

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

**OTOMOTİV YAN SANAYİNDEKİ LAZER UYGULAMALARINDA ORTAYA  
ÇIKAN HATALARIN ANALİZİ VE AZALTMA YOLLARININ İNCELENMESİ**

**REGAİB UĞUR ERTEM**

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

**DANIŞMAN  
PROF. DR. SELAHATTİN YUMURTACI**

**İSTANBUL, 2015**

T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**OTOMOTİV YAN SANAYİNDEKİ LAZER UYGULAMALARINDA ORTAYA ÇIKAN  
HATALARIN ANALİZİ VE AZALTMA YOLLARININ İNCELENMESİ**

Regaib Uğur ERTEM tarafından hazırlanan tez çalışması 27.11.2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

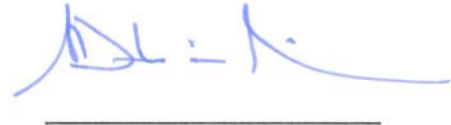
Prof. Dr. Selahattin YUMURTACI  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Prof. Dr. Selahattin YUMURTACI  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet KARAASLAN  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Adnan DİKİCİOĞLU  
İstanbul Teknik Üniversitesi



## ÖNSÖZ

---

Yüksek lisans tez çalışmamda maddi ve manevi desteğini esirgemeyen, yoğun çalışmalarımı duyarlılıkla karşılayıp devamlı yanımda olan eşim Gizem ERTEM' e, tez çalışmamda endüstriyel destek ve deney cihazlarını sağlayan Robert Bosch firmasına, tez danışman hocam olan, bilgisini benimle paylaşan ve tecrübelerinden yararlandığım sayın Prof. Dr. Selahattin Yumurtacı' ya teşekkürlerimi borç bilirim.

Kasım, 2015

Regaib Uğur ERTEM

## İÇİNDEKİLER

---

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	viii
KISALTMA LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ .....	xiii
ÖZET .....	xiv
ABSTRACT.....	xv
<b>BÖLÜM 1</b>	
<b>GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1    Literatür Özeti .....	1
1.2    Tezin Amacı .....	4
1.3    Hipotez .....	5
<b>BÖLÜM 2</b>	
<b>LAZER .....</b>	<b>6</b>
2.1    Lazerin Tarihçesi.....	8
2.2    Lazer Işını Oluşumu .....	9
2.2.1    Uyarılmış Işıma .....	11
2.3    Lazer Işınlarnın Özellikleri .....	12
2.4    Lazer Çeşitleri.....	13
2.5    Lazer Komponentleri.....	13
2.6    Katı Hal Lazeri.....	17
<b>BÖLÜM 3</b>	
<b>LAZER KAYNAĞI.....</b>	<b>20</b>
3.1    Lazer Nokta Kaynağı.....	21
3.2    Lazer Nüfuziyet Kaynağı.....	22

3.3	Lazer Kaynak Parametresini Etkileyen Parametreler.....	22
3.3.1	Lazer Güç Yoğunluğunun Değişimi ve Kaynak Hızı .....	23
3.3.2	Malzeme Özellikleri .....	24
3.3.3	Gerilme Durumu .....	25
3.3.4	Parça Kalınlığı.....	25
3.3.5	İşlem Gazı.....	25
3.3.6	Odak Yeri .....	26
<b>BÖLÜM 4</b>		
HDEV 4. 1	LAZER KAYNAKLI ENJEKSİYON SİSTEMLERİ .....	29
4.1	HDEV 4. 1 Ürünleri ve Çalışma Prensipleri.....	29
4.1.1	Ventil Grubu .....	31
4.1.2	Aktör Grubu .....	31
4.1.3	Bağlantı Grubu .....	32
4.2	HDEV 4. 1 Üretim Adetleri .....	33
4.3	Aktör Gövdesi ve Bağlantı Kovanı Parçaları.....	35
4.4	Aktör Gövdesi ve Bağlantı Kovanı Lazer Kaynağı .....	36
4.4.1	Kullanılan Ekipmanlar .....	36
4.4.2	Kullanılan Kaynak Programı .....	36
4.4.3	Lazer Kaynak Parametreleri ve Koruyucu Gaz.....	36
4.5	Lazer Kaynak Dikiş Resimleri.....	39
4.6	Tespit Edilen Hatalı Kaynaklar.....	39
4.6.1	Lazer Kaynağı Hatalı Dikiş Bölgelerinin Tespiti .....	43
4.7	Lazer Kaynağı Hata Çeşitlerinin Dağılımı.....	44
<b>BÖLÜM 5</b>		
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	.....	47
5.1	Kullanılan Malzemeler .....	47
5.2	Kaynak Parametre Değişimleri.....	48
5.2.1	Deneme Sonuçları .....	49
5.3	Malzeme Yüzey Analizleri .....	55
5.3.1	EDX Analizi .....	55
5.3.2	Geometrik Ölçü Kontrolü.....	56
5.3.3	Makroskopik Yüzey Analizi .....	60
5.4	Parçalara Uygulanan Ön İşlemlerin Etkisi .....	62
5.4.1	1. Deneme .....	64
5.4.2	2. Deneme .....	66
5.4.3	3. Deneme .....	67
5.4.4	4. Deneme .....	67
5.4.5	5. Deneme .....	68
5.5	Kaynak Hızının Değişimi .....	69
5.5.1	Deneme Sonuçları .....	70
<b>BÖLÜM 6</b>		
SONUÇ VE ÖNERİLER	.....	73

KAYNAKLAR.....	76
ÖZGEÇMİŞ.....	79

## SİMGE LİSTESİ

---

AG	Aktör gövdesi
ASS	Bağlantı kovanı
C	Karbon
Cd	Kadmiyum
Ceş	Karbon eşdeğeri
Cr	Krom
Db	Odak leke çapı
E	Enerji farkı
ET	Nüfuziyet
E1	Taban enerji seviyesi
E2	Üst enerji seviyesi
Fc	Kolimasyon çemberi
Fe	Demir
Ff	Fokus seviyesi
H	Plank sabiti
He	Helyum
Mn	Mangan
Mo	Molibden
N	Newton
NB	Dikiş genişliği
Nd	Neodyum
Ni	Nikel
P	Güç
Pd	Güç yoğunluğu
Zn	Çinko
Xe	Ksenon

## KISALTMA LİSTESİ

---

BMW	Bayerische Motoren Werke
CFO	Center Failure Orientation
EDX	Eneji Dağılımlı X Işını
HDEV	Hoch Druck Einspritz Ventil
NOK	Not Okey



## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1	Lazer uygulamaları ..... 6
Şekil 2. 2	Otomotiv üretiminde lazer kullanımı ..... 7
Şekil 2. 3	Bohr atom modeli ..... 9
Şekil 2. 4	Rutherford atom modeli ..... 9
Şekil 2. 5	Elektromanyetik ışınım ..... 10
Şekil 2. 6	Uyarılmış ışınım ..... 10
Şekil 2. 7	Işın çeşitleri ..... 11
Şekil 2. 8	Uyarılmış atomun foton yayması ..... 12
Şekil 2. 9	Lazer çeşitleri ..... 13
Şekil 2. 10	Lazer komponentleri ..... 14
Şekil 2. 11	Lazer komponentleri ..... 15
Şekil 2. 12	Lazer komponentleri ..... 15
Şekil 2. 13	Lazer komponentleri ..... 16
Şekil 2. 14	Lazer komponentleri ..... 16
Şekil 2. 15	Nd-YAG lazeri ..... 17
Şekil 2. 16	Nd-YAG dalga boyu ..... 18
Şekil 2. 17	Nd-YAG kristali ..... 18
Şekil 2. 18	Nd-YAG lazer darbeleri çalışması ..... 19
Şekil 3. 1	Lazer kaynağı şematik resmi ..... 20
Şekil 3. 2	Lazer nokta kaynağı ..... 21
Şekil 3. 3	Lazer nüfuziyet kaynağı ..... 22
Şekil 3. 4	Kaynak hızının kaynak derinliğine etkisi ..... 24
Şekil 3. 5	Odak noktasına bağlı olarak plazma oluşumu ..... 27
Şekil 3. 6	Odak noktasının nüfuziyete etkisi ..... 27
Şekil 4. 1	Enjektör ..... 30
Şekil 4. 2	Ventil grubu ..... 31
Şekil 4. 3	Aktör grubu ..... 31
Şekil 4. 4	Bağlantı grubu ..... 32
Şekil 4. 5	Bağlantı grupları ..... 32
Şekil 4. 6	Enjektör sistemi ..... 33
Şekil 4. 7	Hatlara göre iskarta dağılımı ..... 35
Şekil 4. 8	Aktör gövdesi ve bağlantı kovani ..... 35
Şekil 4. 9	Lazer punta gücü değişimi ..... 37
Şekil 4. 10	Lazer nüfuziyet kaynak gücü değişimi ..... 38

Şekil 4. 11	Kaynak dikiş pozisyonu .....	38
Şekil 4. 12	Koruma gazı pozisyonu .....	38
Şekil 4. 13	Kaynak dikişi iyi .....	39
Şekil 4. 14	Kaynak dikişinde derinlik .....	39
Şekil 4. 15	Kaynak sıçraması.....	39
Şekil 4. 16	Kaynak dikiş formu bozuk ve hafif renklenme.....	39
Şekil 4. 17	Kaynak dikişinde delik.....	40
Şekil 4. 18	Kaynak dikişinde boşluk.....	41
Şekil 4. 19	Kaynak dikişinde boşluk.....	41
Şekil 4. 20	Kaynak dikişinde boşluk.....	41
Şekil 4. 21	Kaynak dikişinde boşluk.....	41
Şekil 4. 22	Kaynak dikişinde yüzey form bozukluğu ve boşluk oluşumu.....	42
Şekil 4. 23	Kaynak dikişinde boşluk oluşumu .....	42
Şekil 4. 24	Kaynak dikişinde yüzey form bozukluğu ve boşluk oluşumu.....	42
Şekil 4. 25	Kaynak dikişinde yüzey form bozukluğu ve boşluk oluşumu.....	42
Şekil 4. 26	Kaynak dikişindeki hataların dağılımı.....	43
Şekil 4. 27	Kaynak dikişindeki hataların dağılımı.....	44
Şekil 4. 28	Iskarta sebeplerinin dağılımı.....	45
Şekil 4. 29	Hata tipleri ve yüzdesel dağılımı .....	45
Şekil 4. 30	Hata tipleri ve yüzdesel dağılımı .....	46
Şekil 5. 1	Aktör gövdesi aktör zırhı .....	48
Şekil 5. 2	Bağlantı kovanı elemanı .....	48
Şekil 5. 3	Dikiş geometrisi.....	50
Şekil 5. 4	Birinci parça dikiş geometrisi sol ve sağ resmi.....	54
Şekil 5. 5	İkinci parça dikiş geometrisi sol ve sağ resmi .....	54
Şekil 5. 6	Üçüncü parça dikiş geometrisi sol ve sağ resmi.....	54
Şekil 5. 7	Yalpalama .....	56
Şekil 5. 8	Ortak merkezlilik .....	57
Şekil 5. 9	Dış çap ölçümü .....	57
Şekil 5. 10	İç çap ölçümü .....	57
Şekil 5. 11	Ortalama pürüzlülük derinliği .....	58
Şekil 5. 12	Profil derinliği.....	58
Şekil 5. 13	Ortak merkezlilik.....	59
Şekil 5. 14	Yalpalama.....	59
Şekil 5. 15	Düzlemsellik .....	59
Şekil 5. 16	Ortak merkezlilik.....	60
Şekil 5. 17	Yalpalama.....	60
Şekil 5. 18	1.4301-X5CrNi18-8 çeliği yüzey analizi .....	61
Şekil 5. 19	1.4418 X4CrNiMo16-5-1 çeliği yüzey analizi .....	62
Şekil 5. 20	Seri parçalar presleme kuvveti .....	64
Şekil 5. 21	Tensitsiz yıkanan parçalara ait presleme kuvveti .....	65
Şekil 5. 22	Seri parçalar presleme kuvveti .....	65
Şekil 5. 23	Tensitsiz yıkanan parçalara ait presleme kuvveti .....	66
Şekil 5. 24	Seri parça denemesi.....	67
Şekil 5. 25	Seri parça denemesi.....	68
Şekil 5. 26	Seri parça denemesi.....	68

Şekil 5. 27	0.906 m/dk kaynak hızındaki kaynak dikiş sol ve sağ bölgeleri .....	70
Şekil 5. 28	0.978 m/dk kaynak hızındaki kaynak dikiş sol ve sağ bölgeleri .....	70
Şekil 5. 29	1.059 m/dk kaynak hızındaki kaynak dikiş sol ve sağ bölgeleri .....	71
Şekil 5. 30	1.141 m/dk kaynak hızındaki kaynak dikiş sol ve sağ bölgeleri .....	71
Şekil 5. 31	1.222 m/dk kaynak hızındaki kaynak dikiş sol ve sağ bölgeleri .....	72
Şekil 5. 32	1.630 m/dk kaynak hızındaki kaynak dikiş sol ve sağ bölgeleri .....	72

## ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 3. 1	Karbon eş değerine göre ön işlemlerin gereksinimi..... 25
Çizelge 4. 1	SL1 üretim ve ıskarta adetleri ..... 33
Çizelge 4. 2	SL2 üretim ve ıskarta adetleri ..... 34
Çizelge 4. 3	SL3 üretim ve ıskarta adetleri ..... 34
Çizelge 4. 4	Toplam üretim ve ıskarta adetleri ..... 34
Çizelge 4. 5	Lazer punta gücü değişimi ..... 37
Çizelge 4. 6	Lazer nüfuziyet kaynak gücü değişimi ..... 38
Çizelge 5. 1	1.4301-X5CrNi18-8 çeliğinin kimyasal bileşenleri ..... 47
Çizelge 5. 2	1.4418-X4CrNiMo16-5-1 çeliğinin kimyasal bileşenleri ..... 47
Çizelge 5. 3	Lazer kaynak parametreleri ..... 48
Çizelge 5. 4	Kaynak süresince güç değişimi ..... 48
Çizelge 5. 5	Lazer punta parametreleri ..... 49
Çizelge 5. 6	Birinci deney geometrik ölçüm sonuçları ..... 50
Çizelge 5. 7	Lazer punta süresi değişimi ..... 51
Çizelge 5. 8	İkinci deney geometrik ölçüm sonuçları ..... 51
Çizelge 5. 9	Lazer punta parametreleri ..... 51
Çizelge 5. 10	Üçüncü deney geometrik ölçüm sonuçları ..... 52
Çizelge 5. 11	Lazer kaynak güç değişimi ..... 52
Çizelge 5. 12	Dördüncü deney geometrik ölçüm sonuçları ..... 52
Çizelge 5. 13	Lazer kaynak gücünün zamana göre değişimi ..... 53
Çizelge 5. 14	Beşinci deney geometrik ölçüm sonuçları ..... 53
Çizelge 5. 15	Birinci parça geometrik ölçüm sonuçları ..... 54
Çizelge 5. 16	İkinci parça geometrik ölçüm sonuçları ..... 54
Çizelge 5. 17	Üçüncü parça geometrik ölçüm sonuçları ..... 55
Çizelge 5. 18	Kimyasal bileşenler ..... 55
Çizelge 5. 19	Kimyasal bileşenler ..... 56
Çizelge 5. 20	Birinci yıkama programı parametreleri ..... 63
Çizelge 5. 21	Dördüncü yıkama programı parametreleri ..... 63
Çizelge 5. 22	Yıkama denemesi sonuçları ..... 66
Çizelge 5. 23	Deneme sonuçları ..... 67
Çizelge 5. 24	Deneme sonuçları ..... 68
Çizelge 5. 25	Deneme sonuçları ..... 69

## OTOMOTİV YAN SANAYİNDEKİ LAZER UYGULAMALARINDA ORTAYA ÇIKAN HATALARIN ANALİZİ VE AZALTMA YOLLARININ İNCELENMESİ

Regaib Uğur ERTEM

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Selahattin YUMURTACI

İmalat sektörü, seri üretime dayalı, ekonomik ve güvenli bir çalışma ortamı sağlayan yeni imalat yöntemlerine ihtiyaç duymaktadır. Özellikle son yıllarda büyük bir gelişme gösteren ve seri üretime dahil olan lazer kaynak yöntemi, alışlagelmiş imalat yöntemlerine göre sahip olduğu avantajlar nedeniyle günümüz imalat sektörünün etkili ve giderek payını artıran yöntemlerinden birisi haline gelmiştir.

Lazer kaynağının uygulama alanlarından birisi de, benzinli ve dizel araç sistemleri için ürün tedarik eden otomotiv yan sanayidir. Ürünler arasında dizel sistemler için enjektör gövdesi, enjektör iğnesi ve ayrıca benzinli sistemler için piezo enjektörler yer almaktadır. Lazer kaynağına tabi tutulan bu ürünlerin kaynak bölgeleri infrared sensörlü pyrometre adlı kameralarla incelendiğinde, delik ve boşluk gibi hatalara rastlanmaktadır. Kaynak prosesi sonucu ortaya çıkan bu hatalar ıskarta sayılarında da büyük artışlara neden olmaktadır.

Bu tez çalışmasında öncelikle lazer kaynağı incelenecek, kaynak prosesi sonucu ıskartaya ayrılan hatalı parçalarda hata analizleri yapılarak, kaynak parametrelerinde yapılması gereken değişiklikler belirlenip hataların en aza indirilmesi ile kaynak kalitesinin araştırılması yapılacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Lazer kaynak, benzinli enjektörler, kaynak parametreleri

**THE ANALYSIS OF DEFECTS THAT OCCUR IN LASER APPLICATIONS IN  
AUTOMOTIVE SUPPLY INDUSTRY AND EXAMINE WAYS TO REDUCE  
WELDING DEFECTS**

Regaib Uğur ERTEM

Department of Mechanical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Selahattin YUMURTACI

The manufacturing sector, based on mass production, economic and providing a safe working environment requires new manufacturing methods. Especially in recent years, including a large series production development and the laser welding method which, according to conventional manufacturing methods due to its advantages in today' s manufacturing sector, which has become one of the effective methods and gradually increase the share of.

One of the application areas of the laser welding, to supply product for the gasoline and diesel vehicles in the automotive industry. Diesel systems' s products are injector body and the injector needle. Gasoline systems' s products are piezo enjectors. Infrared pyrometer sensor cameras are analyzed from the welding regions of the products, such as holes and space defects found. The defects resulting from the welding process causes large increases in the number of scraps.

In this study, firstly laser welding examined, parts which are scraps to the defect analysis, changes in welding parameters to be determined and investigate the quality of the welding. Welding defects will be minimized.

**Keywords:** Laser welding, gasoline injectors, welding parameters

#### 1.1 Literatür Özeti

Lazer kaynağı, birleştirilecek malzemelere tatbik edilerek ergitme yolu ile birleştirme işlemi sağlayan bir yöntemdir. Lazer kaynağında kaynak edilen malzemeler kadar kullanılan kaynak parametreleri de önemlidir. Bu parametreler lazer kaynak gücü, lazer kaynak hızı olabileceği gibi kaynak metali malzeme bileşenleri, koruma gaz çeşidi, salgı ve eksen gibi faktörler de olabilir.

Lazer kaynağı günümüzde otomotiv sanayinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Düşük ısı girdisi, ITAB ısı tesiri altındaki bölgesinin darlığı, yüksek nüfuziyet, düşük distorsiyon ve yüksek dayanım gibi parametrelerin sağlanması bu yöntemi daha da çekici hale getirmiştir. Lazer kaynağı ile ilgili bugüne kadar çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Malzemelerin lazer kaynağı ile kaynak edilebilirlikleri, lazer gücünün kaynağa etkisi, lazer kaynak hızının kaynağa etkisi, lazer kaynağında kaynak bölgesinde çatlama riski gibi çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Aşağıda bazı araştırmacıların lazer kaynağına ilişkin yaptığı çalışmalar anlatılmıştır.

Lazer kaynak parametresinin ve ısı girdisinin kaynak dikişine etkisini araştıran Benyounis, lazer gücünün azalması veya kaynak hızının artmasıyla ısı girdisinin azaldığını tespit etmiştir. Kaynak hızının artmasıyla kaynak dikişi ve ısı tesiri altındaki bölgenin azaldığını tespit etmiştir [1].

Keskin vd. östenitik paslanmaz çeliklerin lazer kaynağı ile birleştirilmesi sonucu kaynak bölgesinin mikro yapısı ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Kaynak metalinde en



yüksek sertlik değerinin olduğunu tespit etmiştir. Isı tesiri altındaki bölgenin ise sertliğinin daha düşük olduğunu belirlemiştir [2].

Chung vd. otomotiv endüstrisinde sık kullanılan düşük karbonlu galvaniz çeliklerin karbondioksit lazer kaynağı ile birleştirilmesinde koruyucu gaz çeşitlerinin etkisini incelemiştir. Bunun için helyum, argon, azot ve karbondioksit gazlarını kullanmıştır. Yaptığı çalışmalar sonucunda helyum koruyucu gaz ortamında yapılan kaynaklarda tam nüfuziyet elde edilmiştir. Argon koruyucu gaz ortamında yapılan lazer kaynağında ise düşük nüfuziyet oluşmuştur [3].

Benyounis yaptığı çalışmalar sonucunda koruyucu gaz akışının kaynak yüzey kalitesi ve kaynak mikro yapısında önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir [4].

Kaluç vd. kaynak metalinde gözenek oluşumunu incelemiştir. Gözeneklerin kaynak metalinde çözünen gaz sonucu oluştuğu, bunların bulunmasının kesitin azalmasına, mekanik değerlerin düşmesine ve zorlanmalar sırasında çentik etkisinin oluşup bağlantının kırılmasına sebep olduğunu tespit etmiştir. Kaynaktan önce oksit tabakasının temizlenmesinin gözenek oluşumunu azaltacağını tespit etmiştir [5].

Weston vd. ise alüminyum alaşımlarında malzeme mikroyapısının lazer kaynak kabiliyeti üzerindeki etkisini incelemiştir. Malzeme yapısındaki porositelerin çekme dayanımını olumsuz etkilediği sonucuna ulaşmıştır [6].

Malek vd. alüminyumun darbeli lazer kaynağında katılma çatlaklarının oluşum eğilimlerini incelemiştir. Tane sınırlarının sıvı metalle dolması katılma çatlaklarının başlamasına önemli bir bloke oluşturmuştur [7].

Durgutlu ve Ertürk, kaynak hızının artırılmasının kaynak ısısının azalmasına ve dolayısıyla ana metalin ergiyen miktarının azalmasına neden olduğunu belirtmiştir [8].

Uzun ve Keleş yaptıkları çalışmada, kaynak hızının artmasıyla kaynak metali genişliğinin azaldığını tespit etmişlerdir. Ayrıca kaynak hızının artışıyla kaynak metalinde yüzey ve kök genişlikleri arasındaki farkın arttığını tespit etmişlerdir. Araştırmacılar, ayrıca kaynak hızının artmasıyla geçiş bölgesi genişliğinin azaldığını belirtmişlerdir. Geçiş bölgesinin dikiş yüzeyi ve dikiş kökünde de farklılık gösterdiğini ve dikiş yüzeyinde ısı

girdisinin etkisiyle geçiş bölgesinin daha geniş olduğunu, dikiş kökünde geçiş bölgesinin daha dar olduğunu tespit etmişlerdir [9].

Uzun ve Keleş çalışmalarında, lazer gücü ve kaynak hızının ısı girdisine olan etkilerinde, ısı girdisi arttıķķa kaynak metali sertliğinin arttığını tespit etmiştir. Katılaşan kaynak metalinde tane ve alt tane sınırları tespit etmişleridir. Kaynak hızında artış meydana geldikçe kaynak metalinde katılaşan tanelerin büyüme doğrultuları ile kaynak merkez çizgisi arasındaki aının azaldığını göstermişlerdir [9].

Gery vd. kaynak hızının kaynak dikiş geometrisi ve ergime bölgesi ile ısı tesiri altındaki bölge sınırları üzerinde önemli etkileri olduğunu tespit etmişlerdir [10].

Kim vd. alışmalarında kaynak hızının alüminyum döküm alaşımlarının mikro yapısına etkisini incelemişlerdir. %85'i alüminyum, silisyum ve bakırdan oluşan alüminyum döküm alaşımı, kaynak işleminde kaynak hızının artırılması sonucunda, kaynak hızındaki bu artışın silisyum parçacıklarının boyutlarını azalttığını tespit etmişlerdir [11].

Kimara vd. yaptıkları çalışmada, dikiş genişliği ve kaynak hızı arasında bağlantı kurulabileceğini göstermiştir. Genel olarak kaynağın en st bölgesindeki dikiş genişliğinin kaynağın daha derin bölgelerindeki dikiş genişliğinden daha büyük olduğunu göstermişlerdir. Kaynak hızı ve iş parçasına giren lazer yoğunluğuna bağlı olarak bu iki genişliğin farklılık gösterdiğini tespit etmişlerdir [12].

Duley yaptığı çalışmalarda, farklı kalınlıklardaki malzemelerin kaynak işlemini incelemiş ve için profilinin kalın malzemeye odaklanmasının, ince malzemedede yanma olasılığını azaltacağını ve kaynağın malzemelerin her iki tarafında tam nüfuziyet temin edeceğini tespit etmiştir [13].

Duley yaptığı çalışmalarda, koruyucu gazların kaynak edilebilirlik üzerine etkilerini incelemek için, parça yüzeylerindeki gaz akışı tarafından yaratılan basınçları analiz etmiştir. Minimum gaz akışı sağlanması kaynak edilecek malzemeleri oksidasyondan korumaya ve maksimum kaynak nüfuziyeti gerçekleştirmeye olumlu etkilerini tespit etmiştir [13].

Weiting ve Rosa tarafından yapılan çalışmalarda, malzemelerin lazer kaynaklarında işinleri absorbe etmelerinin önemli olduğunu tespit etmişlerdir. 304 paslanmaz

çeliğinin yüzeyindeki yutma katsayısında düşük sıcaklıklarda bir artış olduğunu ve yüksek sıcaklıklarda şaşırtıcı bir düşüş olduğunu tespit etmişlerdir [14].

