



T.C.
Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü

SAC METAL BİRLEŞTİRMELERİNDE LAZER KAYNAK
DİKİŞ FORMLARININ KAYNAK ÖZELLİKLERİNE
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Dilara ERGİN

Yüksek Lisans Tezi

SAC METAL BİRLEŞTİRMELERİNDE LAZER KAYNAK
DİKİŞ FORMLARININ KAYNAK ÖZELLİKLERİNE
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Dilara ERGİN



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SAC METAL BİRLEŞTİRMELERİNDE LAZER KAYNAK DİKİŞ
FORMLARININ KAYNAK ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Dilara ERGİN
0000-0003-2457-321X

Prof. Dr. Nurettin YAVUZ
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2021
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SAC METAL BİRLEŞTİRMELERİNDE LAZER KAYNAK DİKİŞ FORMLARININ KAYNAK ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Dilara ERGİN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Nurettin YAVUZ

Günümüzde lazer kaynağı, geleneksel direnç kaynağı ve gazaltı kaynağı gibi kaynak yöntemlerinin yerine kullanılmaya başlanılan, kalite, hız ve ekonomi bakımından üstün özelliklere sahip bir birleştirme yöntemidir. Yüksek proses hızı özelliğiyle seri üretime yatkınlığı lazer kaynağının sanayide tercih edilme sebeplerindedir. Bunun yanında metal sacların lazer kaynak yöntemiyle birleştirilmesi, diğer kaynak yöntemlerine nazaran; farklı tip metallerin kaynağının yapılabilmesi, daha dar bir kaynak bölgesi elde edilmesi gibi bir çok farklı imkanlar da sağlamaktadır.

Bu çalışmada lazer kaynağının genel kullanım alanları, otomotivdeki yeri, önemli parametreleri ve lazer dikiş geometrilerinin farklı birleştirme tiplerinde, farklı yükleme koşullarındaki etkileri araştırılmıştır. Lazer gücü ve kaynak hızı parametrelerinin kaynak nüfuziyetine etkileri makro boyutta incelenmiştir. Belirlenen optimum kaynak parametreleri ile farklı dikiş geometrilerinde kaynaklar uygulanmış ve farklı yükleme koşullarında testlere tabi tutulmuşlardır. Yapılan bu çalışmaların, mevcut durumda endüstride kullanılan birleştirme yöntemlerinin yerine lazer kaynak yöntemi kullanımında uygun dikiş formu seçim aşamasına yardımcı olacağı öngörülmektedir. Böylelikle proses aşamaları kısalacak ve optimum şekilde kaynak prosesi gerçekleştirilmiş olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Lazer kaynağı, lazer dikiş formu, lazer dikiş geometrisi, lazer dikışı, kaynak mukavemeti

2021, viii + 67 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF LASER WELDING SEAM FORMS ON WELDING PROPERTIES IN SHEET METAL JOINTS

Dilara ERGİN

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Nurettin YAVUZ

Today, laser welding is a joining method that is used instead of traditional resistance welding and inert-gas welding methods and has superior features in terms of quality, speed and economy. Laser welding is preferred in the industry due to its high process speed and its tendency to mass production. In addition, combining metal sheets with laser welding method compared to other welding methods; It also provides many different possibilities such as welding different types of metals and obtaining a narrower welding area.

In this study, the general usage areas of laser welding, its place in automotive, its important parameters and the effects of laser seam geometries on different joining types and different loading conditions were investigated. The effects of laser power and welding speed parameters on weld penetration have been studied in a macro scale. Welds in different seam geometries were applied with the determined optimum welding parameters and they were subjected to tests under different loading conditions. It is predicted that these studies will help the appropriate seam form selection stage in the use of laser welding method instead of the joining methods currently used in the industry. In this way, the process steps will be shortened and the welding will be performed in an optimum way.

Key words: Laser welding, laser stitch form, laser stitch geometries, laser stitch, welding strength

2021, viii + 67 pages.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimin boyunca bana destek veren değerli hocam Prof Dr. Nurettin Yavuz'a; çalışmalarım süresince birçok konuda bilgi ve yardımlarını esirgemeyen, testlerin gerçekleştirilmesinde teknik bilgi ve tecrübesiyle bana yardımcı olan değerli arkadaşım Orkun Tekeliođlu'na, çalışmanın gerçekleşmesi için tüm imkanları sağlayan Coşkunöz Kalıp Makina A.Ş firması'na ve çalışmalarda emeği geçen ismini sayamadığım herkese teşekkür ederim.

Ayrıca beni her zaman destekleyen, yanımda olan ve bugünlere gelmemde büyük emeği olan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Dilara ERĐİN
01/01/2021

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	2
2.1. Lazer Işını, Tarihçesi, Oluşumu, Sistemleri ve Kullanım Alanları.....	2
2.1.1. Lazer Işını	2
2.1.2. Lazer Işınının Tarihçesi.....	3
2.1.3. Lazer Işını Oluşumu.....	4
2.1.4. Lazer Sisteminin Temel Elemanları.....	6
2.1.5. Lazer Sistemleri.....	7
2.1.6. Lazer Işını Kullanım Alanları.....	12
2.2. Lazer Kaynağı.....	13
2.2.1. Lazer Kaynağının Temel Elemanları ve Çalışma Prensipleri.....	14
2.2.2. Lazer Kaynak Yöntemleri.....	16
2.2.3. Lazer Kaynağının Kullanım Alanları.....	18
2.2.4. Lazer Kaynağının Avantaj ve Dezavantajları.....	19
2.2.5. Lazer Kaynak Kalitesi Etkileyen Parametreler.....	20
2.3. Galvanizli Çeliklerde Lazer Kaynağı.....	25
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	27
3.1. Materyal.....	27
3.2. Lazer Kaynak Ünitesi ve Özellikleri.....	28
3.3. Parametre Belirleme Çalışmaları.....	29
3.4. Deney Numuneleri.....	33
3.5. Lazer Kaynak İşlemleri.....	35
3.6. Çekme Testleri.....	41
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	43
4.1. Parametre Çalışmaları.....	43
4.2. Farklı Kaynak Dikiş Geometrilerinin Farklı Birleştirme Tiplerinde Etkileri.....	52
4.2.1. Bindirme Birleştirme Tipinde Farklı Lazer Dikiş Geometrilerinin Çekme Dayanımına Etkisi.....	52
4.2.2. Peel Birleştirme Tipinde Farklı Lazer Dikiş Geometrilerinin Çekme Dayanımına Etkisi.....	54
4.2.3. KS-II Birleştirme Tipinde Farklı Lazer Dikiş Geometrilerinin Çekme Dayanımına Etkisi.....	55
5. SONUÇ	59
KAYNAKLAR	61
ÖZGEÇMİŞ	65

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
A ₈₀	Kopma uzaması
R _p	Akma dayanımı
R _m	Çekme dayanımı
Zn	Çinko
E	Enerji
P	Fosfor
Q	Isı
Yb	İterbiyum
C	Karbon
CO ₂	Karbondioksit
S	Kükürt
Mg	Magnezyum
Mn	Mangan
N	Newton
Nb	Niyobyum
Yb	İterbiyum
Si	Silisyum
Ti	Titanyum
Nd	Neodinyum
Al ₂ O ₃	Alüminyum Oksit
Fe ₃ Cl	Demir(III) Klorür

Kısaltmalar	Açıklama
m	Metre
mm	Milimetre
sn	Saniye
dk	Dakika
nm	Nanometre
ITAB	Isı Tesiri Altındaki Bölge
Nd:YAG	Neodymium yttrium aluminum garnet
YAG	Yttrium aluminum garnet
Mpa	Megapascal
W	Watt
kW	Kilowatt
K	Kelvin
CW	Continuous wave
kJ	Kilojoule
µm	Mikrometre
TS	Türk Standartları
EN	European Norm
DIN	Alman Standartlar Enstitüsü
vb	ve benzeri

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Dalga boyu gösterimi.....	2
Şekil 2.2. Lazer ışını dalgaları.....	3
Şekil 2.3. Uyarılma sonrasında atomun foton yayarak bir alt enerji seviyesine geçişi.....	5
Şekil 2.4. Lazer Cihazının Temel Elemanları.....	6
Şekil 2.5. Nd:YAG lazer sistemi şematik gösterimi.....	8
Şekil 2.6. Nd:YAG lazer sisteminin elemanları.....	9
Şekil 2.7. Ruby(yakut) lazer sistemi elemanları.....	10
Şekil 2.8. Gaz lazeri şematik gösterimi.....	11
Şekil 2.9. Yarı iletken lazer şematik gösterimi.....	12
Şekil 2.10. Lazer Kaynağının Şematik Gösterimi.....	14
Şekil 2.11. Katı hal lazer sistemi.....	15
Şekil 2.12. CO ₂ lazer sistemi.....	16
Şekil 2.13. Lazer iletim kaynağı.....	17
Şekil 2.14. Lazer nüfuziyet kaynağı.....	18
Şekil 2.15. Karbonlu çelik levhalar için kaynak hızının CO ₂ lazer gücüne göre fonksiyonu.....	22
Şekil 2.16. Ayna ve lens kullanımıyla lazer ışınının odaklanması.....	23
Şekil 2.17. Yardımcı gazın tipinin plazmanın oluşumuna ve kaynak sonuçlarına etkisi.....	25
Şekil 3.1. Kullanılan robot ve lazer kafası.....	28
Şekil 3.2. Kullanılan rezonatör.....	28
Şekil 3.3. Lazer kaynak işlemlerinde kullanılan fikstür.....	29
Şekil 3.4. Hazırlanan numune boyutları.....	30
Şekil 3.5. I tipi lazer geometrisi konumu.....	30
Şekil 3.6. Numune kesme ve zımparalama makineleri.....	32
Şekil 3.7. Welding Expert cihazı.....	34
Şekil 3.8. Deney numunelerinin kodlanması.....	35
Şekil 3.9. Farklı birleştirme tiplerinde kullanılacak numune ölçüleri.....	36
Şekil 3.10. C tipi dikiş geometrisi ve bindirme tipiyle hazırlanan numune ölçüleri.....	37
Şekil 3.11. C tipi dikiş geometrisi ve peel tipiyle hazırlanan numune ölçüleri.....	37
Şekil 3.12. C tipi dikiş geometrisi ve KS-II tipiyle hazırlanan numune ölçüleri.....	37
Şekil 3.13. C ve uzun C tipi dikiş geometrisi ve bindirme birleştirme tipiyle hazırlanan numuneler.....	38
Şekil 3.14. I ve S tipi dikiş geometrisi ve bindirme birleştirme tipiyle hazırlanan numuneler.....	38
Şekil 3.15. C ve uzun C tipi dikiş geometrisi ve peel birleştirme tipiyle hazırlanan numuneler.....	39
Şekil 3.16. I ve S tipi dikiş geometrisi ve peel birleştirme tipiyle hazırlanan numuneler.....	39
Şekil 3.17. C tipi dikiş geometrisi ve KS-II birleştirme tipiyle hazırlanan örnek numuneler.....	40
Şekil 3.18. I tipi ve uzun C tipi dikiş geometrisi ve KS-II birleştirme tipiyle hazırlanan örnek numuneler.....	40
Şekil 3.19. Kullanılan çekme cihazı.....	41
Şekil 3.20. KS-II birleştirme tipi çekme aparatları.....	42

Şekil 3.21. KS-II birleştirme tipi çekme açıları.....	42
Şekil 4.1. 1 numaralı numunenin makroyapısı.....	44
Şekil 4.2. 3 numaralı numunenin makroyapısı.....	45
Şekil 4.3. 5 numaralı numunenin makroyapısı.....	47
Şekil 4.4. 6 numaralı numunenin makroyapısı.....	47
Şekil 4.5. 7 numaralı numunenin makroyapısı.....	48
Şekil 4.6. 9 numaralı numunenin makroyapısı.....	49
Şekil 4.7. 10 numaralı numunenin makroyapısı.....	50
Şekil 4.8. 11 numaralı numunenin makroyapısı.....	51
Şekil 4.9. Bindirme tipinde birleştirilen numunelerin çekme grafikleri.....	53
Şekil 4.10. Bindirme tipinde birleştirilen numunelerin çekme testi sonrası görüntüleri..	53
Şekil 4.11. Peel tipinde birleştirilen numunelerin çekme grafikleri.....	54
Şekil 4.12. Peel tipinde birleştirilen numunelerin çekme testi sonrası görüntüleri.....	55
Şekil 4.13. KS-II tipinde birleştirilen numunelerin 30° çekme grafikleri.....	56
Şekil 4.14. KS-II tipinde birleştirilen numunelerin 60° çekme grafikleri.....	57
Şekil 4.15. KS-II tipinde birleştirilen numunelerin 90° çekme grafikleri.....	57
Şekil 4.16. KS-II tipinde birleştirilen numunelerin çekme testi sonrası görüntüleri.....	58

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Lazerlerin Kullanım Alanları.....	13
Çizelge 3.1. DX54D+Z malzemesinin kimyasal kompozisyonu.....	27
Çizelge 3.2. DX54D+Z malzemesinin mekanik özellikleri.....	27
Çizelge 3.3. Sabit 1350W lazer gücünde farklı kaynak hızlarının etkisi için parametre çizelgesi.....	31
Çizelge 3.4. Sabit 1500W lazer gücünde farklı kaynak hızlarının etkisi için parametre çizelgesi.....	31
Çizelge 3.5. Sabit 1800W lazer gücünde farklı kaynak hızlarının etkisi için parametre çizelgesi.....	32
Çizelge 3.6. Kullanılan farklı lazer dikiş formları.....	33
Çizelge 3.7. Kullanılan farklı birleştirme tipleri.....	34
Çizelge 4.1. 1350W sabit güç ve değişken kaynak hızlarında numune makroyapı görüntüleri.....	43
Çizelge 4.2. 1500W sabit güç ve değişken kaynak hızlarında numune makroyapı görüntüleri.....	45
Çizelge 4.3. 1800W sabit güç ve değişken kaynak hızlarında numune makroyapı görüntüleri.....	47
Çizelge 4.4. Bindirme birleştirme tipinde birleştirilen numunelerin çekme yükleri.....	52
Çizelge 4.5. Peel birleştirme tipinde birleştirilen numunelerin çekme yükü.....	54
Çizelge 4.6. KS-II birleştirme tipinde birleştirilen numunelerin çekme yükü.....	56

1.GİRİŞ

Lazer kaynağı; yüksek kaynak ilerleme hızı, düşük distorsiyon, derin nüfuziyet ve düşük toplam ısı girdisi özellikleri nedeniyle diğer klasik kaynak yöntemlerine göre daha üstün olup, birçok endüstri alanında kullanılmaktadır. Günümüzde otomotiv endüstrisinin en büyük hedefi araç ağırlıklarını hafifletme ve bunun yanı sıra üretim hızını da arttırmaktır. Bu hedefler doğrultusunda endüstride yeni malzeme, yeni üretim ve yeni birleştirme teknikleri kullanılmaktadır. Lazer kaynağı da otomotiv endüstrisi için yeni sayılabilecek birleştirme yöntemlerinden biridir ve kullanımı giderek artmaktadır.

Genel olarak bir otomobilde kullanılan birleştirme yöntemleri sıralanmak istendiğinde; ortalama 700 adet presli ya da kesilmiş parça, 400 adet talaş kaldırma işlemi görmüş parça, perçin, civata, lehimleme ya da yapıştırma teknikleri kullanılarak en çok da kaynak prosesi ile birleştirilmektedir. Bir araç kasası üzerinde; yaklaşık 5000 adet direnç punta kaynağı, 30 metre ark kaynağı, 1 metre elektron ışın kaynağı ve 15 adet de sürüntünme kaynağı bulunmaktadır (Öztürk ve ark. 2009). Son yıllarda lazer kaynak kullanımı da yaygınlaşmaya başlamıştır. Günümüzde bir araç kasası üzerinde yaklaşık olarak 70m uzunluğunda lazer kaynak kullanılmaktadır.

Lazer kaynağı özellikle otomotiv gövde uygulamalarında kullanılan geleneksel direnç nokta kaynağına alternatif bir yöntemdir. Düşük ısı girdisi ile dar kaynak bölgesi, düşük distorsiyon olasılığı, farklı metallerin birleştirilmesi, derin nüfuziyet ve yüksek dayanım kabiliyetinden dolayı büyük öneme sahip olan lazer teknolojisi otomotiv sektöründe tercih edilme sebeplerinden başlıcalarıdır.

Bu tez çalışmasının amacı, farklı dikiş formlarına sahip lazer kaynaklarının farklı birleştirme tiplerinde kullanılarak çekme mukavemeti yönünden kıyaslanmasıdır. Yapılan çalışmalarda; ilk olarak parametre çalışmaları yapılarak optimum kaynak parametreleri belirlenmiş daha sonra farklı dikiş geometrili lazer kaynaklar numunelere farklı birleştirme tiplerinde uygulanmış ve çekme mukavemetleri kıyaslanmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Günümüzde otomotiv endüstrisinde gerek otomobil ağırlık azaltma hedefleri gerekse üretimi hızlandırma hedefleri doğrultusunda yeni üretim yöntemleri ve yeni birleştirme yöntemleri üzerine araştırmalar, çalışmalar devam etmektedir.

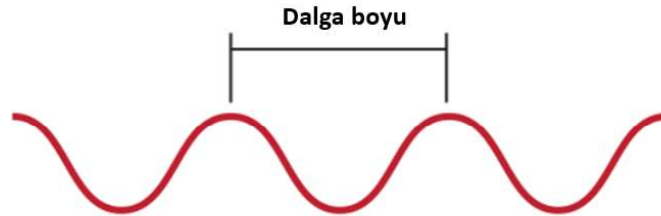
Bu kaynak araştırmasında, yapılan çalışmalara girdi olacak; lazer ışını, çalışma prensibi, lazer kaynağının teknik detayları, kullanım alanları ve parametreleri araştırılmıştır.

2.1. Lazer Işını, Tarihçesi, Oluşumu, Sistemleri ve Kullanım Alanları

2.1.1. Lazer Işını

İngilizcede laser kelimesi; “Light amplification by Stimulated Emission of Radiation” kelimelerinin baş harflerinden meydana gelmektedir. Türkçe’ye lazer olarak geçiş yapmış ve bu şekilde kullanılmaya devam edilmektedir. Işığın uyarılmış emisyonla yükseltgenmesi anlamına gelen bu terim, kısaca yoğunlaştırılmış ışık anlamına gelmektedir.

Işık dalgalar halinde hareket etmekte ve dalgaların tepe noktaları arasındaki mesafeye dalga boyu denmektedir. Farklı renklerdeki ışıklar farklı dalga boylarına sahiptirler. Örneğin güneş ışığı birçok farklı dalga boylarına sahip ışıkların karışımından meydana gelmektedir ve insan gözü bu dalga boyunu beyaz olarak görür.



Şekil 2.1. Dalga boyu gösterimi

Lazer ışını, yaklaşık olarak aynı dalga boylarına sahip ışıkların birleşmesiyle oluşur. Lazer alışılmadık bir ışık kaynağıdır. Bir ampul veya flaş ışığından oldukça farklıdır.

Lazer ışınları odaklanabildiğinden çok fazla mesafe kat edebilir ve küçük bir alana çok fazla enerji yoğunlaştırabilirler.



Şekil 2.2. Lazer ışını dalgaları

Sıcak beyaz ışık, sıradan bir ışık kaynağı tarafından üretilir ve odaklanmamış olarak ışıma gerçekleştirir. Bu ışık insanlar tarafından görülebilir ve birçok rengin birleşmesinden oluşur. Bunun yanında lazer cihazları; dar, yoğun ve tek renge sahip ışın üreten cihazlardır. Bunun için lazer cihazlarıyla üretilen ışınlar, bildiklerimizden oldukça farklı özelliklere sahiptirler(Gribbin, 2000).

Lazer ışınının önemli özellikleri aşağıdaki gibidir; (Güneş, 2012)

- Lazerlerde oluşan ışık aynalara dik doğrultuda olduğundan, ışınlar iyi derecede doğrultu özelliklerine sahiptirler.
- Işınlar, açısal bozukluk yaşamadan uzak mesafelere kadar yol alabilirler.
- Uyumlulukları oldukça yüksektir.
- Hedeflenen noktaya, enerji aynı frekans değerinde yayıldığı için çok yüksek yoğunlukta ulaşabilirler.
- Lazer tek dalga boyuna sahip bir ışıktır.

2.1.2. Lazer Işınının Tarihçesi

Lazerin gelişim süreci, bilim ve mühendislik için heyecan verici bir süreç olarak görülmüştür. Daha öncesinde kullanılmamış farklı alanlarda, farklı cihazların geliştirilmesine imkan sağlamıştır. 1917 yılı, Albert Einstein'ın çalışmaları ile lazer tarihinin başlangıcı sayılabilir. Teorik olarak uyarılmış ışınının temeli Einstein tarafından atılmıştır. Uyarılmış ışınım, lazerde kullanılan en temel kavramlardan biridir. Bu kavram, ışığın yükseltip, lazer ışığının elde edilmesine dayanır. Bu kavramın proses detayları Einstein tarafından açıklanmıştır(Öner, 2007).

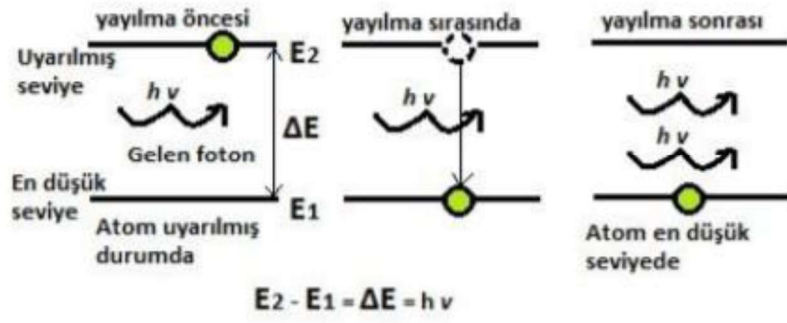
Lazer, ilk olarak 1958 yılında C.H. Townes ve A.L. Schawlow tarafından yayınlanan “Infrared and Optical Masers” isimli yayında maser adıyla tarif edilmiştir. Maser, atomların, dışarıdan uyarılması adımıyla dışarıya verilen radyasyon etkisi ile elde edilen, genliği artırılmış bir elektromanyetik dalgadır. İlk oluşturulan maser mikrodalga frekansında çalışmıştır. Bu nedenle maser kelimesi İngilizce “Microvawe Amplification by Stimulated Emission of Radiation” cümlesindeki kelimelerin baş harflerinden alınarak oluşturulmuştur. Maser; çok çeşitli, tutarlı ve tek renk ışıkların elde edilmesi için oluşturulan optik düzeneklerdir. Bu düzenekler optik frekanslarda çalışırsa optik maser veya lazer olarak isimlendirilir (Schawlow ve ark. 1958).

