



T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LAZER İLE KAYNAKLANMIŞ P265 NB ÇELİKLERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Ahmet GÖRDEBİL

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE EĞİTİMİ ANA BİLİM DALI

Şubat -2011
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Ahmet GÖRDEBİL tarafından hazırlanan "LAZER İLE KAYNAKLANMIŞ P265 NB ÇELİKLERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ" adlı tez çalışması 15/02/2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / ~~oy çokluğu~~ ile Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	**İmza**
Başkan Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR	.....
Danışman Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU	.....
Üye Yrd. Doç. Dr. Recai KUŞ	.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Bayram SADE
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Ahmet GÖRDEBİL
Tarih: 15.02.2011

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

LAZER İLE KAYNAKLANMIŞ P265 NB ÇELİKLERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Ahmet GÖRDEBİL

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Eğitimi Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU

2011, 101 Sayfa

Jüri
Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU

Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR

Yrd. Doç. Dr. Recai KUŞ

Bu çalışmada lazer ile kaynaklanmış P265 NB çeliklerinin kaynak bölgelerinin mekanik özellikleri deneysel olarak araştırılmıştır. P265 NB standardına uygun malzeme temin edilip 2.8 kW gücünde bir CO_2 lazer makinesi ile alın bölgelerinden kaynaklanmıştır. Kaynaklama, lazer kesme makinesinin kesme kafasında bir takım değişiklikler yapılarak gerçekleştirilmiştir. Endüstride yaygın olarak kullanılan kesme makinelerinin bazı değişikliklerle kaynaklama da yapabileceğini ortaya konmuştur. LPG tanklarının üretiminde P265 NB malzemeleri kullanılmaktadır. Bu malzemeler endüstride MAG kaynağı ile kaynatıldığından mekanik özelliklerini lazer kaynağı ile kıyaslayabilmek için MAG kaynaklı numuneler de üretilerek testlere tabi tutulmuştur. Kaynaklı numuneler radyografi, optik mikroskop ve SEM görüntülemeleri yapıldıktan sonra sertlik ölçme, üç noktadan eğme deneyleri ile mekanik özellikleri araştırılmıştır. Işın huzmesi çok küçük bir alana (0,1-0,5mm) odaklanarak ITAB bölgesi olabildiğince küçük tutulmuş ve kaynak bölgesindeki termal gerilmeler ve mikro yapı düzensizlikleri azaltılmıştır. SEM görüntülemelerinde ITAB ve kaynak dikişi üzerinde ısıl çatlak ve gözeneklilik gibi kaynak kusurlarının oluşmadığı tespit edilmiştir. Radyografi görüntülemelerinde MAG kaynaklı numunelerde birçok kaynak kusuru tespit edilirken lazer kaynaklı numunelerde hiçbir kaynak kusuruna rastlanmamıştır. Sertlik ölçümleri neticesinde lazer kaynak dikişi sertliğinin ana metal sertliğinden %75 daha yüksek sertlik değerleri sergilediği tespit edilirken, MAG kaynağında bu oran %96 olarak gerçekleşmiştir. Isı tesiri ile değişim gösteren kesit alanı ölçümlerinde, MAG kaynağının lazer kaynağına göre %85 daha büyük bir alana nüfuz ettiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Lazer Kaynağı, Üç Noktadan Eğme Deneyi, Kesme kafası ile kaynaklama, P265 NB Çeliği.

ABSTRACT

MS THESIS

MECHANICAL PROPERTIES ASSESSMENT OF LASER WELDED P265 NB STEEL

Ahmet GÖRDEBİL

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE
OF SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF
IN MECHANICAL EDUCATION**

Advisor: Prof Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU

2011, 101 Pages

Jury

**Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU
Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR
Yrd. Doç. Dr. Recai KUŞ**

In this study, mechanical properties of the weld zones for laser-welded P265 NB steels have been searched experimentally. Materials in compliance with P265 NB standard was supplied and welded on butt welding points by the means of 2.8 kW power CO_2 laser machine. Welding was performed by making some modifications on cutting head of laser-cutting machine. It was revealed that cutting machines most commonly used in industry could also make welding with some modifications. P265 NB materials are used in the production of LPG tanks. Because these materials are used in industry with MAG welding, in order to compare is mechanical properties with laser welding, samples from MAG welding were produced and subjected to tests. After making radiography, optic microscopy and SEM (scanning electronic microscope), hardness measurement, three point bending tests and mechanical properties of welded samples were searched. Beam was focused on a very small area (0,1-0,5 mm) and exposed HAZ (heat affected zone) zone as much as possible, and thermal tensions and micro structure disorders in the weld zone were reduced. It was found on SEM imaging that any weld defects such as thermal crack and porosity did not happen on HAZ and welding seam. On radiographic imaging, many defects were determined on MAG welded samples, while any defect was not found on laser-welded samples. As a result of hardness measurement, hardness of laser weld seam was determined to exhibit 75% higher hardness value than basis metal hardness, while this rate occurred 96% in MAG welding. In the measurements of the cross sectional area changing due to heat affect, it was found that MAG welding penetrated into a 85% larger area than laser welding.

. **Keywords:** Laser welding, three point bending tests, welding with cutting head, P265 NB steel

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının hazırlanması sürecinde yardımlarını esirgemeyen değerli hocalarım Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU ve Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR'e saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen Teknik Eğitim Fakültesi öğretim üyeleri ve araştırma görevlisi arkadaşlara teşekkür ederim. Çalışmalarım için gerekli malzemelerin temininde yardımcı olan Dormaksan A.Ş.'ne, lazer kaynak işlemleri sırasında yardımları için Konlazer Ltd. Şti. personeline, lazer kaynak makinesi imkânını sunan Selçuk Üniversitesi Vakfına teşekkür ederim.

Beni bugüne kadar yetiştiren ve maddi-manevi olarak destekleyen aileme ve çalışmalarımda her zaman bana destek olan eşime teşekkürü bir borç bilirim.

Ahmet GÖRDEBİL

KONYA-2011

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **iv**

TEŞEKKÜR ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **vii**

SİMGELER ..... **ix**

KISALTMALAR ..... **xi**

ŞEKİL LİSTESİ ..... **xii**

ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xvi**

1. GİRİŞ **1**

2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI **3**

3. LAZER FİZİĞİ TEORİSİNİN ÖZETİ **12**

3.1. Kendiliğinden Emisyon 12
3.2. Atomların Işıkla Uyarılması 14
3.3. Uyarılmış Emisyon 15
3.4. Lazer Işınının Elde Edilmesi 15
3.5. Lazer Cihazının Temel Elemanları 17
3.5.1. Aktif ortam 18
3.5.2. Uyarma mekanizması 21
3.5.3. Optik geri besleme 21
3.5.3.1. Optik çukur 22
3.5.4. Çıkış bağdaştırıcısı 26
3.6. Lazer Işığı 27
3.6.1. Lazer ışığının özellikleri 27
3.6.1.1. Tek renklilik 27
3.6.1.2. Uyumluluk 28
3.6.1.3. Uzaklaştıkça dağılma 29
3.6.1.4. Yoğunluk 30
3.6.1.5. Yönlendirilebilirlik 30
3.7. Lazerde Güç ve Enerji 31

4. LAZERLERİN ENDÜSTRİDEKİ UYGULAMA ALANLARI **32**

4.1. Malzemelerde Isı Transferi 32
4.1.1. İletim 32
4.1.2. Konveksiyon 34
4.1.3. Işınım 34
4.2. Malzeme İşleme Çeşitleri ve Bunlar İçin Kullanılan Lazerler 36

4.2.1. Lazerle kesme işlemi 39
4.2.2. Lazerle kaynak işlemi 44
4.2.2.1. Günümüzün endüstrisinde kaynak teknolojisinin yeri 44
4.2.2.2. Kaynak tekniğindeki gelişmeler 46
4.2.2.3. Kaynak kalitesini etkileyen unsurlar 49
4.2.2.4. Lazerle kaynağın temel prensipleri ve uygulama alanları 50
4.2.2.4.1. Anahtar deliği yöntemi ile lazer kaynağı 51
4.2.2.4.2. Lazerle iletimsel kaynak 54
4.2.2.4.3. Hibrit kaynak yöntemi 57
4.2.2.5. Lazer kaynağının avantaj ve dezavantajları 59
4.2.3. Sertleştirme işlemi 60

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 63

5.1. Giriş 63
5.2. Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve İşlemler 63
5.2.1. Malzeme seçimi 63
5.2.2. Lazer tezgahı ve lazer ışın parametrelerinin seçimi 64
5.2.3. Deney numunelerinin hazırlanması 68
5.2.4. Normalizasyon işlemi 69

6. DENEY SONUÇLARININ TARTIŞILMASI 71

6.1. Mikro Vickers Sertlik Ölçümleri 71
6.2. Üç Noktadan Eğme Deneyleri 75
6.3. Metalografik İncelemeler 78
6.3.1. Optik mikroskop incelemeleri 79
6.3.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri 89
6.3.3. Radyografik incelemeler 96

7. SONUÇLAR 98

8. ÖNERİLER 101

KAYNAKLAR 102

ÖZGEÇMİŞ 108

SİMGELER

Al	: Alüminyum
AlGaAs	: Aluminium gallium arsenide
Ar	: Argon
c	: Malzemenin ısı kapasitesi
C	: Karbon
Cd	: Kadmiyum
CO_2	: Karbondioksit
Co	: Kobalt
Cu	: Bakır
D_y	: Yükselteç çapı
E_n	: Enerji seviyesi
Fe	: Demir
H	: Hidrojen
h	: Plank sabiti ($6.62x10^{-34}$js)
He	: Helyum
GaAs	: Gallium arsenide
γ	: Gama
g_{ul}	: Uyarılmış emisyon kesit alanı
k	: Isı iletim katsayısı W/m.ºC
Kr	: Kripton
L	: Aktif ortam uzunluğu
m	: Kütle
M	: Aktif ortamın doyuma geçmeden önce yükselteç geçiş sayısı
Mg	: Magnezyum
Mn	: Mangan
Mo	: Molibden
μm	: Mikrometre
N_2	: Azot
N_n	: E_n enerji seviyesindeki elektron nüfuzu
Ne	: Neon
Nd	: Neodymium
Ni	: Nikel
nm	: Nanometre
η	: Ortamın kırılma indisi
P	: Fosfor
Q	: Enerji miktarı
Δt	: Sıcaklık artış miktarı
θ	: Demet sapması (radyan)
Ti	: Titanyum

t_s	: Demetin doyuma ulaşması için geçmesi gereken minimum süre
Si	: Silisyum
XeCl	: Xenon chloride
υ	: Yayılan elektromanyetik dalganın frekansı
Zn	: Çinko
ZnSe	: Çinko Selenid

KISALTMALAR

COIL	: Kimyasal Oksijen İyot Lazer(Chemical Oxygen Iodine Laser)
CVL	: Bakır Buharı Lazeri(Copper Vapour Laser)
CW	: Continuous Wave
DC	: Doğru akım
FL	: Odak uzunluğu (Focal Length)
FR	: Tam Yansıyan (Full Reflectivity)
HR	: Yarı Yansıyan(Half Reflectivity)
HV	: Vickers sertlik değeri
ITAB	: Isı tesiri altındaki bölge
J	: Joule
kW	: Kilowatt
LASER	: Light amplification by stimulated emission of Radiation
LPG	: Likit Petrol Gazı
MAG	: Aktif gaz altında eriyen elektrot yöntemi
MASER	: Microwave amplification by stimulated emission of Radiation
MIG	: Asal gaz altında eriyen elektrot yöntemi
Multi-Blower	: Çoklu üfleyici
NB	: Norm British
Nd:CAM	: Neodimyum Cam Lazeri
Nd:YAG	: Neodimyum Lal taşı Lazeri
P265 NB	: Uluslar arası bir çelik standardı
PRRM	: Pulse Repetition Rate Mode (Darbe Tekrarlama Oran Modu)
RF	: Radyo frekansı
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
TEM	: Işın Modu
TIG	: Tungsten inert gaz
YAG	: Yttrium aluminium garnet

ŞEKİL LİSTESİ **SAYFA NO**

Şekil 3.1. İki enerji seviyeli sistem. 12

Şekil 3.2. Atomun uyarılması 13

Şekil 3.3. Kendiliğinden emisyon 13

Şekil 3.4. Uyarılmış Emisyon 15

Şekil 3.5. Lazer ışınının elde edilmesi 16

Şekil 3.6. Lazeri oluşturan temel elemanlar 18

Şekil 3.7. Bir lazerin ışın demetinin genişlemesi 26

Şekil 3.8. Beyaz ışığın prizma tarafından dağılması 28

Şekil 3.9. Lazer ışın demetinin; a) Beklenen, b) Gerçek, enerji dağılımları 30

Şekil 4.1. Lazer ile kesilmiş bir östenit paslanmaz çelikte ITAB oluşumu 35

Şekil 4.2. Kesilen bir metalde kesme yüzeyinde oluşan deformasyon 35

Şekil 4.3. Işın yansıtıcı bakır aynalar 37

Şekil 4.4: Lazer odaklama lensleri 37

Şekil 4.5. Materyal işlemede kullanılan bir lazer düzeneği 38

Şekil 4.6. Odaklanma düzeneği 38

Şekil 4.7. Kesme işlemi için hazırlanmış bir lazer tezgahı 41

Şekil 4.8. Lazer ışınının kesilen iş parçasına nüfuzu ve kesim işlemi 42

Şekil 4.9. Gaz jet takviyeli lazer kesme işlemi 43

Şekil 4.10. Elektron ışını ile kaynak makinesinin temel elemanları 48

Şekil 4.11. Lazerle kaynak işleminin gösterilmesi 52

Şekil 4.12. Lazerle kaynak işlemi 52

Şekil 4.13. Farklı kaynak hızlarında anahtar deliği oluşumu 53

Şekil 4.14. Kaynak hızının Anahtar Deliği oluşumuna etkisi 53

Şekil 4.15. Lazer ile iletimsel kaynağın sert metal levhalara uygulaması 54

Şekil 4.16. İletimsel kaynak düzeneği 55

Şekil 4.17. Lens ve ayna kullanarak lazer ışınının odaklanması 56

Şekil 4.18. Audi araçlarının lazer ile kaynaklanması 57

Şekil 4.19. Kaynak kesit görüntüleri 57
Lazer-TIG Kaynağı b) Lazer Kaynağı c) TIG kaynağı
Şekil 4.20. Lazerle hibrit kaynak 59
Şekil 4.21. Lazerle yapılmış iki kaynak 60
Şekil 4.22. Lazer ile sertleştirme işlemi 61
Şekil 4.23. Lazer ile lokal sertleştirme işlemi 62
Şekil 5.1. Lazer makinesi genel görünüm 65
Şekil 5.2. Koruyucu gaz için yapılan çoklu üfleme (multi-blower) sistemi 66
Şekil 5.3. Koruyucu gaz için yapılan çoklu üfleme sisteminin kesim kafasına montajı 67
Şekil 5.4. Eğme deneyi numunelerinin ebatları 68
Şekil 5.5. Radyografi deneyi numune ebatları 68
Şekil 5.6. Metalografik deneyler (SEM) numune ebatları 69
Şekil 6.1. Normalize edilmiş lazer kaynaklı numunenin sertlik ölçümleri 72
Şekil 6.2. Lazer kaynaklı numunenin sertlik ölçümleri 73
Şekil 6.3. MAG kaynaklı numunenin sertlik ölçümleri 74
Şekil 6.4. Normalize edilmiş MAG kaynaklı numunenin sertlik ölçümleri 74
Şekil 6.5. Lazer kaynaklı numunenin Yük-Basma mesafesi grafiği 76
Şekil 6.6. Normalize edilmiş lazer kaynaklı numunenin Yük-Basma mesafesi grafiği 77
Şekil 6.7. Normalize edilmiş MAG kaynaklı numunenin Yük-Basma mesafesi grafiği 77
Şekil 6.8. MAG kaynaklı numunenin Yük-Basma mesafesi grafiği 78
Şekil 6.9. Kaynaklama işlemi sonrası oluşabilecek kusurlar 79
Şekil 6.10. Optik mikroskop cihazının görüntüsü, Olympus PME 3 80
Şekil 6.11. Ana malzeme, 50x büyütme 81
Şekil 6.12. Ana malzeme, 100x büyütme 81
Şekil 6.13. ITAB bölgesi, 200x büyütme 82

Şekil 6.14. ITAB bölgesi, 500x büyütme 82

Şekil 6.15. Kaynak bölgesi, 100x büyütme 83

Şekil 6.16. Kaynak bölgesi, 200x büyütme 83

Şekil 6.17. Kaynak bölgesi, 500x büyütme 84

Şekil 6.18. Ana yapı- ITAB bölgesi, 50x büyütme 85

Şekil 6.19. Ana yapı- ITAB bölgesi, 100x büyütme 85

Şekil 6.20. ITAB- kaynak bölgesi, 50x büyütme 86

Şekil 6.21. ITAB- kaynak bölgesi, 100x büyütme 86

Şekil 6.22. ITAB- kaynak bölgesi, 200x büyütme 87

Şekil 6.23. ITAB- kaynak bölgesi, 500x büyütme 87

Şekil 6.24. Ana metal-ITAB- kaynak bölgesi, 50x büyütme 88

Şekil 6.25. Ana metal-ITAB- kaynak bölgesi, 100x büyütme 88

Şekil 6.26. SEM cihazının temel parçaları 90

Şekil 6.27. SEM cihazının görüntüsü, ZEISS EVO LS10 90

Şekil 6.28. Lazer kaynaklı numunenin birleşme noktasının makro görüntüsü 53X 91

Şekil 6.29. Lazer kaynaklı numunenin kaynak dikişinin gösterilmesi 91

Şekil 6.30. Ana metal üst yüzeyden SEM görüntüleri 92
a: 2.57 K X, b: 5,61 K X, c: 10.16 K X

Şekil 6.31. 45º açı ile kesilen kaynak yüzeyinin SEM görüntüleri 93
a: 1,06 K X, b: 2,50 K X, c: 5.01 K X, d: 10.05 K X

Şekil 6.32. 45º açı ile kesilen kaynak yüzeyinin SEM görüntüleri 93
a: 1,02 K X, b: 2,51 K X, c: 5.08 K X, d: 10.09 K X

Şekil 6.33. 45º açı ile kesilen ITAB yüzeyinin SEM görüntüleri 94
a: 1,07 K X, b: 2,50 K X, c: 5.01 K X, d: 10.16 K X

Şekil 6.34. 45º açı ile kesilen kaynak metali – ITAB geçiş bölgesi yüzeyinin SEM görüntüleri 94

Şekil 6.35. Kaynak metali üst yüzeyinden SEM görüntüleri 95
a: 2.50 K X, b: 5,06 K X, c: 10.05 K X

Şekil 6.36. ITAB metali üst yüzeyinden SEM görüntüleri 95

a: 2.50 K X, b: 5,06 K X, c: 10.16 K X

Şekil 6.37. X-Ray radyografisi 97

ÇİZELGE LİSTESİ **SAYFA NO**

Çizelge 3.1. Işığın dalga boylarına göre bölgelere ayrılması 17

Çizelge 3.2. Çeşitli tipteki lazerler için aktif ortam parametreleri 21

Çizelge 3.3. Düşük yoğunluklu kazanç ortamlı lazer sistemlerine ait optik parametreler 24

Çizelge 3.4. Düşük yoğunluklu kazanç ortamlı lazer sistemlerine ait optik parametreler 25

Çizelge 3.5. Yaygın olarak kullanılan lazerlerin uyumluluk mesafeleri 29

Çizelge 4.1. Metallere ait ısı iletkenlik ve elektriksel iletkenlik sayıları 34

Çizelge 4.2. Endüstride kullanılan lazerlerin karakteristik özellikleri 39

Çizelge 4.3. Lazerlerin güç yoğunluğuna göre uygulama alanları 39

Çizelge 4.4. Yıllara göre kaynak tekniğinin gelişimi 45

Çizelge 5.1. Seçilen malzemenin kimyasal analizi 64

Çizelge 5.2. Seçilen malzemenin mekanik özellikleri 64

Çizelge 5.3. Lazer ışın karakteristikleri ve kapasitesi 66

Çizelge 5.4. Kaynak işlemi için seçilen değerler 67

1. GİRİŞ

1910'lu yıllarda Einstein "uyarılmış yayım" ilkesini ortaya attı. 1940'ta Valentin A. Fabrikent doktora tezinde moleküler kuvvetlendirmenin mümkün olup olmayacağını tartışıyordu. 1953'te C.H. Towness ve A. L. Schawlow, Einstein' in teorisini mikrodalga frekansına uyarlayarak ilk MASER'i (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) gerçekleştirdiler. 1954'te Robert H. Dicke bir ters toplanma meydana getirmek için kısa bir uyarma darbesi kullanma teorisini ortaya attı. Bu ters toplanmanın, kendiliğinden meydana gelmiş kuvvetlendirilmiş emisyondan şiddetli bir patlama üretmesi beklenmekteydi. 1957'de Gordon Gould Katı Hal Tip Lazer yapısının bir parçası olan Fabri-Perrot boşluğunu tasarladı. 1958'de Schawlow ve Townes, bir optik mazerin yapısının çeşitli durumlarını açıklayan "Infrared and Optical Masers" başlıklı bir makale yayınladılar. Bu makalede lazerlerin uygulanabilirliği konusunda birçok konu tartışılıyordu. 16 Mayıs 1960'ta, Maiman ve arkadaşları pembe bir yakut çubukta ilk lazer olayını gerçekleştirdiler.

Maiman' ın gösterisinin ardından IBM'den Sorakin ve ark., Uranyum katkılı Kalsiyum Flüorid lazerleri için flaş pompalı çubuk tasarımında çalıştılar. Bu lazerle Kasım 1960'taki ilk denemelerinde başarılı oldular. İki hafta sonra, Sorakin ve ark., Samaryum katkılı Kalsiyum Flüoridle lazer etkisini elde ettiler. Lazer etkisini gösterecek yeni materyaller bulunması için farklı çalışmalar yapıldı. 12 Aralık 1960'ta Ali Javan, William R. Bennet ve Donald Herriot Neon-Helyum gaz karışımında lazer etkisini elde ettiler. 1961 yılında Neodimyum lazer geliştirilmiştir. 1963'te C. Kumar ve N. Patel Karbondioksit, 1964'te Joseph Geusic, H. M. Marcos ve Le Grnd Von Uitert Nd:YAG'da ve William Bridges Argon-İyonda lazer etkisini elde ettiler. Günümüzde lazerler katı, sıvı, gaz ve plazma materyallerinde ve hemen hemen her dalga boyunda elde edilebilmektedir.

Elli yılık bir geçmişi olan lazer, sürekli gelişen bir uygulama alanı potansiyeline sahiptir. Bu alanlar örneklenirse, tıp, biyoloji, kimya, elektronik, metroloji, meteoroloji, endüstriyel materyal işleme, askeri amaçlı teknolojiler uygulama alanı olarak sayılabilir. Lazerler askeri amaçlı mesafe ve hız ölçme yoluyla hedef tayini, uydu haberleşmesinde kullanılır. Bunlara ilave olarak uzaktan etki yoluyla uçakların, gemilerin, tankların, füzelerin kontrollü olarak yönlendirilebilmesinde kullanılmaktadır. Tıpta da geniş bir

uygulama alanı bulan lazerler, günümüzde vazgeçilmez üstünlükleriyle birçok ameliyatta kullanılmaktadır.

Endüstriyel uygulamaları da çok geniş olan lazerlerle, materyal kesme, kaynaklama, markalama, sertleştirme gibi birçok işlem kolaylıkla yapılabilmektedir. Nükleer enerji alanında ise lazerin çeşitli gelişmelere yol açacağı beklenmektedir.

Bu tez çalışmasında 2,8 KW gücüne sahip bir CO_2 lazer ile iki metal levhanın alın kaynağı ile birleştirilmesi amaçlanmıştır. CO_2 lazer ile çelik levhalar kaynatılmış ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Lazer ile kaynak işlemi ince ve kalın levhalarda 20 yıllık bir süreç içerisinde başarı ile gerçekleştirilmiştir. Dairesel profile sahip metalik malzemelerde kaynak işlemi endüstrinin ihtiyaç duyduğu bir birleştirme işlemidir. Günümüzde hemen tüm hidrolik ve pnömatik sistemlerde kullanılan çelik tanklar ve onların bağlantı aksamları ve yine LPG tankı olarak da otomotiv sektöründe ve yaygın olarak kullanılmaktadır.

Lazer ile kaynaklanan çelik levhalar TSE standartlarına uygun olarak çekme deneyi, üç noktadan eğme deneyi, Metalografik Deneyler (SEM) ve sertlik ölçüm deneylerine tabi tutulmuştur. Tüm bu deneyler ile lazer kaynağının üstün özelliklerinin malzeme üzerindeki etkilerinin incelemesi yapılarak kaynak bölgesinin mekanik özelliklerinin tespiti amaçlanmaktadır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI

Otomotiv sektörü, boru hattı projeleri ve diğer sanayi alanlarında yaygın olarak kullanılan çelik malzemeler hakkında deneysel ve teorik birçok çalışma yapılmıştır. Çelik malzemelerin mekanik özelliklerinin tespiti, birleştirme yöntemlerinin malzemelerde meydana getirdiği deformasyonlar ve malzeme üzerinde bulunması muhtemel içyapı düzensizliklerinin, değişken yükleme şartlarında malzeme ömrüne olan etkisi gibi konular incelenmiştir.

Akman (2006) yüksek lisans çalışmasında, Ti6Al4V titanyum alaşımlı alüminyum levhaların Darbeli Nd:YAG lazer makinesi kullanılarak yaptığı kaynakta, lazer parametrelerini belirlemek için deneysel çalışmalar yapmıştır. Test numuneleri alın kaynağı ile birleştirilmiş, bu işlemi de iki yönlü kaynaklama yöntemi ile yapmıştır. Elde edilen kaynak dikişinin derinliğine, lazer darbe süresi ve diğer lazer darbe parametrelerinin etkileri incelenerek optimum parametreleri ortaya koymuştur.

Al-Sulaiman ve ark. (2006), lamelli şekilde üretilmiş karbon fiber takviyeli kompozit malzemeleri değişik lazer güçlerinde azot gazı kullanarak lazer kesimini gerçekleştirerek kesim kenarlarında oluşan matriks ve takviye malzemelerindeki deformasyonları incelemişlerdir. Başarılı bir kesim için; lazer ışın gücü, kesme kafası hızı, odak mesafesi, nozzle geometrisi gibi parametrelerin tespitini deneysel olarak sunmuşlardır.

Anand ve ark. (2006) makalelerinde, otomotiv üretiminde sıklıkla kullanılan düşük karbonlu çeliklerin lazer alın kaynağı ile kaynatılması ile meydana gelen kaynak dikişinin malzeme çeşidine göre farklı yorulma davranışları sergilemelerini incelemişlerdir. Yapılan deneyler ile galvaniz kaplı kaynak numunelerinin yorulma ömrünün 1,5 kere daha düşük olduğu görülmüştür. Mikro yapı incelemelerinde kaynak bölgesinde çinkonun, yüzeyden aşağıya doğru penetrasyonu neticesinde çatlak oluşumlarının gözlemlendiği ortaya konulmuştur.

Anık (1991) kitabında, bilinen tüm klasik kaynak yöntemlerini detaylı olarak tarif etmiştir. Kaynak kalitesi, kaynak kusurları, kaynak makineleri ve onları kullanma teknikleri, kaynak makinelerinin parçaları ve kaynak sırasında kullanılan aktif ve asal gazların kaynak işlemine olan etkileri vb. durumları tafsilatlı olarak anlatmıştır.

Aslan (1987), “Lazerin yeni uygulamaları” isimli makalesinde lazerlerin teknolojik gelişiminden bahsettikten sonra otomotiv sektöründe lazerin etkin bir biçimde kullanıldığını sayısal verilerle ortaya koymuştur. Lazer kaynağının kullanım alanlarını sıralamıştır. Black (1999), darbeli mod CO_2 lazer kullanarak yumuşak çelik malzemelerde kesme işlemi gerçekleştirmiştir. Çalışma ile darbe frekansının değişiminin kesme kalitesine etkisini incelemiş düşük darbe frekansında yapılan kesmelerin daha verimli olduğunu ortaya koymuştur.

Bagger ve Olsen (2001), 2,6 kW lazer kesim makinesi kullanarak 1.8 mm kalınlığındaki G 260 standartlı levhaları darbeli ve sürekli ışın kullanarak 5” ve 7.5” odak mesafeli lensler kullanarak değişken hız, basınç ve odak mesafesi parametreleri kullanarak kesmiştir. Kesim köşelerindeki yüzeylerde erime ölçümlerini yaparak minimum pürüzlülük ve köşe geometrisinin sağlanması için optimum parametreleri tespit etmiştir.

Bayraktar ve ark. (2004), petrol ve gaz boru hatlarında kullanılan çelik boruların yüksek güçteki (10-25 kW) CO_2 lazer makineleri ile kaynaklanabilmesi durumunda çatlak oluşumlarının, çekmeli darbe ve çarpma deneyi ile belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada çentikli ve çentiksiz silindirik numuneler lazer ile kaynaklanarak iki tip kırılma davranışı irdelenmiştir. Deneyler sırasında sıcaklık değerleri negatif seçilmiş ve bunun için sıvı azot ile soğutma yapılmıştır. Çalışmaları sonucunda gevrek ve yumuşak kırılma sıcaklıkları tespit edilmiştir. Kaynaklama bölgesinde meydana gelen yüksek ısı geçişlerinin kaynak merkezinden 2-5 mm civarındaki alanda meydana getirdiği termal gerilimlerin (ITAB) etkileri de incelenmiş ve ısı geçişi ile meydana gelen mikro yapı gösterilmiştir.

Bayraktar ve ark. (2004), çalışmalarında karbon oranı düşük çelik levhaların TIG, lazer ve punta kaynağı ile kaynaklanması ile elde edilen kaynaklı numunelerin çekmeli darbe testi ile kaynak mukavemetleri incelenmiştir. Deneyler gevrek kırılma durumunun görülebilmesi için 0 ºC ile -200 ºC arasında yapılmıştır. Çentikli ve çentiksiz formlar verilen numunelerin mikro yapıları için yapılan analizde tane büyüklüğü ve sıcaklık geçiş davranışının kırılmaya olan etkileri ortaya konmuştur.

Bayraktar ve Kaplan (2005) makalelerinde, farklı karbon ve mangan içeriklerine sahip malzemelerin TIG, Lazer, Spot (punta) kaynağı ile kaynaklanması ile elde edilen sonuçların incelenerek bir kaynak limit diyagramı çıkarmıştır. Bu diyagram, karbon ve

mangan oranı belirlenmiş bir malzemenin seçilen kaynak yöntemine yöre beklenen kaynak performansını yaklaşık olarak tahmin edilmesine olanak sağlamaktadır.

Boronski (2006), silindirik malzemelere MAG ve lazer kaynağını uygulayarak malzemeleri çekme testi ve çekme yorulması testine tabi tutmuştur. Gerilme - %Uzama grafikleri ve yorulma analizleri ile kaynak yöntemlerinin kaynak mukavemetine olan etkileri incelenip, kıyaslamıştır.

Cao ve ark. (2006), çalışmalarında magnezyum alaşımlı levhaların CO_2 ve Nd:YAG lazer ile kaynaklanmasında yeni teknikler denenerek, kaynak sonrası malzeme özelliklerini incelemişlerdir. İlave dolgu teli kullanılması ile kaynak mukavemetinin artırıldığı yapılan mekanik deneyler ile ortaya koyulmuştur. Endüstride hangi malzemeye hangi lazer kaynak tezgâhının uyumlu olduğunu da ortaya koymuştur.

Cicala ve ark. (2005), Al-Mg-Si alaşımlı levhalarda lazer kaynağı ile meydana gelen ısı çatlaklarının oluşumları incelenmiştir. Lazer gücü, odak pozisyonu, kaynak ilerleme hızı, koruyucu gaz tipi, gaz akış debisi, alaşımda kaynak sonrası meydana gelen eriyik havuzunun geometrisi, metal buharlaşma oranı, eriyik çözeltisinin spektrası gibi kaynak işlem parametrelerinin çatlak oluşumuna etkileri bir grafik ile az olandan çok olana doğru sıralanmıştır. Tüm bu parametrelerin değiştirilmesi ile elde kaynak numuneleri çekme testi ile test edilerek bu etkiler sınıflandırılmıştır. Cora (2002), Lazer fiziğinin temellerini anlattığı makalesinde lazerlerin çeşitlerini ve kullanım alanlarını detaylı olarak anlatmıştır.

Costa ve ark. (2003), sert çelik alaşımı ile yumuşak çelik alaşımının CO_2 ve Nd:YAG lazer makineleri ile kaynaklanması işlemi gerçekleştirilmiştir. Lazer ışınının; tipi, odak noktası, lazer gücü, kaynak hızı, yardımcı gaz v.b. parametrelerin kaynak kalitesine olan etkisi incelenmiştir. Takım çeliklerinin normal çelikler ile kaynatılması işlemi için lazerle kaynaklama yönteminin kullanılabilirliğini ortaya koymuştur.

Çalık (2004) doktora çalışmasında, elektron ışın kaynağı ile paslanmaz çelik levhaları kaynatmıştır. Elektron ışın kaynağının tüm teorik bilgilerinin anlatıldığı tezde bu kaynak yönteminin avantaj ve dezavantajları sıralanmıştır. Çelen (2006) yüksek lisans çalışmasında, temel işlem parametrelerinin özellikle birleştirme dayanımı ve kaynak kalitesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca, bir darbeli Nd:YAG lazer ışın kaynağıyla 304 kalite paslanmaz çeliklerin alın dikişi şeklinde kaynak edilebilirliği konusu araştırılmıştır. Çalışma sırasında değişken olarak farklı gerilim, darbe enerjisi ve darbe süreleri kullanarak farklı numuneler elde etmiştir. Elde edilen numuneler

sırasıyla; çekme deneyi, 3 noktadan eğme deneyi ve mikro sertlik ölçüm deneyleriyle test edilmiş, bunlara ilave olarak mikro yapı incelemeleri ile numune farklılıkları analiz edilmiştir. Deney sonuçları ve metalografik incelemeler ışığında en uygun parametreler tespit edilerek paslanmaz çeliklerin kaynaklanması işleminde kullanılacak Nd:YAG lazer makinelerinden optimum verim elde edilmiştir.

Çevik (2008) yüksek lisans çalışmasında, kompakt çekme C(T) numunelerinde direnç eğrilerini (R-eğrisi) elde etmek için lazer kaynaklı alüminyum alaşım 6056 plakalar kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan alüminyum alaşım 6056 plakalar kaynaklanarak 3 tip numune elde edilmiştir. Elde edilen numunelerde çatlak izlemesi yapılacak kısımlar üç farklı bölgede incelenmiştir. Bunlar; kaynak bölgesi (WM), ısıdan etkilenen bölge (ITAB) ve ana metal (BM) şeklindedir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen J-Δa grafiğindeki J-Integral değeri ITAB bölgesinde WM bölgesinden daha büyük, WM bölgesinde de BM bölgesinden daha yüksek çıkmıştır.

Demokan (1983), ” Lazer nedir ne değildir?” isimli makalesinde lazer teknolojisi hakkında bilgiler verdikten sonra endüstriyel amaçlı lazerlerin kullanım alanlarını ortaya koymuştur. Ding ve ark. (2006), lazer ile kaynaklanmış Ni_3Al levhalarda kaynak sırasında mikro çatlakların oluşmasına neden olan ITAB (Isı Tesiri Altındaki Bölge) etkisini incelemiştir. Elektron Tarama Mikroskobu (SEM) ile ITAB oluşumunu gözlemlemiştir. Kaynak sırasında oluşan ITAB bölgesinin minimize edilmesiyle sertleşme ve buna mukabil oluşan mikro çatlakların azaltılacağını ortaya koymuş ve lazer kaynağının bu işlemdeki performansını göstermiştir.

Du ve ark. (2004), titanyum alaşımlı levhalarda anahtar deliği yöntemi ile lazer kaynağını gerçekleştirmişlerdir. Bu işlem sırasında kullandıkları lazer ışınının malzeme içerisine kalınlık boyunca dalmasını inceleyerek başarılı bir penetrasyon için gerekleri ışın karakteristiklerini ve yardımcı gazların etkilerini incelemişlerdir.

Durmuş (2006) doktora çalışmasında, toz metalürjisi (T/M) yöntemiyle Al matrisli SiC takviyeli kompozit malzeme üretilerek lazer kaynağı ile birleştirilmesini incelenmiştir. Değişken oranlarda kullanılan takviye malzemesi ile farklı sıcaklıklarda sinterleme yapılarak elde edilen numuneler 5mm kalınlığına inceltilerek değişken hızlarda kaynaklama işlemi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çekme ve sertlik ölçme deneyleri sonucunda takviye malzeme oranı arttıkça gevrek kırılmaların ve sertliğin arttığı görülmüş ve kaynak hızı arttıkça çekme dayanımının azaldığı sertliğinse arttığı gözlemlenmiştir.

Eibl ve ark. (2003), ince alüminyum levhaların CO_2 lazer ile bilinen tüm geometrik biçimlerde kaynaklanması işlemini gerçekleştirmişlerdir. Kaynaklama işlemi sırasında hidrojen gevrekleşmesinin kaynak bölgesine olan etkisi incelenmiş, yorulma etkisi ile kırılma davranışları incelenmiştir. Kaynak işlemi öncesinde kaynak bölgesinin iyice temizlenmesi ile kaynak mukavemetinin artırıldığı tespiti vurgulamışlardır.

Ghany ve Newishy (2005), 1.2 mm kalınlığındaki paslanmaz çeliği darbeli ve CW Nd:YAG lazer cihazıyla kesilmesi işlemini gerçekleştirmiş, farklı darbe frekanslarının kesme yüzeylerine etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada kesme hızı, odaklama açısının kesme yüzeylerinde meydana getirdiği değişimler incelenmiştir.

Günay ve ark. (2001), lazer ve plazma kaynağı hakkında detaylı bir çalışma yapmışlar, temel kaynak prensiplerini ortaya koymuşlardır. Jin ve Li (2003), lazerle kaynak yöntemlerinden biri olan ve kalın malzemelerin kaynaklanmasında kullanılan anahtar deliği yöntemini ele alan çalışmalarında anahtar deliği oluşumunu incelemişlerdir. Kaynak hızının, malzemenin lazer ışınını yutma oranının ve lazer odaklanma açısının anahtar deliği çapı ve genişliğine olan etkilerini tespit etmişlerdir.

Jokinen ve Kujanpaa (2003), 3 kW gücünde bir Nd:YAG lazer kullanarak AISI 304L paslanmaz çeliği hibrit kaynak yöntemi ile kaynatmışlardır. Hibrit kaynağın üstünlüklerinin irdelendiği makalede lazer ışınının yanında bir tel takviyesi ile geniş aralıklı kaynak yüzeylerinde kaynak işlemini gerçekleştirmişlerdir. Yine farklı bir hibrit kaynağı yöntemi olan lazer ve TIG kaynak yöntemlerini birleştirerek kaynak işlemini gerçekleştirmişlerdir.

Ion (2005), lazerle materyal işleme teknolojilerinden; kaynak, ısıl işlem, yeni materyal oluşturma gibi konularda gelişen teknoloji ile birlikte yenilenen teknikleri bilimsel çalışmaları topladığı el kitabında lazer kaynak teknolojisini malzeme yapısına göre sınıflandırarak başarılı kaynaklama parametrelerini yayınlamıştır.

Kim ve Moon (2004), nükleer reaktörlerde iklimlendirme amaçlı eşanjörlerin üretiminde kullanılan inconel600 ve inconel690 alaşımlı metallerin Nd:YAG lazer yöntemini kullanarak kaynak edilmesi ile kaynak bölgesinin gerilim altında korozyon davranışları incelenmiştir. 350 ºC sabit sıcaklıkta kostik, sülfat ve su gibi değişken korozif sıvıların 207- 414 MPa basınçlarda farklı korozyon yorulması zamanları gözlemlenmiştir. Lazer kaynağının düşük ısı girdisi ile elde ettiği başarılı kaynak performansı tüm deneylerde gözlemlenmiştir.