Tzeng çalışmalarında, lazerler ile dikiş kaynağı işleminde lazer atımlarının periyodik olarak gerçekleşmesiyle malzeme yüzeylerinin üst üste getirildiği kaynak bölgelerinde ergime ve dikiş oluşturduğunu tespit etmiştir [15].

Jokinen, lazer nüfuziyet kaynağının lazer gücüne ve kullanılan ışının özelliğine göre çelik malzemelerde 50 mm kalınlığa kadar nüfuziyet sağlanmasının uygun olduğunu belirtmiştir [16].

Nath vd. yaptıkları çalışmada metallerin lazer ışınlarını %98 oranında yansıtıldığını göstermişlerdir. Özellikle paslanmaz çeliklerde bu oranın yüksek olduğunu ve lazer ışını yutma oranını artırmak için yüzey sıcaklığının artırılması gerektiğini tespit etmişlerdir. Yutma malzeme tarafından tutulan lazer enerjisinin malzeme yüzeyine çarpan lazer enerjisine oranı olarak tanımlanır [17].

Xie vd. iletimli lazer kaynağı işleminde güç eşleştirme verimini artırmak için lazer kaynağı yapılacak malzemeler için dolgu malzemesi tozlarının kullanılması ve yüzeyin ön oksitlendirilmesi gerektiğini belirtmiştir [18].

Bu tez çalışmasında lazer kaynak parametrelerindeki değişimlerin kaynak dikiş bölgesine etkileri incelenecektir. Kaynak dikiş bölgelerinde görülen boşluk ve delik tarzı oluşumların sebebi araştırılacak ve özellikle lazer kaynak gücü, lazer darbe süreleri ve kaynak hızının lazer kaynağına etkisi incelenecektir.

## **1.2 Tezin Amacı**

Bu çalışmada, otomotiv yan sanayinde üretimi yapılan benzinli motorlu araçlarda kullanılan enjektörlere uygulanan lazer kaynak işlemi incelenmiştir. Lazer kaynağı sonucunda oluşan hatalar analiz edilerek, hataların oluşmaması için kaynak parametreleri değiştirilerek en iyi parametreler bulunmaya çalışılmıştır.

Lazer kaynak işlemi sonucu bazı parçalarda boşluklar ve delikler tesbit edilmiştir. Bu parçalar iskarta parça olarak adlandırılmaktadır. Amaç kaynak parametrelerini optimize ederek bu iskarta parça sayılarında düşüş sağlamaktır. Böylece birim zamanda üretilen

parça sayısı artacak, ıskarta parça sayısı azalacak, maliyetler düşecek, teslimat zamanında gerçekleştirilecek ve kar oranı artacaktır.

### **1.3 Hipotez**

Enjektörlerin üretiminde lazer kaynağı esas aşamalardan birisidir. Bu nedenle enjektörlerde lazer kaynağından dolayı kaynak hataları oluşabilmektedir. Lazer kaynak gücünün fazla ayarlanması kaynak bölgelerinde boşluk oluşumunu tetikleyebilmektedir. Kaynak gücünün az olması da yetersiz nüfuziyet oluşturmaktadır. Kaynak gücü parametresi gibi kaynak hızı, süresi, punta süresi, punta gücü, kaynağı yapılacak parçalardaki kaynak öncesi işlemler, parçaların kaynak öncesi yıkama işlemleri gibi faktörler enjektörlerin üretiminde lazer kaynak prosesi üzerinde etkin rol oynayabilmektedir.

## BÖLÜM 2

### LAZER

Lazer, İngilizce “light amplification by stimulated emission of radiation” tanımlamasının baş harflerinin kısaltılmasıyla ortaya çıkan bir kelimedir. Teknik olarak, ışığın şiddetinin yükseltilmesi anlamına gelir ve eş fazlı, aynı genlikte, yüksek güçte ışın demeti oluşturma prensiplerini içerir. Diğer ışıklardan bu yönleriyle ayrılan lazer ışınları, imalat sektöründe kullanılabildiği gibi, tedavide, haberleşmede, askeri savunmada, mesafe ölçümünde, holografi ve fotoğrafçılıkta da kullanılmaktadır.

Lazer ışını çok güçlü ışın demetlerini içerir. Bu nedenle lazer ışınlarının en önemli özelliği yüksek güçte olmalarıdır. Q anahtarlama denilen sistemle lazer cihazı içerisinde, lazerin ışın üretmesi bir süre engellenerek, içeride güç birikimi sağlanmaktadır. Böylece biriken güç, engellemenin kaldırılmasıyla çok kısa bir sürede daha yüksek güçte dışarı verilir [19].



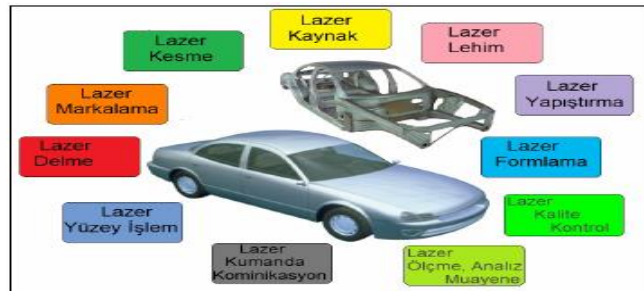
Şekil 2. 1 Otomotiv üretiminde lazer uygulamaları [19]

Lazerin imalat sektöründe kaynak işlemlerinde kullanılması günümüzde yaygınlaşmıştır. Bu kullanım içindeki en büyük pay otomotiv sanayileri ve otomotiv yan sanayilerindedir. İmalat sanayinde malzemelerde kullanılan lazer işlemlerinin 1994' teki kullanım payı 1 milyar avro iken bu değer 2000 yılında 5 milyar avroya yaklaşmıştır. 2005 yılında 15 milyar avroluk kullanım payına sahip lazerlerin önemini 2015 yılında yaklaşık 40 milyar avroya ulaşacağı düşünülmektedir [20].

Otomotiv sanayinde kullanılan lazer işlemleri;

- Dökme işlemi,
- Ayırma işlemi (delme, kesme, oyuk ve kanal açma işlemi, taşlama),
- Birleştirme işlemi (kaynak, lehim ve yapıştırma işlemleri),
- Yüzey işlemleri (sertleştirme, kaplama ve temizleme),
- Plastik şekil değiştirme,
- Malzeme iç yapı özelliklerinin değiştirilmesi.

Otomotiv sanayindeki lazer kaynak işlemlerinin birçok avantajı vardır. Çok amaçlı kullanıma sahip lazer kaynağı, çeşitli malzemelere uygulanabilir ve çeşitli kalınlıktaki birleştirmelerde yüksek dayanım sağlar. Yüksek işlem hızlarında uygulanabilen lazer kaynağı robotik olarak gerçekleştirilebilir. Böylece otomasyona yatkınlığı imalat için zaman tasarrufu sağlar. Lazerli kaynak yöntemleri ile hafif tasarımlar elde edilir. Dolayısıyla otomotiv firmalarının ağırlıktan kazanmaya odaklı yaptığı tasarımlarda lazer kaynağı vazgeçilmez olmuştur. 1980' li yıllarda BMW lazer kaynak teknolojisini kullanmaya başlarken bugün tüm otomobil üreticileri bu yöntemle tasarımlarına gerçeklik vermektedirler [20].



Şekil 2. 2 Otomotiv üretiminde lazer kullanımı [20]

Lazer kaynağı yeni bir teknoloji olduğundan bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Özellikle kaynak makinesi ve kaynak makinesi elemanlarının pahalı oluşu yatırım maliyetlerini artırmaktadır. İmalat yöntemleriyle ilgili olarak parametre sayısının fazla oluşu, her parametrenin kaynak üzerine etkisinin incelenmesini gerektirmektedir. Yine yeni bir teknoloji olmasından kaynaklanan bilgi ve eğitim eksikliği nedeniyle aşama akışında aksamalar yaşanabilmektedir.

## 2.1 Lazerin Tarihçesi

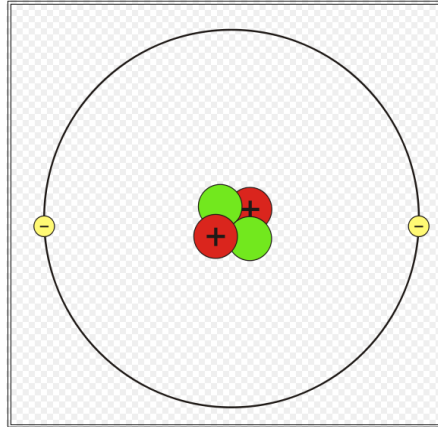
Lazer günümüzdeki durumuna gelinceye kadar çeşitli aşamalardan geçmiştir. Bu aşamalar lazer tekniklerinin teorik olarak oluşturulmasıyla başlar ve lazer cihazı yapımına kadar ilerler. Aşağıda lazer tarihçesi maddeler halinde verilmiştir [21].

- 1940 Sayı yoğunluğu tersiniminin olma olasılığı,
- 1947 Uyarılmış ışmanın ilk gösterimi,
- 1951 İlk maser yapıldı,
- 1960 Yakut kristali ile yapılan ilk çalışan lazerin keşfi. 16 Mayıs 1960, Hughes Araştırma Laboratuvarları,
- 1960 İlk uranyum lazer, yapılan lazerlerin ikincisi,
- 1961 Bell Laboratuvarlarında helyum neon lazerin keşfi,
- 1962 General Elektrik Laboratuvarlarında yarı iletken lazerin keşfi,
- 1964 Bell Laboratuvarları ilk çalışan Nd-YAG lazer,
- 1964 Bell Laboratuvarlarında karbondioksit lazerin keşfi,
- 1964 Hughes Araştırma Laboratuvarlarında argon iyon lazerin keşfi,
- 1965 Kaliforniya Berkley ilk kimyasal lazer,
- 1966 Utah Üniversitesinde ilk metal buhar lazer,
- 1966 IBM Laboratuvarlarında ilk boya lazer,
- 1969 Otomobil uygulamaları için üçlü lazerlerin ilk endüstriyel donanımı,
- 1970 Moskova Lebedev Laboratuvarlarında Xenon ile yapılan ilk excimer lazer,

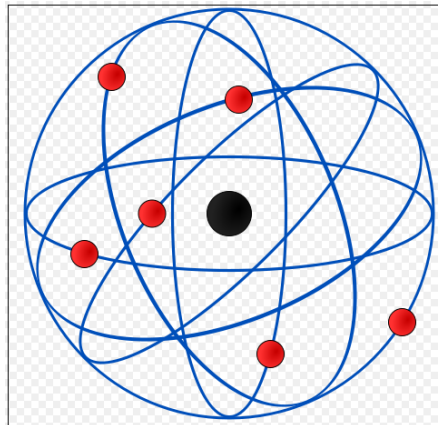
- 1974 Avco Everet Laboratuvarlarında ilk nadir gaz halojenür excimer,
- 1977 Stanford Üniversitesinde ilk serbest elektron lazeri,
- 1980 İngiltere Hull Üniversitesinde X-ışını lazer etkisinin ilk raporu,
- 1981 Lineer olmayan optik ve spektroskopide Nobel fizik ödülü,
- 1984 Lawrence Livermore Laboratuvarlarında ilk X-ışını lazer gözlemlendi.

## 2.2 Lazer Işını Oluşumu

Atom bir çekirdek ve çekirdeği çevreleyen elektronlardan oluşmaktadır. Atom aynı zamanda bir kimyasal elementin tüm özelliklerini taşıyan en küçük parçacığdır. Atomda çekirdeği saran negatif yüklü elektron bulutu bulunur. Çekirdek ise pozitif yüklü protonlar ve yüksüz nötronlardan oluşur [21].



Şekil 2. 3 Bohr atom modeli [21]

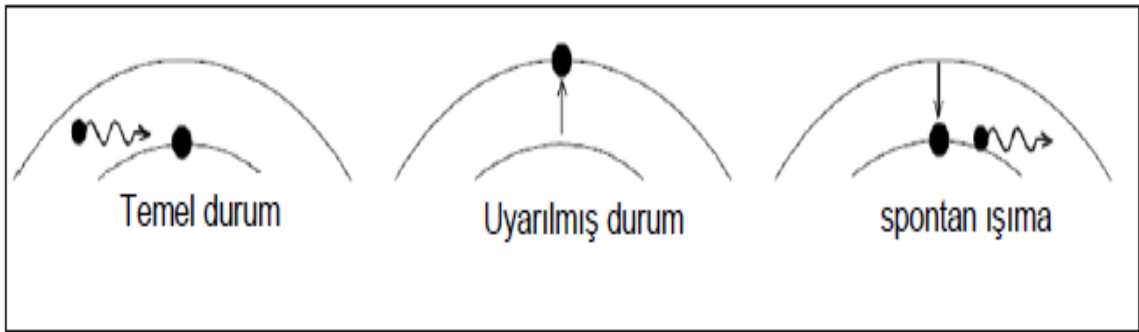


Şekil 2. 4 Rutherford atom modeli [22]



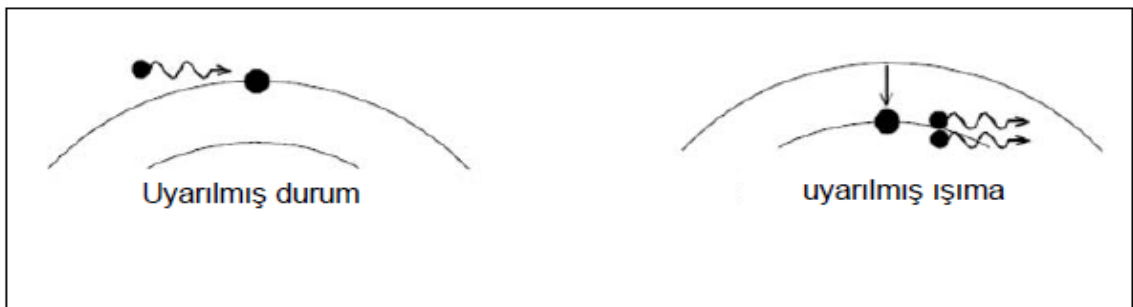
Her atomun kendi iç enerjisi bulunmaktadır. Minimum enerji prensibine göre atom iç enerjisini en alt seviyede tutmak istemektedir. Çünkü minimum enerji seviyesinde atom daha kararlı haldedir. Atomun en düşük enerji seviyesindeki durumuna taban enerji seviyesi adı verilir ve E1 ile gösterilir. Atom taban enerji seviyesinden daha yukarıdaki bir enerji seviyesinde ise bu durumuna uyarılmış atom adı verilir. Bu durum da E2 ile gösterilmektedir [23].

Atomun üst enerji seviyelerine geçmesi için dışarıdan enerji alması gerekir. Bu durum elektromanyetik ışımının temellerini oluşturur. Üst enerji seviyesindeki atom tekrar kararlı durumundaki E1 seviyesine geri dönmek ister. Bunun için aldığı enerjiyi elektromanyetik dalga yani foton olarak geri verir. Bu fotonlar da ışınları oluşturur. Işınlar lazer ışını şeklinde de oluşabilir [23].



Şekil 2. 5 Elektromanyetik ışıma [23]

Atom dışarıdan uyarılıp üst enerji seviyelerine çıktığında eski durumdaki pozisyonlarına aynen dönemezler. Ancak eski durumdaki enerji seviyesinden biraz daha yüksek seviyeye geçiş yapabilirler.



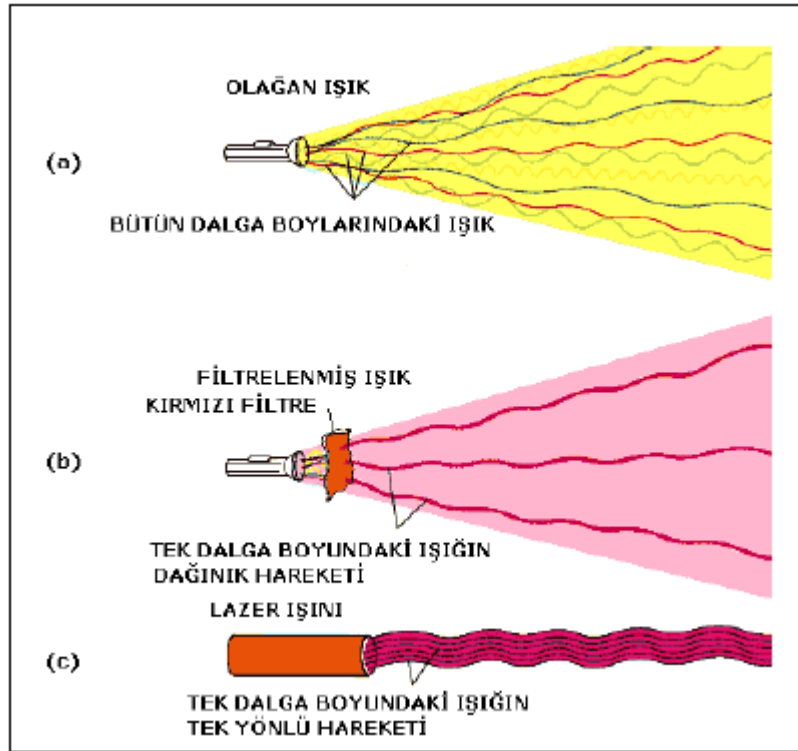
Şekil 2. 6 Uyarılmış Işıma [23]

### 2.2.1 Uyarılmış Işıma

Einstein 1917 yılında uyarılmış ışımaya prensiplerinin temelini atmıştır. Atomda uyarılmış ışımaya gerçekleşebilmesi için dışarıdan enerji gereklidir. Bu enerji sayesinde yüksek enerji seviyesindeki atom uyarılır. Uyarıma işlemi aşağıdaki yollardan herhangi biri ile gerçekleştirilebilir [23].

- Atoma basınç uygulamak,
- Atomu ısıtmak,
- Atomu hızlandırılmış elektronlarla bombardıman etmek,
- Atomu bir ışın demetine maruz bırakmak.

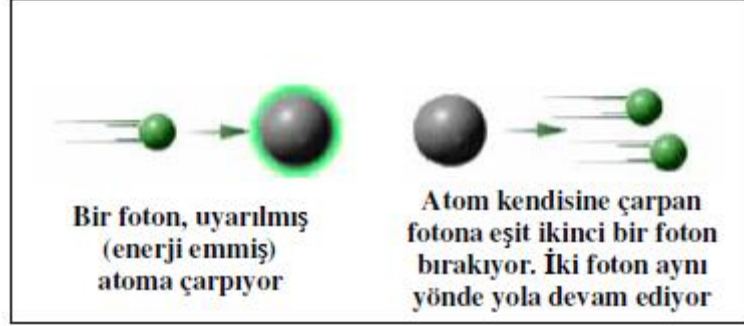
Bir atom uyarılmış durumda iken atoma dışarıdan bir foton gönderildiğinde atom aynı fazda fotonlar yayar. Foton çarptırılmaya devam edildiğinde atomdan tamamen aynı fazda ışın demeti elde edilir [23].



Şekil 2. 7 Işın çeşitleri [24]

E1 enerji seviyesindeki atom dışarıdan uyarılarak üst enerji seviyesine geçer. Atom üst enerji seviyesinde kararsızdır ve daha kararlı olduğu alt enerji seviyelerine geçiş yapmak ister. Bu durumda bir foton yayarak alt enerji seviyesine geçtiği anda dışarıdan

bir foton daha çarptırırsak atomdan aynı fazda iki foton terkedilmiş olur. Atomda bu olayın sürekli devam etmesini sağladığımızda üst enerji seviyelerine çıkan atom devamlı aynı fazda foton üretmeye başlar. Fotonları birbirine paralel aynalar arasından geçirildiğinde lazer ışınları oluşturulur.



Şekil 2. 8 Uyarılmış atomun foton yayması [24]

Atom kararlı durumundayken bu durumda kalmaya devam eder. Dışarıdan bir etki olmadığı sürece kararlılığı değişmez. Dolayısıyla lazer ışını oluşturmanın temelinde atomların uyarılıp üst enerji seviyelerine geçişinin sağlanması gerekir. Aksi durumda lazer ışınları oluşturulamaz.

### 2.3 Lazer Işınlarının Özellikleri

Lazer ışınlarının temel özellikleri şunlardır;

- Tek renklidirler, lazer cinsine göre renkleri değişebilir,
- Düzdürler, yüksek dereceden doğrultu özelliğine sahiptirler,
- Oldukça yoğun ve aynı fazlıdır,
- Dalga boyları küçük, enerjisi yüksek, yüksek güçlüdürler,
- Dağılmaz ve yön verilebilir ışınlardır,
- Dalga boyları tek olduğundan monokromatik özellik taşırlar. Her lazer kendi karakteristik dalga boyunda ışın yayar,
- Lazer ışını darbesi çok kısadır,
- Yüksek derecede uyumluluğa sahiptirler.

## 2.4 Lazer Çeşitleri

Lazerler;

- Gaz lazerleri,
- Sıvı lazerleri,
- Katı hal lazerleri,
- Yarı iletken lazerler,
- Diğer lazerler,

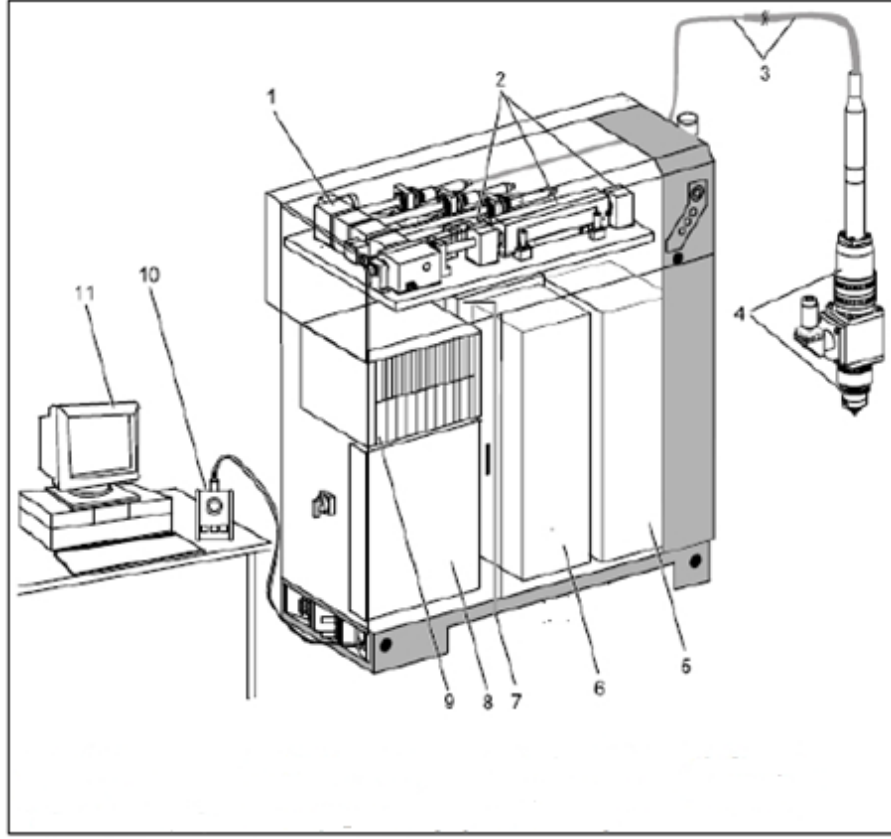
Olmak üzere 5 bölümde incelenebilir. Bunların da kendi alt grupları aşağıdaki şekilde verilmiştir [23].

<b>Gaz Lazerleri</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• <b>Atom Lazerleri</b> Helyum-Neon Lazeri (632.8nm ) (0.5-100mW)</li><li>• <b>Molekül Lazerleri</b> CO<sub>2</sub> Lazeri (10.6µm) (1-10000 W) Nitrojen Lazeri (337nm) (250 kW-1MW) Uzak kızıl-altı Lazeri (99-373 µm ) (1kW ve 100mW) Excimer Lazeri (KrF, XeF,ArF)</li><li>• <b>İyon Lazerleri</b> Argon İyon Lazeri (488nm) (50mW-50W) Kripton İyon Lazeri</li><li>• <b>Metal Buharı Lazerleri</b> Bakır Buharı Lazeri (510.5nm) (1MW) Altın Buharı Lazeri</li></ul>	<b>Sıvı Lazerleri</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• <b>Boya Lazerleri</b></li></ul> <b>Katı-hal Lazerleri</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• <b>Yakut Lazeri</b></li><li>• <b>Nd-YAG Lazer</b></li><li>• <b>Ti-Safir Lazeri</b></li></ul> <b>Yarı-iletken Lazerler</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• <b>Diyot Lazeri</b></li></ul> <b>Diğer Lazerler</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• <b>X-Işını Lazerler</b> (40-400Å)</li><li>• <b>Serbest Elektron Lazerleri</b> (248nm-8mm) (1GW ve 10 W)</li><li>• <b>Fiber Lazerler</b></li></ul>
---	---

Şekil 2. 9 Lazer çeşitleri [23]

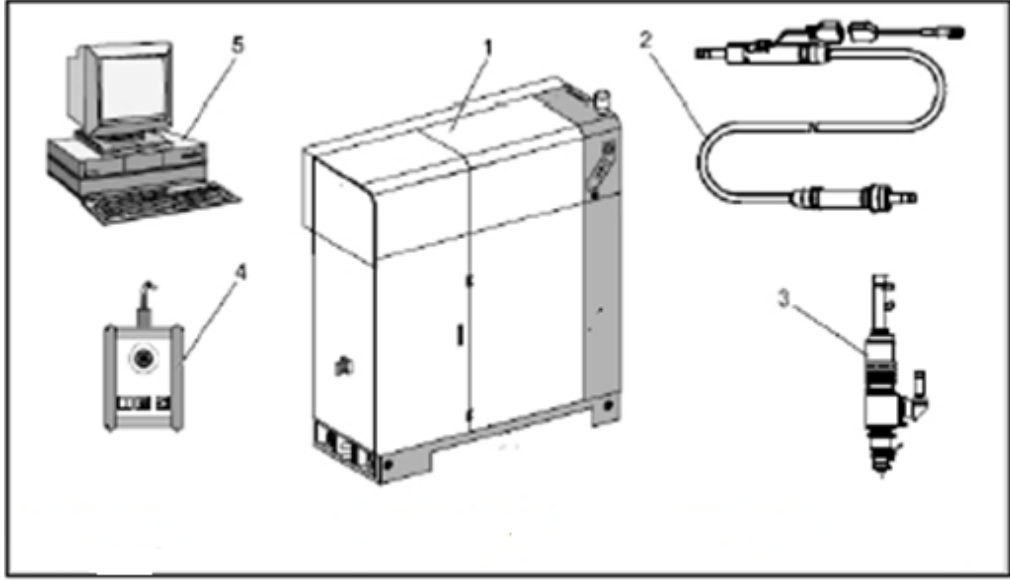
## 2.5 Lazer Komponentleri

Şekil 2. 10' da bir lazer cihazına ait dış komponentler ve Şekil 2. 11' de lazer aparatları görülmektedir.



