşük distorsiyonlar, yüksek kaynak hızları ve yüksek kalitede dikişlerde yöntemin diğer üstünlükleri olarak sıralanabilir.

Elektron ışın ve laser kaynak yöntemleri temelde ışın teknolojisini kullanmalarına rağmen çeşitli farklılıklar göstermektedir. Bu farklılıklar şu şekilde sıralanabilir;

- Elektron ışın kaynağı vakum ortamında gerçekleştirilir. Laser kaynağı ise koruyucu gaz ortamında atmosferde kaynak olanağı sağlar.
- Laser ışınları, optik mercek ve aynalarla odaklanabilir ve yönlenebilir.
- Laser kaynağı, elektron ışın kaynağının sağladığı derin nüfuziyet değerlerini sağlayamaz. Elektron ışın kaynağı için derinlik/genişlik oranı 50/1, laser kaynağı için ise bu değer 10/1 olarak belirtilir[1].

5.2.3 Kaynak Yöntemlerine Göre Dikiş Şekilleri

Kaynaklı bağlantılarda, bağlantının dayanımı dikiş şekli ile ilişkilidir. Dikiş şekli kaynak yöntemine göre farklılık gösterir. Farklı kaynak yöntemleri ile farklı şekil ve derinlik değerlerinde kaynak dikişleri elde edilir. Buna ek olarak, kaynak pozisyonu, işlem esnasında kullanılan koruyucu gaz ve kaynak yönü de dikişe etkiyen diğer faktörlerdir.



Şekil 5.1 Kaynak yöntemlerine göre dikiş şekillerinin karşılaştırılması[1]

BÖLÜM 6

UZAKTAN LASER KAYNAĞI ve OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDEKİ KULLANIMI

6.1 Uzaktan Laser Kaynağının Geliştirilmesi ve Prensibi

6.1.1 Uzaktan Laser Kaynağı Geliştirilmesi

Otomotiv endüstrisinin ilk laser uygulamaları laser kesim yöntemi ile 1970’li yılların sonlarında başlamış olup, 30 yılı aşkın bir geçmişe sahiptir. İlk uygulamalarda, laser kesim yöntemi test amaçlı parçalarda ve çok sınırlı oranda kullanılmaktaydı. Laser kaynağının ilk olarak büyük üretim hacimlerinde kullanılışı, farklı şekil ve kalınlıklara sahip sac parçaların birleştirilmesinde ortaya çıkmıştır. Bu parçalara alın altına kaynak edildikten sonra, tek bir kalıp ile şekil vermek mümkün olmuştur. 2000 yılında, araç karoserilerinde kullanılan nokta direnç kaynağına alternatif olarak laser kaynağı kullanılmaya başlanmış, tavan saclarının ve bagaj kapağı gibi parçaların birleştirilmesinde etkin olarak kullanılmıştır.

Nokta direnç kaynağı araç gövdelerinin birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılan bir birleştirme yöntemidir. Bu yöntemin tercih edilme sebepleri, ucuz bir yöntem olması ve parçalar elektrodla ile tutturulduğundan ilave bir sabitleme ekipmanına ihtiyaç duyulmamasıdır.

Ancak nokta direnç kaynak yöntemi çeşitli sınırlamalara da sahiptir. Bunlar;

- Yeterli yapısal dayanımı sağlamak amacı ile çok noktada kaynak edilebilme zorunluluğu,

- Tek taraflı kaynak işlemine olanak tanımaması ve bunun sonucu olarak parça tasarımında sınırlamalar getirmesi,
- Nokta kaynağı için flanşların belirli bir kalınlıkta olması dolayısıyla ağırlık azaltma çalışmalarına bir engel oluşturması olarak özetlenebilir.

Aksine, laser kaynağının araç gövdelerinde kullanılması çeşitli avantajlar getirmektedir. Bunlar;

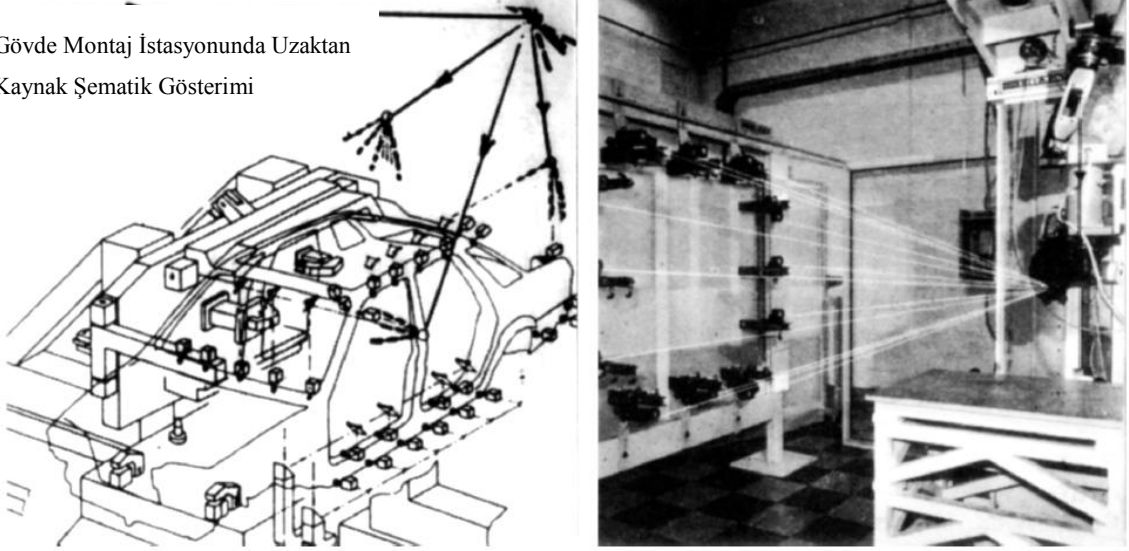
- Sürekli bir kaynak işlemine olanak sağlaması,
- Tek bir yönden kaynak işleminin yapılabilmesi,
- Flanş kalınlıklarının minimuma indirilmesidir.

Bu sebeplerden ötürü, laser kaynağı özellikle Avrupa'da birçok motor üreticisi tarafından benimsenmiştir.

Ancak, laser kaynağı için gerekli olan teçhizat geleneksel nokta kaynağına göre daha pahalıdır ve bu durum araç başına maliyeti etkilemektedir. Bu sebeple, otomotiv endüstrisinde karşılaşılan en büyük sorunlardan birisi de var olan sistemlere yeni teknolojileri entegre etmek ve aynı zamanda maliyetleri düşürmektedir.

Laser ışını ile kaynak yönteminin otomotiv endüstrisinde kullanımını artırmak amacı ile kaynak noktaları arasındaki çevrim zamanlarını minimuma indiren çalışmalar yapılmıştır. 1980'li yılların sonlarına doğru Fransız Sciaky firması tarafından deneysel amaçlı geliştirilen bir sistem uzaktan laser kaynağının başlangıcı olarak düşünülebilir[10]. Laser türü olarak CO₂ laseri kullanılmıştır ve laser ışını iki adet ayna ile kontrol edilmiştir. Bu sistem ile kaynak çevrim süreleri kayda değer oranda azalmıştır.

Gövde Montaj İstasyonunda Uzaktan
Kaynak Şematik Gösterimi



Şekil 6.1 Sciaky uzaktan laser kaynağının resmi[10]

Uzaktan laser kaynağının bu ilk uygulamaları mevcut üretim sistemlerine entegre edilebilen denemeler değillerdir. Bunun sebebi ise, o dönemde kullanılan CO₂ laserlerindeki ışın kalitesinin günümüzde kullanılan laser türleri kadar yüksek olmaması ve ışın kaynaklarında seçim olanağının sınırlı olması olarak özetlenebilir. Sistemde farklı kaynak pozisyonları için çok sayıda mercek kullanılmış, bu da maliyet ve kaynak pozisyonlarında sınırlama gibi çeşitli problemler oluşturmuştur.

2000 yılına gelindiğinde, CO₂ laserleri üzerine yapılan çalışmalar sonucu, farklı çıkış güçlerinde daha iyi odaklanabilme kapasitesi artırılmıştır. Bu çalışmaların yanında, laserekipmanları üzerine yapılan çalışmalar ile YAG ve diğer katı hal laser sistemleri ortaya çıkmış ve uzaktan kaynak yöntemi kullanışlı bir uygulama haline gelmiştir.

6.1.2 Uzaktan Laser Kaynak Prensibi

Laserin kaynak işlemi dışında beklediği her an maliyeti yükseltici bir etki yapmaktadır. Laser kaynağında, ışının parça üzerindeki zamanını maksimize etmek amacı ile çalışmalar yapılmış ve farklı sistemler denenmiştir. Bu çalışmalar sonucunda uzaktan laser kaynağı ortaya çıkmış ve endüstride verimli, hızlı ve kaliteli ürünlerin imal edilmesine olanak sağlamıştır.

Uzaktan laser kaynağı veya diğer bir deyişle tarayıcı kaynak yöntemi, yüksek enerji yoğunluğuna sahip laser ışınının optik sistemler yardımıyla uzun bir odak mesafesinde

iş parçalarının birleştirilmesinde kullanılan bir kaynak teknolojisi olarak tanımlanır. Işının hızlı ve kesintisiz olarak yönlendirilmesi ve uzak mesafelerden iş parçalarına odaklanabilmesi sayesinde, uzaktan laser kaynağı özellikle otomotiv endüstrisinde yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır.

Uzaktan laser kaynağını konvansiyonel laser kaynağından ayıran en önemli özelliği, optik aynalar ile ışının uzak mesafelere yönlendirilmesi ve odaklanabilmesidir. Özellikle laser türlerinde yapılan çalışmalar, laserlerin kalitesini ve verimini artırmış ve uzaktan laser kaynağına zemin hazırlamıştır. Konvansiyonel laser kaynağına olan üstünlüklerini sıralayacak olursak;

- Kaynak noktaları arasında harcanan değer katmayan zamanda azalma,
- Programlanabilir kaynak dikiş şekilleri,
- Parça sabitlemek için kullanılan fikstürlerin bağlantı noktalarında azalma,
- İş parçası üzerinde daha büyük bir alanda çalışma olanağı.

Uzaktan laser kaynağı, tarayıcı sisteme sahip olması sayesinde araç kapıları gibi parçaları birkaç saniye içerisinde birleştirebilmektedir. Robot kolu tarayıcı sistemini iş parçası üzerinde yaklaşık yarım metre mesafede düzgün bir işlem yolunda hareket ettirebilmektedir. Oldukça hızlı olan tarayıcı aynalar ise odak noktasını kaynak bölgeleri arasında değiştirebilme kapasitesine sahiptir.

Programlanabilen odak noktası, tarayıcı sistemde bulunan iki ayna ile kaynak işlemi tatbik edilecek parça için pozisyonlandırılmaktadır. Ayrıca sistemde bulunan bir mercekte odak noktasının Z eksenini boyunca hareketini sağlamaktadır.

Uzaktan laser kaynağı sistemindeki gelişmelere paralel olarak birçok farklı alanda çalışmalar yapılmıştır. Sistemin gereksinimleri, tarayıcı üniteler ve optik sistemler üzerinde yapılan çalışmalar ve yaygın olarak kullanıldığı otomotiv endüstrisine uzaktan laser kaynağının etkileri gerçekleştirilen çalışmaların merkezini oluşturmaktadır.

Hatwig vd.[9] yaptıkları çalışmada, uzaktan laser kaynak ve kesme işlemlerinde laser ışınının izleyeceği yolun otomatik olarak hesaplamasını sağlayan bir program üzerinde çalışmışlardır. Bu yöntem ile kaynak ve kesme bölgelerinde manuel olarak yapılan

işlemlere göre sisteme daha fazla esneklik kazandırmışlar ve otomatik laser yolu programlaması ile işlem verimini %30'a kadar artırmışlardır.

Çalışmayı 5 ana başlığa ayırmak mümkündür. İlk olarak işlem başlamadan önce, sisteme tarayıcı ve robot sistemlerinin çalışma alanları tanıtılır. Tarayıcı; laser ışınının kesin ve hızlı hareketini sağlarken, iş parçası üzerindeki konumunu ise robot sistemi belirlemektedir. Bu aşamada her bir alt başlık (görev) için tarayıcı ve iş parçası arasındaki mesafe belirtilir.

Uzaktan kaynak ve kesme işlemlerinde bu değerler değiştiğinden her birinin belirtilmesi önemlidir.

İkinci olarak, alt başlıkların sırasını düzenlemek gerekir. Başlıklar arası geçişlerde robot hareketlerini minimize edecek bir düzenleme yapılır. Böylece robot kolunun sürekli olarak yukarı ya da aşağı hareketlerine ihtiyaç duyulmaz.

Sonraki adım ise, robot hareketlerini hesaplamak ve böylece işlem zamanlarını azaltmaktır. Eğim açılarından faydalanarak, robotun iş parçası üzerindeki hareketleri daha kısa ve daha rahat gerçekleşir. Bu sayede, tarayıcı sisteme hem her bir alt başlık ile ilgili çalışma için gerekli zaman sağlanır hem de tarayıcı laser ışınını bir sonraki kaynak dikiş ya da kesim noktasına yönlendirebilme olanağı sağlar. Sonuç olarak; laser ışınının kullanılmadığı proses zamanı minimuma indirilir.

Robot hareketi hesaplanması beraberinde tarayıcı hareketinin de hesaplanmasına imkân sağlar. Yaptıkları çalışmada, robot ve tarayıcı hareketlerinin elle kontrol edilmesi mümkün olmadığından ve sistemin sorunsuz bir şekilde çalışması için hareketleri oluşturan çevrimdışı bir program gereksinimine vurgu yapmaktadırlar.

