



T.C.
Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü

**OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANILAN ELEKTRİK
DİRENÇ KAYNAĞINA ALTERNATİF LASER NOKTA
KAYNAĞININ MEKANİK VE TERMAL ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

Gökhan TEKİN

Yüksek Lisans Tezi



**OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANILAN ELEKTRİK
DİRENÇ KAYNAĞINA ALTERNATİF LASER NOKTA
KAYNAĞININ MEKANİK VE TERMAL ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

Gökhan TEKİN



T.C.

ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANILAN ELEKTRİK DİRENÇ
KAYNAĞINA ALTERNATİF LASER NOKTA KAYNAĞININ MEKANİK
VE TERMAL ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Gökhan TEKİN
ORCID: 0000-0002-1751-9891

Doç. Dr. Gökhan SEVİLGİN
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA - 2019

TEZ ONAYI

Gökhan TEKİN tarafından hazırlanan “Otomotiv Sektöründe Kullanılan Elektrik Direnç Kaynağına Alternatif Laser Nokta Kaynağının Mekanik ve Termal Etkisinin İncelenmesi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Gökhan SEVİLGEN

Başkan: Doç. Dr., Gökhan SEVİLGEN
ORCID: 0000-0002-7746-2014
Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye: Prof. Dr., Ali Rıza YILDIZ
ORCID: 0000-0003-1790-6987
Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye: Doç. Dr., Hüseyin LEKESİZ
ORCID: 0000-0003-3350-1509
Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

İmza

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum.


Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN
Enstitü Müdürü
05/02/2024 (Tarih)

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

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

beyan ederim.

05/09/2019

 İmza
Gökhan TEKİN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANILAN ELEKTRİK DİRENÇ KAYNAĞINA ALTERNATİF LASER NOKTA KAYNAĞININ MEKANİK VE TERMAL ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Gökhan TEKİN

Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Gökhan SEVİLGEN

Bu çalışmada; elektrik direnç kaynağına alternatif olan laser nokta kaynağının proses esnasındaki değişkenleri ve önemli olan parametreleri belirlenmiş, mekanik ve termal etkisi incelenmiş ve ana sanayi şartnamelerine göre sanal ve fiziksel doğrulama kriterleri üzerinde durulmuştur.

Laser nokta kaynağının, başta ulaşım sektöründe araç hafifletme ve enerji tüketimini azaltma hedeflerine hizmet etme, sonrasında prosesin yaygınlaşması ile diğer sektörlerde de ciddi avantajlar yaratacağı yapılan araştırmalar ve denemeler sonrası gözlemlenmiştir.

Bir binek araçta ortalama 4000 adet direnç nokta kaynak bulunmaktadır, yaşanan mekanik deformasyon hatalarının %70'i birleşme bölgelerinin etrafında olmaktadır. Dolayısıyla otomotivde en çok kullanılan yöntem olan direnç nokta kaynak prosesi, aracın mekanik dayanım karakterini etkileyen ana unsurlardandır. Elektrik direnç nokta kaynak prosesinin mevcut hızının operasyon verimliliği açısından laser nokta kaynağına göre dezavantaj yaratmasının yanısıra, ürünü devreye alma esnasında çok sayıda denemeler yapılmakta ve ciddi oranda malzeme tüketimi ve hurda maliyeti ortaya çıkmaktadır.

Laser nokta kaynağının avantaj ve dezavantajlarını irdelemek amacıyla otomotiv sektöründe sık kullanılan ve üzerinde ciddi sayıda elektrik direnç kaynağı bulunan ürünler incelenmiş olup, buradan elde edilen proses verimliliğini artırıcı verilerin diğer sektörlerde nasıl yansıtılabileceği konusunda araştırmalar yapılmıştır. Bu çerçevede yapılan deneysel çalışmalar belirlenen numuneler üzerinde optimum parametre belirleme çalışması olarak ilerlemiştir. Uygulamalar esnasında kritik parametreler değiştirilerek en verimli çözümler elde edilmiştir.