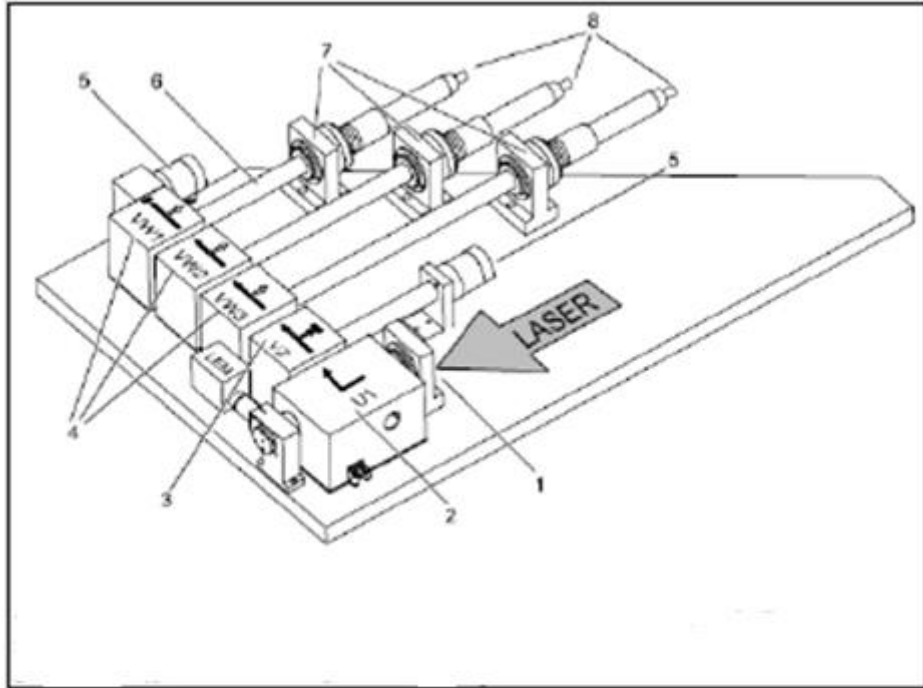
Şekil 2. 10 Lazer komponentleri [23]

1. Optik konstrüksüyon,
2. Lazer,
3. Lazer ışık kablosu,
4. Optik düzenleyiciler,
5. Lazer soğutma,
6. Lamba güç kaynağı,
7. Kabin soğutucu,
8. Dağıtım ağı,
9. Kontrolör,
10. Kontrol istasyonu,
11. Cihaz kullanım.



Şekil 2. 11 Lazer komponentleri [23]

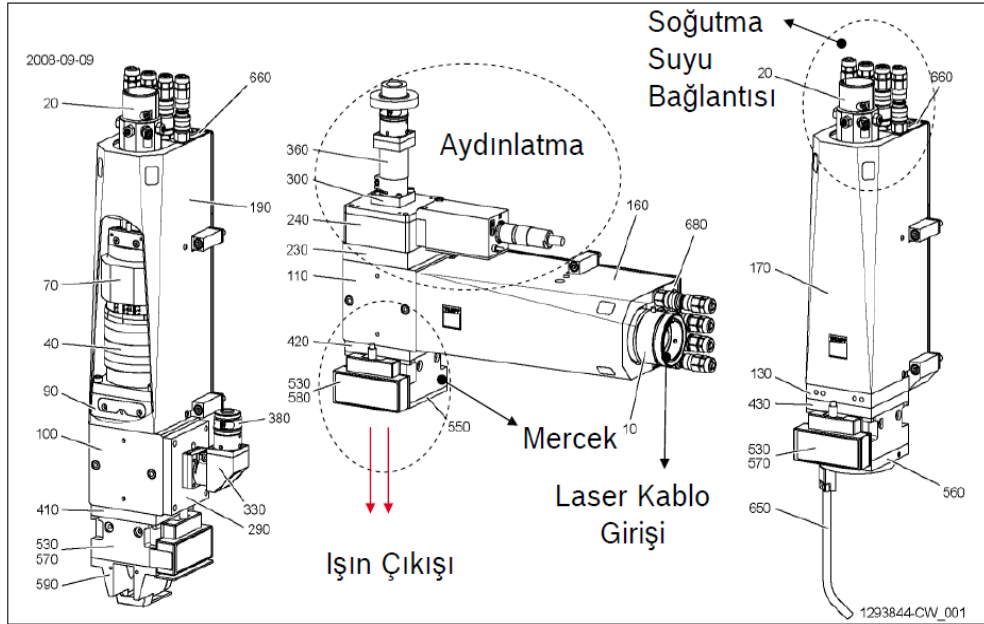
1. Lazer aparatı,
2. Lazer ışık kablosu,
3. Optik düzenleyici,
4. Kontrol istasyonu,
5. Cihaz kullanım.



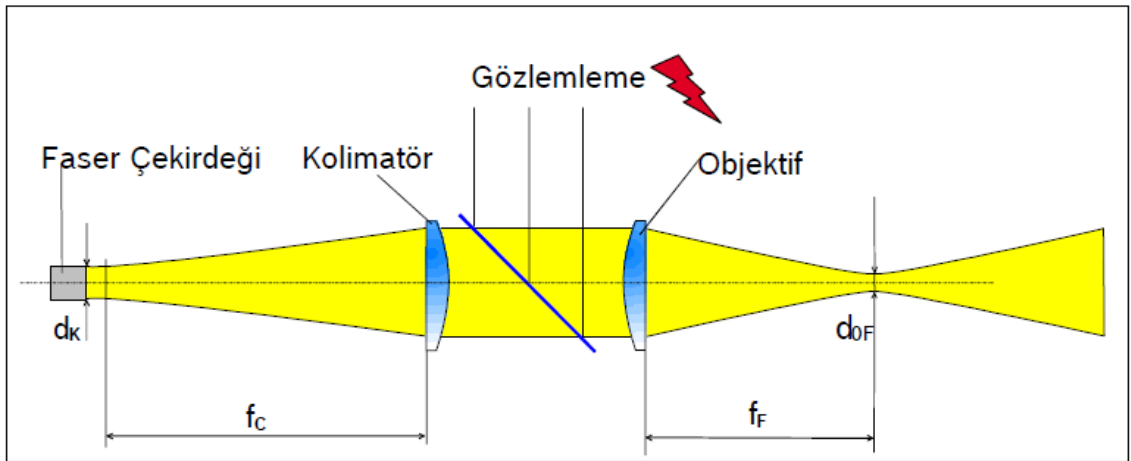
Şekil 2. 12 Lazer komponentleri [23]

1. Laser ışını girer,
2. Sapma 90 derece,
3. Merkezi kapatma,
4. Yazılımla kapatma,
5. Emici,
6. Işın kapağı,
7. Optik bağlantı.

Şekil 2. 12' de lazer ana komponentleri görülmektedir;



Şekil 2. 13 Lazer komponentleri [23]



Şekil 2. 14 Lazer komponentleri [23]

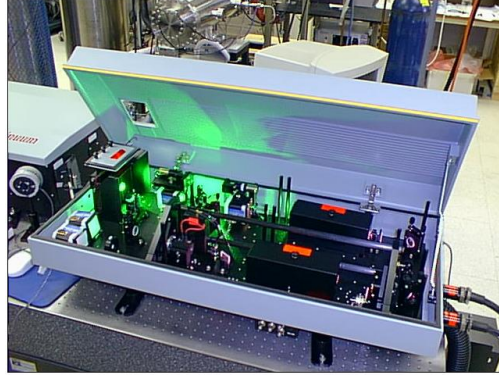
Şekil 2. 13' de  $f_c$  değeri, lazer üretici firma tarafından ayarlanan değerdir. Kolimasyon çemberinin ayarının değiştirilmesi üretici firmalar tarafından yasaklanır [23].

$f_f$  fokus seviyesi ise optik kızak ile ayarlanır. Seri makinelerde ise manuel kızaklar kullanılır [23].

Kolimatör ise ışık huzmesinin şeklini ve çapını sınırlayan aygıttır [23].

## 2.6 Katı Hal Lazeri

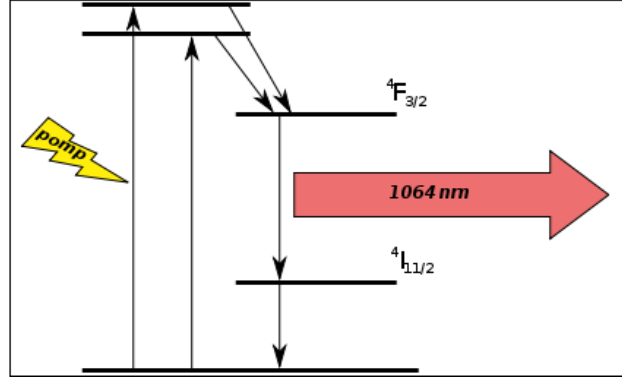
Katı hal lazerinde ilk olarak Cr atomlarını içeren yakut lazeri kullanılmıştır. Cr atomları sayesinde lazer ışınları kırmızı renkte görülürler. Nd-YAG lazerlerinde ise Nd atomlarını içeren YAG kristalinden oluşur. Silindirik bir çubuk şeklinde olan YAG kristalinin lazer üretiminde kullanılmasının amacı, sert olması, dayanıklı olması, iyi optik özelliklere sahip olması ve iyi ısı iletkenliğe sahip olmasıdır. Uyarılmış ışımının süresinin azaltılması için YAG kristali içerisindeki Nd atomları oranını artırmak gerekmektedir [24].



Şekil 2. 15 Nd-YAG lazeri [25]

YAG kristali metal bir kap içerisine konur. Kap içerisine uyarıcı amaçlı flaş lambalar ve yansıtıcı aynalar yerleştirilir. Nd-YAG katı hal lazerinde oluşan lazer ışınlarının dalga boyu 1064 nm' dir.





Şekil 2. 16 Nd-YAG dalga boyu [26]

Uyarılan kristal yapının iç bölgesi ile dış bölgesi arasında oluşan ısı farklılıkları sonucu kristalde oluşan termal gerilmeler çok önemlidir. Bu ısı farklılıkları kristalin silindirik olmasıyla daha da artar. Termal gerilmeleri azaltmak amacıyla, kristalin ince bir disk veya uzun ve ince bir fiber formda olması yönünde çalışmalar yapılmıştır. Böylece uyarılma yüzeyi ile kristalin iç yüzeyleri arasındaki uzaklık mikron seviyelerine iner ve termal gerilmeler azalır, kristal daha verimli kullanılmış olur [27].



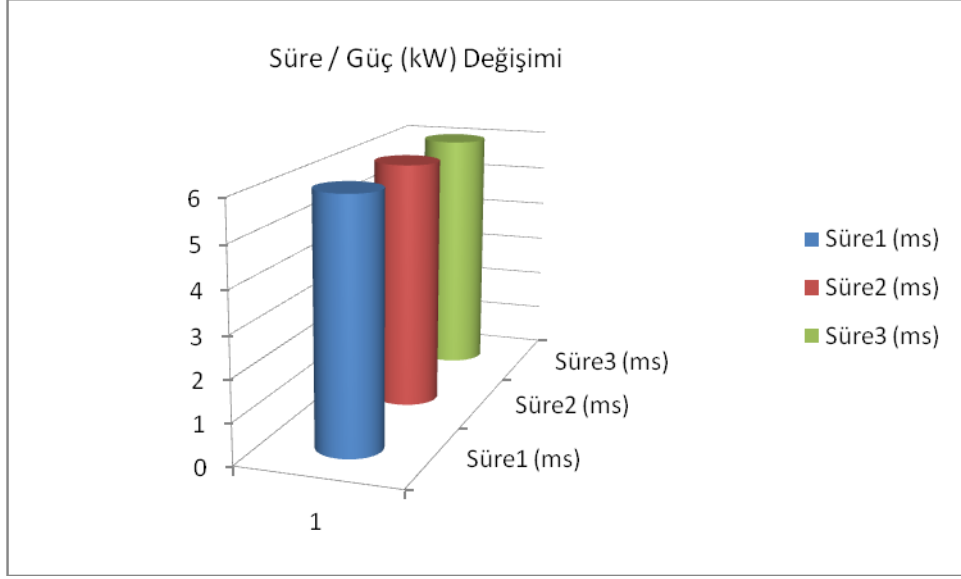
Şekil 2. 17 Nd-YAG kristali [27]

Nd-YAG lazerlerin üç farklı çalışma türü bulunmaktadır. Bu türler aşağıdaki gibidir;

- Sürekli dalga işletmesi,
- Darbeli işletme,
- Q anahtar işletmesi.

Ortalama olarak 50-1000 W lazer gücü kullanılarak gerçekleştirilen malzeme işlemlerinde yukarıdaki işletme türlerinden darbeli lazer kullanılmaktadır. Darbe süresi 0.1-20 ms aralığında değiştirilebilmektedir [28].

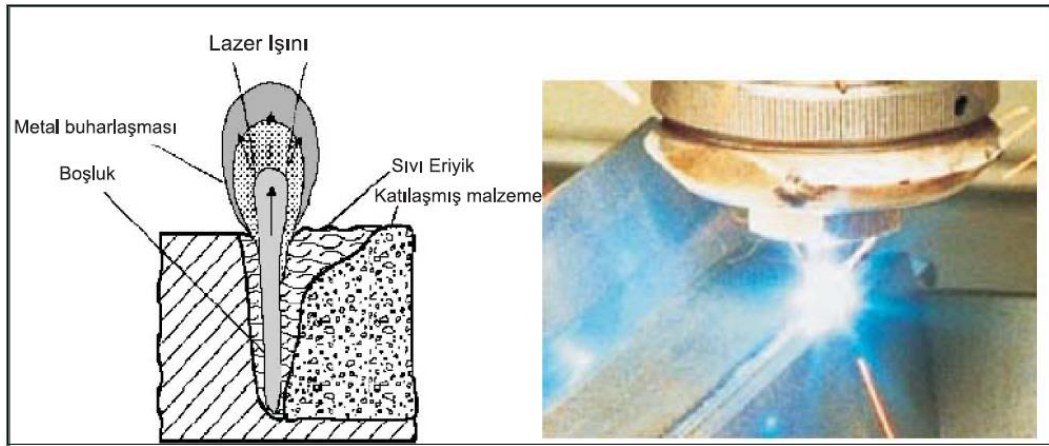
Q anahtar işletmeli lazer işlemlerindeki darbe süreleri ise nano saniye aralığında değiştirilebilmektedir.



Şekil 2. 18 Nd-YAG lazer darbeleri çalışma [28]

### LAZER KAYNAĞI

Kaynak işlemi imalat yöntemleri arasında en çok kullanılan ve önemi büyük olan bir birleştirme tekniğidir. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte geleneksel kaynak yöntemlerine alternatif kaynak yöntemleri doğmuştur. Bu alternatif kaynak yöntemlerinden birisi de özel bir kaynak yöntemi olan lazer kaynağıdır. Bilindiği gibi kaynak işlemleri ergitme ve basınç esaslı olabilmektedir. Lazer kaynağı ergitme esaslı birleştirme yöntemi olup, malzemelerin ergitilmesi esasına dayanarak birleştirme işlemini gerçekleştirmektedir.



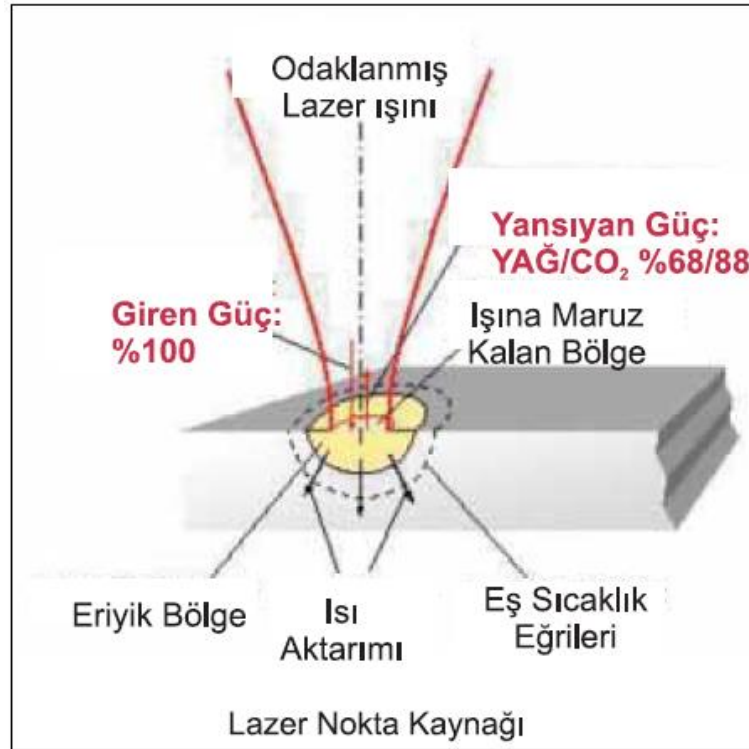
Şekil 3.1 Lazer kaynağı şematik resmi [30]

Ark esaslı kaynak yöntemlerinde malzemelerin birleştirilmesini için gerekli olan ısı, oluşan elektrik malzeme ile kaynak elektrodu arasında akım ile sağlanmaktadır. Bu akım malzemeler üzerine tam olarak odaklanamadığından ısının çevreye kaçışları olabilmektedir. Bu da birleşmeyen bölgelerin de ısıdan etkilenmesine yol açar. Aynı zamanda malzemeleri birleştirmek için daha fazla enerjinin sarfedilmesi gerekecektir.

Tüm bu etkiler kaynak hızında düşmeye yol açar. Lazer kaynağı ise, hassas odaklanmanın malzemeler üzerinde birleştirilecek bölgede sağlanması, hem daha az enerjiyle hem de daha yüksek kaynak hızlarında çalışılmasını mümkün kılar. Böylece malzemeler birleştirilecek malzemelerin birleşme bölgeleri dışındaki alanlar mekanik olarak veya termal olarak etkilenmez. Aynı zamanda lazer kaynağı görsel açıdan da üstünlük sağlar.

### 3.1 Lazer Nokta Kaynağı

Lazer kaynak yöntemleri iki farklı şekilde uygulanır. Bunlar lazer nokta kaynağı ve lazer nüfuziyet kaynağı olmak üzere ikiye ayrılırlar. Lazer nokta kaynağında, birleştirilecek malzemelere nokta şeklinde atımlar yapılır. Elektrik direnç nokta kaynağı silindirik malzemelerin birleştirilmesinde eksen kaçıklığını önlemekte yararlıdır. Lazer nokta kaynağı da birleştirilecek silindirik veya dairesel parçaların eksen kaçıklıklarını önlemekte etkili bir yöntemdir.

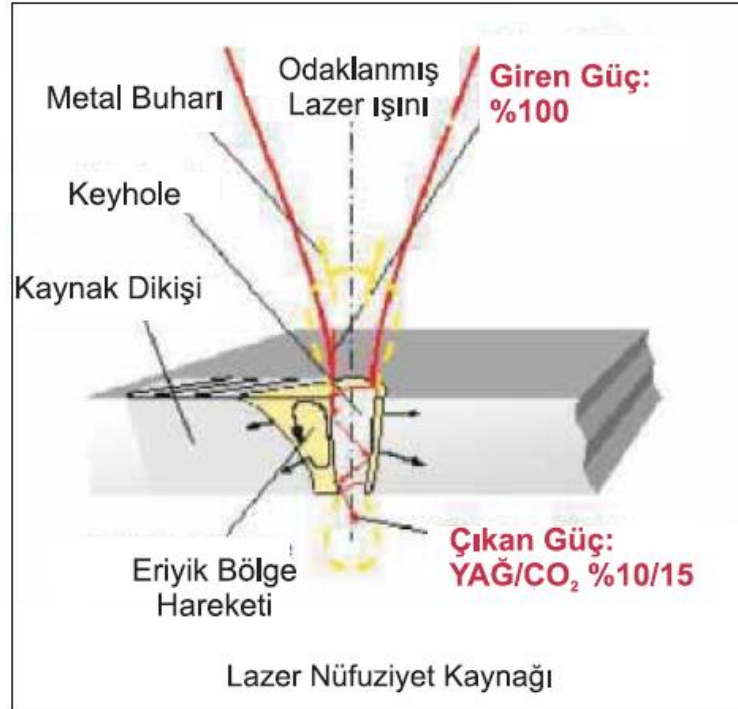


Şekil 3. 2 Lazer nokta kaynağı [31]

Odaklanmış lazer ışını birleştirilecek bölgeye gönderilir. Nokta şeklinde gönderileceğinden nüfuziyet kaynağına oranla daha düşük nüfuziyet sağlanır.

### 3.2 Lazer Nüfuziyet Kaynağı

Lazer nüfuziyet kaynağında, yoğun lazer ışını birleştirilecek malzemeleri boydan boya delerek 'keyhole' adı verilen bir anahtar deliği oluşturur [26]. Buharlaşan metal malzeme bir plazma oluşturur. Bu plazma tarafından emilen lazer ışını deliğin yan duvarlarına aktarılır, duvar malzemesi erimeye başlar. Lazer ışını malzeme üzerinde gezdirilmeye devam ederken eriyen metal malzeme delik etrafında dolaşarak lazer ışınının geçişi ardından soğuma sağlanır [31], [32]. Lazer kaynak yöntemine, gücüne ve ışın kalitesine bağlı olarak 50 mm' ye kadar nüfuziyet sağlanabilir. Ancak endüstriyel uygulamalarda 20 mm' yi geçmemek tavsiye edilir [33].



Şekil 3. 3 Lazer nüfuziyet kaynağı [32]

### 3.3 Lazer Kaynak Parametresini Etkileyen Parametreler

Lazer kaynak kalitesini etkileyen esas parametreler aşağıda verilmiştir;

Lazer parametreleri;

- Lazer gücü.

İşlem parametreleri;

- Kaynak hız,
- Odak yeri,
- İşlem gaz.

Malzeme parametreleri;

- Malzeme kalınlığı,
- Malzeme türü,
- Malzeme yüzey özellikleri.

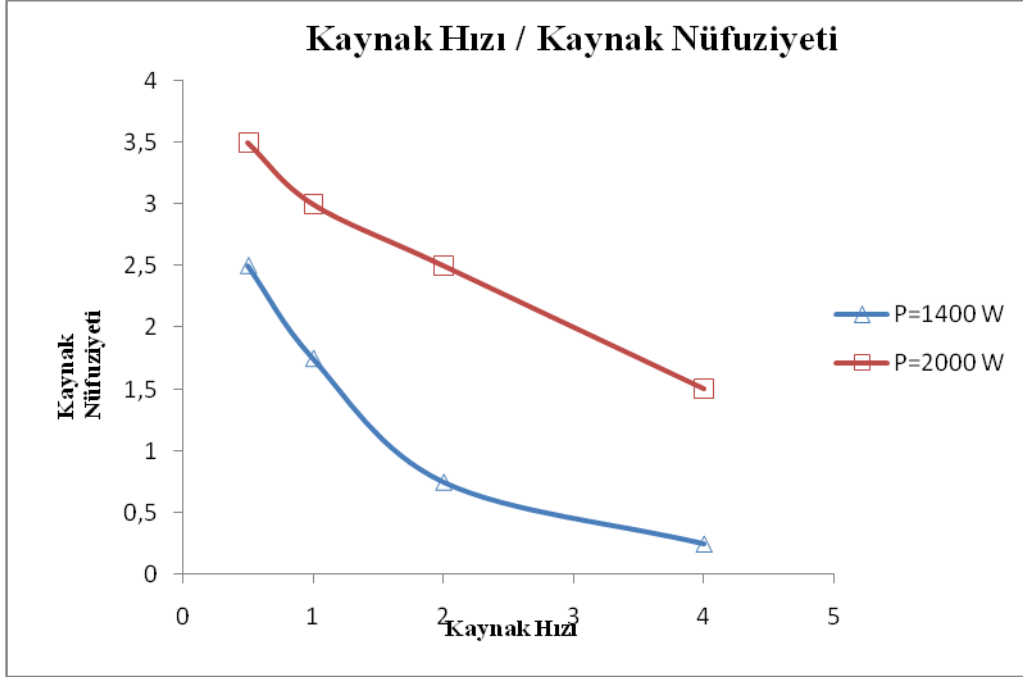
Bu tez çalışmasında, özellikle kaynak kalitesini etkileyen, lazer gücünün değişimi, kaynak hızı değişimi, parçalara uygulanan lazer kaynak öncesi işlemlerin etkisi, malzeme bileşimi ve parça geometrisi gibi parametreler incelenmiştir.

### **3.3.1 Lazer Güç Yoğunluğunun Değişimi ve Kaynak Hızı**

Malzemelerin birleştirilmesinde lazer kaynak makinesinin gücünden çok malzemeye uygulanan güç yoğunluğu daha önemlidir.

Lazer kaynağı boyunca istenilen nüfuziyeti sağlamak, yeterli güç yoğunluğunun oluşturulmasıyla sağlanır. Bunun için ışın demetinin gücünün artışı nüfuziyeti artırır. Odak leke çapı artınca güç yoğunluğu azalacağından, nüfuziyet de azalır.

Kaynak hızı parametresi, kaynak işlemi yapılacak malzeme ve kaynak yöntemine bağlı olarak seçilmelidir. Ayrıca yeterli kaynak dikiş sıcaklıklarını oluşturabilmek için kaynak hızının düşük olması istenir. Eşit malzeme kalınlıklarında daha düşük kaynak derinlikleri için yüksek kaynak hızları seçilirken, derin nüfuziyet gerektiren kaynak işlemlerinde ise düşük kaynak hızları uygulanmaktadır.