Kuo ve Lin. (2006), otomotiv endüstrisinde sıklıkla kullanılan alüminyum alaşımlı levhalarda darbeli mod ve sürekli dalga modu ile dolgu teli kullanmaksızın lazer kaynağını gerçekleştirmişlerdir. İki tip alüminyum alaşımının ayırt edici özelliği ise değişken Mg oranlarıdır. Mg oranı yüksek olan alaşımda kaynaklama sırasında meydana gelen Mg buharlaşması nedeniyle gözeneklilik ve kütle kaybı oluştuğundan çekme deneyi sırasında daha düşük bir çekme gerilmesi elde edilmiştir. Çalışmalarında kaynak bölgesine çelik küreler ile baskı yapılarak, kaynak bölgesindeki çatlak oluşumları mikro yapı resimleri incelemişlerdir.

Lee ve ark. (2003), 9Cr-1Mo katkılı çeliğin 5 kW CO_2 lazer ile kaynaklanması işlemi gerçekleştirilmiştir. Kaynaklanma öncesi numuneler nitrasyon ile sertleştirilmiş, sonra lazer kaynağı yapılmış ve 250, 500 ve 750 derece sıcaklıklarda tavlanarak, 3 tip deney numunesi elde edilmiştir. Kıyaslamak için kaynaksız fakat çentikli, yine aynı ısıl işlemleri görmüş çelik mekanik deneylere tabi tutulmuştur. Malzeme test metotlarından darbe ve çekme testleri deney numunelerine uygulanmış ve çatlak ilerleme hızı da/dN-ΔK grafiği tespit edilmiştir.

Li ve Fontana (1998), AISI 304L ve AISI 12L13 paslanmaz çelik malzemelerde otojen kaynak işlemini gerçekleştirmişlerdir. Bu makalede paslanmaz çelik hidrolik valfların lazer ile kaynaklanmasının başarı ile gerçekleştirilebileceği ortaya konulmuştur.

Liming ve ark. (2004), AZ31B magnezyum alaşımını hibrit kaynak yöntemiyle kaynaklamışlardır. Hibrit kaynağın (TIG ve Lazer) TIG ve lazer kaynağından daha başarılı sonuçlar verdiğini ortaya koymuşlardır. Kaynak genişliği açısından en dar kaynak dikişinin lazer ile elde edildiğini, kaynak dikiş derinliğinde hibrit kaynağın daha derinlere nüfuz ettiğini deneysel olarak ispatlamışlardır. Ayrıca hibrit kaynağı ile yapılan kaynağın diğer kaynak yöntemlerine nazaran malzeme içyapısında meydana gelen olumsuz değişimleri en aza indirdiğini ve magnezyum alaşımlı metallerde magnezyum buharlaşmasının LATIG kaynağında TIG kaynağına nazaran daha az olduğunu ortaya koymuşlardır. Kalın malzemelerin kaynaklanması için hibrit kaynağı önermişlerdir.

Liu ve ark. (2004),, 6 kW CO_2 lazer makinesi ile iki farklı kaynaklama hızı değerinde (V1= 1016 mm/dk ve 635 mm/dk) 7075-T6 alüminyum alaşımı alın kaynağı ile birleştirilmiştir. Yine aynı çalışmada TIG kaynağı ile kaynaklama yapılarak çekme numuneleri elde edilmiştir. Elde edilen 3 tip numunede 26 saat 120 °C de yapay

yaşlanma işlemine tabi tutulmuş sonrasında sertlik ve çekme dayanımları mekanik testlerle ortaya koyulmuştur. Deneyler sonunda sertlik değerleri açışından yaşlanmaya tabi tutulmuş numunelerin kaynak bölgesi ve ana metal içeriği kıyaslandığında birbirine yakın sertlik değerleri verdiği görülmüştür. Yine çekme dayanımı açısından Lazer ile kaynaklanan numunenin TIG kaynağından daha yüksek dayanımlara ulaştığı ortaya konmuştur.

McPherson ve ark. (2003), 316LN östenit paslanmaz çelik levhaları ark ve lazer ile kaynaklamışlardır. Ark kaynağı ile lazer kaynağını kıyasladıkları çalışmalarında mikro yapı incelemeleri ile lazer kaynağının ark kaynağına göre içyapı farklılıklarını tespit etmişlerdir. Murakami ve ark. (2003), çeşitli hız (1,67mm/s – 16,7mm/s) ve güç (2kW–3,2kW) parametreleri ile lazer ışınının kaynak düzlemine düşüş açısının optimizasyonunu araştırdıkları makalede gözenekli bakır alaşımlı malzemede kaynak işlemlerini gerçekleştirmişlerdir.

Nagels ve ark. (2007), bu makalelerinde lazer kesimi sırasında kesilen çeliğin malzeme muhtevasındaki sülfür içeriğinin kesim kalitesine olan etkisi incelenmiştir. Makale genel lazer kesim prosesleri anlatıldıktan sonra kesilen parçadaki sülfür yüzdesi arttıkça; eriyiğin yüzey gerilimini artırdığını ve metal eriyiğin viskozitesini düşürdüğü için kesme kalitesini olumsuz etkilediğini ortaya koymuşlardır.

Nikumb ve ark. (2005), darbe modu düşük Nd:YAG lazerlerin cam endüstrisinde kesme ve delik delme olarak kullanılabileceğini ortaya koyan bir çalışma yapmışlardır. Nishimoto ve Mori (2004) makalelerinde, paslanmaz çelik malzemelerin lazer kaynak işlemi ile kaynaklanması sırasında oluşan çatlak yapısının, malzemenin içerdiği % Azot miktarına bağlı olarak gösterdiği değişimler incelenmiştir. Ayrıca kaynak bölgesinde meydana gelen ferrit ve östenit mikro yapının çatlak oluşumundaki etkileri ön yüklemeli çekme testi ile incelenmiştir. Çalışmada Azot miktarı nispeten daha fazla olan numunelerin kaynaklama sırasında oluşan ısıl çatlakların oluşumunda daha etkin olduğu hem teorik hem de pratik olarak ortaya konmuştur.

Özcan (2003) doktora çalışmasında değişik malzemelerin işlenmesi için lazer tezgâhlarının özelliklerini incelemiştir. Lazer ışın oluşumunun detaylı olarak anlatıldığı çalışmada bilinen iki lazer kaynak yöntemi detaylı olarak anlatılmıştır. Özkan (1987), mikrodalga isimli eserinde lazer ışınının oluşumu ve şartlandırılması hakkında genel bilgiler sunmuştur.

Pakdil (2005) doktora çalışmasında, havayolu taşıtları için geliştirilmiş yeni alüminyum alaşımlarının lazer kaynağı ile birleştirilmesi neticesinde kaynak bölgesinin hem mekanik özellikleri hem de yorulma davranışları incelenmiştir. Kaynaklama prosesi için 6056 alüminyum alaşımı kaynaklama kusurlarını minimize etmek için AlSi12 dolgu teli kullanılarak CO_2 lazer makinesi ile kaynaklanması gerçekleştirilmiştir. Mekanik özelliklerin tespiti için, mikro ve makro çekme testleri uygulanmış ve elde edilen sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu ortaya konulmuştur. Yine mikro sertlik ölçümleri kaynak sınırından başlayarak ısıdan etkilenen bölgelerde ölçülerek sertlik analizi yapılmıştır. Yorulma davranışlarının tespiti için değişken frekanslarda (R= 0.1-0.7) kaynaklı ve kaynaksız numunelerin çatlak ilerleme davranışları incelenmiştir.

Pakdil ve ark. (2005), lazer kaynağı hakkında genel bilgiler verdikten sonra bu kaynağın avantajlarını ve dezavantajlarını sıralamışlardır. Makalede hibrit kaynağının üstünlükleri anlatılmış ve kalın malzemelerin kaynaklanmasında hibrit kaynak yönteminin kullanılması önerilmiştir. Powell ve ark. (1989), lazer ile titanyum alaşımlarının kesilebilmesi için özel bir Gaz-Jet düzeneğini öneren bir makale yayınlamışlardır. Quintero ve ark. (2005), Nd:YAG lazeri ile (P: 500W, f: 120Hz, Kesme hızı: 5mm/s) çeşitli kalınlıklardaki seramik malzemenin kesilmesini incelemişlerdir. Sisteme ilave ettiği Gaz-Jet takviyesinin kesme kalitesine olan etkisi gaz basınç değişimleri yapılarak ideal kesme için gaz basıncı optimize edilmiştir.

Rao ve ark. (2005), darbeli moda çalışan CO_2 lazer cihazı ile titanyum levhanın kesilmesi işlemini incelemişlerdir. Çalışmada 1mm kalınlığındaki titanyum levhanın kesilmesi sırasında yardımcı gazların (Argon, Azot ve Helyum) kesme kalitesine etkisi incelenmiştir. Helyum gazının titanyum levhaların lazerle kesilmesi işleminde diğer gazlara nazaran daha başarılı sonuçlar sunduğunu tespit etmişlerdir. Rao ve ark. (2005), 3.5 ve 10 kW gücünde darbeli ve sürekli dalga ışın üreten CO_2 lazer cihazları ile beton blokların delinmesi ve kesilmesi işlemini test etmişlerdir.

Tarakçıoğlu ve Özcan (2004), "Lazerler ve Materyal İşleme Uygulamaları" isimli kitaplarında lazerle kaynak işlemi için; lazer ışın şiddeti, odak mesafesi, kaynak ilerleme hızı gibi parametrelerin kaynak dikiş mukavemetine olan etkileri incelenmiş, kaynak için birbirine uygun metaller sınıflandırılmıştır. Tokdemir (2007) doktora çalışmasında, toz metalürjisi ile değişken oranlarda Fe-Grafit takviye malzemesi kullanılarak SAE 1020 birleştirilip, preslenmiş arkasından sinterlenerek elde edilen

deney numuneleri 2,5 kW gücünde bir CO_2 lazer kaynak makinesi ile kaynatılarak sırasıyla; çekme deneyi, eğme deneyi, çentikli darbe deneyi, metalografik incelemeler ve sertlik ölçme deneyi ile test edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda kaynaklama hızı arttıkça sertlik değerlerinin arttığı buna mukabil çekme, eğme ve çentik darbe dayanımlarının azaldığı gözlemlenmiştir.

Tsay ve ark. (2003), AISI 304 kalite paslanmaz çelik malzemelerin 5 kW CO_2 lazer ile kaynaklanması işlemi gerçekleştirilmiştir. Kaynaklama işlemi sırasında çeliğe emdirilen hidrojen ve havanın kaynak bölgesine olan etkisi incelenmiş, yorulma etkisi ile iki gazında çatlak oluşumu ve çatlak ilerlemesine olan etkileri incelenmiştir. Shackelford (2005) kitabında radyografik inceleme prensiplerini ve Xray görüntüleme işlemini açıklamıştır. Uzun ve ark. (2004) "Lazer kaynağı ve gelişimi" isimli makalelerinde, lazerlerin tarihsel gelişimi ve lazer kaynak teknolojisinin avantajları sıralanmıştır.

Yeşildal (2008) yüksek lisans çalışmasında, otomotiv sektöründe kullanılan birleştirme yöntemlerini incelemiştir. Lazer ve diğer üç yöntem ile birleştirdiği düşük karbonlu soğuk haddeli çeliklerin sertlik ölçümlerini yapmış ve mikro yapılarını incelemiştir. Lazer ile uzaktan kaynaklama yönteminin kullanıldığı deneysel numunelerde kaynak dikişi sertliğinin diğer yöntemlerden daha yüksek olduğu deneysel olarak ortaya konulmuştur.

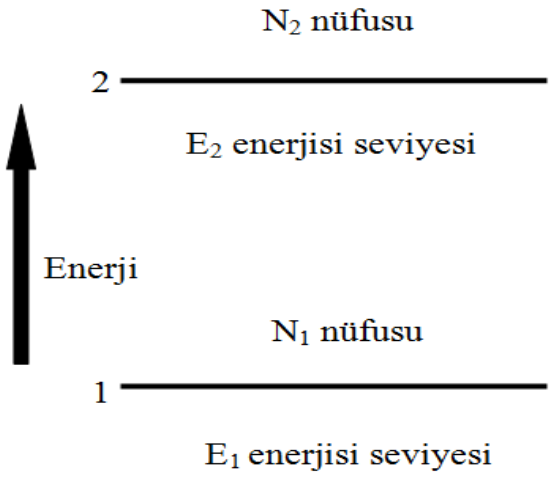
Zhang ve ark. (2006), 304 kalitedeki paslanmaz çeliği su koruması altında 4KW bir Nd:YAG lazer ile kaynaklanması işlemi gerçekleştirmişlerdir. İşlem sırasında özel bir nozzle tasarlamış ve böylece nozzle içerisinden su geçirerek kaynak edilen parçayı atmosferdeki gazın etkisinden arındırmıştır. Böylece daha gözeneksiz ve mukavemeti yüksek kaynak dikişi elde etmiştir.

Zhu ve ark. (2005), AZ31 Magnezyum alaşımlı 1 mm kalınlığındaki levhaların alın kaynağı ile birleştirilmesi işleminde CO_2 ve diyot lazer kullanmıştır. Çalışmanın amacı her iki kaynak tipinin de bu alaşım için en uygun sonuçları verdiği parametrelerin tespitidir. Çalışma neticesinde, gaz türbülansı oluşmasındansa durgun gaz atmosferinin, kaynak dikişi geometrisini düzenlediği görülmüştür. Uygun lazer gücü optimizasyonunun, kaynak çukurlarının ve dikiş içerisinde oluşabilecek küçük deliklerin önlenmesinde kaynak hızıyla doğru orantılı bir şekilde etkili olduğu görülmüştür. Hidrojen gevrekleşmesini önlemek için kaynak hızı optimizasyonunun etkili olduğunu farklı hızlarda elde ettiği numuneleri karşılaştırarak ortaya koymuştur.

3. LAZER FİZİĞİ TEORİSİNİN ÖZETİ

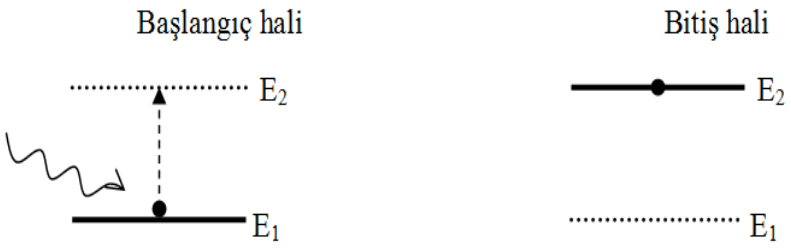
3.1. Kendiliğinden Emisyon

Doğada bulunan her elementin temel yapısını oluşturan atomlar farklı sayılarda enerji seviyelerine sahiptir. Şekil 3.1 de gösterildiği gibi bir atom için E_1 ve E_2 ($E_2 > E_1$) olmak üzere iki enerji seviyesi olduğunu farz edelim. N_1 ve N_2 ise atomun enerji seviyelerindeki elektronların miktarlarını belirtmektedir. Atomun denge halindeki temel enerji seviyesini E_1 olarak düşünülürse, bu atomun enerji seviyesini yükseltmek için uyarılma denilen müdahalenin atoma uygulanması gerekir (Özkan, 1987).



Şekil 3.1. İki enerji seviyeli sistem

Genel bir ifadeyle lazer yeni bir dalga üreteci demektir. Bu üretecin emisyonunu anlamak için atomların nasıl uyarılmaları gerektiğini ve bu enerji alış-verişi sırasında meydana gelen değişimlerin iyi bilinmesi gerekir. E_1 enerji seviyesinde bulunan bir atomun E_2 enerji seviyesine çıkabilmesi için E_2- E_1 farkı kadar bir enerjinin atom tarafından absorbe edilmesi gerekir (Şekil 3.2). Bu enerji farkından daha az bir enerji sürekli olarak gelse bile atomda bir uyarma yapmaz.

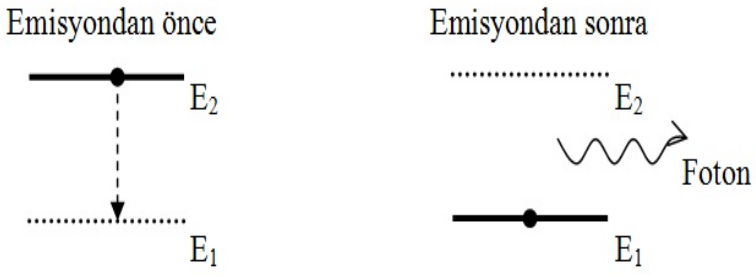


Şekil 3.2. Atomun uyarılması

Temel enerji seviyesindeki bir atom daha yüksek bir enerji seviyesine aşağıdaki durumlardan birisinin yerine getirilmesiyle çıkabilir;

- Isıtılarak,
- Basınç uygulanarak,
- Hızlandırılmış parçacıklarla bombardıman edilerek,
- Hızlandırılmış elektronlarla bombardıman edilerek,
- Bir ışık demetinin etkisine maruz bırakılarak.

Yukarıda sayılan şartlardan birinin meydana gelmesiyle E_2 enerji seviyesine çıkmış bir atom E_1 enerji seviyesine kendiliğinden inmek isteyecektir. Atom daha önce uyarılarak aldığı enerjiyi ortama bırakarak geçiş işlemini tamamlar ve kararlı bir hale geçer. Söz konusu atomdan açığa çıkan enerji (E_2- E_1), Şekil 3.3 te gösterildiği gibi ortamda elektromanyetik dalga (foton) olarak yayılacaktır. Bu olaya kendiliğinden emisyon (*Spontaoneus emission*) denir. Bir atom uyarılmış olarak, yaklaşık 10^{-8} s kalabilmektedir (Özcan, 2003).



Şekil 3.3. Kendiliğinden emisyon

Yukarıda ifade edildiği gibi bir elektron E_2 enerji seviyesinden daha düşük olan E_1 enerji seviyesine kendiliğinden geçerse ΔE değerinde elektromanyetik bir dalga yayar. Atomun bıraktığı bu dalgaya foton da denir. Yayılan bu fotonun enerjisi formül 3.1'den hesaplanır (Özkan, 1987).

$$\Delta E = E_2 - E_1 = h.\upsilon \tag{3.1}$$

Yayılan bu dalganın frekansı ise formül 3.2 ile hesaplanır.

$$\upsilon = (E_2 - E_1) / h \tag{3.2}$$

Formülde; υ: Yayılan elektromanyetik dalganın frekansı, E_2: Uyarılmış atomun enerji seviyesi, E_1: atomun temel enerji seviyesi, h: Planck sabitidir (6.62×10^{-34} js).

Kendiliğinden emisyon olayı bazı durumlarda görülmeyebilir. Yani ortama elektromanyetik radyasyon yayma olayı gerçekleşmeyebilir. Bu durumda bir alt enerji seviyesine geçişte ortama bırakılması gereken ΔE kadar bir enerji, atomun kinetik enerjisinin artmasına sebep olur.

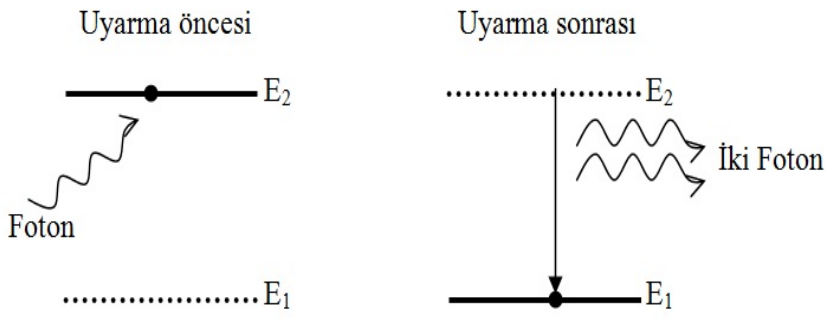
3.2. Atomların Işıkla Uyarılması

Atomların yapısı incelendiğinde elektron sayılarına göre farklı yörüngelerde elektron dizilmeleri görülür. Her atomun kendine özgü bir enerji seviyesi vardır. Atomlar doğal ortamlarda kararlı olarak bulunurlar. Atomlara dışarıdan yapılan müdahalelerle elektron yapıları değiştirilerek kararlı yapıları bozulursa, atom kararlı olduğu yörüngeden bir üst yörüngeye geçerek uyarılır. İşte E_1 gibi kararlı yörüngede bulunan bir atoma frekansı υ olan elektromanyetik bir dalganın sahip olduğu enerjinin çarpması durumunda bu enerji atom tarafından yutulur (Şekil 3.2).Yutulan enerji ile yörüngesi değişen atom kararsız E_2 yörüngesine geçiş yapar. Bu olay literatürde yutma (*absorb*) olarak tanımlanmıştır (Özcan, 2003).

3.3. Uyarılmış Emisyon

Eğer atom bir ışık demeti ile uyarılmış ise enerjisini bir an önce atmak ve kararlı konuma geçmek isteyecektir. Bu işlemi de ortama bir foton yayarak yapar. Bu olay kendiliğinden gerçekleştiği için ortama bırakılan foton gelişi güzel yayılır. Bu işlemin madde içinde tüm atomlar tarafından gerçekleştiği düşünülürse düzensiz, ahenksiz bir yayılma olacaktır. Buda istenmeyen bir durumdur. E_2 enerji seviyesine sahip bir atoma kendi atomik frekansıyla aynı frekanslı olan bir foton çarptırılırsa atom E_1 enerji seviyesine geçecektir. Atom kendisine tam olarak uygun düşen bir ışık demeti ile uyarılmış ise çok kısa bir sürede yerleştirildiği ışık demeti ile aynı doğrultuda ve daha parlak bir ışık demeti şeklinde ışınır. Bu olaya uyarılmış emisyon (*Stimulated Emission*) denir (Özkan, 1987).

Uyarılmış emisyon, atomun dışardan uygulanan elektromanyetik radyasyona cevap olarak enerjisini değiştirdiğinde meydana gelir. Kendiliğinden emisyon olayında atomların bıraktıkları fotonlar arasında bir faz ilişkisi yoktur. Uyarılmış emisyonda ise ortaya çıkan yeni dalga çarpan elektromanyetik dalga ile aynı yönde ve aynı fazda olur (Şekil 3.4). Kısaca uyarma ile ortama frekansı, enerjisi, yönü ve fazı birbirinin aynı iki tane foton yayılır (Tarakçıoğlu ve Özcan, 2004).



Şekil 3.4. Uyarılmış Emisyon

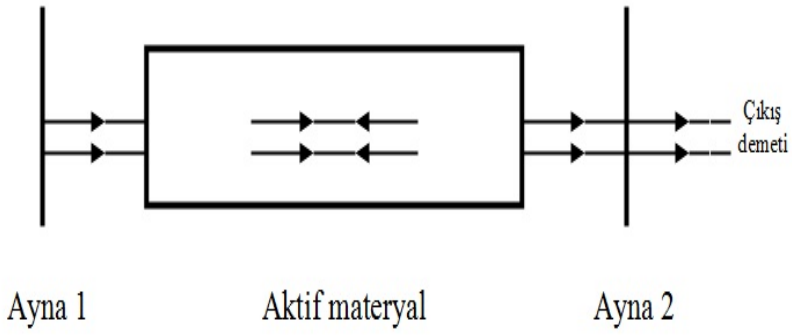
3.4. Lazer Işınının Elde Edilmesi

1950'li yılların sonunda gerçekleştirilen Maser'den sonra lazer fikri ortaya atılmış ve üzerinde birçok çalışmalar yapılmıştır. Maser, (*Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation, MASER*) olarak tanımlanır ve elektromagnetik

spektrumun mikrodalga bölgesinde yoğun, tek renkli, bağdaşık bir ışık kaynağıdır. Maser bir mikrodalga amplifikatörü veya osilatör olarak kullanılabilir.

Lazer kelimesi ise "uyarılmış radyasyon emisyonu ile ışığın kuvvetlendirilmesi" anlamına gelen İngilizce kelimelerin baş harflerinden meydana gelmiştir (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, LASER*). Lazer; elektromagnetik spektrumun görülebilir (*visible*), morötesi (*ultraviolet*) veya kızılötesi (*infrared*) bölgelerinde tek renkli (*monochromatic*), tek bir frekansta yoğunlaşmış (*collimated*) ve aynı fazda bağdaşık (*coherent*) bir radyasyon kaynağıdır (Cora, 2002).

Lazer veya maser ışınları elde edilişleri sırasında iki aşamadan geçilmektedir. Birinci aşama, elektronik şartlanmadır ki, bu safhada toplu bir devinim (*invertion*) oluşmaktadır. İkinci aşamada ise optik şartlanma işlemi gerçekleşmektedir. Bu safhada boşluk rezonansıyla yükseltme sağlanmaktadır. Bu olaya osilasyon denir (Özkan, 1987). Yükselteçlerde osilasyon olayı elde etmek için pozitif bir geri besleme gerekir. Mikrodalga bölgesinde bu işlem, aktif materyalde belli bir frekanslı optik çukur kullanılarak gerçekleştirilir. Lazerde ise bu durum daha farklıdır. Şekil 3.5 te de gösterildiği gibi geri besleme işlemi, aktif materyalin her iki uç kısmına yerleştirilen yansıtıcı aynalar vasıtasıyla gerçekleştirilir (Tarakçıoğlu ve Özcan, 2004).



Şekil 3.5. Lazer ışınının elde edilmesi

İki yansıtıcı ayna arasında bulunan aktif madde, aynalardan dik olarak yansıyan elektromanyetik dalgalar ile uyarılır. İleri-geri yansıyan fotonlar, aktif madde atomlarında yutma ve emisyon olarak tanımlanmış olan lazer fiziğinin temel prensiplerini gerçekleştirirler.

Aktif madde içerisinde bulunan milyonlarca atom için gerçekleşen uyarılmış emisyon sonrasında aynı yöne doğru milyonlarca foton paralel ışınlar halinde ileri geri yansır. Bu ışınlar aynı fazda, aynı frekansta ve aynı yönde olduklarından birbirine yan yana yapışıktır. Paralel aynalar arasında şiddeti bu şekilde çığ gibi artan ışınlar, ışık frekansına eş bir frekansta, darbeler halinde bir ışık huzmesi olarak yansır. Aktif materyalde yükseltilen fotonların bir ışın demeti olarak dışarı taşınabilmesi için aynalardan birisi kısmı geçirgen olarak yapılır.

Lazer ışınının dalga boyu, aynalar arasındaki mesafe ile uyumludur. Lazer ortamından yayılan elektromanyetik dalganın boyuna göre lazerlerin adlandırılması Çizelge 3.1 'de verilmiştir (Özcan, 2003).

Çizelge 3.1. Işığın dalga boylarına göre bölgelere ayrılması

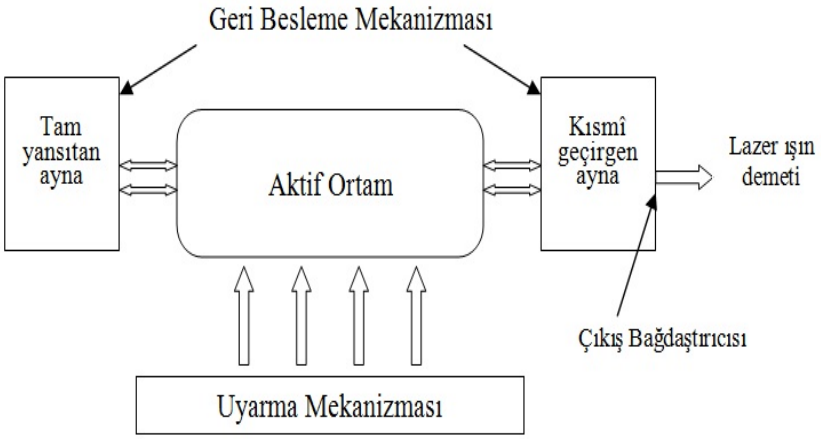
Özellik	Dalga Boyu
Uzak Kızıl Ötesi	100-1000 μm
Orta Kızıl Ötesi	1-10 μm
Yakın Kızıl Ötesi	0.7-1 μm
Görülebilir	400-700 nm
Mor Ötesi	200-400 nm
Vakum mor ötesi	100-200 nm
Aşırı mor ötesi	10-100 nm
X ışını	20-30 nm

3.5. Lazer Cihazının Temel Elemanları

Bir lazer ışık kaynağı elde etmek için aşağıda belirtilen dört fonksiyonel elemana ihtiyaç duyulur.

- Aktif ortam,
- Uyarma mekanizması
- Geri besleme mekanizması
- Çıkış bağdaştırıcısı

Bu fonksiyonel elemanlar şekil 3.6 da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Lazeri oluşturan temel elemanlar

3.5.1. Aktif ortam

Aktif ortam, lazer olayına aktif olan madde demektir. Yalnızca nüfus terslemesine uğrayabilen malzemeler lazer için aktif ortam görevini yerine getirebilirler. Aktif ortamda aranan iki önemli özellik vardır. Öncelikle aktif ortamda bulunan atomların kendiliğinden foton yayabilmeleri için uyarılmış halde olmaları ve kararsız bir elektron yapısı sergileyebilmeleri gerekmektedir. Daha sonrada sürekliliğin sağlanması adına foton yayarak kararlı hale gelen atomların tekrar uyarılarak beslenmesi ve böylelikle uyarılmış atomların sayısının kararlı atomların sayısından daha fazla olması şartı sağlanmalıdır.

Aktif ortamın temel görevi nüfusunda bulunan atomların elektromanyetik dalgalar marifetiyle uyarılması sonucunda ışık kazancı sağlaması ve ışığın yükseltilmesidir. Eğer uyarılmış atomların sayısı kararlı atomların sayısından az olursa ışık yükseltme işlemi gerçekleşmez.

Normal olarak alt enerji seviyesindeki atom sayısı uyarılmış seviyedeki atom sayısından fazladır. Bu durumu pompalama adı verilen işlemle tersine çevirmek mümkündür. Pompalama işlemiyle uyarılmış atomların sayısının artırılması nüfus terslenmesi olarak adlandırılır. Nüfus terslenmesi ise lazer olayının ikinci temel şartıdır.

Aktif ortam lazerlerde optik kazanç sağlar. Aktif ortam;

- Katı-hâl
- Yarı iletken
- Gaz
- Kimyasal
- Sıvı

olarak sıralanabilir. Aktif ortamlar istenilen lazer özellikleri ve kullanıldıkları yerlere göre farklı maddelerden oluşabilmektedir. Lazerlerin tarihsel gelişimi incelendiğinde araştırmacıların farklı yöntemlerle lazer ışını elde ettikleri görülmektedir. Bu yöntemlerde genellikle değişim gösteren lazer elemanı, aktif ortam ve onu besleme yöntemidir.

Katı-hâl lazerlerde ilk deneyler, az katkılanmış kromlu bir yakut alüminyum oksit çubuğunda yapılarak lazer ışını elde edilmiştir. Çubuğun uçları mükemmel paraleldir ve altın gibi yansıtıcı bir malzeme ile kaplanmıştır. Çıkış ucu olarak çalışan uç diğerine göre daha az yoğun malzeme ile kaplanmıştır. Yakut çubuk uyarıldığında atomları enerji seviyelerini değiştirirler. Böylece enerji fotonlar ışınlarlar. Bu fotonlar, daha fazla foton yayan diğer atomlarla çarpışırlar ve "Uyarılmış Emisyon" diye isimlendirilen bir reaksiyon zinciri ile sonuçlanır. Günümüzde ise artık Katı-hâl lazerlerinde genellikle Nd:YAG, yakut, zümrüt, Cr:safir, AlGaAs / GaAs çubukları kullanılmaktadır (Cora, 2002).

Yarı iletken lazerlerde galyum arsenik kristali kullanılmaktadır. Yarı-iletken lazer bir enjeksiyon lazer diyotudur. Çıkan ışığın miktarını kontrol etmek için, uyarma mekanizması olarak diyottan doğru akım geçirilir. Bu doğru akım kolayca ayarlanabilir.

Kimyasal lazerlerde hidrojen ve flüor elementleri tersine çevrilmiş bir toplumda hidrojen flüorür meydana getirmek üzere reaksiyona girdiklerinde lazer etkisi meydana getirirler (Özcan, 2003).

Gaz lazerlerde ise aktif ortam olarak çoğunlukla CO_2 gazı kullanılır. Ancak CO_2 gazı tek başına kullanılmaz. Bir karıştırıcı ile homojen bir karışım haline getirilen CO_2, He, N_2 gazları bir sirkülasyon oluşturacak şekilde bir silindirik cam tüp içerisinde sürekli olarak hareket ettirilir. Uyarma işlemini başlatmak için hareket halindeki gaza bir akım deşarjı yapılır. Gaz her iki ucunda son derece yansıtıcı aynalar bulunan silindirik bir tüpte saklanır. Aynaların biri %100 yansıtıcı diğeri ise çıkış kuplaj sistemi

olarak az bir miktar ışık geçirir. Bir diğer yol ise bir tarafı tamamen yansıtma özelliğine sahip bakır ayna iken çıkış kısmında Çinko Selenid (ZnSe) malzemeden yapılmış tam geçirgen lens ile kapatılmıştır. Işın isteğe bağlı olarak elektrik deşarjı ile verilebildiği gibi sürekli deşarj yapılarak lensten çıkan ışın bir Shutter (kesici ayna) kullanılarak ışın yolu saptırılarak su ile soğutulan bir seramik levhaya yönlendirilebilir. Çıkış ışını süreklidir.

CO_2 lazer rezonatörlerinde elektrik deşarjı için radyo frekansı (RF) ve doğru akım (DC) beslemeli şeklinde iki temel prensip vardır. Direkt DC beslemeli rezonatörlerde az miktarda da olsa (300-600 Wattlık) bir ışın sürekli olarak üretilmek zorundadır. Bu da elektrik sarfiyatı artırırken ışının oluşturulduğu cam tüplerin etrafını çevreleyen aynaların çalışma ömrünü azaltmaktadır. RF rezonatörlerde ise durum farklıdır. Sadece ışına ihtiyaç duyulan anlarda ışın üretimi gerçekleştirdiğinden elektrik tasarrufunun yanında kullanılan aynaların ömrünü de uzatmaktadır.

Günümüzde yeni tip endüstriyel lazer makinelerinde difüzyon soğutmalı, RF beslemeli ve cam tüplere ihtiyaç olmadan iki metal plaka arasında lazer ışını üretimi yapan rezonatörler de üretilmektedir. Kullanılan gazların çeşitlendirildiği bu rezonatörlerde; Kripton, Argon, Nitrojen, Helyum-Neon, CO_2, XeCl gibi çeşitli gazlar kullanılmaktadır. Bu rezonatörlerde gaz sirkülasyonuna ihtiyaç yoktur. Dolayısıyla bir turbo-blower (üfleyici) düzeneğine ihtiyaç duymazlar. Gaz sarfiyatının çok düşük olduğu bu tipte elektrik sarfiyatı da makul seviyelerdedir.

Sıvı lazerlere ise organik bir çözücü içindeki organik boyanın seyreltik çözeltisi örnek verilebilir. Aktif ortam olarak metanolde, rodamin 6G gibi organik boya kullanır. Bu madde kapalı bir gaz tüpüne pompalanır ve yüksek şiddetli ışık darbelerine maruz bırakıldığında parıldayacaktır. Sıvı lazer görülebilir ışığın dalga boyu spektrumunda geniş bir aralık boyunca ayarlanabilir (Cora, 2002). Çizelge 3.2'de çeşitli tipteki lazerler için aktif ortam parametreleri verilmiştir (Özcan 2003).

Düşük yoğunluklu kazanç ortamlı lazer sistemlerine ait optik parametreler Çizelge 3.3'te, yüksek yoğunluklu kazanç ortamlı lazer sistemlerine ait optik parametreler Çizelge 3.4'te verilmiştir (Tarakçıoğlu ve Özcan, 2004).

Bu çizelgede; g_{ul}: Uyarılmış emisyon kesit alanı, L: Aktif ortam uzunluğu, M: Aktif ortamın doyuma geçmeden önce yükselteç geçiş sayısı, D_y: Yükselteç çapı, η: ortamın kırılma indisi, t_s: Demetin doyuma ulaşması için geçmesi gereken minimum süreyi ifade eder.

Çizelge 3.2. Çeşitli tipteki lazerler için aktif ortam parametreleri

Lazer Tipi	g_{ul} (m^{-1})	L(m)	M	D_y (m)	η	T_s(s)
He-Ne	0.15	0.2	500	0.3	1	$5x10^{-7}$
Argon	0.5	1	30	1.1	1	$1.1x10^{-7}$
He-Cd	0.3	0.5	100	0.6	1	$2x10^{-7}$
Bakır (CVL)	5	1	3	1.1	1	$1.1x10^{-8}$
CO_2	0.9	1	19	1.1	1	$7x10^{-8}$
Excimer	2.6	1	6	1.1	1	$2.2x10^{-8}$
Boya(Rh6G)	500	0.02	1.5	0.04	1.5	$3x10^{-10}$
GaAs	100000	0.0001	1.5	0.0001	3.4	$1.7x10^{-12}$
Nd:YAG	10	0.1	17	0.2	1.82	$2x10^{-8}$
Nd: Cam	3	0.1	50	0.2	1.55	$5.2x10^{-8}$

3.5.2. Uyarma mekanizması

Bir lazerde kazanç, daha yüksek seviyedeki toplanma daha düşük seviyedeki toplanmadan daha büyük ise mümkün olabilir. Bu duruma lazer fiziğinde ters toplanma *(Inverse population)* denir. Aktif ortamda en alt enerji seviyesinde bulunan elektronların sayısından, uyarılmış durumda bulunan (yüksek enerji seviyesinde) atomların sayısının fazla olması için bir enerji kaynağıyla ya da pompalanmayla uyarma mekanizması oluşur. Yüksek enerji seviyesi, lazerin bazı dengesiz işlemler yoluyla pompalanarak toplanmasıdır. Bir ışık darbesi, elektriksel bir kıvılcım veya kimyasal bir reaksiyon, yüksek enerji seviyesinde toplanma için kullanılabilir (Cora, 2002).

Uyarma mekanizması, yarı iletken ve gaz lazerlerde ortamdan elektrik akımı geçirilmesi marifetiyle gerçekleştirilir. Katı ve sıvı lazerlerde ise optik pompalama yöntemi kullanılır. Örneğin; Yakut lazerlerde yakut içerisinde bulunan krom atomları ksenon gazı içeren flaş lambasından yayılan güçlü ışık tarafından uyarılarak pompalama işlemi gerçekleştirilir (Özcan, 2003).

3.5.3. Optik geri besleme

Daha önce tanımı basitçe yapılanan direk ışık yükseltgenmesi bazı özel maddeler için geçerli olan ve tam anlamıyla başarı sağlayan bir tekniktir. Ancak böyle

bir sistemde ışık demeti aktif madde içerisinden sadece bir defa geçmekte ve dolayısıyla ışık yükseltilmesi oldukça küçük bir oranda gerçekleşebilmektedir. Geri besleme mekanizması sayesinde uyarılmış emisyonla daha fazla ışık yükseltgenmesi meydana getirmek için eş güdümlü olarak atom tarafından bırakılan ışığın büyük bir kısmı tekrar aktif ortama gönderilir (Özcan, 2003).

Aktif maddenin her iki tarafına konulan yüksek derecede yansıtma özelliğine sahip aynalar tarafından geri yansıtılan ışık demeti birçok defa madde üzerinden geçirilir ve madde üzerinden geçen ışık demeti her geçişte ışığı daha da yükseltir. Geri besleme mekanizması genellikle iki ayna içerir. Aynalar aktif ortamın iki ucuna, aktif ortamdan çıkacak ışınlara dik gelecek şekilde yerleştirilirler. Geri besleme mekanizması, aktif ortamdan geçecek eş güdümlü ışığın yansımasını sağlar (Özcan, 2003).

3.5.3.1.Optik çukur

Lazer için geri besleme önemli bir gereksinimdir. Bilindiği gibi aktif maddenin boyunun uzatılması ışığın madde içerisindeki yolunu uzatmakta ve dolayısıyla ışık neşrini azaltmaktadır. İşte bu şartlar altında yapılabilecek olan optik bir çukur oluşturarak ışığın madde içerisinde defalarca dolaşmasını sağlayarak bu şekilde ışığın çoğalmasını sağlamaktır. Bir atomdan ortama bırakılan foton defalarca yansıyarak başka atomları uyarır. Eğer optik çukur boşluğu olmasaydı durum çok karmaşık bir hal alırdı. İstenilen çıkış sağlanamaz yansıyan fotonlar ortama değil de ortam dışına farklı açılarla çıkardı.