Birleştirilen malzemelere; sertlik, çekme ve metalografik olarak da optik deneyleri uygulanmıştır. Bu malzemelerin farklı laser kaynak parametrelerindeki mekanik ve mikro yapı özellikleri araştırılmış ve karşılaştırmalar yapılarak en uygun özellikler belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektrik direnç kaynağı, laser kaynak, laser nokta kaynağı, otomotiv sektöründe kaynaklı birleştirme

2019, xiii + 79 sayfa

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF MECHANICAL AND THERMAL PROPERTIES OF LASER SPOT WELDING AS A REPLACEMENT TO RESISTANCE SPOT WELDING IN AUTOMOTIVE ASSEMBLY APPLICATIONS

Gökhan TEKİN

Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Automotive Engineering

Supervisor: Doç. Dr. Gökhan SEVİLGEN

In this study; the variables and important parameters of the laser spot source, which is an alternative to the electrical resistance source, were investigated, the mechanical and thermal effects were investigated and the virtual and physical verification criterias were emphasized according to the OEM's specifications.

It has been clearly observed after the researches and trials that the laser spot source will serve the targets of vehicle lightening and energy consumption reduction in the transportation sector, and then it will create significant advantages in other sectors with the spread of the process.

There is an average of 4000 spot welds on a passenger vehicle, and about 70% of mechanical failures are around the joint areas. Therefore, the spot-welding process, the most commonly used method in automotive, is the main factor affecting the mechanical strength of the vehicle. In addition to the disadvantage of the present speed of the spot-welding process compared to the laser spot welding in terms of operation efficiency, there are many attempts at commissioning and serious cost of material consumption and scrap costs.

In order to investigate the advantages and disadvantages of laser spot welding, products which are frequently used in the automotive sector and which have a significant number of electrical resistance sources have been examined and researches have been carried out on how to increase the process efficiency data obtained from these sectors.

Experimental studies have progressed as an optimum parameter setting study on sample materials. During the applications, critical parameters were changed to obtain the most efficient solutions.

Combined materials; hardness, tensile and optical experiments were applied metallographically. The effects of these materials on the mechanical and microstructure properties of different laser welding parameters were investigated and compared to determine these properties.

Keywords: Laser welding, laser spot welding, resistance spot welding, welded assembly in the automotive sector

2019, xiii + 79 pages

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitim sürecimde bana destek veren değerli hocam Doç. Dr. Gökhan SEVİLGEN'e, çalışmanın gerçekleşmesi için bütün imkanları sağlayan Coşkunöz Holding firması ve mesai arkadaşlarıma, uygulamaları yapabilmem için bana tesislerini açan ve tüm imkanları sunan İsse Uluslararası Ticaret ve Laser Teknolojileri Sanayi Ltd. Şti. çalışanlarına, Metalürji ve Malzeme Mühendisi olarak desteğini esirgemeyen değerli çalışma arkadaşım İrem SAPMAZ'a, ve çalışmalarda emeği geçen ismini sayamadığım herkese teşekkür ederim.

Ayrıca bu zorlu süreçte beni her zaman destekleyen ve hep yanımda olan hayat arkadaşım Ümran TEKİN'e ve bugünlere gelmemde büyük emeği olan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Gökhan TEKİN
05/09/2019

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Konvansiyonel Nokta Direnç Kaynağı	3
2.1.1. Nokta direnç kaynağının kullanım alanları	5
2.1.2. Nokta direnç kaynağının önemli parametreleri.....	5
2.1.3. Otomotiv sektöründe nokta direnç kaynağı	9
2.2. Laser Işını Oluşumu ve Kullanım Alanları.....	11
2.3. Laser Kaynağı	14
2.3.1. Laser kaynağı ve kullanım alanları	14
2.3.2. Laser kaynak türleri.....	15
2.3.3. Laser kaynağının önemli parametreleri.....	19
2.3.4. Laser ışını karakterize eden özellikler.....	20
2.3.5. Otomotiv sektöründe laser kaynağı.....	22
2.4. Laser Nokta Kaynağı	23
2.4.1. Laser nokta kaynağının kullanım alanları	23
2.4.2. Laser nokta kaynağının önemli parametreleri.....	24
2.4.3. Otomotiv sektöründe laser nokta kaynağı.....	24
3. MATERYAL VE YÖNTEM	26
3.1. Problemin Tanımlanması.....	26
3.2. Kazanılacak Çıktılar.....	27
3.3. Materyal	27
3.4. Deney Numuneleri	28
3.5. Laser Cihazı ve Yardımcı Ekipmanları.....	30
3.6. Laser Kaynak İşlemi.....	31
3.7. Çekme Testi	34
3.8. Mikroyapı İncelemeleri.....	35
3.9. Sayısal Model.....	36
3.10. Sayısal Modelin Kurulması.....	37
4. BULGULAR.....	42
4.1. Kaynak Hızının Etkisi	42
4.2. Odak Mesafesinin Etkisi	47
4.3. Laser Gücünün Etkisi.....	54
4.4. Kaynak Dikiş Geometrisinin Etkisi ve Nokta Direnç Kaynağı ile Kıyaslanması...57	
4.5. Laser Nokta Kaynağı ile Nokta Direnç Kaynağı Sertlik Test Sonuçları.....	61
4.6. Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları	66
4.7. Mali Fizibilite Çalışması.....	71
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	72