İlerleyen yıllarda, yüksek şiddet ihtiyacı olmayan ilk gaz lazeri sayılan helyum-neon lazeri (Szöke ve ark. 1963); iletişim alanında yaygın bir şekilde kullanılan ilk yarı iletken lazer(Hall, 1962); endüstriyel işlemlerde (kesme, delme, kaynak gibi) yaygın olarak kullanılan kızıl ötesi ışımaya oluşturan CO₂ lazeri(Patel,1964) ve sayılan endüstriyel işlemlere ek olarak cerrahi uygulamalar ve askeri alanlarda da kullanılan Nd:YAG lazeri (Geusic ve ark. 1964) üretimi gerçekleştirilmiştir. Boya lazeri(organik)(Sorokin ve ark. 1966), excimer lazeri(soy gazlı)(Basov ve ark. 1970), serbest elektron lazeri(Deacon ve ark. 1977) gibi farklı türlerde ve farklı dalgaboylarına sahip lazer çeşitlerinin üretilmesi, endüstri, sağlık ve askeri alanlarda yeni teknolojilerin geliştirilmesine yol açmıştır. İlk X ışını lazeri 1985 yılında üretilmiştir. Bu lazer; kazanç ortamı olarak üretilen plazma ortamının kullanıldığı ve elektromanyetik tayfın x-ışını bölgesinde demet ürettiği ilk lazerdir (Matthews ve ark. 1985).

İlerleyen yıllar boyunca lazer üzerindeki çalışmalar devam etmiş ve lazer pek çok alanda denenmeye ve kullanılmaya başlanmıştır.

2.1.3. Lazer Işını Oluşumu

Genel olarak lazer ışınlarının oluşumu, uyarılmış ışınım ile ışığın yükseltilmesi ilkesine dayanır. Doğada bulunmayan lazer ışığı, fotonların madde ile etkileşimi sonucunda oluşmaktadır. Bu etkileşimler soğurulma, kendiliğinden ışımaya ve etki ile ışımaya olmak üzere üç adımdan oluşmaktadır (Dinç ve ark. 2014).



Şekil 2.3. Uyarılma sonrasında atomun foton yayarak bir alt enerji seviyesine geçişi
(Dinç ve ark. 2014)

Uyarılma sonrasında bir atomun bir alt enerji seviyesine foton yayarak iki farklı şekilde geçebileceği Einstein'ın ışık yayınımı teorisinde anlatılmıştır. Bu iki durumdan ilki atomun kendiliğinden emisyon prensibiyle (dışarı kaynaklı herhangi bir etki olmadan) bir alt enerji seviyesine geçmesidir. İkinci durum ise atomun uygun frekansa sahip elektromanyetik ışının etkisiyle yani uyarılmış emisyon ile bir alt enerji seviyesine geçmesidir. İkinci durum yani bir dış kaynağın etkisiyle gerçekleşen uyarılmış emisyon prensibi lazer üretiminin temelini oluşturmaktadır(Çelen, 2006).

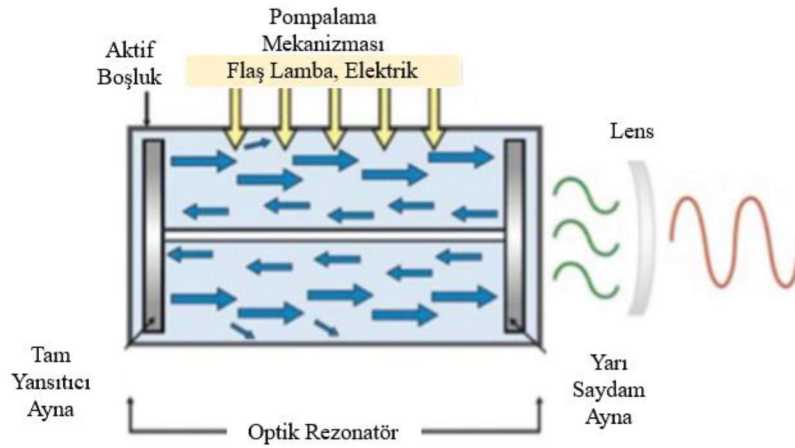
Bir atomun foton etkisiyle ışımaya yapması, uyarılmış emisyondur. Uyarılan atomlar kendiliğinden ışımaya esnasında çok kısa bir süre için bir alt enerji seviyesine uğrarlar. Bu enerji seviyesine yarı kararlı enerji seviyesi denmektedir(Çelen, 2006).

Kendiliğinden emisyon, yüksek enerji seviyesinde bulunan atomun, kendiliğinden foton yayarak bir alt enerji seviyesine inmesi durumudur. Soğurma durumu; düşük enerji seviyesindeki atomun foton absorbe ederek üst enerji seviyesine geçmesidir. Uyarılarak ışımaya prensibi ise, yüksek enerji seviyesinde bulunan atomun ortam içerisindeki fotonların etkisiyle alt enerji seviyesine geçmesi durumudur. Atomu etkileyen foton, alt enerji ve üst enerji seviyesi arasında bulunan enerji farkı kadar enerjiye sahiptir. Bu nedenle elektron aynı dalga boyuna sahip bir foton yayarak ve iki foton atomdan ayrılır. Bu şekilde ışığın güçlenmesiyle lazer ışını meydana gelir(Sırav, 2012).

2.1.4. Lazer Sisteminin Temel Elemanları

Lazer ışığı aşağıdaki dört temel eleman aracılığıyla elde edilmektedir. Bunlar: (Convissar, 2016)

- 1- Aktif Ortam
- 2- Uyarma Mekanizması (Pompalama Mekanizması)
- 3- Mükemmel Yansıtıcı Ayna
- 4- Yarı Saydam Ayna' dır.



Şekil 2.4. Lazer Cihazının Temel Elemanları (Convissar, 2016)

Aktif ortam; bir dış etki vasıtasıyla elektronları üst enerji düzeyine geçirebilecek olan atomlardan oluşur. Bu ortamı oluşturma amacıyla argon, CO₂ benzeri gazlar, erbiyum ve yakut gibi katı kristaller veya yarı iletkenler kullanılabilir. Aktif ortam için enerji üretmek amacıyla uyarma mekanizması kullanılır. Bu yapı kullanılan kimyasal, optik ya da elektriksel elemanlardan oluşur. Sistem içerisindeki tam yansıtıcı ve yarı saydam aynalar optik rezonatörler olarak isimlendirilmektedir. Tam yansıtıcı ayna, üzerine düşen lazer ışığının tamamını yansıtır, yarı saydam ayna ise üzerine düşen lazer ışığının sadece bir kısmının içinden geçmesine olanak sağlar. Tüm bu elemanlar Şekil 2.4'te verildiği gibi lazer cihazının içerisinde bulunmaktadır.(Convissar, 2016).

Atomların uyarılması için gerekli olan enerji, enerji kaynağı tarafından sağlanmaktadır. Bu enerji; elektrik pompalama veya optik pompalama prensibi ile lazer aktif ortamının elektrik enerjisi yada ışımaya atomların üst enerji düzeyine çıkarılması ile oluşmaktadır.

Lazer aktif ortamı lazer ışınının oluşumu için gerekli maddeler bulundurmaktadır. Bu maddeler katı kristal olarak Nb, Yb, gaz olarak Nd:YAG veya sıvı olarak ise CO₂ olabilmektedirler. Kullanılacak lazer çeşidine göre lazer aktif ortamı farklılık göstermektedir. Bir diğer ismi yansıtıcı ayna olan rezonatörler, oluşan lazer ışınlarından bir kısmını lazer aktif maddesine geri yansıtırlar ve devamlı ışık demeti oluşturup bu ışınların belirli eksen boyunca paralel olarak yayılmasını sağlarlar. Rezonatörler, farklı tür iki aynadan oluşmaktadırlar. Biri lazer aktif maddenin arkasında bulunur ve üzerine gelen ışınları yansıtır, diğeri ise aktif maddenin ön kısmında bulunur ve kısmi geçirgenliğe sahiptir(Kannatey 2009).

2.1.5. Lazer Sistemleri

Lazer aktif ortam maddesi katı, sıvı, gaz veya yarı iletken olabilir. Bu aktif maddelerin uyarılması işlemiyle lazer ışını meydana gelir. Katı, sıvı, gaz ve yarı iletken oluşan lazer aktif ortamına göre ışın; mavi, kırmızı, yeşil, kızılötesi veya morötesi gibi farklı renkleri barındırır(Özden, 2008).

Kaynak araştırmasında sırasıyla katı hal lazerleri, Nd:YAG lazer sistemi, Nd:CAM lazer sistemi, ruby(yakut) lazer sistemi, sıvı lazerler, gaz lazerleri ve yarı iletken lazerler incelenmiş ve özellikleri paylaşılmıştır.

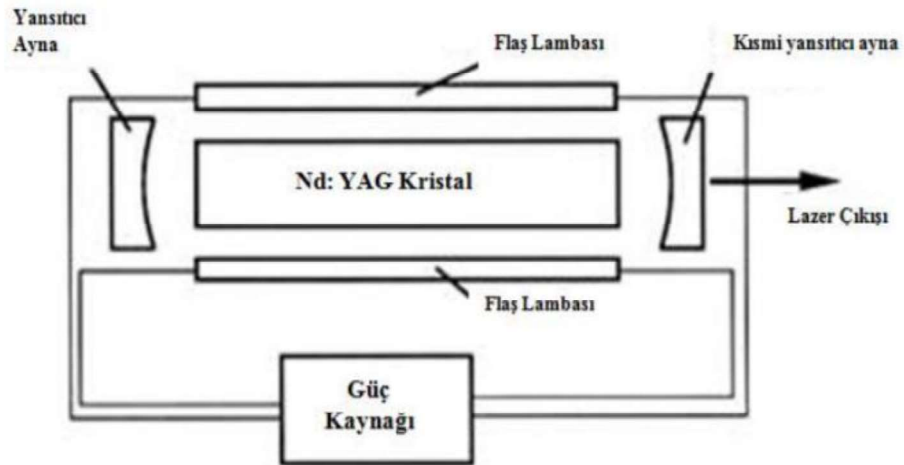
Katı hal lazer malzemelerinin önemli iki çeşidi vardır. Bunlar: (Çelen, 2006)

- 1)Kristal katı hal lazer malzemeleri (Nd:YAG vb.)
- 2)İzotropik katı hal lazer malzemeleri (Cam vb.)

Lazerin özellikleri aktif madde içerisinde bulunan elementin atomlarının ve aktif madde çevresindeki elemanların özellikleriyle ilişkilidir. Nd:YAG lazerlerinde, lazer geçirgenliği oldukça dardır(300 K'de yaklaşık 5 Angstrom) ve bu lazerler 1,064 µm dalga boyundadırlar. Örnek olarak, Nd:CAM ve Nd:YAG lazerlerinde aktif madde olarak neodyum kullanılır. Nd:YAG lazerlerinde kristal kafes içerisindeki her atom simetriktir ve iyi bir dizilim içindedir. Nd:CAM lazerlerinde ise atom amorf yapıdadır, düzensizdir. Sonuç olarak, lazer geçirgenliği Nd:YAG lazerlerinden daha geniştir

(300 K'de yaklaşık 300 Angstrom) ve dalga boyu 1,062 μm (silikat cam) -1,054 μm (fosfat cam) arasındadır(Çelen, 2006).

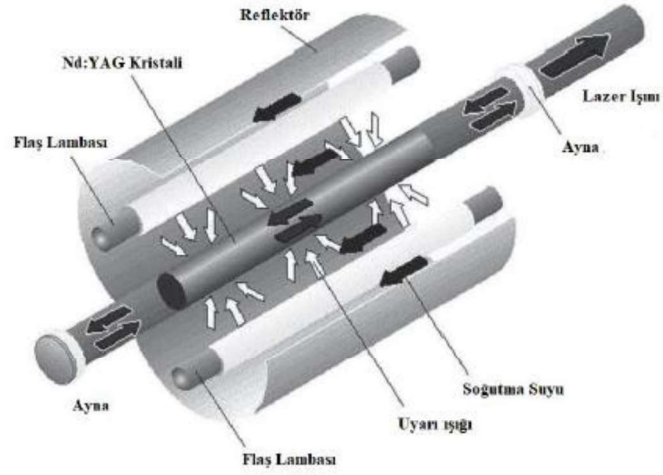
Katı hal lazerlerinde, aktif ortamın etrafına sarılan veya paralel olacak şekilde yerleştirilen flaş tüpü bulunur. Bu tüp vasıtasıyla aktif madde uyarılır,(Şekil 2.5). Bu sistemin uyarılması mor ve yeşil ışıkla gerçekleştirilir ve sistem kırmızı renkte ışın yayar. Aktif madde olarak kullanılan neodyum iyonları bulunduran cam vasıtasıyla lazer ışını üretilir. Endüstride YAG lazeri olarak bilinen Nd-YAG lazerlerinde aktif madde, yttrium-alüminyum granülat (YAG) ve neodyum iyonlarına sahip yapay bir kristalden oluşur. Nd-YAG lazer ışınının dalga boyu kısadır ve metaller tarafından iyi soğurulmaktadır(Arcan, 2011).



Şekil 2.5. Nd:YAG lazer sistemi şematik gösterimi(Arcan, 2011)

Günümüzde kaynak uygulamalarında kullanılan Nd:YAG lazerlerinin çıkış güçleri ortalama 0,3-3 kW aralığındadır, fakat lazer teknolojisi ile ilgili yapılan geliştirmelerle elde edilebilen maksimum güç 4 kW'a kadar çıkabilmektedir.

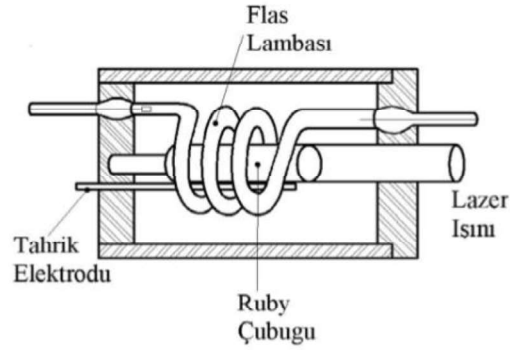
Nd:YAG lazer sisteminin temel elemanları Şekil 2.6'te gösterilmektedir.



Şekil 2.6. Nd:YAG lazer sisteminin elemanları (Katayama, 2013)

Lazer aktif madde olarak içerisinde neodyum (Nd^{+3}) aktif elementi depolanan cam kullanılmaktadır. Optik özellikleri oldukça iyidir fakat ısıl iletkenliği düşüktür. Darbeli yada Q anahtarlamalı olarak tasarlanabilir. Bu sistemde kullanılan lazer çubuğu Nd:YAG sisteminde kullanılan lazer çubuklarına göre oldukça uzundur. Uyarma mekanizması, rezonans boşluk geometrisi gibi özellikleri bakımından Nd:YAG lazer sistemi ile benzerdir. Ancak aktif madde çevresinde kullanılan flaş lamba adeti daha yüksektir(Çelen, 2006).

En eski lazer olarak bilinen yakut lazer, Ted Maimon tarafından bulunmuştur. Corundum(Al_2O_3), yakut lazerlerinin ana maddesi olup, krom ile desteklenmektedir. Yakut lazer tarafından üretilen ışının dalga boyu 694.3 nm'dir. Bu lazer sistemi ilk bulunduğu zamanlarda tek darbeleri(ruby lazerler) prensibi kullanılmaktaydı. Daha sonra devamlı dalga prensibinin geliştirilmesiyle sürekli çalışılabilir hale getirildiler. Devamlı dalga prensibiyle çalışan lazerler, temel yöntemden uzaklaşmamış ama kullanım zorluğu olan lazerlerdir(Arslan, 2017).



Şekil 2.7. Ruby(yakut) lazer sistemi elemanları (Çelen,2006)

Yüksek güçle çalışma esnasında katı lazerlerde aktif ortam içinde oluşan veya uyarma mekanizmasından kaynaklanan yüksek ısının etkisiyle bazı zamanlar kırılmalar veya hasarlar ortaya çıkabilmektedir. Sıvı lazerlerde, uyarma mekanizması olarak kristal veya cam çubuk yerine saydam bölüm içine konulmuş bir sıvı kullanılır. Bu sıvı; neodyum oksit veya neodyum klorürün selenyum oksiklorürdeki eriyiği olabilir. Sıvının konulduğu bölüm istenen kadar büyük yapılabilmektedir. Böylece yüksek güçler elde edilebilir(Tunç 2015).

Gaz fazındaki pek çok elementten lazer ışını elde edilebilir. Ek olarak pek çok moleküler gaz da lazer ışınının elde edilmesinde kullanılabilir. Gaz lazerlerinde, aktif madde içerisinde düşük basınçlı gaz bulunmaktadır(Arcan, 2011).

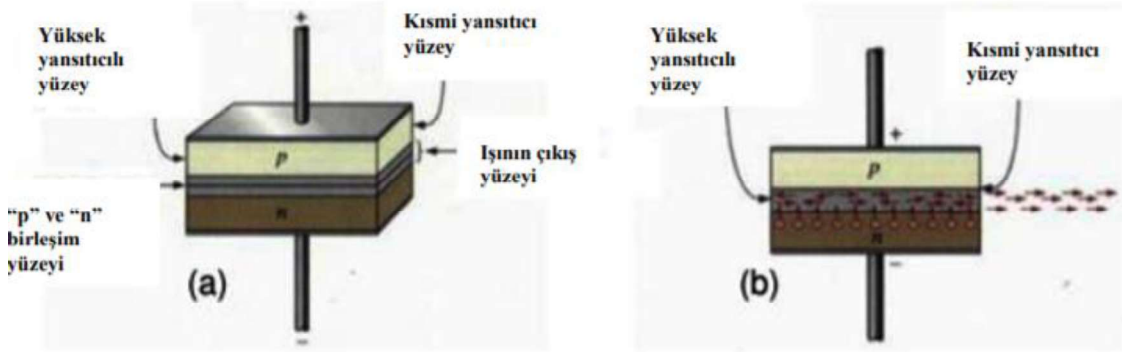


Şekil 2.8. Gaz lazeri şematik gösterimi (Arcan, 2011)

Helyum-Neon lazerleri, gaz lazerleri içerisinde en çok kullanılan lazerlerdendir. Bu lazerler miliwatt seviyesinde düşük güce sahiptirler. Aktif ortam içerisinde iyonlaştırılmış gaz kullanılan lazerlere iyon lazerleri denmektedir. Argon lazeri de yaygın kullanılan gaz lazerlerinden biridir. Argon lazerleriyle fazla sayıda renk tayfi elde etmek mümkün olmaktadır. Karbondioksit lazerlerinde aktif ortam maddesi bir karışımdan oluşur. Bu karışım, kardondioksit, azot ve helyum gazlarını içerir. CO₂ lazerlerinde uyarım azot moleküllerinden karbondioksit moleküllerine doğrudur. Bu lazerler yüksek verime sahip lazerlerdendir(Çelik, 1998).

CO₂ lazerleri için sayılabilecek en büyük dezavantaj; birbirine kaynatılacak malzemelerin yansıtma özelliği olması durumunda kaynak esnasında malzemeler üzerine gelecek lazer ışını yansıtacağından kaynağın doğru gerçekleşmemesine neden olabilmektedir.

Yarı iletken lazerlerde, iki farklı çeşitten yarı iletken madde düz bir birleşim yüzeyi içerecek şekilde yanyana konumlandırılmışlardır. Bu şekilde oluşturulan yapıya, yüksek bir elektrik akımı verilmesi durumunda, birleşme bölgesinde lazer ışığı meydana gelir. Bu lazerler, sınırlı çıkış gücüne sahip olması, düşük maliyetli olması, ufak boyutta olmaları ve verimlerinin yüksek olması nedenleriyle telefon, televizyon gibi iletişim aletlerinde ve uzaklık ölçme cihazlarında kullanılmaktadırlar(Öner 2007).



Şekil 2.9. Yarı iletken lazer şematik gösterimi(Öner, 2007)

Yarı iletken lazerler, pozitif (p) ve negatif (n) tipindeki iki farklı yarı iletkenin birleştirilmesiyle oluşmaktadır. Pozitif ve negatif yarı iletkenlerin birleşme yüzeyi yakut lazerdeki ayna görevini yapar. Birleşme yüzeyinde, "p" tarafına pozitif voltaj, "n" tarafına negatif voltaj verilirse, elektronlar "n" yarı iletkeninden "p" yarı iletkenine geçerler ve bu geçiş esnasında enerji kaybederek foton yayarlar. Yayılan fotonlar

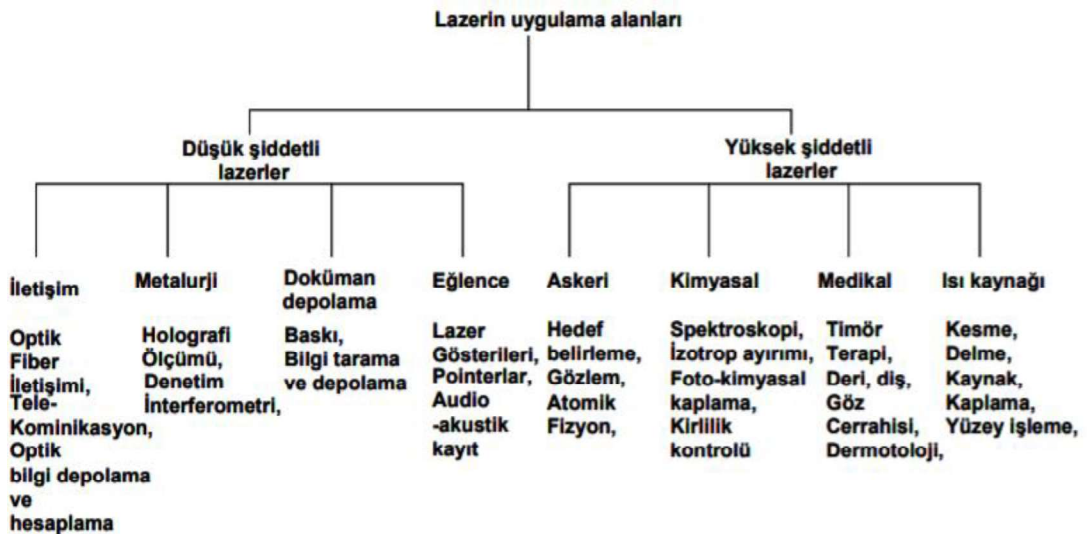
elektronlara çarpıp daha fazla foton üretimine neden olur. Sonuç olarak yeterli derece olan foton yayılımıyla lazer ışını meydana gelmiş olur(Arcan, 2011).