Kim vd.[8] çalışmalarında disk laseri kullanarak uzaktan laser kaynak sistemini incelemişlerdir. Robot kolu ile birlikte kullanılan uzaktan kaynak sisteminde, kaynak parametrelerine bağlı olarak dikiş şekli, penetrasyon derinliği, odak çapı gibi değerleri ortaya çıkarmışlardır. Bununla birlikte ışının iş parçasına geliş açısı da ayrıca incelenmiştir.

Gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada iki farklı laser türünden yararlanmışlardır. Bunlardan ilki, 4 kW gücünde disk laseri ve diğeri ise 4,4 kW gücünde diyot beslemeli Nd:YAG laseridir. Laser sistemlerinin özellikleri Çizelge 6.1' de belirtilmiştir.

Çizelge 6.1 Kim vd. çalışmalarında kullandıkları laser sistemi özellikleri

	<i>Nd:YAG Laser Sistemi</i>	<i>Disk Laser Sistemi</i>
Laser Işın Membaı	Nd:YAG Çubuk	Yb:YAG Disk
Maksimum Çıkış Gücü	4,4 kW	4,0 kW
Işın Kalitesi	12 mm x mrad	8 mm x mrad
Işın Taşınımında Kullanılan Fiber Kablo Çapı	300 µm	200µm
Maksimum Güç Tüketimi	56 kW	21 kW
Odak Mesafesi	250 mm	220 mm, 560 mm

Uygulamalarda 6 eksenli bir robot sisteminden yararlanılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan iş parçalarından biri, gemi inşaatında kullanılan A kalite çelik malzemedir. Buna ek olarak, 1 mm kalınlığındaki soğuk haddelenmiş çelik sac parçalar bindirme kaynağı ile birleştirilmiştir.

Deneyde disk laserinin ışın özelliklerini belirleme amacı ile ışının çapı ölçülmüştür. Bu deneyde kullanılan laser kafaları sırasıyla 220 mm ve 560 mm’lik bir odaklama mesafesine sahiptir. Işının çapı optik sisteme göre değişmektedir. 220 mm odak mesafesine sahip olan laser kafası 0,256 mm büyüklüğünde bir ışın çapına, 560 mm odak mesafesine sahip olan ise 0,538 mm olarak ölçülmüştür.

Yapılan ölçümlerde odak noktasının kaynak yüzeyinden içeride olduğu durumlar negatif değerler olarak belirtilmiştir. 12 farklı odak noktasında yapılan ölçümlerde sonuçlar elde edilmiştir. Buna göre, 4 mm olan odak mesafesi anahtar deliği tipi derin kaynak işlemi için, 6 mm olan odak mesafesi ise iletim kaynağı için uygun görülmüştür. Yüzey kalitesine baktığımızda ise, 6 mm olan mesafe daha iyi sonuç vermektedir.

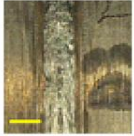
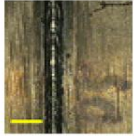
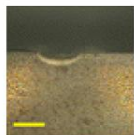
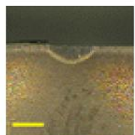
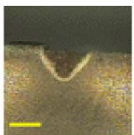
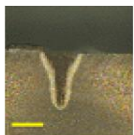
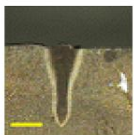
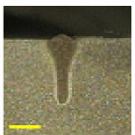
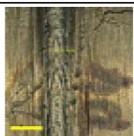
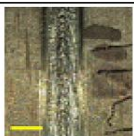
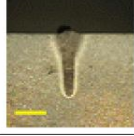
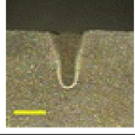
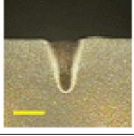
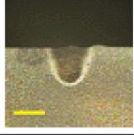
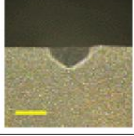
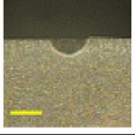
Her iki laser türü için penetrasyon karakteristiklerini ölçme amacı ile laser gücü 1 ve 4 kW arasında değişen değerler ve 0,5’ ten 4 metre/dakika hıza kadar kaynak hızları değerlendirilmiştir.

İncelemeler sonucu disk laserin Nd:YAG laserine göre daha derin bir penetrasyona sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi, disk laserinin ışın kalitesinin daha üstün olması ve disk laserin optik sisteminde odak mesafesinin daha kısa olmasıdır.

Bir diğerk incelemede ise, 1mm kalınlığındaki sacların bindirme kaynağında, 560 mm odaklama mesafesine sahip disk laseri kullanılmış ve odak noktası plaka üst yzeyine sabitlenmiştir. Bu koşullar altında; tam bir penetrasyon 5,5 metre/dakika kaynak hızı ile sağlanmıştır, bunun yanında 6 metre/dakika kaynak hızında tam bir penetrasyona ulaşılamamıştır.

Odak noktası aralığını belirleme amacı, 560 mm odak mesafesine sahip 4 kW gúcündeki disk laserinden faydalanılmış ve kaynak hızı 5 metre/dakika olarak belirlenmiştir. Yapılan incelemelerde, -2 mm ve +1 mm aralığındaki odak mesafe aralığı tam bir kaynak penetrasyonu için uygun aralık olarak belirlenmiştir. Bu aralığın dışında kalan değerler, tam bir penetrasyon için uygun değildir.

Laser ışınının iş parçasına geliş açısı da deney kapsamında incelenmiştir. Buna göre 560 mm odak mesafesine sahip 4 kW laser gúcünde ve 5,5 metre/dakika kaynak hızı ile yapılan deneyde, tam bir kaynak derinliği sağlamak amacı ile sabit laser ışını açısı 20° den daha küçük olmalıdır. 25° den büyük olan açılarda derinlik değerleri tutarsızlık göstermektedir. Buna göre çalışma alanının yarıçap değeri 254,8 mm olarak ölçölmüştür.

	-10mm	-8mm	-6mm	-4mm	-2mm	-1mm
Bead surface						
Cross-section						
	0mm	1mm	2mm	4mm	6mm	8mm
Bead surface						
Cross-section						

şekil 6.2 Farklı odak noktalarında kaynak dikişleri (laser gúcü: 4 kW ; kaynak hızı: 4 metre/dakika; odak mesafesi 220 mm)

Yaptıkları deneylerde elde ettikleri verilere göre aşağıdaki sonuçlara ulaşmışlardır;

- Disk laserlerinin mükemmel bir ışın kalitesine sahip oldukları onaylanmıştır ve odak pozisyonunun ışın özellikleri gözlemlenmiştir.
- Kaynak hızı ve kaynak gücüne bağlı olarak yapılan karşılaştırmada, disk laserinin daha iyi kaynak derinliği sağladığı görülmüştür.
- 560 mm odak mesafesine sahip disk laseri ile 1mm kalınlığındaki parçalar 5,5 metre/dakika kaynak hızı ile kaynak edilebilmektedir.
- Deneyde görülmüştür ki, 1 mm kalınlığında çelik sac parçaların birleştirilmesinde, 4kW değerinde laser gücü ve 5 metre/dakika kaynak hızı parametreleri sabit tutularak, tam bir derinlik sağlamak için iş parçasındaki çalışma alanının yarıçap değeri minimum 64,9 mm ve maksimum değeri 254,8 mm olmalıdır.

Mori vd.[10] Nissan firmasında uzaktan laser kaynağı yöntemini kullanarak gerçekleştirdikleri araç gövde uygulamalarından örnekler vermişler ve sistemin nasıl çalıştığını anlatmışlardır.

Çalışmalarında ilk olarak genel anlamda, robot sistemi ile uzaktan kaynak işlemini özetlemişlerdir. Konuyu 3 ana başlık altında incelemişlerdir: robot ve tarayıcı ünite, laser ışınından etkilenen bölge ve robot hareketi ve tarayıcı programlama.

Laser ışınının etki ettiği bölge parçaların birleştirilmesinde önem kazanmaktadır. Çalışmada laserden etkilenen bölgeyi X , Y , Z doğrultularında belli değerler ile göstermişlerdir.

Çalışmalarında laser ışını altındaki bölgeyi etkileyen çeşitli faktörleri saptamışlardır. Bunlar;

1) İş parçasının geometrik yapısı: Eğer iş parçası karmaşık şekilli ise, robot hareketleri daha fazla önem kazanır ve 3 boyutta da hareket etmesi beklenir.

2) Optik faktörler: Kullanılan aynalar ve aynaların salınım açıları ışın kalitesini etkiler.

3) Laser ışınının yatayda yaptığı açı: Laser ışınının iş parçasına geliş açısı kaynak bölgesinin boyutlarını etkilemektedir. Açı azaldıkça, Z ile ifade edilen derinlik azalır ve X ve/veya Y değerleri artış gösterir.

Son olarak, robot ve tarayıcı ünitenin birbirlerine göre hareketi ve robot kolunun izleyeceği yolun hesaplanmasının işlemin kesintisiz bir şekilde gerçekleştirilmesi için zorunlu olduğundan bahsetmişlerdir.

Mori vd. çalışmalarında uygulama örneği olarak bagaj kapağı parçasının araç gövdesine monte edilmesinde kullanılan uzaktan laser kaynak işlemini incelemişlerdir. Daha önce nokta kaynağı ile gerçekleştirilen kaynak konstrüksiyonu korunmuş ve uzaktan laser kaynağında da kullanılmıştır. Toplamda 32 noktada gerçekleştirilen kaynak işlemi 22,4 saniyede tamamlanmış ve bu değer nokta kaynağında geçen sürenin 3'te biri kadar bir süreye karşılık gelmektedir.

Kaynak işleminin kontrolü için eş zamanlı kontrol sistemi (*in-line monitoring system*) adını verdikleri bir sistemden faydalanmışlardır. Bu sistemde iş parçası üzerine gelen laser ışınının parlaklık derecesi sürekli olarak gözlemlenmektedir ve sistem gerekli gördüğü durumlarda laser ışınının gücünü ve tarayıcı içerisindeki aynaların konumunu yönlendirmektedir. Laser ışın kontrolü galvanize sac parçalarda görülebilen porozite ve kaynak dikiş kesitinde eksik birleşme oluşumunun önüne geçmek için kullanılır.

Sonuç olarak, yapılan çalışma göstermiştir ki uzaktan laser kaynağı ile üç boyutta yapılacak işlemlerde laser ışınının parlaklık derecesi ve robot ve tarayıcının izleyecekleri yol dikkate alınmalıdır. Kaliteli bir kaynak işlemi için, laser parametreleri eş zamanlı kontrol sistemi ile sürekli olarak gözlemlenmelidir.

Akihiko[11] çalışmasında uzaktan laser kaynak kafasının özelliklerinden bahsetmiş, tarayıcı ünite optik elemanlarının görevlerini sıralamış ve deneysel çalışma amacı ile tasarlanan uzaktan laser kaynak kafası ile yapılan incelemeleri özetlemiştir.

Yazarında içinde bulunduğu çalışma grubu, araştırma ve geliştirme çalışmaları kapsamında ALIMS adını verdikleri bir uzaktan laser kaynak kafası geliştirmişlerdir. Kullanılan laser ışın kaynağı 2 kW gücündeki fiber laserdir. Bu çalışma için belirlenen değerler çizelge 6.2' de belirtilmiştir.

Fiber optik kablolar ile taşınan katı hal laserinden tam olarak faydalanmak amacı ile bir robot koluna monte edilebilen küçültülmüş bir laser kafası (10 kg'dan daha az) geliştirilmiştir. Bu amaçla, tek bir yansıtıcı ayna kullanılmıştır. Geniş bir alanda kaynak araştırması yapma amacı ile nokta kaynak boyutları odaklayıcı mercek ile basitçe değişebilmekte, bu da odaklanmış laser ışın enerjisini değiştirebilme imkânı sağlamaktadır.

Çizelge 6.2 Akihiko'nun yapmış olduğu çalışmada kullanılan laser parametreleri

Çalışılabilir Alan	200 mm X 200 mm
Odak Mesafesi	400 - 450 mm
Laser Işın Açısı	$\pm 15^\circ$
Tekrarlanan Pozisyonlama Hassasiyeti	± 0.1 mm veya daha az
Maksimum Pozisyonlama Hızı	0,15 mm veya daha az
Işın Odak Çapı Boyutu	Değişken

Laser ışını fiber optik kablolar ile laser kafasına taşındıktan sonra ilk olarak kolimatör mercekten geçer ve sonrasında yansıtıcı bir ayna tarafından 90° kırılır. Bu yansıtıcı ayna 2 renkli ayna olarak adlandırılır ve yalnızca ışığın belli frekanslarını geçirmektedir. Aynadan geçen ışınlar ayna arkasında bulunan bir kamera ve sensörden oluşan sistem ile kontrol edilmektedir.

Laser ışını yansıtıcı ayna tarafından 90° kırıldıktan sonra, uzun bir odaklama derinliği (600mm) boyunca ilerleyeceği mercek ünitesine gönderilir. Bu mercek sürekli olarak kontrol edilir ve kullanılan lineer bir motor, merceğin ileri ve geri hareketleri hızlıca gerçekleştirmesini sağlar. Bu sistem sayesinde odak noktası dikey yönde hareket edebilmektedir.

Bu mercekten geçtikten sonra, laser ışını tarayıcı üniteye ilerler ve tek bir yansıtıcı ayna tarafından iş parçasına yönlendirilir. Odak noktası optik eksen etrafında dönebilen ve kontrol edilen bir tarayıcı ünite tarafından xy yönünde hareket eder ve iç taraftaki yansıtıcı ayna optik eksene dik olan bir eksen etrafına dönebilir ve kontrol edilir.