KAYNAKLAR	74
ÖZGEÇMİŞ	77



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
I	Akım
Rp	Akma dayanımı
Al	Alüminyum
Cu	Bakır
Rm	Çekme dayanımı
Zn	Çinko
λ	Dalga boyu
E	Enerji
η	Fiber ölçüsü
P	Fosfor
Q	Isı
M2	Işın kalitesi
Yb	İterbiyum
C	Karbon
CO2	Karbondioksit
T	Kaynak süresi
kN	Kilo Newton
S	Kükürt
Mg	Magnezyum
Mn	Mangan
N	Newton
Nb	Niyobyum
K	Sabit
s	Saniye
Si	Silisyum
Ti	Titanyum
kWh	Tüketilen enerji miktarı
₺	Türk Lirası
HV	Vickers sertlik birimi
v	Yoğunluk
W	Watt

Kısaltmalar	Açıklama
BIW	Body In White
CAD	Computer Aided Design
dk	Dakika
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	European Norm

ITAB	Isı Tesiri Altındaki Bölge
ISO	International Organisation for Standardization
kA	Kaynak akımı
kW	Kilowatt
LBW	Laser Beam Welding
mA	Miliamper
MAG	Metal Aktif Gaz
MIG	Metal İnert Gaz
mm	Milimetre
MPa	Megapascal
N	Newton
Nd:YAG	Neodymium yttrium aluminum garnet
nm	Nanometre
TS	Türk Standartları
TIG	Tungsten İnert Gaz
YAG	Yttrium aluminium garnet

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Nokta direnç kaynağı şematik görüntüsü.....	3
Şekil 2.2. Nokta direnç kaynağına ait genel çevrim eğrisi.....	8
Şekil 2.3. Taban enerji seviyesi ve uyarılmış durum şekilleri	11
Şekil 2.4. Laser ışının oluşumunda kullanılan ekipmanların şematik görüntüsü.....	12
Şekil 2.5. Laser teknolojisi kullanılarak malzemelere uygulanan işlemler.....	13
Şekil 2.6. CO ₂ laser kaynağında buhar deliği ve plazma oluşumunun şematik gösterimi	16
Şekil 2.7. Nd:YAG laserde kullanılan ekipmanların şematik görüntüsü.....	18
Şekil 2.8. Fiber laser kaynağında kullanılan ekipmanlar	19
Şekil 2.9. Kolimatör üzerindeki önemli parametreler	21
Şekil 2.10. Farklı lazer tiplerinin dalga boyları.....	22
Şekil 2.11. Nokta direnç kaynağı ile laser nokta kaynağının gösterimi.....	25
Şekil 3.1. Numunelerin kaynak öncesi konumlandırmaları	29
Şekil 3.2. Numune boyutları.....	29
Şekil 3.3. Farklı kaynak dikiş geometrileri ve alanları	30
Şekil 3.4. Çalışmada kullanılan robot, laser kafası ve laser güç ünitesi	30
Şekil 3.5. Çalışmada kullanılan termal kamera ve pirometre	31
Şekil 3.6. Çalışmada kullanılan direnç nokta kaynağı donanımı	31
Şekil 3.7. Çekme test numune ölçüleri	35
Şekil 3.8. Malzeme karakterizasyonu çalışmalarında kullanılan cihazların görüntüsü, (a) numune kesme cihazı, (b) kalıplama cihazı, (c) taşlama ve parlatma cihazı, (d) optik mikroskop.....	36
Şekil 3.9. Simufact Kaynak Simülasyon Görüntüleri	37
Şekil 3.10. Numunelerin CAD datası.....	38
Şekil 3.11. I tipi lazer kaynak dikişi için tanımlanan kaynak hattı	38
Şekil 3.12. Oluşturulan modelin mesh yapısı	39
Şekil 3.13. Analiz kapsamında girilmesi gereken bilgiler	39
Şekil 3.14. Simufact Welding yazılımında Laser ışın çapı, laser derinliği, laser gücü ve laser hızı bilgilerinin oluşturulması.....	41
Şekil 3.15. Simufact Welding kaynak simülasyonu.....	41
Şekil 4.1. Sabit laser gücünde ve odak mesafesinde farklı kaynak hızları ile birleştirilen numunelerin görüntüleri.....	42
Şekil 4.2. Sabit laser gücünde ve odak mesafesinde farklı kaynak hızları ile birleştirilen numunelerin çekme testi sonucunda elde edilen eğrileri	44
Şekil 4.3. Sabit laser gücünde ve odak mesafesinde farklı kaynak hızları ile birleştirilen numunelerin çekme testi sonucunda hasarlı görüntüleri.....	45
Şekil 4.4. Sabit laser gücü ve odak mesafesinde numunelerin kaynak kesit görüntüleri (a) 80 mm/s, (b) 100 mm/s ve (c) 120 mm/s.....	47
Şekil 4.5. Sabit laser gücünde ve kaynak hızında farklı odak mesafelerinde birleştirilen numunelerin görüntüleri.....	48
Şekil 4.6. Sabit laser gücü ve kaynak hızında farklı odak mesafelerinde birleştirilen numunelerin çekme testi sonucunda elde edilen eğrileri	50
Şekil 4.7. Sabit laser gücü ve kaynak hızında farklı odak mesafelerinde birleştirilen numunelerin çekme testi sonucunda elde edilen hasarlı görüntüleri.....	51