2.1.6. Lazer Işını Kullanım Alanları

Lazer ışını; yönlendirilebilir, uyumluluğu ve yoğunluğu yüksek olduğundan dolayı diğer ışık kaynaklarından oldukça farklıdır. İlk üretilen yakut lazerleri sonrasında günbegün lazer çeşitleri ve bunların kullanım alanları artmaktadır(Palais, 1992).

Çizelge 2.1’de lazerlerin kullanım alanları gösterilmektedir. Yine bu çizelgeye göre lazerlerin iletişim, metalurji, medikal, sanayi gibi pekçok endüstride ve bu endüstrilerdeki farklı proseslerde kullanımı bulunmaktadır.

Çizelge 2.1. Lazerlerin Kullanım Alanları (Majumdar ve ark. 2003)



Lazer kaynak prosesinde kullanılan yüksek lazer gücü ve kaynak hızı, kaynak havuzunda metaryallerin ergiyerek düşük bir ısı girdisiyle yapının homojen bir şekilde birleşmesine katkı sağlamaktadır. Düşük ısı girdisi, kaynaklanacak iş parçalarındaki çarpılmaları ve proses sonrası ekstra işlemleri en aza indirmektedir. Bu gibi avantajlarından dolayı lazer kaynak prosesi otomotiv gövde parçalarının kaynağında kullanılabilir potansiyel bir yöntemdir(Nayak ve ark. 2015, Yuce ve ark. 2016).

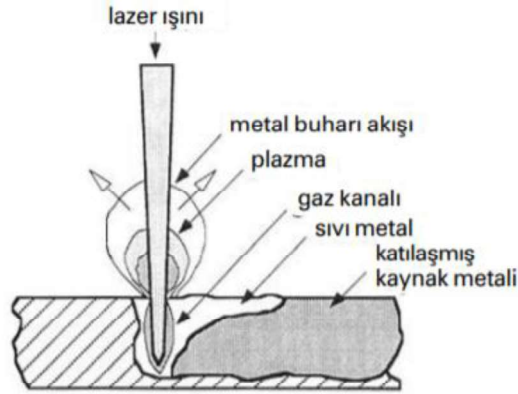
2.2. Lazer Kaynağı

Lazer kaynak; otomotiv, elektronik, kalıpcılık, beyaz eşya ve bunlara benzeyen yüksek adetli üretim yapan farklı sektörlerde giderek yaygınlaşan, hedeflenen noktaya çok yüksek enerjiyi odaklayabilen bir birleştirme yöntemidir(Püskülcü ve ark. 2009).

Lazer sistemiyle oluşturulan lazer ışını, sistem içerisinde bulunan aynalar yardımıyla yönlendirilerek yoğunlaştırılmış bir halde malzemenin üzerine ulaşır. Kaynaklanmak istenen malzeme, bölgesel olarak ertirilip, kaynak prosesinin gerçekleşmesi sağlanır(Karaaslan ve ark. 2001).

Lazer kaynak işleminde iş parçasına enerji gönderimi, yüksek enerji yoğunluğuna sahip ışının, rezanotörler ve fiber optik kablolar kullanılarak malzeme üzerine odaklanmasıyla gerçekleştirilir. Malzeme yüzeyine odaklanmış olan yüksek enerji yoğunluğuna sahip ışınlar malzemeyi ertirerek, çok ince bir buhar yapısı üretimine neden olur. Lazer ışını ilerledikçe ertiyen metal açılan kanal boyunca akarak kaynak prosesi gerçekleştirilir(Çam ve ark. 1998).

Şekil 2.10'de lazer kaynak prosesi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Lazer Kaynağının Şematik Gösterimi(Çam ve ark. 1998)

Lazer kaynak işlemi endüstriyel alanlarda kullanımı yaygınlaşmaya başlayan birleştirme yöntemlerinden biridir. Bu işlem ile çelik, alüminyum, titanyum, bakır, krom gibi farklı malzemeler birleştirilebilir(Abbot ve ark. 1994).

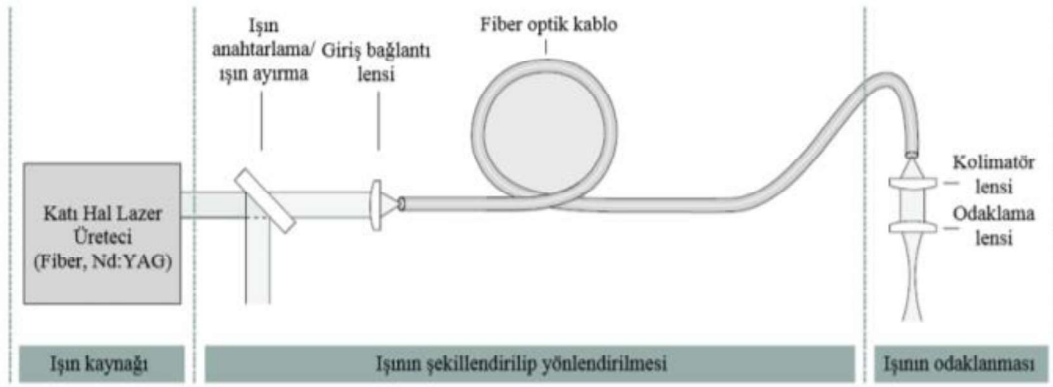
2.2.1. Lazer Kaynağının Temel Elemanları ve Çalışma Prensibi

Lazer kaynak işlemi, proses esnasında kullanılan lazerin cinsine göre sınıflandırılabilir. Örneğin; katı hal lazerlerinde Nd:YAG ve fiber diyot lazerler, gaz lazerlerinde de CO₂ lazerleri kullanılır. Kullanılan lazer türüne göre lazer kaynak prosesi lazerin ismini alır. Örnek olarak; CO₂ lazer kaynağı, Nd:YAG lazer kaynağı gibi.

Nd: YAG lazer kaynak prosesinde lazer çubuğu olarak, itriyum–alüminyum–granattan (YAG) oluşturulan sentetik bir kristal kullanılır. Kullanılan bu kristal, kararlı, fiziki olarak sert,optik olarak izotropik bir yapıdadır ve yüksek termal iletkenliğe sahiptir. Neodyum, lazer üretimi için kullanılan diğer malzemelerden daha yüksek düzeyde pik gücü üretimi sağlar. Termal iletkenlik beklentisinin ve kristalin kalitesinin sağlanabilmesi için lazer çubukları ortalama 15 milimetre (mm) çapı ve 200 mm uzunluğuyla sınırlıdır(Tekin, 2019). Nd:YAG lazer kaynak prosesi darbeli ve sürekli modda yeteneğine sahiptir. Darbeli modda çalışan Nd: YAG lazer sistemi vasıtasıyla kaynak, kaynak havuzunun belirli aralıklarla ısıtılması ve devamlı oluşan erime ve katılaşma etaplarının gerçekleşmesine izin veren maksimum güç yoğunluğunda darbeli bir lazer ışını ile diğerlerinden kaynak çeşitlerinden ayırt edilir(Afonso ve ark. 2010, Meng ve ark. 2015). Yüksek maksimum darbe gücü ve düşük ortalama güç özelliklerine sahip darbeli Nd:YAG lazer kaynak prosesi, dar ITAB oluşumu ve kalıntı gerilmelerin düşük olması nedeniyle avantajlı bir prosestir(Sun ve ark. 2016). Darbeli Nd: YAG lazer kaynak işlemi, yüksek verimlilik, darbe süresi ve darbe frekansı gibi parametrelerin kontrol edilebilmesi sebebiyle de diğer lazer kaynak çeşitleri arasında dikkat çekicidir. Nd:YAG lazer kaynak işleminde önemli proses parametreleri; darbe gücü(kW), darbe süresi(ms), darbe enerjisi(joule), ışın çapı(mm), frekans(hz) ve kaynak hızıdır(mm/sn) (Sivagurumanikandan ve ark. 2018).

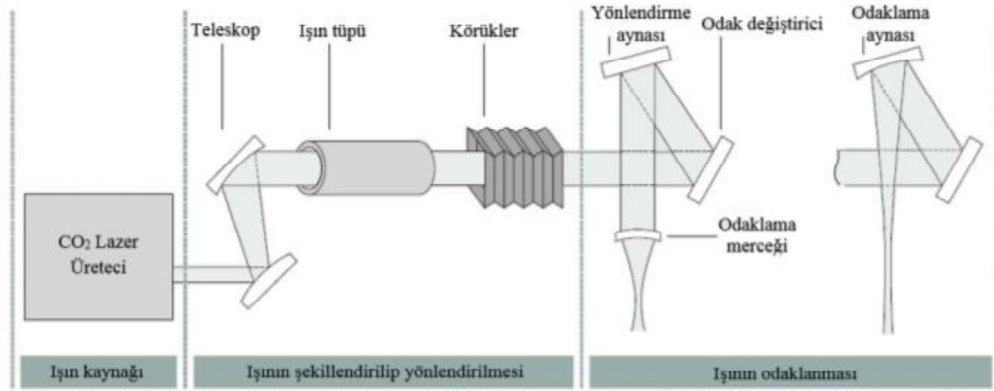
Fiber optik lazer kaynak prosesi, oldukça küçük iş parçalarının birleştirilmesinde kullanılan en uygun kaynak yöntemlerinden biridir. Bu proseste düşük güç girdisi ile yüksek ışın kalitesi elde edilebilmektedir. Yüksek kalitede ve devamlı odaklanmış ışık, oldukça küçük bir alanda malzemenin ergimesini sağlayarak özellikle ince malzemelerin (örneğin; paslanmaz çelik) iyi kalitede nokta kaynağının yapılmasına imkan sağlar(You

ve ark, 2013). Fiber optik lazer prosesinde kaynak malzemesi olarak genellikle 3 ila 9 metre uzunluğa sahip ve 9 ila 50 mikron çapında cam elyaf katkılı malzemelerdir. Kaynak elementi olarak çoğunlukla iterbiyum kullanılır. Bunun nedeni yaklaşık 1 μm dalga boyuna sahip olabilmesi ve yüksek çevrim verimliliğinde çalışabilmesidir(Hull ve ark. 2011).



Şekil 2.11. Katı hal lazer sistemi (Buchfink, 2007)

Lazer ışını, belirlenen bir ortam içerisinde oluşturulur ve aynalar yardımıyla yönlendirilir. Yönlendirilen ışın, odaklama mekanizmasına ulaşmasının ardından çok ufak bir alana yoğunlaşır. Bu yoğunlaşma sayesinde ilgili bölgede ergime ve buharlaşma meydana gelir. Lazer tarafından üretilmiş olan enerji, buharlaşma sıcaklığında malzeme tarafından soğurulmaya devam eder. Buharlaşma sonrasında malzeme ve koruyucu gaz karışımının(atmosferdeki gaz) yoğunlaşmasıyla plazma oluşur ve yüksek soğurma özelliği bulunan plazmanın oluşturduğu ısı malzemeden iş parçasına iletilir. Ergiyen malzemedeki oluşan sıcaklık ile basınç farkları, akıcı faza sahip buhar kanalı oluşumuna neden olur. Ergiyen malzeme, oluşan bu buhar kanalından devamlı akış sağlar ve ısınan buharın oluşturduğu yüksek basınçla iş parçasının yüzeyine çıkar. Yüzey gerilmesi, çekim kuvveti ve viskozitenin etkisiyle yapıdaki genleşmeler engellenir. Bu durumda iş parçasındaki kaynak dikişi, oldukça dar ve homojen bir yapıya sahip olur. Lazer prosesinde ısı kaynağının enerjisi yüksek olur ise, oluşan kaynak dikişindeki ITAB'ın boyutu oldukça dar olur(Karaaslan ve ark. 2001).



Şekil 2.12. CO₂ lazer sistemi (Buchfink, 2007)

2.2.2. Lazer Kaynak Yöntemleri

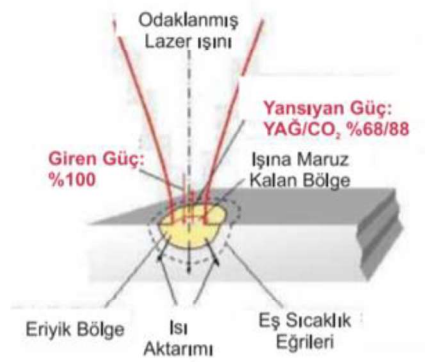
Lazer kaynak yöntemi kullanılan lazer ışınının enerji yoğunluğuna göre değişebilmektedir. İki farklı kaynak yöntemi vardır. Düşük kalınlıktaki malzemelerin kaynatılmasında iletimle kaynak, kalın malzemelerin kaynatılmasında ise nüfuziyet kaynağı(anahtar deliği) kullanılır(Duley, 1999).

İki yöntem arasındaki en büyük fark kaynak esnasında oluşan kaynak havuzunun iletim kaynağında sürekli olmasıdır. Nüfuziyet kaynağında sıvı metal havuzu lazer ışını vasıtasıyla ikiye ayrılır. Bu ayırma sonrası oluşan çukur yapı anahtar deliğine benzediğinden, bu kaynak yöntemine anahtar deliği kaynağı da denilebilmektedir. İletim kaynağı, lazer ışını parça içerisine tam olarak işlemediğinden daha yüzeysel bir kaynak yöntemidir. Nüfuziyet kaynak yönteminde ise parça tamamen eritildiğinden kaynak bölgeleri gözenekli olabilir. Bu durumun engellenmesi için koruyucu gaz kullanılabilir. (Abbott ve ark., 1994).

Lazer iletim kaynak yönteminde, ilk olarak lazer ışınları malzeme tarafından emilir ve sonrasında malzemeye sabit bir kuvvet uygulanmasıyla kaynak prosesi gerçekleştirilir. Lazer ışınlarının malzeme tarafından emilmesiyle oluşan ısı ve radyasyon, konveksiyon ile yayılıma geçmeden önce iletim ile iş parçasının et kalınlığı boyunca yayılma gerçekleştirir. Lazer ışınlarının emilmesiyle iş parçasında erime gerçekleşir ve ışınların malzemeden ayrılmasıyla da iş parçası soğuyarak katılaşır. Bu kaynak yönteminde de nüfuziyet kaynağında olduğu gibi yüksek seviyede en/boy oranı elde edilemez. Bu

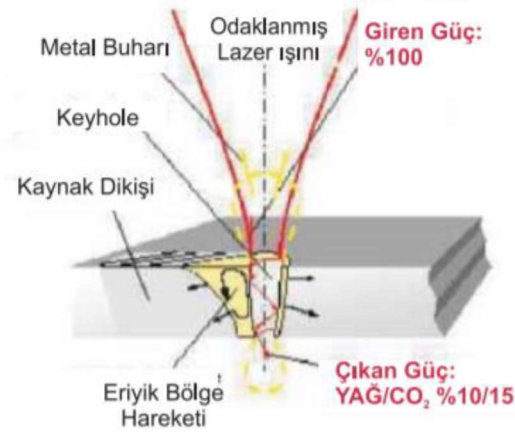
yöntem genellikle düşük lazer gücü ile iş parçasının buharlaşmadan yalnızca ergitildiği prosesler için kullanılır(Karaağaçlı, 2019).

Lazer iletim kaynağında, Şekil 2.13'te gösterildiği gibi düşük enerji yoğunluğuyla, derin olmayan ve geniş bir kaynak dikişi oluşur. Bu kaynağın en büyük avantajı oldukça estetik ve pürüzsüz olmasıdır.



Şekil 2.13. Lazer iletim kaynağı

Nüfuziyet kaynak yönteminde lazer ışınının birleştirilecek iş parçalarını delerek geçmesi hedeflenmektedir. Bu yöntemde çok yüksek güç ve yoğunlukta lazer ışını kullanıldığından, iş parçası aniden buharlaşır ve kaynak bölgesinde “keyhole” olarak da adlandırılan delik oluşur(Ion, 2005). Delik oluşumu ile delik içerisinden buharlaşan malzemenin oluşturduğu plazma vasıtasıyla lazer ışını emilir ve delik etrafına iletilerek, duvar malzemesinin de ergimesi sağlanır. Bu esnada lazer ışını da iş parçası üzerinde hareket ettirilir ve hareket yönüne doğru ergiyen malzeme deliğin çevresinden dolaşarak, karşıp soğuma sağlanır. Bu soğuma ile iki parçasının birbirine birleşmesi sağlanır. Bu lazer kaynak yöntemi ile kullanılacak lazer gücü ve ışının özelliklerine göre 50mm kalınlığa kadar çelik malzemeler kaynatılabilmektedir(Jokinen, 2004).



Şekil 2.14. Lazer nüfuziyet kaynağı (Püskülcü ve ark. 2009)

Lazer nüfuziyet kaynak yönteminde, derin nüfuziyet, dar kaynak bölgesi oluşumu ve kaynak prosesi öncesinde ekstra bir hazırlık ya da ilave dolgu malzemesi gereksinimi olamamasından ötürü otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır(Nayak ve ark. 2015, Yuce ve ark. 2016).

2.2.3. Lazer Kaynağının Kullanım Alanları

Lazer kaynak yöntemi, otomotiv endüstrisi ve beyaz eşya sektöründe sac parçaların, elektronik ürünler ve donanımların birleştirilmesinde, savunma, havacılık ve denizcilik endüstrilerinde kullanılmaktadır. Özellikle sanayide yüksek üretim adetine sahip ürünlerdeki direnç nokta kaynağı yerine kullanımının hafiflik ve maliyet açısından avantajları bulunmaktadır(Tekin, 2019).

Otomotiv endüstrisinde CO₂ ve fiber lazer çeşitleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Lazer kaynak yöntemi temassız bir proses olduğundan dolayı kolay kontrol edilen otomasyon teknikleri sunmaktadır. Bu da bu yöntemin seri üretim ağırlıklı olan otomotiv endüstrisinde kullanımını artırmaktadır. Bunun yanında, seri üretime başlamadan evvel, kaynak ile sinterleme prosesi işletilerek üç boyutlu prototipleme imkanı sunmaktadır. Yüksek enerjinin küçük bir alana uygulanabilmesi ve bu sayede ısıdan etkilenen bölgenin minimuma indirilmesi lazer kaynak yöntemini geleneksel diğer kaynak yöntemlerinden(elektron ışın kaynağı) ayırmaktadır. Otomobillerin ana iskelet yapısında, frenlerde, şanzıman gibi elemanlarda ve alüminyum kapı içi parçalarda günbegün lazer

kaynak, kullanılan diğerkonvansiyonel kaynak türlerinin yerini almaktadır(Aydın ve ark. 2014).

2.2.4. Lazer Kaynağının Avantaj ve Dezavantajları

Her prosesin olduğu gibi lazer kaynak prosesinin de avantajlarının yanında bazı dezavantajları bulunmaktadır. Lazer kaynak yönteminin diğerkaynak yöntemlerine göre avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Yüksek proses hızları dolayısıyla seri üretime yatkın olması,
- Farklı türden malzemelerin kaynatılabilmesi imkanı,
- Kaynak prosesi esnasında ısıdan etkilenen bölgenin(ITAB) dar olması ve bu nedenle kaynatılan iş parçalarında çarpılmaların daha az olması,
- Elektrot ya da herhangi bir dolgu malzemesi kullanılmasına gerek olmadığından kirliliğin az olması,
- Lazer ışınları manyetik ortamdan etkilenererek zarar görmemesi,
- Oda sıcaklığında çalışabilmesi,
- Küçük kaynak genişliği sebebiyle estetik olması,
- Yüksek derinlik/genişlik oranına sahip olması,
- Temassız bir şekilde kaynak işlemi gerçekleştirilebildiğinden konvansiyonel kaynak yöntemleri ile ulaşılması zor olan bölgelerde de kaynak yapılma imkanının olması.

Lazer kaynağının sayılan bazı avantajlarının yanında bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- İlk yatırım maliyetlerinin yüksek olması,
- Kullanılan lazer ışınının canlı teması sonrasında sağlık sorunlarının yaşanabilmesi, iş güvenliği problemlerinin oluşabilmesi,
- Yüzeyleri yüksek derecede yansıtma özelliğine sahip olan malzemelerde doğru kaynak prosesi için ekstra işlemlere gereksinim olması,
- Sert/sertleştirilebilir malzemelerin kaynak işlemleri sonrası oldukça sert kaynak dikişinin meydana gelmesi.

2.2.5. Lazer Kaynak Kalitesini Etkileyen Parametreler

Lazer kaynak prosesinde kaynak kalitesini etkileyen faktörler kaynaklanacak malzeme özellikleri ve kaynak parametreleri olarak iki grupta incelenebilir. Kaynak parametrelerinde ise lazer gücü ve kaynak hızı en önemli parametrelerdir. Bunun nedeni, lazer kaynağı için en önemli özellik olan malzemenin içerisindeki nüfuziyet derinliğinin, lazer gücü ve kaynak hızı parametreleri ile doğrudan ilişkili olmasıdır. Kaynak hızı, lazer kafasının aksel olarak belirli süre içerisinde yer değiştirme miktarıdır.

Kaynak kalitesini etkileyen tüm parametreler sıranlanmak istenirse(Kusinski, 2001):

- Kaynak yapılan iş parçalarının özellikleri,
- Lazer gücü,
- Kaynak hızı,
- Lazer ışınının çapı,
- İş parçasının yüzeyine odaklanan ışının doğruluğu,
- Kullanılan koruyucu gazın türü, miktarı ve yönü.