Yansıtıcı aynanın dönel hareketi odak noktası formunu küresel bir forma getirir. Bunun sonucu olarak, yansıtıcı aynanın dönel hareketi ve ileri-geri yönlendirilmesi ile mercekler senkronize olur ve odak noktasının xyz eksenlerinde belirlenmiş hızda hareketine imkân sağlar.

Higuchi[12] çalışmasında uzaktan laser kaynağı sisteminin Amerikan otomotiv endüstrisindeki gelişimini detaylandırmış ve gelecek dönemlerde yapılacak çalışmalar ile ilgili bilgiler vermiştir.

Higuchi uzaktan kaynak sisteminin gelişimini üç bölümde incelemiştir: Birinci nesil sistem geliştirmesi, ikinci nesil sistem geliştirmesi ve sistemin mevcut durumu. Buna göre birinci nesil sistem gelişimine baktığımızda, saatte 80 adet otomobil kapısını kaynak yöntemi ile birleştirmek ve üretmek amacıyla bir uzaktan laser sisteminin geliştirildiği görülmektedir. Otomobil kapıları, bir dizi farklı malzemenin üst üste getirilmesi ile üretilir ve kaynak kalınlıkları birçok bölgede farklılık gösterir. Üzerinde çalışılan konstrüksiyon toplamda 3 adet preslenmiş parçadan oluşmaktadır: Bir adet kapı iç paneli (galvanize sac parça) ve iki adet güçlendirme elemanı(kaplamasız). **Sistem 32 sn içerisinde 56 adet kaynak noktasında** birleştirme yapabilme kapasitesine sahiptir. Bu kaynak işlemi için 600 mm X 1200 mm X 400 mm ölçülerinde bir çalışma alanına ihtiyaç vardır.

Uzaktan laser kaynağının kullanımı yaygınlaştıkça, endüstrinin bu birleştirme yöntemine olan ilgisi de artmaktadır. Yapılan ikinci nesil çalışmalarda, saatte 400 adet parçanın üretiminde kullanılmak üzere bir sistem geliştirilmiştir. Bu çalışmada üretilecek olan parça, araçlarda kullanılan yolcu koltuklarının ana gövde parçalarının birleştirilmesidir ve bu işlemde her bir parçada 8 farklı noktada birleştirme yapılmaktadır.

Bu büyüklükte bir üretim hacmi için, 5 kW gücünde CO₂ laseri seçilmiştir. Buna ek olarak, sistemin gereksinimleri karşılayabilecek kapasitede bir tarayıcı ünite seçimi de yapılmıştır. Toplamda 3 adet parça uzaktan laser kaynağı ile birleştirilecektir ve her biri 2 mm kalınlığındadır. Bu da bindirme kaynağında 4 mm büyüklüğünde bir kalınlık etmektedir. Sistemde koruyucu gaz olarak helyum gaz kullanılmıştır. Üretilecek parçanın bir örneği Şekil 6.3' te gösterilmiştir.



Şekil 6.3 Araç koltuk gövde yapısı

Son olarak endüstrideki mevcut durum incelenmiştir ve yapılan çalışmaya göre özellikle yeni nesil fiber ve disk laserlerin kullanımı ile birlikte, uzaktan kaynak sistemi endüstrideki kullanımını artırmaktadır. Bunlara ek olarak tarayıcı ünite optik elemanlarında yapılan çalışmalar, laser verimini artırmaya yönelik çalışmalar içerisinde yer almaktadır.

Uzaktan laser kaynağı özellikle otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanıldığından, sistemin endüstriye adapte edilmesinde karşılaşılan önemli bir sorunda çinko buharlaşması ve kaynağa etkisidir. Kaynak esnasında görülen çinko buharı kaynak metaline doğru ilerler ve kaynak dikişinde gözeneklere yol açar. Bunun sonucunda dayanım açısından düşük ve kalitesiz kaynaklı bağlantılar oluşmaktadır.

Konu ile ilgili yapılan çalışmalar çinkonun buharlaşmasını azaltma veya önleme amaçlı ve oluşan buharın ortamdaki uzaklaştırılmasına yönelik olarak yapılan çalışmalardır.

OCANA vd.[14] çalışmalarında otomotivde kullanılan ince galvanize sacların uzaktan laser kaynağı ile birleştirilmesini ele almışlardır. Kaynak parametrelerinin kaynak dikişine ve formuna olan etkisi incelenmiştir ve parametreleri optimize etmek amacı ile bir dizi deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir.

Deneyde kullanılan laser tipi CO₂ laseridir. Kullanılan laser cihazının güç kapasitesi maksimum 3,5 kW'tır. Farklı kalınlıklara sahip malzemeler bindirme kaynağı ile birleştirilmektedir. Her iki parçada da 10 µm kalınlığında çinko kaplama bulunmaktadır ve parçalar 20 mm uzunluğunda kaynak dikişleri ile birleştirilmiştir.

İşlem için kullanılan malzeme çifti, otomotiv endüstrisinde kullanılan çinko ile kaplanmış galvanize çeliklerdir. Malzemelerin standart isimleri; ZStE 260 Z ve St 05 Z olarak belirtilmiştir ve kimyasal kompozisyonları Çizelge 6.3' te görülebilir.

Çizelge 6.3 ZStE 260 Z ve St 05 Z malzemelerinin kimyasal kompozisyonları

	C [%]	Mn [%]	Si [%]	S [%]	P [%]	Al [%]
ZStE 26 Z	2	55	84	8	70	37
St 05 Z	1	13	5	10	16	28

Malzeme çiftlerinde ZStE 260 Z malzemesinin kalınlığı St 05 Z malzemesine göre daha fazladır ve deneysel çalışmalar esnasında laser ışını ilk olarak ZStE 260 Z malzemesine etki etmektedir. Ayrıca koruyucu gaz olarak helyum, argon ve oksijen gazları kullanılmıştır.

Çizelge 6.4 OCANA vd. çalışmasında kullanılan malzeme çiftleri ve kalınlıkları

Malzeme Çifti	Üst Parça	Alt Parça
A	ZStE 260 Z 2.0 mm	St 05 Z 0.9 mm
B	ZStE 260 Z 2.0 mm	St 05 Z 0.9 mm
C	ZStE 260 Z 2.0 mm	St 05 Z 0.9 mm
D	ZStE 260 Z 2.0 mm	St 05 Z 0.9 mm

OCANA vd. çalışmalarında aşağıdaki sonuçlara ulaşmışlardır.

a) Odak noktasının etkisi

Tek bir malzeme çifti kullanılarak farklı odak noktalarında yapılan uzaktan laser kaynağı ile işlemlerde, kaynak bölgesinin şekli ve kalitesi değişmektedir. Odak noktası malzeme yüzeyinden 25 mm ve daha üstünde olduğunda istenilen kaynak derinliği ve anahtar şekli oluşmamaktadır. 15 ile 25 mm aralığında kaynak derinliği istenilen değerdedir ancak kaynak şekli anahtar deliği formundan ziyade mum alevi şeklindedir. 8 ile 15 mm aralığındaki odak noktasında ise, kaynak kalitesi oldukça iyidir ve istenilen kaynak derinliği gözlenmiş ve anahtar deliği formu oluşmuştur. Daha kısa mesafelerde ise, kaynak formu gittikçe kötüleşmekte ve malzeme içerisindeki odak noktasında ise ergiyen kaynak metali malzeme yüzeyine doğru ilerlemektedir. Tüm bu çalışma belli bir malzeme çifti için uygulanmış ve laser gücü 3,5 kW olarak belirlenmiş ve kaynak hızı 30mm/sn olarak sabitlenmiştir. Koruyucu gaz olarak helyum gazı kullanılmıştır.

b) Kaynak bölgesi genişliği

Yapılan incelemelerde kaynak hızının kaynak genişliği ile olan ilişkisi belirtilmiş ve grafikler ile açıklanmıştır. Özetle, kaynak hızı arttıkça, kaynak genişliği düşmektedir.

c) Kaynak derinliği analizi

Kaynak hızının derinliğe etkisi grafik ile açıklanmıştır. Belli bir kaynak hızına kadar istenilen derinlik korunmakta ancak sonrasında plazma oluşumunun etkisi görülmekte ve derinlik giderek azalmaktadır.

d) Laser gücünün kaynak kalitesine etkisi

Optimum laser parametreleri ile iyi bir kaynak kalitesi elde etmek için, aynı malzeme çifti ile birden çok birleştirme yapılmış ve sonuçlar açıklanmıştır. Buna göre; sabit laser gücünde kaynak hızının artırılması belirli bir noktaya kadar iyi kaynak kalitesini garanti eder. Kaynak hızı artmaya devam ettikçe kaynak kalitesi düşmektedir.

e) Farklı koruyucu gazlar ile uygulamaların karşılıklı analizi

Koruyucu gaz olarak kullanılan helyum, argon ve oksijen gazları ile yapılan uygulamalar, özel kamera sistemi ile deney boyunca gözetlenmiştir. İşlem sonunda oluşan kaynak bölgelerinin içyapı incelemeleri yapılmıştır. Bunlara göre helyum ile yapılan uzaktan laser kaynak işlemi baz alınarak, argon gazı özellikle buharlaşan

Çinkonun kaynak metali içerisinde kalmasına yol açmış ve gözenekli bir yapı oluşmuştur. Oksijen ise uzaktan laser kaynağında çinko buharlaşmasının etkisini engellemesinden ötürü helyum gazına alternatif olarak kullanılabilecek bir koruyucu gaz olarak öne çıkmaktadır.

Bu sonuçlar göstermektedir ki, kalınlığı toplamda 5 mm olan galvanize saclar, CO₂ laseri kullanılarak uzaktan laser kaynağı ile birleştirilebilir. Galvanize sacların birleştirilmesinde açığa çıkan çinko buharını kontrol etmek amacı ile helyum gazı iyi bir koruyucu gaz olarak öne çıkmaktadır. Oksijen gazı da helyum gazına alternatif olarak düşünülebilir.

Gu ve Shulkin[18] çalışmalarında bindirme kaynağı ile uzaktan laser kaynağı kullanılarak birleştirilen çinko kaplamalı sac parçaları incelemişler ve çalışmalarında çinko buharlaşma sorununu çözmek için tepe etkisi (*humping effect*) adını verdikleri bir teknikten yararlanmışlardır.

Çalışmaya göre çinko kaplanmış sac parçaların uzaktan laser kaynağı kullanılarak gerçekleştirilen bindirme kaynağında mutlaka parçalar arasında bir boşluk olması gerekmektedir. Bu boşluk değeri kaplamaya ve birleştirilecek parçaların kalınlığına bağlı olmakla birlikte 0,1 ile 0,2 mm arasında değişen bir değer olarak belirtilmiştir. Tepe etkisi (*humping effect*) uzaktan laser kaynağı ile birleştirilen çinko kaplamalı sac parçaların bindirme kaynağında, çinko buharının tahliyesi için gereken boşluğu oluşturmakta kullanılır.

Bu yöntemin kullanılmasında bazı sınırlamalar mevcuttur. Bu sınırlamalardan ilki, birleştirilecek parçalar fikstürler tarafından belli bir kenetleme kuvveti altında bulunduklarından, gereken boşluk miktarını sağlamak zahmetli ve maliyetli bir işlemdir. Bununla birlikte tepe etkisinden faydalanmak için, kaynak işlemine ek olarak bir işlem daha yapmak zorunluluğu vardır.

Genel olarak, kaynak işlemlerinde birleştirilecek yüzeylerin temiz ve pürüzsüz olması istenen özelliklerdir ancak çinko kaplamalı sac parçaların uzaktan kaynağında yüzeyde oluşturulan tepeler kaynak kalitesi için önemlidir.

Tepe etkisi yönteminin kaynak işlemine entegre etmek için ek bir işleme ihtiyaç vardır. Parçaları birleştirmeden önce, alt parçanın yüzeyine laser ışını etki ettirilir ve yüzeyde tepelikler oluşması sağlanır. Sonrasında birleştirilecek parçalar fikstürler yardımı ile st

üste bindirilir ve kaynak işlemi yapılır. Şekil 6.4'te yöntemin uygulanışı şematik olarak görülmektedir.

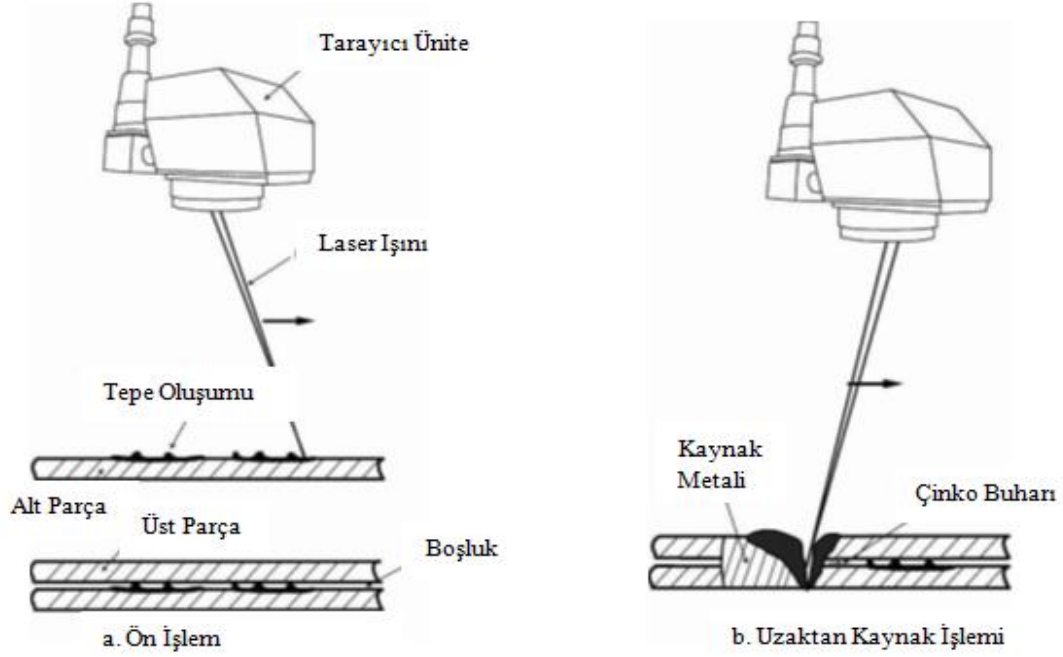
Gu ve Shulkin deneysel çalışmada disk laseri kullanarak iki adet galvanize sac parçayı bindirme kaynağı ile birleştirmişlerdir. Kullanılan parametreler Çizelge 6.5'te görülebilir.