Şekil 4.8. Sabit kaynak hızı ve laser gücünde odak mesafesinin kaynak kesit görüntüsüne etkisi (a) -3 mm, (b) -1,5 mm ve (c) +3 mm	53
Şekil 4.9. Sabit kaynak hızında ve odak mesafesinde, farklı laser güçlerinde birleştirilen numunelerin görüntüleri	54
Şekil 4.10. Sabit kaynak hızında ve odak mesafesinde, farklı laser güçlerinde birleştirilen numunelerin çekme testi sonucunda elde edilen eğrileri	55
Şekil 4.11. Sabit laser gücünde ve odak mesafesinde farklı kaynak hızları ile birleştirilen numunelerin çekme testi sonucunda hasarlı görüntüleri	56
Şekil 4.12. I – Tipi kaynak dikişine sahip laser kaynaklı numunelerin ön ve arka yüzey görüntüleri	57
Şekil 4.13. I – Tipi kaynak dikişine sahip laser kaynaklı numunelerin çekme testi sonucu elde edilen grafikleri.....	58
Şekil 4.14. C – Tipi kaynak dikişine sahip laser kaynaklı numunelerin ön ve arka yüzey görüntüleri	58
Şekil 4.15. C – Tipi kaynak dikişine sahip laser kaynaklı numunelerin çekme testi sonucu elde edilen eğrileri	59
Şekil 4.16. Nokta direnç kaynağı ile birleştirilen numunelerin ön ve arka yüzey görüntüleri	59
Şekil 4.17. I – Tipi kaynak dikişine sahip laser kaynaklı numunelerin çekme testi sonucu elde edilen eğrileri	60
Şekil 4.18. Laser kaynaklı ve nokta direnç kaynaklı numunelerin kaynak dikişlerinin kesit görüntüleri	60
Şekil 4.19. I – Tipi, C – Tipi ve direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin çekme dayanımları.....	61
Şekil 4.20. Farklı geometrilere laser kaynağı denemeleri.....	62
Şekil 4.21. Farklı geometrilere laser kaynağı denemeleri.....	62
Şekil 4.22. Farklı geometrilere laser kaynağı denemeleri.....	62
Şekil 4.23. Laser nokta kaynağı ve nokta direnç kaynağı bakalite alınmış numuneler ..	63
Şekil 4.24. Testlerin yapıldığı mikro sertlik cihazı	63
Şekil 4.25. Laser nokta kaynağı numunesinden sertlik ölçümü alınan noktalar	64
Şekil 4.26. Nokta direnç kaynağı numunesinden sertlik ölçümü alınan noktalar.....	64
Şekil 4.27. 2 nolu numuneden sertlik ölçümü alınan noktalar	65
Şekil 4.28. 3 nolu numuneden sertlik ölçümü alınan noktalar	65
Şekil 4.29. 4 nolu numuneden sertlik ölçümü alınan noktalar.....	66
Şekil 4.30. Sonlu elemanlar analizi ekran görüntüsü.....	67
Şekil 4.31. Farklı proses sürelerinde lazer ışınının konumu ve sıcaklık dağılımı.....	67
Şekil 4.32. Sonlu elemanlar analizinde oluşan ısı girdisinin görüntüsü	68
Şekil 4.33. Kaynak kesit görüntüsü ile sonlu elemanlar analiz sonucunun karşılaştırması (Ansys)	69
Şekil 4.34. Kaynak kesit görüntüsü ile sonlu elemanlar analiz sonucunun karşılaştırması (Simufact).....	69
Şekil 4.35. Akma dayanımı değişimi	70
Şekil 4.36. Gerçek ve sanal test sonuçlarının kıyaslanması.....	70