Lazer kaynak işleminde kaynatılacak iş parçalarının kimyasal, fiziksel özellikleri ve yüzey kaliteleri kaynak dikişinin kalitesi için oldukça önemlidir. Çünkü bu parametreler, kaynak prosesi esnasında parçanın lazer ışınlarını emme kabiliyetlerini etkilemektedir. Lazer ışınlarının emilmesi özelliği kaynak dikişinin kalitesi için en önemli özelliklerindedir. Metal malzemeler genellikle üzerlerine gelen ışınları yansıtırlar ve ışığı geçirmezler. Lazer kaynak prosesinde, kaynaklanacak malzemeye aktarılan ısı, emilen enerji ile hesaplanmaktadır ve yapılan çalışmalarda maksimum emilimin ışınların iş parçası yüzeyine 90°lik açı ile çarptığında olduğu görülmüştür(Altıntaş, 2018).

Lazer prosesinde lazerin iletiminde görev alan elektronların sayısına göre, malzemenin lazer ışınlarını emme kabiliyeti değişmektedir. Metal malzemelerin ısınmasıyla, kafes sistemleri içinde bulunan elektronlar serbestleşir. Serbest kalan elektronlar arttığında malzemenin ışınları emme kabiliyeti de artmaktadır(Katayama, 2013).

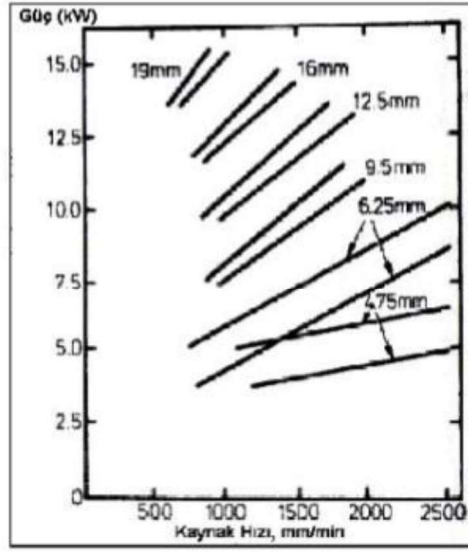
Otomotiv sanayisindeki lazer kaynak proseslerinde kullanılan lazerler ortalama olarak 4 ila 10 kW güce sahiptirler. Lazer gücü, kaynatılacak malzemeye nüfuz edebilecek şekilde ayarlanır. Çok fazla güç kullanımı, metalin katılaşmasına hatta delinmesine neden olur. Uygun nüfuziyetin sağlanması, lazer gücünün yanında kaynak hızı ve malzemenin özelliklerine de bağlıdır. Seri üretim prosesleri için genellikle yüksek hız talep edildiğinden, çoğunlukla yüksek güç kullanılarak, kaynak hızı uygun nüfuziyete göre ayarlanır. Çoğu zaman, proseste değişime izin vermek amacıyla güç parametresi yüksek olarak belirlenir(Fahlström, 2015).

Lazer gücünün bir farklı yönü de dağıtımıdır. Dağıtım olarak, devamlı lazer gücü ve darbeli lazer gücü kullanılabilir. Kaynak bölgesinde oluşabilecek çatlak ve gözenekleri önlemek amacıyla darbeli güç modu kullanılabilir. Devamlı lazer gücü kullanımı, kaynak prosesinin daha verimli gerçekleşmesini sağlar ve yaygın olarak kullanılan dağıtım modlarından biridir.(Fahlström, 2015).

Kaynak hızı, gerçekleştirilen kaynak prosesinin hızıdır. Kaynak hızı [mm / s], lazer gücü [kW] ile birlikte ısı girdisini [kJ / mm] belirlemektedir. (Denklem 2.1). Lazer gücü ile kaynak hızı optimize edilmediği durumlarda zayıf nüfuziyet oluşmaktadır. (Fahlström, 2015).

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

Lazer kaynak prosesinde oluşan kaynak nüfuziyetinin derinliğinin belirlenmesi için lazer gücü ve kaynak hızı parametreleri arasındaki bağıntının iyi tanımlanması gerekmektedir. Bu bağıntı yapılan deneysel çalışmalar ve testler ile türetilmektedir. Şekil 2.15'te CO₂ lazer kaynak çeşidi ile karbonlu çeliğin birleştirmesindeki parametre bağıntısı gösterilmektedir(Çelen, 2006).

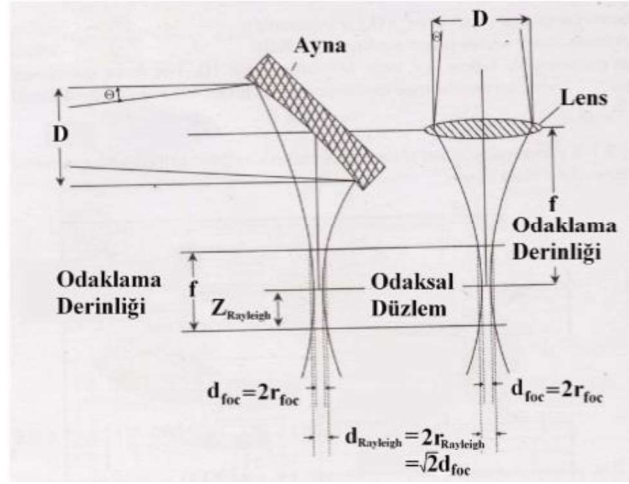


Şekil 2.15. Karbonlu çelik levhalar için kaynak hızının CO₂ lazer gücüne göre fonksiyonu (Duley, 1998)

Kaynak hızının değişmesiyle kaynak havuzunun da şekil ve boyutu değişmektedir. Düşük kaynak hızları, kaynak havuzunun genişliğini artırmaktadır. Gereğinden fazla kaynak hızları ise kaynak havuzunun düzgün ve devamlı bir bağlantı oluşturması için yeterli zaman olmaması riskini oluşturur(Fahlström, 2015).

Kaynatılacak iş parçası yüzeyine göre odak konumu, kaynağın nüfuziyet derinliğini etkileyen önemli parametrelerdendir. Yapılan çalışmalar, ince levhaların lazer kaynak ile kaynatılmasında maksimum nüfuziyet sağlamak için optimum odak konumunun üst levha yüzeyinden 1mm altında olması gerektiğini göstermektedir. Bunun sebebi, iş parçası içinde bir ergime sağlayarak key hole oluşturmaktır(Fahlström, 2015).

Şekil 2.16'da lazer ışığının ayna ve lens kullanılarak odaklanması gösterilmektedir. Lazer ışınının iş parçası yüzeyine odaklanmasının daha iyi bir sonuç çıkaracağı düşünülür, ama gerçekte durum böyle değildir. Asıl problem, odaklanmanın tam olarak hangi kısımda oluşacağını tahminidir. Bazen odaklanılan noktaya yakın alanlarda yanma gerçekleşebilmektedir. Eğer odaklama sistemi geniş odaklama derinliğine (f/sayısına) sahipse bu gerçekleşebilmektedir(Çelen, 2006).



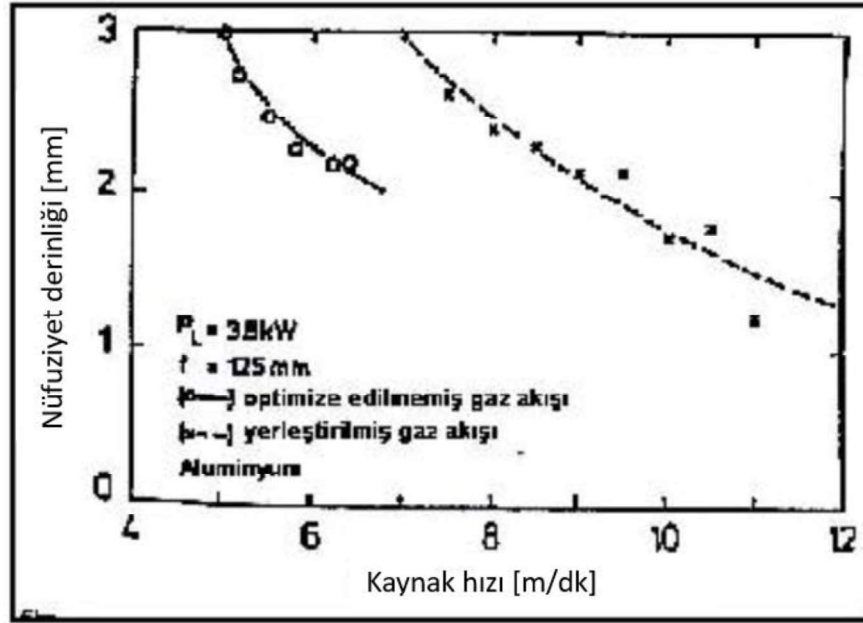
Şekil 2.16. Ayna ve lens kullanımıyla lazer ışınının odaklanması (Wirth, 2004)

Odak düzleminin pozisyonu, kaynaklanacak iş parçalarına ve birleştirme işlemine bağlı olan önemli bir diğer unsurdur. Birleştirilecek malzemeler farklı kalınlıklarda ise kaynak işlemi anında, metalurjik özellikler bakımından lazer ışın odağını lazer dikişinin diğer kısmına ayarlamak daha avantajlı olmaktadır. Örnek olarak; kalın bir malzeme ile ince malzemenin alın kaynağı ile birleştirilmesinde odak merkezinin kalın malzeme üzerinde olmasıyla lazer gücünün daha etkili olması avantaj sağlayabilmektedir. Bu durumda ince malzemedeki yanma riski ortadan kaldırılarak, ince ve kalın malzeme arasında tam nüfuziyet sağlanabilmektedir. Kullanılan farklı türden malzemeler veya farklı kalınlıklardaki malzemelerin lazer kaynağında odak mesafesi ayarlarının iki bileşene göre değerlendirilerek prosesin gerçekleştirilmesi kaynak kalitesini iyileştirmektedir(Duley, 1998).

Doğru ve kaliteli bir kaynak dikişi elde edebilmek için ilk olarak kaynak bölgesindeki oksitlenme ve kirlenmeyi önlemek amacıyla kaynak havuzunun korunması gerekmektedir. İkinci olarak; lazer gücünün yüksek, kaynak hızının düşük olduğu durumlarda plazma oluşumu yüksek olacağından, oluşan plazma, lazerin odak noktasını değiştirip, kaynak bölgesinin emdiği ısının azalmasına neden olacaktır. Proses esnasında koruyucu gaz kullanılarak plazmanın neden olacağı olumsuz etkiler önlenabilmektedir. Üçüncü olarak; kaynak prosesi esnasında kaynaktan sıçrayacak çapağın etraftaki ekipmanlara, lazer ünitesindeki hassas cama zarar verme riski vardır. Bunu ortadan kaldırmak için de koruyucu gaz kullanılarak, çapaklar yönlendirilebilir(Fahlström, 2015).

Lazer kaynak işlemlerinde koruyucu gaz olarak genellikle helyum ve argon gazları kullanılır. Azot gazı da helyum gazı yerine kullanılabilen bir gaz türüdür. Bu gazlar ihtiyaca bağlı olarak karışım halinde de kullanılabilirler. Helyum gazı yüksek iyonizasyon özelliğinden dolayı oldukça tercih edilen gaz çeşididir. Bununla beraber helyum ve argon gaz karışımının kullanılması oksitlenmeyi engeller ve aynı zamanda kaliteli kaynak havuzu oluşumuna imkan sağlar.

Koruyucu gazlar genellikle 10 ila 40 lt/dk debi ile kullanılırlar. Daha yüksek kaynak hızları için daha yüksek debiler gerekmektedir(>10 m/dak). Azot gazının kullanımı, Helyum'dan daha çok plazma oluşumuna ve düşük bir kaynak nüfuziyet derinliğine yol açmaktadır(Behler ve ark, 1988). Koruyucu gaz akışının kaynak nüfuziyeti etkisi Şekil 2.17'de gösterilmektedir.



Şekil 2.17. Yardımcı gazın tipinin plazma oluşumuna ve kaynak sonuçlarına etkisi (Duley, 1998)

2.3. Galvanizli Çeliklerde Lazer Kaynağı

Çelik malzemeler korozyona karşı dirençli hale getirilebilmek için bazı kimyasal işlemlerden geçirilmektedirler. Çelik malzemeyi korozyondan korumak için bilinen en temel yöntem malzemeyi çinko ile kaplamaktır. Bu kaplama işlemi çeliğin eritilmiş çinkoya batırılması ve oluşan kimyasal reaksiyon sonrasında çinkonun, çeliğin yüzeyini kaplamasıyla gerçekleşmektedir.

Galvaniz kaplama genel olarak birkaç katmandan meydana gelmektedir. Ana malzemeye(metale) temas eden katman demir çinko bileşiklerinden oluşur. Ana malzemenin dışının kaplandığı bu kaplama tabakalarının en dışında tamamen çinkodan oluşan bir katman bulunmaktadır. Kaplamayı oluşturan bu katmanlar, fiziksel, mekanik ve kimyasal kompozisyonu değiştirerek difüzyon ve sonradan soğuma gibi özellikleri etkilemektedirler. Kaplamanın kimyasal özelliklerinde ve ya prosesinde yapılacak en ufak değişiklik, kaplamanın görünümü ve özelliklerinde önemli değişikliklere neden olmaktadır(Aytan, 2015).

Çelik malzemeleri, suyla teması sonrasında oluşacak korozyona karşı korumada sınır koruma kaplaması ve galvaniz kaplama adında iki farklı çinko kaplama yöntemi kullanılır. Sınır korumada, oluşan korozyon, çelik malzemeye ulaşmadan evvel çeliği korozyon ortamından ayırma görevi gören çinko kaplama ilk olarak aşınır. Galvaniz kaplamada ise; çinko nemli ortamlarda çelikten daha aktif olduğundan dolayı çeliği korumak adına kendisini feda etmektedir(Marder, 2000).

Galvaniz kaplamalı ve kaplamasız çeliklerin kaynak gereksinimleri aynıdır. Çelikler ile ilgili yapılan bazı test çalışmalarında, kaynak işlemi görmüş ve görmemiş çeliğin galvaniz kaplama işlemi görmesi sonrasında mekanik özelliklerinde değişiklik olmadığı görülmüştür(Anonim, 2018)

Lazer kaynak yönteminin temassız yapılabilmesi ve estetik görünüm sağlaması gibi birçok avantajı bulunmaktadır. Ancak galvaniz kaplamalı çelik malzemelerin direnç punta kaynağında yaşanan problemlerine benzer olarak, kaynak prosesi esnasında çelik

malzeme üzerindeki galvanizin buharlaşması lazer kaynak prosesinde de problem oluşturmaktadır. Malzemenin yüzeyinden buharlaşan çinko kaplama, kaynak bölgesinin stabilitesini bozarak, kaynakta sıçrama ve boşluk oluşumlarına neden olabilmektedir. Yapılan çalışmalar sonucunda, galvaniz kaplamasız olan çelik malzemelerin kaplamalı malzemelerden daha az kararsızlık gösterdikleri görülmüştür(Kim ve ark. 2015).

Lazer kaynak proseslerinde kullanılacak olan galvanizli çeliklerin kaynağında oluşacak çinko buharının kaynak bölgesinden uzaklaştırılmasında farklı yöntemler kullanılmaktadır. Özellikle ince malzemelerde, malzemeler üzerinde çok küçük formlar oluşturmak ya da malzemeler arasında uygun şimler kullanılabilir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

Tez çalışmasına ilk olarak kullanılacak lazer kaynak prosesi için optimum parametreleri belirleme çalışmalarıyla başlanmıştır. Bu parametre belirleme çalışmalarında, devam edecek çalışmalarda da kullanılacak olan 0.7 mm ve 2mm galvanizli DX54D+Z çelik sac numune çiftleri, farklı hızlarda ve lazer güç yoğunluklarında bindirme birleştirme tipinde lazer kaynak prosesi ile birleştirilmiş ve numunelerden makro alınarak nüfuziyet derinliklerine bakılmıştır.

Tez kapsamında ilerleyen çalışmalarda, belirlenen optimum parametrelere göre 0.7mm ve 2mm'den oluşan numune çiftleri farklı lazer dikiş geometrileri kullanılarak, farklı birleştirme tiplerinde lazer kaynak yöntemi ile birleştirilmişlerdir.

Soğuk şekillendirmeye uygun düşük karbonlu, çinko ile kaplanmış galvanize çeliklerden biri olan DX54D+Z çeliği, TS EN 10346 sıcak daldırmayla sürekli olarak kaplanmış yassı mamuller standardında 1.0952 çelik numarası ile tanımlanmıştır. Malzemenin kimyasal bileşimi Çizelge 3.1'de, mekanik özellikleri ise Çizelge 3.2 'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. DX54D+Z malzemesinin kimyasal kompozisyonu

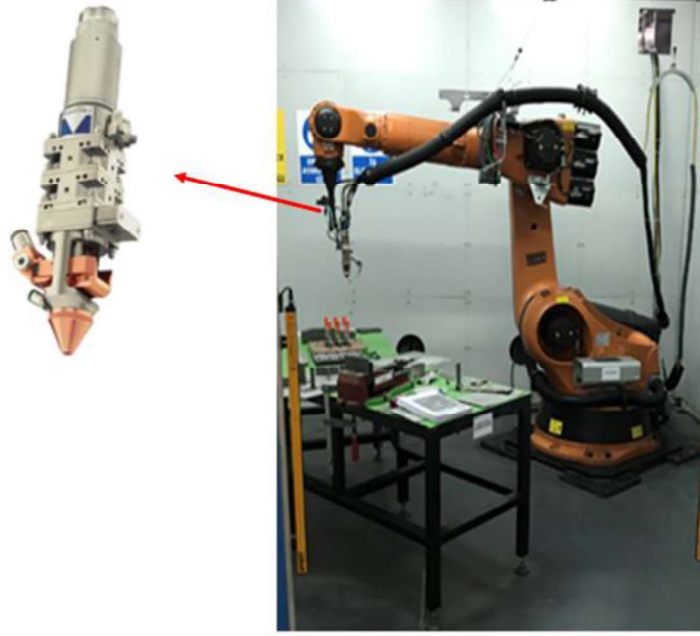
Malzeme	C max.	Si max.	Mn max.	P max.	S max.	Ti max.
DX54D+Z	0,12	0,60	0,60	0,10	0,045	0,30

Çizelge 3.2. DX54D+Z malzemesinin mekanik özellikleri

Malzeme	Akma Dayanımı R_p [Mpa]	Çekme Dayanımı R_m [Mpa]	Kopma Uzaması A_{80} [%]
DX54D+Z	120-220	260-350	36

3.2. Lazer Kaynak Ünitesi ve Özellikleri

Tez kapsamında yapılan lazer kaynak çalışmalarında altı eksenli KUKA robotu ve onunla entegre halde çalışan 3kW gücündeki Precitec YW30 model lazer kafası kullanılmıştır.



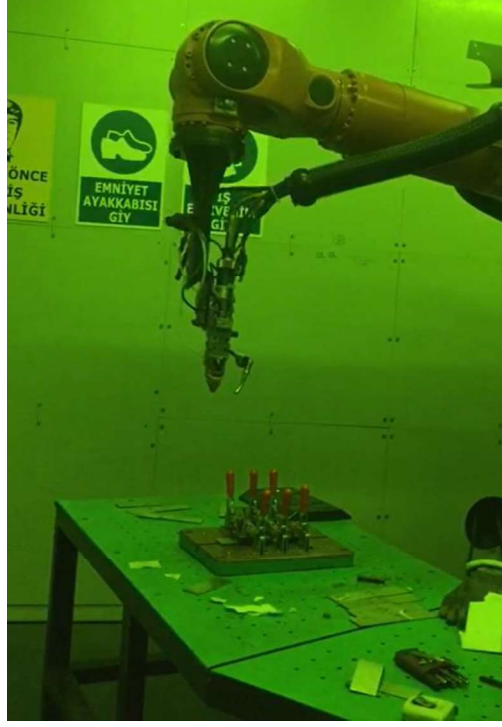
Şekil 3.1. Kullanılan robot ve lazer kafası

Rezonatör ünitesi olarak IPG YLS-3000-S2T model su soğutmalı fiber lazer ünitesi kullanılmıştır. Maksimum 3 kW lazer gücüne sahip bu cihaz, 1.070 μm dalga boyunda ışık üretmektedir. 0,2 mm proses fiberi kullanılan kaynak cihazında 100 mm kolimatör lensi, 200 mm odak lensi kullanılmaktadır. Odaklanmış haldeki lazerin spot çapı 0,4 mm'dir. Şekil 3.2'de kullanılan rezonatör verilmiştir.



Şekil 3.2. Kullanılan rezonatör

Lazer kaynak işlemi sırasında doğru ve hassas bir kaynak prosesi için kaynakla birleştirilecek olan iş parçalarının sabitlenmesi önemlidir. Bu parçaların sabitlenmesinde Şekil 3.3'teki fikstür kullanılmıştır. Parçalar birçok yerinden klemp yardımıyla sabitlenmişlerdir.



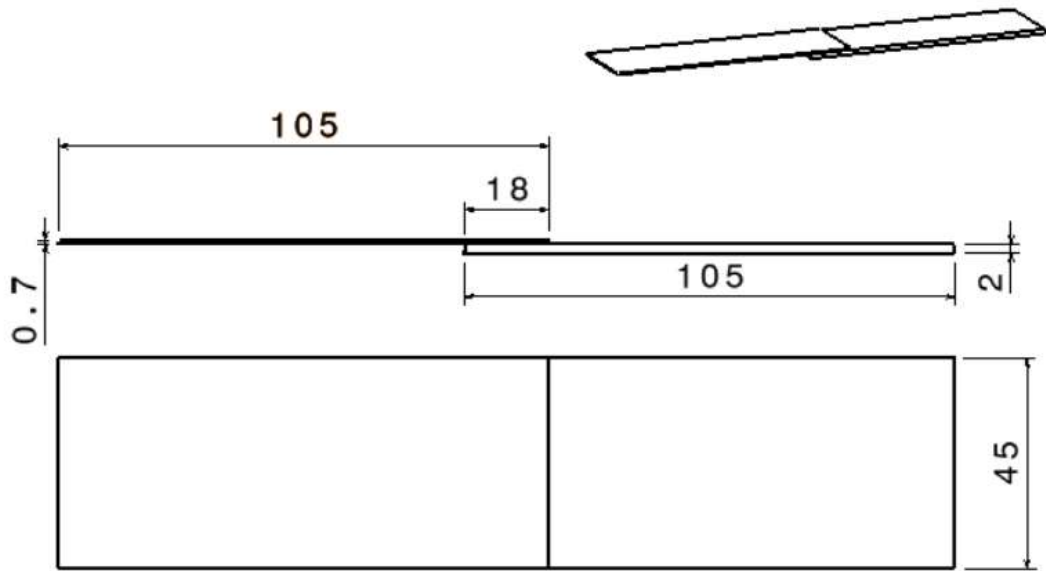
Şekil 3.3. Lazer kaynak işlemlerinde kullanılan fikstür

3.3. Parametre Belirleme Çalışmaları

Parametre belirleme çalışmalarında, kaynak nüfuziyetinde en etkili iki parametre olan lazer gücü ve kaynak hızı parametreleri değiştirilerek diğer parametreler sabit tutulmuştur. Lazer kaynak prosesinde odak uzaklığı 0mm olarak belirlenmiş ve koruyucu gaz kullanılmamıştır.