Şekil 3. 4 Kaynak hızının kaynak derinliğine etkisi [28]

Şekil 3. 4' de farklı güçlerde yapılan Nd-YAG lazer kaynak işlemlerinde, kaynak gücündeki ve kaynak hızındaki değişimin kaynak derinliğine etkisi gösterilmiştir. P=2000 W kaynak gücüyle yapılan lazer kaynak işleminde, P=1400 W gücüyle yapılan lazer kaynak işlemine göre daha yüksek kaynak derinlikleri elde edilmiştir. Kaynak hızının artışı her iki kaynak gücünde yapılan lazer kaynak işleminde kaynak derinliğini azaltmıştır [28].

### 3.3.2 Malzeme Özellikleri

Şekillendirme özelliği iyi olan malzemeler daha iyi kaynak edilebilme özelliğine sahiptirler. Sert malzemelerin ise kaynak kabiliyeti iyi değildir. Malzeme bileşimindeki karbon oranı arttıkça sertlik artar, dayanım artar, kaynak kabiliyeti azalır ve plastik şekillendirme özelliği azalmaktadır [28].

Malzeme bileşimindeki karbon oranı arttıkça sertlik artacaktır. Buna bağlı olarak kaynak dikişinin kırılma tokluğu değerlerinde düşüş görülmektedir. Yaklaşık olarak % 0,1-0,15 C içeren çeliklerin kaynak dikişi kırılma tokluk değeri 60 MPaVm iken, yaklaşık %45 C içeren çeliklerdeki kaynak dikişindeki kırılma tokluğu değeri 8 MPaVm değerinde görülmektedir [28].

Malzeme yüzeyi ne kadar temizse elde edilecek kaynak dikişi de o denli temiz olacaktır. Malzeme yüzeyinde sürtünme katsayısını artıracak etmenler kaynak dikiş kalitesini de etkileyecektir. Yine malzeme yüzeyindeki yağ, boya ve fosfat türü kaplamalar gibi oluşumlar kaynak dikiş kalitesini etkileyen parametreler arasındadır [28].

### 3.3.3 Gerilme Durumu

Çelikte gerilmeler iç yapıda veya dış yapıda olabilir. Kaynak kabiliyeti yönünden gerilmelerin varlığı istenmez. Kaynak sırasında çatlakların oluşma riskini artırdığından gerilmeli durumlarda kaynak kabiliyeti düşer [28].

### 3.3.4 Parça Kalınlığı

Parça kalınlığı kaynak işlemi sırasında soğuma hızına etki eder. Kaynak kabiliyetinin iyi olması amacıyla soğuma hızının yavaş olması istenir. Kaynak işlemi yapılan kalın bir malzeme ince bir malzemeye göre daha hızlı bir soğuma süresi içerir. Böylece ısı tesiri altındaki bölge ve kaynak metali ince malzemeye göre daha sert olur. Sertlik rijitliği artırır ve daha geniş bir kaynak ağzı gerektirir. Geniş kaynak ağzı geniş paso gerektireceğinden çekme gerilmeleri artar. Gerilmeler de kaynak kabiliyetini olumsuz etkilediğinden, kalın malzemelerin kaynak edilebilirlikleri iyi değildir [28].

Çelikler kaynak edilebilirlik kabiliyetlerine göre alaşımsız çelikler, düşük alaşımlı çelikler ve yüksek alaşımlı çelikler olmak üzere üç grupta toplanmaktadır. Aynı zamanda karbon eşdeğeri (Ceş) değerine göre çeliklere kaynak öncesi bir işlem yapıp yapılamayacağı belirlenebilir.

Çizelge 3. 1 Karbon eş değerine göre ön işlemlerin gereksinimi

Ceş	Ön Isıtma	Gerilme Giderme
0.40'a kadar	Gereksiz	Gereksiz
0.40-0.60 arası	Gerekli	Gereksiz
0.60 daha büyük değerler için	Zorunlu	Zorunlu

### 3.3.5 İşlem Gazı

Lazer kaynak işlemlerinde kullanılan koruyucu gazlar;



- CO2 gazı,
- He gazı,
- Argon gazı,
- Azot gazıdır

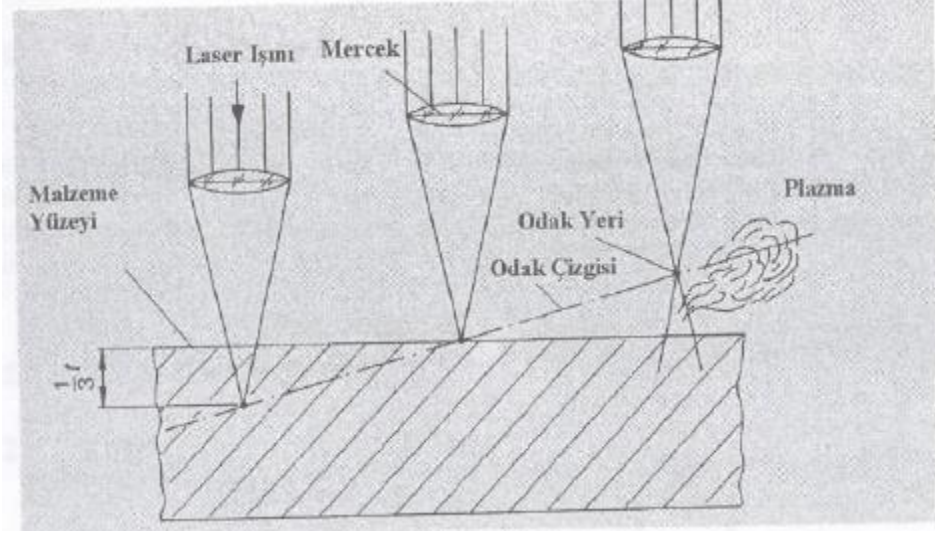
İşlem gazının kullanılması plazma parçacıkları ile işlem gazı parçacıklarının etkileşimi ile buhar plazmasında yeni bir bileşim oluşumuna sebebiyet verir. Böylece lazer ışınının plazma tarafından soğurulma derecesi daha düşük değerlerde tutulmuş olur.

Diğer konvansiyonel kaynak işlemlerinde olduğu gibi lazer kaynağında da kaynak dikiş bölgesinin atmosfer gazlarından korunması gerekir. Bu yüzden koruyucu gaz kullanmak gereklidir. Genellikle paslanmaz çeliklerde helyum gazı ve azot gazı kullanılmaktadır. Helyum gazı ile kaynak dikiş bölgesi daha kaliteli bir durumda tutulabilir. Ancak helyumla gazıyla yapılan kaynak işlemi azot gazıyla yapılan kaynak işlemine göre daha yavaştır. Azot gazı ise kaynak dikiş yüzeylerini bozma etkisi gösterir ancak daha ucuz ve de kaynak hızı sürelerini düşürdüğünden tercihlerde ön sıralarda bulunmaktadır. Karbondioksit gazı ise genellikle alaşımsız çeliklerin kaynağında kullanılmaktadır. Argon gazı da alaşımlı çelikler için iyi bir oksidasyon koruyucu özelliği gösterir [28].

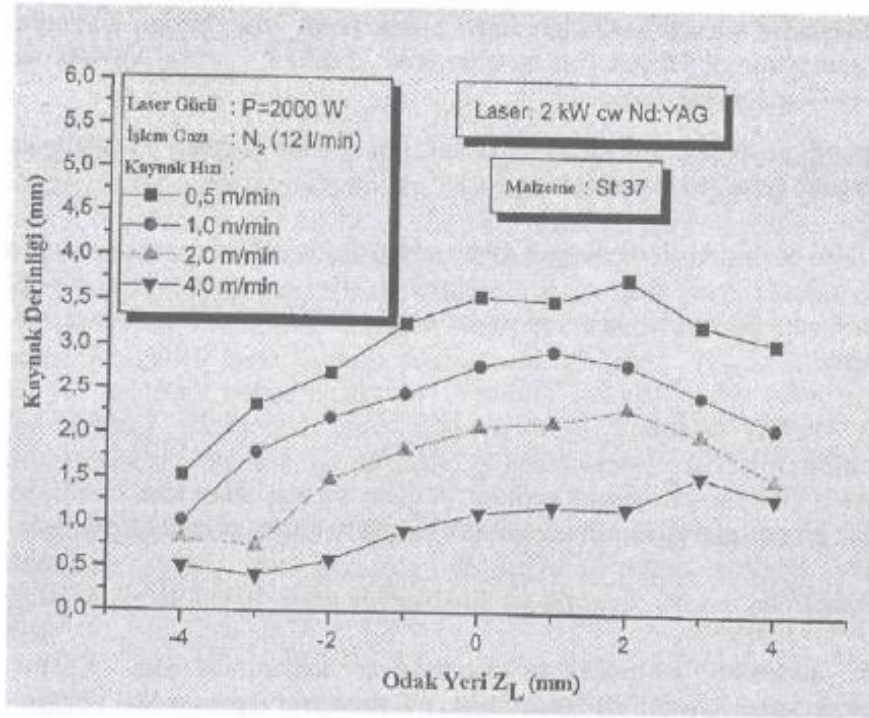
### **3.3.6 Odak Yeri**

Lazer kaynak işleminde odak noktası doğru seçildiğinde kaynak dikişi de beklenildiği yüksek kalitede gelir. Odak noktasını doğru bir şekilde belirlemek plazma oluşumunu önlemede işe yarar. Eğer malzeme yüzeyine dik durumda hatalı bir odaklama yapılırsa mavi bir plazma alevi oluşur. Burada plazma oluşumu sınır değerini saptamaya yönelik bir analiz yapılmış olur. Bu sadece düşük lazer güçlerinde geçerliliğini korur. Dolayısıyla plazma oluşumunu önlemede odaklama ayarı üreticinin detaylı özelliklerine göre belirlenir [28].

Şekil 3. 5’da odak noktasına bağlı olarak plazmanın oluşumu görülebilir.



Şekil 3. 5 Odak noktasına bağlı olarak plazma oluşumu [28]



Şekil 3. 6 Odak noktasının nüfuziyete etkisi [28]

Aynı lazer gücünde yapılan lazer kaynak işleminde yine aynı malzemede görülen odak yeri değişiminin nüfuziyete etkisi Şekil 3. 6' da görülmektedir. Odak noktası tam malzeme yüzeyinde iken oluşan nüfuziyet, odak yerinden uzaklaştıkça oluşan nüfuziyetten daha üst seviyede bulunmaktadır. Malzeme yüzeyi içerisindeki odaklanmalarda en düşük dikiş derinlikleri oluşmuştur, malzeme yüzeyine varmadan yapılan odaklanmada ise malzeme yüzeyi içerisindeki odaklanmaya göre daha yüksek

nüfuziyet oluşmuştur. Genel olarak 0 mm ile  $\pm 2$  mm arasında yapılan odaklanmalarda nüfuziyet artmıştır [28].

### HDEV 4. 1 LAZER KAYNAKLI ENJEKSİYON SİSTEMLERİ

Robert Bosch fabrikaları yüksek basınçlı püskürtme enjektörleri üretimi yapan dünyanın en büyük otomotiv yan sanayidir. Dizel motor sistemleri ve benzinli motor sistemleri için Bursa fabrikasında enjektör üretimini gerçekleştirmektedir. Benzin motor sistemleri için enjektörler HDEV (Hoch Druck Einspritz Ventil) kısaltmasıyla adlandırılmaktadır. HDEV Türkçe anlamıyla, yüksek basınçlı püskürtme enjektörü anlamına gelmektedir. HDEV tipleri ikiye ayrılmaktadır. Bunlar HDEV 4. 1 VE HDEV 5 ürün grupları olarak isimlendirilmektedir.

Bu tez çalışmasında HDEV 4. 1 ürün grupları incelenecektir. Bu grup içerisindeki aktör gövdesi ile bağlantı kovanı parçalarının lazer kaynağı incelenecektir.

#### 4.1 HDEV 4. 1 Ürünleri ve Çalışma Prensipleri

Bir HDEV 4. 1 enjektör grubunun alt parçaları;

- Ventil grup,
- Aktör modul,
- Bağlantı grubundan oluşmaktadır.

Bir enjektörün çalışması iki alt grupta incelenmektedir. Püskürtme ve kapanma prensipleriyle tanımlanan enjektörde;

Püskürtme;

- Meme içindeki baskı yayının kuvveti ile yukarı doğru çekilen iğne memeyi kapatır.

Kontak pimleri ile aktöre verilen akım (yük) sayesinde aktör genişerek iğneyi ittirir ve yay kuvvetini yenerek iğnenin açılmasını sağlar.

Kapanma;

- Elektrik akımı kesilir ve aktör yükü boşaltılır,
- Aktör tekrar eski boyuna döner,
- Yay kuvveti iğneyi tekrar geri çekip memeyi kapatır,
- Püskürtme basıncı 200 bar.



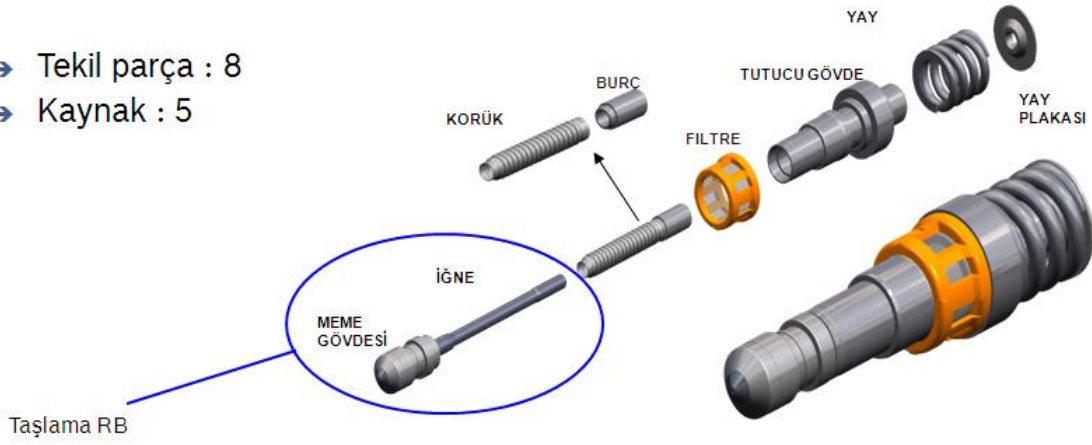
Şekil 4. 1 Enjektör [23]

#### 4.1.1 Ventil Grubu

Yakıt püskürtmesinin gerçekleştiği uç görevini görür.

- Yakıt püskürtme
- A-Meme ile püskürme formunu oluşturma
- Hareketli parçalarla sızdırmazlık

- Tekil parça : 8
- Kaynak : 5

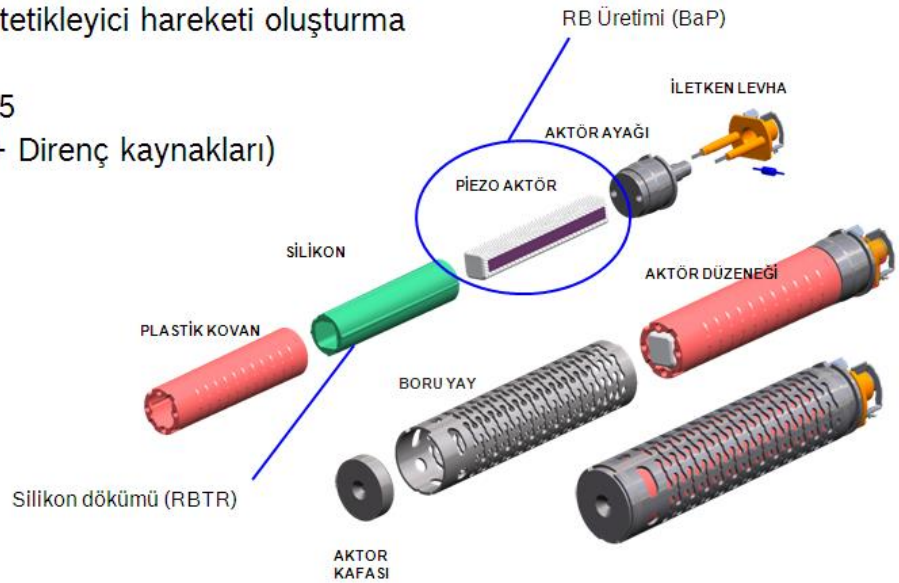


Şekil 4. 2 Ventil grubu [23]

#### 4.1.2 Aktör Grubu

Genleşerek tetikleyici hareketi oluşturan parça görevini görür.

- Genleşerek tetikleyici hareketi oluşturma
- Tekil parça: 5
- Kaynak: 2 (+ Direnç kaynakları)



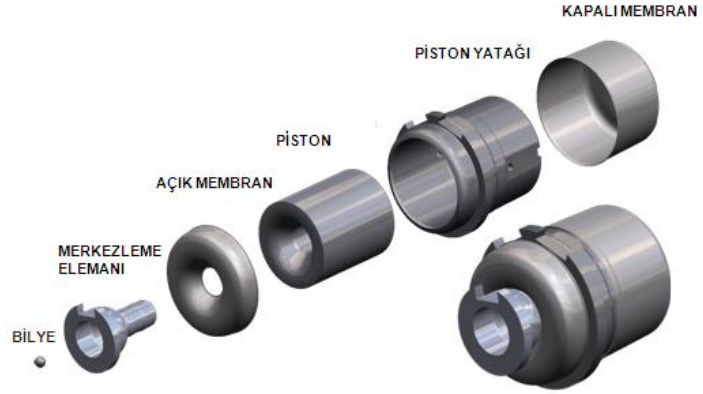
Şekil 4. 3 Aktör grubu [23]

#### 4.1.3 Bağlantı Grubu

Isıl genleşmelerin dengelenmesi, aşınmaların dengelenmesi ve sönümlenme görevlerini gören enjektör parçasıdır.

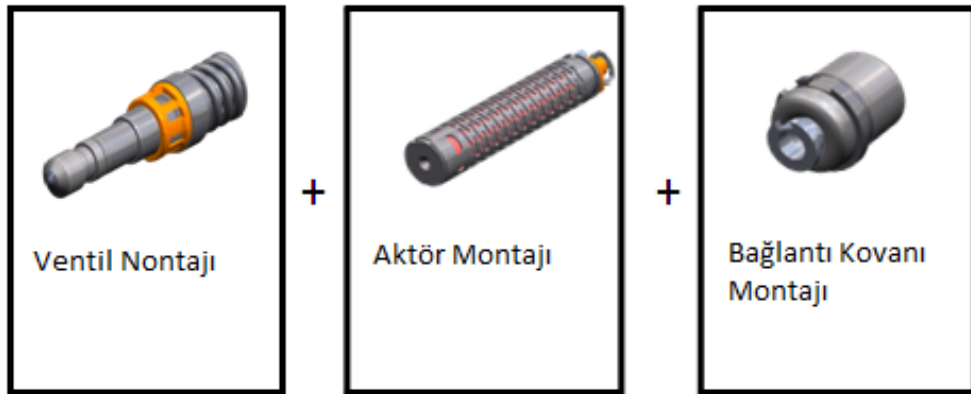
- Isıl genleşmelerin dengelenmesi
- Aşınmaların dengelenmesi,
- Sönümlenme özelliği

- Tekil parça: 6
- Kaynak: 3



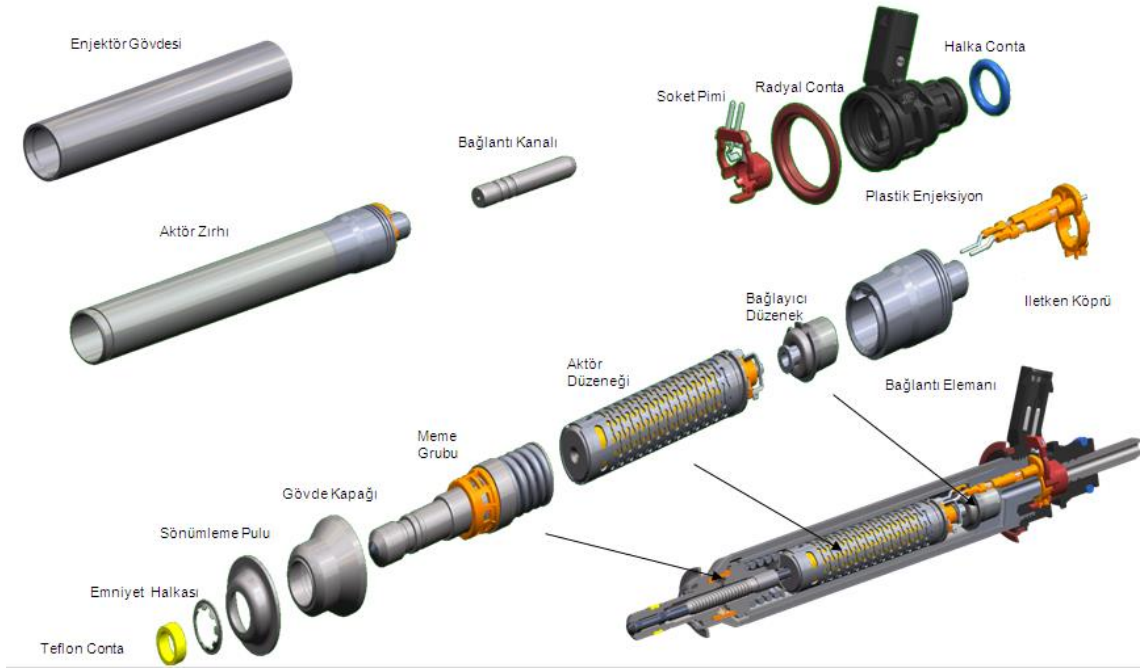
Şekil 4. 4 Bağlantı grubu [23]

Şekil 4. 5' deki üç parça birbirine montaj yapılarak bir enjektör sisteminin temelini oluştururlar.



Şekil 4. 5 Bağlantı grupları [23]

Şekil 4. 5' deki gruplar gövde elamanlarıyla da birleşerek bir enjektör sistemini meydana getirirler.



Şekil 4. 6 Enjektör sistemi [23]

#### 4.2 HDEV 4. 1 Üretim Adetleri

HDEV 4. 1 benzinli enjektör 2012 yılına ait üretim adetleri Çizelge 4. 1' de gösterilmiştir. SL1, SL2 ve SL3 hatları olmak üzere toplam üç hatta üretim yapılmıştır. Detaylı üretim ve ıskarta adetleri Çizelge 4. 1' dedir.

Çizelge 4. 1 SL1 üretim ve ıskarta adetleri

SL1			
Aylar	Sağlam Parça Üretim Adedi	İskarta Adedi	İstasyon 425 Hatalı Parça Sayısı
4	15.201	529	11
5	16.874	640	35
6	13.139	407	21
7	26.727	724	17
8	38.309	965	28
9	47.330	660	9
10	35.789	464	21
11	43.698	651	30
12	46.067	693	0
Toplam	283.134	5733	172



Çizelge 4. 2 SL2 üretim ve iskarta adetleri

SL2			
Aylar	Sağlam Parça Üretim Adedi	Iskarta Adedi	İstasyon 425 Hatalı Parça Sayısı
1	111.301	1011	171
2	119.499	1027	97
3	127.365	1027	109
4	115.449	1138	181
5	111.708	941	42
6	124.533	1043	52
7	124.940	1089	50
8	107.744	1064	23
9	120.081	1030	45
10	99.367	901	24
11	125.940	1.001	100
12	65.305	515	55
<b>Toplam</b>	<b>1.353.232</b>	<b>11.787</b>	<b>949</b>

Çizelge 4. 3 SL3 üretim ve iskarta adetleri

SL3			
Aylar	Sağlam Parça Üretim Adedi	Iskarta Adedi	İstasyon 425 Hatalı Parça Sayısı
1	65.764	949	105
2	92.904	1.029	66
3	100.037	1.013	92
4	106.240	1.140	105
5	106.177	1.127	80
6	64.655	552	38
7	125.609	1.040	74
8	107.475	1.008	39
9	115.897	883	59
10	92.825	823	44
11	123.457	853	81
12	66.896	662	58
<b>Toplam</b>	<b>1.167.936</b>	<b>11.079</b>	<b>841</b>

Çizelge 4. 4 Toplam üretim ve iskarta adetleri

	Sağlam Parça Üretim Adedi	Iskarta Adedi	İstasyon 425 Hatalı Parça Sayısı
SL1	283.134	5.733	172
SL2	1.353.232	11.787	949
SL3	1.167.936	11.079	841
<b>Toplam</b>	<b>2.804.302</b>	<b>28.599</b>	<b>1962</b>

Çizelge 4. 4' de görüldüğü gibi 2012 yılı benzinli enjektör üretim sayısı toplam 2.804.302 adet olarak gerçekleşmiştir. Bu yıl içerisindeki ıskarta sayısı 28.559 adettir. Üretimin müşterisi Mercedes-Benz Daimler grubudur.

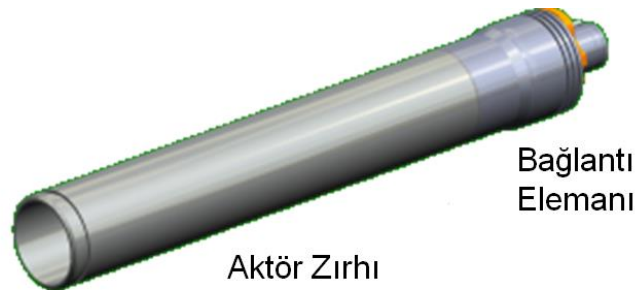


Şekil 4. 7 Hatlara göre ıskarta dağılımı

#### 4.3 Aktör Gövdesi ve Bağlantı Kovanı Parçaları

Benzin enjektörü sistemi içerisinde lazer kaynağı yapılan parçalardan birisi de aktör gövdesi ve bağlantı kovanı parçalarıdır. Aktör gövdesi parçası daha önce montajı yapılan aktör grubunun zırhı olarak görev yapar. Bağlantı kovanı parçası ise iletken köprü ile bağlantı grubu arasında eleman olarak kullanılır. Bu iki parçanın 1000 W' lık Nd-YAG lazer kaynak makinesi ile azot koruyucu gazı eşliğinde kaynak işlemi tamamlanır.