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Bazı araç modellerindeki direnç nokta kaynak sayıları.....	10
Çizelge 3.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan çelik saçların kimyasal bileşimleri	28
Çizelge 3.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan çelik saçların mekanik özellikleri	28
Çizelge 3.3. Sabit laser gücünde ve odak mesafesinde kaynak hızının etkisi için parametre çizelgesi.....	32
Çizelge 3.4. Sabit laser gücünde ve kaynak hızında odak mesafesinin etkisi için parametre çizelgesi.....	33
Çizelge 3.5. Sabit kaynak hızı ve odak mesafesinde laser gücünün etkisi için parametre çizelgesi.....	33
Çizelge 3.6. Farklı dikiş geometrilerine sahip laser kaynaklı numunelerin parametre çizelgesi.....	34
Çizelge 3.7. Direnç nokta kaynağı ile birleştirilen numunelerin parametre çizelgesi.....	34
Çizelge 4.1. Sabit laser gücünde ve odak mesafesinde farklı kaynak hızları ile birleştirilen numunelerin çekme dayanımları.....	43
Çizelge 4.2. Sabit laser gücünde ve kaynak hızında farklı odak mesafelerinde birleştirilen numunelerin çekme dayanımları.....	49
Çizelge 4.3. Sabit kaynak hızında ve odak mesafesinde, farklı laser güçlerinde birleştirilen numunelerin çekme dayanımları.....	54
Çizelge 4.4. Vickers sertlik deney sonuçları.....	66
Çizelge 4.5. Laser nokta kaynağı ile nokta direnç kaynağının proses maliyetlerinin kıyaslanması.....	71
Çizelge 4.6. Laser nokta kaynağı ile nokta direnç kaynağının ürüne oluşturduğu maliyet.....	71

1. GİRİŞ

Otomotiv sektörünün; çevre regülasyonlarına uyma, artan konfor ihtiyacını karşılama, teknolojik değişimlere ayak uydurma ve rekabet edilebilirlik adına gerçekleştirdiği çalışmaların temelinde iki ana madde bulunmaktadır. Bunlardan ilki ürün ve proses maliyetlerinin düşürülmesi, ikincisi ise araç ağırlığının azaltılması, özellikle yeni nesil araçlarda konfor ve menzilin artırılması yönündedir. Bu nedenle günümüzde gerçekleştirilen birçok çalışmanın ve buluşun temelinde bu iki maddeye hizmet etmek amacı bulunmaktadır.