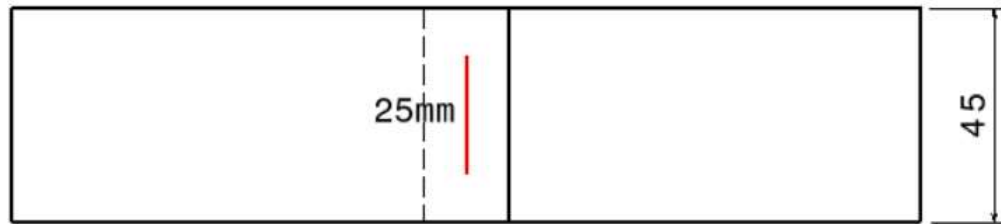
Hazırlanan numunelerin farklı kaynak hızlarında ve lazer güçlerinde kaynak işlemleri yapıldıktan sonra numunelerdeki kaynak bölgelerinden alınan kesitlerin makroyapıları incelenmiş nüfuziyet derinliklerine bakılmıştır. Odak mesafesi, koruyucu gaz gibi diğer parametrelerin sabit tutulmasıyla lazer gücü ve kaynak hızının kaynak kalitesine etkisi gözlemlenmek istenmiştir.

Parametre çalışmaları için numuneler 105x45x0.7mm ve 105x45x2mm ölçülerinde hazırlanmıştır. Çelik saclar istenilen boyutlara giyotin ile kesilerek getirilmiş ve kesme işlemi sonrasında yüzeyleri zımparalanıp çapaklardan arındırılmıştır. Hazırlanan tüm numuneler bindirme birleştirme tipinde lazer kaynak ile kaynatılmışlardır. Proses esnasında malzeme yüzeylerindeki galvanizin buharlaşarak kaynak bölgesindeki olumsuz etkisini engellemek amacıyla iki malzeme arasında 0.1mm şim kullanarak buharlaşan galvanizin kaynak bölgesinden uzaklaşmasına izin verilmiştir. Numune boyutları ve bindirme konumları Şekil 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.4. Hazırlanan numune boyutları

Parametre çalışmaları için numunelerin birbirleriyle kıyaslanması amacıyla tüm numunelerde lazer kaynak geometrisi olarak 25mm uzunluğunda I tipi lazer geometrisi kullanılmıştır. Lazer dikişinin konumu iki malzemenin bindirme yüzeylerinin ortasında olacak şekilde planlanmıştır.



Şekil 3.5. I tipi lazer geometrisi konumu

Numunelerin kaynak proseslerinde lazer gücü olarak 1350W, 1500W ve 1800W olacak şekilde üç farklı lazer gücüne göre farklı kaynak hızlarında kaynak işlemleri yapılmıştır. Kaynak hızları olarak 10mm/sn, 15mm/s, 20mm/s ve 25mm/s hızlarında çalışılmıştır. Parametre çalışmalarında Çizelge 3.3, Çizelge 3.4 ve Çizelge 3.5'te görüldüğü gibi her lazer gücü için dörder farklı numune çifti belirtilen parametlerde lazer kaynak ile birleştirilmiştir. Parametre çalışmaları toplamda 12 farklı numune çiftinin kaynatılması ve makroyapıda incelenmesi ile tamamlanmıştır.

Çizelge 3.3. Sabit 1350W lazer gücünde farklı kaynak hızlarının etkisi için parametre çizelgesi

Numune	Malzeme	Kalınlık (mm)	Lazer Gücü (W)	Kaynak Hızı (mm/sn)	Odak Uzaklığı (mm)	Lazer Geometrisi
1	DX54D+Z	0.7-2	1350	10	0	I tipi
2	DX54D+Z	0.7-2	1350	15	0	I tipi
3	DX54D+Z	0.7-2	1350	20	0	I tipi
4	DX54D+Z	0.7-2	1350	25	0	I tipi

Çizelge 3.4. Sabit 1500W lazer gücünde farklı kaynak hızlarının etkisi için parametre çizelgesi

Numune	Malzeme	Kalınlık (mm)	Lazer Gücü (W)	Kaynak Hızı (mm/sn)	Odak Uzaklığı (mm)	Lazer Geometrisi
5	DX54D+Z	0.7-2	1500	10	0	I tipi
6	DX54D+Z	0.7-2	1500	15	0	I tipi
7	DX54D+Z	0.7-2	1500	20	0	I tipi
8	DX54D+Z	0.7-2	1500	25	0	I tipi

Çizelge 3.5. Sabit 1800W lazer gücünde farklı kaynak hızlarının etkisi için parametre çizelgesi

Numune	Malzeme	Kalınlık (mm)	Lazer Gücü (W)	Kaynak Hızı (mm/sn)	Odak Uzaklığı (mm)	Lazer Geometrisi
9	DX54D+Z	0.7-2	1800	10	0	I tipi
10	DX54D+Z	0.7-2	1800	15	0	I tipi
11	DX54D+Z	0.7-2	1800	20	0	I tipi
12	DX54D+Z	0.7-2	1800	25	0	I tipi

Çizelgelerde belirtilen parametrelere göre lazer kaynak ile birleştirilen numuneler kaynak sonrası makro ölçüde nüfuziyetin incelenebilmesi için ilk olarak kesme makinasında kaynak bölgesini(I tipi dikişe dik bir şekilde) ortasından bölerek kesilmiştir. Kesim sonrası numunelerin incelenecek kısmının kesim yüzeyi zımpara cihazı ile zımparalanmıştır. Kullanılan kesme ve zımparalama makineleri Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Numune kesme ve zımparalama makineleri

Numuneler, kaynak bölgesi ve ana malzemenin görsel olarak iyi ayırt edilebilmesi için Fe_3Cl çözeltisinde ve daha sonra pas önleyici solüsyonda bekletilmiştir. Şekil 3.7’de gösterilen Welding Expert cihazında incelenmeden önce, cihaz üzerinde parçaları kolay konumlandırabilmek ve numunenin kenarlarına koruma sağlamak amacıyla bakalite alma işlemleri yapılmıştır.


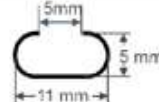




Şekil 3.7. Welding Expert cihazı

3.4. Deney Numuneleri

Parametre çalışmaları tamamlandıktan sonra seçilen kaynak parametrelerine göre farklı lazer dikiş formları ve farklı birleştirme tipleriyle kaynatılacak numuneler hazırlanmış ve belirlenen dikiş formlarının farklı yükleme koşulları altındaki davranışları incelenmek istenmiştir. Numunelerin lazer ile kaynatılması işlemi C tipi, Uzun C tipi, I tipi ve S tipi olmak üzere dört farklı lazer dikiş geometrisi kullanılmıştır. Bu geometriler ve ölçüleri Çizelge 3.6’da verilmiştir.



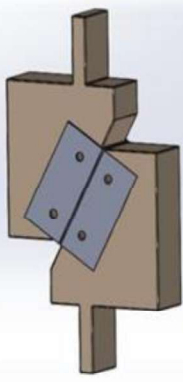
Çizelge 3.6. Kullanılan farklı lazer dikiş formları

Punta Tipi	C	Uzun C	I	S
Tanımlama No	1	2	3	4
Punta Ebatları				

C punta tipi 9.5mm çapında ve 305° dairesel, uzun c punta tipi uzunluğu 11mm, genişliği 5mm ve ağız açıklığı 5mm, I punta tipinde 25mm düz dikiş ve S punta tipinde ise yanyana 9.5mm çapındaki yarım daireler olacak şekilde belirlenmiştir.

Belirtilen lazer dikiş formlarına ek olarak her dikiş formuna göre numuneler Çizelge 3.7’de gösterildiği gibi bindirme, peel ve KS-II olarak isimlendirilen 3 farklı birleştirme tipinde lazer kaynak ile birleştirilmiştir.

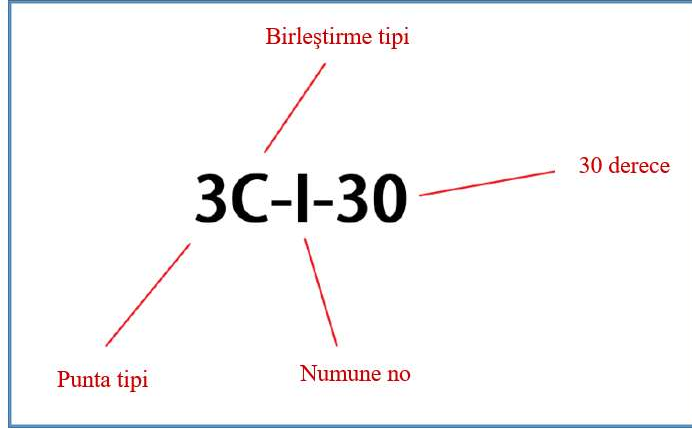
Çizelge 3.7. Kullanılan farklı birleştirme tipleri

Birleştirme Tipi	Bindirme	Peel	KS-II
Birleştirme Kodu	A	B	C
Birleştirme Görüntüsü			

KS-II tipi ile hazırlanan numunelerin çekme testlerinde 30°,60° ve 90° olmak üzere farklı açılar kullanılmış(numuneler farklı açılarda çekilmiş) ve bu koşullarda da çekme mukavemetleri değerlendirilmiştir.

Bu farklı birleştirme tiplerinin kullanılmasındaki amaç farklı lazer dikiş formlarına sahip numunelerin farklı yükleme şartları altındaki davranışlarını incelemektir.

Hazırlanan numune sayısı ve yapılacak testlerin sonuçlarında karışıklık olmaması adına numuneler birleştirmelerde kullanılan dikiş formlarına ve birleştirme tiplerine göre isimlendirilmiş, kodlanmışlardır. Şekil 3.8’de numune kodlama detayları verilmiştir.



Şekil 3.8. Deney numunelerinin kodlanması

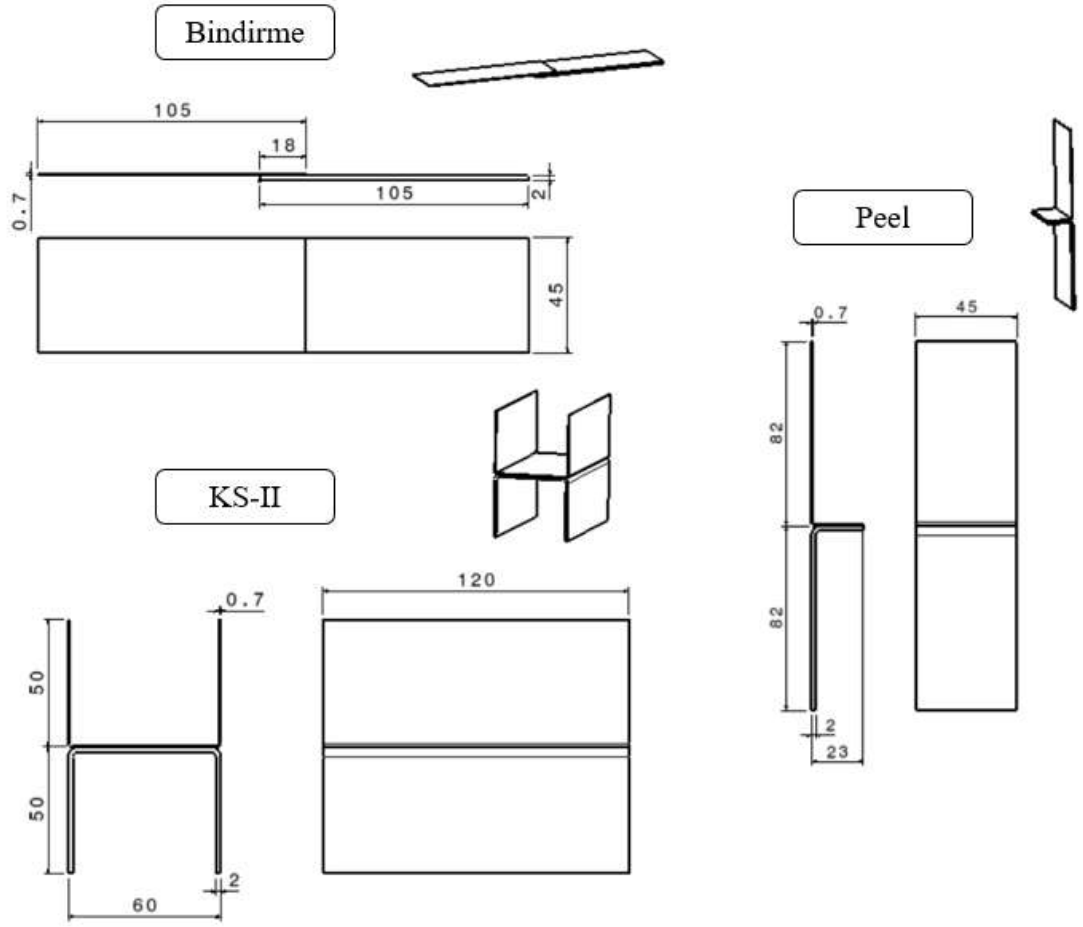
Bu kodlamalarda sırasıyla punta tipi, birleştirme tipi, numune numarası ve çekme derecesi(eğer birleştirme tipi KS-II ise) belirtilmektedir. Şekil 3.6'da verilen örnek kodlamayı açıklamak gerekirse;

- 3 : Çizelge 3.6'da belirtilen dikiş formlarında 3 numara ile tanımlanan I tipi dikiş formu
- C : Çizelge 3.7'de belirtilen birleştirme tiplerinde C ile tanımlanan KS-II birleştirme tipi
- I : Kaynatılan numune çiftlerine verilen numara
- 30 : Birleştirme olarak KS-II tipi kullanıldıysa numunenin hangi açıyla çekme testine tabi tutulacağı anlamlarına gelir.

Yapılan testler sonrasında verilen sonuçlarda numuneler bu kodlama yöntemine göre isimlendirilmiştir.

3.5. Lazer Kaynak İşlemleri

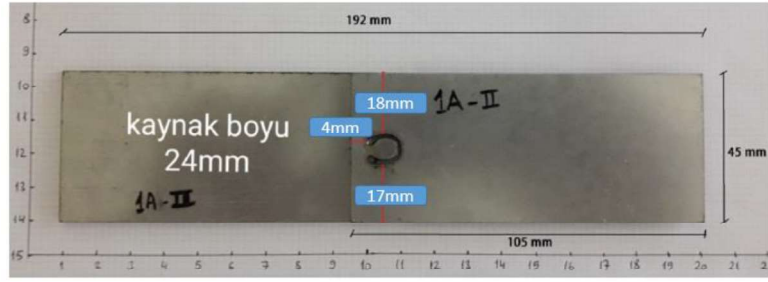
Parametre çalışmalarında numuneler bindirme tipi kullanılarak kaynatıldığından numune hazırlığında giyotin kesme ve temizleme işlemleri uygulanmıştır. Buradaki deney numunelerinin hazırlanmasında bindirme dışında peel ve KS-II birleştirme tipleri de kullanıldığından bu birleştirme tipleri için numuneler giyotinde istenilen ölçülerde kesildikten sonra abkant vasıtasıyla bükülmüşlerdir. Kullanılan numune ölçüleri ve kaynak yüzeylerinin örtüşme konumları Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



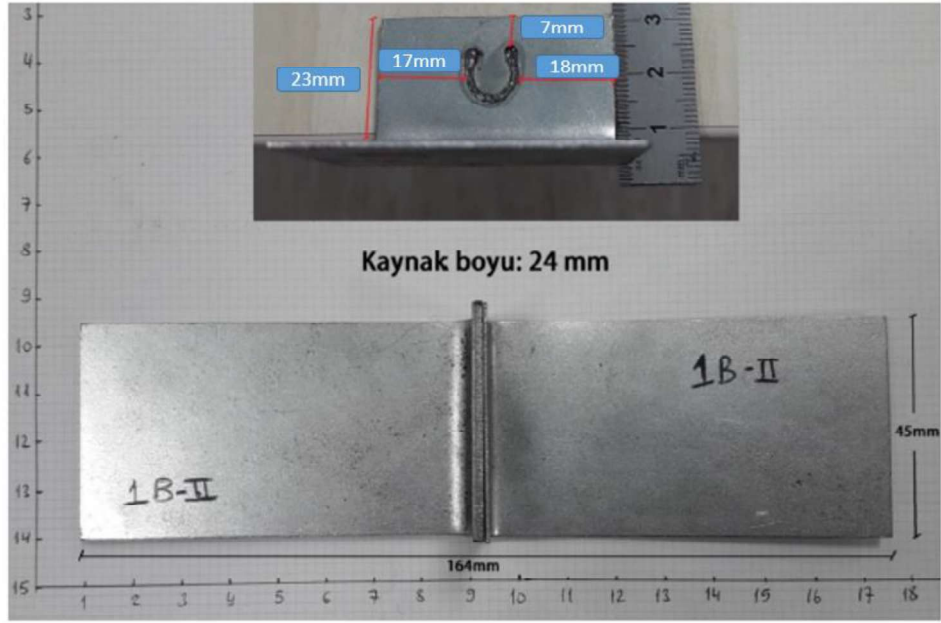
Şekil 3.9. Farklı birleştirme tiplerinde kullanılacak numune ölçüleri

Peel birleştirme tipinde hazırlanan numuneler için kaynak bölgelerinin oturma yüzeyleri kullanılan dikiş geometrisine göre farklı ölçülerde hazırlanmıştır. Örneğin en geniş ölçülerde olan C tipi lazer kaynak dikişli numunelerde oturma yüzeyleri 23mm iken, dar ölçüde olan I tipi lazer kaynak dikişli numunelerde bu ölçü 16mm olarak kullanılmıştır.

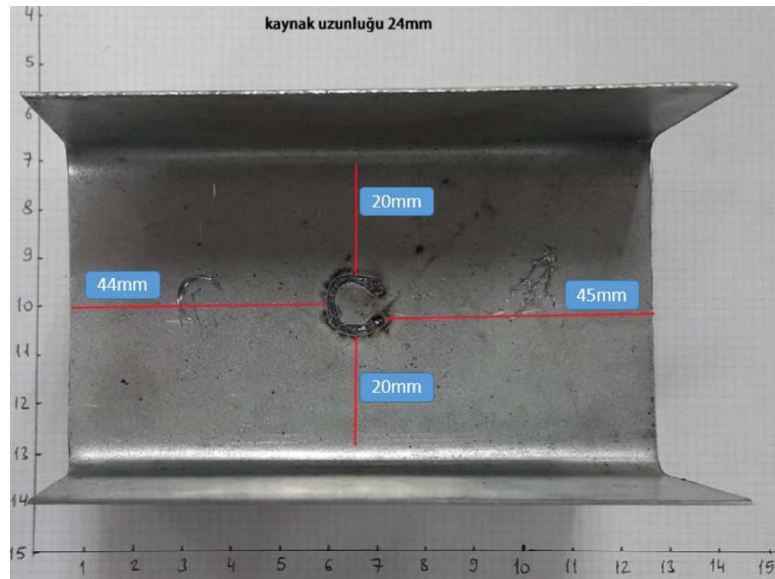
Örnek olarak C tipi dikiş geometrisi kullanılarak, farklı birleştirme tiplerine göre kaynatılan numunelerin görselleri Şekil 3.10, Şekil 3.11 ve Şekil 3.12’de gösterilmiştir. Bu şekillerde numunelerin birleşim sonrasında ölçüleri de belirtilmiştir.



Şekil 3.10. C tipi dikiş geometrisi ve bindirme tipiyle hazırlanan numune ölçüleri



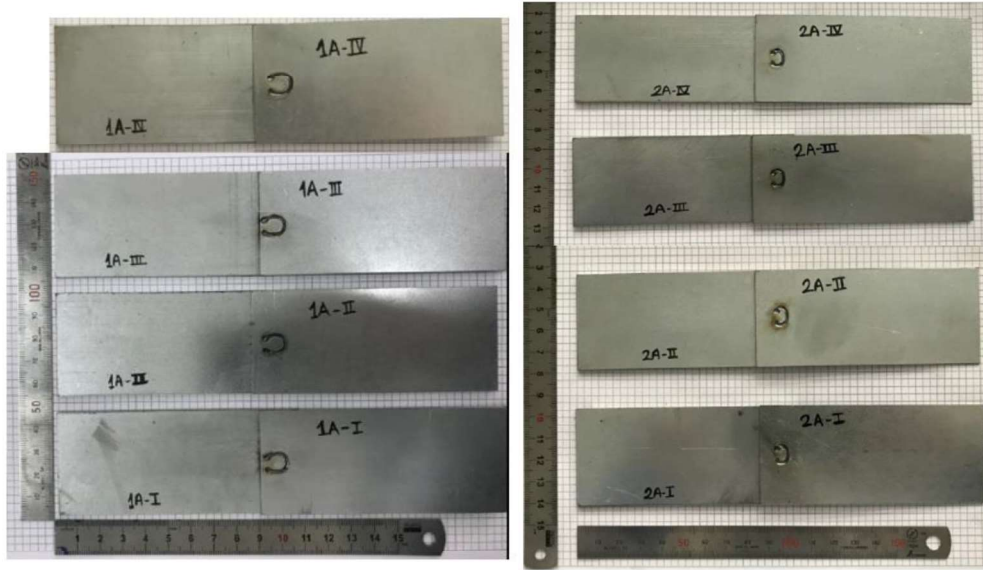
Şekil 3.11. C tipi dikiş geometrisi ve peel tipiyle hazırlanan numune ölçüleri



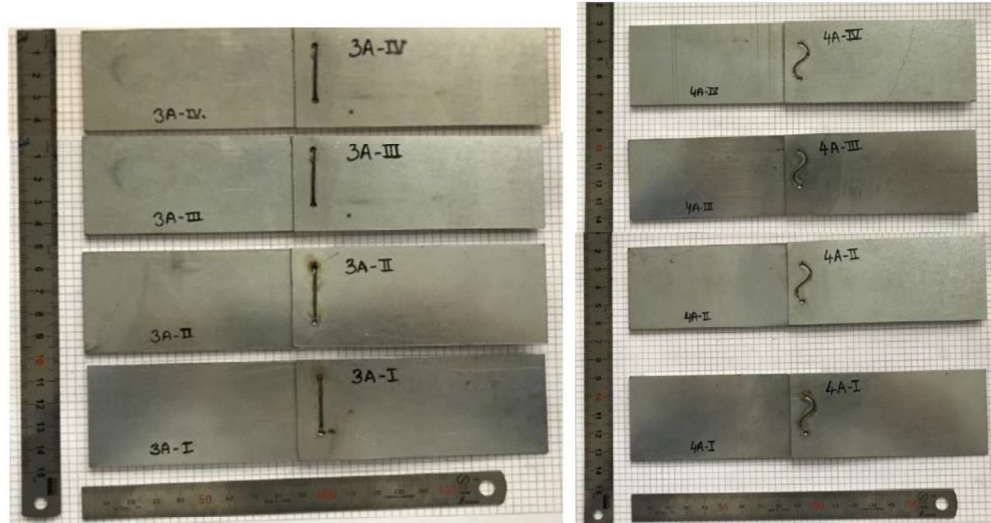
Şekil 3.12. C tipi dikiş geometrisi ve KS-II tipiyle hazırlanan numune ölçüleri

Belirtilen dikiş geometrileri ve birleştirme tiplerine göre hazırlanan numuneler sırasıyla aşağıdaki şekillerde verilmiştir. Numunelerin üzerine test öncesinde kodlamaları yazılmıştır.