Aktör gövdesi ve bağlantı kovanı parçalarına ait resimler Şekil 4. 8' de gösterilmektedir.



Şekil 4. 8 Aktör gövdesi ve bağlantı kovanı [23]

#### **4.4 Aktör Gövdesi ve Bağlantı Kovanı Lazer Kaynağı**

Bağlantı kovanı olarak adlandırılan bağlantı elemanı 1.4418-X4CrNiMo16-5-1 ESU östenitik paslanmaz çeliği ve aktör gövdesi olarak adlandırılan aktör zırhı parçası 1.4301-X5CrNi18-0 östenitik paslanmaz çeliğidir.

Bu parçalar silindirik eksen kaçıklığını önlemek amacıyla öncelikle üç farklı noktadan lazer nokta kaynağıyla birleştirilmektedir. Daha sonra çevresel lazer kaynağı yapılarak kaynak işlemi tamamlanmaktadır.

##### **4.4.1 Kullanılan Ekipmanlar**

Lazer kaynak işleminde kullanılan kaynak makinesi ve fokus özellikleri aşağıda verilmiştir.

- Lazer TruDisk 1000 (1000 W gücünde Nd-YAG lazer kaynak makinesi),
- Fokus uzaklığı 300 mm,
- Kolimasyon 100 mm.

##### **4.4.2 Kullanılan Kaynak Programı**

Nd-YAG lazer kaynak makinesi programı CFO program PM425 ASS-AG olarak adlandırılmaktadır. Program kaynak makinesi monitöründen manuel olarak ayarlanmaktadır.

##### **4.4.3 Lazer Kaynak Parametreleri ve Koruyucu Gaz**

Lazer nokta kaynağı ve lazer nüfuziyet kaynağı için ayrı ayrı parametreler söz konusudur. Bu parametreler Bölüm 5' te detaylı olarak verilmiştir.

Kaynak optik pozisyonuyla ilgili belirlenen parametreler;

Fokus pozisyonu;

X= 2,0 mm

Y= 2,0 mm

Z= 2,0 mm

Mastar blokları;

X= 12,02 mm

Y= 11,68 mm

Z= 13,4 mm' dir.

Koruyucu gaz olarak azot gazı kullanılmaktadır.

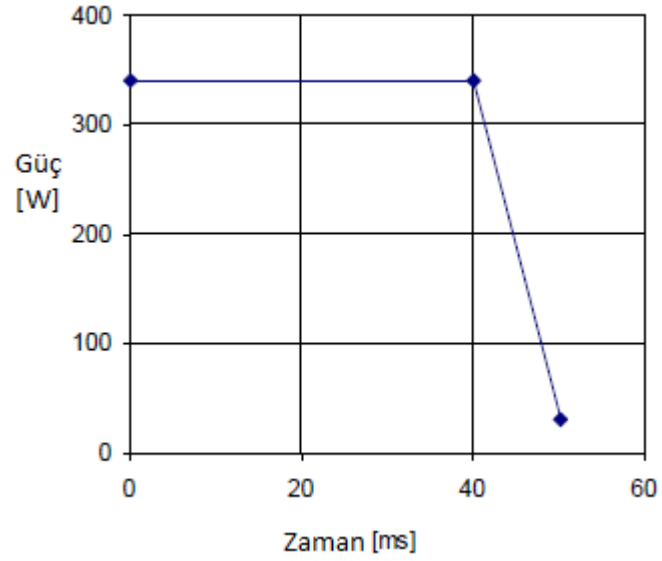
Koruma gazı izleme süresi = 15 dak.

Koruma gazı debisi = 5 litre/dakika

Koruma gazı basıncı = 8 mbar

Punta frekansları = 1,35; 2,70; 1,35; 1,00

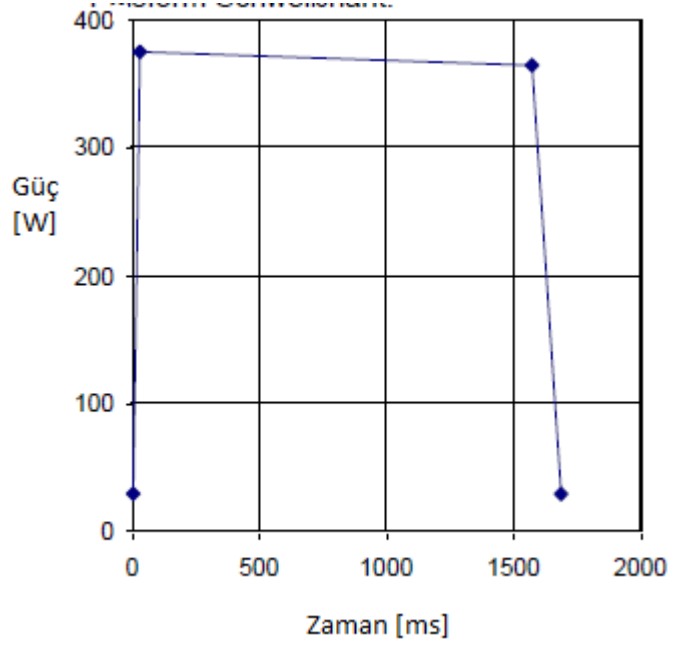
Kaynak hızı = 0.815 m/dak



Şekil 4. 9 Lazer punta gücü değişimi

Çizelge 4. 5 Lazer punta gücü değişimi

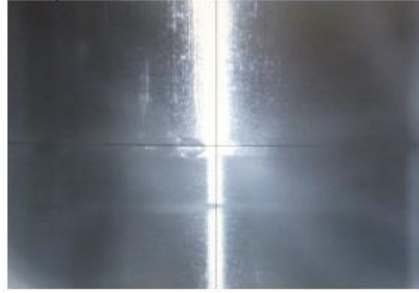
Zaman (ms)	Güç (W)
0	340
40	340
50	30



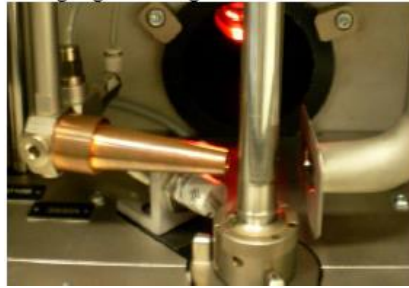
Şekil 4. 10 Lazer nüfuziyet kaynak gücü değişimi

Çizelge 4. 6 Lazer nüfuziyet kaynak gücü değişimi

Zaman (ms)	Güç (W)
0	340
30	360
1570	360
1680	30



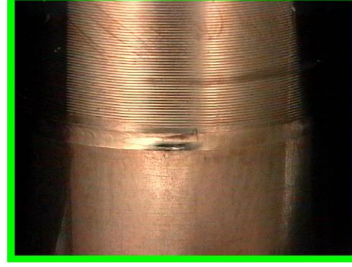
Şekil 4. 11 Kaynak dikiş pozisyonu



Şekil 4. 12 Koruma gazı pozisyonu

#### 4.5 Lazer Kaynak Dikiş Resimleri

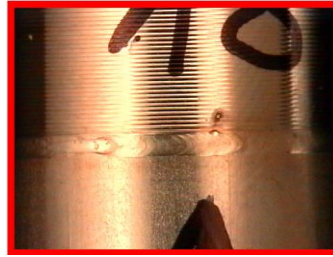
ASS-AG östenitik paslanmaz çeliklerin lazer kaynağında tolerans sınırları içerisindeki resimler ve hatalı kabul edilen örnek resimler aşağıda gösterilmiştir.



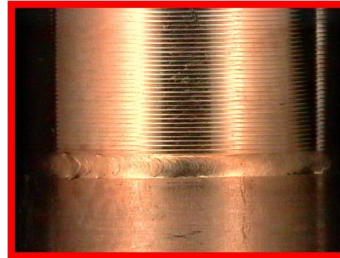
Şekil 4. 13 Kaynak dikişi iyi



Şekil 4. 14 Kaynak dikişinde derinlik



Şekil 4. 15 Kaynak sıçraması



Şekil 4. 16 Kaynak dikiş formu bozuk ve hafif renklenme

#### 4.6 Tespit Edilen Hatalı Kaynaklar

Bölüm 4. 5' de östenitik paslanmaz çelik parçalarının lazer kaynağına ait, hata katoloğuna göre belirlenmiş resimler gösterilmiştir. Bu bölümde ise yine aynı kaynak

işlemine aynı parametrelerle lazer kaynağı yapılmış parçaların kaynak dikişinde meydana gelen hatalar resmedilmiştir.

Östenitik paslanmaz çelik parçalarının lazer kaynağında meydana gelen hatalar;

- Aktör gövdesinin yanlış monte edilmesinden oluşabilmektedir,
- Kaynağın koruma gazsız yapılmasından oluşabilmektedir,
- Kaynak dikişinin tam olmaması şeklinde olabilmektedir,
- Parçaların yanlış yerleştirilmesinden oluşabilmektedir,
- Aktör gövdesinin vuruğundan oluşabilmektedir,
- Kaynak dikişindeki derinlik şeklinde oluşabilmektedir,
- Kaynak sıçraması şeklinde oluşabilmektedir,
- Kaynak dikiş formunun bozuk olması şeklinde oluşabilmektedir,
- Hafif renklenme şeklinde oluşabilmektedir.

Bu çalışmada kaynak dikiş bölgesinde görülen derinlik, boşluk, delik ve yüzey form bozuklukları şeklinde oluşan hatalara yönelik tespitler yapılmıştır. Lazer kaynak denemesi yapılan parçalara ait tespit edilen hatalı dikiş resimleri aşağıdadır.



Şekil 4. 17 Kaynak dikişinde delik



Şekil 4. 18 Kaynak dikişinde boşluk



Şekil 4. 19 Kaynak dikişinde boşluk



Şekil 4. 20 Kaynak dikişinde boşluk

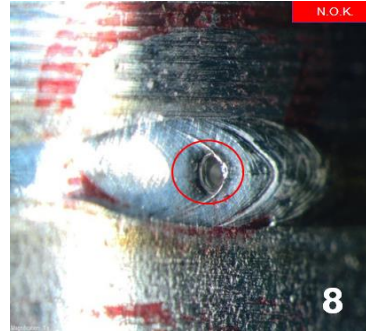


Şekil 4. 21 Kaynak dikişinde boşluk

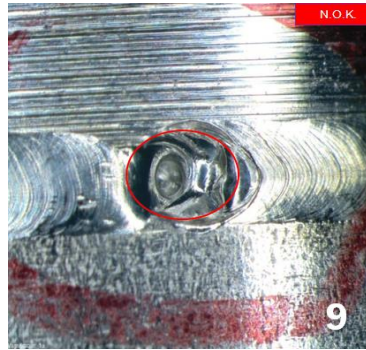




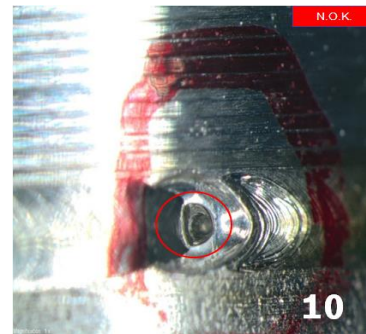
Şekil 4. 22 Kaynak dikişinde yüzey form bozukluğu ve boşluk oluşumu



Şekil 4. 23 Kaynak dikişinde boşluk oluşumu



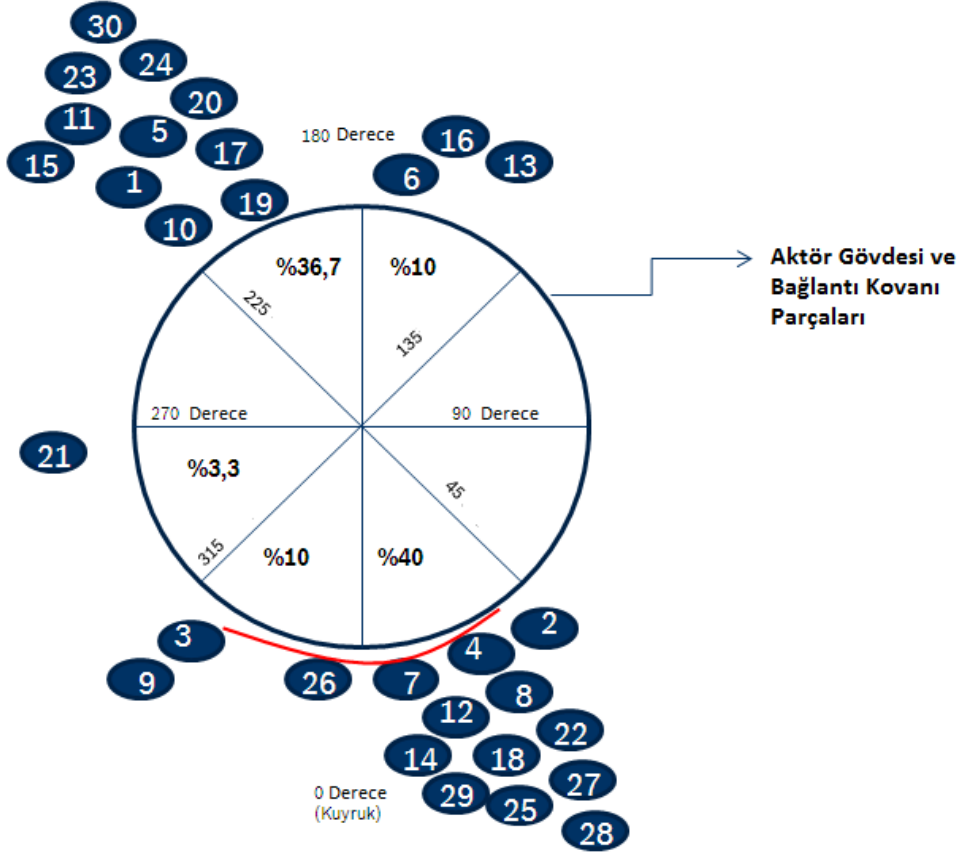
Şekil 4. 24 Kaynak dikişinde yüzey form bozukluğu ve boşluk oluşumu



Şekil 4. 25 Kaynak dikişinde yüzey form bozukluğu ve boşluk oluşumu

#### 4.6.1 Lazer Kaynağı Hatalı Dikiş Bölgelerinin Tespiti

Parçaların lazer kaynağı incelendiğinde kaynak dikiş bölgelerinde hatalara diğer bölgelere oranla daha çok rastlanıldığı tespit edilmiştir. Bir önceki bölümde on adetlik lazer kaynak denemesinde, kaynak dikiş bölgelerinde delik, boşluk ve yüzey form bozukluğu gibi hatalara rastlanılmıştır. Bu hataların dağılım bölgeleri Şekil 4. 26' da gösterilmiştir.

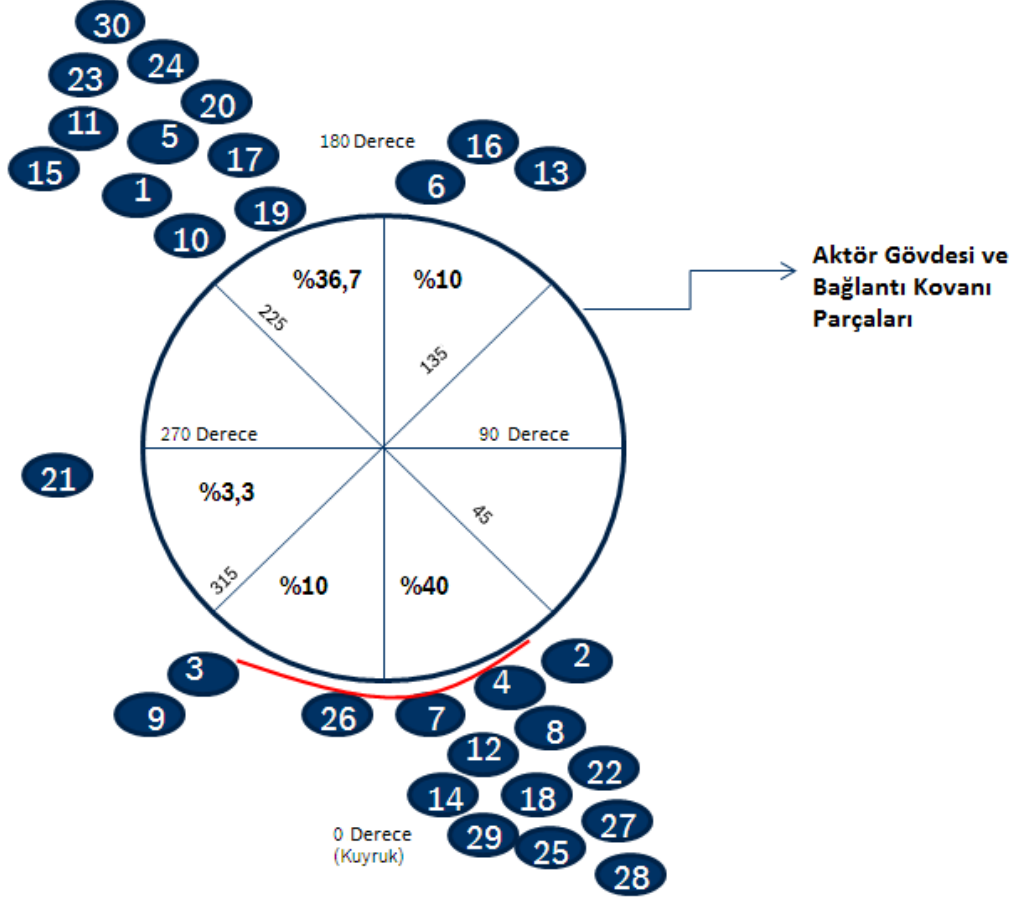


Şekil 4. 26 Kaynak dikişindeki hataların dağılımı

10 adetlik deneme sonucunda kaynak dikiş bölgesinin 0-45 derece bölgesinde hataların yoğun olarak ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. 180-225 ile 315-360 derecelik bölgelerde ise 1 adetlik hata oluşmuştur.

Kaynak dikiş bölgesinin 0-45 derecelik bölgelerinde yoğunlaşan bu hatalar, kaynak başlangıç bitiş noktası olarak bilinen bu bölgede meydana gelmiştir. Bu bölgede işlem eksen kaçıklığını önlemek amacıyla yapılan punta kaynağıyla başlanılarak devamında çevresel lazer kaynağı ile tamamlanmaktadır. Dolayısıyla hem punta kaynağı hem de çevresel kaynağı tarafından iki kez üstünden geçilen bu bölge daha fazla ısı tesiri

altında kalmaktadır. Fazla enerji altında ısınan bu bölgede koruyucu gaz da yetersiz kalmakta ve yüzey bozuklukları, delik ve boşluk oluşumu gibi hatalar artmaktadır. Hataların bu bölgede yoğunlaşmalarını teyit etmek amacıyla 30 adetlik deneme daha yapılarak oluşan hataların bölgesel dağılımları Şekil 4. 27' de gösterilmiştir.



Şekil 4. 27 Kaynak dikişindeki hataların dağılımı

Enjektör üretimi üç ayrı hatta gerçekleştirilmektedir. Bunlar SL1, SL2 ve SL3 hatları olarak isimlendirilmektedir. Yukarıda kaynak başlangıç bitiş noktası verilen bölgeler SL1 ve SL3 hatları için geçerlidir. 10 adetlik denemede de kaynak dikiş bölgesi SL1 ve SL3 için geçerlidir. SL2 için ise kaynak dikiş bölgesi 30 adetlik deneme için 135-225 dereceler arasındadır. Buna göre bakıldığında kaynak dikiş bölgelerinde meydana gelen hataların %76,7' si 0-45 derece bölgesinde gerçekleşmiştir.

#### 4.7 Lazer Kaynağı Hata Çeşitlerinin Dağılımı

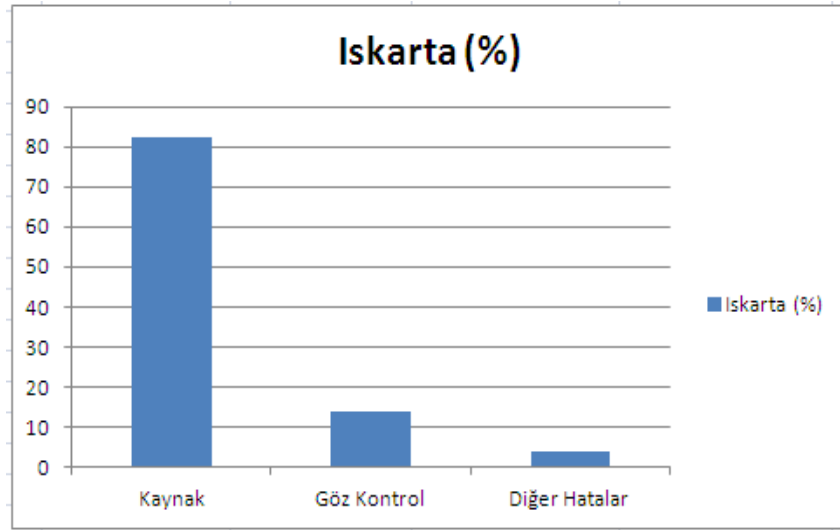
01.01.2012 ile 01.12.2012 tarihleri arasında izlenen kaynak hataları;

- Kaynakta boşluk,

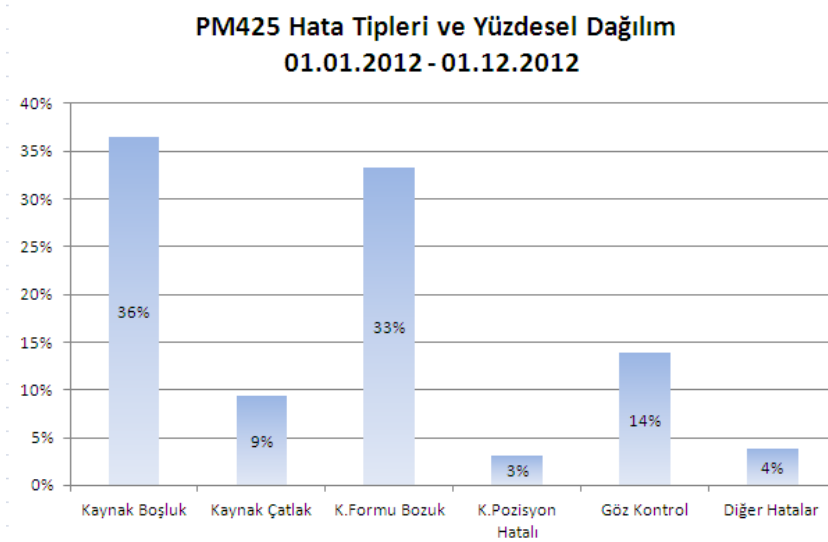
- Kaynakta çatlak,
- Kaynak form bozukluğu,
- Kaynak pozisyon hatası,
- Göz kontrol hataları,
- Diğer hatalar,

Olmak üzere tespit edilmiştir.

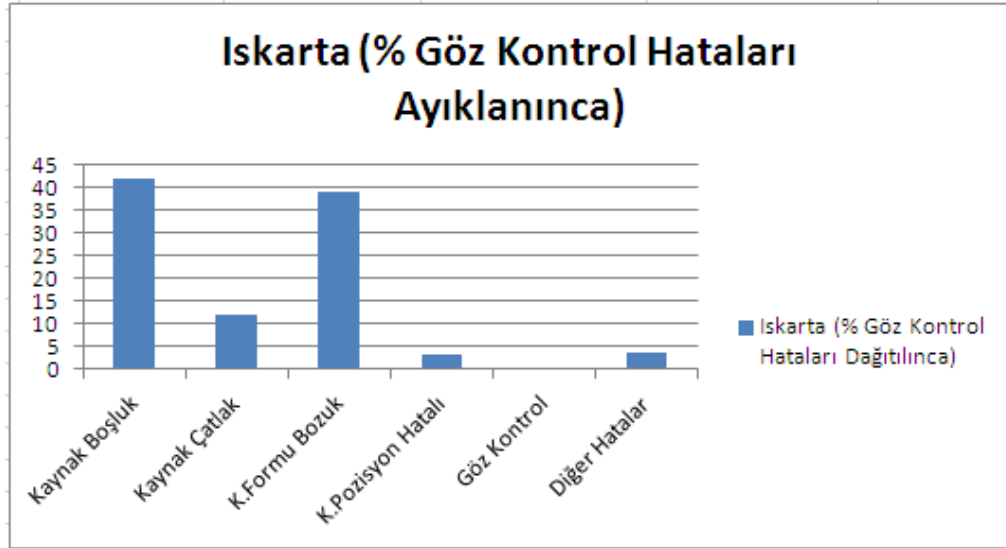
Yukarıdaki hataların yıl boyunca yüzdesel dağılımları Şekil 4. 28, Şekil 4. 29 ve Şekil 4. 30' da gösterilmiştir.



Şekil 4. 28 Iskarta sebeplerinin dağılımı



Şekil 4. 29 Hata tipleri ve yüzdesel dağılımı



Şekil 4. 30 Hata tipleri ve yüzdesel dağılımı

Kaynak hataları incelendiğinde hataların %36' lık bir bölümünün kaynak boşluğu ve %33' lük bir bölümünün de kaynak form bozukluğu olduğu görülmektedir. Göz kontrol hataları ise ikinci ayıklamada hatalara dağıtıldığında %42,5' lik bir bölümünün kaynak boşluğu ve %38,5' lik bir bölümünün de kaynak form bozukluğu olduğu görülmektedir. Bu durumda ıskartaların artış sebebi olarak hataların %50' den fazla (%81) kısmında kaynak boşluk, delik ve kaynak form hatası olduğu görülmektedir.

**DENEYSEL ÇALIŞMALAR**

Bu çalışmada iki adet yüksek alaşımlı paslanmaz çeliğin lazer kaynağı ile birleştirilmesi incelenmiştir. İlk olarak kaynak parametrelerinde yapılan değişikliklerin kaynak kabiliyetindeki etkisi gözlemlenmiştir. Bulgular fotoğraflanmıştır. Daha sonra malzeme bileşimi analiz edilerek, kaynak kabiliyetini etkileyebilecek yüzey kontrolleri yapılmıştır. Parçaların lazer kaynağından önce girdiği işlemler de kontrol edilmiştir.