Optik çukur ilk defa 1957'de Gordon Gould tarafından lazer yapısının bir parçası olan Fabri-Perrot boşluğu adıyla tasarlandı (Özcan, 2003). Bu boşluk sayesinde pompalama sonrası aktif madde içerisinden ortama bırakılan fotonların boşluğun sağ ve sol tarafına yerleştirilen iki ayna tarafından tekrar ortama yollanması marifetiyle foton sayısının artırılması amaçlanmıştır. Yükselme süreci fotonların sağ ve sol tarafındaki aynalara çarparak geri döndürüldüğü sürece devam etmektedir. Madde tarafından salınan enerjinin çoğu geri yansıtılır ve geri yansıyan enerji aktif medyumu üzerinden tekrar geçer ve geçerken yükseltgenmeye uğrar. Ancak bu çoğalan fotonları ortamdan almak için optik çukuru oluşturan aynalardan birisinin kısmi geçirgen olması gerekir.

Lazer ışığı sağlamak için, nüfus tersleniminin oluşması ve dolayısıyla lazer ortamı içerisindeki kazancın, lazer çıkış enerjisindeki kayıpları da içerisine alan çeşitli kayıpların üstesinden gelebilmesi için optik çukurun yeterince büyük olması gerekmektedir. Bütün bu açıklamalar yapılırken boşluk içerisinde ilerleyen ışığın mükemmel bir şekilde paralel halde olduğu ve paralel olarak ilerlediği göz önünde tutulmaktadır.

Hâlbuki pratikte bu böyle değildir. Farklı doğrultularda yansımaya uğrayan fotonlar da olabilir. Bu durumda aynaların kenarlarında bazı foton kayıpları oluşabilir. Aynalar tarafından sebep olunan soğurma ve saçılmalar, aynaların kenarlıklarındaki kırılmalar, lazer aktif ortamında arzulanan geçişlerden başka arzulanmayan geçişlerin sebebiyet verdiği soğurmalar, lazer aktif ortamının homojen olmaması sebebiyle meydana gelebilecek muhtemel saçılmalar kayıpların sebepleri olarak sayılabilir (Özkan, 1987).

Bunu önlemek için bu aynaların geometrisi ayarlanabilir ve hatta en pratik çözüm olarak çukur aynalar kullanılabilir. Bu amaca yönelik birçok tipte ayna geometrisi gerek kullanıldığı yer gerekse kullanım amacına uygun olarak seçilebilmektedir. Lazerlerde, aktif lazer materyali, dıştan her iki ucunda son derece yansıtıcı aynalar bulunan silindirik bir tüpte muhafaza edilir. Bu aynalardan biri %100 yansıtıcı iken diğeri, sistemin çıkış bağlantısı için bir miktar ışığın geçmesine izin verir. Çıkış ışını süreklidir. Geri besleme düzeni olarak bu harici aynalar kullanıldığında cam tüpün uçları eğimli yapılır. Bu ise camın uçlarına doğru sıfır kayıp olmasını sağlar. Bu sıfır kayıp açısına *Brewster açısı* denir. Brewster açısı camın 56,3º eğik tutulması halinde yansımaların önleneceğini gösterir (Cora, 2002).

Bu ayna tasarımlarının hemen hepsi bazı avantajları sunduğu gibi bir takım dezavantajlara sahiptirler. Mesela düzlem paralel ayna tasarımı oldukça zordur ve eğer iki ayna birbirine tam anlamıyla paralel değilse bir kaç yansımadan sonra ışık demeti ayna sınırlarının dışına çıkabilir. Eğer boşluk içerisinde ışık demeti odaklanmıyorsa, bu durumda maksimum aktif madde hacmi oluşmakta yani lazer ortamında geniş bir hacim üzerinde lazer olayının elde edilmesi söz konusu olmaktadır. Eşmerkezli ayna tasarımında ise bir önceki örneğin aksine minimum aktif madde hacmi kullanılabilmektedir, kullanım açısından birçok kolaylıklar da sağlanmaktadır.

Çizelge 3.3. Düşük yoğunluklu kazanç ortamlı lazer sistemlerine ait optik parametreler

Lazer tipi	He-Ne	Argon iyon	Bakır buharı	CO_2	Excimer
Lazer dalga boyu(λ)	632.8–543.5nm	488–514.5nm	510.5–578.2nm	9.4–10.6μm	XeF,351nm XeCl,308nm ArF,193nm
Lazer geçiş olasılığı(A_{ul})	$3.4x10^{v}$–$2.83x10^{5}$/s	$7.8x10^{7}$/s	$2x10^{6}$–$1.65x10^{6}$/s	0.25/s	$0.8–2.5x10^{8}$/s
Üst lazer seviye ömrü(τ_u)	$1.7x10^{-7}$ s	$1x10^{-8}$s	$5x10^{-7}$–$6.1x10^{-7}$s	4 s	4–12 s
Uyarılmış emisyon kesit alanı(σ_{ul})	$3x10^{-17}$-$2x10^{-18}m^2$	$2.5x10^{-16}m^2$	$8.6x10^{-18}$–$1.25x10^{-17}m^2$	$3x10^{-22}m^2$	$2.4–4.5x10^{-20}m^2$
Kendiliğinden uyarılma hat genişliği ve band genişliği FWHM(Δ_{vul})	$1.5x10^{9}$–$1.5x10^{9}$ Hz	$5x10^{9}$ Hz	$2.3x10^{9}$ Hz	$6x10^{7}$ Hz	$1x10^{13}$ Hz
Tersine yoğunluk(ΔN_{vul})	$5x10^{15}/m^3$	$2x10^{15}/m^3$	$8x10^{17}/m^3$	$3x10^{21}/m^3$	$1x10^{20}/m^3$
Küçük işaret kazanç katsayısı	0.15/m	0.5/m	5/m	0.9/m	2.6/m
Lazer kazanç-orta uzunluğu	0.1-1m	0.1-1m	1-2m	0.3-2m	0.5-1m
Tek-geçiş kazancı($e^{\sigma ul \Delta Nul L}$)	0.03	0.1-0,5	1000–20000	0.3–5	4-14
Gaz basıncı	2.5 torr	0.1 torr	40 torr Ne 0,1–1 torr Bakır buharı	50-760 torr	1500 torr
Gaz karışımı	He:Ne 5/1 oranında	-	Ne: Cu 400/1 ya da 40/1 oranında	CO^{2}:N_2 0.8/1 oranında (He ilave)	10 torr F_2, 30 torr Kr, 1460 torr He
Pompalama metodu	Elektriksel deşarj	Elektriksel deşarj	Elektriksel deşarj	Elektriksel uyarma Carpışma	Elektriksel deşarj Yeniden olusum
Operasyon modu	Sürekli	Sürekli	Darbeli	Sürekli-Darbeli	Darbeli
Çıkış gücü	0.5-100mW	100mW-50W	1MW/darbe 20KHz tekrarlama oranı	1-10000 W	0.5-1 J Lazer darbe süresi 30-50 ns, 100W
Modu	TEM_{00}	TEM_{00}-çok modlu	Çok modlu	TEM_{00}-çok modlu	Yüksek dereceli çok modlu

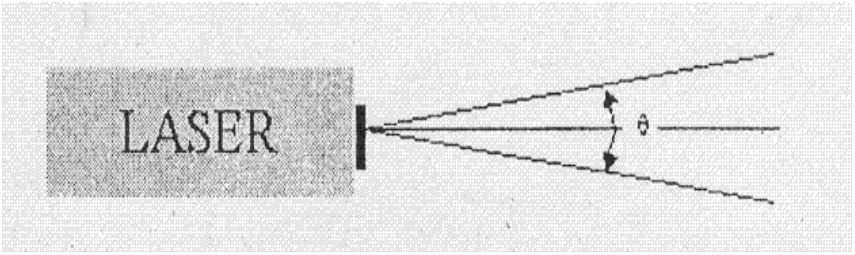
Çizelge 3.4. Düşük yoğunluklu kazanç ortamlı lazer sistemlerine ait optik parametreler

Lazer tipi	Boya	Yakut	Titanyum safir	Erbium fiber	Yarı-iletken
Lazer dalga boyu(λ)	320-1200nm	694.3nm	660-1180nm	1.53-1.56µm	0.5-1.55µm
Lazer geçiş olasılığı(A_{ul})	2 den $5x10^{8}$ /s	333/s	$2.6x10^{5}$ /s	90/s	$\approx 10^{9}$/s
Üst lazer seviye ömrü(τ_u)	2 den $5x10^{-9}$ /s	3ms	3.8µs	11ms	10^{-9}s
Uyarılmış emisyon kesit alanı(σ_{ul})	1 den $4x10^{-20}$ m^2	$2.5x10^{-24}$ m^2	3.8µs	11ms	10^{-9}s
Kendiliğinden uyarılma hat genişliği ve band genişliği FWHM(Δ_{vul})	30-40nm 25-30nm	$3.3x10^{11}$/s	$1x10^{14}$/s	$3x10^{12}$ Hz	2.5 den 10xx10^{13}/s
Tersine yoğunluk(ΔN_{vul})	$2x10^{22}/m^3$	$8x10^{24}/m^3$	$6x10^{23}/m^3$	$2x10^{24}/m^3$	$10^{23} – 10^{24}/m^3$
Küçük işaret kazanç katsayısı	500/m	20/m	20/m	1.35/m	10^{4}- 10^{5}/m
Lazer kazanç-orta uzunluğu(L)	0.001-0.01m	0.1m	0.1m	12 m	200-500µm
Tek-geçiş kazancı($e^{\sigma ul \Delta Nul L}$)	2-1000	7.5	7-10	10^{7}	$10^{3} – 10^{4}$
Pompalama metodu	Optik (lazer yada flaş lambası)	Flaş lambası	Optik (lazer yada flaş lambası)	Optik (lazer diyotlar)	Elektriksel
Pompalama dalga boyu ve genişliği	30nm dalga boyu 30nm bant genişliği	404nm ve 504nm	380-620nm	980nm ve 1480nm	-----
Operasyon modu	Sürekli	Darbeli	Sürekli-Darbeli	-----	Sürekli-Darbeli
Çıkış gücü	10^{9}w/Darbe	100J/Darbe	50W-10^{14}W 100 darbede	-----	mW 'lardan W' lara
Modu	Tek veya Çok modlu	Tek veya Çok modlu	Tek veya Çok modlu	-----	Yüksek dereceli (elipsel)

3.5.4. Çıkış bağdaştırıcısı

Çıkış çifti, yansıtıcı iki ayna arasındaki lazer ışığının bir kısmının aktif ortamdan lazer ışın demeti olarak dışarıya çıkmasına müsaade eden kısımdır. Geri besleme mekanizmasındaki aynalardan biri ışığın bir kısmının lazer dalga boyunda aktif ortamdan dışarı iletilmesini sağlar. Lazer cihazına bağlı olarak çıkış çiftinin, dışarıya iletilmesine izin verdiği lazer ışık demetinin miktarı değişmektedir. Şekil 3.7 de bir lazerin ışın demetinin genişlemesi gösterilmiştir (Özcan, 2003). Lazerler bir seçilen kuplaj ayarına bağlı olarak ışının belirli bir açıda genişleyerek gitmesi gibi bir soruna sahiptirler. Bu açının anlaşılması şu örnekle mümkün olabilir. CO_2 bir lazerde ışınının çapı, çıkış lensinden bir metre sonraki ölçümlerde 16 mm iken 12 metrelik bir mesafe sonunda 30 mm değerlerine ulaşabilir. Bu ise istenmeyen bir özelliktir. Bunu önlemek amacıyla konveks ve konkav aynalara sahip ışın açıcı (Beam Expander) optik sistemler kullanılarak ışın çapı sabitlenmektedir. Yine bir diğer yol ise U ekseni diye patentlenmiş bir hareketli ayna düzeneği kullanarak ışın çapının her yerde aynı olması sağlanmıştır.

Darbeli lazerlerde uyarma işlemi, enerji kaynağından sağlanan kısa patlamalardan sağlanır. Hem kazanç hem de çıkış gücü hızlı bir şekilde en yüksek seviyeye ulaşıp düşer. Sonuçta patlamalar şeklinde lazer ışın demeti üretilir. Sürekli dalga (*Continuous Wave*) lazerlerde uyarma işlemi enerji kaynağından sabit güçte olacak şekilde sağlanır. Hızlı bir şekilde kayıplar ve kazançlar dengelenerek sistem kararlı bir duruma geçer. Böylece lazer gücü sabit bir değere ulaşır (Tarakçıoğlu ve Özcan, 2004).



Şekil 3.7. Bir lazerin ışın demetinin genişlemesi.

Çıkış çiftinin dışarıya çıkmasına müsaade ettiği ışının oranı Helyum Neon lazerlerde % 1'den az, katı-hal lazerlerinde ise %80'den fazladır (Özcan, 2003).

3.6. Lazer Işığı

Lazer ışığının en can alıcı özellikleri parlaklığı ve yönlendirilebilir olmasıdır. Eğer gözle seyretmeye çalışırsak lazer demetinde herhangi bir genişleme gözlemleyemeyiz. Bunun en temel sebeplerinden biri lazer ışığının yeterince koherens olmasıdır. Uygun bir tasarım yapıldığında, lazerlerin yeterince monokromatik ve yüksek mertebeden kutuplanabilir olduğu görülür. Lazerlerin parlaklık ve yönlendirilebilme özelliklerinin çıplak gözle gözlenmesi mümkün ve kolaydır. Fakat monokromatiklik ve koherensliğin algılanması oldukça zor bir işlem gerektirmektedir. Bunun için gözlem yetersiz kalmakta ve özel tasarlanmış cihazların kullanımı kaçınılmaz hal almaktadır.

3.6.1. Lazer ışınının özellikleri

Lazer ışığını, normal herhangi bir ışıktan ayıran farklı özellikleri vardır. Bu özellikler sırasıyla yazıldığında;

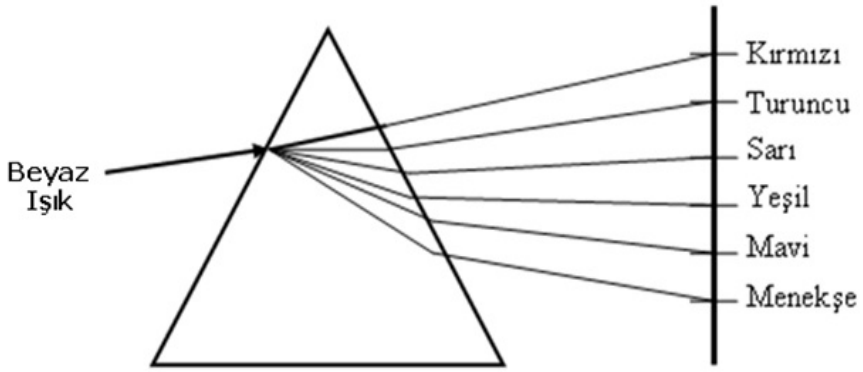
- Tek renklilik (Monochromaticity),
- Uyumluluk (Coherence),
- Uzaklaştıkça dağılma (Divergence),
- Yoğunluk (İntensity),
- Yönlendirilebilirlik (Directivity)

3.6.1.1. Tek renklilik

Lazer ışığının en belirgin özelliklerinden bir tanesi tek renkli oluşudur. Bir mumun veya akkor telli elektrik ampulünün yaydığı ışık tek renkli değildir. Bu kaynaklardan çıkan ışınlar bir prizmadan geçirilirse birçok renge ayrıldığı görülür. Her ışığın kendine has bir dalga boyu vardır. Tipik olarak bir lazer ışınının rengi, merkezi dalga boyu ile karakterize edilir (Cora, 2002). Dalganın kendisini tekrarladığı mesafeye dalga boyu denir ve λ ile gösterilir. Görülebilir her ışığın kendine has bir dalga boyu vardır (Özcan, 2003).

Bir grup fotonun tek bir frekansa sahip olması özelliğine tek renklilik (*monochromaticity*) denir. Gerçek uygulamalarda dalga boyu birimi için Angstrom veya nm, frekans birimi içinse Hertz kullanılır (Cora, 2002).

Yapılan çalışmalar göstermektedir ki ne lazerler ne de başka herhangi bir ışık kaynağı mükemmel bir monokromatik ışık üretmeye muktedir değildir. Gerek lazer ışığı ve gerekse herhangi bir ışık kaynağı geniş bandlı beyaz ışık üretmektedir. Daha sonra üretilen ışık bir prizma veya kırınım ağından geçirildiğinde ışık yayılmakta (*disperse*) ve ışığın spektrumu ortaya konulmaktadır. Şekil 3.8, beyaz bir ışığın prizmadan geçişi sırasında oluşan renkleri göstermektedir. Mükemmel bir monokromatik ışık elde etmek için ışık filtrelenebilir ve bu işlemden sonra elde edilen ışığın tek renkliliği filtrenin mükemmelliğine bağlıdır.



Şekil 3.8. Beyaz ışığın prizma tarafından dağılması.

3.6.1.2. Uyumluluk

Lazer hariç diğer ışık kaynaklarının verdiği ışık aynı fazda (bağdaşık) değildir. Yani demet içinde bütün ışınlar aynı fazda bulunmazlar. Lazer ışınları tabiatında birbirleri ile uyumludur. Frekansı, fazı ve doğrultusu aynı olan iki dalga birbiriyle uyumlu (coherence) olan dalgalar olarak tanımlanır. Uyumlu olan tüm dalgalar sinüzoidal olup, belirli bir genliğe ve dalga boyuna sahiptirler. Çizelge 3.5 te çeşitli lazerlerin uyumluluk mesafeleri verilmiştir (Tarakçıoğlu ve Özcan., 2004).

Çizelge 3.5. Yaygın olarak kullanılan lazerlerin uyumluluk mesafeleri.

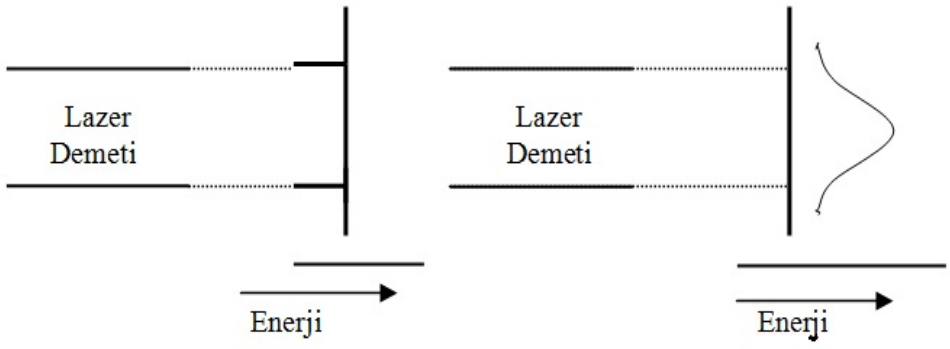
Lazer Tipi	Tipik Uyumluluk Uzunluğu (m)
He-Ne tek modlu	<1000
He-Ne çok modlu	0.1-0.2
Argon çok modlu	0.02
Nd:YAG	$1x10^{-2}$
Nd:Cam	$2x10^{-4}$
GaAs	$1x10^{-3}$
Yakut	$1x10^{-2}$

3.6.1.3. Uzaklaştıkça dağılma

Lazer içerisinde üretilen ışık demeti çok yüksek yansıtıcılığa sahip iki ayna arasına konulduğunda; aynalar arasında çok kısa bir bölgeye hapsedilmiş olan bu demetin seyahat yolu, demetin aynalardan birçok kez yansıtılmasıyla uzatılabilir. Lazer ışığı başka ışıklar gibi çok geniş bir bölgeye yayılmaz. Çünkü lazer yalnızca birbirine paralel olan demetler üretir. Fakat bu yinede kesin bir paralellik anlamına gelmez. Her zaman az da olsa bir eğrilik söz konusudur. Bu eğilmeye *difraksiyon* denir. Optik çukur içerisinde seyahat edilen bu uzun yol nedeniyle dalgaların eğriliği çok küçüktür ve lazerden dışarı çıkan ışık dalgaları yaklaşık olarak düzlemseldir.

Demet sapması, ışık demetinin lazerden salınmasından sonra demetin ne kadar çabuk genişlediğini belirleyen bir ölçüdür. Genellikle lazer demetinin yayılma açısı mili radyan olarak ölçülür. Tipik bir küçük lazer için demet sapması yaklaşık olarak 1 miliradyan'dır. Tipik bir He-Ne lazerinin uzaklaştıkça dağılımı 0.5 ile 1.5 mili radyan arasında değişmektedir. Dolayısıyla, lazer demetinin metre başına 1mm genişlemektedir. Şekil 3.9'da lazer demetinin beklenen ve gerçek enerji dağılımları gösterilmektedir (Özcan, 2003).

Şekilden de anlaşıldığı gibi enerji yoğunluğu merkezde en yüksek, kenarlara doğru gittikçe azalmaktadır. Bu tip lazer demetine Gaussyen demeti denir. Lazer demeti mercek kullanarak bir leke şeklinde odaklandırılabilir. İç bükey mercek kullanılarak demet çapı genişletilebilir veya dış bükey mercek kullanılarak demet çapı daraltılabilir.



a) Lazer demetinde beklenen enerji dağılımı b) Lazer demetinde gerçek enerji dağılımı

Şekil 3.9. Lazer ışın demetinin; a) Beklenen, b) Gerçek, enerji dağılımları.

3.6.1.4. Yoğunluk

Lazer demeti çok yoğun bir ışık üretir. Lazerin pompalanma sırasında aldıkları ışınlar yoğunluk bakımından küçük değerlerde olmasına rağmen optik çukur sayesinde bu lazerden alınan ışığın yoğunluğu çok yüksektir. Bunun sebebi uyarılmış emisyonla foton yayan atomların tüm fotonları birbirine paralel bir biçimde eş fazlı olarak yaymalarıdır. Optik boşluk içerisinde birbirini takip eden yansımalar neticesinde lazerden çıkan ışığın yoğunluğu da artmaktadır.

Bir ışık kaynağının şiddeti, bir yüzeye birim zamanda ulaştırdığı enerji ile ölçülür. Bir noktaya gelen dalgalar aynı fazda olmaları halinde birbirlerini güçlendirirler. Zıt fazda olmaları halindeyse birbirlerini zayıflatırlar. Lazerler haricindeki bütün ışıklar lazere göre çok zayıf kalırlar. Lazerler ışıklarını çok dar bir demette topladıkları için oldukça parlak bir görünüm sergilerler. Bunu daha iyi anlamak şu örnekle mümkün olabilir. Güneş ışığının yoğunluğu yaklaşık 130 W/cm^2 iken bir He-Ne lazerinin ışık yoğunluğu 10^6 W/cm^2 dir. Bazı darbeli (*pulsed*) lazerlerin yoğunluğu ise 10^{18} W/cm^2 değerlerine ulaşabilmektedir (Tarakçıoğlu ve Özcan, 2004).

3.6.1.5. Yönlendirilebilirlik

Günlük hayatta kullandığımız tüm ışık kaynaklarından her yönde ışık yayılmaktadır. Bunun aksine lazer ışıkları oldukça dar bir bantta ışık yaymaktadırlar (Özkan, 1987). Lazerlerin en önemli özelliklerinden bir tanesi de lazer ışığının

doğrultusunun değiştirilebilir ve yönlendirilebilir olmasıdır. En düşük enerji çıkışı veren lazerlerle yapılan gözlemlerde bile toz bulutu veya dumanının lazer ışığını saçtığı veya yönlendirdiği görülebilir (Cora, 2002). Lazer ışınları oldukça uzun bir mesafeyi sabit genişlikte bir ışın demeti olarak alır, bu mesafeden sonra genişlemeye başlar. Bazı uygulamalarda optik sistemler marifetiyle lazer ışın demetinin yönlendirilebildiği görülmüştür. Buna örnek olarak bir lazer ışığının aydaki görüntüsü optik sistemler kullanılarak yaklaşık 2.5 kilometre yarı çapına çıkarılmıştır.

3.7. Lazerlerde Güç ve Enerji

Demeti oluşturan ışık tayfının yoğunluğunu değerlendirebilmek için enerji kavramı kullanılmaktadır. Lazerler için de enerji joule ile ölçülür. Bir de iş yapabilme yeteneği vardır ki bunun için güç kavramı kullanılır. Güç, genellikle Watt (W) cinsinden ifade edilir. Bir Watt gücün bir saniyede ürettiği enerji bir joule' dür.

Işık tayfını sürekli olarak üreten lazerlere sürekli dalga (Continuous Wave, CW) modunda çalışan lazerler, ışık tayfını periyodik darbeler şeklinde üreten lazerlere ise (Pulse Repetition Rate Mode, PRRM) tekrarlanan darbeler modunda çalışan lazerler denir (Ion, 2005). Tekrarlanan modda darbeler üreten lazerlere genellikle darbeli lazerler denir. CW lazerlerde ölçülen güç ortalama güçtür. Darbeli lazerlerde ise güç, ortalama güç ve tepe gücü olarak ikiye ayrılır.

4. LAZERLERİN ENDÜSTRİDEKİ UYGULAMA ALANLARI

Lazerler icat edildiği günden bu güne sürekli gelişen bir uygulama alanıyla karşı karşıyadır. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte sürekli olumlu yönde gelişen lazerler endüstride çok geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Lazerlerin sahip oldukları olumlu özellikler endüstride birçok ihtiyacı karşılamış, daha ekonomik, daha kaliteli ve daha az işletme masraflarıyla endüstrideki yerlerini almışlardır.

Lazerlerin endüstrideki kullanım amaçlarına geçmeden önce lazer ışığının malzemeler üzerinde nasıl bir etki yaptığını anlamak gerekir. Lazerler endüstride en çok ısısından istifade edildiği alanlarda kullanılmaktadır. Lazerler, ışığının çok güçlü ve ısısının küçük bir alanda yoğunlaştırılması sayesinde hemen tüm metalleri eriterek kesebilme yeteneğine sahiptirler (Demokan, 1983).

4.1. Malzemelerde Isı Transferi

Malzemelere bir işlem yapmak için gerekli olan enerjinin malzemeye verilmesi için farklı uygulama yöntemleri vardır. Bu enerji daha çok ısı enerjisi olarak malzemeye verilir ve kontrollü bir biçimde malzemede istenilen şekil değişimi sağlanır. Lazerlerde enerji, ışık enerjisi olarak verilse de malzeme üzerine etkiyen ışık demetinin oluşturduğu ısı enerjisi malzemede istenilen etkiyi yapar. Bir malzeme için ısı transferi üç yolla sağlanır;

- İletim
- Konveksiyon
- Işınım

olarak sıralanabilir.

4.1.1. İletim

İletim, ısının malzeme içerisinde atomdan atoma iletilmesidir. Malzemeler için bu iletim miktarı ısı iletim katsayısı ile ifade edilir. Her malzemenin farklı ısı iletim katsayıları vardır. Metaller iyi bir ısı iletimine sahiptirler. Isı iletimi malzemeye

uygulanan ısının her metrede meydana getirdiği sıcaklık artışı olarak da ifade edilebilir. Isı iletim katsayısının (k) birimi W/(m.ºC) dir. Burada W: malzemeye uygulanan güç birimi olan Watt, m: malzeme boyu olan metre, ºC: metalde meydana gelen sıcaklık artışı olan Santigrat'tır. Isı iletim katsayısı, metallerin saflık derecesi, hacimsel biçimi ve bulunduğu ortamın sıcaklığına bağlı olarak değişen bir katsayıdır. Metallerin sıcaklıkları arttıkça söz konusu katsayının değeri de artar, saflığı bozuldukça bu değer azalır.

Metallerin ısı iletimleri belli bir ölçüde elektrik akımını iletebilmelerine de bağlıdır. Elektrik akımını iyi ileten malzemelerin ısı iletim katsayıları da çoğunlukla iyidir. Çizelge 4.1 bazı metallerin ısı iletim katsayısı, elektrik geçirgenliğini bu iki değerin uyumunu göstermektedir (Tarakçıoğlu ve Özcan, 2004).

Isı iletiminin metaller arasındaki farklılığını ve malzemeye etkisini bir örnekle anlamak bakımından 1 kg bakır ve çeliği 0 ºC'den erime noktasına ulaştırmak için gerekli ısı enerjisini hesaplarsak;

$$Q_{bakır} = m.c.\Delta t \qquad Q_{çelik} = m.c.\Delta t \qquad (4.1)$$

$$Q_{bakır} = 1x0.39x10^{3}x1083 \qquad Q_{çelik} = 1x0.45x10^{3}x1400$$

$$Q_{bakır} = 0.422x10^{6}\ J. \qquad Q_{çelik} = 0.63x10^{6}\ J.$$

sonuçlarını elde ederiz. Formülde; Q: Enerji miktarı, m: Malzemenin kütlesi, Δt: Sıcaklık artış miktarıdır. Görüldüğü gibi, aynı kütledeki bakır ve çeliği erime noktalarına ulaştırmak için çeliğe daha çok ısı verilmesi gerekir. Isı iletkenliğinin daha iyi anlaşılması için verilen yukarıdaki iki metalden bakır, ısı iletkenliği açısından çeliğe nazaran altı kat daha yüksek bir ısı iletkenliğine sahiptir.

Isı iletkenliğinin olumlu ve olumsuz etkileri malzemelere göre değişmektedir. Bir bakır levhanın yalnızca küçük bir kısmı eritilmek istenirse, bakır yüksek bir ısı iletkenliğine sahip olduğu için malzemenin tamamı erime noktasına ulaşamayacağından dolayı ısının uygulandığı alanda erimeyecektir. Çelik içinse durum tam tersidir. Isı iletim katsayısı daha düşük olan çelik tamamı erime noktasına ulaşmadan eriyecektir. Bu nedenle ısı iletim katsayısı yüksek malzemelerin bir kısmını eritmek için, aynı hacim ve kütledeki ısı iletim katsayısı düşük diğer malzemelere uygulanması gereken ısıdan daha çok ısı uygulamak gerekir (Özcan, 2003).

Çizelge 4.1. Metallere ait ısı iletkenlik ve elektriksel iletkenlik sayıları.

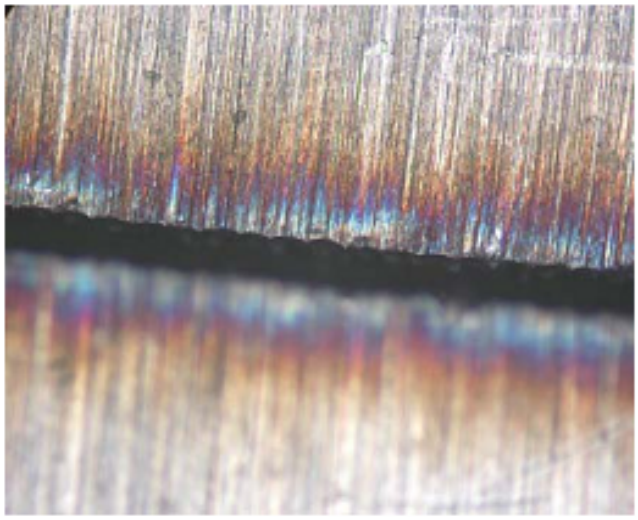
Metal cinsi	Isıl iletkenlik (W/m ºC)	Elektriksel iletkenlik (Ω/m)
Gümüş	106	108
Bakır	100	100
Alüminyum	62	56
Çinko	29	29
Nikel	25	15
Demir	17	17
Çelik	13-17	13-17
Kalay	15	17
Kurşun	8	8

4.1.2. Konveksiyon

Isı, kütlelerin bir noktadan başka bir noktaya iletilmesi yoluyla taşınıyorsa, bu iletime konveksiyon yolu ile ısı transferi denir. Bir çelik levhanın kesilmesi sırasında kesme yüzeylerinde oluşan yüksek ısıyı soğutucu bir akışkana vererek soğuması konveksiyona örnek olarak verilebilir.

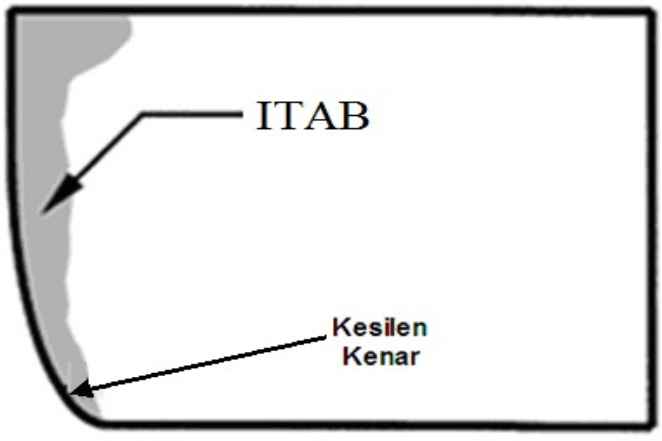
4.1.3. Işınım

Isının yayılması ve ışığın yayılması birbirine benzer iki durumdur. Işınım, ısı enerjisi darbelerinin radyasyon olarak uzaya yayılması olarak tanımlanabilir (Özcan, 2003). Yani ısı enerjisine tabi tutulmuş bir malzeme soğurken üzerindeki ısı enerjisinin bir kısmını ışınım olarak yayar. Metaller yüksek ısı enerjisine tabi olduklarında zamanla kırmızımsı bir renk (kor) alırlar. Malzeme üzerinden ısı etkisi kaldırıldığında soğuma süreci başlar. Bu süreçte de yukarıda saydığımız üç etken (iletim, konveksiyon ve ışınım) ile soğuma oluşur. Metaller soğudukça malzeme üzerinde gözle görülen veya görülmeyen bir iz kalır. Bu iz literatürde ITAB (Isı Tesiri Altındaki Bölge) olarak adlandırılır. Şekil 4.1 ve 4.2'de kesilen bir malzemenin ısıdan etkilenen bölgesi gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Lazer ile kesilmiş östenit paslanmaz çelikte ITAB oluşumu (Ghany ve Newishy, 2005).

ITAB oluşumu, kesme, kaynaklama, delme ve sertleştirme gibi işlemlerde oluşan ve malzemenin işlem yapılan kısmının ısı etkisiyle uğradığı değişimin sonucudur. Bu değişim istenmeyen durum olsa da kaçınılmazdır. Geleneksel materyal işleme yöntemlerine kıyasla lazer ile işlenmiş bir metalde ITAB oluşumunun azaltıldığı bilinen bir gerçektir. ITAB oluşumunu inceleyen çalışmalarda, lazer kafa hızı, lazer ışın demetinin taşıdığı güç, bu ışının darbe miktarı, malzemenin ışın yutma miktarı gibi parametrelerin optimizasyonuyla bu oluşumun azaltıldığı görülmüştür (Ghany ve Newishy, 2005).



Şekil 4.2. Kesilen bir metalde kesme yüzeyinde oluşan deformasyon (Belhadj ve ark. 2003).

4.2. Malzeme İşleme Çeşitleri ve Bunlar İçin Kullanılan Lazerler

Lazerler gün geçtikçe farklı uygulama alanları bulsa da günümüzde lazer cihazları çoğunlukla aşağıdaki işlemleri gerçekleştirmek için kullanılmaktadır.

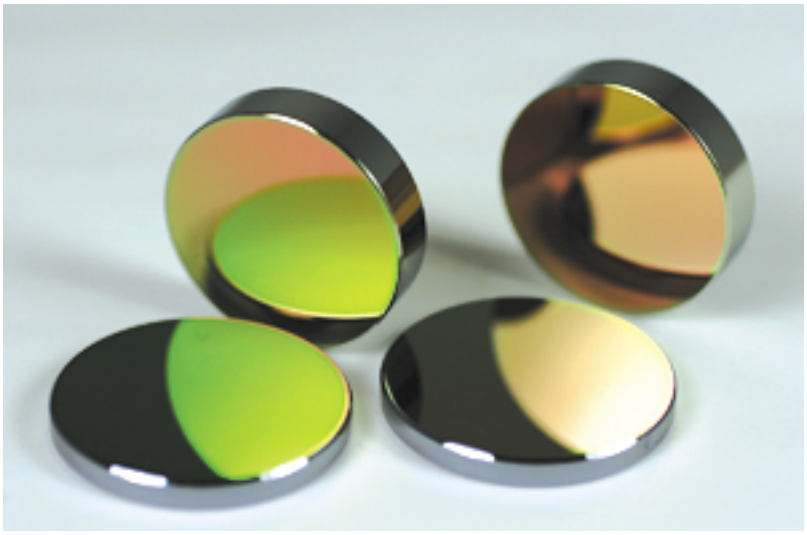
- Kesme işlemi,
- Kaynak işlemi,
- Delme işlemi,
- Sertleştirme işlemi,

Bu işlemlerin gerçekleştirilmesinde sürekli veya darbeli dalga modda çalışan CO_2 ve Nd:YAG lazer cihazları kullanılmaktadır. CO_2 lazerler çıkış gücünün geniş sınırlar arasında değişebilmesi ve maliyet açısından daha ekonomik olduğu için Nd:YAG lazerlere göre daha yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Şekil 4.5' te malzeme işlemekte kullanılan bir lazer düzeneği verilmiştir (Nikumb ve ark., 2005).

Darbeli modda çalışan Nd:YAG lazerler bir saniyede 4000 darbe üretebilirler. Nd ile katkılanmış (doping) lazerlerde Q anahtarlaması kullanılarak oldukça kısa süreli (10^{-12} s) ve oldukça büyük tepe gücüne sahip darbeler elde edilebilir. Çizelge 4.2'de metal malzemelerin işlenmesinde kullanılabilecek lazer tipleri ve tipik özellikleri verilmiştir.

Kızıl ötesi dalga boyundaki ışınları; plastik, cam, lastik, ağaç, kumaş, deri, metal ve seramik malzemeler çok iyi yuttuğu için bu malzemelerin işlenmesinde yaygın olarak CO_2 lazerler kullanılır. CO_2 lazer cihazlarının ürettiği ışın demetinin dalga boyu 10-11 μm gibi oldukça yüksek değerlere ulaşmaktadır. Bu dalga boyuna sahip lazer demetinin iş parçası üzerine fiber optik kablo ile taşımak mümkün değildir. Bu yüzden CO_2 lazerlerde demet taşıma işi için yüzeyleri parlatılmış veya yansıtma özelliği yüksek malzemeler ile kaplanmış bakır aynalar kullanılır (Şekil 4.3). Bakırın lazer ışın demetini yutma katsayısı oldukça düşük, ısıl iletkenliği ise oldukça yüksektir.

Bu tip yansıtıcıların yuttukları ışığın ısıya dönüşen kısmı, soğutma sıvısı ile bir soğutma sistemi kullanılarak bakır üzerinden uzaklaştırılır. Bu soğutma işlemi düzensiz olduğunda lazer ışınının karakteristik özellikleri kötüleşir. Lazer üretici firmalar bakır aynalar üzerine yerleştirdikleri termo kuplörler ile sıcaklıklarını tespit ettikleri aynaların kirlenme kontrolü için özel sistemler tasarlamışlardır. Normal ısıl değerlerin üzerine çıkan aynalar yüzeyleri kirlenmemişse aynalar temizlenir ve böylece ışında meydana gelebilecek olumsuz etkiler yok edilir.

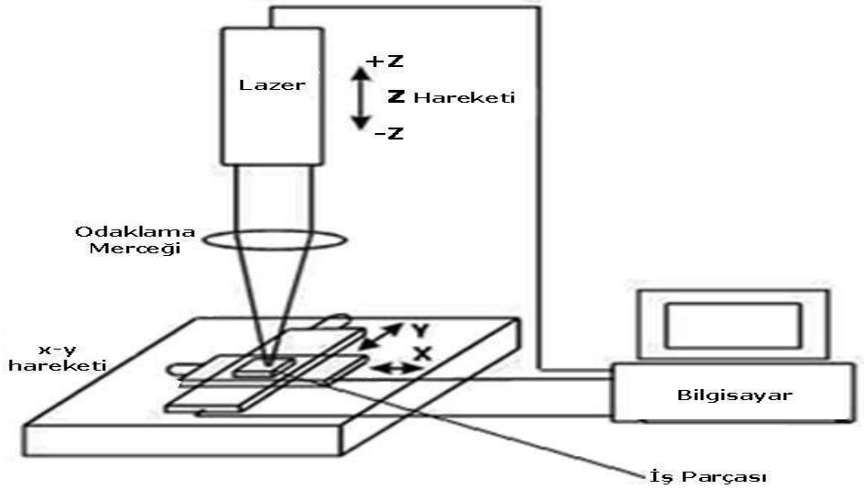


Şekil 4.3. Işın yansıtıcı bakır aynalar.