Bindirme birleştirme tipinde; 4 adet numunede C tipi, 4 adet numunede uzun C tipi, 4 adet numunede I tipi ve 4 adet numunede de S tipi lazer dikiş formu kullanılarak numuneler kaynatılmıştır.

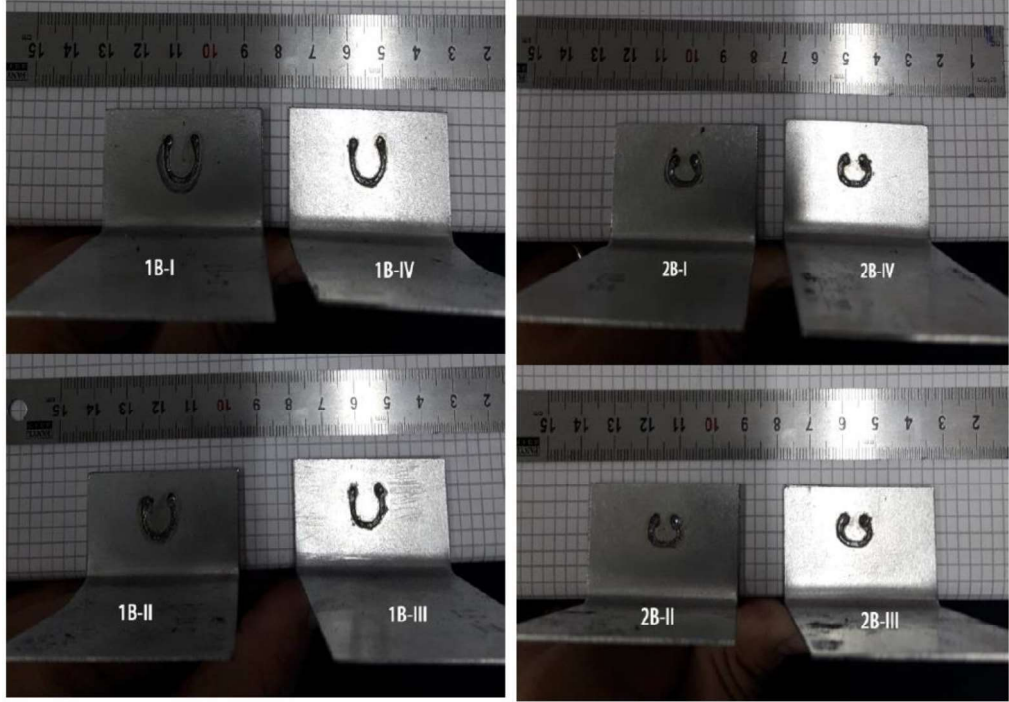


Şekil 3.13. C ve uzun C tipi dikiş geometrisi ve bindirme birleştirme tipiyle hazırlanan numuneler

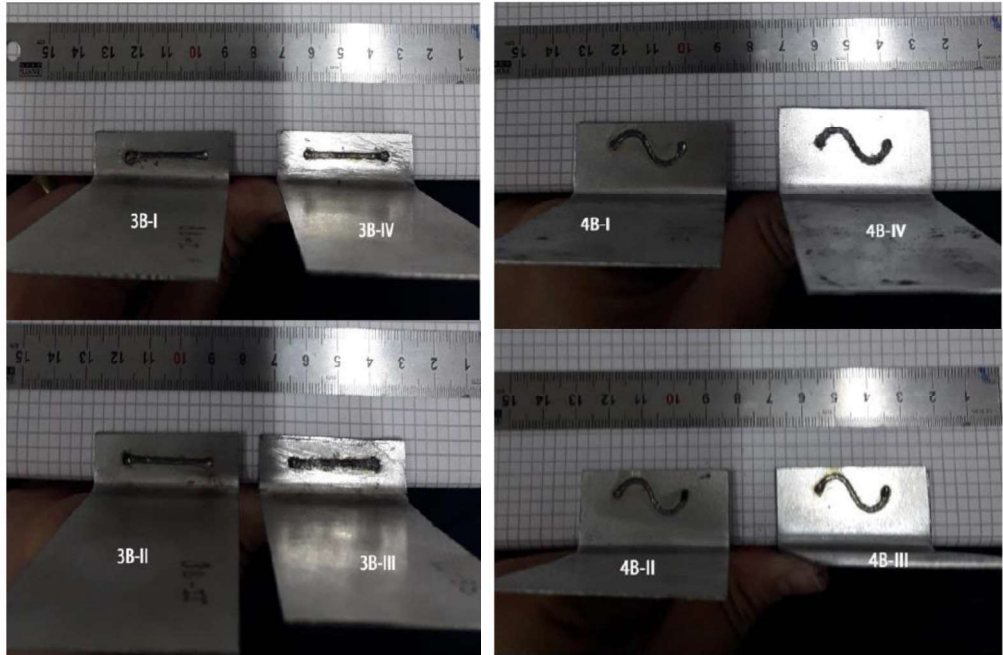


Şekil 3.14. I ve S tipi dikiş geometrisi ve bindirme birleştirme tipiyle hazırlanan numuneler

Peel birleştirme tipinde; 4 adet numunede C tipi, 4 adet numunede uzun C tipi, 4 adet numunede I tipi ve 4 adet numunede de S tipi lazer dikiş formu kullanılarak numuneler kaynatılmıştır.



Şekil 3.15. C ve uzun C tipi dikiş geometrisi ve peel birleştirme tipiyle hazırlanan numuneler

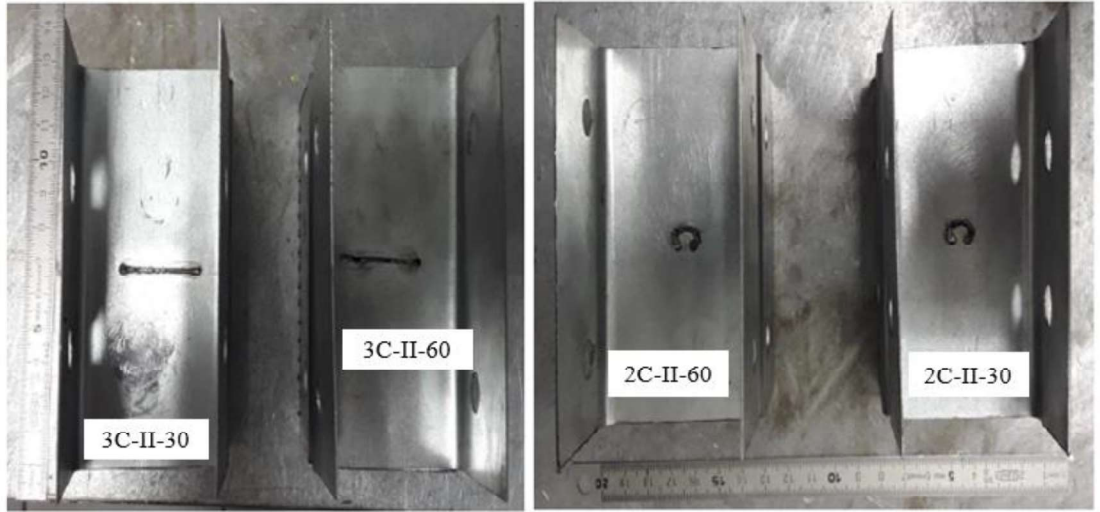


Şekil 3.16. I ve S tipi dikiş geometrisi ve peel birleştirme tipiyle hazırlanan numuneler

KS-II birleştirme tipinde; 6 adet numunede C tipi, 6 adet numunede uzun C tipi, 6 adet numunede I tipi ve 6 adet numunede de S tipi lazer dikiş formu kullanılarak numuneler kaynatılmıştır.



Şekil 3.17. C tipi dikiş geometrisi ve KS-II birleştirme tipiyle hazırlanan örnek numuneler



Şekil 3.18. I tipi ve uzun C tipi dikiş geometrisi ve KS-II birleştirme tipiyle hazırlanan örnek numuneler

KS-II birleştirme tipinde her dikiş geometrisi için 30°, 60° ve 90° uygulanacak çekme testleri için ikişer numune hazırlanmıştır. Örneğin; I tipi dikiş geometrisi için 2 adet 30°, 2 adet 60° ve 2 adet 90° derece için numuneler hazırlanmıştır.

3.6. Çekme Testleri

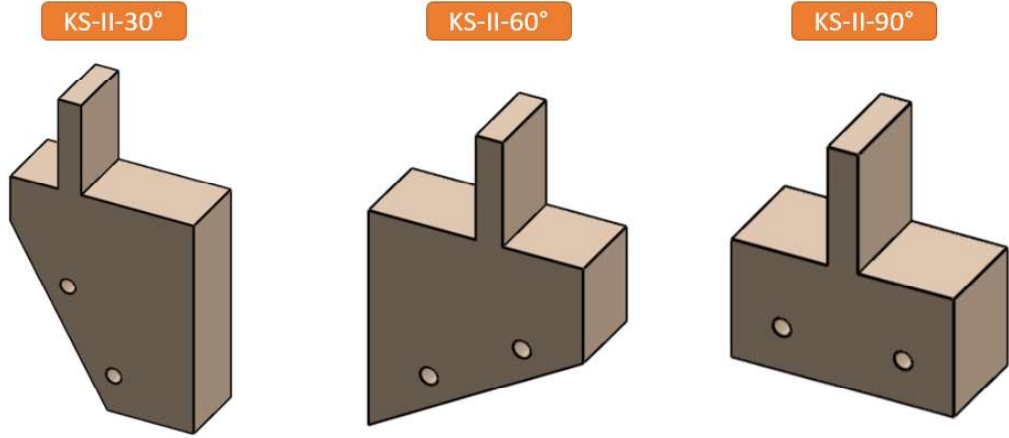
Lazer kaynak işlemlerinden sonra numunelerin çekme testleri Şekil 3.19’da gösterilen Zwick marka çekme cihazında gerçekleştirilmiştir. Farklı lazer dikiş formları ve farklı birleştirme tipleri kullanılarak hazırlanan numunelere 32mm/dk çene ilerleme hızında çekme testi uygulanmıştır. Benzer lazer dikiş formu ve bindirme tipindeki numunelerin çekme mukavemetlerinin ortalamaları alınmıştır.



Şekil 3.19. Kullanılan çekme cihazı

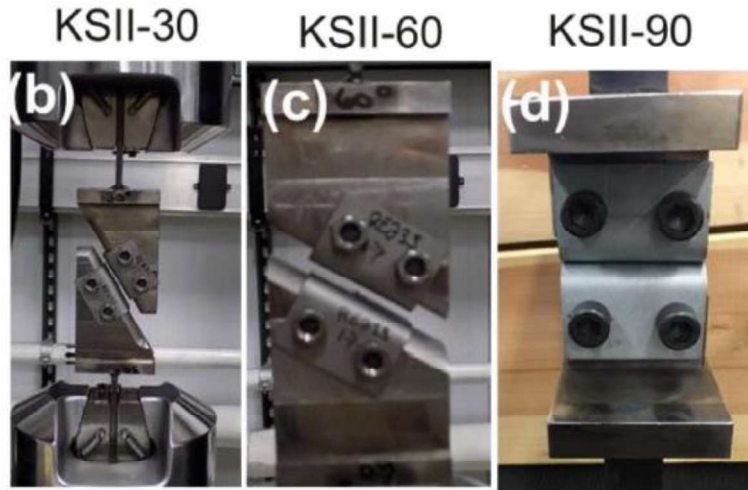
KS-II birleştirme tipiyle birleştirilen numunelerin çekme testleri için kullanılacak her üç açı için farklı çekme aparatı tasarlanmıştır. Şekil 3.20’de tasarlanan aparatlar verilmiştir.

KS-II açılı çekme testlerinde numuneler hazırlanan aparatlar üzerine civata somun yardımıyla sabitlenmişlerdir. Üretilen açılı aparatlar ise çekme cihazı çenelerine sabitlenmiştir.



Şekil 3.20. KS-II birleştirme tipi çekme aparatları

Aparatların numune ve çekme cihazı ile birlikte kullanımı Şekil 3.21’de verilmiştir.



Şekil 3.21. KS-II birleştirme tipi çekme açıları

4. BULGULAR

Bu bölümde ilk olarak, çalışma kapsamında 0.7mm DX54D+Z malzeme ile 2 mm DX54D+Z malzemelerinin lazer kaynak yöntemi ile birleştirilmelerinde kullanılan parametrelerin kaynak nüfuziyetlerine etkileri makroyapıda incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Kaynak bölgelerinin makro seviyede incelenmesinde özel kaynak ölçüm cihazı kullanılmıştır. Sonraki aşamada, makroyapıların değerlendirilmesinden sonra belirlenen parametreler ile çalışmalara devam edilerek farklı lazer dikiş geometrilerinin, farklı birleştirme tiplerinde gösterdikleri mukavemetler çekme testleri sonuçlarıyla birlikte kıyaslanmıştır.

4.1. Parametre Çalışmaları

Yapılan parametre çalışmalarında kaynak nüfuziyeti için en önemli iki parametre olan lazer gücü ve kaynak hızı değişken olup diğer parametreler sabit tutularak, bu iki parametrenin kaynak nüfuziyetine etkileri makro seviyede incelenip, değerlendirilmiştir.

Lazer Gücünün ve Kaynak Hızının Etkisi

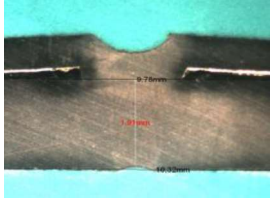
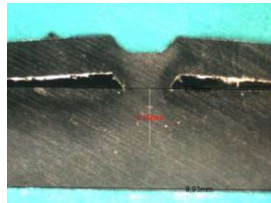
Yapılan parametre çalışmalarında numuneler üç farklı güç ve dört farklı kaynak hızlarında lazer kaynak yöntemi ile birleştirilmiş ve lazer geometrisi olarak I tipi kaynak dikişi kullanılmıştır. Birleştirmeler bindirme tipinde yapılmıştır.

Numuneler, kullanılan 1350W, 1500W ve 1800 W lazer güç değerlerinin herbiri için dört farklı kaynak hızlarında birleştirilmişlerdir.

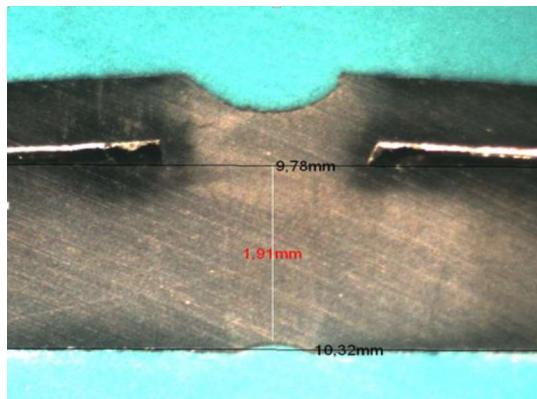
Çizelge 4.1'de 1350W sabit güçte, farklı kaynak hızlarında birleştirilen numunelerin kaynak bölgelerinin makroyapı görüntüleri verilmektedir.

1350W güç, 15mm/sn hızda ve 1350W güç, 25mm/sn hızlarda numuneler arasında herhangi bir nüfuziyet oluşmayıp, iki sac birbirini tutmadığından bu numuneler için makroyapı incelemesi yapılamamıştır.

Çizelge 4.1. 1350W sabit güç ve değişken kaynak hızlarında numune makroyapı görüntüleri

NO	GÜÇ (W)	HIZ (mm/sn)	Odak Mesafesi (mm)	MAKRO YAPI
1	1350	10	0	
2	1350	15	0	N.Yok
3	1350	20	0	
4	1350	25	0	N.Yok

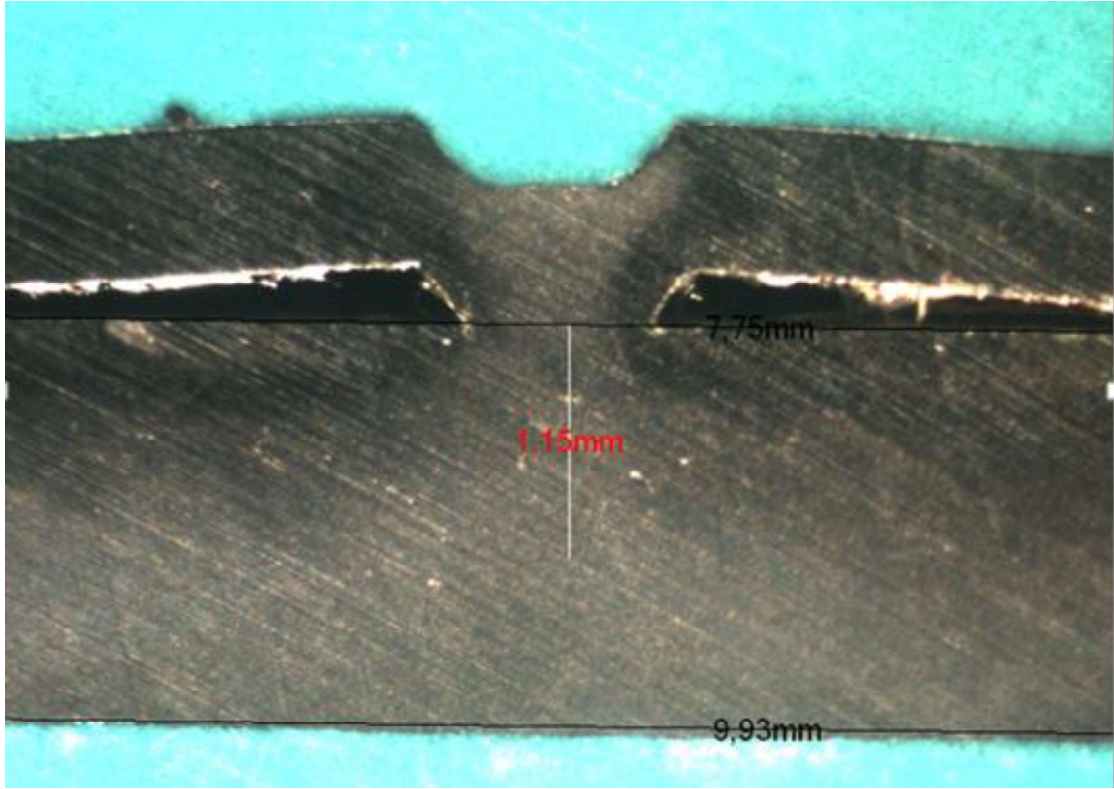
Şekil 4.1’de 1350W güç ve 10mm/sn hızlarında kaynak işlemi uygulanan 1 numaralı numunenin kaynak bölgesinden alınan kesitteki makroyapısı verilmektedir.



Şekil 4.1. 1 numaralı numunenin makroyapısı

Şekil 4.1’de verilen 1 numaralı numunenin makro görüntüsünde kaynak nüfuziyeti miktarının 1.91 mm olduğu görülmektedir. Bu nüfuziyet değeri kalınlık yönünden, 2mm kalınlığındaki alt malzemenin yaklaşık %95’ine denk gelmektedir. Alt ve üst sac arasındaki boşluk kaynak prosesi esnasında buharlaşan galvanizi kaynak bölgesinden uzaklaştırmak için malzemeler arasında bırakılan açıklık kaynaklıdır. İncelenen makroyapı görüntüsüne göre kaynaklı bölgelerde herhangi bir kaynak hatasına (pasolar arası cüruf kalıntısı, yetersiz birleşme vb.) rastlanmamıştır.

Şekil 4.2’de 1350W güç ve 20 mm/sn hızlarında kaynak işlemi uygulanan 3 numaralı numunenin kaynak bölgesinden alınan kesitteki makroyapısı verilmektedir.



Şekil 4.2. 3 numaralı numunenin makroyapısı


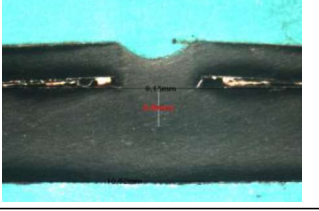
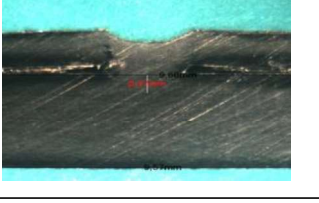
Şekil 4.2’de verilen 3 numaralı numunenin makro görüntüsünde kaynak nüfuziyeti miktarının 1.15 mm olduğu görülmektedir. Bu nüfuziyet değeri kalınlık yönünden, 2mm kalınlığındaki alt malzemenin yaklaşık %57’sine denk gelmektedir. Alt ve üst sac arasındaki boşluk kaynak prosesi esnasında buharlaşan galvanizi kaynak bölgesinden uzaklaştırmak için malzemeler arasında bırakılan açıklık kaynaklıdır. İncelenen

makroyapı görüntüsüne göre kaynaklı bölgelerde herhangi bir kaynak hatasına (pasolar arası cüruf kalıntısı, yetersiz birleşme vb.) rastlanmamıştır.