**5.1 Kullanılan Malzemeler**

Bu tez çalışmasında numune olarak 2,007 mm kalınlıklı 1.4301-X5CrNi18-8 ile 4,9 mm kalınlıklı 1.4418-X4CrNiMo16-5-1-ESU östenitik paslanmaz çelikleri kullanılmıştır. Kullanılan malzemelere ait resimler ve X-ışını spektroskopisiyle tespit edilen kimyasal bileşenleri Çizelge 5. 1 ve Çizelge 5. 2' de gösterilmiştir. Parçaların dikiş bölgelerinin görüntülenmesi zeiss teknooskop kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 5. 1 1.4301-X5CrNi18-8 çeliğinin kimyasal bileşenleri

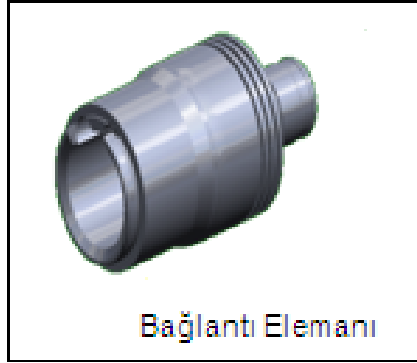
Element	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Toplam
EDX-Analizi 1	0.28	18.74	1.60	71.52	7.87	100.00

Çizelge 5. 2 1.4418 X4CrNiMo16-5-1 çeliğinin kimyasal bileşenleri

Element	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo	Toplam
EDX-Analizi 1	0.50	15.86	1.05	76.21	5.46	0.90	100.00



Şekil 5. 1 Aktör gövdesi aktör zırhı



Şekil 5. 2 Bağlantı kovanı elemanı

## 5.2 Kaynak Parametre Değişimleri

Östenitik paslanmaz çeliklerin lazer kaynak parametreleri Çizelge 5. 3 ve Çizelge 5. 4' de verilmiştir.

Çizelge 5. 3 Lazer kaynak parametreleri

Lazer Kaynak Parametreleri	
Kaynak Makinesi Gücü	1 k W
Koruyucu Gaz	Azot
Koruyucu Gaz Debisi	5 l / dak
Kaynak Genişliği	0.75-1.05 mm
Nüfuziyet	0.55-0.75 mm

Çizelge 5. 4 Kaynak süresince güç değişimi

Kaynak Süresince Güç Değişimi	
Zaman (ms)	Güç (W)
0	30
60	350
1680	30

Bu çalışmada, iki östenitik paslanmaz çelik malzeme Trumpf Trudisk 1000 Nd-YAG makinesi ile sürekli olarak enerjisini açığa çıkaran ışınlar ile kaynak edilmiştir. Lazer kaynak makinesine ait kaynak optik pozisyonları aşağıdadır.

Fokus pozisyonu; X= 2,00 mm; Y= 2,00 mm; Z= 2,00 mm

Mastar blokları; X= 12,02 mm; Y= 11,68 mm; Z= 13,4 mm' dir.

Parçalar silindirik olduğundan eksen kaçıklığını önlemek amacıyla çevresel lazer kaynağından önce parçaların üç bölgesine lazer punta kaynağı yapılmıştır. Puntalama işlemi bir saniye sürmektedir. Puntalama süresince sıcaklık 470°C ile 530°C arasında değişmektedir.

Çizelge 5. 5 Lazer punta parametreleri

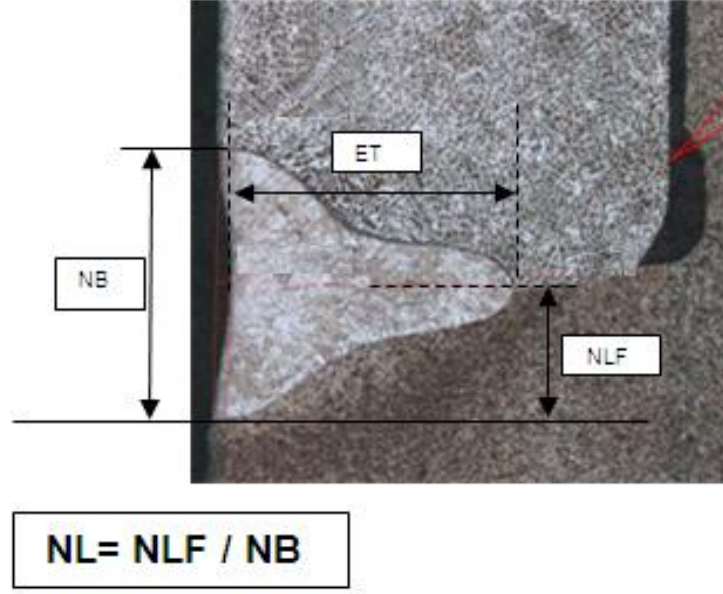
Lazer Punta Parametreleri	
Zaman (ms)	Güç (W)
0	300
20	300
30	30
0	0

Lazer punta süresi, punta gücü ve kaynak gücü parametrelerinin değiştirilerek yapılan deney sonuçlarına göre kaynak dikiş geometrisi fotoğraflanmıştır. Kaynak sonrası dikişte çatlak kontrolü yapılmıştır. Sonuçlar fotoğraflanmıştır. Ayrıca kaynak dikişinde boşluk meydana gelip gelmediği de kontrol edilmiştir. Her deney sonucunda ana malzemedeki ve kaynak dikişindeki sertlik ölçümü vickers cinsinden ölçülmüştür.

### 5.2.1 Deneme Sonuçları

İlk denemede seri imalat koşullarındaki lazer kaynak parametreleri kullanılmıştır. Kullanılan parametreler Çizelge 5. 3, 5. 4 ve 5. 5 ' de gösterildiği gibidir. 100 adetlik parçada lazer kaynak işlemi yapılmıştır. Ölçüm sonuçlarının ortalama değerleri Çizelge 5. 6' da verilmiştir.





Şekil 5. 3 Dikiş geometrisi [16]

Çizelge 5. 6 Birinci deney geometrik ölçüm sonuçları

Geometrik Faktörler	NB (Dikiş Genişliği)	ET (Derinlik)	NLF	Çatlak	Boşluk
Değerler	0.820 mm	0.722 mm	0.394 mm	Yok	486 $\mu$ m

Deney sonuçlarına göre lazer kaynağı diğer geleneksel kaynak yöntemleriyle karşılaştırıldığında, dikiş genişliğinin dar sınırlar içerisinde kaldığı görülmektedir. Kaynak bölgesinde herhangi bir çatlak oluşumuna rastlanmamıştır. Ancak 486  $\mu$ m' lik boşluk oluşumu gözlemlenmiştir. 1.4301-X5CrNi18-8 östenitik paslanmaz çeliğin sertlik değeri 299 vickers, 1.4418 X4CrNiMo16-5-1 ESU östenitik paslanmaz çeliğin sertlik değeri 368 vickers ve kaynak dikişinin sertlik değeri 210 vickers olarak hesaplanmıştır. Kaynak dikişine en yakın ısı tesiri altındaki bölgenin sertlik değeri ise 394 vickers olarak bulunmuştur.

İkinci denemede lazer puntalama süresinin boşluk oluşumuna etkisi incelenmek istenmiştir. Bu amaçla punta süresinin yarı yarıya (20 ms' den 10 ms' e) düşürülmesi öngörülmüştür. Lazer punta süresi değişimi Çizelge 5. 7' de gösterilmiştir. Diğer punta gücü ve kaynak gücü değişimleri Çizelge 5. 4 ve Çizelge 5. 5' de gösterilmiştir. Bu denemede 100 adetlik parça kaynak edilmiş ve ölçüm sonuçları ortalama olarak Çizelge 5. 8' de verilmiştir.

Çizelge 5. 7 Lazer punta süresi değişimi

Zaman (ms)
0
10
15
0

Çizelge 5. 8 İkinci deney geometrik ölçüm sonuçları

Geometrik Faktörler	NB (Dikiş Genişliği)	ET (Derinlik)	NLF	Çatlak	Boşluk
Değerler	0.819 mm	0.720 mm	0.390 mm	Yok	Yok

Lazer puntalama süresinin azaltılması ısı tesiri altındaki bölgenin ısıdan daha az etkilenmesine yol açmıştır. Dikiş genişliğinde 0.001 mm' lik bir azalma tespit edilmiştir. Nüfuziyette de azalma gözlemlenmiştir. Ancak emniyet sınırları içerisinde kabul edilebilir bir değişim olduğundan sorun teşkil etmemiştir. Seri imalat koşullarında yapılan kaynak işleminde görülen boşluk oluşumunun, punta süresinin azaltılmasıyla oluşmadığı görülmektedir. 1.4301-X5CrNi18-8 östenitik paslanmaz çeliğin sertlik değeri 336 vickers, 1.4418 X4CrNiMo16-5-1 ESU östenitik paslanmaz çeliğin sertlik değeri 342 vickers ve kaynak dikişinin sertlik değeri 212 vickers olarak hesaplanmıştır. Kaynak dikişine en yakın ısı tesiri altındaki bölgenin sertlik değeri ise 383 vickers olarak bulunmuştur.

Üçüncü denemede punta süresinin azaltılmasının olumlu sonuçlanması kabul edilerek (10 ms' lik punta süresi kullanılarak) punta gücü 300 W' tan 200 W' a düşürülmüştür. Kaynak gücü parametreleri Çizelge 5. 4' te gösterilmiştir. Lazer punta parametreleri Çizelge 5. 9' da gösterilmiştir. Deneyde 100 adetlik parça lazer kaynak işlemine tabi tutulmuştur.

Çizelge 5. 9 Lazer punta parametreleri

Zaman (ms)	Güç (W)
0	200
10	200
15	30
0	0

Çizelge 5. 10 Üçüncü deney geometrik ölçüm sonuçları

Geometrik Faktörler	NB (Dikiş Genişliği)	ET (Derinlik)	NLF	Çatlak	Boşluk
Değerler	0.826 mm	0.704 mm	0.402 mm	Yok	Yok

Kaynak gücünün düşürülmesi nüfuziyette azalmaya neden olmuştur. Kaynak işleminde yeterli nüfuziyetin sağlanması gerekir. 100 W' lık bir düşüş nüfuziyette 0.016 mm' lik düşüşe neden olmuştur. Bu değişimler punta kaynak bölgelerinde meydana gelen değişimlerdir. Kaynak dikişinde çatlak ve boşluğa rastlanmamıştır. 1.4301-X5CrNi18-8 östenitik paslanmaz çeliğin sertlik değeri 342 vickers, 1.4418 X4CrNiMo16-5-1 ESU östenitik paslanmaz çeliğin sertlik değeri 343 vickers ve kaynak dikişinin sertlik değeri 209 vickers olarak hesaplanmıştır. Kaynak dikişine en yakın ısı tesiri altındaki bölgenin sertlik değeri ise 376 vickers olarak bulunmuştur.

Birinci, ikinci ve üçüncü denemeler punta kaynak bölgelerinde meydana gelen değişimlerin sonuçlarını içermektedir. Dolayısıyla kaynak dikişinin geneli itibariyle bilgi vermemektedir. Dördüncü ve beşinci deneyler ise kaynak dikişinin geneli itibariyle yapılan çalışmaları içermektedir.

Dördüncü denemede punta parametreleri seri imalat koşullarındaki parametreler olarak kabul edilmiştir. Kaynak gücü parametresinde yapılan değişim gözlemlenmiştir. Kaynak gücü 350 W' tan 290 W' a düşürülmüştür. Lazer kaynak işlemi 100 adet parçada gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonuçları ortalama olarak Çizelge 5. 12' de verilmiştir. Kaynak güç değişimi Çizelge 5. 11' de gösterilmiştir.

Çizelge 5. 11 Lazer kaynak güç değişimi

Zaman (ms)	Güç (W)
0	30
60	350
1570	290
1680	30

Çizelge 5. 12 Dördüncü deney geometrik ölçüm sonuçları

Geometrik Faktörler	NB (Dikiş Genişliği)	ET (Derinlik)	NLF	Çatlak	Boşluk
Değerler	0.785 mm	0.547 mm	0.411 mm	Yok	30 µm

Kaynak gücünde yapılan 60 W' lık düşüş hem dikiş genişliğinde hem de nüfuziyette azalmalara sebebiyet vermiştir. Nüfuziyet seri imalat koşullarındaki dikiş geometrisi değerlerine göre %25 oranında azalmıştır. Bu oran yüksek olduğundan deney seri imalat koşullarındaki parametreden 30 W' lık bir düşüş esas alınarak tekrarlanmıştır. 1.4301-X5CrNi18-8 östenitik paslanmaz çeliğin sertlik değeri 333 vickers, 1.4418 X4CrNiMo16-5-1 ESU östenitik paslanmaz çeliğin sertlik değeri 334 vickers ve kaynak dikişinin sertlik değeri 213 vickers olarak hesaplanmıştır. Kaynak dikişine en yakın ısı tesiri altındaki bölgenin sertlik değeri ise 360 vickers olarak bulunmuştur.

Kaynak gücünde yapılan 60 W' lık düşüşün istenilen sınırlar içerisinde sonuçlar vermemesi deneyde kullanılan kaynak gücü parametresinin 30 W düşüşle tekrarlanması gerekli görülmüştür. Lazer kaynak işlemi 100 adet parçada gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonuçları Çizelge 5. 14' de ortalamaları hesaplanarak verilmiştir. Kaynak güç değişimi Çizelge 5. 13' te gösterilmiştir.

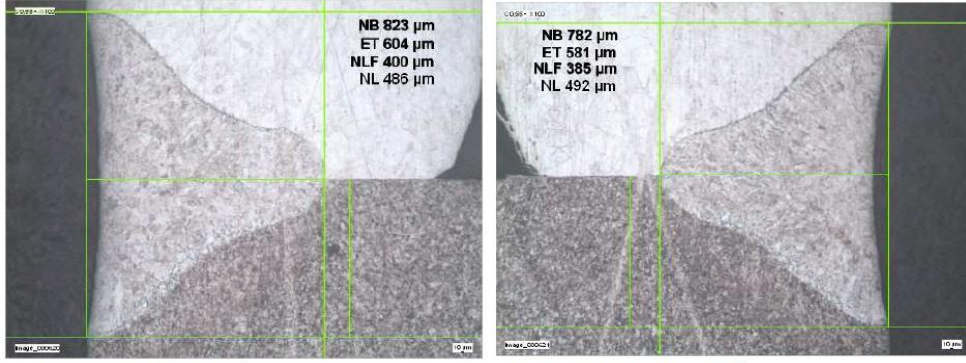
Çizelge 5. 13 Lazer kaynak gücünün zamana göre değişimi

Zaman (ms)	Güç (W)
0	30
60	350
1570	320
1680	30
0	0

Çizelge 5. 14 Beşinci deney geometrik ölçüm sonuçları

Geometrik Faktörler	NB (Dikiş Genişliği)	ET (Derinlik)	NLF	Çatlak	Boşluk
Değerler	0.787 mm	0.598 mm	0.392 mm	Yok	Yok

Kaynak gücünde yapılan 30 W' lık düşüş sonucunda istenilen nüfuziyet derinliği değerlerine ulaşılmıştır. Kaynak bölgesinde herhangi bir çatlak ve boşluk oluşumu görülmemiştir. Kaynak dikişine en yakın ısı tesiri altındaki bölgenin sertlik değeri 385 vickers olarak ölçülmüştür. Seçilen üç adet parçanın kaynağında incelenen kaynak dikişine ait metalurjik resimler ve dikiş geometrisine ait ölçümler aşağıdadır. Bir kaynağa ait dikiş geometrisi sağ ve sol olmak üzere iki bölgeden incelenmiş ve fotoğraflanmıştır.



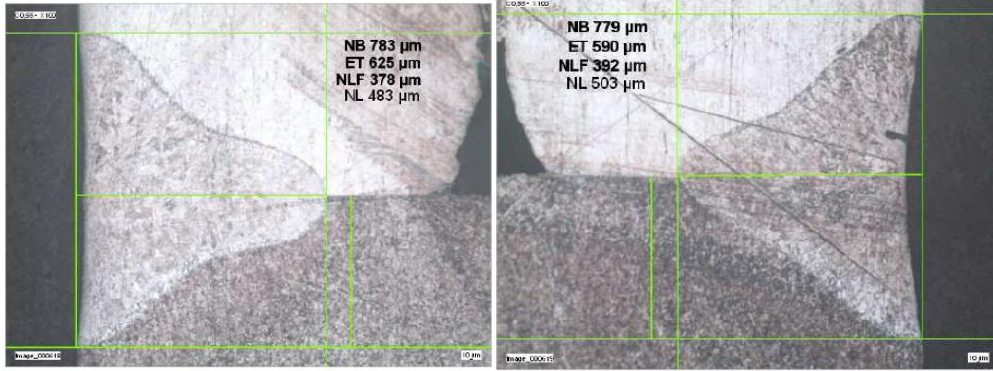
1665 "AG-ASS" SOL-1

1665 "AG-ASS" SAĞ-1

Şekil 5. 4 Birinci parça dikiş geometrisi sol ve sağ resmi

Çizelge 5. 15 Birinci parça geometrik ölçüm sonuçları

Parça No	NB	ET	NLF	NL
1.Sol	0.823	0.604	0.4	0.486
1.Sağ	0.782	0.581	0.385	0.492



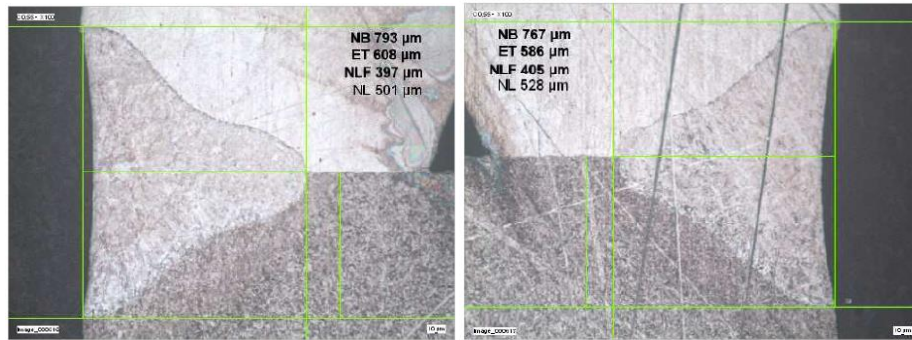
1665 "AG-ASS" SOL-2

1665 "AG-ASS" SAĞ-2

Şekil 5. 5 İkinci parça dikiş geometrisi sol ve sağ resmi

Çizelge 5. 16 İkinci parça geometrik ölçüm sonuçları

Parça No	NB	ET	NLF	NL
1.Sol	0.783	0.625	0.378	0.483
1.Sağ	0.779	0.59	0.392	0.503



1665 "AG-ASS" SOL-3

1665 "AG-ASS" SAĞ-3

Şekil 5. 6 Üçüncü parça dikiş geometrisi sol ve sağ resmi

Çizelge 5. 17 Üçüncü parça geometrik ölçüm sonuçları

Parça No	NB	ET	NLF	NL
1.Sol	0.793	0.608	0.397	0.501
1.Sağ	0.767	0.586	0.405	0.528

Yapılan deney sonuçlarına göre boşluk oluşumunun lazer punta süresinin azaltılmasıyla azaldığı görülmüştür. Aynı zamanda kaynak gücündeki 30 W'lık bir düşüşün nüfuziyeti çok fazla etkilemeden boşluk ve çatlak oluşumunda engelleyici olduğu görülmüştür. Genel kaynak işlemi itibarıyla sertlik değerinin dikiş bölgesinde en alt seviyelerde yer aldığı tesbit edilmiştir. Isı tesiri altındaki kaynak dikişine en yakın bölgelerde ise ana metalin sertlik değerinden daha yüksek sertlik değerlerine rastlanılmıştır. 30 W'lık kaynak gücü düşüşüyle yapılan denemede kaynak dikişinde herhangi bir çatlak veya boşluk oluşumu görülmemiştir.

### 5.3 Malzeme Yüzey Analizleri

Bu bölümde ilk olarak malzemelerin EDX analizi yapılarak kimyasal kompozisyonları belirlenmiştir. Daha sonra kaynak edilecek malzemelerin geometrik tolerans değerleri araştırılmıştır. Kaynağı etkileyecek pürüzlülük değerleri kontrol edilmiştir. En son olarak da her iki malzemenin yüzey fotoğrafları teknooskop altında çekilerek zıtlıklar araştırılmıştır.

#### 5.3.1 EDX Analizi

1.4301-X5CrNi18-8 malzemesine ait kimyasal bileşenler Çizelge 5. 18' de gösterilmiştir.

Çizelge 5. 18 Kimyasal bileşenler

Element	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Toplam
EDX-Analizi 1	0.28	18.74	1.60	71.52	7.87	100.00
EDX-Analizi 2	0.40	19.42	1.19	71.45	7.54	100.00

Parça yüzeyinden alınan EDX-Analizi sonucu çıkan kimyasal bileşenler incelendiğinde östenitik paslanmaz çelik malzeme ile uyum gösterdiği görülmektedir. Detaylı EDX-analizi sonuçları Çizelge 5. 18' de yer almaktadır.

1.4418 X4CrNiMo16-5-1 ESU malzemesine ait kimyasal bileşenler Çizelge 5. 19' da gösterilmiştir.

Çizelge 5. 19 Kimyasal bileşenler

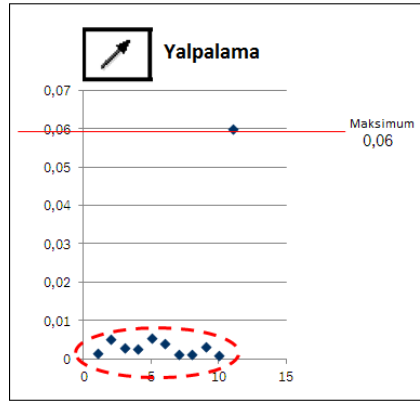
Element	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo	Toplam
EDX-Analizi 1	0.50	15.86	1.05	76.21	5.46	0.90	100.00
EDX-Analizi 2	0.38	15.98	1.18	76.51	5.04	0.91	100.00

Parça yüzeyinden alınan EDX-Analizi sonucu çıkan kimyasal bileşenler incelendiğinde östenitik paslanmaz çelik malzeme ile uyum gösterdiği görülmektedir. Detaylı EDX-analizi sonuçları Çizelge 5. 19' da yer almaktadır.

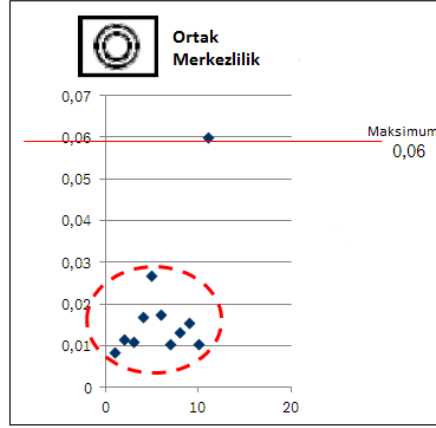
### 5.3.2 Geometrik Ölçü Kontrolü

Geometrik ölçü kontrolü, kaynağı yapılan parçaların kaynak bölgeleri ve kaynak bölgelerine yakın bölgelerinin tolerans değerleri arasında olup olmadığının kontrolü amacıyla yapılmıştır. Her iki parça için de ayrı ayrı önemli görülen bölgelerin araştırılma sonuçları aşağıdaki şekillerde verilmiştir. Her iki malzemeden de on adet seçilmiştir.

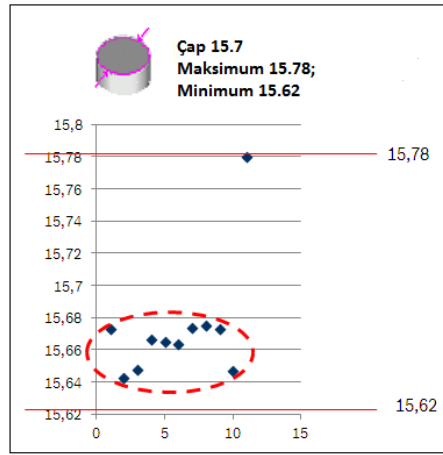
1.4301-X5CrNi18-8 östenitik paslanmaz çelik malzemesine ait önemli geometrik ölçüm değerleri Şekil 5. 7, Şekil 5. 8, Şekil 5. 9, Şekil 5. 10, Şekil 5. 11 ve Şekil 5. 12'de gösterilmiştir.



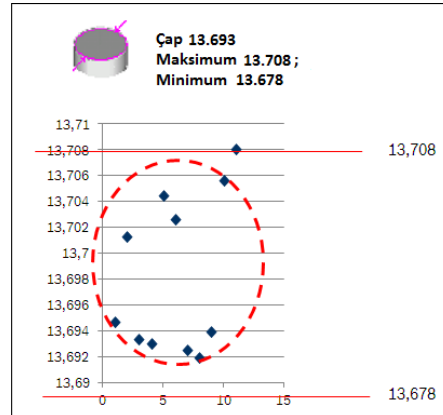
Şekil 5. 7 Yalpalama



Şekil 5. 8 Ortak merkezlilik

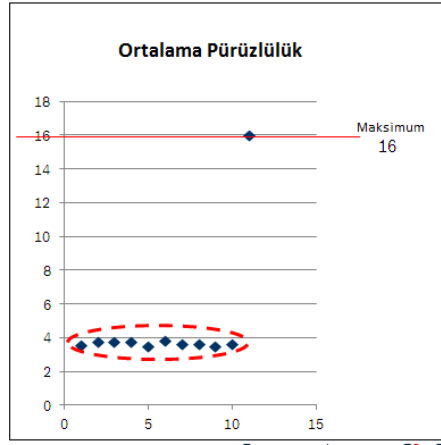


Şekil 5. 9 Dış çap ölçümü

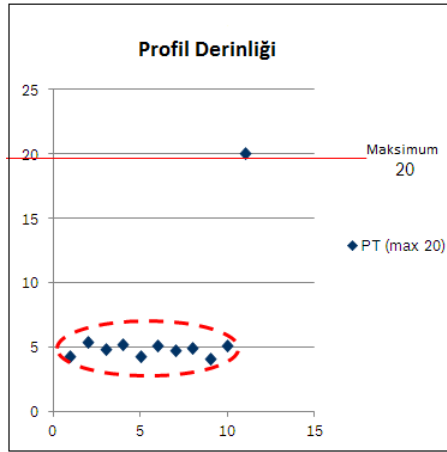


Şekil 5. 10 İç çap ölçümü





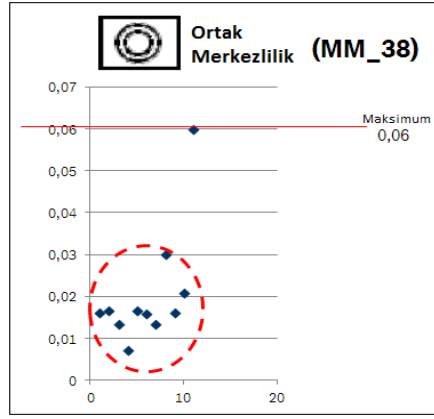
Şekil 5. 11 Ortalama pürüzlülük derinliği



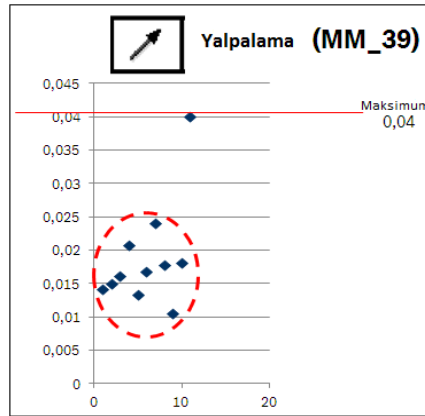
Şekil 5. 12 Profil derinliği

Yapılan ölçümlere göre 10 adet parça da tolerans aralığında ölçülmüştür. Her bir parça için ölçüm değerleri birbirine yakın olup herhangi bir sapma gözlemlenmemiştir.