10.6 µm dalga boyundaki ışınları daha iyi ilettiği için CO_2 lazerlerinin odaklama mercekleri genellikle çinko selenid (ZnSe) malzemelerinden yapılır. Şekil 4.4, CO_2 lazerlerde kullanılan odaklama lenslerini göstermektedir.

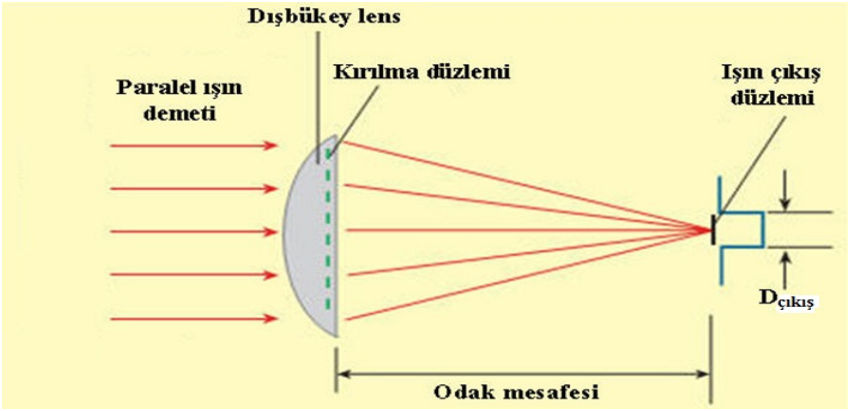


Şekil 4.4. Lazer odaklama lensleri.



Şekil 4.5. Materyal işlemede kullanılan bir lazer düzeneği (Nikumb ve ark., 2005).

Lazer ışın demeti ile malzeme üzerinde işlem yapmak için lazer cihazının gücünden ziyade, malzemenin birim alanına düşen ışın gücü daha önemlidir. Bu parametre güç yoğunluğu olarak tanımlanmaktadır. Lazer ışınlarının uyumluluğu ışın demetinin çok küçük bir alana odaklanabilmesini ve çok büyük bir tepe gücü yoğunluğunun elde edilmesini mümkün kılmaktadır (Bayraktar ve ark., 2004). Şekil 4.6, lazer ışın demetinin odaklanma düzeneğini göstermektedir. Elde edilen güç yoğunluğuna göre materyal üzerinde, kesme, kaynak, delme vb. işlemlerin yapılabilmesi mümkün olmaktadır. Çizelge 4.2 ve 4.3' te lazerlerin güç yoğunluğuna göre malzemeler üzerinde yapabilecekleri işlemleri göstermektedir (Tarakçıoğlu ve Özcan, 2004).



Şekil 4.6. Odaklanma düzeneği.

Çizelge 4.2. Endüstride kullanılan lazerlerin karakteristik özellikleri.

Lazer tipi	Verim (%)	Dalga Boyu (nm)	Sürekli Gücü (W)	Odak tepe gücü (W)	Üretim Uygulaması
CO_2	>10	10600	>1000	10^8	Kesme, delme, markalama, sertleştirme vb.
He-Ne	<0.1	633	0.002	10^{-3}	Ayarlama, dalga kılavuzu
Nd:Cam	>1	1060	>1000	10^9	Delme, kaynak
Nd:Yakut	<0.15	694	0.05	10^8	Delme
Nd:YAG	>10	1060	>100	10^8	Kesme, delme, markalama, sertleştirme vb.

Lazer ışının elde edilmesinden sonra bu ışının taşıdığı gücün şekil değişimine uğratılacak iş parçasına iletilmesi için bir düzeneğe ihtiyaç vardır. Günümüzde CNC tezgâhlarıyla iş parçalarını, kesme, markalama, delme, kaynak ve sertleştirme gibi işlemler hassas toleranslarda başarı ile yapılabilmektedir (Pakdil ve ark., 2005).

Çizelge 4.3. Lazerlerin güç yoğunluğuna göre uygulama alanları.

Güç Yoğunluğu (W/cm^2)	Materyal Tepkisi	Uygulama Alanı
$<10^4$	Isınma	Isıtma, ısıl işlemeler
10^4-10^6	Erime	Kaynak
10^6-10^8	Buharlaşma	Kesme, delme

4.2.1. Lazerle kesme işlemi

Titanyum gibi bazı metallerin uzay teknolojileri, otomotiv sektörü ve medikal alanda kullanımı giderek artmaktadır. Bu metaller işlenirken kesme, delme ve yüzey işlemlerine ihtiyaç duyarlar. Günümüzde hızla gelişen lazer teknikleri sayesinde geleneksel yollarla yapılan bu işlemler, daha üstün ve kaliteli sonuçlarla yapılmaktadır. Lazer ile yapılan kesme işlemleriyle birçok kalıp ve aparattan tasarruf sağlanmıştır. Bununla birlikte birçok makine kullanılmayarak insan faktöründen kaynaklanan hatalarda azaltılmıştır (Rao ve ark., 2005). CO_2 lazerleri kullanılarak otomotiv parçalarının kesilmesi günümüzde neredeyse tüm otomobil fabrikalarında yaygın bir şekilde yapılmaktadır (Aslan, 1987). Yapılan çalışmalarda bazı çeliklerin kesilmesinde

yüzey kalitesi bakımından darbeli mod ile çalışan lazer cihazları kullanılmıştır (Black, 1999).

Lazer ışınlarının metal, plastik, kauçuk ve hatta kâğıtların delinmesi ve kesilmesinde kullanılması da gittikçe artmaktadır. Bilim adamları lazeri bu tip uygulamalarda incelemeye başladıklarında yüksek işlem hızına rağmen malzeme üzerinde bir takım yüzey bozuklukları tespit etmişler ve hasarların giderilmesi için lazer ışınının yanında malzemeye bazı aktif ya da asal gazlar göndermişlerdir (Rao ve ark., 2005).

Lazer ile kesme işlemi yapılırken bazı asal veya asist gazlar kullanılır. Bu gazlar belirli oranlarda birbirleriyle karıştırılabildiği gibi yalnız başlarına da kullanılabilirler. Bu gazlar; Argon, Azot, Helyum, Oksijen vb. gazlardır. Bu gazların yanı sıra CO, H ve Ne gazları da lazer ile kesme işleminde kullanılan gazlardandır. İşlem gazları lazer ışınının malzemeyle tepkimeye girdiği noktalarda kullanılmaktadırlar. Gazın seçimi ve kalitesi işlem kalitesi ve verimliliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Kesilen metaller için çoğunlukla Oksijen, plastik, deri ve kâğıt gibi malzemeler için Azot ya da Argon gazları tercih edilmiştir (Al-Sulaiman ve ark. 2006). Kullanılan gazların kesme için en önemli faydası, lazer ışını merkezindeki ısıyı artırarak daha keskin ve pürüzsüz yüzeyler oluşturmaktır. (Rao ve ark., 2005)

Darbeli mod CO_2 lazer kullanarak bir titanyum levhanın kesilmesi işlemi sırasında Helyum gazı kullanılarak yapılan kesme işleminde elde edilen sonuçlar kullanılan diğer gazlara göre daha başarılı ve daha olumlu sonuçları ortaya çıkarmıştır.

Bu avantajlar yazılacak olursa:

- Metal üzerinde daha az ITAB oluşumu
- Düşük metal kaybı (kesme ile ortadan kalkan maden cürufu)
- Dar alanlarda başarılı kesme
- Düşük kesme gerilmesi (çarpılma)
- Otomasyona uygunluk

olarak yazılabilir (Rao ve ark., 2005). Lazerle kesme işlemi sırasında malzeme yüzeyine, klasik yöntemlerde olduğu gibi bir temas olmadığından kesici bir elmas ya da sert bir kesici takıma gerek yoktur. İş parçası üzerine gönderilen, gücü ve frekansı doğru seçilmiş bir lazer ışını kesme işlemi için oldukça elverişlidir. Temel olarak kesme işlemi için, öncelikle doğru şartlandırılmış bir lazer ışını, bu lazer ışınını iş parçasına

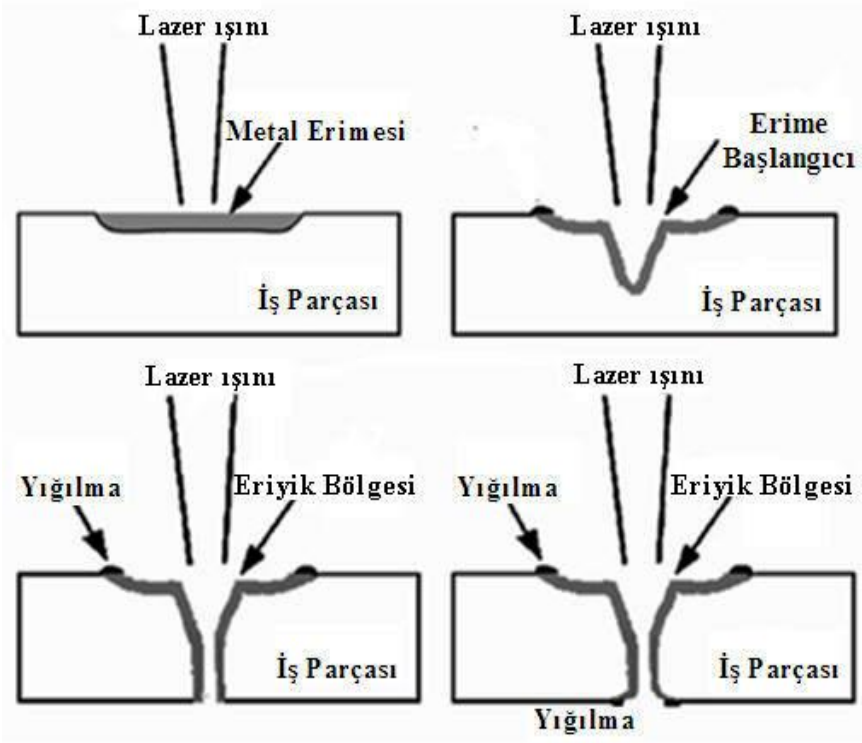
odaklayacak odaklama düzeneği, malzemeye uygun bir gaz seçimiyle beraber bu gazı şartlandıracak bir gaz ünitesi ve kesilecek malzemeye yön verecek hareket sistemi gereklidir. Şekil 4.7 'te bir lazer kesim işlemi için üretilmiş bir lazer tezgahı gösterilmektedir.



Şekil 4.7. Kesme işlemi için hazırlanmış bir lazer tezgahı.

Kesme işlemi sırasında önce bir metal erimesi ardından buharlaşması oluşur. Buharlaşan metalle birlikte ışın, malzemenin kalınlığı boyunca ilerler. Malzemeyi terk ettiğinde ise mekanik olarak yön verilen iş parçasının hareketine göre kesme yönü belirlenir. Kesme için gerekli tüm yönler ve kesme hızı bilgisayar ortamında daha önce hazırlanıp bir CNC tezgâhına aktarılır. Bu sayede kesme işlemi kontrolü başarı ile sağlanır. Kesme işleminin malzemeye olan etkisi şekil 4.8 'de gösterilmiştir.

Günümüzde oldukça yaygın olan bir lazerle kesme yöntemi de gaz jet yöntemidir. Lazerle kesme sırasında oluşan metal cüruflarının yok edilmesi için gaz jet düzeneği önerilmiştir (Powell ve ark., 1989). Lazer kafası olarak adlandırılan lazer ışınını malzeme üzerine taşıyan sistem elemanına eş eksenli bir gaz jeti ilavesinden oluşmuştur. Lazerin malzeme üzerinde meydana getirdiği yüksek ısıdan dolayı oluşan metal eriyik havuzu üzerine debisi optimize edilmiş bir gazın püskürtülmesi neticesinde kesme işlemi gerçekleştirilmiştir.

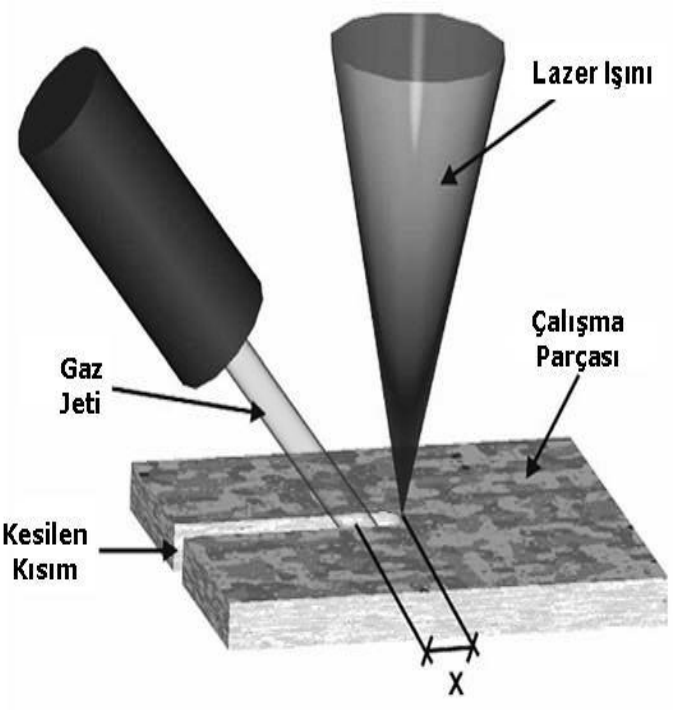


Şekil 4.8. Lazer ışınının kesilen iş parçasına nüfuzu ve kesim işlemi.

Metaller, termoplastikler, polimerler ve bazı seramiklerin kesiminde başarılı sonuçların alındığı gaz jet takviyeli lazer kesme tezgâhları uygulama açısından geniş bir yelpazede kesme işlemi yapar. Ancak gaz jet ünitesinin karmaşık bir yapısı vardır. Bir Nozzle ile basıncı, hızı ve sıcaklığı şartlandırılan lazer gazı daha kaliteli ve düzgün kesim yüzeyleri oluşturarak kesilen malzemeyi ikiye ayırır. Nozzle tasarımıyla yüksek hıza ulaşmış gaz kütlesi metal eriyik üzerine çarparak iyi bir kesme işlemi için olanak sağlar. Şekil 4.9'da gaz jeti takviyeli bir lazer kafası gösterilmiştir (Quintero ve Pou, 2005).

Gaz jetinin ilavesiyle kesme işlemine ilave bir katkı da gazın soğutma özelliğidir. Kesilen malzemede meydana gelen yüksek ısı daha fazla materyal üzerine yayılamadan gaz üzerine aktarılarak ITAB oluşumunu azaltır (Zhang ve Fontana, 1996). Bir diğer faydası da kesilen metal eğer demir esaslı ise kullanılan yardımcı gazın oksijen olarak seçilmesiyle demir oksitlenerek kesme sırasında lazerin taşıdığı güç azaltılarak kesim yapmak mümkündür. Bu işlemin bilimsel açıklaması yapılacak olursa; demirin erime sıcaklığı ortalama 1550 ºC iken demir oksidin erime sıcaklığı ortalama

1300 ºC değerlerinde olmasıdır (O'Neill veGabzdyl, 2000). Paslanmaz çelik malzemelerinin kesimi sırasında azot gazı kullanılmazda oksijen gazı kullanılır ise krom oksit oluşumu meydana gelir ki bu da kesim kenarlarına yapışır ve çapaklı bir kesim yüzeyi oluşmasını sağlar.



Şekil 4.9. Gaz jet takviyeli lazer kesme işlemi (Quintero ve Pou, 2005).

Lazerler ile kesilmesi çok zor metallerin kesilmesi daha kolay ve ekonomik olarak gerçekleştirilmektedir. İşlemler esnasında minimum kesme çentiği (daha az metal kaybı), düz kenarlı kesim, düşük yüzey pürüzlülüğü, metalin içyapısında minimum bozulma, yüzey kalitesi, CNC tezgâhlarıyla ile kolay uyum, malzemeyle temas etmeden yapılan işlem ve daha zor çalışma alanlarında, ulaşılması güç bölgelere ulaşabilme yeteneğiyle geleneksel yöntemlerden çok daha iyi sonuçlar sunmaktadır. Kesim yapılan metaller için kesim kalitesi, termal gerilmelerdeki düşüklük ve kesme verimi açısından lazerler mükemmel sonuçlar vermektedir (Bagger ve Olsen, 2001).

4.2.2. Lazerle kaynak işlemi

Lazerlerin endüstride yoğun bir kullanım alanı bulduğu işlem de kaynak işlemidir. Cıvatalama, perçinleme, lehimleme ve son olarak da kaynak gibi birleştirme tekniklerinin ticari boyutlarda ortaya çıkışı ancak makineye bağlı endüstriyel devrimin gerçekleşmesiyle mümkün olmuştur. Bugün çok sayıda kullanılabilir birleştirme tekniği vardır ve günümüzdeki sorun birleştirmenin nasıl yapılacağı değil, en iyi birleştirme yönteminin nasıl seçileceğidir. Her yöntemin kendine has özellikleri vardır. En uygun seçim için birçok hususun değerlendirilmesi gerekir. Mukavemet, üretim kolaylığı, maliyet, ömür, korozyon dayanımı ve görünüş gibi faktörlerin göreceli önemi büyük ölçüde göz önüne alınan uygulamaya bağlı olarak değişir.

4.2.2.1. Günümüz endüstrisinde kaynak teknolojisinin yeri

İnsanoğlu günümüzden yaklaşık 3500 yıl kadar önce, iki metal parçasını sıcak veya soğuk halde çekiçleyerek kaynak edip birleştirmeyi gerçekleştirmiştir. Demirci kaynağının özellikle orta bronz devrine ait örneklerine dünyanın çeşitli müzelerinde rastlanmaktadır. Kaynak yönteminin endüstriyel uygulamaları ise, 19. yüzyılın ikinci yarısında başlamıştır. Oksijen gazının endüstriyel çapta elde edilmesi, özellikle tamir işlerinde oksi-asetilen kaynağının yaygınlaşmasını sağlamıştır. Elektrik arkının 18. yüzyılın son yıllarında Volta tarafından keşfedilmesine rağmen bu enerjinin kaynak teknolojisi olarak kullanılması 19. yüzyılın son çeyreğini bulmuştur. Çizelge 4.4, yıllara göre kaynak tekniğinin gelişimi gösterilmiştir (Anık 1991).

Kaynak, çözülemeyen bağlama elemanlarındandır. İki veya daha fazla malzemeleri birleşme bölgelerine ısı veya basınç veya her ikisini birden kullanarak, bir ilave kaynak malzemesi kullanarak veya kullanmadan çözülmez bir bütün halinde birleştirmektir (Anık 1973). Günümüzde kaynak bağlantıları çelik kirişler, tank, kazan, dökme ve dövme makinelerinde perçinin yerini almış, çatlak ve kırılmalarda, tamir maksadıyla çok taraflı yama yapılmasında, aşınmış yerlerin doldurulmasında, takviye ve dolgu kaynağı olarak kullanılmaktadır. Ayrıca kaynak; bağlantıların ayrılmasında, delinmesinde, kesilmesinde ve şekillendirilmesinde de kullanılmaktadır.

Çizelge 4.4. Yıllara göre kaynak tekniğinin gelişimi (Anık, 1991).

1890	Karbon elektrotla kaynak Elektrik direnç kaynağı Tel elektrotla kaynak Eriyen elektrotla kaynak
1900	Havanın sıvılaştırılması Asetilenin asetonla eritilmesi Kaynak üfleci (Oksi-asetilen)
1910	Örtülü elektrot
1920	Oksijenle kesme Gazaltı kaynağı
1930	Tozaltı kaynağı
1940	Soğuk basınç kaynağı Sürtünme kaynağı Ultrasonik kaynak Plazma ile kesme
1950	Elektron ışını ile kaynak Difüzyon kaynağı
1960	Plazma kaynağı Lazer Kaynağı
1970	Kaynak robotları Kaynak yöntemlerinin otomasyonu
1980	Kaynak robotlarının etkili kullanımı
1990	Özel yöntemlerin gelişimi

Kaynak; metal, plastik, cam ve bakalit malzemeler gibi farklı özellikte olan her türlü malzemeye uygulanabilir. Teknikte en çok uygulandığı malzemeler ise çelik, çelik döküm, pik, karbon alaşımlı çelikler, alüminyum ve alaşımları, magnezyum alaşımları, nikel, çinko, kurşun malzemelerin bağlanması gibi metal malzemelerin yanında, termoplastik malzemelerde de geniş bir uygulama alanına sahiptir (Anık 1981).

Kaynağın yapılabilmesi için, birleştirilecek parçalar ergime sıcaklığına kadar ısıtılır ve iki malzeme birbirine ya doğrudan ya da ara dolgu malzemesiyle kaynatılır. Metalik malzemeyi ısı veya basınç veya her ikisinin birden kullanılarak, aynı cinsten ve erime aralığı aynı veya yaklaşık bir malzeme katarak veya katmadan birleştirmeye metal kaynağı adı verilir (Anık 1993).

Kullanılma amacına göre metal kaynağı ikiye ayrılır. Bunlar,

1. Birleştirme Kaynağı
2. Doldurma Kaynağı

olarak sınıflandırılabilir (Anık 1991).

Burada önemli husus, bağlantı yapılacak malzemelerin ve dolgu maddesinin özelliklerinin aynı veya bir birine çok yakın olarak seçilmesidir (Günay ve ark., 2001). Metallerin birbirine kaynatılması üç değişik şekilde yapılabilir.

- Otojen kaynak: Aynı cins malzemelerin birbirine dolgu malzemesi kullanılmaksızın kaynatılması işlemi,
- Homojen kaynak: Birleştirilecek malzemelerle, birleştirme için kullanılacak dolgu malzemesinin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri özdeş ya da yakın olan malzemelerin kaynatılması işlemi,
- Heterojen kaynak: Kimyasal ve mekanik özellikleri özdeş olan malzemelerin kimyasal ve mekanik özellikleri farklı bir dolgu malzemesi kullanılarak kaynatılması (Kullanılan dolgu malzemesi ile kaynatılacak malzemelerin kaynama noktaları aynı yada birbirine yakın olmalıdır.) (Tarakçıoğlu ve Özcan, 2004).

4.2.2.2. Kaynak tekniğindeki gelişmeler

Bilinen yöntemlerin geliştirilmesi ve yeni yöntemlerin bulunması yolunda yapılan araştırmalar sonucu son elli yıl içinde sayılamayacak derecede gelişmeler kaydedilmiştir. Kaynak yöntemlerinde meydana gelen bu hızlı gelişmeler savunma ve uzay endüstrilerinin istemleri neticesinde oluşmuştur.

Örneğin, 1. ve 2. dünya savaşları sırasında kalın sacların gemi ve tanklarda kullanılması gerektiğinde toz-altı yöntemi geliştirilmiştir. Yine bu savaşların gereksinimleri neticesinde alüminyum ve magnezyum alaşımlı sacların kaynaklanmasında TIG yöntemi geliştirilmiştir. Soy gaz koruması altında yapılan TIG kaynak yöntemi ile bugün bütün metalleri kaynaklanması mümkün hale gelmiştir. MIG diye adlandırılan eriyen elektrot ile soy gaz altında kaynak yöntemi, birçok alanda TIG yönteminin yerini alarak işlemin hızlanmasına ve otomatikleşmesine olanak sağlamıştır. MAG, diğer bir deyimle aktif gazlar altında eriyen elektrot ile yapılan kaynak, son yıllarda büyük gelişmeler göstermiş, az alaşımlı çeliklerin kaynağında diğer yöntemlere karşı üstünlükler göstermiştir.

Günümüzdeki konstrüksiyonlar iş verimi ve güvenliğini artırmaya, boyutları ve ağırlığı küçültmeye, aynı zamanda malzeme ve üretim masrafları azaltmaya yöneliktir. Buna paralel olarak yeni problemler oluşmuş ve çözümü için de yeni yöntemler

geliştirilmiştir. 1950 'li yıllarda geliştirilen ultra-sonik kaynak yöntemi ile ince metaller ve termoplastik folyolar ultrasonik titreşimler ile kaynatılabilmektedir. Elektro-curuf kaynağı 1960' dan bu yana ağır parçaların dik kaynağında kullanılmaktadır. Bu yöntem ile 15 mm kalınlığa kadar olan parçaların dik pozisyonda kaynaklanması kolay ve hızlı hale gelmiştir.

Kaynak yöntemlerinde son yıllarda gelişen bir diğer yöntemde sürtünme ile kaynaklama yöntemidir. Günümüzde bu yöntem hem yaygın bir şekilde kullanılmakta hem de giderek gelişim göstermektedir. Matkap uçları ve otomobil motorlarının supap üretiminde kullanım görmektedir. Elektron ışını ile metal kaynağının ilk pratik uygulamaları nükleer reaktör, uçak ve roket yapımı olarak sıralanabilir. Bu kaynak yöntemi ile klasik metotlarının üzerinde mekanik özellikler bekleyen özel konstrüksiyonların kaynaklanma işlemi nispeten başarılı olarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemin en büyük dezavantajı kaynak sırasında vakumlu bir ortamı gerektirmesidir (Çalık 2004).

Elektron demeti ile kaynak, yüksek hızlı elektron demetinin malzemeye çarpması sonucunda malzemenin ısınması prensibine dayanmaktadır. Isı memba olarak elektron ışının gaz alevi ve elektrik arkına karşılık, kaynak yerinde 10.000 kat daha yüksek bir ısı yoğunluğu elde edilir (Anık, 1983). Kaynak genelde vakum altında yapıldığından kaynak metali oksijen, azot, hidrojen gibi zararlı elementlerden çok az etkilenir. Genelde ilave malzeme kullanımına gereksinim yoktur. Bu yöntem ile kaynak derinliğinin genişliğine oranı 25:1'e kadar yüksek kaliteli kaynak elde etmek mümkün olmuştur. Mikrometre mertebesinden 100 mm' nin üzerine bir kalınlığa kadar rahatlıkla birleştirme yapılabilir. Diğer hiçbir yöntemle bu gerçekleştirilmez (Çalık 2004). Ancak elektron demeti ile kaynağın bazı dezavantajları vardır.

Bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

1. Ekipman maliyeti diğer kaynak sistemlerine oranla yüksektir.
2. Kaynatılacak malzemelerin yüzey hazırlıkları zaman ve maliyet alır.
3. Vakum hücresi sebebiyle iş parçasının boyutları sınırlanır.
4. Yüksek Derinlik/Genişlik oranlı kaynakların hazırlanmasında parça birleşme kenarlarının ve birleştirme açısının uygun olması gerekir. Ayrıca elektron ışının boyutlarının küçük olması birleştirme boşluğunu da küçültür (Çalık 2004).
5. Hızlı soğuma oranı, sert ve kırılgan kaynak dikişine neden olabilir.

6. Elektron ışının manyetik alan aracılığıyla saptırılması sebebiyle kaynak işlemi hassas ayarlar gerektirir.

7. Vakumsuz ortamda yapılan elektron ışın kaynağında tabanca ile iş parçası arasındaki mesafe, kaynak bağlantısına bitişik alanlarda ürün tasarımını sınırlar.

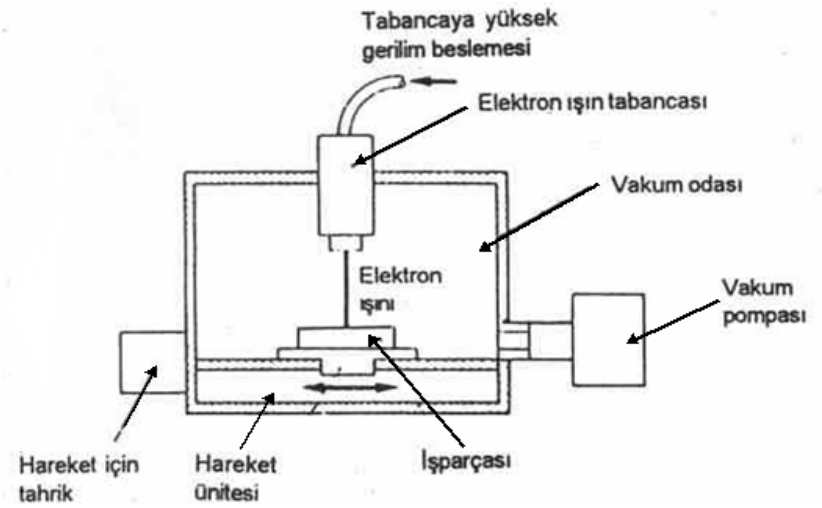
8. Elektron ışın kaynağının bütün modellerinde kaynak sırasında oluşan X ışınlarından çalışan kaynak işçilerinin korunabilmesi için pahalı koruyucu kıyafetler gerektirir (Özcan, 2003).

9. Vakum oluşturmak zaman ve maliyet almaktadır.

10. Teknik kapasitesi yüksek operatör gerektirmektedir.

11. Işınların odaklandığı yerde yüksek sıcaklığın etkisiyle metal buharlaşma sıcaklığına çıkar, bu durum ana metalin kimyasal bileşiminden farklı kaynak dikişi elde edilebilir (Çalık 2004).

Tüm bu dezavantajlarına rağmen elektron demet kaynağı kısmı olarak otomobil ve uçak sanayisinde lazer demet kaynağının endüstride kullanılmasına başlayıncaya kadar yaygın olarak kullanılmaktaydı. Şekil 4.10, elektron ışın demeti kaynağının elemanlarını göstermektedir. Günümüzdeki en yüksek kaynak teknolojisi olarak kabul gören ve hemen her alanda başarılı olarak kaynak yapabilen lazer ışını ile kaynaklama 1970' li yıllardan sonra gelişme göstermiş ve robotlu uygulamaları ile rakipsiz hale gelmiştir (Günay, 2001).



Şekil 4.10. Elektron ışını ile kaynak makinesinin temel elemanları (Günay ve ark. 2001).

Birçok açıdan lazer kaynağı elektron ışını ile kaynağa benzerdir. Işın parça yüzeyine çarptığında kinetik enerji salınır ve metal üzerinde küçük bir eriyik havuzu oluşur. Elektronik endüstrisindeki nokta kaynağı için özellikle tellerin düz yüzeylere birleştirilmesinde ve kenar birleştirilmelerinin sağlamlaştırılmasında düşük güçte lazerler kullanılmaktadır. Montaj parçalarının sürekli olarak küçülmesi, birleştirme tekniğinin daha küçük boyut ve alanlarda yapılmasını gerekli kılmaktadır. Küçük boyutları kapsayan alanda, klasik kaynak usulleri (elektrik direnç kaynağı hariç) kullanılamaz. Bu durum, elektron ışını ve lazer ışını ile kaynak gibi yeni birleştirme usullerinin gelişimini teşvik etmiştir (Günay, 2001).

Lazer demet kaynağı, elektron demet kaynağı gibi yüksek derecede vakum ortamı gerektirmez. Ayrıca X-ışınları da oluşturmaz. Lazer ışın demetinin yüksek derecede uyumluluğu odaklanarak çok küçük bir noktaya 10^6 W/cm^2'nin üzerinde bir güç yoğunluğunun uygulanmasını mümkün kılar. Bu güç yoğunluğunda, malzeme tabanında ısı yayılımı çok hızlı bir şekilde (iletim yoluyla) gerçekleşmektedir. Lazer kaynağında, ışın demetinin odaklandığı yerdeki leke çapına düşen malzemeyi eritecek kadar enerji uygulanmalıdır.

CO_2 lazerler kaynak kalitesinin mükemmel, üretim hızlarının yüksek olması nedeniyle endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır (Tarakçıoğlu ve Özcan, 2004). Ancak CO_2 lazerler otomasyona yönelik robotlu uygulamalarda bazı dezavantajlara sahiptir. Işın taşıma sistemlerinin katı-hal ve diyot lazerlerine göre daha karmaşık bir yapıda olması robot uygulamalarında bu yöntemi sınırlamaktadır. Nd:YAG lazerlerde ise fiber optik kablolar kullanılarak ışın taşıma işlemi gerçekleştiğinden robotik uygulamalarda daha çok tercih edilmektedir.

4.2.2.3. Kaynak kalitesini etkileyen unsurlar

Genel olarak kaynak kalitesi aşağıda sayılan faktörlere bağlıdır. Bu faktörler;

1. Malzeme,
2. Malzemenin hazırlanması,
3. Kaynak yapım şekli,
4. Kaynak dolgu malzemesi seçimi,
5. Kaynak operatörünün ustalığı,

6. Kontrol,

şeklinde sayılabilir. Yapılan kaynağın kalitesini bu faktörler belirler. Buradaki altı özelliğinde arandığı kaynak 1. sınıf, ilk beş özelliğin arandığı kaynak 2. sınıf, bu özelliklerin aranmadığı kaynak ise 3. sınıf kaynaktır (Anık 1991).

Lazerle kaynak işleminin kalitesi, lazer parametreleri ve işlem şartlarına çok yakından bağlıdır. Bu parametreler kullanılacak lazerin tipini, iş parçası üzerine lazer demetinin odaklanma biçimini, güç dağılımını vb. ifade eder. Lazer parametreleri daha ayrıntılı olarak ifade edilirse; demet biçimleyici merceklerin odak uzaklığı, odak leke boyutu, odak derinliği, demet genişliği ve kararlılıklarını kapsarlar. İşlem parametrelerine gelince bunlar; kaynak hızını, malzeme seçimini, kaynatılacak malzemelerin sabitlenmesini, kaynak şeklini, kaynak bölgesinin temizliğini, koruyucu ve yardımcı gazların tipini ve saçılmaya karşı niteliklerini kapsar (Tarakçıoğlu ve Özcan, 2004).

4.2.2.4. Lazerle kaynağın temel prensipleri ve uygulama alanları

Lazer kaynağı, teknolojik şartlara bağlı olarak, iki temel prensipten birini esas alarak gerçekleştirilmektedir;

- Derinlemesine nüfuz eden lazer kaynağı (Key Hole Laser Welding),
- İletimsel lazer kaynağı (Conduction Laser Welding).

Yüksek güçlü lazerlerin en önemli uygulama alanlarından biri saç malzemelerin kaynatılması işlemidir. Bu tür kaynağın en geniş ve vazgeçilmez uygulama alanı otomotiv sektörüdür. Bu alan lazerle imalat pazarının %30'nu oluşturmaktadır. Bunun dışında, değişik amaçlı malzemelerin birleştirilmesi için de lazer kaynağı kullanılmakta ve lazerin bu alanda uygulaması hızla genişlemektedir. Günümüzde yapımı çok zor olan metal konstrüksiyon kalıplarının yapılıp dökülmesi yerine daha basit kalıplarla dökülen parçaların lazer kaynağı ile birleştirilmesi çok daha kolaydır. Lazerler, otomasyona uygunlukları sebebiyle endüstride gün geçtikçe daha etkin olarak kullanılmaktadır. Robotik uygulamalarda ekseriyetle Nd: YAG ve son beş yılda büyük bir gelişim gösteren diyot lazer sistemleri kullanılmaktadır. Fiber optik kablolar lazer ışınının operasyon yerine taşınmasında CO_2 lazerlere nazaran büyük kolaylıklar sunmaktadır.

CO_2 lazerlerin robotik uygulamaları ise ekseriyetle çok yüksek güçlerin (10-20 kW) gerektiği durumlarda tercih edilmektedir.

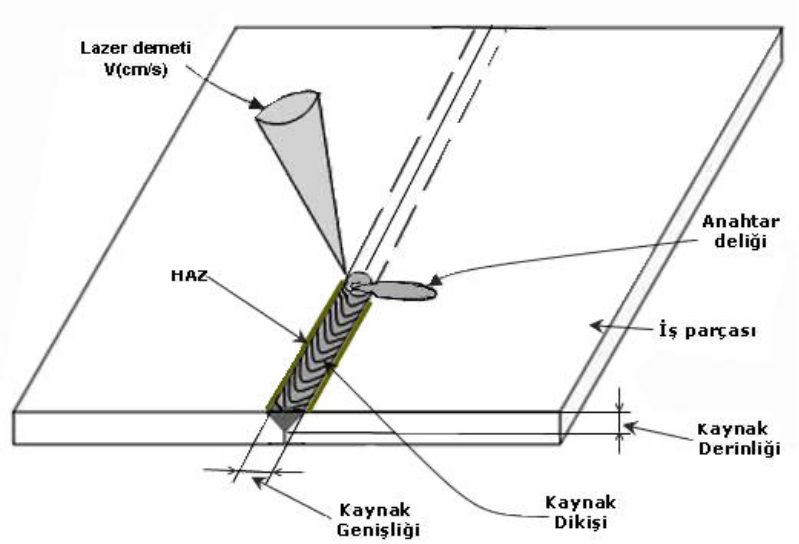
4.2.2.4.1. Anahtar deliği yöntemiyle lazer kaynağı

Derinlemesine nüfuz yöntemi ile elde edilen lazer kaynağına Anahtar Deliği manasına gelen "KEY HOLE" yöntemi de denir. Yeterince güç yoğunluğuna sahip bir lazer ışın demeti malzeme üzerine odaklanırsa anahtar deliği elde edilir (Özcan, 2003). Anahtar deliğinin meydana geldiği yerde bir eriyik havuzu oluşur. Havuz içindeki erimiş halde bulunan malzeme yer çekimi, yüzey gerilmesi, metal buharı basıncı ve uygulanan yardımcı gazın etkisiyle dengede bulunur. Anahtar deliği oluşumu lazerle kaynak yapmanın temelini oluşturur (Jin ve Li, 2003).

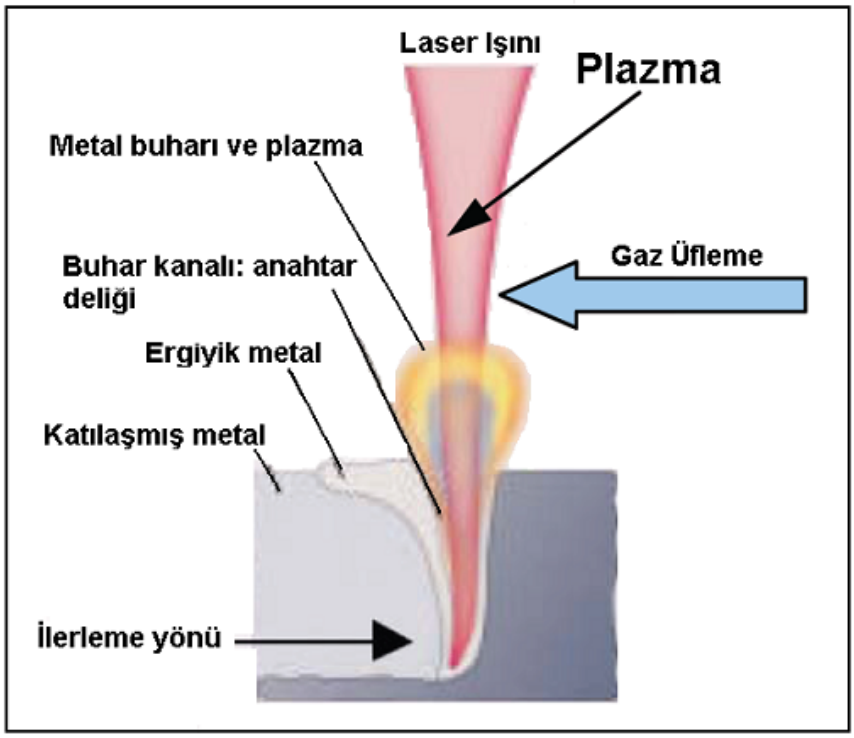
Anahtar deliği, eriyen metal ve onun dışını çevreleyen katı metalden oluşur. Bu delikte oluşan buhar basıncı, malzeme yüzeyindeki gerilme ve eriyen metalin hidrostatik basıncı ile dengelenir. Anahtar deliği oluşumundan sonra sabit bir hızla hareket ettirilen kaynak tablası veya lazer kafası kaynak işlemini devam ettirir. Anahtar deliği, malzeme hareket ettikçe kaynak dikişi oluşturarak kaynak işleminin tamamlanmasını sağlar. Şekil 4.11'de anahtar deliği oluşturmak suretiyle lazerle kaynak işlemi gösterilmiştir.