Çizelge 4.2’de 1500W sabit güçte, farklı kaynak hızlarında birleştirilen numunelerin kaynak bölgelerinin makroyapı görüntüleri verilmektedir.

1500W güç, 25mm/sn hızda numuneler arasında herhangi bir nüfuziyet oluşmayıp, iki sac birbirini tutmadığından bu numuneler için makroyapı incelemesi yapılmamıştır.

Çizelge 4.2. 1500W sabit güç ve değişken kaynak hızlarında numune makroyapı görüntüleri

NO	GÜÇ (W)	HIZ (mm/sn)	ODAK MESAFESİ (mm)	DURUM
5	1500	10	0	
6	1500	15	0	
7	1500	20	0	
8	1500	25	0	N.Yok

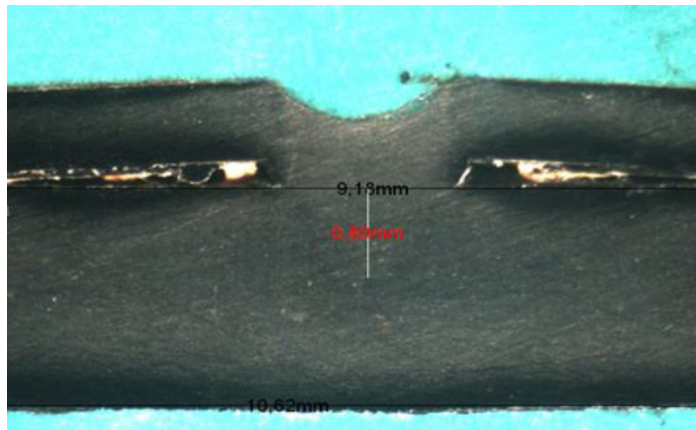
Şekil 4.3’te 1500W güç ve 10 mm/sn hızlarında kaynak işlemi uygulanan 5 numaralı numunenin kaynak bölgesinden alınan kesitteki makroyapısı verilmektedir.



Şekil 4.3. 5 numaralı numunenin makroyapısı

Şekil 4.3'te verilen 5 numaralı numunenin makro görüntüsünde kaynak nüfuziyeti miktarının 0.76 mm olduğu görülmektedir. Bu nüfuziyet değeri kalınlık yönünden, 2mm kalınlığındaki alt malzemenin yaklaşık %38'ine denk gelmektedir. Alt ve üst sac arasındaki boşluk kaynak prosesi esnasında buharlaşan galvanizi kaynak bölgesinden uzaklaştırmak için malzemeler arasında bırakılan açıklık kaynaklı oluşmuştur. İncelenen makroyapı görüntüsüne göre kaynaklı bölgelerde herhangi bir kaynak hatasına (pasolar arası cüruf kalıntısı, yetersiz birleşme vb.) rastlanmamıştır.

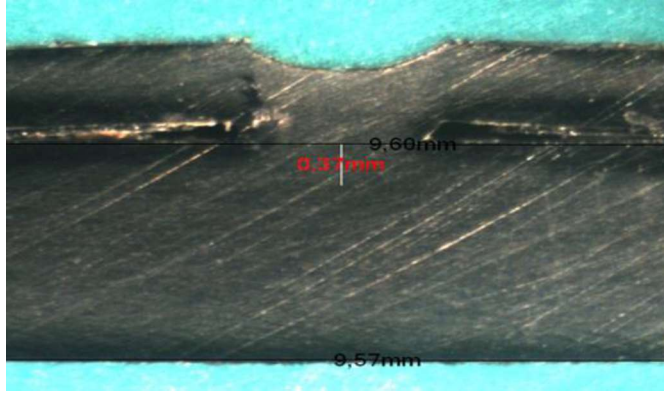
Şekil 4.4'te 1500W güç ve 15 mm/sn hızlarında kaynak işlemi uygulanan 6 numaralı numunenin kaynak bölgesinden alınan kesitteki makroyapısı verilmektedir.



Şekil 4.4. 6 numaralı numunenin makroyapısı

Şekil 4.4'te verilen 6 numaralı numunenin makro görüntüsünde kaynak nüfuziyeti miktarının 0.80 mm olduğu görülmektedir. Bu nüfuziyet değeri kalınlık yönünden, 2mm kalınlığındaki alt malzemenin yaklaşık %40'ına denk gelmektedir. Alt ve üst sac arasındaki boşluk kaynak prosesi esnasında buharlaşan galvanizi kaynak bölgesinden uzaklaştırmak için malzemeler arasında bırakılan açıklık kaynaklıdır. İncelenen makroyapı görüntüsüne göre kaynaklı bölgelerde herhangi bir kaynak hatasına (pasolar arası cüruf kalıntısı, yetersiz birleşme vb.) rastlanmamıştır.

Şekil 4.5'te 1500W güç ve 20 mm/sn hızlarında kaynak işlemi uygulanan 7 numaralı numunenin kaynak bölgesinden alınan kesitteki makroyapısı verilmektedir.



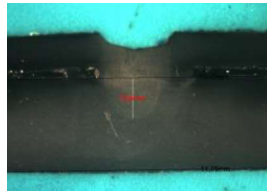
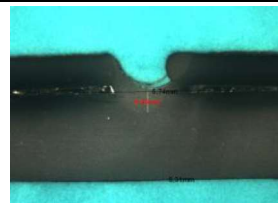
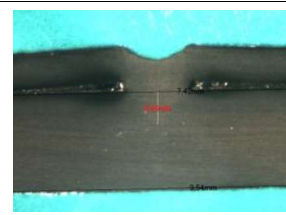
Şekil 4.5. 7 numaralı numunenin makroyapısı

Şekil 4.5'te verilen 7 numaralı numunenin makro görüntüsünde kaynak nüfuziyeti miktarının 0.37 mm olduğu görülmektedir. Bu nüfuziyet değeri kalınlık yönünden, 2mm kalınlığındaki alt malzemenin yaklaşık %18'ine denk gelmektedir. Alt ve üst sac arasındaki boşluk kaynak prosesi esnasında buharlaşan galvanizi kaynak bölgesinden uzaklaştırmak için malzemeler arasında bırakılan açıklık kaynaklıdır. İncelenen makroyapı görüntüsüne göre kaynaklı bölgelerde herhangi bir kaynak hatasına (pasolar arası cüruf kalıntısı, yetersiz birleşme vb.) rastlanmamıştır.

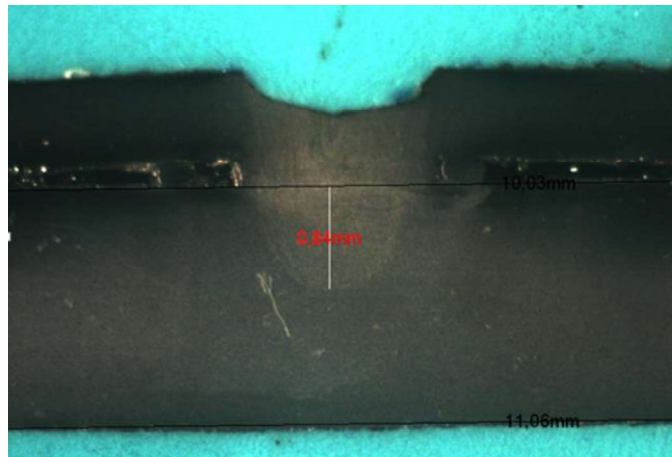
Çizelge 4.3'te 1800W sabit güçte, farklı kaynak hızlarında birleştirilen numunelerin kaynak bölgelerinin makroyapı görüntüleri verilmektedir.

1800W güç, 25mm/sn hızda numuneler arasında herhangi bir nüfuziyet oluşmayıp, iki sac birbirini tutmadığından bu numuneler için makroyapı incelemesi yapılamamıştır.

Çizelge 4.3. 1800W sabit güç ve değişken kaynak hızlarında numune makroyapı görüntüleri

NO	GÜÇ (W)	HIZ (mm/sn)	ODAK MESAFESİ (mm)	DURUM
9	1800	10	0	
10	1800	15	0	
11	1800	20	0	
12	1800	25	0	N.Yok

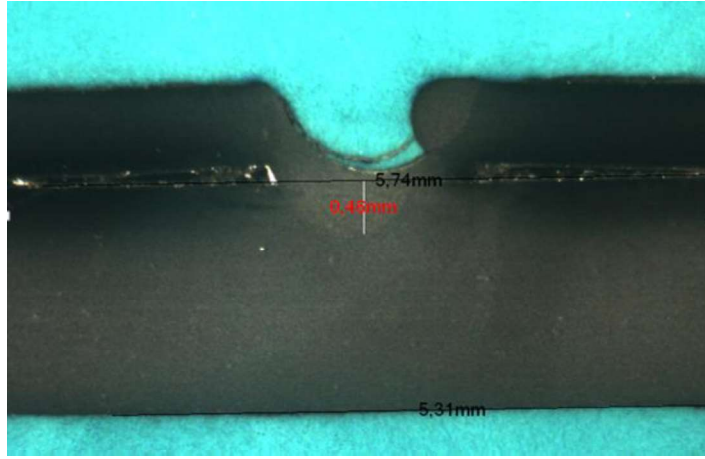
Şekil 4.6’da 1800W güç ve 10 mm/sn hızlarında kaynak işlemi uygulanan 9 numaralı numunenin kaynak bölgesinden alınan kesitteki makroyapısı verilmektedir.



Şekil 4.6. 9 numaralı numunenin makroyapısı

Şekil 4.6'da verilen 9 numaralı numunenin makro görüntüsünde kaynak nüfuziyeti miktarının 0.84 mm olduğu görülmektedir. Bu nüfuziyet değeri kalınlık yönünden, 2mm kalınlığındaki alt malzemenin yaklaşık %42'sine denk gelmektedir. Alt ve üst sac arasındaki boşluk kaynak prosesi esnasında buharlaşan galvanizi kaynak bölgesinden uzaklaştırmak için malzemeler arasında bırakılan açıklık kaynaklıdır. İncelenen makroyapı görüntüsüne göre kaynaklı bölgelerde herhangi bir kaynak hatasına (pasolar arası cüruf kalıntısı, yetersiz birleşme vb.) rastlanmamıştır.

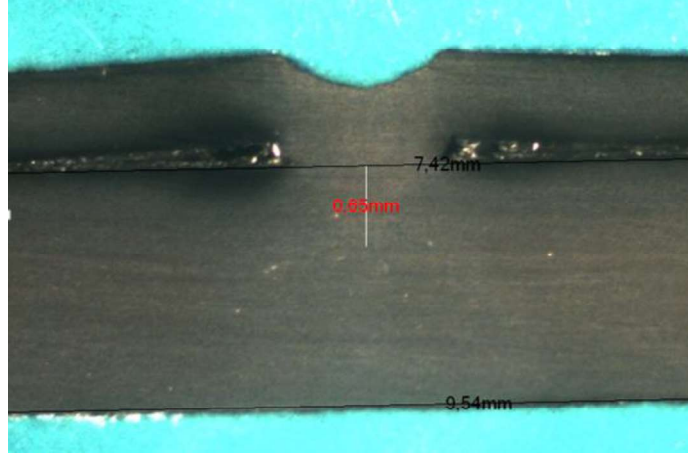
Şekil 4.7'de 1800W güç ve 15 mm/sn hızlarında kaynak işlemi uygulanan 10 numaralı numunenin kaynak bölgesinden alınan kesitteki makroyapısı verilmektedir.



Şekil 4.7. 10 numaralı numunenin makroyapısı

Şekil 4.7'de verilen 10 numaralı numunenin makro görüntüsünde kaynak nüfuziyeti miktarının 0.46 mm olduğu görülmektedir. Bu nüfuziyet değeri kalınlık yönünden, 2mm kalınlığındaki alt malzemenin yaklaşık %23'üne denk gelmektedir. Alt ve üst sac arasındaki boşluk kaynak prosesi esnasında buharlaşan galvanizi kaynak bölgesinden uzaklaştırmak için malzemeler arasında bırakılan açıklık kaynaklıdır. İncelenen makroyapı görüntüsüne göre kaynaklı bölgeden çapak sıçraması nedeniyle olabilecek malzeme eksilmesi görülmüştür.

Şekil 4.8'de 1800W güç ve 20 mm/sn hızlarında kaynak işlemi uygulanan 11 numaralı numunenin kaynak bölgesinden alınan kesitteki makroyapısı verilmektedir.



Şekil 4.8. 11 numaralı numunenin makroyapısı

Şekil 4.8’de verilen 11 numaralı numunenin makro görüntüsünde kaynak nüfuziyeti miktarının 0.65 mm olduğu görülmektedir. Bu nüfuziyet değeri kalınlık yönünden, 2mm kalınlığındaki alt malzemenin yaklaşık %32’ine denk gelmektedir. Alt ve üst sac arasındaki boşluk kaynak prosesi esnasında buharlaşan galvanizi kaynak bölgesinden uzaklaştırmak için malzemeler arasında bırakılan açıklık kaynaklıdır. İncelenen makroyapı görüntüsüne göre kaynaklı bölgelerde herhangi bir kaynak hatasına (pasolar arası cüruf kalıntısı, yetersiz birleşme vb.) rastlanmamıştır.

Sekiz farklı parametre kombinasyonu ile lazer kaynak işlemi tamamlanan sekiz farklı numunenin makroyapıları incelendiğinde maksimum nüfuziyet derinliğinin 1350W lazer gücü ve 10mm/sn kaynak hızı kullanılarak birleştirilen 1 numaralı numunede olduğu görülmüştür. Ayrıca numunenin makroyapısında herhangi bir cüruf veya yetersiz birleşme gibi bir problem gözlemlenmediğinden farklı lazer dikiş formlarının kıyaslandığı çalışmalarda bu parametreler ile ilerlenmiştir.

İncelenen makroyapılarda sabit lazer gücü ile kaynatılan numunelerdeki kaynak nüfuziyeti genellikle çalışılan düşük hızlarda daha yüksek olduğu görülmüştür.

4.2. Farklı Kaynak Dikiş Geometrilerinin Farklı Birleştirme Tiplerinde Etkileri

Parametre çalışmaları aşamasında lazer kaynak ile farklı parametlerde birleştirilen 0.7mm DX54D+Z ve 2mm DX54D+Z malzemelerinin kaynak bölgelerinden alınan kesitlerdeki makroyapıları incelenmiştir. Buradaki sonuçlara göre lazer dikiş geometrilerinin kıyaslanma çalışmasında kullanılmak üzere 1350W lazer gücü, 10mm/sn kaynak hızı, 0mm odak mesafesi parametreleri belirlenmiştir. Parametre çalışmalarında olduğu gibi bu aşamadaki lazer kaynak çalışmalarında da koruyucu gaz kullanılmamıştır.

Farklı lazer dikiş geometrileriyle farklı birleştirme tiplerinde kaynatılan malzemeler çekme testine tabi tutulmuş ve bu testler sonrası çekme mukavemetleri kıyaslanarak yorumlanmıştır.

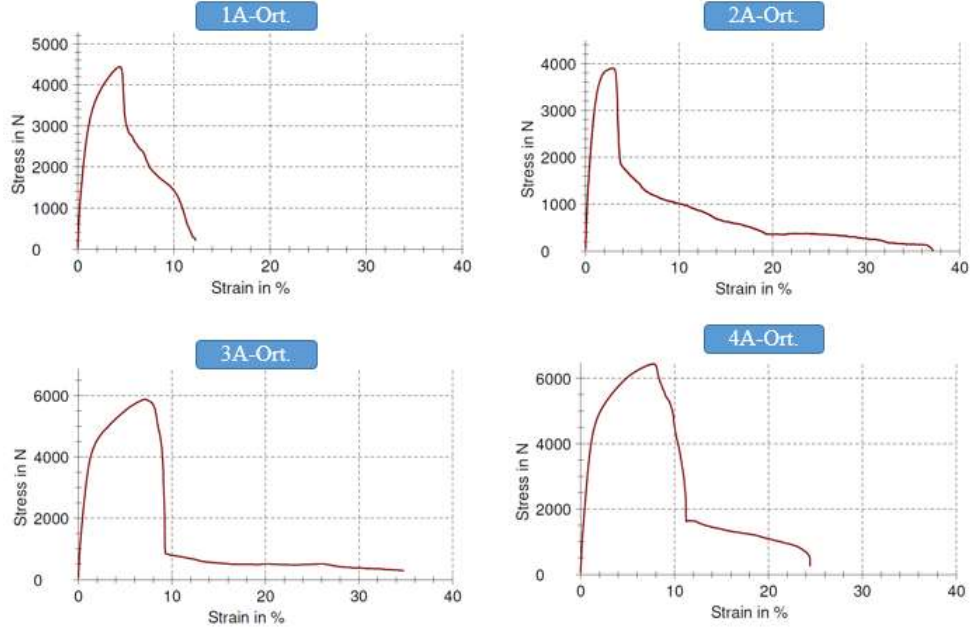
Birleştirilen numuneler DIN EN 10002 standardına uygun olarak çekme testlerine tabi tutulmuşlardır.

4.2.1. Bindirme Birleştirme Tipinde Farklı Lazer Dikiş Geometrilerinin Çekme Dayanımına Etkisi

Farklı lazer dikiş geometrileri kullanılarak bindirme birleştirme tipinde kaynaklanan numunelerin çekme dayanımları Çizelge 4.4'te verilmiştir. Her dikiş geometrisindeki numunelerin kendi içlerindeki çekme dayanım ortalamaları alınarak çizelgeye eklenmiştir. Numunelerin ortalama çekme dayanım grafikleri Şekil 4.9'da verilmiştir. Birim alana düşen maksimum yük kıyaslanmak istendiğinden çekme grafiklerindeki pik noktaları dikkate alınmıştır.

Çizelge 4.4. Bindirme birleştirme tipinde birleştirilen numunelerin çekme yükleri

NUNUME KODU	GÜÇ (W)	HIZ (mm/sn)	ODAK MESAFESİ (mm)	BİRLEŞTİRME TİPİ	DİKİŞ GEOMETRİSİ	ÇEKME YÜKÜ (N)
1A-tümü	1350	10	0	Bindirme	C	4440,78
2A-tümü	1350	10	0	Bindirme	Uzun C	3901,04
3A-tümü	1350	10	0	Bindirme	I	5877,22
4A-tümü	1350	10	0	Bindirme	S	6444,11



Şekil 4.9. Bindirme tipinde birleştirilen numunelerin çekme grafikleri

Çekme testleri sonrası numunelerden alınan örnek görseller Şekil 4.9’da paylaşılmıştır. Çekme testleri sonucunda bindirme birleştirme tipinde kaynatılan tüm numunelerde kopma, ana malzemede meydana gelmiştir.



Şekil 4.10. Bindirme tipinde birleştirilen numunelerin çekme testi sonrası görüntüleri

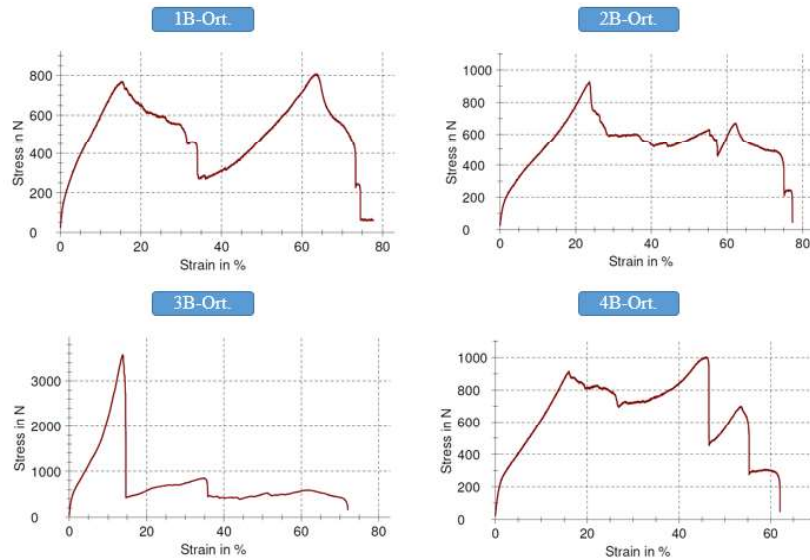
Çekme dayanım sonuçlarına göre, bindirme tipindeki birleştirmede kullanılan dört farklı lazer kaynak dikiş geometrisi içerisinde en yüksek çekme dayanımı S tipi dikiş geometrisinde, en düşük çekme dayanımı ise uzun C tipi dikiş geometrisinde görülmüştür.

4.2.2. Peel Birleştirme Tipinde Farklı Lazer Dikiş Geometrilerinin Çekme Dayanımına Etkisi

Farklı lazer dikiş geometrileri kullanılarak peel birleştirme tipinde kaynaklanan numunelerin çekme dayanımları Çizelge 4.5'te verilmiştir. Her dikiş geometrisindeki numunelerin kendi içlerindeki çekme dayanım ortalamaları alınarak çizelgeye eklenmiştir. Numunelerin ortalama çekme dayanım grafikleri Şekil 4.11'de verilmiştir. Birim alana düşen maksimum yük kıyaslanmak istendiğinden çekme grafiklerindeki pik noktaları dikkate alınmıştır.

Çizelge 4.5. Peel birleştirme tipinde birleştirilen numunelerin çekme yükü

NUNUME KODU	GÜÇ (W)	HIZ (mm/sn)	ODAK MESAFESİ (mm)	BİRLEŞTİRME TİPİ	DİKİŞ GEOMETRİSİ	ÇEKME YÜKÜ (N)
1B-tümü	1350	10	0	Peel	C	807,45
2B-tümü	1350	10	0	Peel	Uzun C	927,73
3B-tümü	1350	10	0	Peel	I	3574,7
4B-tümü	1350	10	0	Peel	S	1004,9



Şekil 4.11. Peel tipinde birleştirilen numunelerin çekme grafikleri

Çekme testleri sonrası numunelerden alınan örnek görseller Şekil 4.12’de paylaşılmıştır. Çekme testleri sonucunda peel birleştirme tipinde kaynatılan tüm numunelerde kopma, ana malzemede meydana gelmiştir.