Günümüzde binek veya ticari araçları oluşturan komponentleri birleştirme prosesi olarak hala ağırlıklı konvansiyonel nokta direnç kaynağı ve gazaltı kaynak yöntemleri kullanılmaktadır. Bir binek araçta ortalama 4000 adet nokta direnç kaynağı bulunmaktadır ve yaşanan mekanik deformasyon hatalarının %70'i birleşme bölgelerinin etrafında olmaktadır. Dolayısıyla otomotiv sektöründe gövde parçalarının birleştirilmesinde en çok kullanılan yöntemlerden biri olan nokta direnç kaynak prosesi, aracın mekanik dayanım karakterini etkileyen ana unsurlardandır. Nokta direnç kaynak prosesinin mevcut uygulama hızının, kaynak atılacak bölgeye yaklaşma zorluluğu nedeniyle yavaş kalması operasyon verimliliği açısından dezavantaj yaratmasının yanısıra, ürünü devreye almada çok sayıda denemeler yapılmakta ve ciddi oranda malzeme tüketimi ve hurda maliyeti ortaya çıkmaktadır. Gazaltı kaynak metodlarında (TIG-MIG-MAG) ise bu durum kaynak yapılacak malzemelerin cinsi, uygulama yapılacak malzemenin kalınlığı, geometrisi ve malzeme üzerindeki kaplama durumuna göre farklılık göstermektedir. Genel olarak otomotiv sektöründe kullanılan gazaltı kaynağı, birleştirilecek parçalarda oluşturduğu ısı tesiri altında kalan bölgenin (ITAB) genişliği nedeniyle kaynaklanan ürünlerde çarpılma ve kalitesizlik maliyetlerine neden olmaktadır. Günümüz otomobillerinde kullanılan malzeme türleri dikkate alındığında hem gazaltı kaynağı hem de nokta direnç kaynağının yeni nesil ve farklı türdeki malzemeleri birleştirmede yarattığı olumsuz sonuçlardan dolayı bu kaynak türleri yerine laser kaynağı gibi yenilikçi kaynak türlerinin kullanımı tercih edilmeye başlanmıştır. Dünyada otomotiv sektöründe laser kaynak kullanımı 1990'lı yıllarda seri üretimde kullanılmaya başlanmış iken ülkemizde ise ilk yatırım 2009 yılında yapılmıştır.

Bu tez çalışmasında otomotiv sektöründe yaygın kullanılan nokta direnç kaynağına alternatif olarak, laser nokta kaynağının mekanik ve termal incelenmesi ele alınmıştır. Çalışmanın birinci kısmında belirlenen sac malzemeler üzerinde konvansiyonel nokta direnç kaynak denemeleri yapılmış olup, ikinci kısmında ise aynı malzemeler üzerinde laser nokta kaynak denemeleri yapılmıştır. Otomotiv sektöründe özellikle nokta direnç kaynağın ciddi oranda kullanılıyor olmasından dolayı bu çözümün yerine geçeceği düşünülen laser nokta kaynak çözümü uygulanmıştır. Denemelerde hem düz kaynak çizgisi hem C şeklinde kaynak çizgisi hem de yuvarlak kaynak çizgisi denenmiş olup kaynak geometrisinin birleşme dayanımına olası etkileri kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre hangi ürün gruplarında ne tür kaynak geometrisi kullanılabileceği kabulleri yapılmıştır. Günümüzde kaynak bölgelerinin mekanik dayanımının incelemesinde sanal analizler ile elde edilen sonuçlar ile gerçek üretim sonuçları arasındaki ilişkiyi sağlamanın oldukça zor olduğu bilinmektedir. Bu tez çalışmasında kaynak modellemeleri ve analizleri için geliştirilen yazılımlardan olan Ansys ve Simufact yazılımları kullanılarak kaynak bölgesinde oluşan ısı ve kaynaklı ürünlerin kopma mukavemeti elde edilerek, elde edilen sonuçlar gerçek sonuçlar ile kıyaslanmıştır.

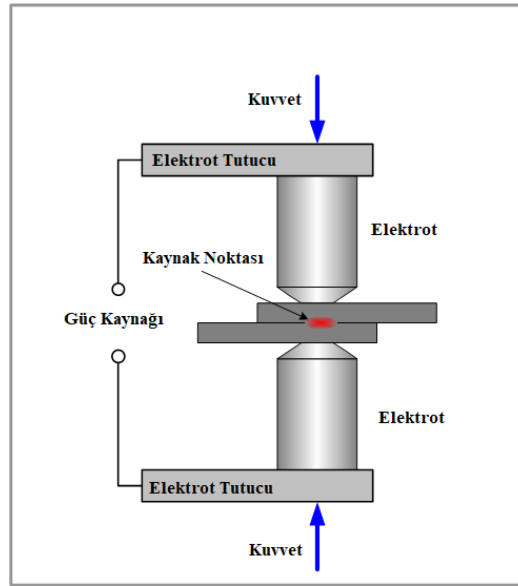
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Otomotiv endüstrisindeki büyük değişimlerin yaşandığı günümüzde konvansiyonel birleştirme yöntemleri yerine yeni nesil birleştirme teknikleri araştırılmakta ve uygulanmaktadır. Bu çalışma ile nokta direnç kaynağının önemli parametreleri ve uygulama alanları araştırılmış olup, bu prosesin yerine kullanılmaya başlanan ve halen teknik zorlukların yaşandığı laser kaynak prosesi ve önemli parametreleri araştırılmıştır.