İlk olarak kaynak öncesi yapılan işlemde, iş parçasının yüzeyinde meydana gelen tepelerin yükseklikleri ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışma ile oluşan tepelerin ortalama yüksekliklerini kontrol etmek mümkün olmaktadır.

Çizelge 6.5 Gu ve Shulkin çalışmasında kullanılan işlem parametreleri

Laser Türü	Disk Laseri (1030 nm)
Laser Maksimum Çıkış Gücü	4 kW
Işın Kalitesi	8 mm x mrad
Fiber Kablo Çapı	200 µm
Işın Odak Çapı	600 µm
Malzeme Kalınlığı	1,4-2,0 mm

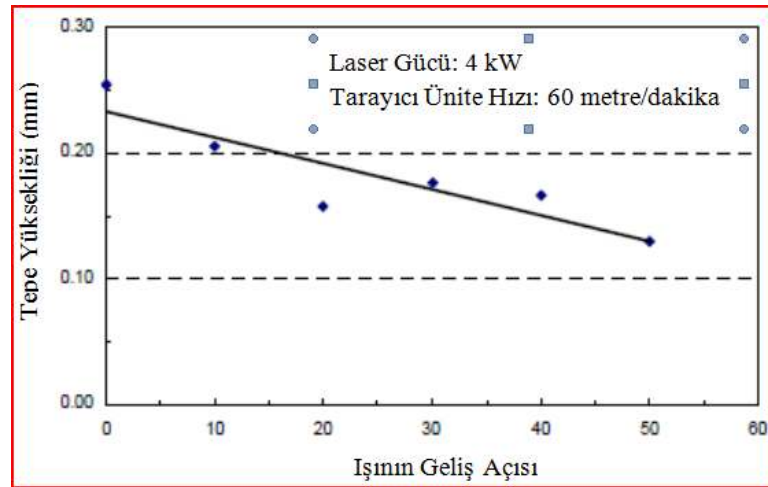
Yapılan incelemede farklı laser güçlerinde oluşan tepelerin yükseklikleri belirlenmiştir. Buna göre; 4 kW laser gücü, malzeme üst yüzeyine odaklanan laser ışını ile uzaktan kaynakta, 20 metre/dakika kaynak hızında tepe etkisi görülmektedir. Oluşan tepelerin yükseklikleri 0,5 mm den fazladır. Tarayıcı ünitenin hızı arttıkça tepelerin yükseklikleri azalmaktadır. Maksimum hızda ise, malzeme yüzeyinde tepe oluşumu gözlemlenmemektedir.



Şekil 6.4 Tepe etkisi (Humping Effect) şematik gösterimi (a.önişlem, b.uzaktan kaynak işlemi[18])

Laser gücü 3,5 kW olursa malzeme yüzeyinde tepe oluşumu 30 metre/dakika kaynak hızında gözlemlenmiştir. Bu verilere göre, laser gücünün artması ile birlikte tepe oluşumu için gereken kaynak hızı azalmaktadır.

Tepe oluşumunu etkileyen bir başka özellik ise, ışının iş parçasına geliş açısıdır. Gu ve Shulkin incelemelerinde yüzeye 90° ile gelen ışının açı değerlerini değiştirerek sabit kaynak hızında oluşan tepelerin ortalama yüksekliklerini ölçmüşlerdir. Laser ışının açısı değiştiğinde, tepelerin yüksekliklerini kayda değer bir değişim gözlemlenmemiştir.



Şekil 6.5 Tepe yüksekliği ile ışın geliş açısı arası ilişki[18]

Daha öncede belirtildiği üzere, galvanize sacların uzaktan laser kaynağı ile birleştirmesinde çinko buharının tahliyesi için 0,1-0,2 mm arası bir boşluk olması gerekir. Bu deneyde kullanılan 4 kW gücündeki disk laseri ve 60 – 80 metre/dakika hızdaki tarayıcı ünite ile istenilen tepe yüksekliklerine ulaşılabilir. Boşluk değeri elde etmek amacı ile kurulan diğer laser sistemlerinde işlem parametreleri farklılık gösterebilir.

6.1.3 Uzaktan Laser Kaynağında Sistem Gereksinimleri

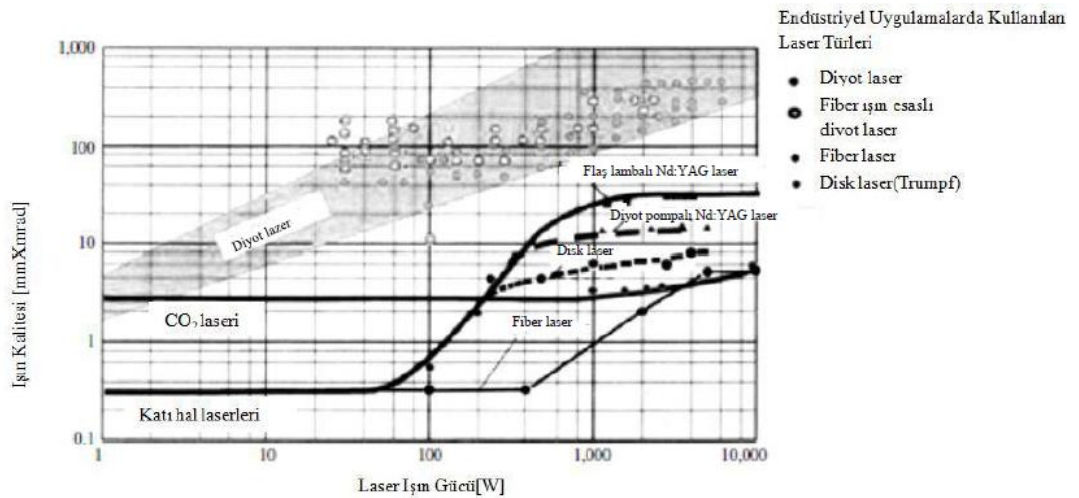
Uzaktan laser kaynağında sistem gereksinimleri üç kategoriye ayrılır:

- Uzun bir odak mesafesi için yeterli kalitede bir laser ışın türü,
- Kaynak işlemi için belirlenmesi gereken proses parametreleri,
- Işının taşınımı için gereken tarayıcı optik elemanlar.

6.1.3.1 Laser Işın Türü

Metal parçaların kaynağında yüksek enerjiye sahip laser ışını uzun bir odak mesafesi ile (genellikle 500-2000mm) metal parçaları kaynak edeceğinden, laser ışın üretici kilowatt düzeyinde bir güç çıkışına ve yüksek ışın kalitesine sahip olmalıdır.

Şekil 6.6 laser gücü ve laser ışını elde etmek için laser ışın kaynakları arasındaki ilişkiyi göstermektedir ve dikey eksendeki ışın parametresinin değeri küçüldükçe, dar bir alanda uzun odaklama mesafesine kaynak edebilme kabiliyeti artmaktadır.



Şekil 6.6 Farklı laser türlerinde ışın kalitesi[11]

CO₂ laserleri düşük güçten yüksek güce kadar yüksek enerji yoğunluğuna sahip ışın üretebilmektedir, YAG ve diğer katı hal laserleri düşük güç bölgesinde daha yüksek bir enerji yoğunluğuna sahip ışın oluşturabilmektedir ancak ışın kalitesi güç arttıkça azalmakta, bu sebeple odak mesafesi kilowatt düzeyinde bir güç için sorun oluşturmaktadır. Bu nedenle, ilk laser ışın kaynakları (1990'lı yılların sonunda) CO₂ laserleri ile sınırlandırılmıştır. Teknolojideki son gelişmeler ve katı hal laserlerindeki iyileştirmeler ile fiber ve disk laserlerini, laserlerin gücünü artırmak ve uzaktan laser kaynağında laser ışın kaynakları olarak kullanmak mümkün olmaktadır.

6.1.3.2 Uzaktan Laser Kafası ve Tarayıcı Ünite

Geleneksel laser kaynak sistemlerinde laser ışınını veya iş parçasını yönlendirmek amacı ile bir robot ve kartezyen koordinat sistemi kullanılırken, uzaktan laser kaynağında laser ışınını odaklamak ve yönlendirmek amacıyla optik ve tarayıcı ayna sistemleri kullanılmaktadır. Tarayıcı sistem kullanılması özellikle kaynak noktaları arasında harcanan zamanın azaltılmasında oldukça önemlidir. Sonuç olarak geleneksel laser kaynağından çok daha kısa sürede daha iyi birleştirmeler elde edilebilmektedir[15].

Tarayıcı sistemlerin başlangıcı, üretimde verimi artırma amacı ile yapılan çalışmalar sonucunda geliştirilmiştir. Birden çok istasyonda gerçekleştirilen birleştirmeleri, tek bir istasyonda toplamak amacı ile geliştirilen tarayıcı üniteler, endüstride kullanılmaya başlanmalarından itibaren gelişen, laser sistemleri ile birlikte kendini yenilemiştir.

İlk uygulamalar CO₂ laserleri ile başlamıştır. 1 kW ve 2kW gücündeki CO₂ laserleri küçük kaynak bağlantıları için kullanılmaktaydı ve buna örnek olarak otomotivde klima parçalarında görülmektedir. Uzaktan kaynak, birçok klima parçasını kısa sürelerde ve hızlı bir şekilde birleştirmek için ideal bir yöntemdir. Tarayıcı ünite 500mm X 500mm boyutlarında bir çalışma alanını kapsamaktadır ve 2 kW gücündeki bir CO₂ laseri ile yaklaşık olarak 0,45 mm çapında bir odak çapı oluşturmaktadır.

Laserlerde kullanılan çıkış güçlerinin artması ile birlikte, tarayıcı ünitelerde de bazı değişiklikler yapılmıştır. Parçaları birleştirmek amacı ile 600 µm çapındaki bir odak çapı elde etmek amacı ile kullanılan 6 kW gücündeki CO₂ laserinde kullanılan aynaların açıklıkları 70 – 80 mm arasında olmak zorundadır. Ayna açıklığı terimi, kullanılan

merceklerin çapını belirtir. Daha büyük çapa sahip mercek, daha fazla ışını toplar ve böylece ışınların parça üzerine geliş açıları değişir. Bu büyüklükteki aynaların kontrolü amacı ile kullanılan yüksek hızdaki aynaların kontrolü sorun oluşturmaktadır. Bu sebeple elektronik kontrol sistemleri geliştirilmiştir. Buna ek olarak oluşan ısıdan korumak amacı ile laser kafası su soğutmalı, yansıtıcı aynalar ise hava soğutmalı sistemler ile desteklenmektedir.

Nd:YAG laserleri, CO₂ laserlerinden daha düşük dalga boyuna sahiptir. Nd:YAG laserlerin kullanılması amacı ile tarayıcı sistemlerde kullanılan mercek açıklıkları 90 mm'yi bulmaktadır. Bu sistem ile laser kafası 180mm X 180mm X 50 mm boyutlarında bir bölgeyi tarayabilmektedir. 4 kW gücündeki Nd:YAG laseri kullanılarak oluşturulan sistem 0,7 mm çapındaki bir odak çapını garanti etmektedir.

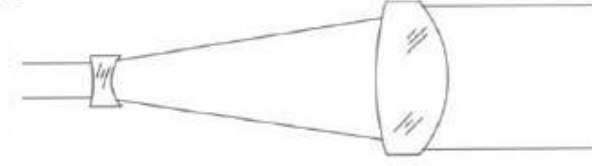
Fiber laserler diğer endüstriyel laserlere göre en düşük dalga boyuna sahip laser türüdür. 5 kW gücündeki fiber laser ile 50 mm büyüklüğündeki mercek açıklıkları ile 0,65 mm çapındaki odak çapı elde edilebilir.

a) Optik Elemanlar ve Tarayıcı Ünite Tipleri

Bir uzaktan laser kaynağı sisteminde rezonatörden çıkan ışının laser kafasında odaklanması gerekmektedir. Bu amaçla fiber optikler veya yansıtıcı aynalar ile laser kafasına taşınan laser ışını ilk olarak kolimatörden geçmektedir. Kolimatörler, laser kafasına birçok farklı yerden giriş yapan ve dağınık olarak ilerleyen laser ışın demetini belirli bir doğrultuya göre yönlendiren ve ışının çapını daraltan merceklerdir. Eğer laser ışını bir mercek tarafından yönlendirilmez ise, mercek ışına değişken çaplarda odaklanır. Bunun sonucu olarak, birçok değişken ışın odak çapı ve tutarsız bir işlem oluşur. Kolimatör mercekler, tutarlı bir laser ışını oluşturarak, tutarlı bir odak çapı sağlamaktadır.

Bir diğer optik elemanda laser ışın genişleticisi olarak isimlendirilmektedir. Laser ışın genişletici aygıtı iki adet ZnSe (Çinko Selenür) malzemeden üretilen ve yansıtıcı özelliklerini önlemek amacı ile kaplama yapılmış mercekten meydana gelmektedir. Bu iki mercek arası mesafe değiştirilebilmektedir. Işının ıraksaması veya yakınmasını ayarlamakta kullanılır. En sık kullanılan ışın genişleticisi Galileo ışın genişleticisidir. Galileo teleskopundan yararlanılarak geliştirilmiştir ve odak mesafesinin ayarlanması için kullanılır. Basit oluşu, az yer kaplaması ve düşük maliyetinden ötürü tercih edilir.