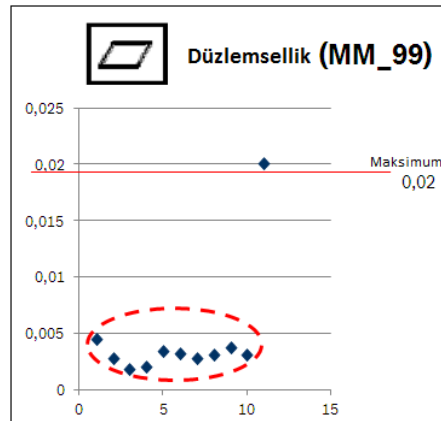
1.4418 X4CrNiMo16-5-1 ESU östenitik paslanmaz çelik malzemesine ait önemli geometrik ölçüm değerleri Şekil 5. 13, Şekil 5. 14, Şekil 5. 15, Şekil 5. 16 ve Şekil 5. 17'de gösterilmiştir.



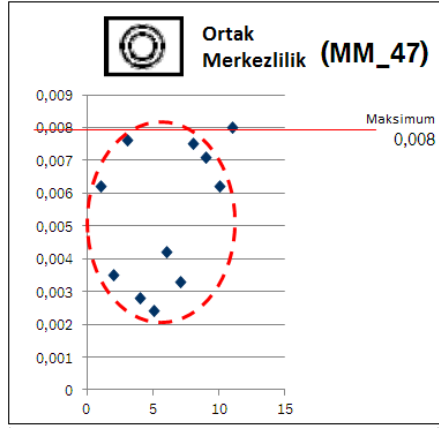
Şekil 5. 13 Ortak merkezlilik



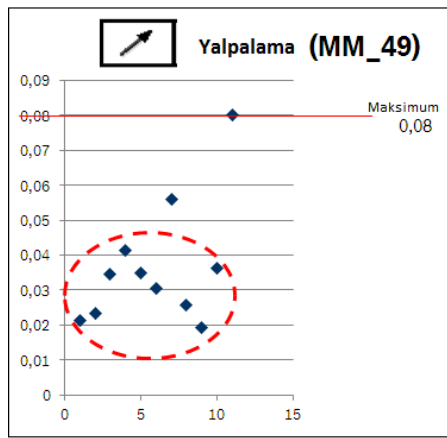
Şekil 5. 14 Yalpalama



Şekil 5. 15 Düzlemsellik



Şekil 5. 16 Ortak merkezlilik

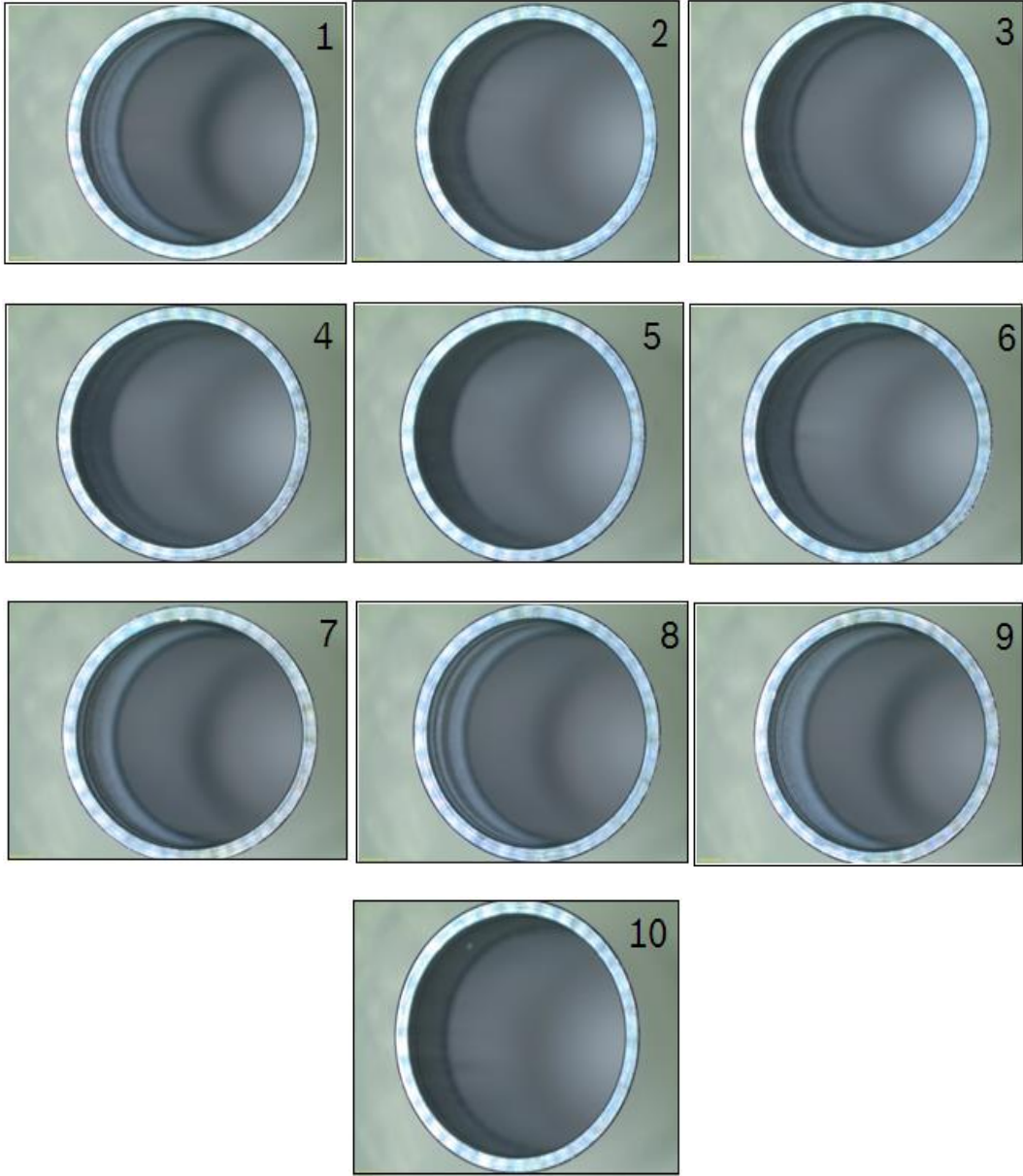


Şekil 5.17 Yalpalama

Yapılan ölçüm sonuçlarına göre, kaynak kabiliyetini etkileyebilecek değerlendirmeler sonucunda her iki parçaya ait ölçüm sonuçları, pürüzlülük değerleri ve profil derinliği değerleri tolerans sınırları arasındadır. Kaynak kabiliyetinde olumsuzluk yaratacak bir bulguya rastlanmamıştır.

### 5.3.3 Makroskopik Yüzey Analizi

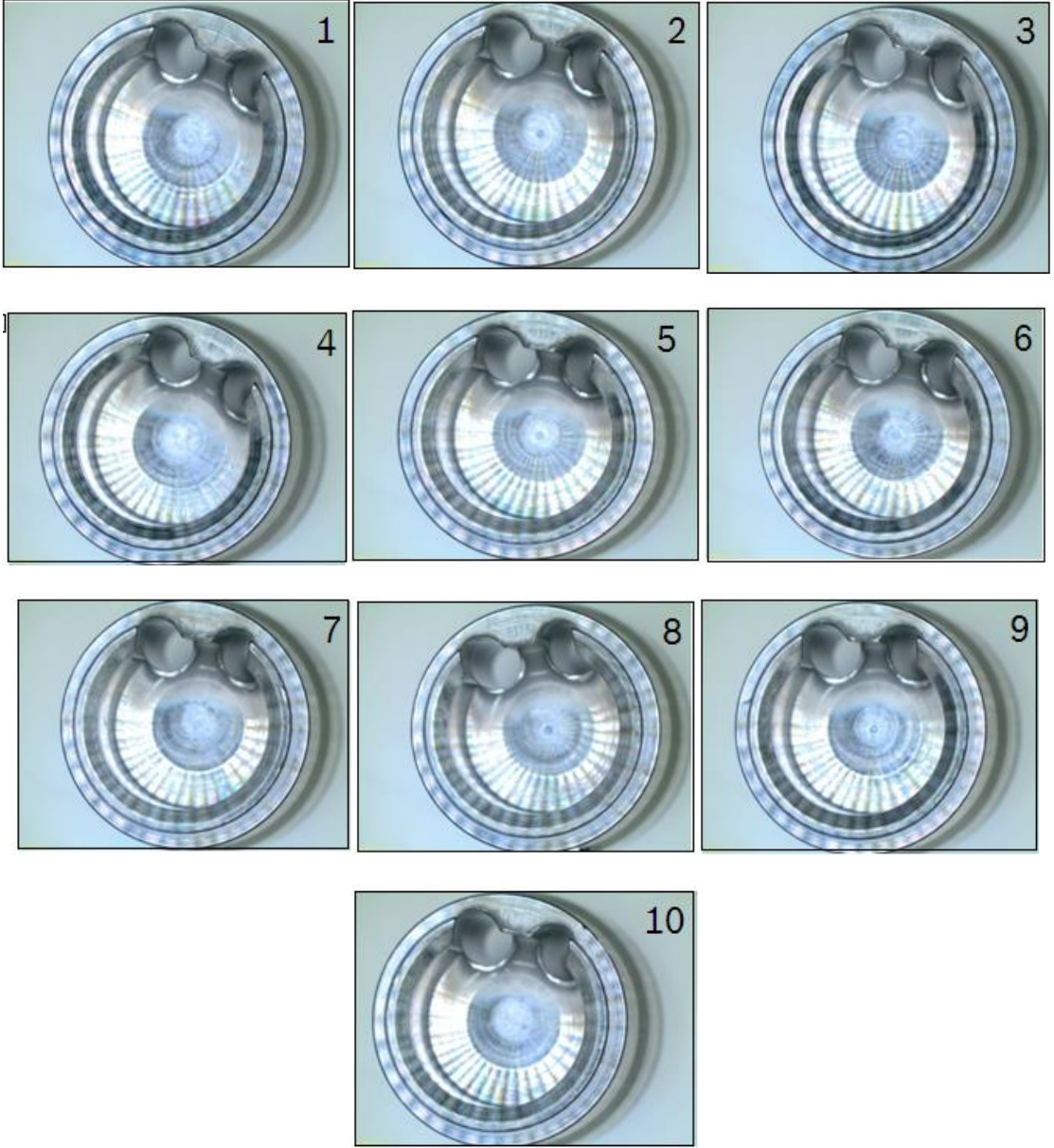
1.4301-X5CrNi18-8 östenitik paslanmaz çelik numunesine ait önemli yüzey analiz resimleri Şekil 5. 18' te gösterilmiştir.



Şekil 5. 18 1.4301-X5CrNi18-8 çeliği yüzey analizi

On adet 1.4301-X5CrNi18-8 östenitik paslanmaz çelik malzemelerinde yapılan teknooskop ölçümlerine göre herhangi bir zıtlık gözlemlenmemiştir. Parça resimlerinde herhangi bir vuruk, çizik veya herhangi bir deforme olmuş alana rastlanmamıştır.

1.4418 X4CrNiMo16-5-1 ESU östenitik paslanmaz çelik malzemelerine ait önemli yüzey analiz resimleri Şekil 5. 19' da gösterilmiştir.



Şekil 5. 19 1.4418 X4CrNiMo16-5-1 çeliği yüzey analizi

On adet 1.4418 X4CrNiMo16-5-1 ESU östenitik paslanmaz çelik malzemelerinde yapılan teknooskop ölçümlerine göre herhangi bir zıtlık gözlemlenmemiştir. Parça resimlerinde herhangi bir vuruk, çizik veya herhangi bir deforme olmuş alana rastlanmamıştır.

#### 5.4 Parçalara Uygulanan Ön İşlemlerin Etkisi

Bu bölümde lazer kaynak öncesi parçalara uygulanan yıkama işleminin, lazer kaynak makinesi baskı kuvvetine etkisi incelenmiştir.

1.4301 X5CrNi18-10 parçası ile 1.4418 X4CrNiMo16-5-1 ESU östenitik paslanmaz çeliği, lazer kaynağı uygulamasından önce parçalar yıkama makinelerine girmektedir. 1.4301 X5CrNi18-10 östenitik paslanmaz çeliği yıkama makinesinde birinci program ile adlandırılan ve program parametreleri Çizelge 5. 20 ve Çizelge 5. 21’ de gösterilmiştir.

Çizelge 5. 20 Birinci yıkama programı parametreleri

1.Program	Süre (Saniye)
Vakum	180
Tambur Dönme	Tam
Y.Basınç Yıkama	Yok
1.Yıkama	150
2.Yıkama	150
3.Yıkama	150
1.Durulama	120
2.Durulama	140
1.Tensit Kaplama	Yok
2.Tensit Kaplama	Yok
1.Kurutma	150
2.Kurutma	165

1.4418 X4CrNiMo16-5-1 ESU östenitik paslanmaz çeliği yıkandığı dördüncü programa ait parametreler de aşağıdadır.

Çizelge 5. 21 Dördüncü yıkama programı parametreleri

4.Program	Süre (Saniye)
Vakum	180
Tambur Dönme	Tam
Y.Basınç Yıkama	Yok
1.Yıkama	150
2.Yıkama	150
3.Yıkama	150
1.Durulama	120
2.Durulama	140
1.Tensit Kaplama	10%
2.Tensit Kaplama	Yok

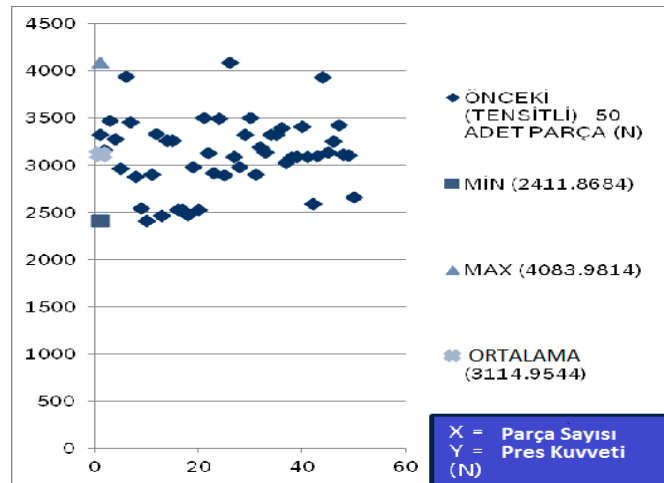
1.4418 X4CrNiMo16-5-1 ESU östenitik paslanmaz çelik malzemesin yıkama işlemi kimyasal bir madde olan tensit ile gerçekleşmektedir. Tensit oranı yıkama sıvısı içerisinde %10 olarak seri imalatta devam etmektedir. Amacımız tensit oranlarını

minimum ya da sıfır seviyesinde alıp bu malzemenin yıkanmasıdır. Böylece ileriki aşamalarda lazer kaynak kalitesini, dikış geometrisini etkileyeceği düşünölen tensitin varlığı elemine edilmiş olacaktır. Tensitsiz gerçekleşen yıkama işlemlerinden çıkan 1.4418 X4CrNiMo16-5-1 ESU östenitik paslanmaz çeliğinin lazer kaynağı sonrası presleme kuvvetleri incelenmiş ve öngörölen tolerans aralığında olup olmadığının kontrolü yapılmıştır. İlk olarak 100 adet parça tensitsiz yıkanmış, ikinci aşamada 1000 adet parça tensitsiz yıkanmış, üçüncü olarak 2141 parça tensitsiz olarak yıkanmıştır. Son olarak 106.257 adet parça tensitsiz yıkanarak her hattan geçmiştir. Bu dört deneye ait işlem sonuçları alt başlıklarda verilmiştir.

#### 5.4.1 1. Deneme

100 adetlik 1.4418 X4CrNiMo16-5-1 ESU östenitik paslanmaz çeliği tensitsiz olarak yıkanıp tek hattan geçirilip presleme kuvvetlerinin incelenmesi hedeflenmiştir. Bu parçaların yıkama işleminin öncesi ve sonrasında 50' şer adetlik parçaların normal olarak yıkanıp baskılama kuvvetlerinin incelenmesi yapılmıştır.

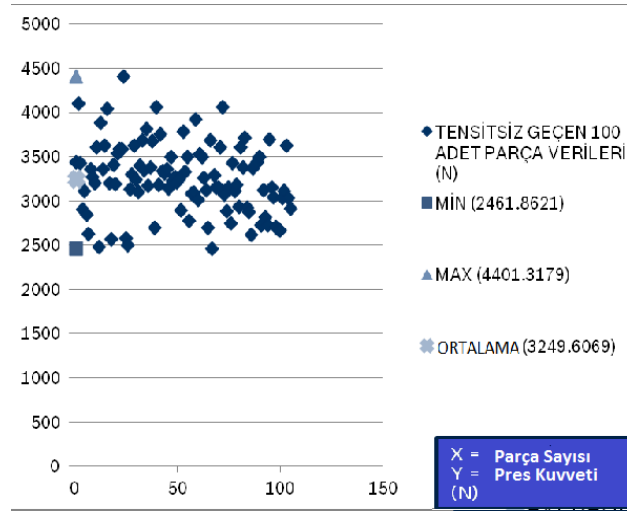
Tensitsiz yıkamadan önce yapılan normal yıkamaya ait 50 adetlik parçanın baskılama kuvveti Şekil 5. 20' de gösterilmiştir. Presleme kuvveti maksimum üst tolerans limiti 10.000 N olarak imalatta belirlenmiştir.



Şekil 5. 20 Seri parçalar presleme kuvveti

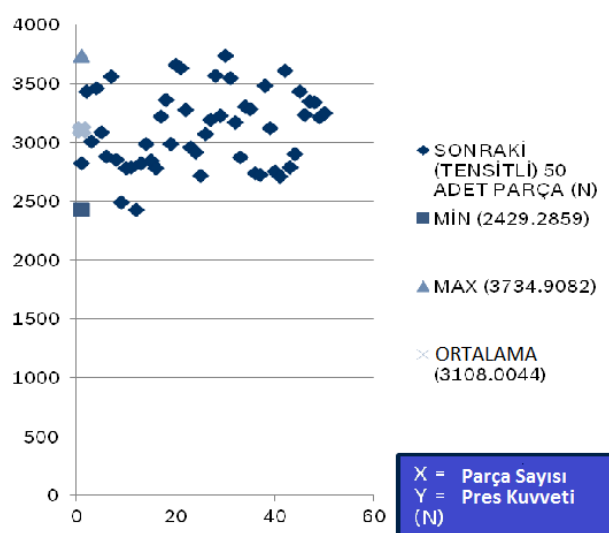
Grafik incelendiğinde presleme kuvvet üst sınırının 4083.9814 N' da kaldığı görölmektedir. Ortalama presleme kuvveti ise 3114.9544 N olduğu görölmektedir.

Tensirtsiz yıkanan 100 adetlik 1.4418 X4CrNiMo16-5-1 ESU östenitik paslanmaz çeliğe ait presleme kuvveti Şekil 5. 21' de gösterilmiştir.



Şekil 5. 21 Tensirtsiz yıkanan parçalara ait presleme kuvveti

Tensirtsiz yıkanan parçalara ait grafik incelendiğinde ortalama değerin seri parçalardaki normal yıkamadaki baskılama kuvveti değerlerine yakın olduğu gözlemlenmiştir. Buna göre bakıldığında üst sınırın 4400 N' lara çıktığı görülmüştür. Bu tensirtsiz yıkanan parçaların denemesinde sonra 50 adet tekrar seri koşullardaki yıkama işlemi gerçekleştirilmiş olup, baskılama kuvvetleri Şekil 5. 22' de gösterilmiştir.



Şekil 5. 22 Seri parçalar presleme kuvveti

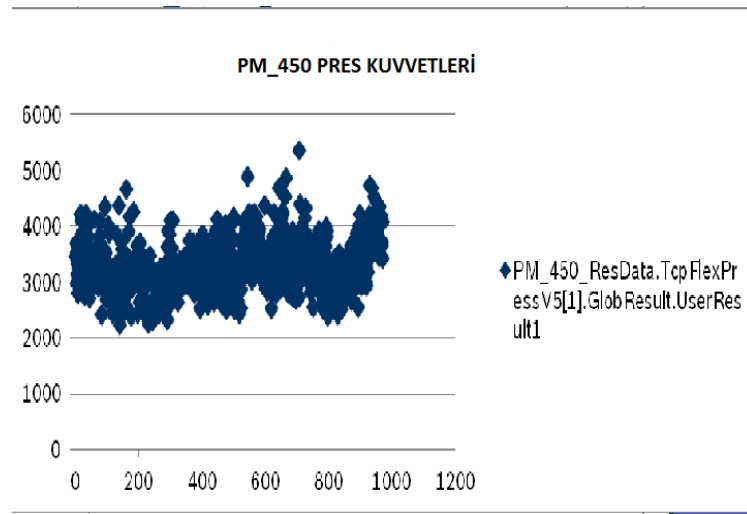
Buradaki sonuçlara göre seri koşullardaki yıkama sonucu baskılama kuvvetleriyle, tensirtsiz yıkama sonucundaki presleme kuvvetleri değerleri birbirlerine yakın



bulunmuştur. Denemede tolerans sınırları dışında parça gözlemlenmediğinden denemeye 1000 adetlik tensitsiz yıkanan 1.4418 X4CrNiMo16-5-1 ESU östenitik paslanmaz çeliklerle devam edilmiştir.

#### 5.4.2 2. Deneme

1000 adetlik tensitsiz yıkanan parçalara ait baskılama kuvveti Şekil 5. 23' de gösterilmiştir.



Şekil 5. 23 Tensitsiz yıkanan parçalara ait presleme kuvveti

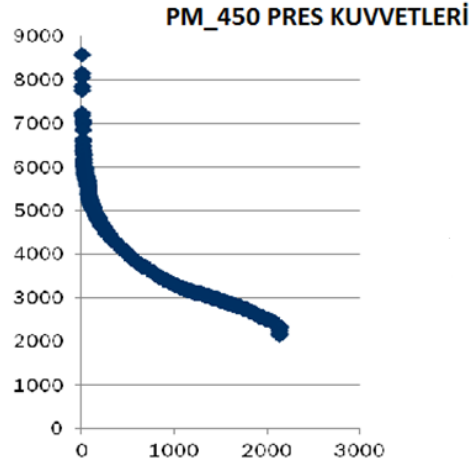
Deneme sonuçlarına bakıldığında ortalama baskı kuvvetinin 3200 N' larda bulunduğu ve üst baskılama kuvveti değerinin 5300 N' larda bulunduğu tespit edilmiştir. Bu değerler tolerans sınırları içinde bulunmaktadır. Ancak 100 adetlik denemede olduğu gibi 1000 adetlik denemede de görüldüğü üzere parçaların tensitsiz yıkanması üst baskılama kuvvet değerlerini artırmaktadır. Bu durumun şu an için imalatı etkileyebilecek bir olumsuzluk yaratmamasından dolayı ihmal edilmiştir.

Çizelge 5. 22 Yıkama denemesi sonuçları

	1000 Adetlik Deneme	100 Adetlik Deneme	Tensitli İlk 50 Parça	Tensitli Son 50 Parça
Ortalama	3278.411	3249.607	3114.954	3108.004
Maksimum	5362.156	4401.318	4083.981	3734.908
Minimum	2231.195	2461.868	2411.868	2429.286

### 5.4.3 3. Deneme

Şu ana kadar tensitsiz yıkanan parçalarda herhangi bir olumsuzluğa rastlanılmamıştır. Dolayısıyla deneme parçalarının sayısı artırılarak denemenin verimliliğinin izlenilmesi kararlaştırılarak 2141 adet parçayla tensitsiz yıkama işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu Parçalara ait baskılama kuvveti Şekil 5. 24' de gösterilmiştir.



Şekil 5. 24 Seri parça denemesi

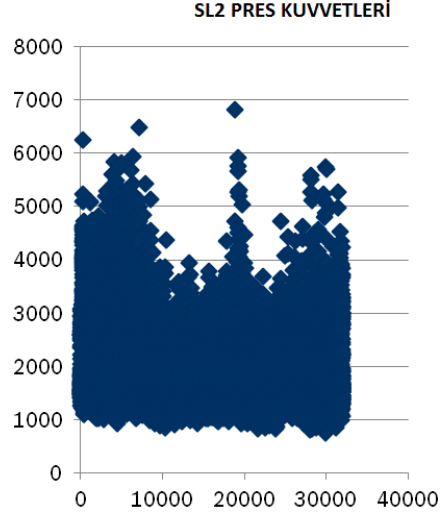
Çizelge 5. 23 Deneme sonuçları

PM_450	Baskı Kuvveti
Mksimum	8568.8584
Minimum	2134.9451
Ortalama	3478.6717

Deneme sonuçlarına göre ortalama pres kuvveti 3400 N' larda bulunmuştur. Üst baskı kuvveti değeri ise 8500 N değerlerine ulaşmıştır. Tolerans üst limiti 10.000 N olduğundan deneme imalat için olumlu geçmiştir.