Şekil 4.12. Peel tipinde birleştirilen numunelerin çekme testi sonrası görüntüleri

Çekme dayanım sonuçlarına göre, peel tipindeki birleştirmede kullanılan dört farklı lazer kaynak dikiş geometrisi içerisinde en yüksek çekme dayanımı I tipi dikiş geometrisinde, en düşük çekme dayanımı ise C tipi dikiş geometrisinde görülmüştür.

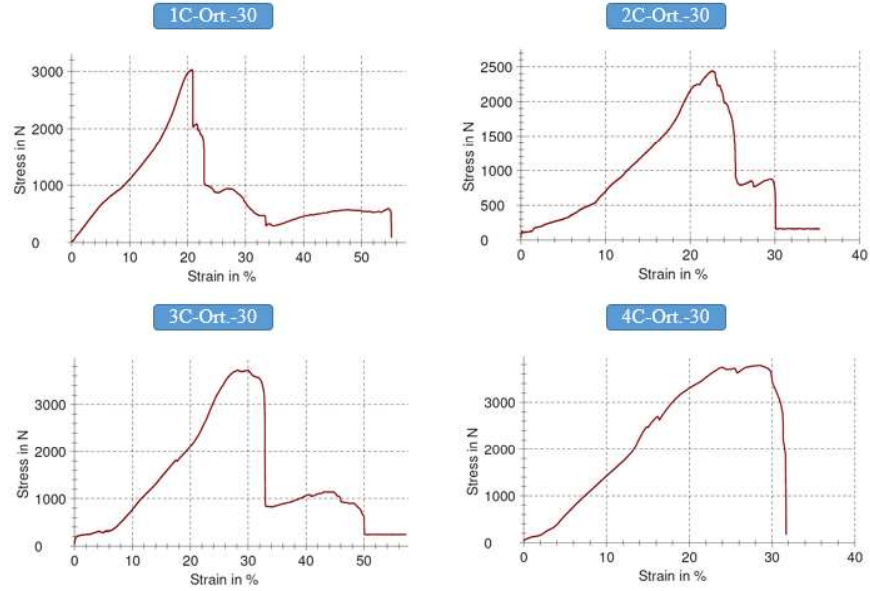
4.2.3. KS-II Birleştirme Tipinde Farklı Lazer Dikiş Geometrilerinin Çekme Dayanımına Etkisi

Farklı lazer dikiş geometrileri kullanılarak KS-II birleştirme tipinde kaynaklanan numunelerin çekme dayanımları Çizelge 4.6’da verilmiştir. Her dikiş geometrisindeki numunelerin kendi içlerindeki çekme dayanım ortalamaları alınarak çizelgeye eklenmiştir. Numunelerin ortalama çekme dayanım grafikleri çekme açılarına göre Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’te verilmiştir. Birim alana düşen maksimum yük kıyaslanmak istendiğinden çekme grafiklerindeki pik noktaları dikkate alınmıştır.

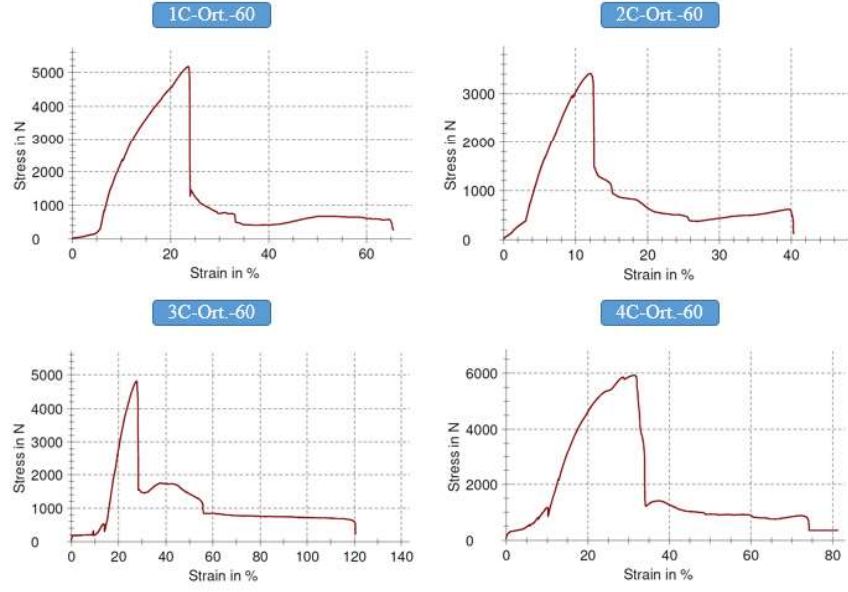
KS-II tipi birleştirmelerde her lazer dikiş formu için 6’şar numune hazırlanmış ve 30°, 60°, 90°’lerdeki çekme testlerinde her dikiş formundan 2 tane numune test edilmiştir. Çizelge ve grafiklerde bu iki numunenin ortalamaları belirtilmiştir.

Çizelge 4.6. KS-II birleştirme tipinde birleştirilen numunelerin çekme yükü

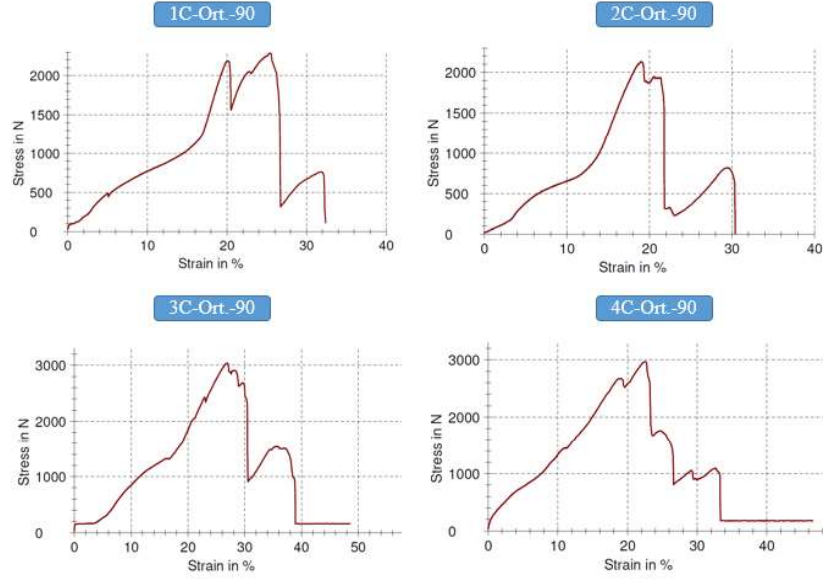
NUNUME KODU	GÜÇ (W)	HIZ (mm/sn)	ODAK MESAFESİ (mm)	BİRLEŞTİRME TİPİ	DİKİŞ GEOMETRİSİ	ÇEKME YÜKÜ (N)
1C-tümü-30	1350	10	0	KS-II	C	3029,52
2C-tümü-30	1350	10	0	KS-II	Uzun C	2443,19
3C-tümü-30	1350	10	0	KS-II	I	3723,64
4C-tümü-30	1350	10	0	KS-II	S	3783,13
1C-tümü-60	1350	10	0	KS-II	C	5179,55
2C-tümü-60	1350	10	0	KS-II	Uzun C	3414,52
3C-tümü-60	1350	10	0	KS-II	I	4811,37
4C-tümü-60	1350	10	0	KS-II	S	5935,75
1C-tümü-90	1350	10	0	KS-II	C	2287,12
2C-tümü-90	1350	10	0	KS-II	Uzun C	2132,78
3C-tümü-90	1350	10	0	KS-II	I	3035,99
4C-tümü-90	1350	10	0	KS-II	S	2970,46



Şekil 4.13. KS-II tipinde birleştirilen numunelerin 30° çekme grafikleri



Şekil 4.14. KS-II tipinde birleştirilen numunelerin 60° çekme grafikleri



Şekil 4.15. KS-II tipinde birleştirilen numunelerin 90° çekme grafikleri

Çekme testleri sonrası numunelerden alınan örnek görseller Şekil 4.16’te paylaşılmıştır. Çekme testleri sonucunda KS-II birleştirme tipinde kaynatılan tüm numunelerde kopma, ana malzemede meydana gelmiştir.



Şekil 4.16. KS-II tipinde birleştirilen numunelerin çekme testi sonrası görüntüleri

Çekme dayanım sonuçlarına göre, KS-II tipindeki birleştirmede kullanılan dört farklı lazer kaynak dikiş geometrisi içerisinde 30° çekmede en yüksek çekme dayanımı S tipi dikiş geometrisinde, en düşük çekme dayanımı ise uzun C tipi dikiş geometrisinde görülmüştür. 60° çekme sonuçlarında da en yüksek çekme dayanımı S tipi dikiş geometrisinde, en düşük çekme dayanımı ise uzun C tipi dikiş geometrisinde görülmüştür. Son olarak 90° çekme sonuçlarında ise en yüksek çekme dayanımı I tipi dikiş geometrisinde, en düşük çekme dayanımı ise yine uzun C tipi dikiş geometrisinde görülmüştür.

5. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında özellikle otomotiv sanayisinde, düşük ısı girdisi ile dar kaynak bölgesi, düşük distorsiyon olasılığı, farklı metallerin birleştirilmesi, derin nüfuziyet ve yüksek dayanım kabiliyetinden dolayı büyük öneme sahip olan lazer kaynak teknolojisinde kullanılabilen farklı dikiş formlarının ve bu formların farklı açılardaki çekme dayanımları incelenmiştir.

Bu kapsamda ilk olarak dikiş formlarının kıyaslamalarında kullanılacak optimum parametreyi belirlemek için parametre çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Parametre çalışmalarında 0.7mm ve 2mm kalınlıklarında DX54D+Z çeliği kullanılmıştır. Kaynak nüfuziyetinde en etkili iki parametre olan lazer gücü ve kaynak hızı parametreleri değişken olarak belirlenmiş odak mesafesi 0 mm olacak şekilde tüm kaynak proseslerin sabit kabul edilmiştir. Lazer kaynak işlemlerinde koruyucu gaz kullanımı olmamıştır. Bu çalışmalarda lazer gücü ve kaynak hızı parametrelerinin kaynak nüfuziyetine etkileri incelenmiştir. Numunelerden alınan kaynak kesitlerinin makroyapıları incelendiğinde en yüksek kaynak nüfuziyetinin 1350W lazer gücü ve 10mm/sn kaynak hızı parametreleriyle birleştirilen numunede olduğu görülmüştür. Yapılan çalışmalarda sabit lazer gücü ve odak mesafesinde, kaynak hızının artmasıyla kaynak nüfuziyetinde azalma olduğu gözlenmiştir.

Tezin ikinci kısmında parametre çalışmalarında kaynak nüfuziyeti konusunda optimum olarak görülen parametlerle, farklı lazer dikiş formlarında ve farklı birleştirme tiplerinde numuneler hazırlanmış, çekme testlerine tabi tutulmuş ve farklı lazer kaynak dikişlerinin çekme dayanımları birbirleriyle kıyaslanmıştır. Malzeme olarak parametre çalışmalarında da kullanılan 0.7mm ve 2mm kalınlıklarında DX54D+Z çeliği kullanılmıştır.

Gerçekleştirilen testler sonucunda lazer kaynak prosesinin, stabil olmayarak aynı parametrelerle gerçekleştirilen aynı çalışmalarda farklı sonuçlar verebildiği görülmüştür.

Hazırlanan deney numunelerinin tabii tutulduğu çekme testleri sonuçlarında genel olarak belirlenen sabit lazer gücü, kaynak hızı ve odak mesafesi parametrelerine göre uzun C tipi lazer kaynak dikiş formunun farklı çekme koşullarında, diğer dikiş formlarının sağladığı çekme dayanıma göre zayıf kaldığı görülmüştür. Bindirme, KS-II-30° ve KS-II-60° birleştirme tiplerinde S tipi lazer kaynak dikiş geometrisinin, peel ve KS-II-90° birleştirme tiplerinde ise I tipi lazer kaynak dikiş geometrisinin diğerlerinden daha iyi çekme dayanımı sergilediği gözlenmiştir.

Ek olarak, lazer kaynak uygulanacak ürünün maruz kalacağı yük koşullarına ve ürün beklentilerine göre; farklı dikiş formlarının kullanılabilirliği, lazer kaynak prosesinin temassız, lazer ışını ile karmaşık geometrili ürünlerde de erişim kolaylığı sağlayabileceği tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

Abbott, D. H, Albright C. E. 1994. CO₂ Shielding Gas Effects in Laser Welding Mild Steel. *Journal of Laser Applications*, 6: 69-80.

Afonso, V., Roberto, J., Rossi, W. De 2010. Pulsed Nd : YAG laser seam welding of AISI 316L stainless steel thin foils. *Journal of Materials Processing Tech.*, 210(14): 1838–1843.

Altıntaş, H.İ. 2018. Plastik Enjeksiyon Kalıplarının Onarım Kaynağında Tungsten Elektrod İle Koruyucu Gazaltı Kaynağı ve Lazer Kaynak Parametreleri ve Etkileri. *Yüksek Lisans Tezi*, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

Anonim, 2018. Galvaniz Sonrası Kaynak. <http://www.telepatireklamcilik.com/yazi-detay/100-galvaniz-sonrasikaynak-telepati-reklamcilik.html> (Erişim Tarihi : 30/12/2020)

Arcan, A. 2011. Lazer Işını İle Metallerin Kesilmesine Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir.

Arslan, M. 2017. Katı Hal Lazerleri Nedir. www.muhendisbeyinler.net (Erişim tarihi : 20.12.2020)

Aydın, Y.O., Salman, H.S. 2014. Otomotiv Endüstrisinde Lazer Uygulamaları. Fiber LAST Fiber Lazer Sistemleri ve Teknolojileri Müh. Bil. San. Ve Tic. A.Ş., Ankara.

Aytan, G. 2015. Farklı Kalitedeki Galvanizli Çeliklerde Fırın Sertleştirme Parametrelerinin Mekanik Özelliklere Etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

Basov, N. G., Danilychev, V. A., Popov, Y.M., Khodkevich, D.D. 1970. Laser Operating in The Vacuum Region of The Spectrum By Excitation of Liquid Xenon With an Electron Beam. *JETP Letters*, 12: 329-331.

Buchfink, G. 2007. The Laser as a Tool: A light beam conquers industrial production. Vogel Communications Group GmbH & Co. KG, Wurzburg, Germany, 280 pp.

Convissar R. A. 2016. Principles and Practice of Laser Dentistry. Elsevier Mosby Inc., New York, USA, 328 pp.

Çam, G., Koçak, M. 1998. Progress in Joining of Advanced Materials, *International Materials Reviews*, 43 (1): 1-44.

Çelen, S. 2006. Paslanmaz Çeliklerin Lazer Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Bağlantının Dayanım Ve Korozyon Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir.

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

Deacon D. A. G., Elias L. R., Madey J. M. J., Raiman G. J., Schwettman H. A., Smith T. I. 1977. First Operation of a Free-Electron Laser, *Physical Review letters*, 38: 892-894.

Dinç, B., Or, M.E. 2014. Farklı Tipte Lazerlerin Veteriner Hekimlikte Kullanımı, *TÜBAV Bilim Dergisi*, 3: 1-10.

Duley W. W., Mao Y. L., Kinsman G. 1991. Laser and Electron Beam. Proceedings Conference Columbia University, New York, USA, 206 pp.

Duley, W. W. 1998. Laser Welding. Wiley-Interscience, New York, USA, 264 pp.

Fahlström, K. 2015. Laser Welding of Boron Steels for Light-Weight Vehicle Applications. *Licentiate Thesis*, University West, Department of Engineering Science Sweden.

Geusic J. E., Marcos H. M., and Van Uitert L. G. 1964. Laser Oscillations In NdDoped Yttrium Aluminum, Yttrium Gallium and Gadolinium Garnets. *Applied Physics Letters*, 4: 182-184.

Gribbin, J. 2000. Q is For Quantum: an Encyclopedia of Particle Physics. Touchstone, New York, USA, 560 pp.

Güneş, C. 2012. Benzinli Enjektörlerin Lazer Kaynağı ve Lazer Kaynak Parametreleri. *Yüksek Lisans Tezi*, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

Hall R. N., Fener G. E., Kingsley J. D., Soltys T. J, and Carlson R. O. 1962. Coherent Light Emission From GaAs Junctions. *Physical Review letters*, 9: 366-368.

Hull, D., Souders, J. 2011. Fiber Laser Applications. The National Center for Optics and Photonics Education, Texas, USA.

Ion, J. C. 2005. Laser Processing of Engineering Materials. Elsevier Butterworth, Heinemann, ABD, 569 pp.

Jokinen, T. 2004. Novel ways of using Nd:YAG laser for welding thick section austenitic stainless steel. VTT Technical Research Centre, Finland.

Kannatey, E. 2009. Principles of Laser Materials Processing. John Wiley and Sons Inc., New Jersey, USA, 820 pp.

Karaağaçlı, A. 2019. Otomotiv Uygulamalarında Lazer Kaynak Parametrelerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*, AKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Afyon.

Karaaslan, A., Yumurtacı, S., Sönmez, N., 2001. Laser ışını ile birleştirilmiş farklı malzemelerin kaynak dikişlerinde sertlik değişimleri. II Makine Malzemesi ve İmalat Teknolojisi Sempozyumu, 7-9 Kasım 2001, Celal Bayar Üniversitesi, Manisa.

Katayama, S. 2013. Handbook of Laser Welding Technologies. Woodhead Publishing, Cambridge, UK, 632 pp.

Kim, J., Oh, S., Ki, H., 2015. A study of keyhole geometry in laser welding of zinc-coated and uncoated steels using a coaxial observation method. *Journal of Materials Processing Technology*, 225: 451–462.

Kusinski, J. 2001. Lasers and applications of lasers in material engineering. Scientific books of Kielce University of Technology, Mechanics.

Limmaneevichitr C., Kou, S. 2002. Visualization of Marangoni Convection in Simulated Weld Pool. *Welding Journal*, 79: 231-235.

Majumdar J. D., Manna, I. 2003. Laser processing of materials, *Sadhana*, 28: 495– 497.

Marder A.R. 2000. The metallurgy of zinc-coated steel. Department of Materials Science and Engineering of Lehigh University, Bethlehem, USA.

Matthews, D.L., Hagelstein, P.L., Rosen, M. D., Eckart, M. J., Ceglio, N. M., Hazi, A. U., Meddecki, H., MacGowan, B. J., Trebes, J. E., Whitten, B. L., Campbell, E. M., Hatcher, C. W., Hawryluk, A. M., Kauffman, R. L., Pleasance, L. D., Rambach, G., Scofield, J. H., Stone, G., Weaver, T. A. 1985. Demonstration of a Soft X-Ray Amplifier. *Physical Review Letters*, 54: 110-113.

Meng, Y., Hrubciak, R., Rod, E., Boehler, R., Shen, G. 2015. New developments in laser-heated diamond anvil cell with in situ synchrotron x-ray diffraction at High Pressure Collaborative Access Team. *Review of Scientific Instruments*, 86: 1-7.

Öner, U. 2007. Lazerle kesme parametrelerinin kesme aralığı ve yüzey kalitesine üzerindeki etkisinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.

Özden, H. 2008. Sanayide Kullanılan Yüksek Güçlü Lazer Makineleri ve Lazer İmalat Yöntemleri. *Makine Tek.*, 124: 152-160.

Öztürk, F., Toros, S., Esener E., Uysal, E. 2009. Otomotiv Endüstrisinde Yüksek Mukavemetli Çeliklerin Kullanımının İncelenmesi. *Mühendis ve Makina*, 596: 44-49

Palais C. J. 1992. Fiber Optic Communication. Prentice Hall, New Jersey, USA, 180pp.

Patel C. K. N. 1964. Interpretation of CO₂ Optical Maser Experiments. *Physical Review Letters*, 12: 588-590.

Püskülcü, G., Koçlular, F. 2009. Lazer Kaynak Yöntemi ve Uygulaması. *Mühendis ve Makine*, 50: sayı:599.

Schawlow A. L., Townes C. H. 1958. Infrared and Optical Masers, *Physical Review*, 112: 1940-1949.

Sıray, B. 2012. Lazer Nedir? Fiziği ve Doku ile Etkileşimi. *Türkiye Klinikleri J Dental SciSpecial Topics*, 3: 1-6.

Sivagurumanikandan, N., Saravanan, S., Kumar, G. S., Raju, S. 2018. Optik Prediction and optimization of process parameters to enhance the tensile strength of Nd : YAG laser welded super duplex stainless steel. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 157: 833–840.

Sorokin P. P., and Lankard J. R. 1966. Stimulated Emission Observed From an Organic Dye Chloroaluminum Phtalocyanine. *IBM Journal of Research and Development*, 10: 162-163.

Sun, Q., Di, H. S., Li, J. C., Wang, X. N. 2016. Effect of pulse frequency on microstructure and properties of welded joints for dual phase steel by pulsed laser welding. *Materials and Design*, 105: 201–211.

Szöke A., Jawan A. 1963. Isotop Shift and Saturation Behavior of The 1.15-M Transition Of Ne. *Physical Review letters*, 10: 521-524.

Tekin, G. 2019. Otomotiv Sektöründe Kullanılan Elektrik Direnç Kaynağına Alternatif Lazer Nokta Kaynağının Mekanik ve Termal Etkisinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, UÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Otomotiv Mühendisliği Anabilim dalı, Bursa.

Wirth, P. 2004. Introduction to Industrial Laser Material Processing, Hamburg, Germany.

You, D. Y., Gao, X. D., Katayama, S. 2013. Review of laser welding monitoring. *Science and Technology of Welding and Joining*, 19(3): 181–201.

Yüce, C. 2018. Yüksek Mukavemetli Çelikler ile Alüminyum Alaşımlarının Lazer Kaynağı ile Birleştirilmesinde Kaynak Parametrelerinin Bağlantı Üzerine Etkilerinin İncelenmesi. *Doktora Tezi*. UÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.

Yüce, C., Tutar, M., Karpat, F., Yavuz, N. 2016. The Optimization of Process Parameters and Microstructural Characterization of Fiber Laser Welded Dissimilar HSLA and MART Steel Joints. *Metals. Journal of Mechanical Engineering*, 6(10):, 245.