Laser ışığını 1,3 ile 20 kat arasında değişen oranlarda genişletebilir. Sabit bir mercek ünitesine sahip olan laser sisteminde, ışın genişletilerek istenilen değerlerde ışın odak çapına ulaşmak mümkün olmaktadır.

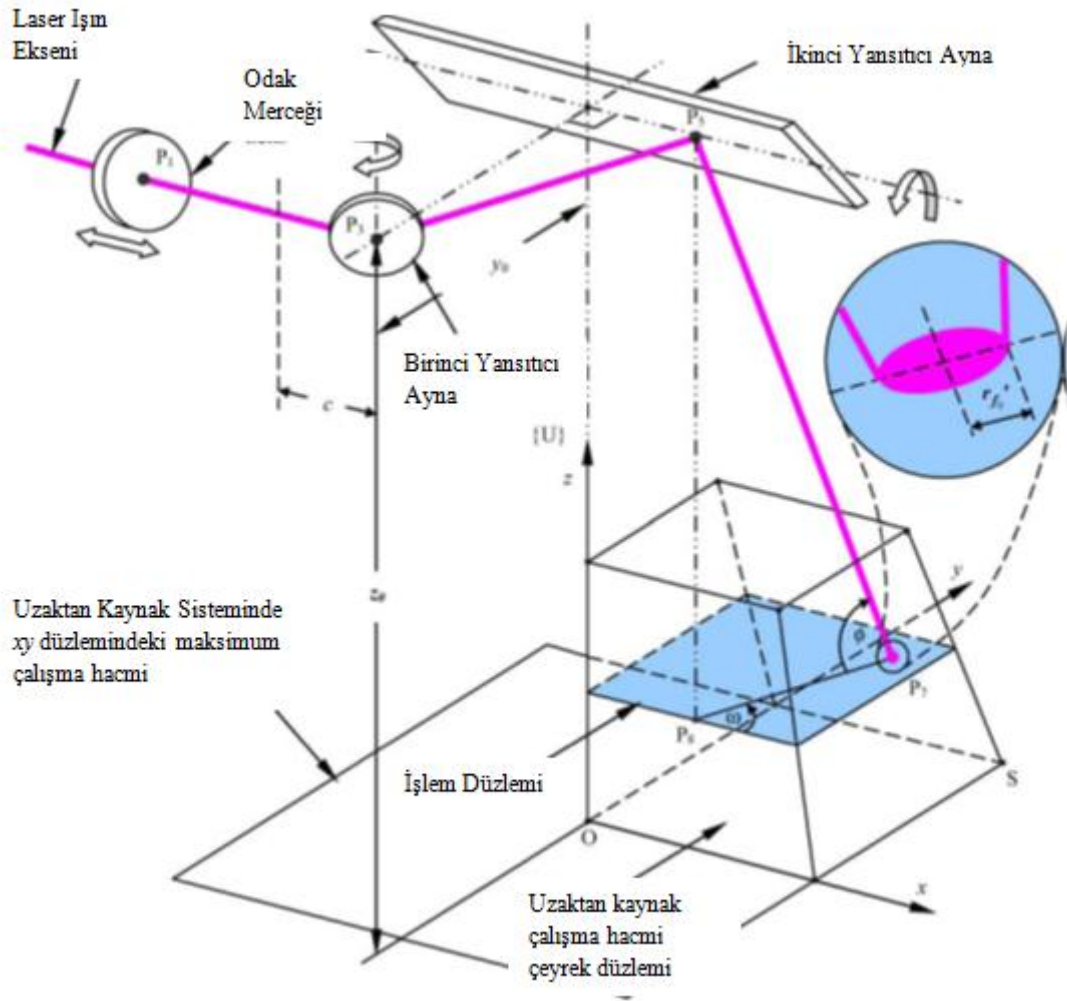


Şekil 6.7 Galileo teleskobunun şematik gösterimi

Bu sistemler dışında laser ışınının tarayıcı ünitesine taşınımı amacı ile yansıtıcı aynalar da kullanılmaktadır.

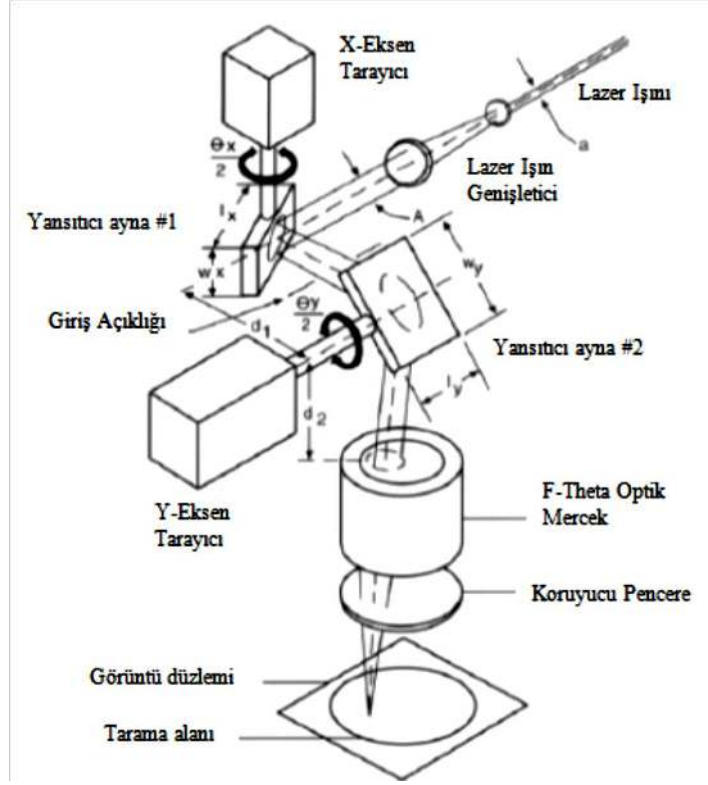
Uzaktan kaynak sistemlerinde iki farklı tür tarayıcı sistem bulunmaktadır. Bu tarayıcı sistemlerin değişiklik gösterme sebebi, kullandıkları laser güç kaynaklarından gelmektedir.

Bu sistemlerden ilki; yüksek güç ve yüksek kaliteye sahip CO₂ laserleri ile kullanılan ve bir veya iki adet yansıtıcı aynaya sahip tarayıcı sistemlerdir. Bu yansıtıcı aynalara ek olarak kullanılan ve lineer hareket imkânına sahip olan üçüncü bir odaklama merceği ile de üç boyutlu bir çalışma hacmi elde edilir. Bu tip sistemlerde odak mesafesi 1 ile 1,6 m arasında değişmektedir.



Şekil 6.8 İki aynalı tarayıcı uzaktan laser sistemi[17]

Diğer tarayıcı sisteminde ise iki adet ayna bulunmaktadır ve bunlara ek olarak bir adet F-theta olarak isimlendirilen bir tarayıcı mercek kullanılır. **F-Theta** optik elemanı ikinci yansıtıcı aynayı takip etmektedir ve laser ışın etki alanında ufak değişiklik ile düz bir görüntü düzlemi oluşturulmasını sağlar. Bu sistemde fiber optik kablo ile taşınan ve diyod beslemeli bir Nd:YAG laseri ve robot istasyonu kullanılır. F-Theta optik elemanının kullanımı laserin parçaya etki açısının değişmesini sınırlamaktadır ancak robot hareketleri tüm tarayıcı ünitenin hareket etmesine olanak sağlamaktadır[17].



Şekil 6.9 İki yansıtıcı ayna ve F-Theta optik mercekli tarayıcı sistem[23]

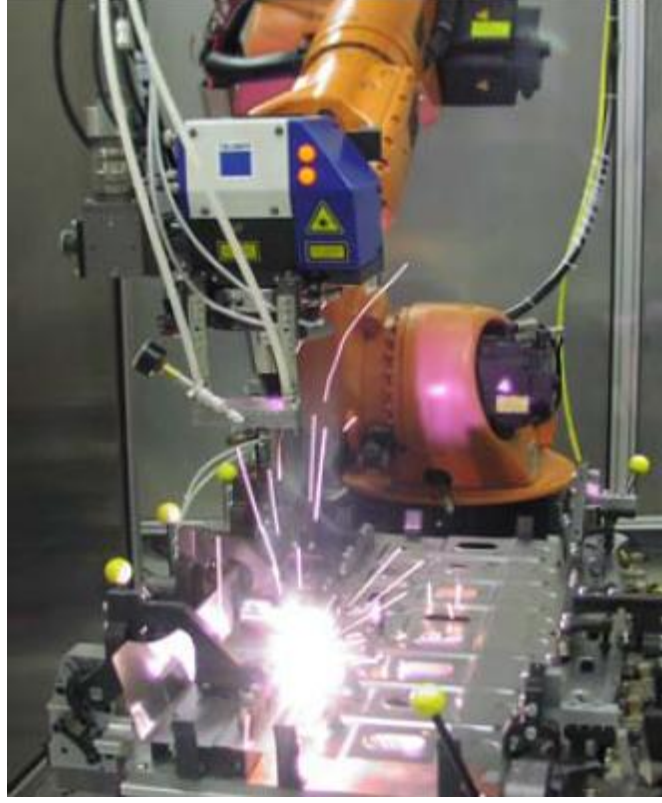
b) Tarayıcı Ünite ve Robot Hareketleri

Uzaktanlaser kaynağında lazer ışınının yönlendirilmesi ve odaklanması amacı ile kullanılan tarayıcı üniteler robot koluna monte edilerek kullanılırlar. Tarayıcı ünite ve robot kolundan meydana gelen bu sistemde, robotun ve tarayıcının birbirlerine göre bağıl hareketlerinin dikkate alınması gerekir. Kaynak işlemi esnasında veya işlem öncesinde, robotun izleyeceği yol hesaplanmalıdır.

Robot kolu ve tarayıcı üniteli bu sistemde, esas olarak incelenen hareket lazerin iş parçasındaki odak çapının hareketidir. Kaynak konstrüksiyonunda birleştirmeye uygun kaynak noktaları seçildikten sonra, ışının iş parçası üzerindeki hareketi hesaplar. Lazer ışınının odak çapının iş parçasındaki hareketine bağlı olarak, tarayıcı üniteye hareketler ve robot kolunun hareketleri hesaplanır.

Lazer ışını odak çapının iş parçası üzerindeki hareketinin optimizasyonu için, lazer ışınının iş parçası üzerindeki hızı dikkate alınmalıdır. Uzaktan laser sisteminde lazer gücünde değişiklik yapmak çok zordur ancak diğer taraftan kaliteli bir kaynak dikişi elde etmek amacı ile parametrelerin optimizasyonu gereklidir. Endüstriyel robotlar, hareket eksenlerinde sabit hızda hareket ederler. Buna ek olarak, birçok lazer tarayıcısı

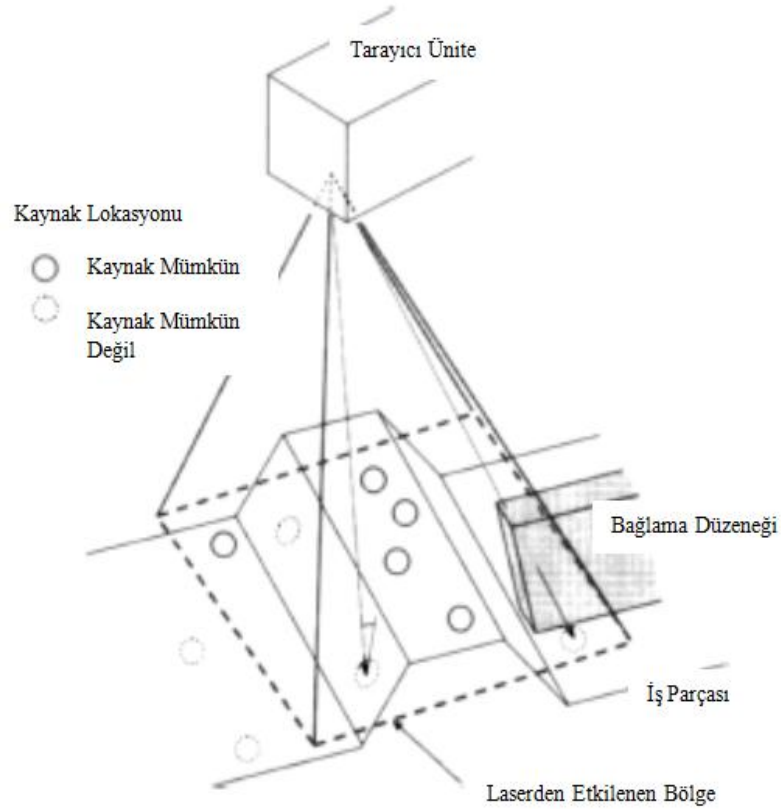
 nitesi de esnek bir çalışma hızına imkân tanımaz. Dolayısıyla, robot ile tarayıcı ünite arasındaki bağıl hız sabit kalmaktadır[9].



şekil 6.10 Robot koluna monte edilen tarayıcı ünite ile kaynak[15]

Üç boyutlu kaynak pozisyonları için 6 eksenli sistemler yeterli olmaktadır. Kullanılan robot sistemi 6 eksene sahiptir ve buna ek olarak tarayıcı ünite 3 eksene sahiptir. Robot kolu ve tarayıcı ünite sistemindeki toplam 9 eksen fazlalık oluşturabilmektedir. Bununla birlikte robot hareketlerinde sınırlama yaratan üç ana unsurda şunlardır.