### 5.4.4 4. Deneme

Tensitsiz yıkanan parçaların lazer kaynak kalitesini ve dikiş geometrisini etkilemediği daha önceki denemelerde bulunmuştu. Parça sayısını artırılarak tekrar baskı kuvvetlerinin değişimi izlendi. Bir aylık bir süre zarfı boyunca yapılan denemede toplam 106.257 adet parça tensitsiz olarak yıkanarak ikinci hatta verildi ve pres kuvvet değişimleri incelendi. Sonuçlar Şekil 5. 25' de gösterilmiştir.



Şekil 5. 25 Seri parça denemesi

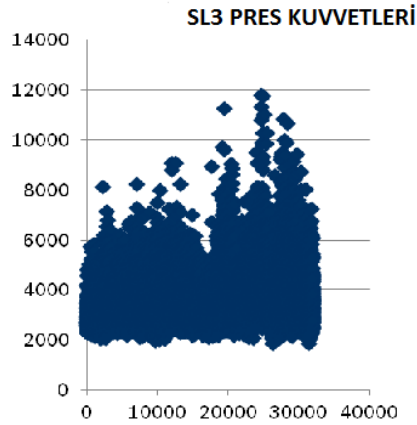
Çizelge 5. 24 Deneme sonuçları

PM_450	Baskı Kuvveti
Maksimum	6495.4
Minimum	894.32
Ortalama	2270

Sonuçlara göre baskılama kuvvetlerinde artış gözlemlenmiştir. Değerler yine tolerans aralığında olduğundan diğer hatlardaki araştırmalar yapılmıştır.

#### 5.4.5 5. Deneme

Bu deneme 3. hatta gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Şekil 5. 26' da gösterilmiştir.



Şekil 5. 26 Seri parça denemesi

Çizelge 5. 25 Deneme sonuçları

PM_450	Baskı Kuvveti
Max	11773,74
Min	1861,74
Ortalama	3595,51

Deneme sonuçlarına göre üst baskı kuvveti değeri 11000 N civarlarına kadar yükselmiştir. Üst tolerans değerini geçen parça sayısı 36 adet olarak belirlenmiştir. Ortalama baskı kuvveti değeri 3500 N civarlarındadır. Bu sonuçlara göre yapılan lazer kaynağı incelendiğinde herhangi bir olumsuzluk gözlemlenmediğinden, tensitsiz uygulamasının aktör gövdesi ve bağlantı kovanı kaynağına girecek tüm parçalar için uygulanması yeterli görülmüştür.

##### **5.5 Kaynak Hızının Değişimi**

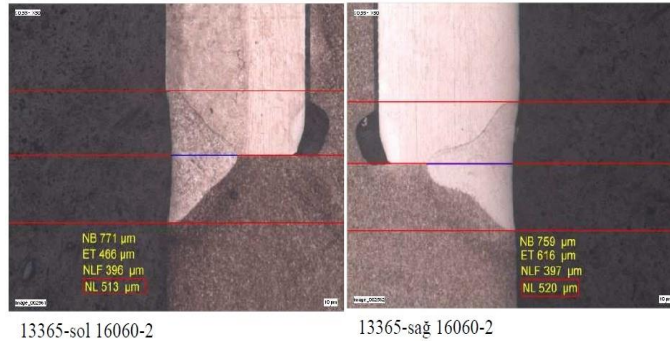
Lazer kaynak işlemini etkileyen faktörlerden birisi de kaynak hızının değiştirilmesidir. Değişken kaynak hızlarında kaynak dikişi olumlu ya da olumsuz olarak etkilenebilmektedir. Kaynak hızının artırılmasıyla kaynak edilen parçalar üzerinde yeterli ısının dolaşmaması sebebiyle yetersiz nüfuziyetli bir kaynak işlemi oluşur. Aynı zamanda kaynak hızının yavaşlatılması kaynak edilen parçalardaki ısıyı artıracığından ITAB bölgesinin büyümesini ve dikişin olumsuz etkilenmesine neden olur. Bu sebeplerden dolayı en iyi kaynak hızı parametresinin bulunması lazer kaynak kalitesi için oldukça önemlidir.

Deney aşamaları olarak kaynak hızında %10, %20, %30, %40, %50 ve %100' lük artışlar planlanmıştır. Kaynak hızında artış yapılmasının amacı boşluk ve çatlak oluşumunu artıran fazla ısı girdisinin azaltılmasıdır. Kaynak hızında yapılan bu değişiklikler sonucu kaynak dikiş bölgeleri resmedilmiştir.

### 5.5.1 Deneme Sonuçları

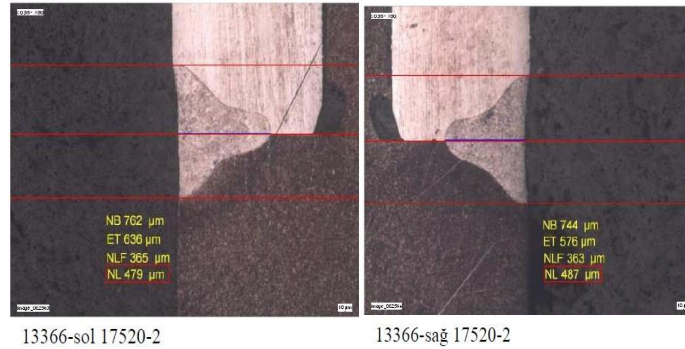
Standart kaynak hızı değeri 0.815 m/dk olarak imalatta uygulanmaktadır. %10' luk artış sonucu kaynak hızı değeri 0.906 m/dk olarak belirlenmiştir. Bu kaynak hızı değeriyle yapılan lazer kaynağı sonucu oluşan dikiş geometrisi resmi ve ilgili geometrik değerler Şekil 5. 34' te gösterilmiştir.

% 10' luk hız artışı 100 adet paslanmaz çelik kaynağına uygulanmıştır. Deney sonucunda 5 adet parçaya ait kaynakta tolerans sapması görülmüştür. Bu parçalardan birine ait kaynak dikiş sağ ve sol optik ölçüm resimleri Şekil 5. 34' te gösterilmiştir. Kaynak dikiş değerlerine bakıldığında ise tolerans aralığı dışına çıkan değer, sağ ve sol dikiş bölgesindeki nüfuziyet değeridir.



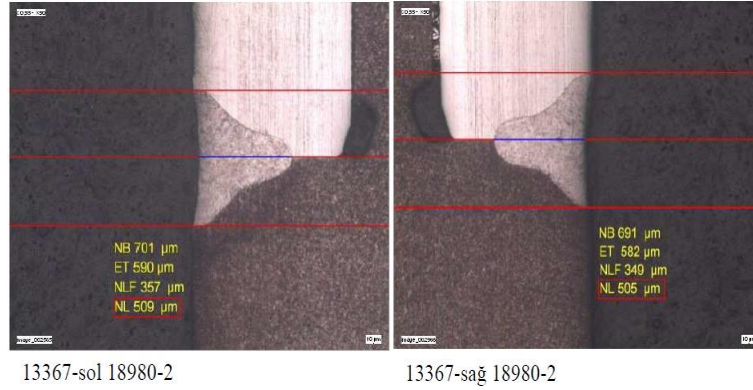
Şekil 5. 27 0.906 m/dk kaynak hızındaki kaynak dikişi sol ve sağ bölgeleri

%20' lik hız artışı sonucunda kaynak hızı 0.978 m/dk olarak belirlenmiştir. % 20' lik hız artışı 100 adet paslanmaz çelik kaynağına uygulanmıştır. Deney sonucunda 9 adet parçaya ait kaynakta tolerans sapması görülmüştür. Bu parçalardan birine ait kaynak dikiş sağ ve sol optik ölçüm resimleri Şekil 5. 35' de gösterilmiştir. Kaynak dikiş değerlerine bakıldığında ise tolerans aralığı dışına çıkan tek değer, sağ dikiş bölgesindeki dikiş genişliği değeridir.



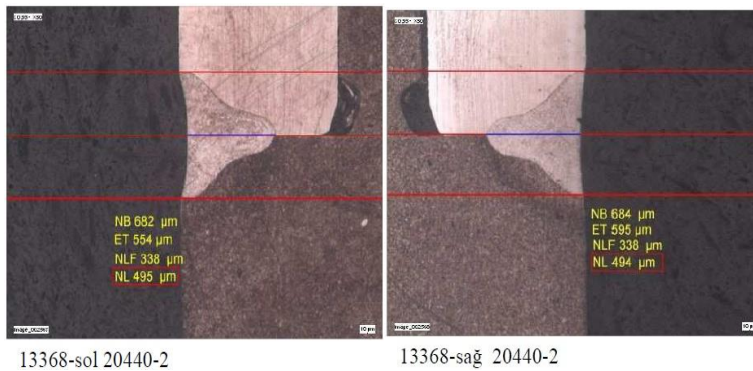
Şekil 5. 28 0.978 m/dk kaynak hızındaki kaynak dikişi sol ve sağ bölgeleri

%30' luk hız artışı sonucunda kaynak hızı 1.059 m/dk olarak belirlenmiştir. % 30' luk hız artışı 100 adet paslanmaz çelik kaynağına uygulanmıştır. Deney sonucunda 12 adet parçaya ait kaynakta tolerans sapması görülmüştür. Bu parçalardan birine ait kaynak dikiş sağ ve sol optik ölçüm resimleri Şekil 5. 36' da gösterilmiştir. Kaynak dikiş değerlerine bakıldığında ise tolerans aralığı dışına çıkan değer, sağ ve sol dikiş bölgesindeki dikiş genişliği değeridir.



Şekil 5. 29 1.059 m/dk kaynak hızındaki kaynak dikişi sol ve sağ bölgeleri

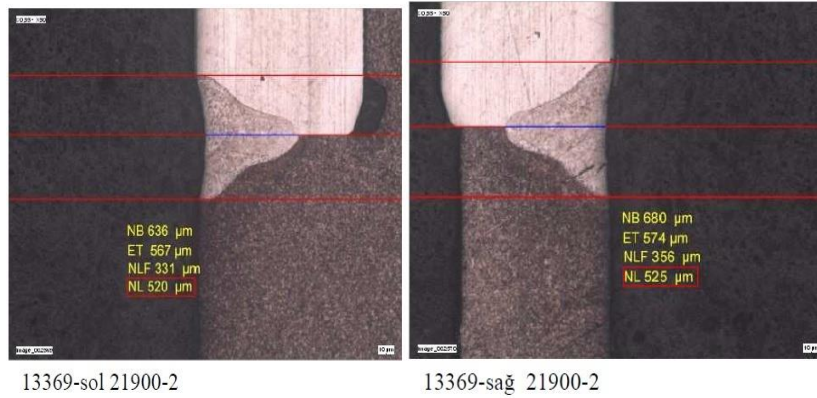
%40' lık hız artışı sonucunda kaynak hızı 1.141 m/dk olarak belirlenmiştir. % 40' lık hız artışı 100 adet paslanmaz çelik kaynağına uygulanmıştır. Deney sonucunda 23 adet parçaya ait kaynakta tolerans sapması görülmüştür. Bu parçalardan birine ait kaynak dikiş sağ ve sol optik ölçüm resimleri Şekil 5. 37' de gösterilmiştir. Kaynak dikiş değerlerine bakıldığında ise tolerans aralığı dışına çıkan değer, sağ ve sol dikiş bölgesindeki dikiş genişliği değeridir.



Şekil 5. 30 1.141 m/dk kaynak hızındaki kaynak dikişi sol ve sağ bölgeleri

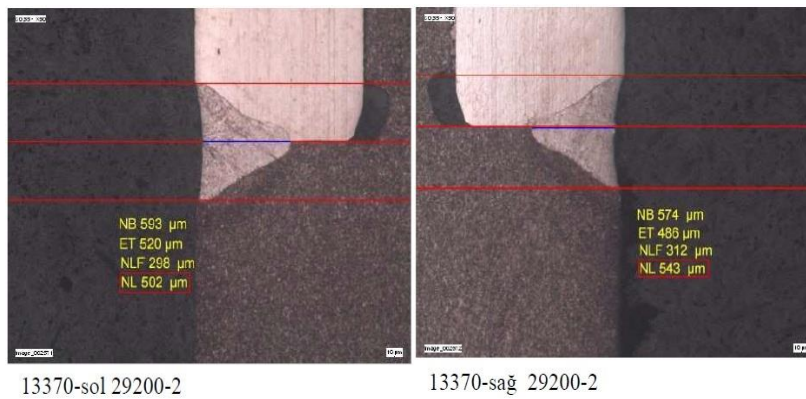
%50' lik hız artışı sonucunda kaynak hızı 1.222 m/dk olarak belirlenmiştir. % 50' lik hız artışı 100 adet paslanmaz çelik kaynağına uygulanmıştır. Deney sonucunda 54 adet

parçaya ait kaynakta tolerans sapması görülmüştür. Bu parçalardan birine ait kaynak dikiş sağ ve sol optik ölçüm resimleri Şekil 5. 38' de gösterilmiştir. Kaynak dikiş değerlerine bakıldığında ise tolerans aralığı dışına çıkan değer, sağ ve sol dikiş bölgesindeki dikiş genişliği değeridir.



Şekil 5. 31 1.222 m/dk kaynak hızındaki kaynak dikişi sol ve sağ bölgeleri

%100' lük hız artışı sonucunda kaynak hızı 1.630 m/dk olarak belirlenmiştir. % 100' lük hız artışı 100 adet paslanmaz çelik kaynağına uygulanmıştır. Deney sonucunda 86 adet parçaya ait kaynakta tolerans sapması görülmüştür. Bu parçalardan birine ait kaynak dikiş sağ ve sol optik ölçüm resimleri Şekil 5. 39' da gösterilmiştir. Kaynak dikiş değerlerine bakıldığında ise tolerans aralığı dışına çıkan değerler, sağ ve sol dikiş bölgesindeki nüfuziyet ve dikiş genişliği değerleridir.



Şekil 5. 32 1.630 m/dk kaynak hızındaki kaynak dikişi sol ve sağ bölgeleri

Yapılan kaynak hızı artışlarının kaynak dikişi tolerans değerlerinin dışına çıkması nedeniyle kaynak hızı parametrelerinde herhangi bir değişiklik yapılmaması uygun görülmüştür.

### SONUÇ VE ÖNERİLER

Lazer kaynak işlemi ile paslanmaz çeliklerin kaynak işleminde yeterli nufuziyeti sağlamanın, kaynak parametrelerinde yapılan değişikliklerle güvenli bir şekilde gerçekleştiği deneyler sonucunda görülmüştür.

Kaynak dikiş genişlikleri ve nufuziyet geleneksel kaynak yöntemleriyle karşılaştırıldığında daha düşük seviyelerde yer almıştır.

Parçaların lazer kaynağında, eksen kaçıklığını engellemek amacıyla yapılan lazer punta atımında punta gücü sabit tutulup punta süresinin yarı yarıya azaltılması, ısı girdisini azalttığından boşluk oluşumu azaltmıştır.

Aynı zamanda punta gücünde yapılan azaltmayla boşluk oluşumuna rastlanmamıştır. Punta gücünün azalması birim alana düşen ısı miktarını da düşürdüğünden, gereksiz fazla ısıdan dolayı oluşabilecek boşluklar azaltılmıştır.

Yarı yarıya azaltılan punta süreleriyle birlikte 100 W'lık punta gücü düşüşü uygulamasıyla nufuziyet azalmıştır.

Punta süresi ve gücünün sabit tutulup daha sonrasında yapılan çevresel kaynak işleminde, kaynak gücünde yapılan 60 W'lık bir azalış, kaynakta yeterli nufuziyet sağlamamıştır. Yeterli nufuziyetin sağlanmadığı durumların ıskarta yani hatalı parça sayısında artışa sebep olduğundan kabul edilebilir değildir.

Punta süresi ve punta gücünün sabit tutulup daha sonrasında yapılan çevresel kaynak işleminde, kaynak gücünde yapılan 30 W'lık bir azalış, kaynakta yeterli nufuziyeti sağlamıştır. Böylece istenilen mukavemete ulaşılmış olur.



Dolayısıyla diğer parametrelerin sabit tutulup kaynak gücünde meydana gelen büyük düşüşlerde yeterli nüfuziyetin sağlanmadığı görülmüştür. Kaynak gücünün büyük oranlarda azalışı ısı girdisini azaltacağından dikiş genişliğini de düşürür. Bu yüzden kaynak gücünde meydana gelen büyük azalışlar yeterli kaynak işlemini sağlamayacaktır.

Punta süresi ve punta gücünü sabit tutup, kaynak gücünde meydana gelen azalışta sertliğin de azaldığı saptanmıştır. Kaynak gücünde meydana gelen 60 W'lık düşüşe göre 30 W'lık düşüşte daha yüksek sertlik değeri elde edilmiştir.

Lazer punta süresinin azalışı sertliği düşürmüştür. Kaynakta malzemelerin ısı altında kalma süresinin azalışı sertliği o bölgede düşürmüştür. Bunu kaynak dikiş bölgesine en yakın ısı tesiri altındaki alanların sertlik değerlerine baktığımızda görebiliriz. Bu bölgelerin sertlik değeri daha yüksektir.

Genel kaynak işlemi itibariyle sertlik, kaynak dikişine en yakın ısı tesiri altındaki bölgede en yüksek değerlerdedir. Bu bölgeden kaynak edilen metallere doğru sertlik değerlerinde düşme görülmüştür.

1 kW Nd-YAG lazer kaynak makinesiyle, 2 adet silindirik paslanmaz çeliğin kaynak işleminde, lazer kaynak hızı %10, %20, %30, %40, %50 ve %100 artırılarak yapılmış olup, 100'er adetlik denemelerde tolerans aralığı dışına çıkan parça sayısı ve tolerans değerlerin ne kadar saptığı optik ölçüm resimlerinde gösterilmiştir.

0.815 m/dk lazer kaynak hızından itibaren yapılan deneylerde, her kademedeki hız artışında, kaynak dikiş bölgelerinde tolerans aralığı dışına çıkan değerler görülmüştür.

Kaynak hızının artışıyla birlikte kaynak dikiş nüfuziyetinin azaldığı tespit edilmiştir. Kaynak hızının artması kaynak dikişine etki eden ısı girdisinde azalmaya sebep olduğundan nüfuziyette azalış olduğu gözlemlenmiştir. Normal koşullardaki emniyetli kaynak işleminde 0.722 mm olan kaynak derinliği diğer hız artışı denemelerinde ortalama olarak 0.541 mm, 0.606 mm, 0.586 mm, 0.574 mm, 0.570 mm, 0.403 mm olarak ölçülmüştür.

Kaynak dikiş genişliği kaynak hızının artmasıyla birlikte azalış göstermiştir. Normal koşullardaki emniyetli kaynak işleminde 0.800 mm olan dikiş genişliği hız artışı

denemelerinde ortalama olarak 0.765 mm, 0.753 mm, 0.696 mm, 0.683 mm, 0.658 mm ve 0.583 mm olarak tespit edilmiştir.

Elde edilen deneysel sonuçlara göre yüksek alaşımlı paslanmaz çelikler 1000 W gücündeki Nd-YAG katı hal lazer kaynağıyla emniyetli şekilde birleştirilebilir.

## KAYNAKLAR

---

- [1] Benyounis, K.Y., Olabi A. G., Hashmi, M.S.J., (2005). "Effect of laser welding parameters on the heating put and weld-bead profile", *Journal of Materials Processing Technology*, 164: 978-985.
- [2] Keskin, M.S., (2009). "Östenitik paslanmaz çeliğin lazer kaynağı yöntemiyle birleştirilmesinin incelenmesi", 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, 2 Kasım 2009, Karabük.
- [3] Zambon, A., Ferro P., Bonollo, F., (2006). "Micro structural, compositional and residual stres evaluation of CO2 laser welded super austenitic AISI 904L stainless steel", *Materials Science and Engineering*, A424: 117-127.
- [4] Benyounis, K. Y., Olabi A. G., Hashmi, M. S. J., (2005). "Effect of Laser Welding Parameters on The Heat Input and Weld-Bead Profile", *Journal of Materials Processing Technology*, 164: 978-985.
- [5] Kaluç, E., Taban, E., (2006). "Alüminyum ve Alüminyum Alasımlarının TIG Kaynagi", *Makine Tek*, 103-104: 122-126.
- [6] Weston, J., Yoon, J.W., Wallach, E.R. (2004). "Laser welding of aluminum alloys using different laser sources", *Department of Materials Science and Metallurgy, University of Cambridge, England*.
- [7] Malek, G. F., Sheikhi, M., Torkamany, M.J., Sabbaghzadeh, J. (2009). "The relation between liquation and solidification cracks in pulsed laser welding of 2024 aluminum alloy", *Materials Science and Engineering A*, A(159):167-171.
- [8] Durgutlu,A., Gülenç,B.,Tülbentçi K.,"Ark Kaynağında Kaynak Hızının Nüfuziyete ve Mikroyapıya Etkisi" (1999). *Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences*, 23: 251-259.
- [9] Uzun,R.O., Keleş,Ö. "Lazerle Kaynak İşleminde Kaynak Parametrelerinin Kaynak Kalitesi Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi." (2012). *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27: 509-517.
- [10] Gery,D., H. Long., P. Maropoulos., "Effects of welding speed energy input and hea tsource distribution on temperature variations in built joint welding." (2005). *Journal of Material Processing Technology* 167: 393-401.
- [11] Kim, Y.G., (2009). "Effect of welding parameters on micro structure in the stir zone of FSW joints of alüminium die casting alloy.", 60: 3830-3837.

- [12] Kimara S. , Sugiyama S. , Mizutame M., (1986). Proceedings ICALEO' 91, SPIE, 1722: 156.
- [13] Duley W. M. (1998). Laser Welding, John-Wiley, United States of America.
- [14] Weiting T. J. , de Rosa J. L. , (1979). Journal of Applied Physics, 650:1071.
- [15] Tzeng Y. F. (2000) "Parametric analysis of the pulsed Nd: YAG laser seam-welding process", Journal of Materials Processing Technology, 102:40-47.
- [16] Jokinen, T., (2004). Novel Ways of Using Nd-YAG Laser For Welding Thick Austenitic Stainless Steel, VTT Publications, Lappeenranta, Finlandiya.
- [17] Nath, A.K. , Sridhar R. , Ganesh and Kaul R. , (2002). "Laser Power Coupling Efficiency in Conduction and Keyhole Welding of Austenitic Stainless Steel", 27: 383-392.
- [18] Xie, J., Kar A., (1997). "Melting and Vaporization for Large-area Film Removal with a Chemical Oxygen-Iodine Laser", Journal of Applied Physics. , 82: 4744-4751.
- [19] Kaluç, E., (1993). Lazer Işını İle Kaynak ve Kesme, Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Kocaeli.
- [20] Özden, H., (2008). Otomotiv Üretiminde Lazerli Üretim Yöntemleri, Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir.
- [21] Bohr Atom Modeli, [www.wikipedia.org/](http://www.wikipedia.org/) Bohr\_Modeli.htm, 10 Ağustos 2013.
- [22] Rutherford Atom Modeli, [www.wikipedia.org/](http://www.wikipedia.org/) Rutherford\_Atom\_Modeli, 10 Ağustos 2013.
- [23] BOSCH Lazer Eğitim Notları, [www.bosch.de/](http://www.bosch.de/) Lasertechnik\_Lazer, 22 Temmuz 2013.
- [24] 50. Yılında Lazer, [www.uralakbulut.com.tr/](http://www.uralakbulut.com.tr/) 2009/ 11/ 50. Yılında\_Lazer.pdf, 24 Temmuz 2013.
- [25] Nd\_YAG, [www.wikipedia.org/](http://www.wikipedia.org/) Nd\_YAG Laser. Jpg, 2 Mart 2013.
- [26] Nd\_YAG\_2, [www.wikipedia.org/](http://www.wikipedia.org/) Nd\_YAG Laser\_2. Jpg, 2 Mart 2013.
- [27] Koechner, W., Bass, M., (2003). Solid\_State Lasers, Springer-Verlang, New York, ABD.
- [28] Karaaslan, A., (2009). Lazer İle Malzemelerin İşlenmesi, Birinci Cilt, Birinci Baskı, Literatür Yayıncılık Dağıtım, İstanbul.
- [29] Buldum, B. B., (2008). "Mikro Kaynak ve Yeni Teknolojilerde Uygulama Alanları", Mühendis ve Makina, 51 (Sayı 610): 23-28.
- [30] Külekçi, M.K., (2008). "Mikro Kaynak ve Yeni Teknolojilerde Uygulama Alanları", Mühendis ve Makine, 51 (Sayı 610): 23-28.
- [31] Püskülcü, G., (2008). "Lazer Kaynak Yöntemi ve Uygulamaları", Mühendis ve Makina, 50 (Sayı 599).

- [32] Koçlular, F., (2008). "Lazer Kaynak Yöntemi ve Uygulamaları", Mühendis ve Makine, 50 (Sayı 599).
- [33] Ion, C., (2005). Laser Processing of Engineering Materials, Elsevier Butterworth-Heinemann, MA-ABD.
- [34] Jokinen, T., (2004). Novel Ways Of Using Nd: YAG Laser Welding Thick Section Austenitic Stainless Steel, VTT Publications, Lappeenranta, Finlandiya.

## ÖZGEÇMİŞ

---

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : ERTEM Regaib Uğur  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 09.02.1989 Samsun  
**Yabancı Dili** : İngilizce  
**E-posta** : regaibertem@gmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Makine Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2011
Lise	Fen Bilimleri	Bursa Erkek Lisesi	2007

### İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2015-Devam ediyor	Rexroth Bosch Group	Üretim Mühendisi
2013-2015	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2011-2013	Robert Bosch	Üretim Mühendisi