Anahtar deliğinin en önemli faydalarından biri de oluşumundan sonra malzemenin lazer ışınını yutma oranını % 98'lere ulaştırmasıdır. Lazer ışınının malzeme tarafından yüksek oranda yutulması, bu küçük deliğin bir anda genişleyip bir eriyik havuz oluşmasına neden olur. Malzeme veya lazer ışınının hareketiyle eriyik havuzunun ön tarafı erirken, arkada kalan erimiş metal soğuyarak katılaşır (Uzun ve ark., 2004).

Uygulanan lazer ışın demetinin gücü, seçilmiş olan hareket hızında metali eritecek kadar büyük, ama çukurdaki metali buharlaştırıp yok etmeyecek kadar küçük seçilmelidir. Bunun yanında kaynak çukuru oluşur oluşmaz lazer ışınının gücü kontrollü olarak azaltılmalıdır (Özcan, 2003). Bir diğer yol da kaynak ilerleme hızının artırılmasıdır. Lazer ışını ile kesme ve kaynaklama gibi işlemleri başarılı bir şekilde yapabilmek için, lazer ışın gücü-ilerleme hızı ikilisi için seçilen değerler optimum olmalıdır.



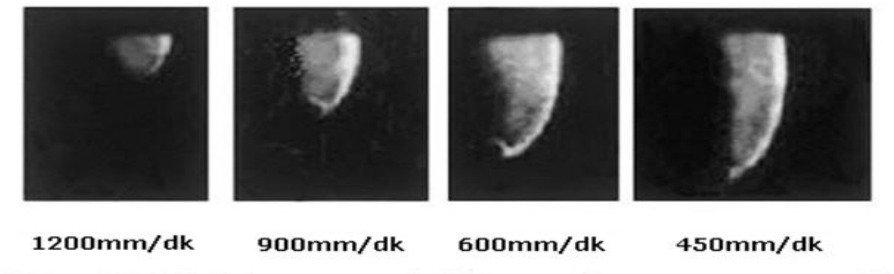
Şekil 4.11. Lazerle kaynak işleminin gösterilmesi.



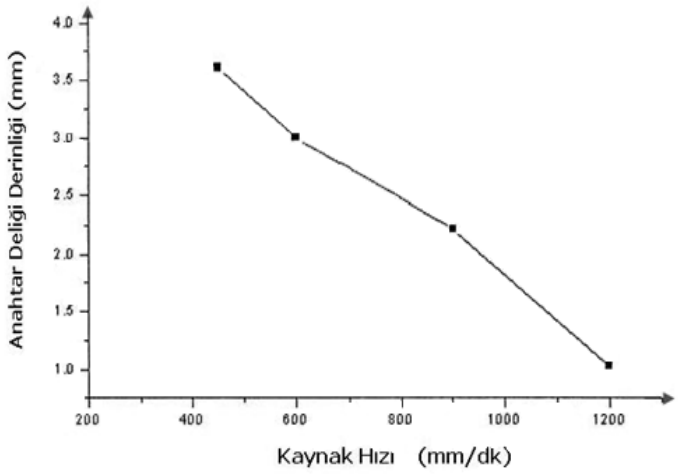
Şekil 4.12. Lazerle kaynak işlemi. (Yeşildal, 2008)

Kaynak işleminde dikkat edilmesi gereken bir diğer faktör de kaynak yapılacak malzemelerin erime noktalarının birbirine yakın olmalarıdır. Aksi halde erime noktası düşük olan metal buharlaşır ve sonuçta kaynak bölgesinde dikiş yerine birtakım çukurların oluşmasına neden olur. Başka bir diğer önemli husus ise kaynatılacak

metallerin yeterli kalınlığına sahip olmasıdır. Anahtar deliği oluşturarak lazerli kaynak işlemi, kalın malzemeler için uygun bir yöntemdir (Ion, 2005). Kaynak işlemi için önemli bir etken olan anahtar deliği oluşumu birçok parametrenin optimizasyonuna bağlıdır. Şekil 4.12'de lazer kaynak işleminin aşamaları gösterilmiştir (Yeşildal, 2008). Şekil 4.13'te, farklı kaynak hızlarında anahtar deliği oluşumları gösterilmiştir(Jin ve Li, 2003).



Şekil 4.13. Farklı kaynak hızlarında anahtar deliği oluşumu (Jin ve Li, 2003).



Şekil 4.14. Kaynak hızının anahtar deliği oluşumuna etkisi.

Anahtar deliğinin çapı ve derinliği;

- Malzemenin lazer ışınını yutma oranı,
- Kaynak hızı,
- Lazer ışınının odaklanma biçimi,
- Koruyucu gazın seçimi ve geometrik konumu,

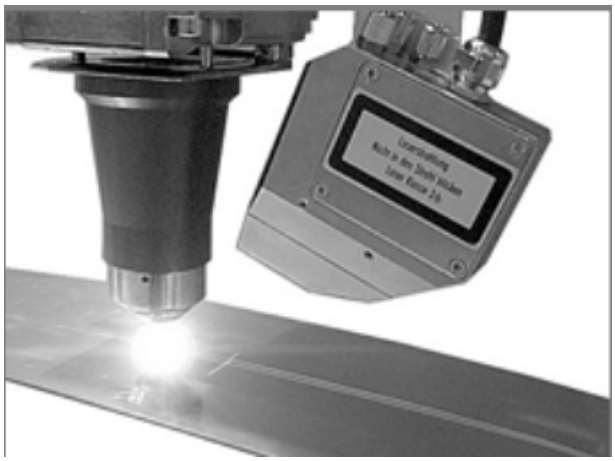
- Lazer ışınının taşıdığı güç,

gibi etkenlere bağlıdır. Farklı kaynak hızlarında oluşmuş anahtar deliği derinlikleri şekil 4.14' te gösterilmiştir (Jin ve Li, 2003).

Anahtar deliği yöntemi hemen her alanda kullanılabilen bir yöntemdir. Lazer ışınının taşıdığı güç bu yöntemde 20 kWatt değerlerine kadar çıkabilmektedir. Darbeli ya da duruma göre sürekli dalga modundaki ışınlar kullanılabilir. Otomotiv sektöründe subap başları, şanzıman ve diferansiyel dişlileri, şasi, kardan mili vb. kaynaklar başarı ile yapılmaktadır. Bu yöntem ile gemi saclarının birleştirilmesinden tarım makinelerine, uçak iskeletinden türbin kanatlarının birleştirilmesine kadar birçok alanda başarılı kaynaklamalar yapılabilmektedir.

4.2.2.4.2. Lazerle iletimsel kaynak

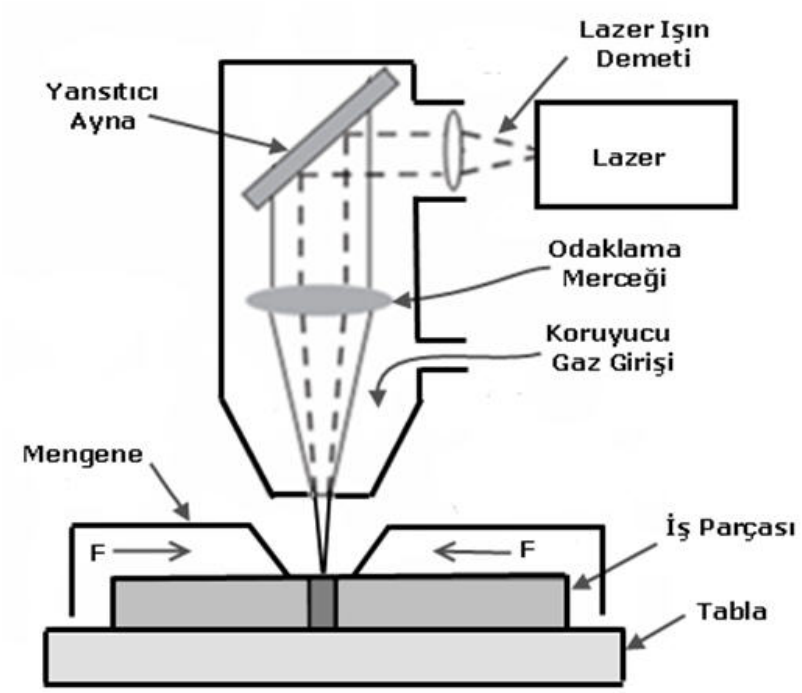
Malzemelerin kaynatılmasında kullanılan lazerle iletimsel kaynak (Conduction Laser Welding) sisteminin temeli, birbirine basınç uygulanarak yakınlaştırılmış parçaların lazer ışınını yutarak kaynama noktasına ulaşmasıdır. Kaynama noktasına ulaşmış malzemelerin sabit bir kuvvetle birbirine itilmesi ile birleşme meydana gelir. Bu kaynak usulü çoğunlukla ince metallerin birbirine kaynatılmasında kullanılır. Kalın malzemelerde ise istenilen verim alınamaz. Bunun sebebi iletim yoluyla malzemenin yuttuğu ısının malzemeye yayılmasıdır. Genellikle düşük güçlü lazerler ile yapılan iletimsel kaynak 2 mm' nin altındaki kaynak kalınlıklarında verimlidir.



Şekil 4.15. Lazer ile iletimsel kaynağın sert metal levhalara uygulaması (Wirth, 2005).

Seçilen lazer gücü, kaynak işleminde kaynak dikişine etki eden en önemli parametredir. Bunun sebebi ince malzemelerin kaynaklanmasında lüzumundan fazla lazer gücünün kullanılması halinde kaynak etkisinden çok kesme veya yakma etkisinin meydana gelmesidir. Bir diğer önemli husus ise kaynatılacak yüzeylerin birbiri üzerine, hiçbir açıklık kalmayacak şekilde temas etmeleridir. Birleştirilecek levhalar arasında kalabilecek boşluklar, kaynak dikişinin stabilizasyonunu olumsuz etkiler. Levhaların birbirine iten kuvvet de tüm kaynak yüzeylerine eşit oranda uygulanmalıdır. Şekil 4.15 te, lazer ile iletimsel kaynağın sert metal levhalara uygulaması gösterilmiştir.

Lazer ile iletimsel kaynak işlemi yardımcı gazın tesirine de bağlıdır. Yüksek debi, kullanılan nozzle' ye bağlı olarak jet etkisi gösterebilir. Bu etki ise ince levhalarda kaynaktan çok kesme neticesini doğurabilir. Şekil 4.16 da, lazerle iletimsel kaynak usulünün basit bir düzenek ile gösterilmiştir.

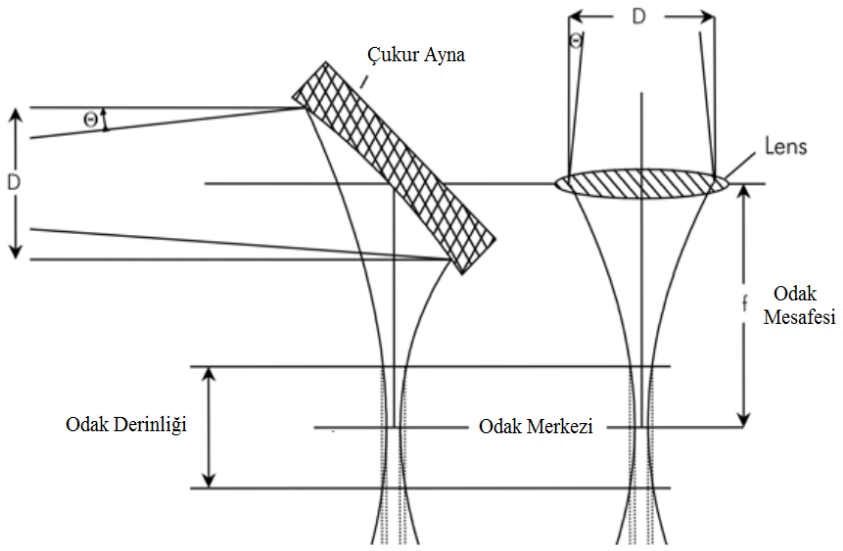


Şekil 4.16. İletimsel kaynak düzeneği.

Lazerle iletimsel kaynak elektronikte, uzay taşıtlarında ve tıpta yaygın olarak kullanılır. Araç gövdelerinin ince metaller kullanılarak birbirine kaynatılması iletimsel kaynağın kullanım alanına girer (Özcan, 2003). Çok ince levhaların kaynatılması gerektiğinde lazer iletim kaynağı üretim hızı ve kaynaklama maliyeti açısından

alternatifsizdir. Ancak en temel gereksinimi olan kaynatılacak levhaların yüzey hizalama ve birbirine itme ekipmanları her imalat için değişken tasarımlar gerektirebilmektedir.

Lazer ile iletimsel kaynağın oluşumu doğru parametrelerin seçilmesine bağlıdır. Yüksek ışın gücü levhanın delinmesine, düşük lazer gücü ise kaynak yerine sertleştirme etkisine neden olabilir. Işının odak değeri de çok önemlidir. Odak mesafesi doğru seçilmez ise güç parametresine benzer sorunlar oluşabilir. Lazer ile iletimsel kaynakta odak mesafesi anahtar deliği yöntemine nazaran daha küçüktür. Şekil 4.17 de lens veya ayna kullanarak iki farklı odaklama yöntemi gösterilmiştir (Wirth, 2005).



Şekil 4.17. Lens ve ayna kullanarak lazer ışınının odaklanması (Wirth, 2005).

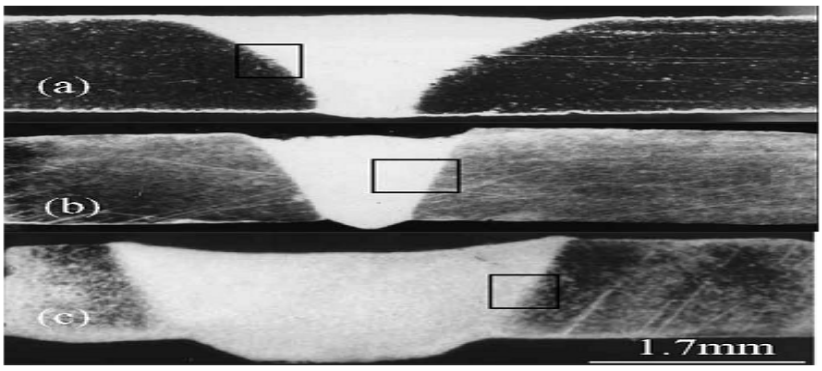
İletimsel kaynak yöntemi için 1000 Watt'a kadar olan lazer güçleri yeterlidir. Ancak derinlemesine nüfuz yönteminde bu güç değeri malzemenin cinsine ve kaynak kalınlığına bağlı olarak 20 kWatt değerlerine kadar çıkabilmektedir. Nd:YAG veya karbondioksit lazer makineleri iletimsel kaynak yapabilecek özellikteki ışınları üretebilirler. Genel olarak eritme ve eriyen metallerin basınç etkisi ile birleştirilmesi prensibine dayanan iletimsel kaynak yöntemine otomobil kaportaları, kavrama balataları, radyatör ısı transfer levhaları vb. parçalar örnek olarak verilebilir. Şekil 4.18 de Audi marka araçların kaporta kaynaklarının lazer ile lazer ile yapılması gösterilmektedir (Wirth, 2005). Günümüzde otomobil üretici firmalar, araçların güvenliği için farklı birleştirme yöntemleri kullanmaktadır. Ama hemen hepsi üretim sürecinin çeşitli safhalarında lazer kaynağı tekniğini kullanma noktasında birleşmişlerdir.



Şekil 4.18. Audi araçlarının lazer ile kaynaklanması (Wirth, 2005).

4.2.2.4.3. Hibrit kaynak yöntemi

Hibrit kaynak olarak bilinen, lazer kaynak sistemine ilave bir dolgu teli kullanarak veya kullanmadan başka bir kaynak yönteminin ilavesiyle yapılan kaynaklar, mükemmel sonuçlar verdiği gibi çok kalın malzemelerin kaynatılmasında ve büyük açıklıkların kapatılmasında başarılı sonuçlar sunmaktadır. Burada önemli olan doğru kaynaklama materyallerinin seçilmiş olmasıdır. Şekil 4.19 da AZ31B magnezyum alaşımının sırasıyla; lazer-TIG, yalnız lazer ve yalnız TIG kaynağı ile kaynaklanmasının kesit görüntüleri görünmektedir (Liming ve ark., 2004).



Şekil 4.19. Kaynak kesit görüntüleri (Liming ve ark., 2004).

a) Lazer-TIG Kaynağı b) Lazer Kaynağı c) TIG kaynağı

Hibrit kaynaklama sisteminin genel avantajları şu şekilde sıralanabilir:

1- İlave dolgu telinin kullanıldığı kaynaklama yöntemlerinde buharlaşan metalin yerine geçen dolgu teli, kaynak bölgesindeki kütle kaybını telafi edebilmektedir.

2- İlave dolgu teli yüksek ısının etkisi ile tamamen yanarak veya damlalar halinde düşerek azalan eriyiğin yerine geçerek kaynak dikişi mukavemetini artırır.

3- Kaynak dikişinde meydana gelen gözenekli mikro yapıyı minimize eder.

4- Kaynaklama sırasında meydana gelen kaynak eriyiğinin gevrekliğini azaltır.

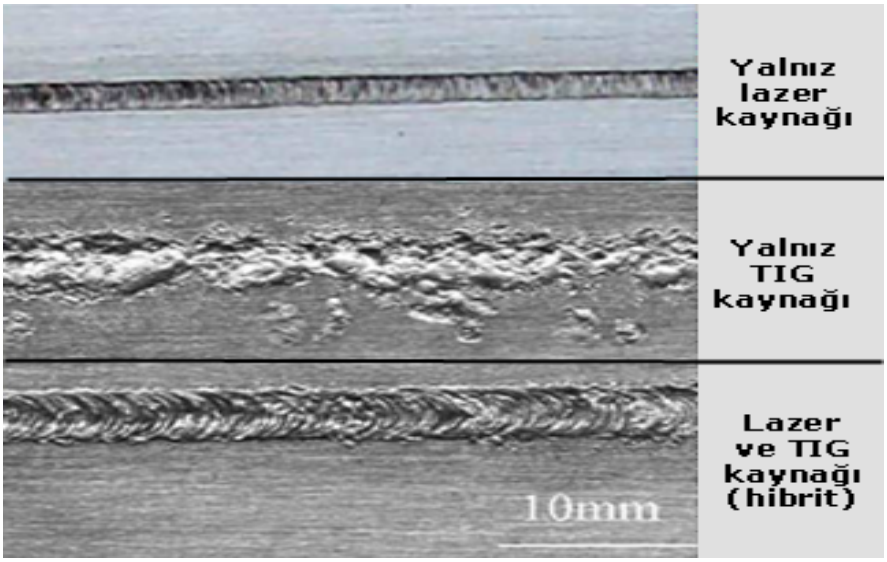
5- Kaynak sonrası katılaşan metal eriyikte meydana gelebilecek gerilme korozyonu çatlaklarının önüne geçer.

6- Kaynak işleminin ilerleyişini düzenleyerek kolaylaştırır.

7- Geniş aralıklı parçaların kaynaklanmasında dolgu malzemesi boşluk kapatma özelliği ile başarılı kaynaklama işlemine olanak sağlar.

Hibrit kaynak yöntemi hemen tüm kaynaklama yöntemlerinde mevcuttur. TIG kaynağını ele alırsak, normalde dolgu teli kullanmadan, tungsten telinden malzeme yüzeyine yönlendirilen ark ile malzeme ısınarak erimektedir. Ama geniş aralıkların kapatılması söz konusu olduğunda veya konstrüksiyona bağlı olarak kaynaklanması zor olan bölgelerin kaynatılmasında MIG kaynağı tercih edilmeli ve ilave dolgu teli kullanılmaktadır. Burada önemli olan ilave dolgu telinin seçimidir. Zira olabildiğince homojen kaynak yapabilmek için kaynaklanan malzemeye, mümkün olduğunca kimyasal özellikleri bakımından yakın dolgu teli seçilmelidir. Şekil 4.20 de üç farklı kaynak dikişi gösterilmektedir (Liming ve ark., 2004).

Hibrit kaynaklama işleminde seçilen kaynaklama ikilisinin malzeme üzerindeki ısıl etkisi dikkate alındığında, aktarılan güç ve kaynak ilerleme hızı optimizasyonun iyi yapılması gerekmektedir. Alaşım içerisinde kaynama noktası düşük metallerin buharlaşması ile kaynak bölgesindeki mekanik özellikler olumsuz olarak etkilenebilmektedir. Hibrit kaynaklama ikilisinin yerleşim şekli kaynaklama bölgesinin mikro yapısında değişik tane büyüklükleri oluşumda etkilidir.



Şekil 4.20. Lazerle hibrit kaynak (Liming ve ark., 2004).

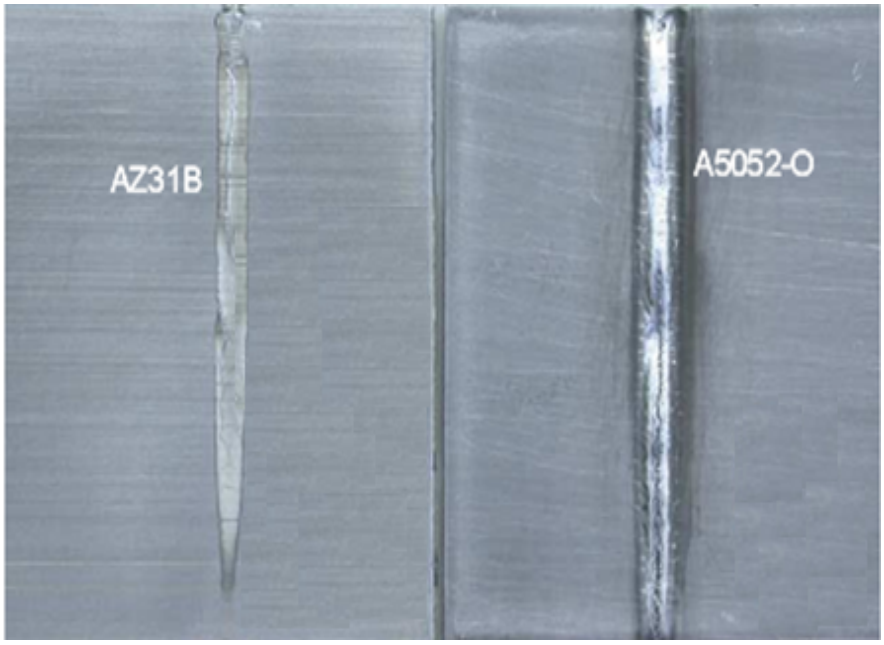
4.2.2.5. Lazer kaynağının avantaj ve dezavantajları

Lazer kaynağı yüksek ısı yoğunluğu ve ısının çok küçük bir alana odaklanabilmesi gibi iki temel işleme dayanır. Şekil 4.21 de lazerle yapılmış iki kaynak gösterilmektedir (Borrisutthekul ve ark., 2005). Çok ince (1 mm den küçük) lazer ışınıyla kaynaklanan bir levhada diğer malzeme yüzeyleri ısıdan etkilenmediği için son derece az bir içyapı bozulması (etkilenmesi) olur. Bu da onun en iyi özelliği olarak sayılabilir. Klasik metotlarla kıyaslandığında lazerle kaynak yönteminin yüksek güce sahip (10-20 kW) lazer makineleri kullanılması ile kaynaklama; malzeme içinde daha derinlere nüfuz ederek daha iyi kaynak yapması, kaynak dikişinin optimizasyonu ile kaynak kalitesini artırması diğer bir avantajı olarak sayılabilir.

Lazer kaynağı; yüksek kaynak ilerleme hızı, derin nüfuziyet, düşük distorsiyon ve düşük toplam ısı girdisiyle ark kaynağı gibi klasik ergitme kaynaklarına göre çok üstündür. Ayrıca lazer ışınının hassas olarak odaklanabilmesi ve belirli bir açıyla kaynak bölgesine yönlendirilebilmesi; kaynak dikişinin ark kaynağına nazaran çok dar olmasını sağlamaktadır. Bunun yanında toplam ısı girdisinin düşük olması sebebiyle mikro yapıdaki değişimlerin azalmasına ve malzemenin mekanik özelliklerini korumasına olanak sağlar. Diğer bir özelliği ise ısı girdisi azlığı sebebiyle kaynak parçalarının çarpılmalarını engellemesidir. Ayrıca lazer kaynağı kaynama noktaları aynı ya da birbirine yakın metal alaşımlarının kaynatılabilmesini mümkün kılar.

Lazer kaynağının otomasyona uygun olması ve fabrikalardaki işlem miktarını artırması, maliyetleri düşürmesi, birden çok aparat ve makineye ihtiyaç duymaması, kullanıcı hatalarını sıfıra indirmesi gibi sebeplerden dolayı endüstride hızla yaygınlaşmaktadır (Pakdil ve ark., 2005).

Lazer kaynağının yaygınlaşmasında en büyük engel ilk yatırım maliyetinin yüksek olmasıdır. Kaynak yapılacak parçaların çok iyi sabitlenmesi ve yüzey temizliğine dikkat edilmesi lazer ışınının malzemeye doğru ulaşmasında önemli etkenlerdir. Bazı metallerin yüksek derecede yansıtma özelliği ise bu kaynak yöntemini zorlaştırmaktadır.



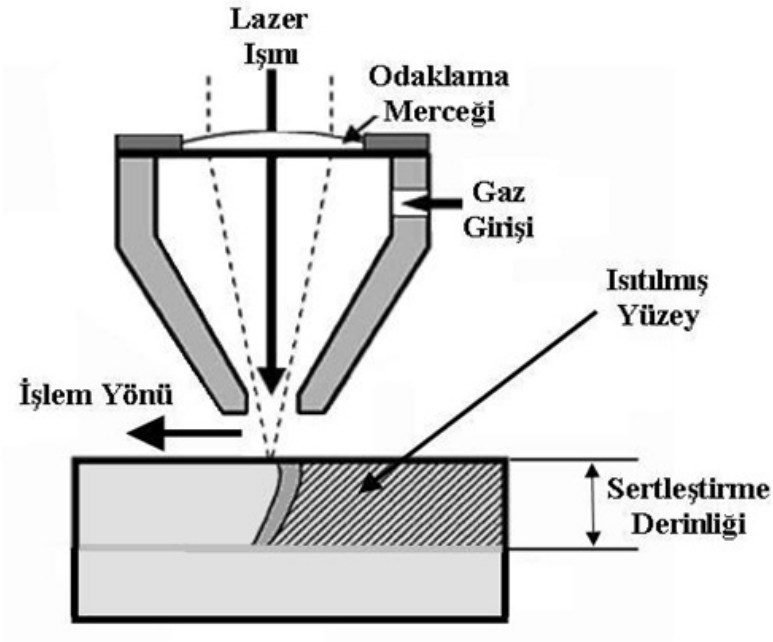
Şekil 4.21. Lazerle yapılmış iki kaynak (Borrisutthekul ve ark., 2005).

4.2.3. Sertleştirme işlemi

Malzemelerin, mikro ve makro boyutta belli başlı niteliklerinin tespiti kullanılacağı yere göre değişmektedir. Makine elemanlarının birçoğu sertleştirme işlemine tabi tutulurlar. Sertleştirme işlemi ise bir malzemenin belirli bir ısıya maruz bırakılmasıyla elde edilir. Bilinen en klasik sertleştirme işlemi sementasyondur. Malzemenin belirli bir ısıyla ısıtılması sonucunda ısıtılan bölgenin içyapısında değişim oluşturulur. Daha sonra aniden veya zamanla soğutma işlemi uygulanarak malzemede bir sertleşme işlemi meydana getirilir.

Lazerin sahip olduğu odaklanabilir yüksek ısı malzeme üzerinde istenilen yerlerin sertleştirilmesinde kullanılmaktadır. Özellikle otomotiv sektöründe; krank mili muylularının, piston segman kanallarının, piston piminin, kardan milinin, vites kutusu içerisindeki grup millerinin ve dişlilerinin, kam mili muylularının, supap başları ve saplarının, diferansiyel dişlilerinin v.b. sertleştirilmesinde yaygın kullanılmaktadır. Tarım makinelerinde kullanılan kesici aletler, istenilen alanda ve istenilen derinlikte sertleştirme işlemine tabi tutularak seri bir şekilde üretilebilmektedir.

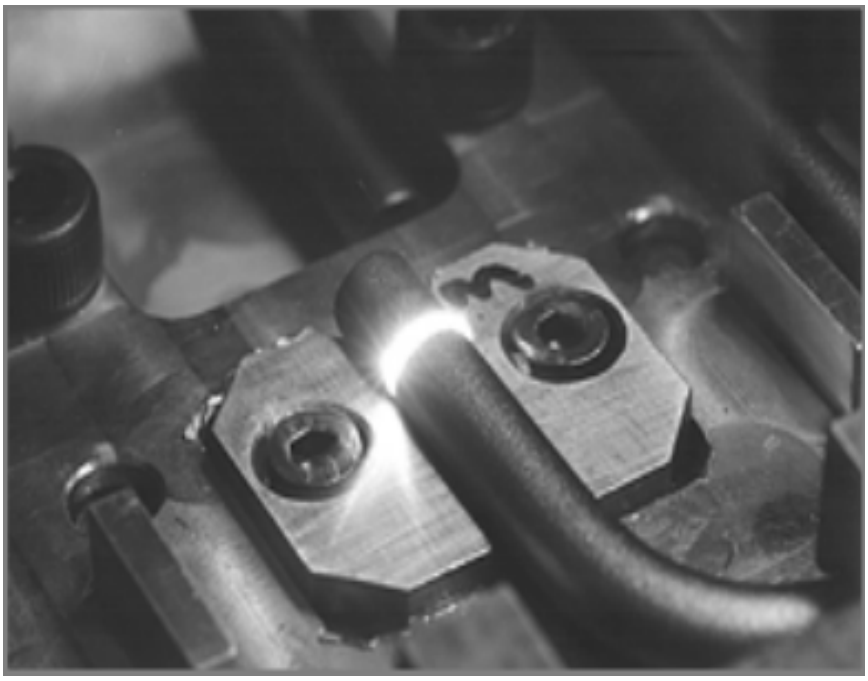
Öncelikle malzemede setleştirilmesi düşünülen bölge tespit edilir. Yine bir CNC tezgahına entegre edilmiş lazer ışını malzeme yüzeyine gelecek şekilde hassas olarak odaklanır. Lazer gücü ve nüfuz derinliği optimum olarak ayarlandıktan sonra istenilen ısıl işlem yüzeysel veya derinlemesine olarak lazer ışını malzeme üzerinde gezdirilir. Tarama sırasında ya da daha sonra malzeme özelliklerine bağlı olarak hızlı veya yavaş soğutma yollarından birisi tercih edilerek malzeme yüzeyinde sertleşme meydana getirilir. Şekil 4.18'de lazer ile sertleştirme işlemi düzeneği gösterilmiştir (Lamikiz ve ark., 2005).



Şekil 4.22. Lazer ile sertleştirme işlemi (Lamikiz ve ark., 2005).

Lazer ile sertleştirme yapılırken darbeli ışın modu ekseriyetle tercih edilmez. Kullanılacak lazer ışınının taşıdığı enerji malzemeye göre optimize edilmelidir. Zira yüksek enerji girdisi, ısıl işlem yapılan malzemenin ısı iletim katsayısına bağlı olarak

malzeme yüzeyinde metal erimesi gibi yüzey kusurları oluşturulabilir. Darbeli mod lazer ışınlarının tercih edilmemesi de bu sebebe dayanır. Bir diğer önemli hususta lazer ile sertleştirme işleminin kesme ve kaynak işlemine nazaran daha geniş bir spot çapına ihtiyaç duymasıdır. Bu yüzden sertleştirme lazerleri klasik yollarla odaklanmazlar. Işının şeklini ve odaklama işlemini ayarlayan kollimator ayna ve lens düzenekleri kullanırlar.



Şekil 4.23. Lazer ile lokal sertleştirme işlemi (Wirth, 2005).

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Giriş

Bu çalışmada lazer kaynak numunelerinin üretilmesi için gerekli metalik malzeme, lazer tezgâhının kaynak yapabilme kabiliyeti dikkate alınarak seçilmiştir.

Lazerle kaynak işlemi, Selçuk Üniversitesi Vakfı bünyesinde kurulmuş olan KONLAZER Ltd. Şti.'nin sahip olduğu Wegman-Basel firması tarafından üretilen TRIAGON 2500 markalı lazer kesim tezgâhı ile yapılmıştır.

Lazer ile kaynaklanmış numuneler ile yapılan deneylerin çeşitleri ve yapılma sıraları yazılacak olursa bu deneyler dört ana gurupta incelenebilir. Bunlar;

i. Kaynak bölgesi ve etrafında meydana gelen sertlik değerlerinin tespiti için yapılan mikro sertlik ölçme deneyleri,

ii. Kaynak bölgesindeki mekanik özelliklerin tespiti için yapılan üç noktadan deneyleri,

iii. Kaynak bölgelerindeki ısıl çatlak, geçiş bölgeleri vb. gözle görülemeyen kaynak kusurlarının tespiti için yapılan SEM (Scanning Electron Microscopy) incelemeleri,

iv. Kaynak kalitesi ve içyapı kusurlarının tespiti için yapılan radyografik deneyleri.

şeklinde sıralanabilir.

5.2.Deneylerde Kullanılan Malzeme ve İşlemler

5.2.1. Malzeme seçimi

Endüstride hemen her alanda karşımıza çıkan çelik levhaları birbirine bağlama metotlarından en önemlisi kaynakla birleştirme yöntemidir. Endüstriyel amaçlı kullanımı da yaygın olan çelik levhaların kaynak bölgelerindeki mekanik özelliklerinin ve hasar davranışlarının bilinmesi, tasarım ve mühendislik hesaplamaları için çok önemlidir.

Bu tez çalışmasında LPG tankların üretimi için sıklıkla kullanılan uluslar arası standardı P265 NB olan ve ülkemizde Erdemir Ereğli Demir Çelik fabrikasında 6842 nolu standartla üretilmiş 3 mm kalınlığında çelik levhalar kullanılmıştır. Uygulanacak testler için TSE standartlarına uygun olarak boyutlandırılmış ve test işlemleri gerçekleştirilerek kaynaklı çelik levhaların mekanik özellikleri ve hasar davranışları gözlemlenmiştir. Seçilen çelik levhanın tipi ve kimyasal özellikleri tespiti için yapılan spektral analizin sonucu %Ağırlık olarak çizelge 5.1 de verilmiştir. Yine tablo 5.2 de seçilen malzemenin mekanik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 5.1. Seçilen malzemenin kimyasal analizi.

%Ağırlık olarak P265 NB malzemesinin kimyasal Analizi								
C	Mn	Cr	Al	Si	P	Si	Mo	Ni
0.0809	0.8250	0.0170	0.0382	0.0533	0.0114	0.0077	<0.0010	<0.0059
Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	Mg	Fe
<0.0061	0.0326	<0.0020	<0.0010	<0.0010	<0.0050	<0.0030	<0.0010	98.910

Çizelge 5.2. Seçilen malzemenin mekanik özellikleri.

Standart İsmi	Üst Akma Dayanımı	Çekme Dayanımı	Kopma Uzaması $L_0 = 80$ mm %	Normalize Sıcaklığı ºC
P265 NB	265 N/mm^2	410-500 N/mm^2	24	890-930

5.2.2. Lazer tezgâhı ve lazer ışın parametrelerinin seçimi

Lazer makineleri günümüzde sıklıkla metal kesme işleminde kullanılmaktadır. Ancak kesme için tasarlanmış lazerler bir takım değişiklikler ile bir kaynak lazerine dönüştürülebilir. Selçuk Üniversitesi Vakfı bünyesinde kurulmuş olan Konlazer Limited Şirketi, Üniversite-Sanayi işbirliğinin sağlanması amacıyla kurulmuş bir şirkettir. Şirket 2.8 KW gücünde bir CO_2 lazer kesim makinesine sahiptir. 3 x 3 metre ebadındaki kesim tablası, sürekli ve darbeli ışın verebilme yeteneğine sahip olan lazer tezgâhı Almanya'da Wegman-Basel firması tarafından üretilmiştir.

Tezgâhın CNC ünitesi üç eksenden oluşmakta olup tezgâha ilave edilecek olan kaynak kafası da hesaba katılarak Held Pedilas 3030 CNC ünitesi, X ve Y eksenlerinde

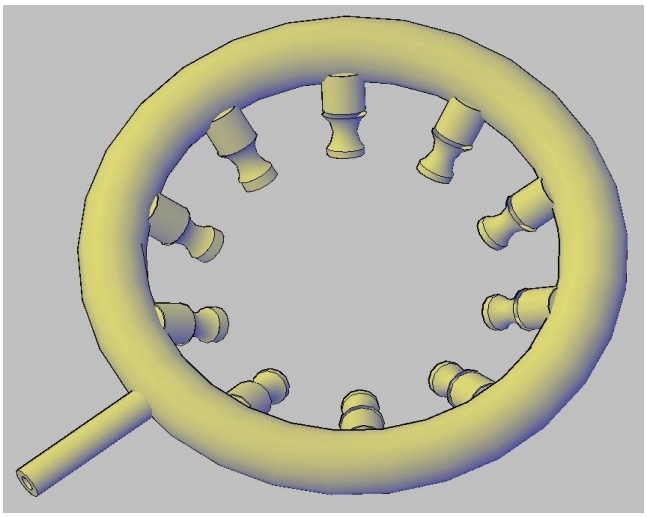
3’ er metrelik çalışma alanı sunması satın alma sırasında önemli bir tercih sebebi olmuştur. Tezgâhın genel olarak ek donanımları ile birlikte komple resmi Şekil 5.1 de verilmiştir. Yine tezgâhın genel olarak ışın karakteristikleri ve kapasitesi Çizelge 5.3. de verilmiştir. Deney için kullanılan lazer tezgâhı darbeli ve sürekli ışın üretebilme kabiliyetine sahip olup 500 W ile 2800 W arasında ışın gücü ayarlanabilmektedir. Literatürde kaynaklama işlemi CO_2 lazerlerde ekseriyetle CW mod ile yapıldığından, deney sırasında kullanılacak ışın CW mod olacak şekilde seçilmiştir. Kaynaklama işlemi için gerekli ışın gücü 2750 Watt olarak makineden seçilmiştir.

Kaynaklama işlemi için malzemenin kalınlığı dikkate alınarak 5” (F.L.) odak mesafeli lens seçilerek malzeme içerisine penetre edeceği en uygun odak noktası ayarlanmıştır. Koruyucu gaz olarak molekül yapısı küçük, uçucu ve asal gaz olduğundan Helyum gazı seçilmiştir. Helyum gazının saatteki akış oranı literatür dikkate alınarak 20 lt/dk şeklinde regülatörden kalibre edilmiştir. Gaz türbülanslı bir şekilde bir gaz-jet etkisi oluşturmaması amacı ile özel bir adaptör kullanılarak sıkı dokunmuş metal bir elekten geçirilerek kaynak bölgesine uygulanmıştır. Zira kesme işlemine benzer lazer ışını ile eş eksenli bir gaz akışının tatbiki kaynak işlemini olumsuz etkilemektedir. Dikiş stabilizasyonu, eriyik havuzunun çapı ve derinliği gibi temel kaynak süreçlerini sağlamak için koruyucu gazın Gaz-Jet etkisine sahip olmaması gerekmektedir (Ion 2005). Koruyucu gazın kullanım amacı kaynak bölgesindeki atmosferi yok etmek olduğu için buna yönelik bir tasarım tercih edilmiştir. Şekil 5.2 de, dairesel tasarlanmış çok noktalı akış düzeneği gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Lazer makinesi genel görünüm.

Gerçek metal ile kaynaklama yapmadan pilot lazer ile simülasyon yapılmış ve lazer kafasının birleşme noktasını izlediğinden emin olunmuştur. Kaynaklanacak numunelerin ışın yansıtma veya aşırı ışın yutma davranışları seğrilememesi için tel fırça ile yüzey pürüzlendirilmiş, korozyon kalıntıları temizlenmiştir. Yine kaynaklama öncesi aseton ile kaynaklanacak yüzeyler temizlenmiş, yağ ve benzeri kaynak kalitesini düşürecek etkiler bertaraf edilmiştir.