- Laser ışınının iş parçasına geliş açısı,
- İş parçası bağlama düzeneğinden kaynaklı sınırlama,
- Kaynak zamanından doğan robot hareket hızındaki sınırlama[10].



Şekil 6.11 Laser ışını etki bölgesi ve kaynak lokasyonları[10]

Son dönemlerde robot hareketlerini kontrol etmek ve işlem öncesinde programlama yapmak amacı ile çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmaların sonucunda, robot hareketleri CAD simülasyon araçları ile programlanabilmektedir. Kullanılan program, kaynak dikişlerine laser ışınının ulaşabilmesini, iş parçasının sabitlenmesi için kullanılan cihaz ile çarpışma riskini ve robot ile tarayıcının koordinasyonunu hesaplayabilmektedir. Programın kullanılması, işlem zamanının azaltılmasında ve karmaşık parçaların birleştirilmesinde büyük kolaylık sağlamaktadır.

6.1.4 Uzaktan Laser Kaynağının Otomotiv Endüstrisindeki Kullanım Alanları

Yakın gelecekte laser sistemlerinin malzeme işlemlerindeki kullanımının iki-üç kat artması beklenmektedir. İmalat sanayinde malzemelerin işlenmesinde laserlerin kullanım payı 1994 yılında yaklaşık 1 milyar Euro iken, 2000 yılında 5 kat artarak yaklaşık 5 milyar dolara varmıştır. 2005 yılında bu rakam yaklaşık olarak 15 milyar euroya varmıştır. 2015 yılında ise, 40 milyar euroya ulaşacağı öngörülmektedir[19].

Uzaktan laser kaynağı otomotiv endüstrisinde birçok farklı parçada kullanılmaktadır. Özellikle parçaların birleştirilmesinde kullanılan en yaygın kaynak yöntem olan nokta direnç kaynağına alternatif olarak ortaya çıkan uzaktan laser kaynağı, getirdiği avantajlar ile üretimde kaliteden ödün vermeden daha hızlı, daha esnek sistemlerin kullanılmasına olanak sağlamıştır.

Araçların gövde imalatında kullanılan sac parçaların imalatında kaynak sıraları ve boyutları değişkenlik gösterebilir. Uzaktan laser kaynağında tarayıcı ünite yardımı ile istenilen kaynak şeklinde ve boyutunda zaman kaybı yaşamadan birleştirme yapmak mümkündür.

Araçlarda ağırlığı azaltma ve aynı zamanda dayanımı da artırma amacı ile farklı türdeki kaynak dikişlerine ihtiyaç duyulmaktadır. C veya U şeklinde görülebilen farklı kaynak dikişleri de robot hızından bağımsız olarak yüksek hassasiyet ile gerçekleştirilmektedir.



Şekil 6.12 Kapı panel birleştirilmelerinde kullanılan farklı türden kaynak dikişleri

Nokta direnç kaynak yönteminde elektrodların iş parçasına temas etmesi gerektiğinden kaynak bölgesine erişimi sağlamak amacı ile tasarımda sınırlamalar oluşmaktadır. Bununla birlikte elektrod için gereken flanş kalınlıkları da toplam ağırlığı artırmaktadır. Aynı zamanda kaynak pozisyonlama için geçen değer katmayan zaman ise, seri imalatla önemli zaman kayıplarına yol açmaktadır.

Uzaktan laser kaynağında laser ışınının yüksek hassasiyetle ve hızlı bir şekilde yönlendirebilmesinden ötürü, değer katmayan zamanda önemli ölçüde azalmalar görülebilmektedir. Araç gövdeleri için bakıldığında, nokta kaynağında her bir kaynak için ortalama 2 saniye harcanmaktadır. Bu değer uzaktan laser kaynağı ile 0,4 saniyenin de altındadır. Bu değerlerden de anlaşılacağı gibi, aynı işlemi 5 kat hızlı gerçekleştirebilmek mümkündür.

Uzaktan laser kaynak istasyonunda, nokta kaynağı ile 5 istasyonda yapılabilecek birleştirme işlemi tek bir istasyonda yapılabilmektedir. Bu da kullanıcılara üretim alanında çalışma alanı sağlamaktadır. Bunun bir sonucu olarak, tek bir istasyon ile birleştirme işleminden sonra laser markalama gibi diğer işlemlerde yapılabilmektedir.

Sadece üretim hızına baktığımızda 4 kilowatt gücündeki laser gücü ile kaynak hızı ortalama 6 kat daha fazladır. 6 kilowatt laser gücünün kaynak hızı 10 kata kadar daha yüksek olabilmektedir.

İşlemin avantajları sadece nitelik olarak değil, nicelik olarak da bulunmaktadır. Uzaktan laser kaynağı aynı zamanda birleştirilmelerin daha dar toleranslarda yapılmasına imkân sağlar. Bir yandan, parçalarda daha az ısı girdisi ve mekanik gerilme oluşur. Öte yandan, daha az sayıdaki pozisyonlama ve sabitleme elemanı iş parçalarının ölçülerinde stabilite sağlamaktadır.

Araçta birçok farklı uygulamada uzaktan laser kaynağı kullanılmaktadır. Bunlar arasında, yolcu koltuklarının makas ve kızak gibi alt yapı parçalarının birleştirilmesi, kapı panelleri, taban ve tavan sacları ve bagaj kapaklarının montajı gibi uygulamalar bulunmaktadır.

ÖRNEK UYGULAMA İNCELEMESİ

Otomobil gövde imalatında, birleştirme tekniklerinden en yaygın olanı nokta direnç kaynağı ile birleştirme yöntemidir. Nokta direnç kaynağı kullanımı seri imalat şartlarında çeşitli dezavantajlara sahiptir. Bu dezavantajları sıralayacak olursak;

- Flanş kalınlıkları,
- Elektrodların iş parçasına temas etme zorunluluğu,
- Elektrodların bir kaynak noktasından diğer kaynak noktasına hareketinden doğan değer katmayan süre olarak sıralanabilir.

Bu dezavantajların dışında üretim mühendislerinin sürekli geliştirmek için üzerinde çalıştığı diğer konularda şu şekilde sıralanır:

- Termal etkilerden kaynaklanan deformasyon ve ısı girdisi,
- Otomobil gövde ağırlığı,
- Daha hafif malzemeler arayışı ve bu malzemelerin kaynak yöntemlerinde kullanılabilmesi,
- Araç gövde yapısı ve dayanım özellikleri,
- Maliyetler ve üretim alanı,
- İlk yatırım ve yöntemin işletme giderleri,
- Müşteri beklentileri
- Hızlı ve esnek imalat sistemi.

Uzaktan laser kaynak yönteminin uygulamasını incelemek amacı ile FORD OTOSAN firmasında çeşitli gözlemlerde bulunulmuştur.

7.1 Uzaktan Laser Kaynak Yönteminin Kazandırdıkları

7.1.1 Proses Zamanı

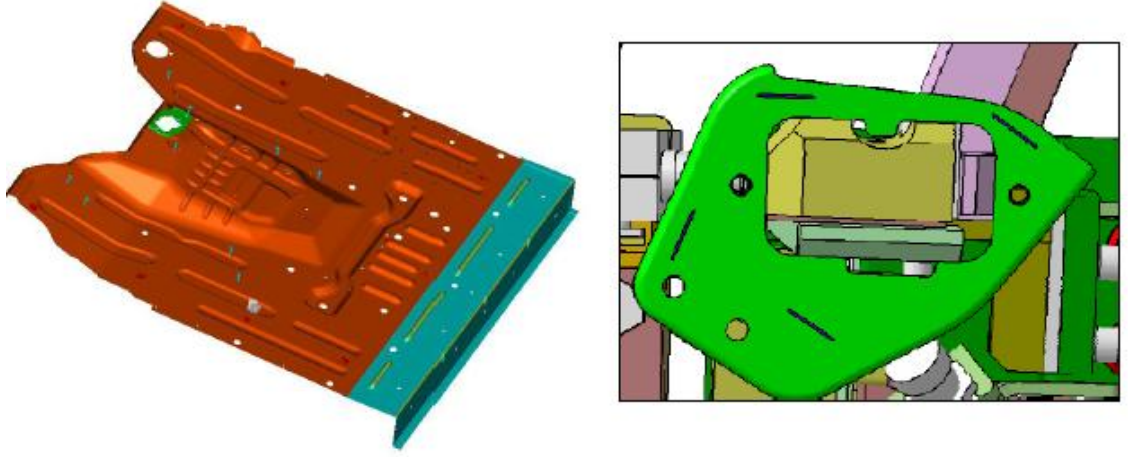
FORD OTOSAN firmasında uzaktan laser kaynağı, taban panel saclarının birleştirilmesinde kullanılmaktadır. Kullanılan taban panel sacları soğuk şekillendirmeye uygun, düşük karbonlu, galvanize çelik malzemeden oluşmaktadır. Sac kalınlıkları 0,8 mm büyüklüğündedir. Çizelge 7.1’ de taban panellerinde kullanılan sacların kimyasal kompozisyonları belirtilmiştir.

Çizelge 7.1 Taban panel saclarının kimyasal kompozisyonu

Standart Karşılığı	%C	%Si	%S	%P	%Mn	%Al	%Cr	%Ni	%Ti
DIN EN 10346 / DX56D+Z	0,0020	0,0070	0,0090	0,0090	0,1110	0,0790	0,0150	0,0160	0,0640

Taban panel saclarının birleştirilmesinde kullanılan uzaktan laser kaynağı ve nokta direnç kaynağı yöntemlerinde harcanan zamanlar karşılaştırılmıştır. Sonuçlar şu şekilde özetlenebilir;

- Uzaktan laser kaynağı yöntemi ile gerçekleştirilen birleştirmede, toplamda 21 adet kaynak dikişi görülmektedir. Kaynak dikişlerinin uzunlukları ortalama 28 mm olarak ölçülmüştür. Buna göre 21 adet 28 mm uzunluğa sahip kaynak dikişinin oluşturulması için geçen süre yaklaşık 20 saniyedir.
- Nokta direnç kaynağında ise toplamda 21 adet nokta kaynağı ile birleştirme yapılmaktadır. Manuel olarak hareket ettirilen elektrod tabancası ile gerçekleştirilen nokta direnç kaynağında geçen süre ise yaklaşık 84 saniyedir.
- Sonuç olarak, uzaktan laser kaynağı yöntemi nokta direnç kaynağına göre 4 kat daha hızlı çalışmaktadır.



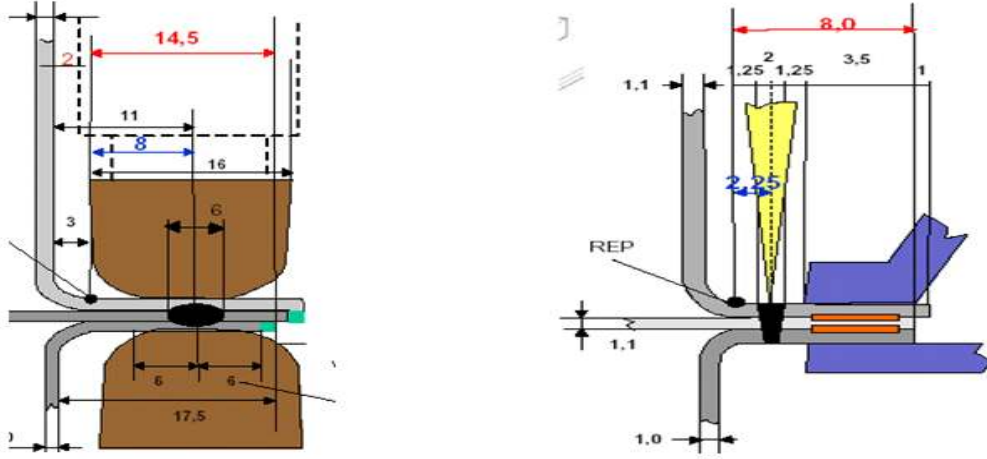
Şekil 7.1 Taban panel saclarının görünüşü

7.1.2 Gövde Tasarımı

FORD OTOSAN firmasında mevcut üretim kapasitesinde, nokta direnç kaynağı birleştirme yöntemleri arasında en yaygın olanıdır. Nokta direnç kaynak yönteminin kullanımı tüm birleştirme yöntemleri arasında % 90 civarındadır. Örnek olarak, Transit Connect aracının gövde üretiminde 5611 adet nokta kaynağı bulunmaktadır.

Nokta direnç kaynağında, elektrodlar parçaya her iki taraftan da ulaşmak zorundadır. Bunu sağlamak amacı ile parçaların tasarımı esnasında erişim pencereleri tasarlanır. Taşıyıcı parçalar üzerinde açılan bu delikler dayanımı azaltıcı etki yapmaktadır ve parçaların kalınlaşmasına ve ağırlaşmasına sebep olmaktadır. Aksine laser kaynağına bu türden tasarım gereksinimlerine ihtiyaç yoktur ve tasarımda serbestlik sağlamaktadır.

Nokta direnç kaynağının tasarım kuralları gereği flanş mesafesi minimum 14 mm olmalıdır. Bu mesafe elektrodun çapına bağlı olan bir değerdir. Uzaktan laser kaynağında ise flanş kalınlığının 6 mm olması yeterlidir. Aradaki 8 mm olan fark, toplamda araç başına ağırlık azaltılmasına büyük oranda katkı sağlamaktadır. Şekil 7.2’de uzaktan laser kaynağı ile nokta direnç kaynaklarında belirlenen flanş mesafeleri gösterilmiştir[26].