2.1 Konvansiyonel Nokta Direnç Kaynağı

Kaynaklı konstrüksiyonların imalinde kullanılan en yaygın birleştirme yöntemidir. Kaynak yöntemleri işlemin cinsine göre ergitme kaynağı ve basınç kaynağı olmak üzere ikiye ayrılır. Basınç kaynağı yöntemi arasında direnç kaynağı otomotiv sektöründe en yaygın olarak kullanılan başlıca kaynak yöntemidir.

Nokta direnç kaynağı, metal parçaları birleştirmek amacıyla 1880’li yıllarda Elihu Thomson tarafından bulunmuştur (Thomson 1891). Nokta direnç kaynağı genel olarak, metalik malzemelerin belirli bir basınç altında temas ara yüzüne uygulanan elektrik akımı sonrasında gösterdiği direnç sonucu oluşan ısıdan dolayı ergimesine dayanan bir prosestir (Ing ve Spitz 2014). Nokta direnç kaynağının şematik görünüşü şekil 2.1’de verilmektedir.



Şekil 2.1. Nokta direnç kaynağı şematik görünüşü (Kopeliovich 2012).

Kaynak için gerekli akım, yüksek gerilim ve düşük akım şiddetindeki şebeke elektrik akımını, düşük gerilim ve yüksek akım şiddetinde kaynak akımına çeviren trafodan sağlar. Gerekli basınç veya elektrot kuvveti, pnömatik, hidrolik veya mekanik donanımlar ile gerçekleştirilir.

Nokta direnç kaynağını oluşturan bileşenler aşağıda belirtilmiştir;

- Kaynak yapılacak parçalar
- Karşılıklı iki elektrot
- Parçaları elektrotlar arasında sıkıştırmak için gerekli aparat
- Belirli bir süre için kontrollü bir akım uygulayabilen güç üretici

Kaliteli bir kaynak yapabilmek için uygun şartların oluşturulması gerekir. Kaynak elektrotunun, akımının ve süresinin kaynatılacak malzemenin türüne bağlı olarak belirlenmesi, kaynak uygulamasının kalitesini arttırmaktadır.

Direnç kaynağının diğer kaynak yöntemlerine göre avantajları (Akyol 2001);

- Kaynak hızının yüksek olması
- İlave birleştirme malzemesi gerektirmemesi ve kaynağın kolay kontrol edilebilirliği
- Kaynak kalitesinin operatöre bağlı olmaması
- Seri üretime daha uygun olması, tekrarlanabilirlik
- Maliyetinin düşük olması
- Kaynama bölgesinin ve ısı tesiri altında kalan bölgenin küçük olması
- Malzemenin mekanik özelliklerinin bozulmaması

Direnç kaynağının diğer kaynak yöntemlerine göre dezavantajları;

- Çok fazla kontrol parametresinin bulunması (Gallagher 2003)
- Enerji tüketiminin yüksek olması (Gallagher 2003)
- Ekipmanların ilk kurulum maliyetinin yüksek olması (Akyol 2001)
- Bağlantıların minimum distorsiyonla oluşturulması ve levhaların arasında bulunan çekirdeğin çevresinde oluşan çentiğin etkisinden dolayı oluşan düşük gerilme ve yorulma dayanımı (Ünlükal 2007)
- Birleştirme yapılacak olan ürünlere fiziksel olarak erişim zorluğu bulunması

Genel olarak nokta direnç kaynağı yöntemi değişik uygulama alanlarında kullanılır. Uygulama alanlarına göre nokta direnç kaynağı farklı şekillerde yapılır.

2.1.1 Nokta Direnç Kaynağının Kullanım Alanları

Nokta direnç kaynağı, her ikisinin de kalınlığı yaklaşık olarak 3 mm'ye kadar olan, kalınlıkları ve kompozisyonları/ bileşimleri birbirine göre aynı veya farklı olabilen ve yüzeyine kaplama yapılmış sac levhaların birbiri üzerine getirilerek birleştirilmesine olanak sağlamaktadır.

Pres ile form verilmiş levha parçaların maliyeti oldukça düşük bir şekilde ve yüksek üretim hızıyla birleştirilmesini sağlamaktadır ancak sızdırmazlık (su veya gaz gibi maddelerin) istenen durumlarda başarılı bir sonuç verememektedir (Gugel 1995).