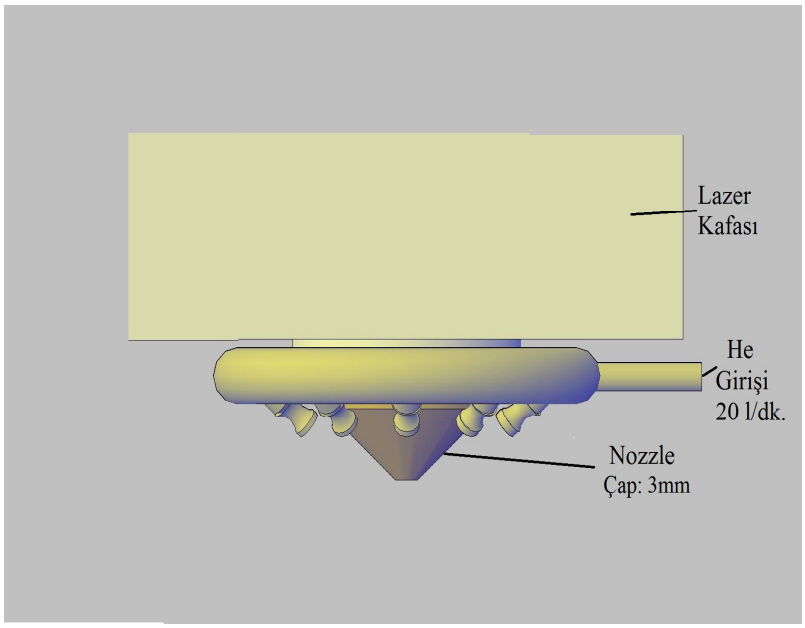


Şekil 5.2. Koruyucu gaz için yapılan çoklu üfleme (multi-blower) sistemi

Esas metal kaynağından önce başarılı kaynaklama işlemini elde etmek için 3 mm kalınlığında St-37 malzemeler ile kaynaklama işlemi başarı ile yapılmıştır. Ardından 500mm x 500mm bir levha halinde P265 NB çeliği lazer ile kaynaklama işlemi gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 5.3. Lazer ışın karakteristikleri ve kapasitesi.

Teknik özellikler	WB-Triagon 2500
Lazer tipi	Karbondioksit lazer
Dalga boyu	10600 nm
Güç çıkış aralığı	0-2800 W cw
Güç kararlılığı	± % 1.5
Işın modu	Düşük TEM
Işın çapı	16mm ± % 10
Darbe oranı	0-2.5 kHz
Darbe süresi	200 µs – cw
Gaz debisi (He, N_2, CO_2)	55 litre/saat
Besleme gücü	21 kW



Şekil 5.3. Koruyucu gaz için yapılan çoklu üfleme sisteminin kesim kafasına montajı

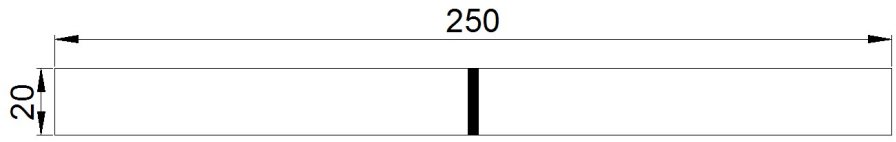
Şekil 5.3 te, dairesel tasarlanmış çok noktalı akış düzeneğinin lazer kesim kafasına tatbiki ile kaynak kafasına dönüştürülmesi gösterilmektedir. İki parça levhanın lazer ile kaynatılmasının ardından deneyler için numuneler standartlara uygun olarak levha üzerinden kesilerek elde edilmiştir.

Çizelge 5.4. Kaynak işlemi için seçilen değerler.

Lazer gücü	2750 Watt
Odaklama lensi	ZnSe 1.5”
Odak mesafesi	127 mm
Penetrasyon mesafesi	-1.5 mm
Nozzle çapı	3 mm
Koruma gazı	Helyum
Gaz debisi	20lt/dk.
Kaynak ilerleme hızı	750 mm/dk
Kaynak öncesi temizlik maddesi	Aseton
Malzeme kalınlığı	3 mm
Kaynak mesafesi	500 mm
Dikiş kalınlığı	2.5 mm
Dikiş derinliği	2.95 mm
Yüzey pürüzlendirme	Tel fırça, spiral

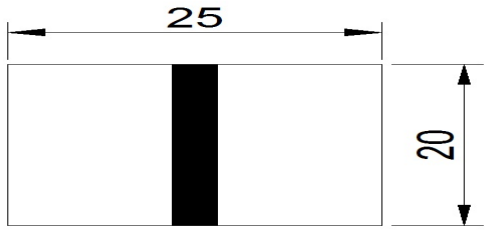
5.2.3. Deney numunelerinin hazırlanması

Numuneler kaynaklanmadan sonra ilgili TSE standartlarına göre boyutlandırılıp bir takım talaşlı işlemlere tabi tutulmuştur. Üç noktadan eğme deneyi için TS EN ISO 5173 OCAK 2010 standardına uygun test numuneleri hazırlanmıştır. Şekil 5.4, eğme numunelerinin ölçülerini göstermektedir.



Şekil 5.4. Eğme deneyi numunelerinin ebatları.

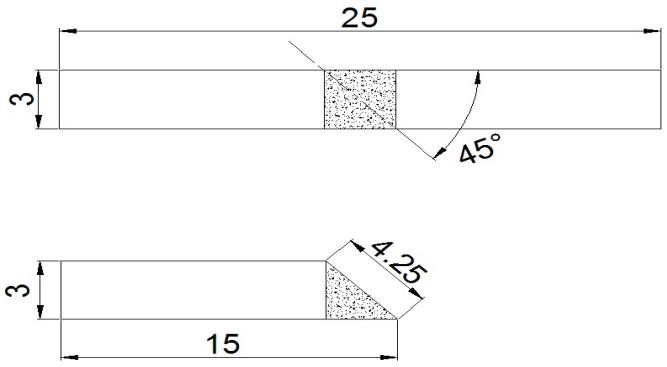
Radyografi deneyi için eğme deneyinden çıkmış deney numuneleri kullanılmıştır. Bu seçimin amacı kaynak yapısının kontrolü ile eğme deneyi sonrası kaynak bölgesinde göz ile tespit edilemeyen bir çatlak yapısı varsa onun tespitidir. Bu test TS 5127 EN 1435 NİSAN 2002 SINIF B ve BS EN 12517-1 2006 SEVİYE 3 standartlarına göre yapılmıştır. Kaynak yüzeyinin radyografi değerlendirmesi ise TS 7536 EN ISO 6520-1 MART 2003 standardına göre yapılmıştır. Bu test için gerekli numune ölçüleri Şekil 5.5' te gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Radyografi deneyi numune ebatları.

Mikro sertlik ölçüm deneyi için Şekil 5.5 teki ölçülere göre numune hazırlanmıştır. Hazırlanan bu numuneler sırası ile 150-360-600 numara zımparalardan geçirilerek 5µm keçede parlatılmıştır. Ardından bu yüzey aseton ile temizlenerek ölçüme hazır hale getirilmiştir. Ölçümler neticesinde oluşan iz boyları mikroskop ile ölçülerek tablolar yardımıyla Vickers mikro sertlik değerine çevrilmiştir.

Metalografik deneyler için de Şekil 5.5 teki ölçülere uyularak deney numuneleri hazırlanmıştır. SEM ölçümleri için bir tane farklı geometri daha kullanılmış olup, incelenen kaynak yüzeyi miktarının artırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla kaynak yüzeyi Şekil 5.6 daki gibi 45 º açı ile kesilmiştir.



Şekil 5.6. Metalografik deneyler (SEM) numune ebatları.

5.2.4. Normalizasyon işlemi

Bazı mühendislik çeliklerine uygulanan normalizasyon işlemi malzemelerin ilk durumuna göre bunları yumuşatır, sertleştirir veya gerilimlerini giderir. Normalizasyon işlemi, Lpg tankları için kaynak işlemi sonrası mutlaka yapılması istenen bir ısıl işlemdir. Amaç kaynak bölgesinde meydana gelen tane yapısı değişikliklerini düzenlemek, malzeme içeriğinde oluşan gerilimleri almaktır. Bir diğer amacı da kaynak ile bozulan homojenliği tekrar malzemeye kazandırmaktır.

Normalizasyon P265 NB çeliklerinde 890 - 930°C aralığında ısıtılması ve sonra havada soğutulmasından meydana gelir. Isıtma da genellikle açık atmosferde yapılır, bu nedenle tufal veya dekarbürüzasyon tabakalarını kaldırmak için daha sonra talaşlı işlem veya yüzey tamamlama işlemleri gerektirir. Yapı itibari ile ferrit ve perlitten ibarettir. Normalize edilmiş doku sertleştirme öncesi en uygun dokudur.

MAG kaynağı ile kaynatılmış olan numuneler bir ısıl işlem ocağında 900°C ye kadar ısıtılarak 30 dakika beklenmiş ve sonra havada hızlı soğuması sağlanmıştır. Bu şekilde eğme ve sertlik ölçüm deneyleri için iki tip numune elde edilmiştir. Aynı işlemi

lazer ile kaynaklanmış numuneler içinde yaparak her iki kaynak (lazer ve MAG) yönteminin malzeme içeriğindeki ısıl etkisinin boyutları gösterilmek istenmiştir.

Sonuç olarak;

- Sadece lazer kaynaklı Numune
- Normalizasyon tavlaması yapılmış lazer kaynaklı numune
- Sadece MAG kaynaklı numune
- Normalizasyon tavlaması yapılmış MAG kaynaklı numune

şeklinde dört sınıflandırma yapılmıştır.

6. DENEYLER VE SONUÇLARININ TARTIŞILMASI

6.1. Mikro Vickers Sertlik Ölçümleri

Makine üretim sürecinde üretilen her parçanın çalışma yeri ve konumuna göre sertliğinin bilinmesi gerekmektedir. Makine elemanları, kullanımı öncesi değişik işlemlerden geçmektedir. İmalat sürecinde çalışacak makine elemanına; kaynak yapılabilir, baskı yükü altında şekil verilebilir, döverek sertleştirilebilir, üzerinden talaş kaldırılabilir ve su verme işlemiyle sertleştirilebilir. Bu işlemlere maruz kalmış parçada malzemenin mikro yapısı ve buna bağlı olarak da sertliği değişkenlik gösterir.

Sertlik, bir malzemenin kendisine batmaya çalışan daha sert bir malzemeye karşı göstermiş olduğu direnç olarak tanımlanır. Sertlik; sürtünmeye, çizmeğe, kesmeğe, korozyona ve plastik deformasyona karşı direnç olarak da tarif edilir. Sertlik ölçümlerindeki değer, malzemenin plastik deformasyona karşı gösterdiği dirençtir.

Bir malzemenin sertliği;

• Malzemenin kökeni hususunda bir takım bilgiler verir.

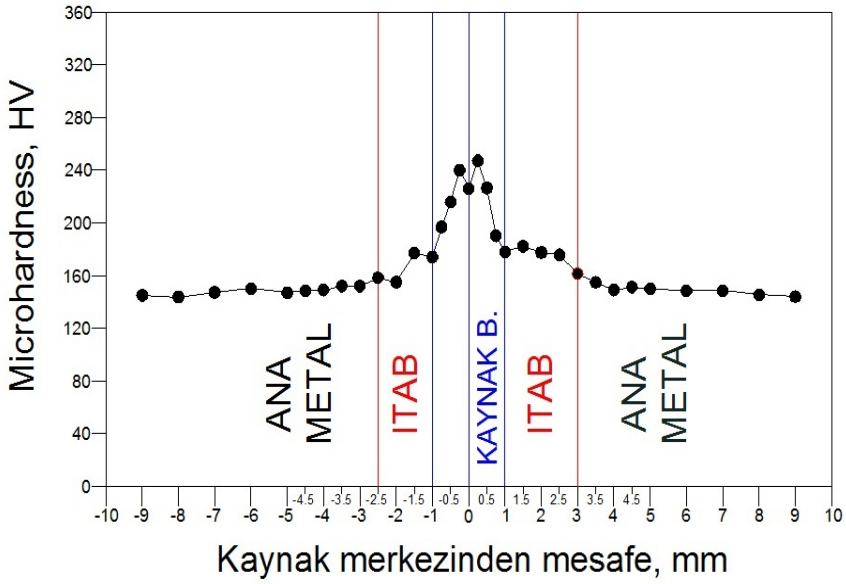
• Malzemenin mekanik özellikleri hususunda fikir verir. Talaşlı işlem öncesi bilinen sertlik değeri, işlem sırasında kullanılacak kesici takımın seçimine yardımcı olur.

• Sertlik deneyleri tahribatsız deneylerdir, malzemenin özellikleri hakkında, malzemeye zarar vermeden fikir verebilir.

Vickers sertlik ölçme yöntemi, sertliği ölçülecek malzeme parçasının yüzeyine, tabanı kare olan piramit şeklindeki bir ucun belirli bir yük altında batırılması ve yük kaldırıldıktan sonra meydana gelen izdeki köşegenlerinin ölçülmesiyle yapılır. Yumuşak çelik olarak tarif edilen malzemelerin sertlik ölçümlerinde hassas okumalar yapması sebebiyle tercih edilmiştir. Vickers sertliği ölçme yöntemi diğer yöntemlere nazaran daha uzun zaman almakla beraber hassas bir sertlik ölçme yöntemidir.

Numuneler sırası ile 150-360-600 numara zımparalardan geçirilerek keçe ile parlatılmıştır. Ardından bu yüzey aseton ile temizlenerek ölçüme hazır hale getirilmiştir. Sertlik ölçümü için numunelerin üstünden ölçüm yapılmıştır. Ölçümler neticesinde oluşan iz boyları ölçülerek Vickers mikro sertlik değerleri elde edilmiştir.

Şekil 6.1 de lazer ile kaynaklanmış ve normalize edilmiş numuneden ölçülen sertlik değerleri verilmiştir.

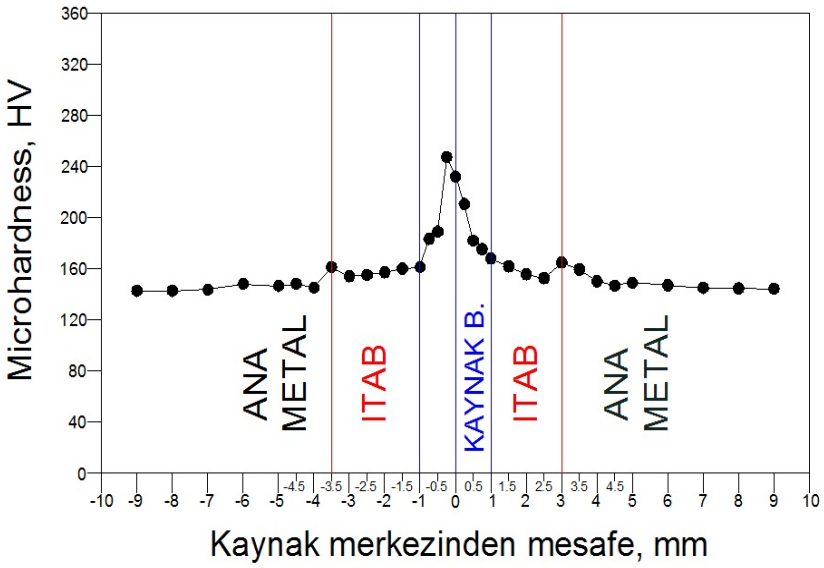


Şekil 6.1. Normalize edilmiş lazer kaynaklı numunenin sertlik ölçümleri.

Değerler incelendiğinde en yüksek sertlik değerinin kaynak dikişi üzerinde, ITAB bölgesinde daha düşük ve ana metalde en düşük sertlik değerlerinin ölçüldüğü görünmektedir.

Şekil 6.2 de lazer ile kaynaklanmış numuneden ölçülen sertlik değerleri verilmiştir. Değerler incelendiğinde sadece lazer kaynaklı ile normalize edilmiş lazer kaynaklı numuneler arasında paralellikler görülmektedir.

Sadece lazer kaynaklı numunenin sertlik ölçümlerinde en düşük sertlik değeri kaynak merkezine 9 mm mesafede ana metalde 142 HV, ITAB bölgesinde 165 HV ve kaynak dikişi üzerinde 248 HV olarak ölçülmüştür. Normalize edilmiş lazer kaynaklı numunenin ölçümlerinde ise en düşük sertlik değeri kaynak merkezine 9 mm mesafede ana metalde 152 HV, ITAB bölgesinde 180 HV ve kaynak dikişi üzerinde 242 HV olarak ölçülmüştür.

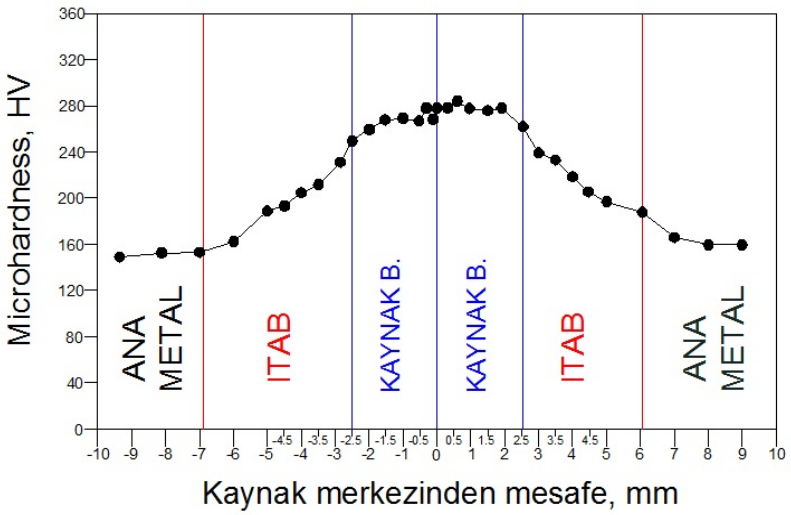


Şekil 6.2. Lazer kaynaklı numunenin sertlik ölçümleri.

Şekil 6.3 de MAG ile kaynaklanmış numuneden ölçülen sertlik değerleri verilmiştir. Sertlik ölçümlerinde en düşük sertlik değeri kaynak merkezine 9 mm mesafede ana metalde 148 HV, ITAB bölgesinde 221 HV ve kaynak dikişi üzerinde 291HV olarak ölçülmüştür.

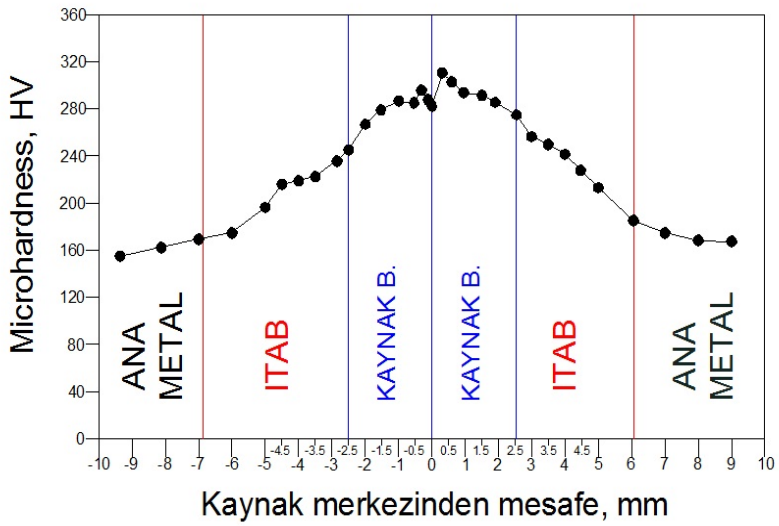
Şekil 6.4 de normalize edilmiş MAG ile kaynaklı numunenin sertlik ölçüm değerleri yer almaktadır. Sertlik ölçümlerinde en düşük sertlik değeri kaynak merkezine 9 mm mesafede ana metalde 153 HV olarak ölçülmüştür. ITAB bölgesinde 230 HV ve kaynak dikişi üzerinde 307 HV olarak ölçülmüştür.

Ölçümler neticesinde MAG kaynaklı numunelerde hem kaynak dikiş genişliği hem de ITAB bölgesinin ebadının, lazer kaynaklı numune ile kıyaslandığında iki katı geçen ölçülere ulaştığı görülmektedir. MAG kaynaklı numunelerin yüksek sertlik değerleri de grafikte görülmektedir. Lazer ile kaynaklanmış numunelerin sertlik ölçümleri neticesinde kaynak bölgesindeki sertlik ölçümlerinin MAG kaynağına kıyasla daha düşük olduğu neticesine ulaşılmıştır. ITAB' ın sertlik değerleri de daha küçük bir alanı kapsamakla beraber daha düşük değerlerin ölçülmesi şeklinde oluşmuştur.



Şekil 6.3. MAG kaynaklı numunenin sertlik ölçümleri.

Normalizasyonun lazer kaynaklı numuneler üzerinde dikkate değer bir etkisi görülmemiştir. MAG kaynaklı numunede ise kaynak dikişi ve ITAB'da sertlik artışının olduğu anlaşılmaktadır. Bu artışın bir diğer sebebi de kaynak dikişi yüksekliğinin talaşlı bir işlemle alınması sırasında oluşan ısının yüzeyde sertleşme etkisi oluşturabilmesidir. Her ne kadar talaşlı işlem, soğutma suyu ile soğutularak yapılmış olsa da bu etki olabilmektedir.



Şekil 6.4. Normalize edilmiş MAG kaynaklı numunenin sertlik ölçümleri.

6.2. Üç Noktadan Eğme Deneyleri

Üç noktadan eğme deneyleri metalik malzemelerin şekil değiştirilmeye zorlandıkları durumlardaki davranışları hakkında niteleyici bilgiler verir. Makine parçaları, sıvama veya katlama yolu ile bükümlü tasarımlar gerektirdiğinde malzemenin şekil değişikliği sırasında ve sonrasında oluşacak çatlak ve kırılmalar güvenli imalat için tedbirler alınmasını gerektirmiştir. Malzemenin bu durumlardaki davranışlarının önceden tespiti için uygun eğme deneyleri malzemeye tatbik edilmeli ve deney sonuçları dikkate alınmalıdır.

Çoğunlukla ince saçlar sıvama kalıplarında şekil alarak kimi zaman derin çekme işlemlerine tabi tutulmaktadır. LPG tankları da bu şekilde şekillendirildiğinden bu test önem arz etmektedir. Kaynak dikişlerinin 3 noktadan eğme testine tabi tutulması çoğunlukla uygulanan bir test metodudur. Kaynak dikişinde bükme sırasında meydana gelen şekil değişimi kaynak dikişi ile esas malzeme arasında iyi bir bağlantı olup olmadığının tespitinde kullanılabilir (Çelen 2006).

Deney genellikle, yuvarlak veya dikdörtgen kesitli ürünlerden çıkarılan numunelere uygulanır. Bükme deneyi için hazırlanan deney numuneleri 30 mm mandrel çaplı, mandreller arası mesafesi 90 mm olan DARTEC MARKA M9000 Model 600 kN'luk Üniversal test cihazında 1 mm/dk basma hızı ile ilgili standarda uyularak gerçekleştirilmiştir. Deney için numunelerin sınıflandırılması;

- Sadece lazer kaynaklı Numune
- Normalizasyon tavlaması yapılmış lazer kaynaklı numune
- Sadece MAG kaynaklı numune
- Normalizasyon tavlaması yapılmış MAG kaynaklı numune

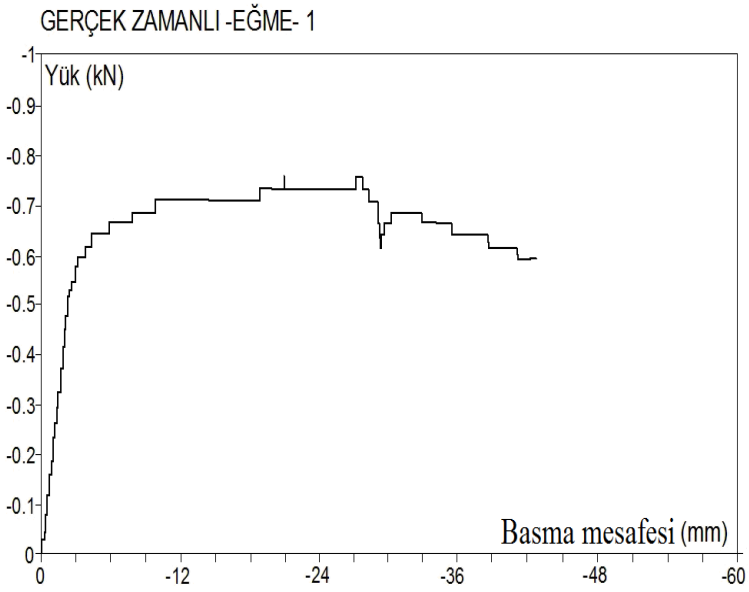
şeklinde yapılmıştır.

Burada dikkat edilecek en önemli husus deney sırasında basma yüzeyinin kaynak merkezine merkezlenmesi ve kaynaklama yüzeyinin hem alt hem de üst tarafına basılmasıdır. Çünkü kaynak işlemi tipine bağlı olarak düzensiz yapı sergileyen kısım değişkenlik gösterebilmektedir. Yetersiz kaynak nüfuziyeti durumunda kaynak bölgesinin alt yüzeyi, fazla ısı enerjisi verilmesi durumunda ise kaynak bölgesinin üst yüzeyi metal buharlaşmasına bağlı olarak yüzey kusurları sergileyebilmektedir. Bu

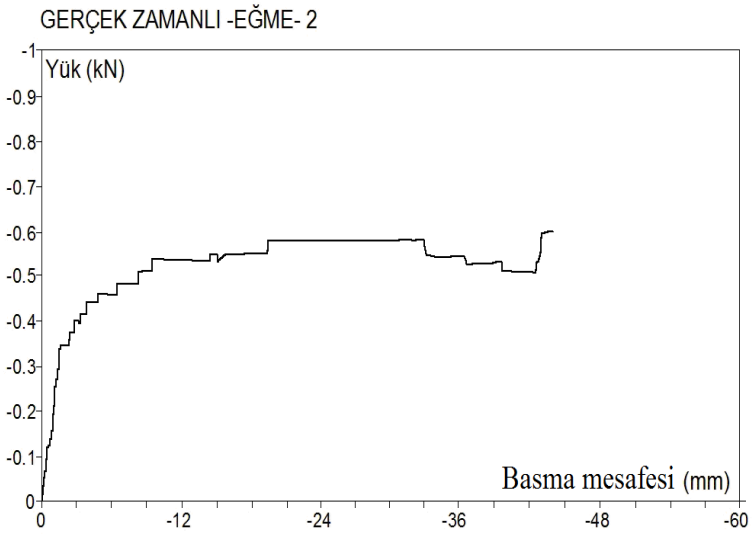
sebeple deney sırasında oluşabilecek yüzey kusurlarının tespiti için iki yönlü eğme işlemi yapılmalıdır.

Şekil 6.5 de sadece lazer ile kaynaklanmış numunenin eğme deneyi sonucu oluşan Yük - Basma mesafesi grafiği görülmektedir. Grafiğe göre en büyük basma yükü 0.76 kN olup, basma mesafesi 44 mm olarak ölçülmüştür. Lazer kaynaklı bir diğer numuneye de ters yüzeyinden basılmış ve birbirine yakın değerler sergilediği görülmüştür. Lazer kaynaklı numunelerin her iki eğme deneyinde de kaynak yüzeyi veya ITAB bölgelerinde gözle görülür bir çatlak gözlemlenememiştir.

Şekil 6.6 da lazer ile kaynaklanıp normalize edilmiş numunenin eğme deneyi sonucu oluşan Yük - Basma mesafesi grafiği görülmektedir. Grafiğe göre en yüksek basma yükü 0.57 kN olup, basma mesafesi 44 mm olarak ölçülmüştür. Lazer kaynaklı normalize edilmiş bir diğer numuneye de ters yüzeyinden basılmış ve birbirine yakın değerler sergilemiştir. Normalize edilmiş lazer kaynaklı numunelerin her iki eğme deneyinde de kaynak yüzeyi veya ITAB bölgelerinde gözle görülür bir çatlak gözlemlenememiştir.

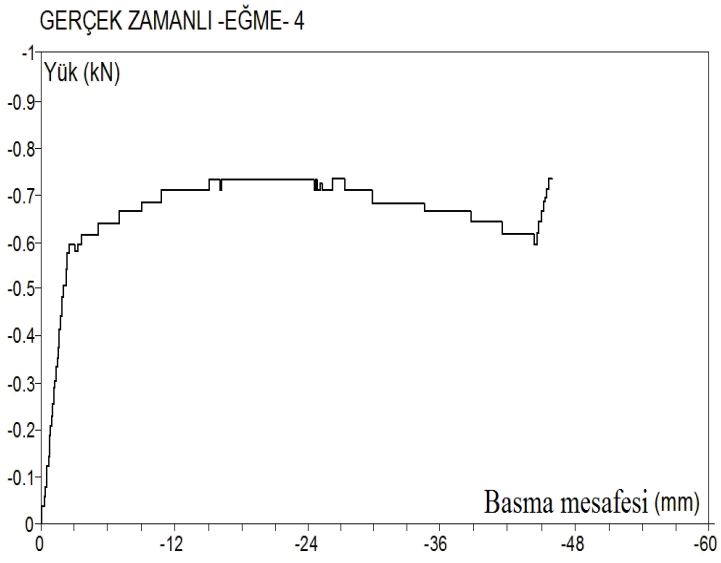


Şekil 6.5. Lazer kaynaklı numunenin Yük-Basma mesafesi grafiği.



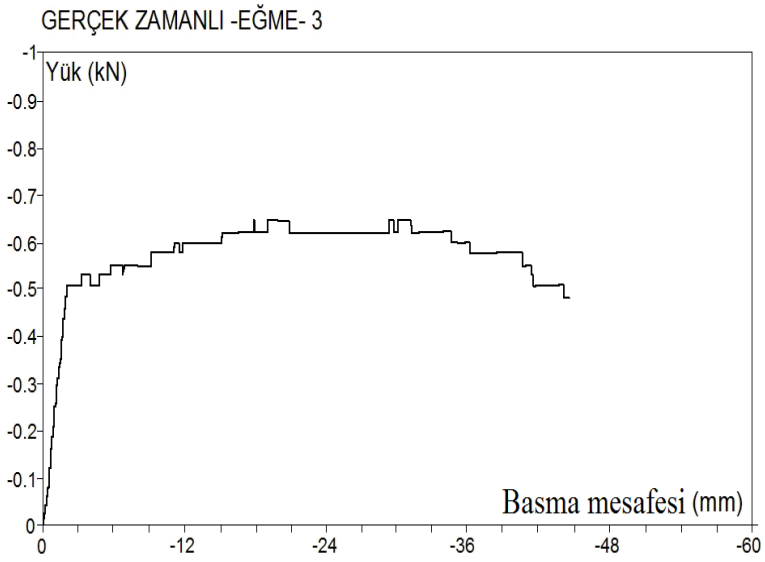
Şekil 6.6. Normalize edilmiş lazer kaynaklı numunenin Yük-Strok grafiği.

Şekil 6.7 de normalize edilmiş MAG kaynağı ile kaynaklanmış numunenin eğme deneyi sonucu oluşan Yük - Basma mesafesi grafiği görülmektedir. Grafiğe göre en yüksek basma yükü 0.78 kN olup, basma mesafesi 45 mm olarak ölçülmüştür. Normalize edilmiş MAG kaynaklı bir diğer numuneye de ters yüzeyinden basılmış ve birbirine yakın değerler sergilemiştir. Normalize edilmiş MAG kaynaklı numunelerin her iki eğme deneyinde de kaynak yüzeyi veya ITAB bölgelerinde gözle görülür bir çatlak gözlemlenememiştir.



Şekil 6.7. Normalize edilmiş MAG kaynaklı numunenin Yük-Strok grafiği.

Şekil 6.8 de MAG kaynağı ile kaynaklanmış numunenin eğme deneyi sonucu oluşan Yük - Basma mesafesi grafiği görülmektedir. Grafiğe göre en yüksek basma yükü 0.65 kN olup, basma mesafesi 45 mm olarak ölçülmüştür. MAG kaynaklı bir diğer numuneye de ters yüzeyinden basılmış ve birbirine yakın değerler sergilemiştir. MAG kaynaklı üstten basılan numunede kaynak dikişinin altında ITAB bölgesi ile kaynak dikişinin kesiştiği yerde gözle görülür bir yarılma tespit edilmiştir. Diğer basılan numunede kaynak yüzeyi veya ITAB bölgelerinde gözle görülür bir çatlak gözlemlenememiştir.



Şekil 6.8. MAG kaynaklı numunenin Yük-Strok grafiği.

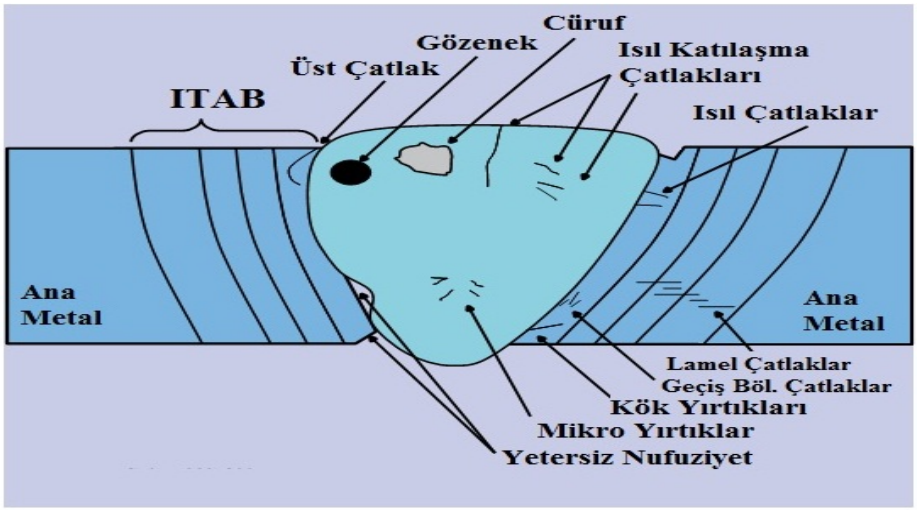
6.3. Metalografik İncelemeler

Malzemenin mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri açısından sahip olduğu mikro yapı önemlilik arz eder. Mikro yapı, bir malzemenin sahip olduğu en küçük birim olarak da tanımlanabilir. Malzemelerin içyapısını inceleyen bilim dalına metalografi denir. Malzeme mikro yapısı üzerine yapılan incelemeler ile

- Tane büyüklükleri,
- Faz ve ara fazların tespiti,
- İnceleme bölgesinde meydana gelen kimyasal kompozisyon,

- İnceleme bölgesindeki lifleşme,
- İnceleme bölgesindeki düzensiz soğuma sebebiyle oluşan boşluklar (lunker),
- Mikro çatlak oluşumları,
- İçeriğindeki gaz boşlukları
- Düzenli veya düzensiz gözeneklilik
- Çekme boşlukları (dentritler arası)

gibi malzeme hatalarının tespiti yapılabilir. Şekil 6.9 da makro ve mikro boyutlarda kaynaklama işlemi sonrası oluşabilecek kusurlar görülmektedir.



Şekil 6.9. Kaynaklama işlemi sonrası oluşabilecek kusurlar.

6.3.1. Optik mikroskop incelemeleri

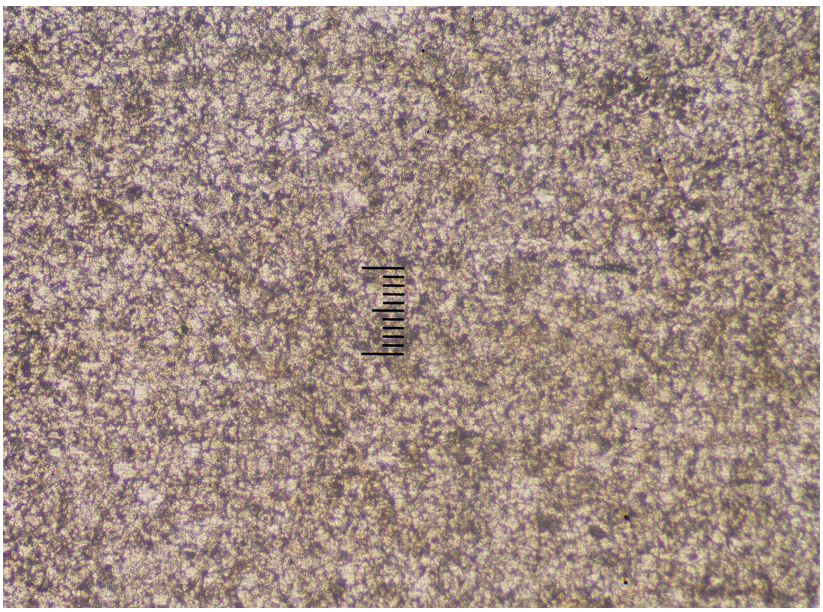
Optik mikroskop ile ITAB ve kaynak bölgelerinin fazlarının tespiti amaçlanmaktadır. Optik mikroskop ile inceleme işlemi, numunelerin hazırlanması ile başlar. Numunenin hazırlanması, incelemenin yapılacağı bölgenin tespiti ve onun bir takım; zımparalama, parlatma, asit ile dağlama ve saf su ile yıkama işlemlerini kapsar.

Numuneler sırası ile 150-360-600-800-1200 numara zımparalardan geçirilerek 2 µm keçede parlatılmıştır. Zımparalama işleminin bütün kademelerinde bir önceki kademede kullanılan aşındırıcılardan daha ufak aşındırıcılar kullanılmıştır. Amaç numunenin yüzeyinde oluşan deformasyon ve çizikleri minimuma indirmektir. Ardından bu yüzeye Nital dökülerek inceleme yüzeyi dağlanmış, 30 saniye bekledikten sonra saf su ile yıkanmış, görüntülemeye hazır hale getirilmiştir. Şekil 6.10 da Kosgeb laboratuarındaki Olympus PME 3 markalı optik mikroskobun görüntüsü verilmiştir.

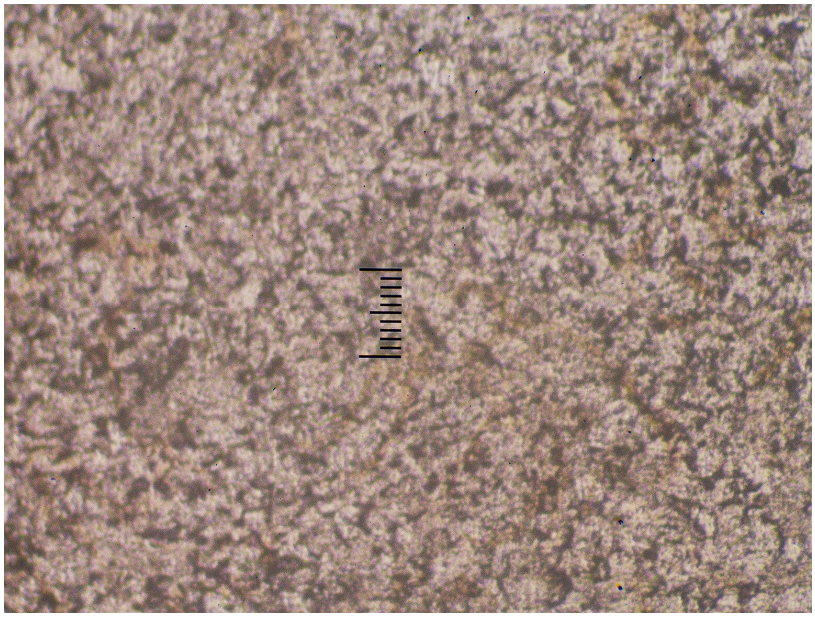


Şekil 6.10. Optik mikroskop cihazının görüntüsü, Olympus PME 3.

Optik mikroskop ile 50x – 100x – 200x – 500x büyüklüğünde resimler filme çekilerek tab ettirilmiş ve ardından yüksek çözünürlüklü bir tarayıcıda taranarak dijital resimler elde edilmiştir. Şekil 6.11 ve 6.12 de, ana malzemenin 50x ve 100x büyüklüklerindeki resimleri verilmiştir. Resimler incelendiğinde tane yapıları düzenli ve iri taneli bir mikro yapı görülmektedir. Ana malzeme ferritik ve az perlitik bir faz yapısı sergilemektedir. Malzemenin spektrasından bilinen düşük karbon yüzdesi bu faz yapısını doğrulamaktadır.