Şekil 7.2 Nokta direnç kaynağı ve uzaktan laser kaynağı uygulamaları[26]

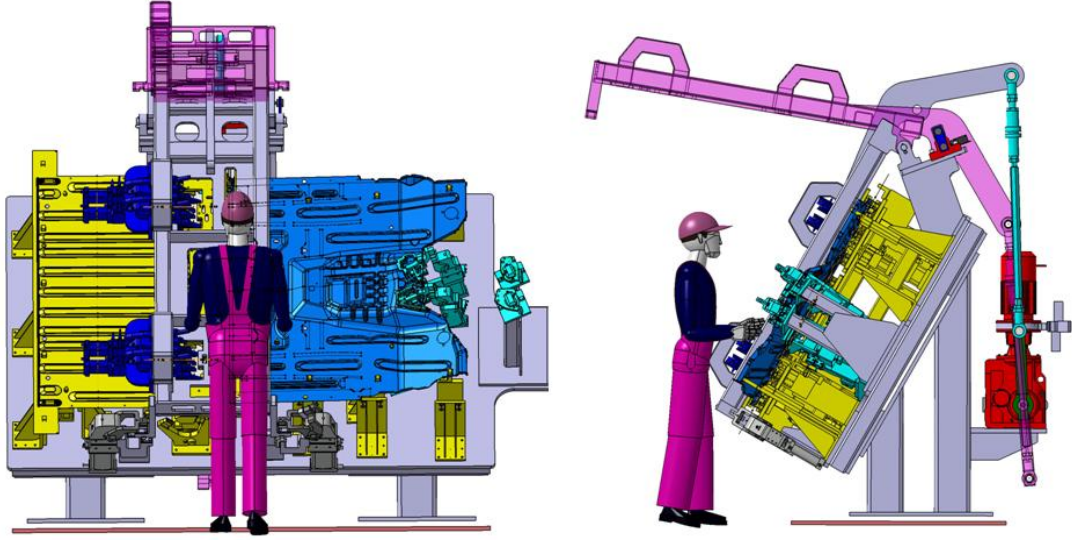
7.1.3 Fabrika Kullanım Alanı

Firmada yapılan teorik çalışmada konvansiyonel teknoloji ile kurulan bir gövde hattı ile tamamen laser kaynağı kullanılarak yapılmış bir gövde hattı karşılaştırılmıştır. Bu çalışmaya göre, laser kaynağı kullanılan gövde hattı ile %25 alan kazanılmış ve %70 daha az robot kullanılmıştır. Açıkça görülmektedir ki, uzaktan laser kaynağı üretim alanında daha fazla kullanım alanı açmaktadır. Buna ek olarak, daha az ekipman ve robot kullanımı işletme ve bakım maliyetlerinin azalmasını sağlamaktadır.

7.2 Sistem Donanımı

Uzaktan laser kaynağı ile birleştirilecek alt komple ön taban sacında birleşim noktalarının kalınlıkları değişkenlik göstermektedir. 0,8 – 1 mm ve 1-3 mm gibi farklı birleşim noktalarını kaynak edebilmek için seçilen laser, 4 kW gücünde Nd:YAG laseridir. 1064 nm dalga boyuna sahip olan Nd:YAG laseri bir katı hal laseridir ve düşük dalga boyundan ötürü fiber optik kablolar ile laser ışını taşınabilmektedir.

Laser ışınını odaklama amacı ile kullanılan tarayıcı ünite, odak mesafesi 400 mm ile 1200 mm arasında değişmektedir. Birleştirilen parçalar üç boyutlu birleşme bölgelerine sahip olduklarından odaklama mesafesi, parçaların birleşme bölgesindeki kalınlıklarına göre değişmektedir.



Şekil 7.3 Konumlama ekipmanı[26]

7.2.1 Çinko Buharlaşma Problemi

Otomotiv endüstrisinde kullanılan galvanize sacların kaynağında, çinko buharlaşmasına dikkat etmek gereklidir. Kaynak işlemi esnasında açığa çıkan çinko buharı eğer ortamdan uzaklaştırılmaz ise, kaynak metaline nüfuz eder ve kaynakta gözenek oluşumuna ve dayanım yetersizliğine yol açar.

Bu sorunu gidermek amacı ile birleştirilecek parçaların temas yüzeylerinde bir açıklık oluşturulmuştur. Sac parçalar arasında kontrol edilebilen 0,15 mm büyüklüğündeki bir aralığın kaynak yapılabirliği etkilemediği ve çinko buharının uzaklaşmasını sağladığı gözlemlenmiştir[26].

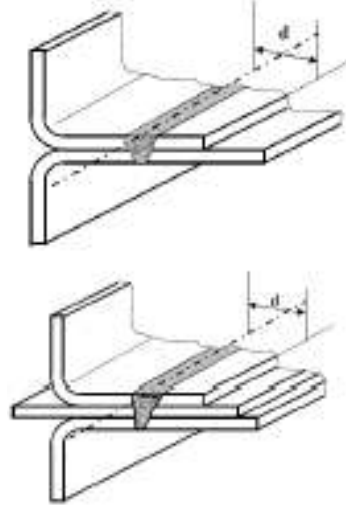
7.3 Uzaktan Laser Kaynağı Uygulamalarında Tasarım Kuralları

Laser kaynağı ile gerçekleştirilen uygulamalarda tasarım açısından dikkat edilmesi gereken bazı hususlar bulunmaktadır.

7.3.1 Kaynak Dikiş Lokasyonu

Gövde imalatında laser ışını ile birleştirmelerde kaynak dikişlerinin kenara olan uzaklıklarına dikkat edilir. Güvenilir bir kaynak dikişi elde etmek ve aynı zamanda birleştirmeden sonraki istasyonlarda çalışma alanı sağlamak amacı ile kaynak dikişlerinin kenarlara olan mesafeleri önem arz etmektedir.

2 adet sac parçanın laser ile birleştirilmesinde, kaynak dikişinin merkez çizgisi ile kenar arasında en az 3 mm uzunluğunda bir mesafe sağlanmalıdır. 3 adet sac parçanın birleştirilmesinde ise bu değer en az 4 mm olması gerekmektedir.



Şekil 7.4 Kaynak dikiş merkezinin kenara olan mesafesi

7.3.2 Sac Parçalar Arasında Boşluk Oluşturma

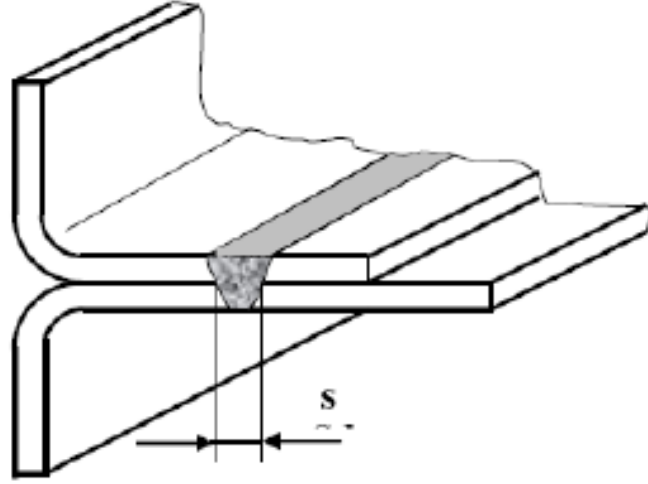
Çinko kaplı galvanize çeliklerin laser kaynağında, çinko buharlaşma problemi görülmektedir. Bu problemi gidermek için birleştirilen parçalar arasında en az 0,1 mm büyüklüğünde kontrol edilebilen bir boşluk bırakılmalıdır. Bu boşluk düzgün ve porozite içermeyen bir kaynak dikişinin oluşturulmasını sağlar. Sac parçalar arasında boşluk oluşturmak genellikle zordur bu nedenle çinko kaplamalı sacların kaynağında mümkün oldukça köşe kaynağı tercih edilmektedir.

Sac aralarında oluşturulan boşluğun maksimum değeri 0,3 mm'yi geçmemelidir. Ortalama olarak, kullanılan sacların dörtte biri büyüklüğündeki bir boşluk çinko buharının uzaklaşması için yeterli olacaktır.

7.3.3 Kaynak Dikişinin Genişliği

Kaynak dikiş genişliği, kaynak bölgesinde gerekli dayanımın sağlanması ve kaynak nüfuziyeti için önemli bir parametredir. Laser ışını kullanılarak yapılan kaynak işlemlerinde, kaynak dikiş genişliği, sacların kalınlığına bağlı olarak değişmektedir. Genel olarak, 2 adet sacın birleştirilmesinde, dikiş genişliği ince sacın kalınlığının en az

10'da 9'u kadar olmalıdır. Farklı kaynak konstrüksiyonları için bu değer değişkenlik gösterebilir.



Şekil 7.5 Kaynak dikiş genişliği

7.4 Birleştirilen Parçalarda Uygulanan Testler

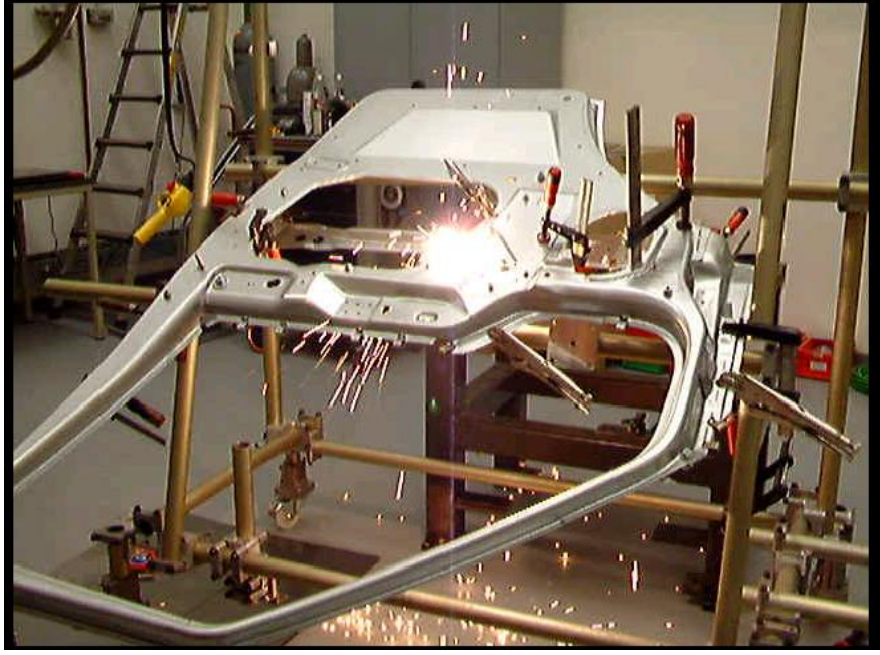
7.4.1 Statik ve Dinamik Yükleme Şartlarında Uygulanan Testler

Uzaktan laser kaynağı ile gerçekleştirilen birleştirmelerin statik ve dinamik yükleme koşullarında dayanımını test etmek amacı ile çeşitli incelemeler yapılmıştır. Test düzeneğinde kullanılmak üzere, 6 mm düğme çaplı bir nokta kaynağı ile 20 mm uzunluğundaki bir laser dikişi karşılaştırılmıştır.

Uzaktan laser kaynağı ile yapılan birleştirmelerin nokta direnç kaynağı ile minimum eş değer dayanıma sahip olduğunu ölçmek amacı ile çeşitli yükleme durumlarını simüle eden çekme testleri tasarlanmış ve test kuponları ile bu testler gerçekleştirilmiştir.

Yapılan testler sonucunda görülmüştür ki, statik yükleme şartlarında çekme ve yırtma tipi yüklemelerin minimum nokta direnç kaynağı kadar başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Çekme yönünün laser kaynağının uygulama yönüne dik olduğu testlerde ortalama sonuçlar, nokta direnç kaynağına göre %290 daha iyi sonuç vermiştir[26].

Bu testlere ek olarak dinamik yükleme altında da çeşitli testler yapılmıştır. Sistemin dinamik yükleme altında vereceği tepkiyi simüle etmek amacı ile numune bir kapı uzaktan laser kaynağı ile birleştirilmiş ve çarpma testine tabi tutulmuştur.



Şekil 7.6 Numune kapı imalatı[26]

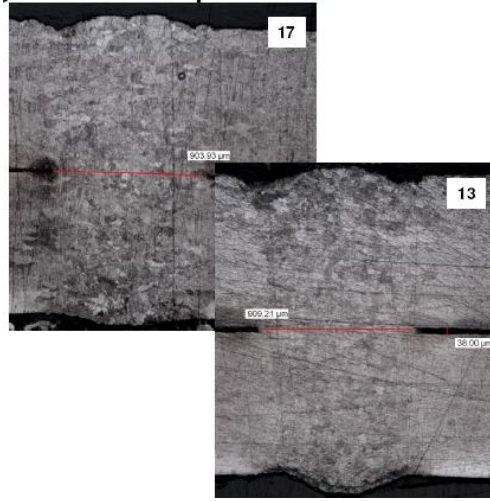
Testler normal şartların yaklaşık iki katı olan 250.000 çevrime kadar zorlanmıştır. Yaklaşık 3 ay süren testler sonucunda kaynak çevrelerinde herhangi bir çatlak oluşumu ya da yırtılma problemine rastlanmamıştır.

7.4.2 Numune İçyapı İncelemesi

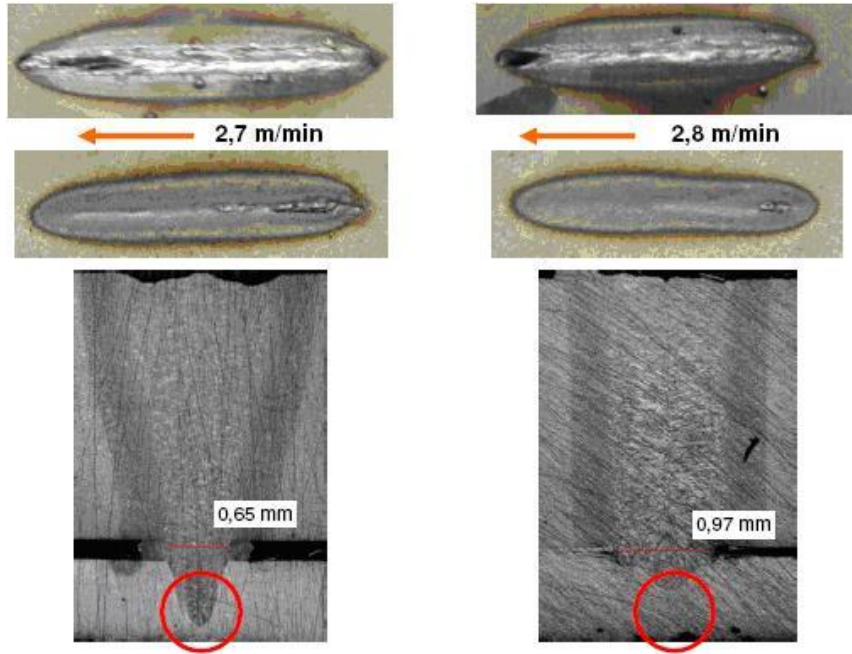
Nokta direnç kaynağı ile birleştirilen numunelerde, birleşme bölgesinde nüfuziyet değerlendirmesi amacı ile yapılan test yırtma testi olarak adlandırılır. Bu test sonrasında kaynak edilen bölgenin koptuğu noktada üst sac parçasından bir kısmı koparıp ayırması beklenir. Kopma noktasının çapı ölçülür ve kaynağın mukavemeti ile ilgili değerlendirme yapılır.

Ancak uzaktan laser kaynağında düşük ısı girdisi ve dar ITAB' dan ötürü aynı test düzeneğini kullanmak mümkün değildir. Ayırma test düzeneğinin kaynak noktasına denk gelmesi durumunda kaynak birleşim noktasından ayrılmakta ve hatalı sonuçlar ortaya çıkmaktadır.

Bununla birlikte, hazırlanan test numuneleri ile yapılan çekme testlerinde elde edilen sonuçlar, uzaktan kaynağın nokta direnç kaynağına göre çok daha dayanıklı olduğunu göstermiştir. Şekil 7.7 ve şekil 7.8' de uygun ve başarısız birleşme örneklerinin mikrografi testleri görülmektedir.



Şekil 7.7 Uygun birleşmiş test örnekleri[26]



Şekil 7.8 Başarısız mikrografi test örnekleri[26]

BÖLÜM 8

SONUÇ ve SENTEZ

Bu çalışmada uzaktan laser kaynağı yönteminin gelişimi, prensibi ve konvansiyonel laser kaynağı ile farkları ortaya konmuştur. Yapılan incelemelerden çıkan sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Uzaktan laser kaynak yöntemi, konvansiyonel birleştirme yöntemlerine olan üstünlüklerinden ötürü başta otomotiv endüstrisi olmak üzere birçok endüstriyel uygulamada nokta direnç kaynağına alternatif olarak kullanılmakta olup, önemi gün geçtikçe artmaktadır.
- Birleştirilecek iş parçalarına düşük ısı girdisi, dar bir ITAB oluşumu, yüksek kaynak hızlarına ulaşılabilmesi ve birleşme bölgelerinde derin nüfuziyet, yöntemin avantajlarından birkaçıdır.
- Laser ışını, uzaktan laser kafasındaki optik elemanların yardımı ile iş parçaları üzerinde istenilen bölgelere kolaylıkla yönlendirilebilmekte ve odak mesafesi 1,6 metreye kadar ulaşabilmektedir. Odak mesafesinin bu denli yüksek olması büyük boyutlardaki karmaşık iş parçalarının tek bir istasyonda birleştirilebilmesine olanak sağlamaktadır.
- Otomotiv endüstrisinde gövde parçalarının imalatında çoğunlukla galvanize çelik sac malzemeler kullanılmakta olup, bu malzemelerin kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi esnasında çinko buharı oluşmaktadır. Çinko buharı kaynak metaline nüfuz ederek birleşme bölgesinin mekanik dayanımını azaltır ve işlem esnasında kontrol edilmesi gerekmektedir. Yapılan teorik araştırmada görülmüştür ki, çinko buharlaşma problemini gidermek amacı ile birleştirilecek parçalar arasında 0,1 mm - 0,2 mm büyüklüğünde aralık bırakmak, oluşan

çinkonun kaynak bölgesinden tahliye edilmesi için yeterlidir. Bu kapsamda FORD OTOSAN firmasında yapılan çalışmalarda, çinko buharı etkisini önlemek için, iş parçaları arasında 0,15 mm büyüklüğünde kontrol edilebilen bir açıklık oluşturulmuş olup, bu değer teorik açıklamalar ile de uyum içerisinde bulunmaktadır.

- Katı hal laser türleri, laser ışın kalitelerinin yüksek olması ve laser ışınının birden çok istasyonda kullanılabilmesinden ötürü endüstride farklı birçok uygulamada tercih edilmektedir. FORD OTOSAN firmasında katı hal laser türlerinden Nd:YAG laseri kullanılmakta olup, kaliteden ödün vermeden seri imalatın gereksinimlerine cevap vermektedir.
- Uzaktan laser kaynağı, tek bir istasyonda birden fazla sayıda kaynak işlemini yapabilmesinden ötürü, tesis tasarımına da olumlu yönde etki yapmaktadır. FORD OTOSAN firmasında uzaktan laser kaynağının devreye alınması ile birlikte, tesis içerisindeki kullanılabilir alanda %25 oranında bir kazanım elde edilmiştir.
- Laser kaynağı yönteminde, laser ışınının birleştirme için kullanılmadığı her an, imalat verimini düşürmekte ve dolayısıyla da maliyetleri artırmaktadır. Bunu önlemek için laser ışınının kullanımı maksimize edilmeli ve uzaktan laser kaynak yöntemi böylesi bir imalat sistemi için en uygun yöntemlerden biri konumuna gelmektedir. Nokta direnç kaynağı ile karşılaştırıldığında kaynak süreleri ortalama 5 kata kadar düşmekte ve parça başına gereken imalat süresi önemli ölçüde azalmaktadır. FORD OTOSAN firmasındaki incelemelerde, nokta direnç kaynağı ile toplamda 4 saniyede gerçekleştirilen birleştirme işlemi, uzaktan laser kaynağı ile yaklaşık 0,9 saniyede gerçekleşmektedir. Her iki yöntemin imalat süreleri karşılaştırıldığında, uzaktan laser kaynağı lehine yaklaşık 4 kat daha hızlı bir üretimin söz konusu olduğu görülmektedir.

Otomotiv endüstrisinde 1970'li yıllardan itibaren kullanılmaya başlanan laser uygulamaları, uzaktan laser kaynağı ile yeni bir boyut kazanmıştır. İşletmelerin, uluslar arası rekabet ortamında yerlerini koruyabilmeleri, dahası üst sıralara yerleşebilmelerinde hızlı, kaliteli, esnek imalat sistemleri daha da önem kazanmakta ve

bu noktada uzaktan laser kaynağı tüm bu özellikleri bünyesinde barındıran özelliği ile öne çıkmaktadır.

Günümüzde iş verimliliğini artırmak, yatırım masraflarını azaltmak ve daha fazla imalatı gerçekleştirmek amaçlarına dönük olarak yapılan geliştirme çalışmaları ile uzaktan laser kaynağının kullanımının daha da yaygınlaşacağı beklenmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Karaaslan, A., (2009). Laser İle Malzeme İşlemleri, Literatür Yayınları, 580, İstanbul
- [2] Pakdil, M., (2005). Determination of the Mechanical Properties and Fatigue Crack Propagation of the Laser Welded New Generation Aluminum Alloys, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir
- [3] Özcan, M., (2003). Değişik Malzemelerin İşlenmesinde Kullanılan ND:YAG Lazerleri İçin Etkin Bir Güç Kaynağının Tasarımı ve Uygulanması, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya
- [4] Durmuş, H., (2006). CO₂ Lazer Kaynağıyla Birleştirilmiş Alüminyum Matriksli Kompozitlerin Kaynak Bölgesinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa
- [5] 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
- [6] Uzun, O.R., (2010). Lazerle Kaynak İşleminde Kaynak Parametrelerinin Kaynak Kalitesi Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- [7] Tsoukantas, G. ve Chryssolouris, G., (2006). “Theoretical and experimental analysis of the remote welding process on thin, lap-joined AISI 304 sheets”, Springer-Verlag, 35:880-894
- [8] Kım, S.S., Kım, K.W ve Lee, W.J., (1999). “Development of Remote Laser Welding Technology”, Korea Atomic Energy Research Institute, 200-209
- [9] Hatwig, J., Reinhart, G. ve Zaeh. F.M., (2010). “Automated task planning for industrial robots and laser scanners for remote laser beam welding and cutting”, German Academic Society for Production Engineering, 327-332
- [10] Mori, K., Tarui, T., Hasegawa, T. ve Yoshikawa, N., (2010). “Remote Laser Welding Applications For Car Bodies”, Welding International, October 2010, 24(10):758-763
- [11] Akihiko, T., (2010). “Remote Welding Head and Its Application”, Welding International, October 2010, 24(10):768-772

- [12] Higuchi, T., (2010). “Remote Laser Welding – Development and Applications in American Automotive Industries”, Welding International, October 2010, 24(10):764-767
- [13] Kim, C., Kim, J., Lim, H. ve Kim, J., (2008). “Investigation of Laser Remote Welding Using Disc Laser” , Journal of Materials Processing Technology, 201:521-525
- [14] Ocana, J.L., Iordachescu, D., Blasco, M. ve Iordachescu, M., (2009). “Remote Laser Welding of Automotive Thin Sheets” , Metalurgia International, 14:10-15
- [15] Havrilla, D. ve Brockmann, R.,(2011). “Remote Laser Welding in Automotive Production”, Industrial Laser Solutions, 26(5):8-12
- [16] Iordachescu, D., Blasco, M., Lopez, R., Cuesta, A., Iordachescu, M. ve Ocana, J.L., (2011). “Recent Achievements and Trends in Laser Welding Of Thin Plates”, Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 13:2-4
- [17] Tsoukantas, G., Salonitis, K., Stournaras, A., Stavropoulos, P. ve Chrysosolouris, G., (2007). “On Optical Design Limitations of Generalized Two-Mirror Remote Beam Delivery Laser Systems: The Case of Remote Welding”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 32: 932-941
- [18] Gu, H. ve Shulkin, B.,(2011). “Remote Laser Welding Of Zinc-Coated Sheet Metal Component In A Lap Configuration Utilizing Humping Effect”, Paper 1004, Stronach Centre for Innovation, Magna International Inc.
- [19] Uzun, R.O. ve Keleş, Ö., (2012). “Lazerle Kaynak İşleminde Kaynak Parametrelerinin Kaynak Kalitesi Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi”, Gazi Üniv.Müh.Mim.Fak.Der.,27(3):509-517
- [20] Püskülcü, G. ve Koçlular, F., (2009). “Lazer Kaynak Yöntemi ve Uygulamaları”, Mühendis ve Makina, 50(599):8-17
- [21] Keskin, M.S., (2009). “Östenitik Paslanmaz Çeliğin Lazer Kaynağı Yöntemiyle Birleştirilmesinin İncelenmesi”, 5.Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, 13-15 Mayıs, 2009, Karabük
- [22] Özcan, M., Tarakçıoğlu, N. ve Kahramanlı, Ş., (2004). “Sac Malzemelerin LazerKaynak Parametreleri”, Teknik-Online Dergi, 3(1):14-25
- [23] Tokdemir, M., Ünlü, B.S., Yılmaz, S.S. ve Meriç, C., (2009). “Lazer Kaynağı ile Birleştirilmiş Demir Esaslı Malzemelerin Darbe Dayanımının Belirlenmesi”, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, 13-15 Mayıs, 2009, Karabük, Türkiye
- [24] Demir, A., Bingöl, Z., Ertürk, S. ve Sınmazçelik, T., (2004). “Görüntü İşleme Kontrollü Nd:YAG Lazer ile Ti6Al4V ve Magnezyum Alaşımların Dikiş Kaynak İşlemleri”, Kocaeli Üniversitesi Lazer Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi, BAPProje No: 2004/033.
- [25] Özden, H.,(2009). “Otomotiv Sektöründe Lazerli Üretim Yöntemleri Lazerli İmalat, Ölçme ve Kalite Kontrol”, Mühendis ve Makine, 50(596):38-43
- [26] Demirural, G., (2011). “Transit Ön Taban Saclarının Uzaktan Lazer Kaynağı ile Üretilmesi”, Kaynak Teknolojisi VIII. Ulusal Kongre ve Sergisi, 235-245

- [27] Olson, L.D., Siewert, A.T., Liu, S. ve Edwards, R.G., (1993). Metals Handbook First Edition Volume 6: Welding, Brazing and Soldering', ASM International
- [28] Special Optics, Inc., "Scanning Lens Theory", http://specialoptics.com/pdf/wp_scanning_lens_theory.pdf, 02 Nisan 2013
- [29] Special Optics, Inc., "Laser Beam Expander Theory", http://specialoptics.com/pdf/wp_laser_beam_expander_theory.pdf, 02 Nisan 2013

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Samet GÜNCAN
Doğum Tarihi ve Yeri : 16.09.1988 / İstanbul
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : s.guncan@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Makine Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2010
Lise	Sayısal	Vefa Anadolu Lisesi	2006

İŞTECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2010	FORD OTOSAN A.Ş	Ürün Geliştirme Mühendisi