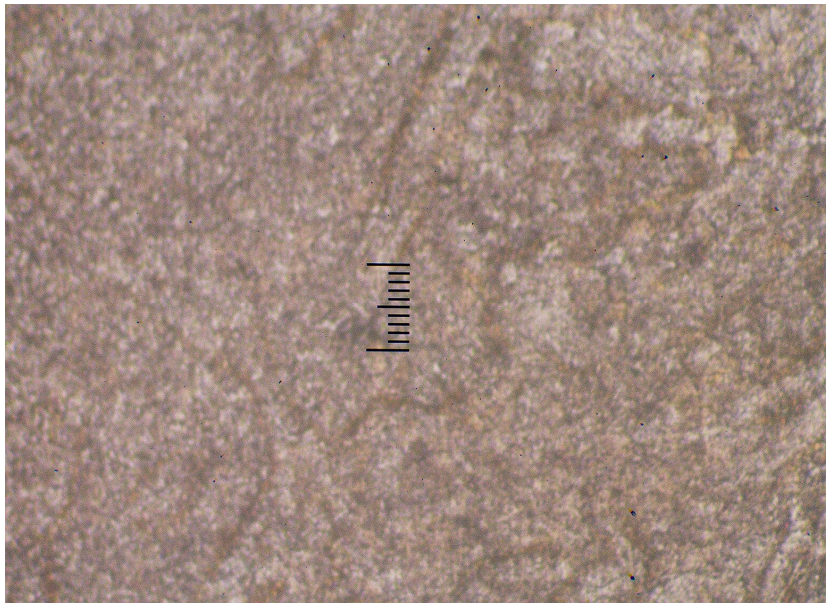


Şekil 6.11. Ana malzeme, 50x büyütme

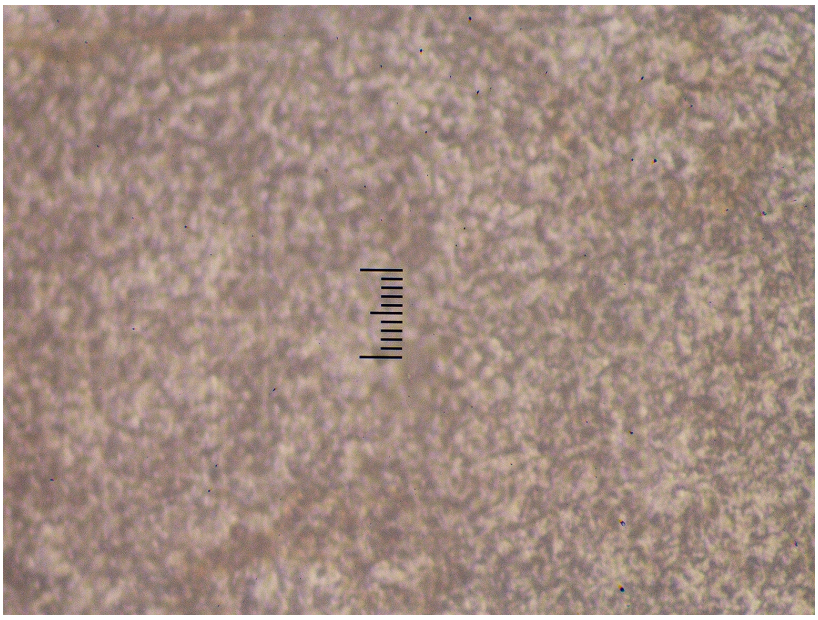


Şekil 6.12. Ana malzeme, 100x büyütme.

Şekil 6.13 ve 6.14 te, ITAB bölgesinin 200x ve 500x büyüklüklerindeki resimleri verilmiştir. Resimler incelendiğinde tane yapıları ana malzemeye kıyasla daha düzensiz ve daha küçük taneli bir mikro yapı görülmektedir. ITAB bölümü, ferritik ve perlitik faz yapısı sergilemektedir.

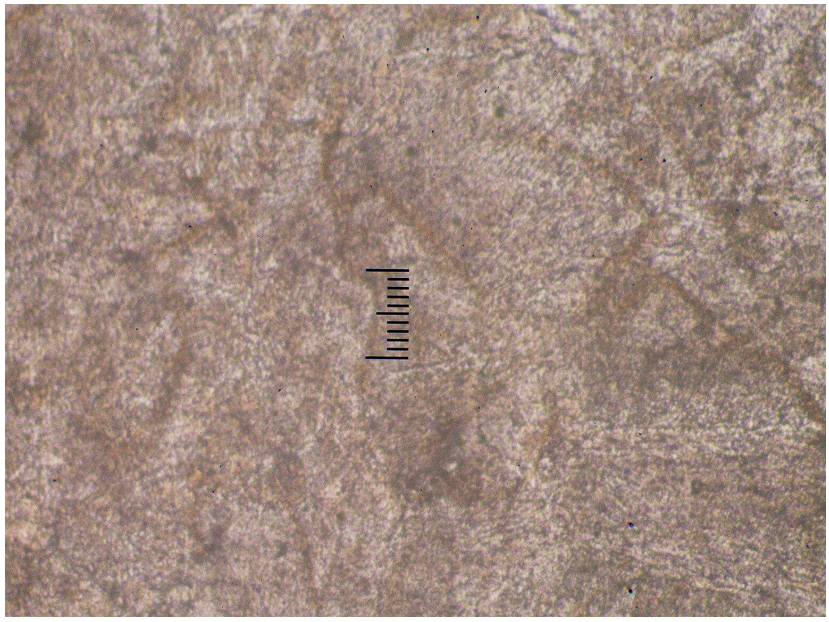


Şekil 6.13. ITAB bölgesi, 200x büyütme.

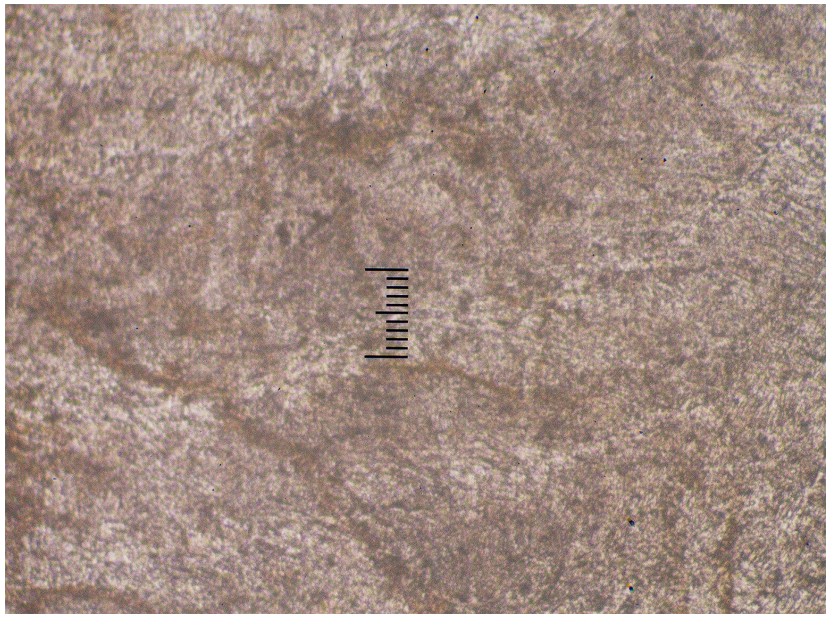


Şekil 6.14. ITAB bölgesi, 500x büyütme.

Şekil 6.15, 6.16 ve 6.17 de, kaynak bölgesinin 100x, 200x ve 500x büyüklüklerindeki resimleri verilmiştir. Resimler incelendiğinde tane yapıları ITAB bölgesine kıyasla daha düzensiz ve daha küçük taneli bir mikro yapı görülmektedir. Bu mikro yapı şekli literatürde, Widmanstätten (dallantılı) faz yapısı olarak tarif edilmiştir. Kaynak bölgesinin, ferritik bir faz yapısı sergilediği resimlerden görülmektedir.



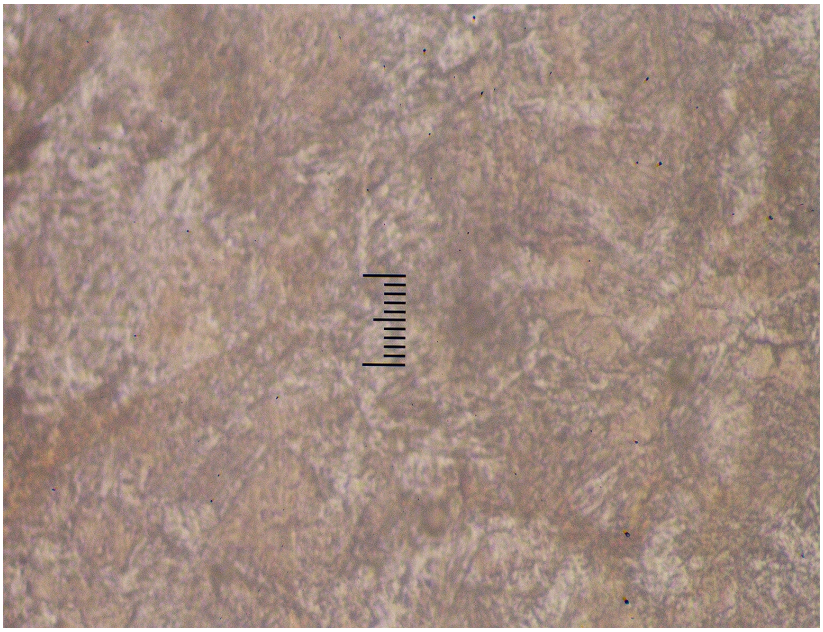
Şekil 6.15. Kaynak bölgesi, 100x büyütme.



Şekil 6.16. Kaynak bölgesi, 200x büyütme.

Kaynak dikişi mikro yapısında, malzemeye ve kaynak parametrelerine bağlı olarak istenmeyen ara fazların oluşması gözlemlenebilir. Otojen kaynak yönteminin en büyük avantajı kaynak teli kullanmayarak bu ara fazların oluşmasına mani olabilmesidir. Bir diğer etken ise ısıtılan kesitin azlığıdır. Lazer ile kaynaklama işlemi

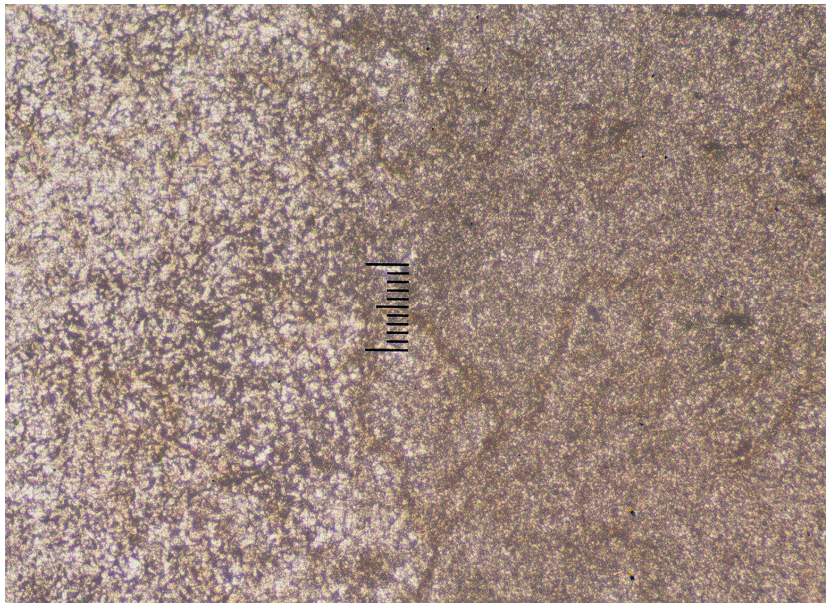
mikro yapıdaki olumlu etkileri sebebiyle tercih sebebidir. Bir kaynaklama işlemi için en temel gereksinim, ısı veya basınç etkilerinden birinin veya ikisinin birden tatbikidir. Temel gereksinimler böyleyken bunların uygulanması sırasında seçilen yardımcı etkenlerde başarılı kaynaklama sürecini tamamlayan faktörler olarak sayılabilir.



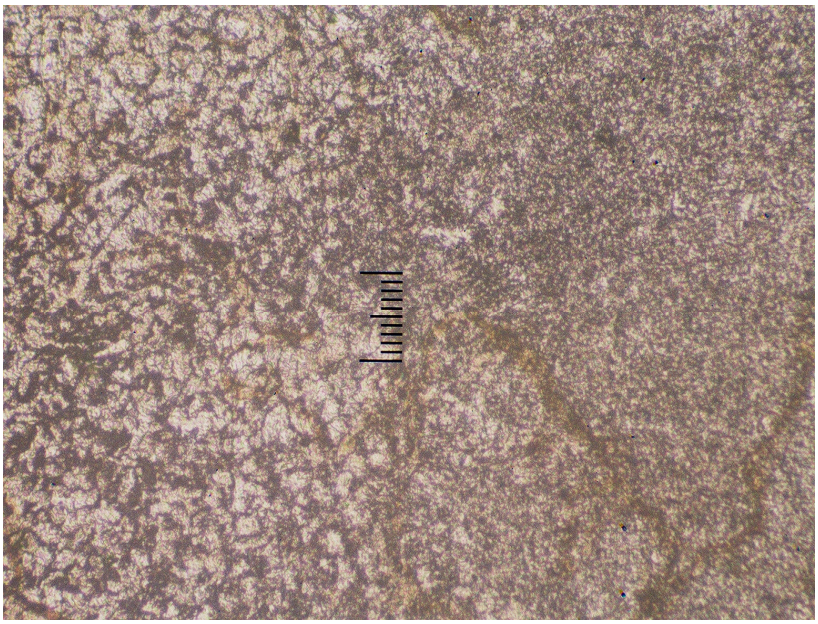
Şekil 6.17. Kaynak bölgesi, 500x büyütme.

Tasarlanan Multi-Blower (Çoklu Üfleyici) düzeneği ile kaynaklama sırasında atmosferdeki aktif gazların olumsuz etkilerinin bertarafı diğer yöntemlere kıyasla daha başarılı olmuştur. Yöntemin bir diğer avantajı ise bir kaynak lazerine gerek kalmadan endüstrideki hemen tüm kesme lazerlerine uygulanabilir olmasıdır. Böylelikle çok düşük maliyetlerle, kesme anlamında rekabet gücünü yitirmiş makinelerin kaynaklama makinelerine dönüştürülebilmesine olanak sağlamıştır.

Şekil 6.18 ve 6.19 de ana metal-ITAB ikilisinin 50x ve 100x büyütmeline ait optik mikroskop resimleri yer almaktadır. Şekillerden ITAB bölgesinin ana malzemeye kıyasla daha ince taneli ve daha fazla perlit fazının olduğu anlaşılmaktadır.



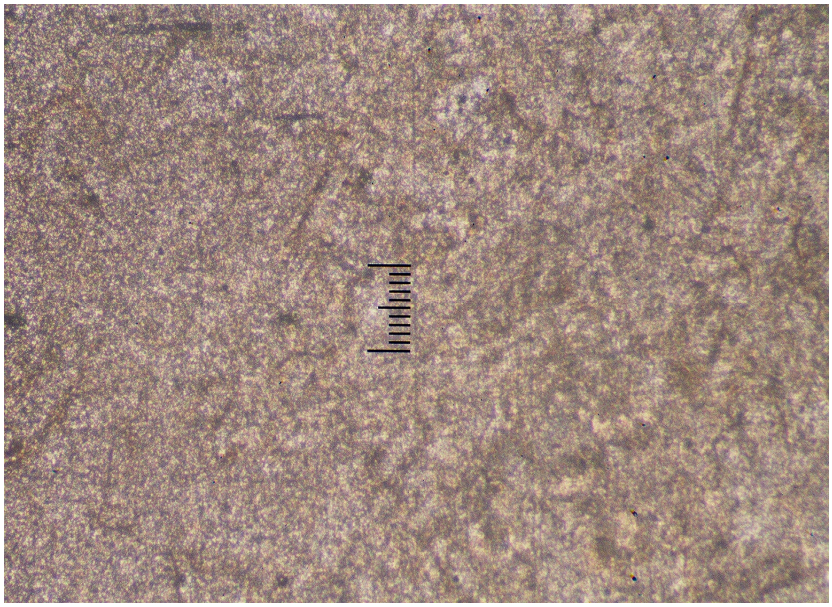
Şekil 6.18. Ana yapı- ITAB bölgesi, 50x büyütme.



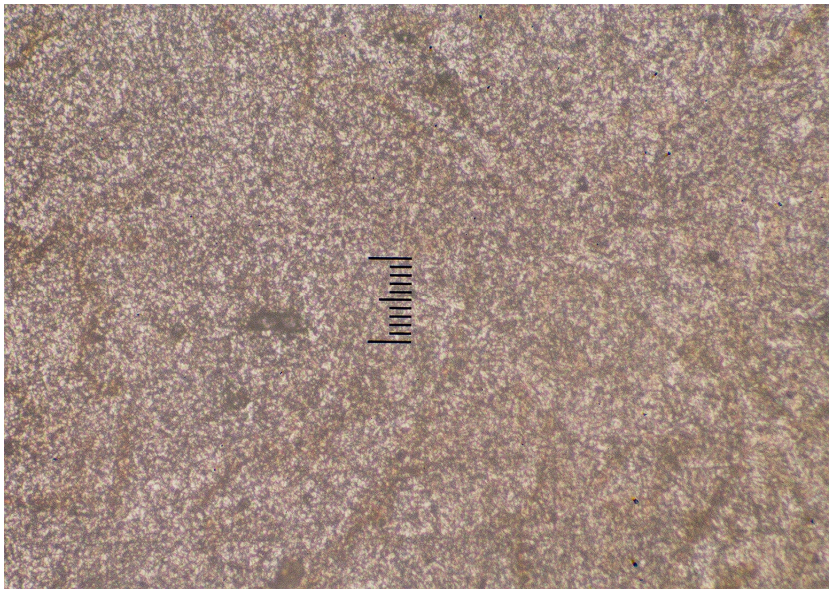
Şekil 6.19. Ana yapı- ITAB bölgesi, 100x büyütme.

ITAB bölgesi kaynaklı birleştirmelerde ısı tesiriyle oluşan ana metal ile kaynak dikişi arasında kalan bölümde oluşan düzensiz yapıdır. Bu yapının sertliği ana metalden fazla kaynak dikişinden ise azdır. Bir kaynak konstrüksiyonunun en çok hasar davranışı sergilediği bölüm ITAB bölümüdür. Bu bölgenin minimize edilmesi kaynak emniyetini artıran önemli bir faktördür. Lazerler sahip oldukları enerjiyi çok dar bir kesite

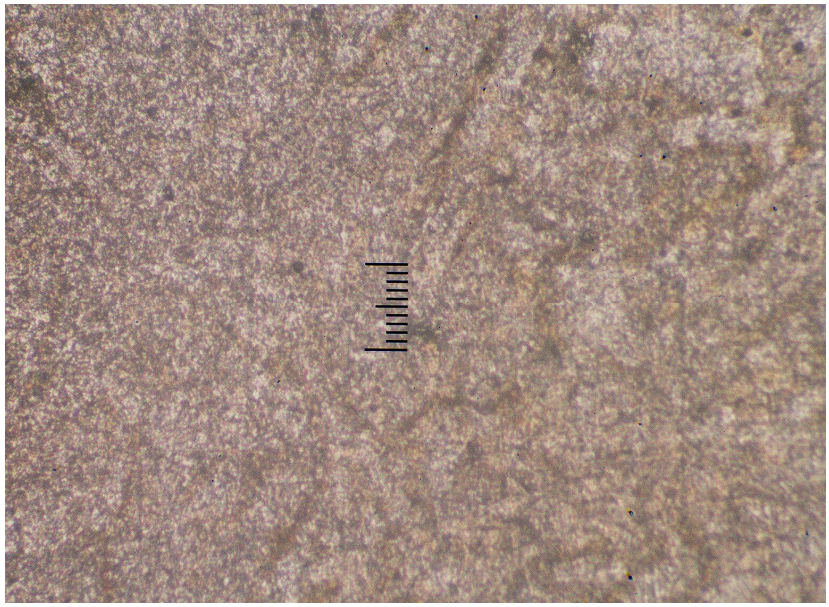
yoğunlaştırabilmeleri ile aslında ITAB bölgesini karakteristik olarak küçültürler. Burada önemli olan doğru operasyon parametrelerinin seçilmiş olmasıdır. Şekil 6.20, 6.21, 6.22 ve 6.23 te ITAB-kaynak bölgesi ikilisinin; 50x,100x,200x ve 500x büyüklüklerindeki resimleri gösterilmiştir.



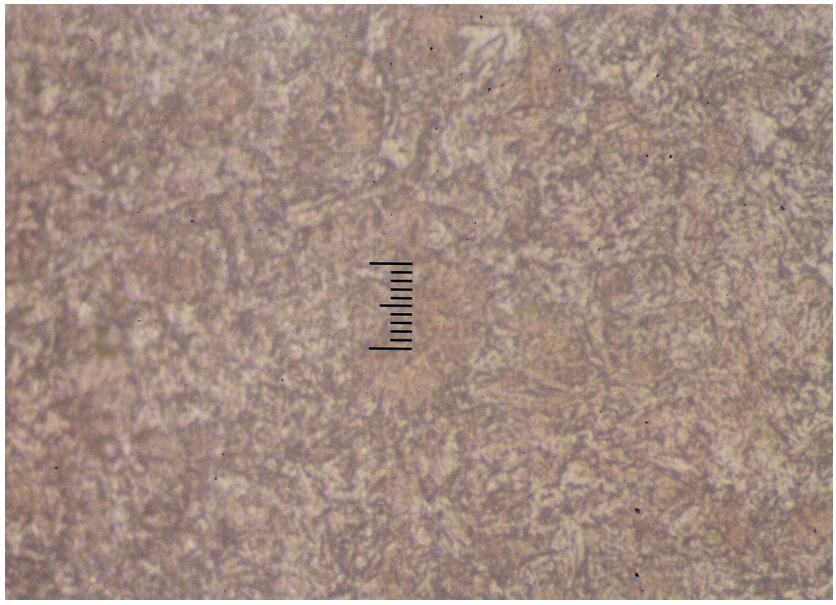
Şekil 6.20. ITAB- kaynak bölgesi, 50x büyütme.



Şekil 6.21. ITAB- kaynak bölgesi, 100x büyütme.



Şekil 6.22. ITAB- kaynak bölgesi, 200x büyütme.

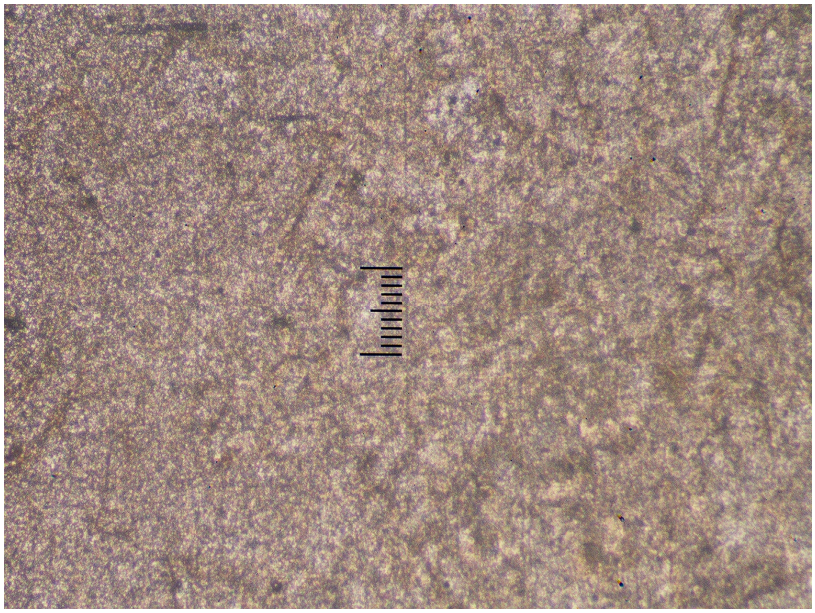


Şekil 6.23. ITAB- kaynak bölgesi, 500x büyütme.

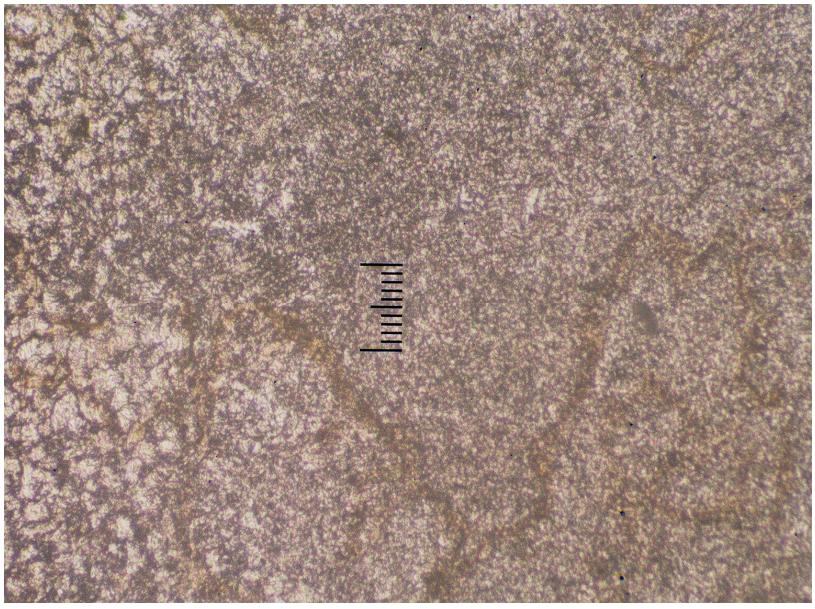
Lazer ile kaynaklama işleminin başarısı; kaynatılacak parçaların yüzey temizliği, kullanılan malzemenin ışın yutabilme oranı ve kaynatılacak parçaların boşluksuz şekilde eksen kaçıklığı olmadan yerleştirilebilmesine de bağlıdır. Kaynak yüzeyleri asit ile temizlenebildiği gibi alkol veya aseton ile de temizlenebilir. Parçaların birleşme yüzeylerinin tam teması, kaynatılacak levhaların başına ve sonuna atılacak küçük punta

kaynakları ile sağlanabileceği gibi, özel tasarım aparatlar kullanmak suretiyle de sağlanabilir.

Şekil 6.24 ve 6.25 te lazer kaynağı ile malzemede oluşan; ana metal-ITAB-kaynak metali bölgelerinin, 50x ve 100x büyütmelerinden elde edilmiş olan optik mikroskop görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 6.24. Ana metal-ITAB- kaynak bölgesi, 50x büyütme.



Şekil 6.25. Ana metal-ITAB- kaynak bölgesi, 100x büyütme.

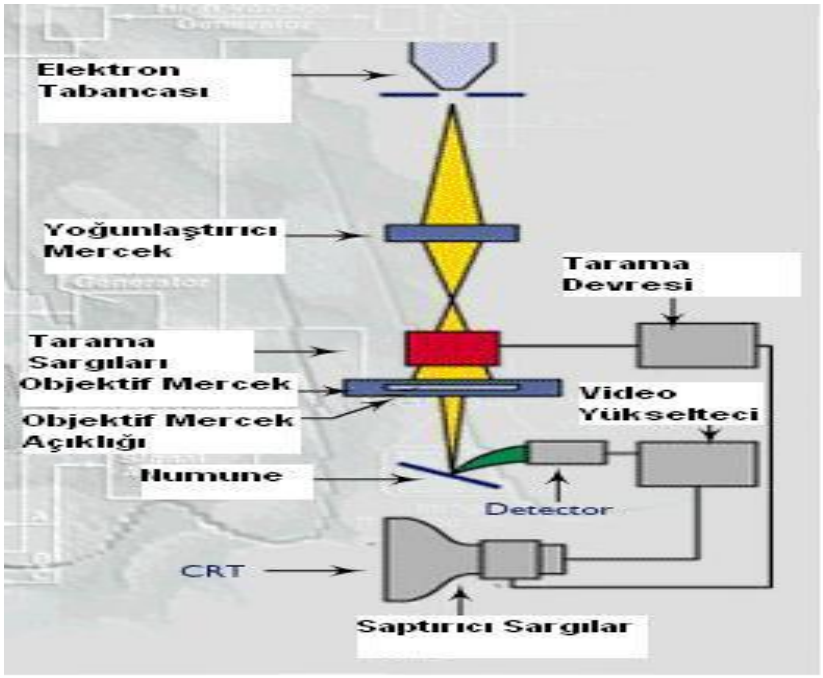
Hemen her kaynak yönteminde olduğu gibi lazer kaynağında da kaynatmaya başlanılan bölge ile bitiş bölgeleri ideal kaynak dikişinden uzaktır. Yetersiz nüfuziyet, malzemenin ışığı ilk etapta yansıtması gibi nedenlerden dolayı eriyik havuzu oluşuncaya kadar geçen sürede kaynak dikişinin kötü olmasına neden olmaktadır. Bu problemin tedbiri ise basittir. Kaynak başlama referansından 1-5 cm daha geride bir mesafeye ilave bir metal punta ile kaynatılarak bozuk dikiş kısmının ilave metalde kalmaları sağlanabilir. Aynı punta ile kaynaklama bitiş noktasına da yapılarak gerçek malzemenin kaynağı bitmesine rağmen 1-5 cm daha kaynaklama yapılarak lazer ışınının kapatılması sırasındaki olumsuz etkiler bertaraf edilebilir.

6.3.2.Taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri

SEM incelemelerin yapılma amacı ısıl işlemler sonucunda malzeme yapısı üzerindeki değişimleri tanımlamaktır. Daha önce optik mikroskop incelemelinde kullanılan numuneler SEM cihazı kullanılarak incelenmiştir.

ZEISS EVO LS10 modelli SEM cihazına sabitlenerek işaretlenen bölgelerden fotoğraflar alınmıştır. Şekil 6.26 da taramalı elektron mikroskobunun temel elemanları gösterilmiştir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM), tamamen bilgisayar kontrollüdür. Şekil 6.27 de inceleme yapılan ZEISS markalı SEM ve EDX cihazının genel görüntüsü verilmiştir.

İnceleme yapılacak malzemenin iletken olması gerekir. Bu cihazlar, iletkenliği düşük veya iletken olmayan malzemelerin analizi için altın veya bakır kaplama yapılması ile inceleme imkânı sağlarlar. Bu kaplamalar vakum altında ve mikron hassasiyetinde bir tabaka şeklinde olmalıdır. Demir esaslı malzemelerin kaplamaya ihtiyacı yoktur, iletkenlikleri SEM analizi için yeterli görülmüştür.

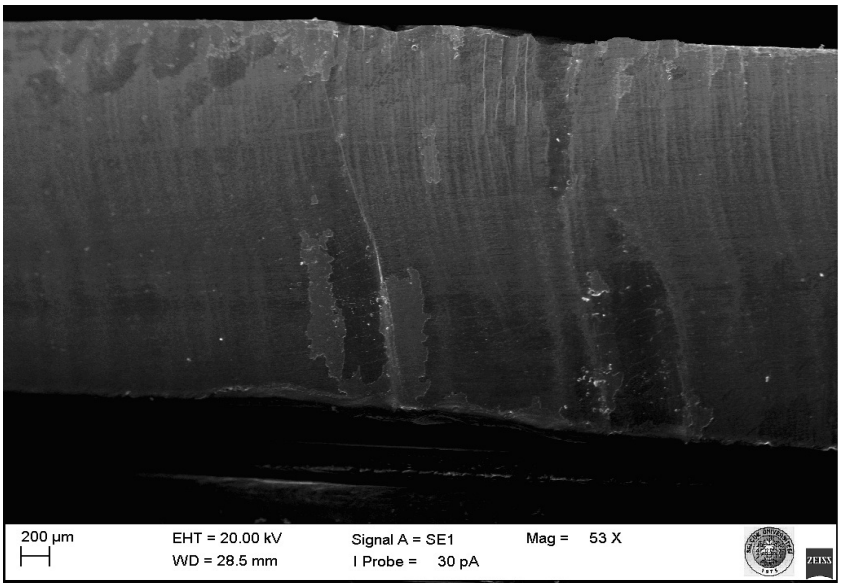


Şekil 6.26. SEM cihazının temel parçaları.

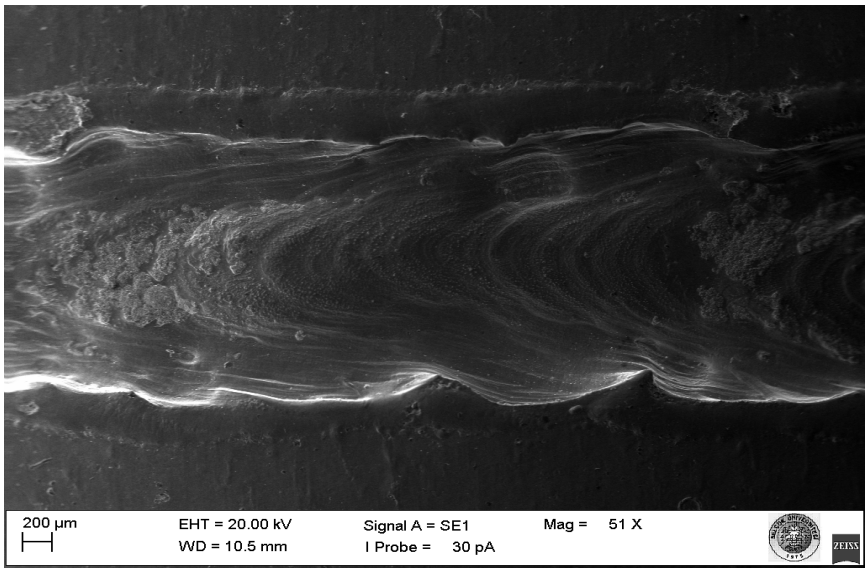


Şekil 6.27. SEM cihazının görüntüsü, ZEISS EVO LS10.

Şekil 6.28 de lazer kaynak ile kaynaklanmış numunenin kaynak kesitinin görüntüsü görülmektedir. Resimden; kaynak bölgesinin alt ve üst yüzeyi incelendiğinde; eriyik çöküntüsü, aşırı lazer gücü sebebiyle metal buharlaşması, düşük lazer gücü sebebiyle yetersiz nüfuziyet, makro çatlaklar, kaynak dikişinden ITAB bölgesine geçişte meydana gelebilecek katılaşma boşlukları ve kaynak dikişi merkezindeki sınır oluşumu gibi hataların oluşmadığı görülmektedir. Buradan hareketle kaynak işleminin geometrik koşulları sağladığı neticesine ulaşılmıştır.



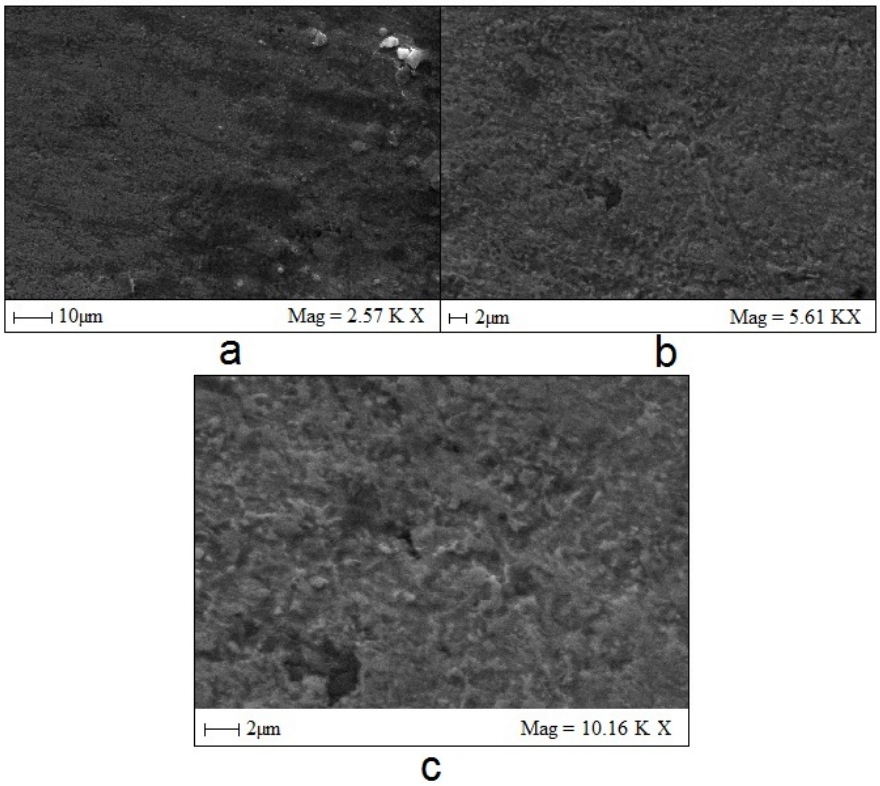
Şekil 6.28. Lazer kaynaklı numunenin birleşme noktasının makro görüntüsü 53X.



Şekil 6.29. Lazer kaynaklı numunenin kaynak dikişinin gösterilmesi.

Şekil 6.29 da lazer ile kaynatılan P265 NB tipi çeliklerin kaynaklama sonrası üst yüzeyinden çekilen 51X büyüklüğündeki görüntü görülmektedir. Görüntüden kaynaklama işlemi sırasında meydana gelen anahtar deliğinin kaynak boyunca eriyip katılaşması sonucunda hilal şeklinde birbirini izleyen bir yapıda sağdan sola doğru oluşumu görülmektedir.

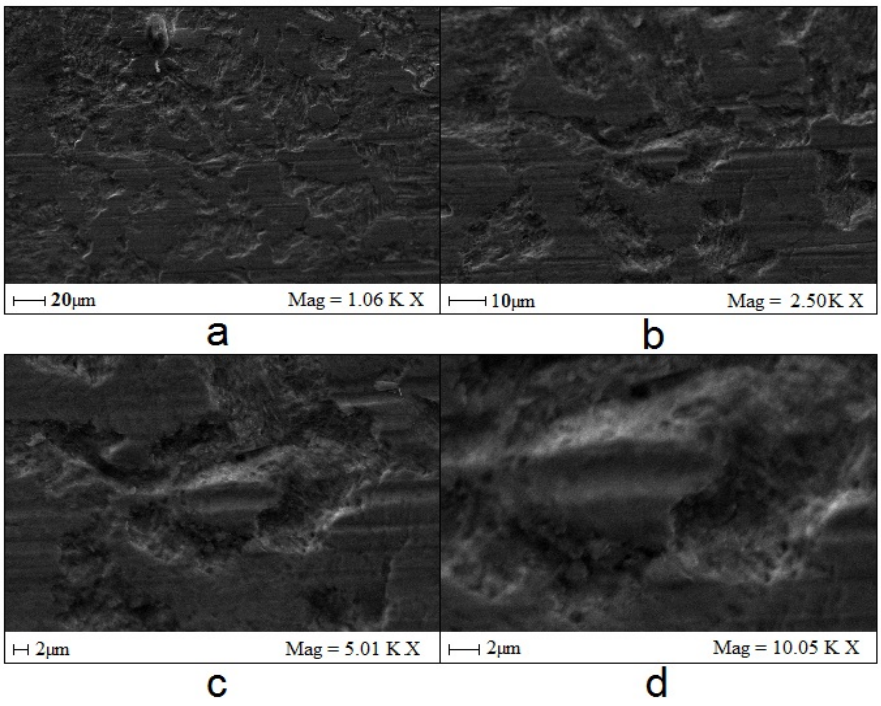
Şekil 6.30 da, lazer ile kaynatılan P265 NB tipi çeliklerin ısıdan etkilenmeyen ana metal kısmının üst yüzeyinden çekilen değişik büyütme oranlarındaki görüntüler görülmektedir. Ana metalin kaynak merkezine 12 mm mesafede çekilen görüntülerinde düzgün bir tane yapısı izlediği görülmektedir.



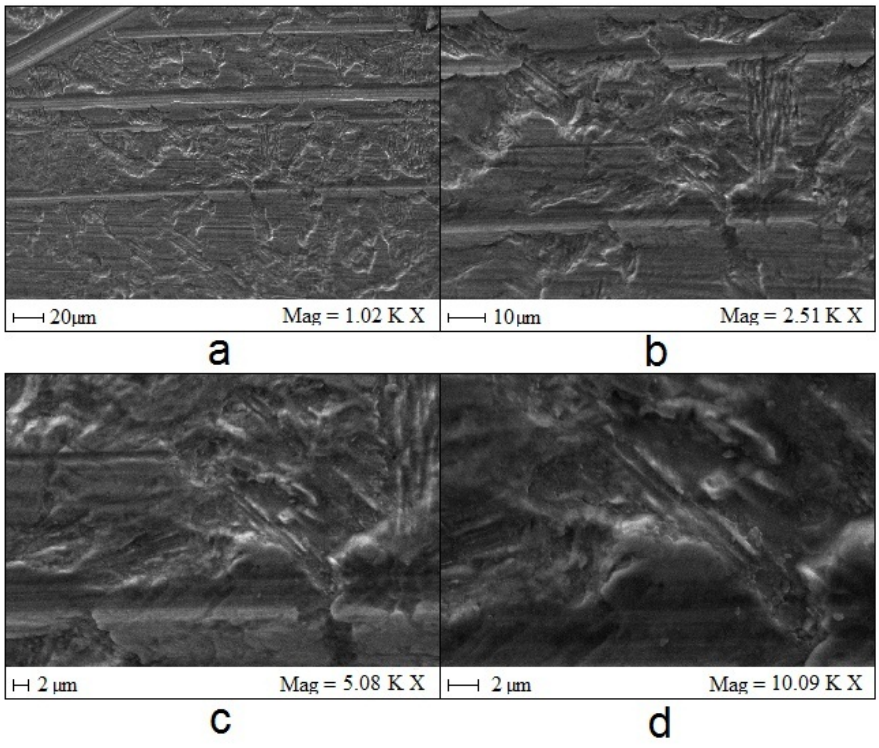
Şekil 6.30. Ana metal üst yüzeyden SEM görüntüleri
a: 2.57 K X, **b:** 5,61 K X, **c:** 10.16 K X

Şekil 6.31 de, lazer ile kaynatılmış P265 NB tipi çeliklerden şekil 5.6 da gösterilen şekilde 45º açı ile kesilmiş numunenin kaynak bölgesine ait değişik büyütme oranlarında çekilen görüntüler görülmektedir. Görüntülerin tarandığı bölgeye ait mikro yapı resimlerinde herhangi bir kaynak kusuruna rastlanmamıştır. Şekil 6.32 de, lazer ile kaynatılmış P265 NB tipi çeliklerden şekil 5.6 da gösterilen şekilde 45º açı ile kesilmiş numunenin kaynak metaline ait başka bir yerinden değişik büyütme oranlarında çekilen

görüntüler görülmektedir. Görüntülerin tarandığı bölgeye ait mikro yapı resimlerinde herhangi bir kaynak kusuru tespit edilememiştir.

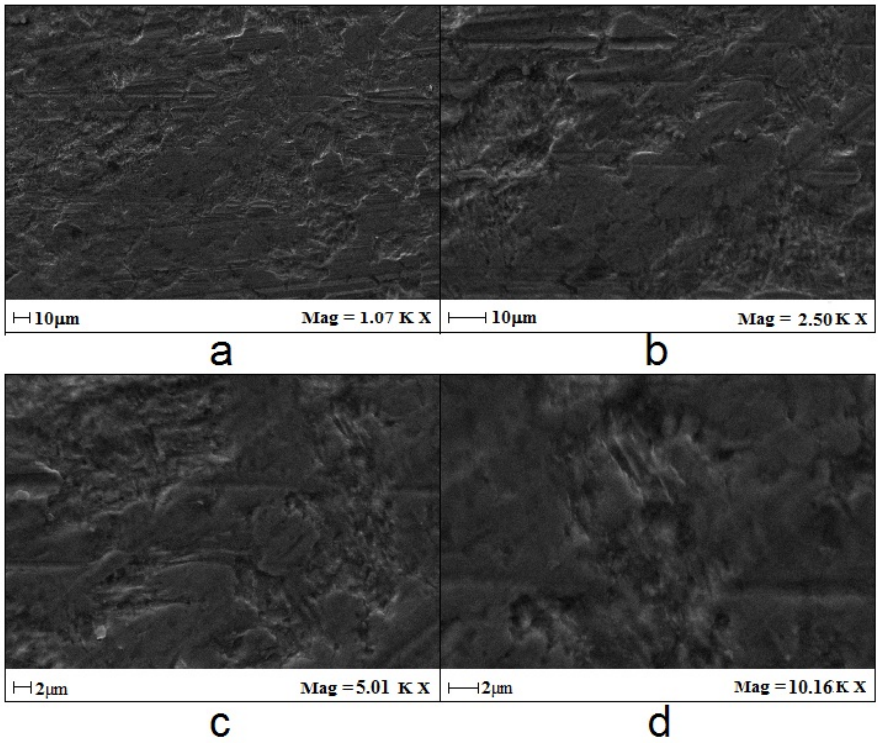


Şekil 6.31. 45º açı ile kesilen kaynak yüzeyinin SEM görüntüleri
a: 1,06 K X, **b:** 2,50 K X, **c:** 5.01 K X, **d:** 10.05 K X

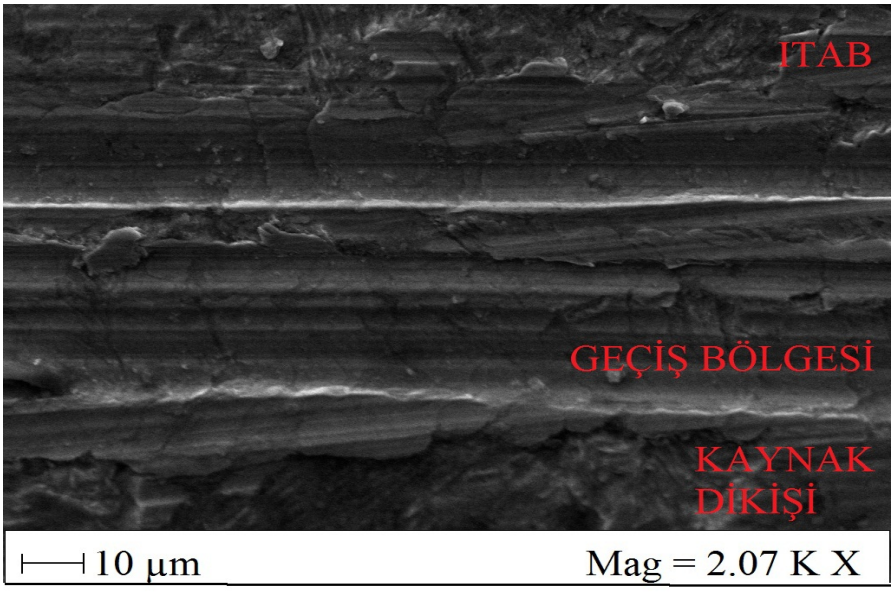


Şekil 6.32. 45º açı ile kesilen kaynak yüzeyinin SEM görüntüleri
a: 1,02 K X, **b:** 2,51 K X, **c:** 5.08 K X, **d:** 10.09 K X

Şekil 6.33 te, lazer ile kaynatılmış P265 NB tipi çeliklerden, şekil 5.6 da gösterilen şekilde 45º açı ile kesilmiş numunenin ITAB bölgesine ait değişik büyütme oranlarında çekilen görüntüler görülmektedir.

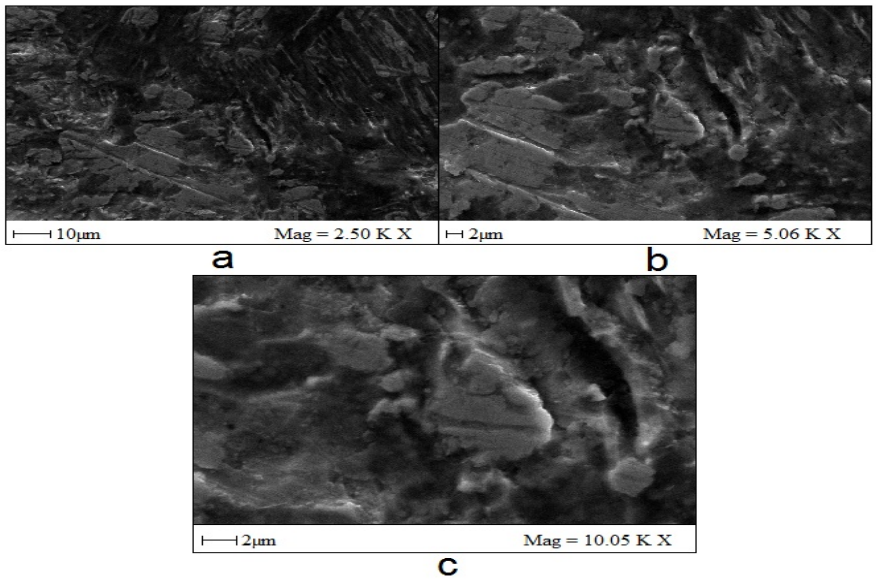


Şekil 6.33. 45º açı ile kesilen ITAB yüzeyinin SEM görüntüleri
a: 1,07 K X, **b:** 2,50 K X, **c:** 5.01 K X, **d:** 10.16 K X

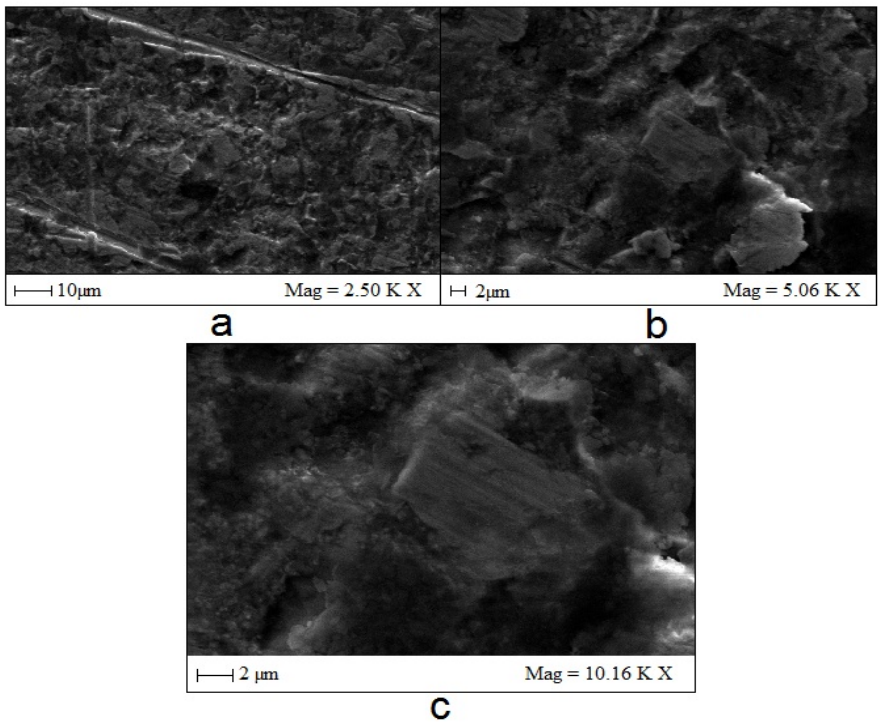


Şekil 6.34. 45º açı ile kesilen kaynak metali – ITAB geçiş bölgesi yüzeyinin SEM görüntüleri

Şekil 6.34 de, lazer ile kaynatılmış P265 NB tipi çeliklerden, şekil 5.6 da gösterilen şekilde 45º açı ile kesilmiş numunenin kaynak metali-ITAB geçiş bölgesine ait 2.07 K X büyütme oranında çekilen görüntü görülmektedir.



Şekil 6.35. Kaynak metali üst yüzeyinden SEM görüntüleri
a: 2.50 K X, **b:** 5,06 K X, **c:** 10.05 K X



Şekil 6.36. ITAB metali üst yüzeyinden SEM görüntüleri
a: 2.50 K X, **b:** 5,06 K X, **c:** 10.16 K X

Şekil 6.35 te, lazer ile kaynatılan P265 NB tipi çeliklerin kaynak metali bölgesinin üst yüzeyinden çekilen değişik büyütme oranlarında görüntüler görülmektedir. Şekil 6.36 da, lazer ile kaynatılan P265 NB tipi çeliklerin ITAB metali bölgesinin üst yüzeyinden çekilen değişik büyütme oranlarında görüntüler görülmektedir. Üst yüzey incelemelerinde ana metal yüzeyinin tane yapısının ITAB bölgesinde biraz daha küçüldüğü, kaynak metalinde ise uygulanan ısıyla paralel daha küçük ve değişken tane yapıları oluştuğu görülmüştür.

6.3.3. Radyografik incelemeler

Radyografi deneyi ile araştırmacılar, malzeme kusurları ile ilgili bilgiler elde etmektedirler. Radyografi X ya da γ (Gama) ışınlarıyla fotoğraf alma tekniğidir. Bir cismin sadece profilinin değil, kalınlık farklılıklarının ve içyapıdaki hacimsel süreksizliklerin de bir film üzerinde görünür hale getirildiği önemli bir test yöntemidir. Radyografik görüntü, üç boyutlu deney numunesinin iki boyuta izdüşümünün filme aktarılması şeklinde tarif edilebilir. Diğer tahribatsız muayene yöntemlerine göre daha dikkatli çalışılma gereğinin yanında, film gibi yıllarca saklanabilecek kalıcı belgeler sunması, test edilen malzemede bir tahribat oluşturmaması ile tercih edilen bir test metodudur.

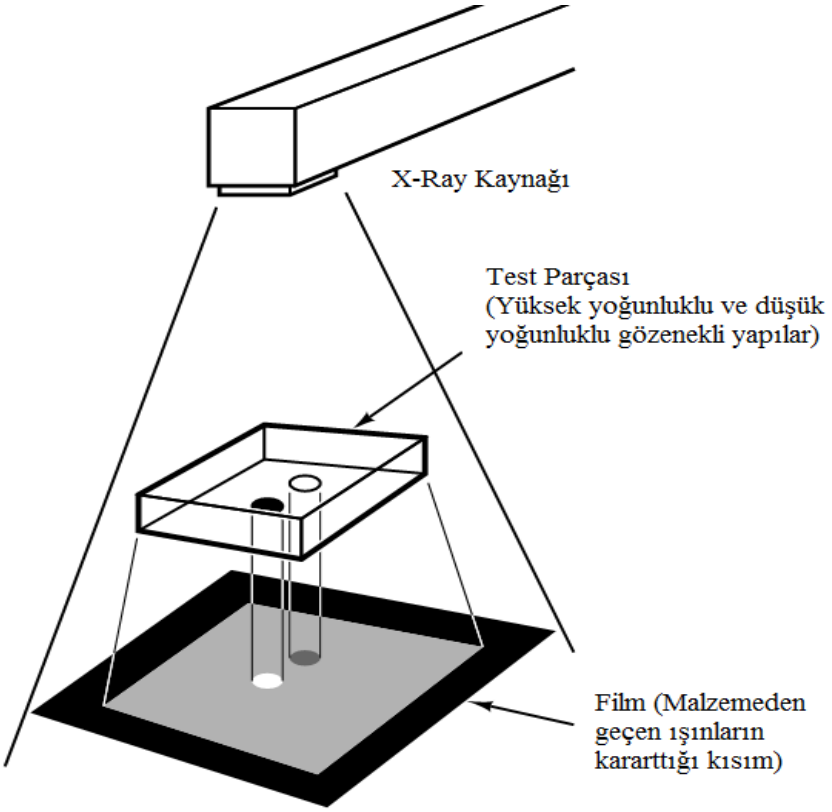
Radyografi testinde görüntü alma işlemi için bir fotoğraf filminin X ya da γ ışınları kullanılarak karartılması esasına dayanır. Bu yöntem, radyasyon oluşumu ile ölçüm yaptığı için güvenlik kurallarına dikkat edilerek uygulanması hayati bir zorunluluktur. Test edilecek malzemenin üstüne ışın kaynağı, altına ise fotoğraf filmi yerleştirilir. Malzeme kalınlığına ve cinsine bağlı olarak özellikleri ayarlanabilen ışınlar (X-ray, γ-ray) malzemeyi geçer ve zayıflamış olarak filme ulaşarak filmi karartırlar. X ve Gama ışınları kısa dalga boyunda elektromanyetik ışınlardır. Doğrusal ve ışık hızında yayılan enerji paketlerinden oluşurlar. Standartlarda tanımlanan aşamaların sağlanması ile sapma ve kırılmaya uğramadan numuneye nüfuz edip içinden geçerek filme ulaşırlar. Şekil 6.37 de X-Ray radyografisinin deneysel düzeneği görülmektedir (Shackelford 2005).

Radyografik muayeneler; endüstriyel gazların depolandığı tüp ve tanklarda, likit petrol ve doğalgaz tankları, petrol ve doğalgaz boru hatları, rafineriler, enerji santralleri

(nükleer ve termik) gibi alanların üretim aşamalarında uygulanan en güvenilir muayene tekniği olarak bilinmektedir. Süreksizlikler; yani boşluk, çatlak ve kalıntı gibi hataların film düzlemine paralel iki boyutu, görüntü üzerinden görülebilir.

Radyografik muayeneler ilgili standartlarına göre Konya ABİGEM'in NTD tahribatsız muayene laboratuarında yapılmıştır. Kaynak yüzeyinin radyografi değerlendirmesi ise ilgili kurum tarafından TS 7536 EN ISO 6520-1 MART 2003 standardına göre yapılmıştır. Radyografik muayeneler kaynak bölgeleri esas alınarak yapılmış ve yüzey kusurlarının tespiti amaçlanmıştır.

MAG kaynaklı numunenin değerlendirme sonuçlarına göre gözenek ve gaz boşlukları, kümeli gözeneklenme oluşumları tespit edilmiştir. Bu sebeple numune testten geçememiştir. Lazer kaynaklı numune de ise test edilen bir numune de MAG kaynağına nispetle küçük iki adet gözenek tespit edilmiş, diğer numunede ise hiçbir kusur tespit edilememiştir.



Şekil 6.37. X-Ray radyografisi (Shackelford 2005).

7. SONUÇLAR

Bu yüksek lisans tezinde; LPG tank üretiminde kullanılan P265 NB çeliklerini, MAG ve lazer kaynaklama yöntemleriyle kaynatılması neticesinde, lazer kaynak yönteminin MAG kaynak yöntemine kıyasla literatürde belirtilen üstünlüklerinin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Her iki kaynak yöntemiyle elde edilmiş olan kaynak numuneleri, mekanik deneyler ve metalografik incelemelere tabi tutulmuştur. Kaynak için kullanılan lazer tezgâhı darbeli ve sürekli ışın üretebilme kabiliyetine sahip olup 500 W ile 2800 W arasında çıkış ışın gücü ayarlanabilmektedir. Literatürde çelik malzemeler için kaynaklama işlemi CO_2 lazerlerle ve ekseriyetle CW mod ile yapıldığından, deney sırasında kullanılacak ışın CW mod olacak şekilde seçilmiştir. Kaynaklama işlemi için gerekli ışın gücü 2750 W güç değeri makineden seçilmiştir.

Kaynaklama işlemi için malzemenin kalınlığı (3 mm) dikkate alınarak 5" odak mesafeli (FL) lens seçilerek malzeme içerisine penetre edeceği en uygun odak noktası ayarlanmıştır. Koruyucu gaz olarak molekül yapısı küçük, uçucu ve inert gaz olması hasebiyle 20 l\dk debi ile helyum gazı seçilmiştir. Kesme kafasının kaynaklama kafasına dönüştürülmesi için dairesel çoklu üfleme (multi-blower) düzeneği tasarlanmıştır. Numuneler kesme kafası kullanılarak alın kaynağı ile birleştirilmiş, kaynak ve ITAB bölgeleri incelenmiştir.

Deneyler sonucunda;

1. Lazer ile kaynaklanmış numunelerin geometrik incelemeleri neticesinde ilk başta kaynak yüzeyinde aşırı güç kullanımı veya düşük kaynak ilerleme hızı sebebiyle meydana gelen yüksek metal buharlaşması tespit edilmiş, ışın gücü sabit tutulup kaynak hızı 500 mm\dk' dan 750mm\dk değerine çıkarılarak ideal kaynak dikişi elde edilmiştir (dikiş genişliği 2.5 mm, dikiş derinliği 2.95 mm).
2. Kaynak bölgesinin atmosferden koruması için yapılan tasarımda, helyum gazının jet etkisi oluşturmaması düşünülerek gaz sık dokunmuş bir telden geçirilerek türbülans yok edilmiş, ayrıca çok noktalı dairesel üfleme sistemi ile tam koruma sağlanmıştır. Bu değişiklik kesim lazerlerinin kaynak lazeri olarak kullanılmasını sağlamak amacıyla tasarlanmıştır (Şekil 5.2, Şekil 5.3). Üretilen bu koruma düzeneği ile geometrik kusurların giderildiği sağlam kaynak yapısı sağlanmıştır.

3. Çalışmanın temel amacına bağlı olarak endüstriyel lazer kesme makinelerine özel birkaç ekipmanın ilavesiyle kaynak yapma kabiliyeti kazandırılabileceği ortaya konmuştur.
4. MAG kaynak numuneleri için; endüstride kaynak işlemleri yapan bir firmadan destek alınmış, kaynak özellikleri belirtilerek kaynak işlemi gerçekleştirilmiş ve deney numuneleri oluşturulmuştur.
5. Vickers sertlik ölçümü yapılan dört tip numunenin hepsinde en yüksek sertlik değeri kaynak dikişinde ölçülmüştür. ITAB bölgesinin sertliği kaynak dikişi sertliklerinden az, ana metal sertlik değerindense fazla çıkmıştır.
6. En yüksek sertlik değeri normalize edilmiş MAG kaynağı kaynak dikişi üzerinde 307 HV değerinde ölçülmüştür. MAG ile kaynaklı numunelerde ölçülen sertlik değeri, ölçüm öncesi yapılan yüzey düzeltme talaşlı işlemi ile bir miktar artış göstermiş olabilir. Normalize edilmiş lazer kaynağı kaynak dikişi üzerindeki sertlik değeri 242 HV olarak tespit edilmiştir. Normalizasyon yapılmamış MAG kaynağında kaynak metali sertlik değeri 291 HV olarak ölçülürken, lazer kaynağı kaynak dikişinde sertlik değeri 248 HV olarak ölçülmüştür.
7. Kaynaklama sonrası oluşan sertlik değerleri malzemelerin kullanım amacına göre değişkenlik göstermektedir. LPG tüpleri formlarını kaynaklama öncesi aldıklarından oluşan sertlik değerleri imalat aşamasında bir sorun teşkil etmemektedir. Ancak kaynaklı birleştirme sonrası yapılacak bükme, sıvama gibi işlemlerde kaynak bölgesi sertliği çatlama, yarılma, yırtılma, şekil almama gibi sorunlar doğurabilir. Bu çalışma ile lazer kaynağının sertlik değeri ve sertleşme alanı açışından MAG kaynağından daha düşük değerler sergilediği ortaya konmuştur.
8. Üç noktadan eğme deneyleri her iki kaynak tipi ile kaynaklanmış numunelere tatbik edilmiş, iki yönlü basma yapılmıştır. Lazer ile kaynaklanmış numunelerde çatlak veya yarılma gözlemlenmemiştir. Normalize edilmiş MAG kaynağında herhangi bir kusur görülmezken MAG kaynaklı numune kaynak işlem yüzeyinden basılan deneyde kaynak alt yüzeyinde bir yarılma tespit edilmiştir. Bunun sebebi kaynak merkezi alt bölgesinde yetersiz nüfuziyet sebebiyle bir sınır çizgisi oluşumu olabilir.

9. Optik mikroskop incelemelerinde lazer kaynağı ile meydana gelen fazlar tespit edilmiştir. İncelemeler neticesinde, ana metalin düşük karbon içermesine bağlı olarak ferritik ve az perlitik bir faz yapısı sergilediği anlaşılmıştır. Ana malzemenin tane büyüklükleri ITAB ve kaynak metaline kıyasla daha büyük ve daha düzenli bir yapıdadır. ITAB bölgesinde faz yapısı ferrit ve perlitten oluşmaktadır. Tane büyüklüğü ana metale kıyasla daha küçüktür. Kaynak metalinde ise Widmanstätten olarak tarif edilen dallantılı bir tane yapısı tespit edilmiştir. Ferritik bir faza sahip olan kaynak metalinde tane büyüklüğü diğer bölümlerden daha küçük olarak gözlemlenmiştir.
10. SEM incelemeleri, sadece lazer ile kaynatılmış numunelere yapılmıştır. SEM incelemelerinde mikro yapıda çatlak veya gözenek çukurları tespit edilememiştir.
11. Radyografik incelemeler sonucunda lazer kaynaklı numuneler radyografi testini geçerken MAG kaynaklı numunelerde kümeli gözeneklilik yapısı ile sınır çizgisi oluşumu tespit edilmiştir.
12. Bu tezde kullanılan tüm deneysel veriler bir lazer kesme makinesinin kesme kafası kullanarak kaynaklama yapabileceğini ortaya koymuştur.

8. ÖNERİLER

1. İmalat sektörü, gün geçtikçe yeni teknolojilere adapte olarak daha uzun ömürlü üretimler gerçekleştirirken rekabet gücünü de iç ve dış pazarlarda artırmaktadır. Ancak bir teknolojinin tercih edilmesi ilk yatırım maliyetine de bağlıdır. Günümüzde lazer teknolojisi çoğunlukla metal kesme işlemi için kullanıldığından kaynak ve sertleştirme işlemleri henüz yaygınlaşamamıştır. İlk yatırım maliyetlerinin azaltılması durumunda lazer kaynak teknolojisinin de yaygınlaşması beklenmektedir. Yerli lazer rezonatörlerinin üretilmesi ile endüstrideki lazer makinesi satın alma maliyetleri azalarak daha yaygın olarak kullanılacaktır.
2. Lazer kaynağı ile ilgili ülkemizde araştırma sayısı teknolojinin yaygınlaşmasına paralel bir artış göstermektedir. Ancak bu teknoloji yüksek bir ilk yatırım maliyeti gerektirmektedir. Ülkemizde hali hazırda 300 kadar lazer kesim makinesi bulunmaktadır. Bu makineler basit bazı değişiklikler ile uygun malzeme seçilmesi durumunda hem kesme hem de başarılı kaynaklama işlemlerini gerçekleştirebilirler.
3. Kaynak işleminin yaygınlaşması için bir diğer yol ise teknolojik açıdan metal kesme rekabetçiliğini kaybeden 10-15 yıl önce üretilmiş lazer kesim makinelerinin lazer makine özelliklerine bağlı olarak lazer kaynak makinelerine dönüştürülmesi olabilir.
4. Lazer kaynağı sanayide birçok alanda farklı metaller için kullanılabilir. Paslanmaz çelikler, yumuşak ve sert çelikler, Alüminyum alaşımları, toz metal kompozitler ve farklı metallerin birleştirilmesi şeklinde yeni çalışmalar yapılabilir. Lazer kaynağının sunduğu avantajların araştırmalar ile tespiti arttıkça bu teknolojinin yaygınlaşma sürecinin kısalacağı tahmin edilmektedir.

KAYNAKLAR

Akman E., 2006, Ti6Al4V Titanyum Alaşımlarının Atımlı Nd:YAG Lazeri Kullanılarak Kaynak Edilmesi Ve Kaynak Parametrelerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli.

Anand D., Chena D.L., Bholea S.D., Andreychukb P., Boudreaub G., 2006, Fatigue behavior of tailor (laser)-welded blanks for automotive applications, *Elsevier*, 199–207.

Anık, S., 1981, Kaynak Tekniği, Çeliklerin Kaynak Kabiliyeti, Cilt 3, İTÜ Makine Fakültesi Ofset Atölyesi, *İstanbul*, 258 s.

Anık, S., 1973, Kaynak Tekniği, Oksi-Asetilen ve elektrik- ark kaynağı, Cilt 1, İTÜ Mak. Fak. Ofset Baskı Atölyesi, *İstanbul*, 359 s.

Anık, S., 1991, Kaynak Tekniği El Kitabı Yöntemler ve Donanımlar, Gedik Holding Yayını, *İstanbul*, 222 s.

Anık, S., Anık, S.E.,Vural, M.,1993, 1000 Soruda Kaynak Teknolojisi El Kitabı, Cilt I, Birsen Yayınevi, *İstanbul*, 336 s.

Aslan S., 1987, Lazerin Yeni Uygulamaları, *Bilim ve Teknik*, sayı 235.

Black I., 1999, Profile Cutting In Mild Steel Using A Pulsed CO_2 Laser, *Elsevier*, pp. 119-132.

Bagger C., Olsen F.O., 2001, Pulsed node laser cutting of sheets for tailored blanks, *Elsevier*, pp 131-135.

Bayraktar E., Kaplan D., Jansen P.J., Hugele D., 2004, Evaluation Of Pipeline Laser Girth Weld Properties By Charpy (V) Toughness And Impact Tensile Tests, *Elsevier*, pp. 155–162.

Bayraktar E., Kaplan D., Buirette C., Grumbach M., 2004, Application of impact tensile testing to welded thin sheets, *Elsevier*, pp. 27-39.

Bayraktar E., Kaplan D., 2005, Parametric approach model for determining welding conditions: New type of welding limit diagrams (WLD), *Elsevier*, pp. 477–486

Belhadj A., Baudouinb P., Breabanc F., Deffontaine A., Dewulf M., Houbaert Y., 2003, Effect of laser cutting on microstructure and on magnetic properties of grain non-oriented electrical steels, *Elsevier,* pp. 20-31.

Boronski D., 2006, Cyclic material properties distribution in laser-welded joints, *Elsevier*, 346–354

Borrisutthekul R., Miyashita Y., Mutoh, Y., 2005, Dissimilar material laser welding between magnesium alloy AZ31B And aluminum alloy A5052-O, *Elsevier,* pp. 199-204.

Cao X., Jahazi M., Immarigeon J.P., Wallace W., 2006, A review of laser welding techniques for magnesium alloys, *Elsevier*, pp. 188–204

Cicala E., Duffet G., Andrzejewski H., Grevey D., Ignat S., 2005, Hot cracking in Al–Mg–Si alloy laser welding–operating parameters and their effects, *Elsevier*, pp.1-9.

Cora A., 2002, Lazerler, *Otomasyon Dergisi*, Sayı 127

Costa A. P., Quintino L., Greitmann M., 2003, Laser beam welding hard metals to steel, *Elsevier,* pp. 163–173

Çalık A., 2004, Elektron Işın Kaynağı ile Birleştirilmiş İki Farklı Çelik Malzemenin Kaynak Bölgesinin İncelenmesi, Doktora Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta.

Çelen S., 2006, Paslanmaz Çeliklerin Lazer Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Bağlantının Dayanım ve Korozyon Özelliklerinin Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir.

Çevik U., 2008, Fracture Behavior Of Welded Mis-Matched Joints, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül University Graduate School Of Natural And Applied Sciences*, İzmir.

Demokan S., 1983, Lazer Nedir, Ne Değildir?, *Bilim ve Teknik Dergisi*, Sayı 186.

Ding R. G., Ojo A. O., Chaturvedi M. C., 2006, Fusion zone microstructure of laser beam welded directionally solidified Ni_3Al-base alloy IC6, *Elsevier*, pp. 859–864.

Du H., Hu L., Liu J., Hu X., 2004, A Study On The Metal Flow In Full Penetration Laser Beam Welding For Titanium Alloy, *Elsevier*, pp. 419–427.

Durmuş H., 2006, CO2 Lazer Kaynağı İle Birleştirilmiş Alüminyum Matriksli Kompozitlerin Kaynak Bölgesinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,* Manisa.

Eibl M., Sonsino C. M., Kaufmann H., Zhang G., 2003, Fatigue Assessment of Laser Welded Thin Sheet Aluminium, *Elsevier*, pp. 719–731.

Ghany K. A., Newishy M., 2005, Cutting Of 1.2 mm Thick Austenitic Stainless Steel Sheet Using Pulsed And CW Nd:YAG Laser, *Elsevier*, pp. 438–447.

Günay D., Özkan D., Şentürk S., 2001, Lazer, Plazma Kaynağı ve Uygulamaları, Bitirme Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Makine Müh*., Isparta, 11-35

Heitkemper M., Fischer A., Bohne Ch., Pyzalla A., 2002, Laser surface treatment of the high nitrogen steel x30CRMON151, 6 th internatıonal tooling conference,

Jin X., Li L., 2003, An Experimental Study On The Keyhole Shapes In Laser Deep Penetration Welding, *Elsevier*, pp. 779-790.

Jokinen T., Kujanpaa V., 2003, High Power Nd:YAG Laser Welding In Manufacturing of Vacuum Vessel of Fusion Reactor, *Elsevier*, pp. 349/353.

Ion J. C., 2005, Laser Processing of Engineering Materials Handbook, Principles, Procedure and Industrial Application, Butterworth Heinemann, pages 41-177.

Kaynak dikişlerinin tahribatsız muayenesi - Kaynaklı birleştirmelerin radyografik muayenesi, 2002, TS 5127 EN 1435.

Kaynak ve ilgili işlemler - Metalik malzemelerde geometrik kusurların sınıflandırılması - Bölüm 1: Ergitme kaynağı, 2003, TS 7536 EN ISO 6520-1.

Kim J. D., , Moon J. H., 2004, C-ring stress corrosion test for Inconel 600 and Inconel 690 sleeve joint welded by Nd:YAG laser, pp. 807–818

Kuo T.Y., Lin H.C., 2006, Effects Of Pulse Level of Nd-YAG Laser On Tensile Properties And Formability of Laser Weldments In Automotive Aluminum Alloys, *Elsevier*, pp. 281–289.

Lamikiz A., Lopez de Lacalle L. N., Sanchez J. A., Del Pozo D., Etayo J. M., Lopez J.M., 2005, CO_2 laser cuttingof advanced high strength steels (AHSS), *Elsevier,* pp. 362–368,

Lee W.H., Shiue R.K., Chen C., 2003, Mechanical properties of modified 9Cr/1Mo steel welds with notches, *Elsevier*, pp. 153-161.

Li Z., Fontana G., 1998, Autogenous laser welding of stainless steel to free-cutting steel for the manufacture of hydrolic valves, *Elsevier*, pp 174-182.

Liming L., Jifeng W., Gang S., 2004, Hybrid Laser–TIG Welding, Laser Beam Welding And Gas Tungsten Arc Welding of AZ31B Magnesium Alloy, *Elsevier,* pp. 129–133.

Liu C., Northwood D.O., Bhole S.D., 2004, Tensile Fracture Behavior in CO_2 Laser Beam Welds of 7075-T6 Aluminum Alloy, *Elsevier*, pp.573–577.

McPherson N .A., Chi K., Baker T. N., 2003, Submerged Arc Welding of Stainless Steel And The Challenge From The Laser Welding Process, *Elsevier*, pp. 174–179.

Metalik malzemelerde kaynak dikişleri üzerinde tahribatlı muayeneler - Eğme deneyleri, 2010, TS EN ISO 5173.

Metalik malzeme kaynaklarında tahribatlı deneyler - Sertlik deneyi - Kısım 2: Kaynaklı birleştirmelerde mikro sertlik deneyi, 1997, TS EN 1043-2.

Metalik malzemeler - Vickers sertlik deneyi - Bölüm 1: Deney metodu, 2007, TS EN ISO 6507-1.

Murakami T., Nakata K., Ikeda T., Nakajima H., Ushio M., 2003, Weld Fusion Property of Lotus-Type Porous Copper By Laser Beam Irradiation, *Elsevier*, pp. 134-140.

Nagels E., Duflou J.R., VanHumbeeck J., 2007, The influence of sulphur content on the quality of laser cutting of steel,Elsevier, pp. 232-339

Nikumb S., Chen Q., Li C., Reshef H., Zheng H. Y., Qiu H., Low D., 2005, Precision Glass Machining, Drilling And Profile Cutting By Short Pulse Lasers, *Elsevier*, pp. 216–221.

Nishimoto K., Mori H., 2004, Hot Cracking Susceptibility In Laser Weld Metal Of High Nitrogen Stainless Steels, *Elsevier*, pp. 231–240.

Non destructive testing of welds - Part 1: Evaluation of welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys by radiography - Acceptance levels, 2006, BS EN 12517-1.

O'Neill W., Gabzdyl J. T., 2000, New developments in laser-assisted Oxygen cutting, *Elsevier,* pp. 355–367.

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.

Özkan T., 1987, Mikrodalga, Milli Eğitim Gençlik Ve Spor Bakanlığı Yayınları, *Ankara*, 437-452.

Pakdil M., 2005, Determination Of The Mechanical Properties And Fatigue Crack Propagation Of The Laser Welded New Generation Aluminium Alloys, Doktora Tezi, *Dokuz Eylül University Graduate School Of Natural And Applied Sciences,* İzmir.

Pakdil M., Çam G., Erim S., 2005, Lazer Kaynağının Avantajları, *MakinaTek*, Sayı 95.

Paul C. P., Jain A., Ganesh P., Negi J., Nath K., 2004, Laser rapid manufacturing of Colmonoy-6 components, *Elsevier*.

Powell J., Jezioro M., Menzies A., Scheyvearts F., 1989, CO_2 Laser Cutting Of Titanium Alloys, *Elsevier*, pp. 609–617.

Quintero F., Pou J., Fernandez L., Doval A.F., Lusquinos F., Boutinguiza M., Soto R., Perez-Amor M., 2005, Optimization Of An Off-Axis Nozzle For Assist Gas Injection In Laser Fusion Cutting, *Elsevier*.

Rao T., Kaul R., Tiwari P., Nath A., 2005, Inert Gas Cutting Of Titanium Sheet With Pulsed Mode CO_2 Laser, *Elsevier*, pp. 1330-1348.

Rao T., Kumar H., Nath A.,2005, Processing of Concretes With A High Power CO_2 Laser, *Elsevier*, pp. 348–356.

Tarakçıoğlu N., Özcan M., 2004, Lazerler Ve Materyal İşleme Uygulamaları, Atlas Yayın Dağıtım, *Ankara*, 5-133.

Tokdemir M., 2007, Lazer Kaynağı ile Birleştirilmiş Demir Esaslı T/M Malzemelerin Kaynak Bölgesinin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi, Doktora Tezi, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,* Manisa.

Tsay L.W., Young M.C., Chen C., 2003, Fatigue crack growth behavior of laser-processed 304 stainless steel in air and gaseous hydrogen, *Elsevier*, 1985–1997.

Shackelford F. J., 2005, Failure Analysis, The engineering handbook second edition, CRC press LLC.

Sulaiman F.A., Yilbas B.S., 2006, CO_2 Laser Cutting of A Carbon/Carbon Multi-lamelled Plain Weave Structure, *Elsevier*, pp. 345–351.

Uzun, R. O., Durmuş, H., Meriç, C., 2004, Lazer Kaynağı ve Gelişimi, *Otomasyon*, Sayı 151.

Wang H., Shi Y., Gong S., Duan A., 2007, Effect of asist gas flow on the gas shielding during laser deep penetration welding, *Elsevier,* pp. 379–385.

Wirth P., 2005, Introduction to industrial laser materials processing, Rofin-Sinar Technologies, Hamburg.

Zhang X., Ashidab E., Shonob S., Matsudab F., 2006, Effect of shielding conditions of local dry cavity on weld quality in underwater Nd:YAG laser welding, *Elsevier.*

Zhu J., Lib L., Liu Z., 2005, CO_2 And Diode Laser Welding of AZ31 Magnesium Alloy, *Elsevier,* pp. 300–306.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Ahmet GÖRDEBİL
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : KONYA - 19.05.1980
Telefon : 0332 345 13 53
Faks : 0332 345 39 80
e-mail : a_gordebil@yahoo.com

EĞİTİM

Derece		**Adı, İlçe, İl**	**Bitirme Yılı**
Lise	:	Endüstri Meslek Lisesi, Meram. KONYA	**1998**
Üniversite	:	Fırat Üniversitesi, Merkez, ELAZIĞ	**2004**
Yüksek Lisans	:	Selçuk Üniversitesi, Selçuklu, KONYA	**2011**
Doktora	:	**-**	

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	**Kurum**	**Görevi**
2004-2005	Yavuz Sürücü Kursu	Müdür
2005-2006	Hayıroğlu İlköğretim Okulu	Öğretmen
2006-(…..)	Konlazer Ldt. Şti.	Müdür

UZMANLIK ALANI

Lazer Teknolojileri ve Lazer ile Materyal İşleme

YABANCI DİLLER

İngilizce