Otomotiv sektöründe güvenlik standartlarının daha iyi hale getirilmesi ve araç hafifletme stratejisi doğrultusunda yapılan çalışmalar sonucunda özellikle araç üretim aşamaları arasından en kritik rol alan basamaklarından biri olan gövde imalatında kullanılan birleştirme yöntemleri sürekli değişmekte ve her gün daha da geliştirilmektedir. Nokta direnç kaynağı otomotiv sektöründe araç gövde imalatında kullanılan en önemli birleştirme yöntemidir. Araçların gövdesinin birleştirilmesinde yaklaşık olarak %80 oranında nokta direnç kaynağı kullanılmaktadır. Nokta direnç kaynağı otomotiv sektörünün dışında beyaz eşya, enerji, raylı sistemler, savunma sanayi gibi birçok farklı endüstride de kullanılmaktadır.

Günümüzde düşük karbonlu çelikler, galvanizli çelikler ve paslanmaz çeliklerin birbiri ile birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Doruk ve ark. 2015).

2.1.2. Nokta Direnç Kaynağının Önemli Parametreleri

Kaynak esnasında ortaya çıkan ısı, birleşme bölgesinde Joule Kanunu'na göre oluşmaktadır. Nokta direnç kaynağında kullanılan ısı enerjisi Eşitlik (2.1) de gösterilmiştir (Gugel 1995).

$$Q=K I^2RT \quad (2.1)$$

K: Sabit

I: Kaynak akımı

R: Kaynak bölgesi direnci

T: Kaynak süresi

Malzemelerin yapısal özelliklerinin de malzemeye yapılan nokta direnç kaynağının kalitesi üzerinde önemli bir etkisi bulunmaktadır. Bu özelliklerden bazılarının nokta direnç kaynağı kalitesi üzerine etkisi ele alındığında: (Gawai ve Sedani 2016)

Direnç: Elektrotlar arasındaki kuvvetle ters orantılı olarak değişir. Gereğinden fazla kuvvetin direnci düşüreceği iyi değerlendirilmelidir. Gereğinden az kuvvet uygulandığında ise kaynak direnci artacağı için yanmalar oluşabilir. Sıcaklıkla kaynak direnci değişimler gösterir. Bu değişim malzemeye bağlı bir özelliktir (Wolff ve ark. 2007).

Kaynak Akımı: Isı enerjisini kaynak noktasında oluşturan en önemli büyüklüktür. Kaynak akımı küçük tutulursa “uzun süreli kaynak” türü olur ve ısıtılan bölge genişler. Kaynak akımı fazla olursa elektrotlardan malzemeye akım geçişindeki zorluklardan dolayı ark ve çatlaklar oluşabilir (Akyol 2001).

Kaynak Süresi: Kaynak akımı akma süresi de kaynak için çok önemli bir parametredir. Kaynak süresi kısa olursa, kaynak tutmayabilir veya kaynak çekirdeği çapı küçük olabilir. Kaynak süresi uzun olunca, ergimiş bölge fazla büyüyeceği için baskıdan dolayı patlar ve malzeme fişkirabilir. Bu ise bölgenin bozulmasına sebep olur (Akkaş ve ark. 2016).

Kaynak Baskı Kuvveti: Kaynak başlamadan önce elektrotlarla kaynatılacak bölge sıkılır, kuvvet kararlı hale geldikten sonra akım akıtılır. Kaynak için gerekli olan direnç genellikle kuvvetle ters orantılıdır. Kuvvet arttırılırsa temas direnci azalır ancak temas direncinin azalma şekli malzemedен malzemeye farklılık göstermektedir (Gallagher 2003).

Isıl İletkenlik: Isıl iletkenliği yüksek olan metallerin nokta kaynak kabiliyeti, düşük olan metallere kıyasla daha zayıftır. Isıl iletkenlik ile elektrik iletkenliği çoğu metalde birbiriyle yakın ilişkilidir (Andersson 2013).

Isıl Genleşme: Metalin yapısında meydana gelen sıcaklık değişimi sonucunda cismin boyutunda değişiklik meydana gelmektedir. Isıl genleşme katsayısı yüksek olan metallerde, kaynaklı parçalar burkulma gibi form bozukluklarına maruz kalabilmektedir (Andersson 2013).

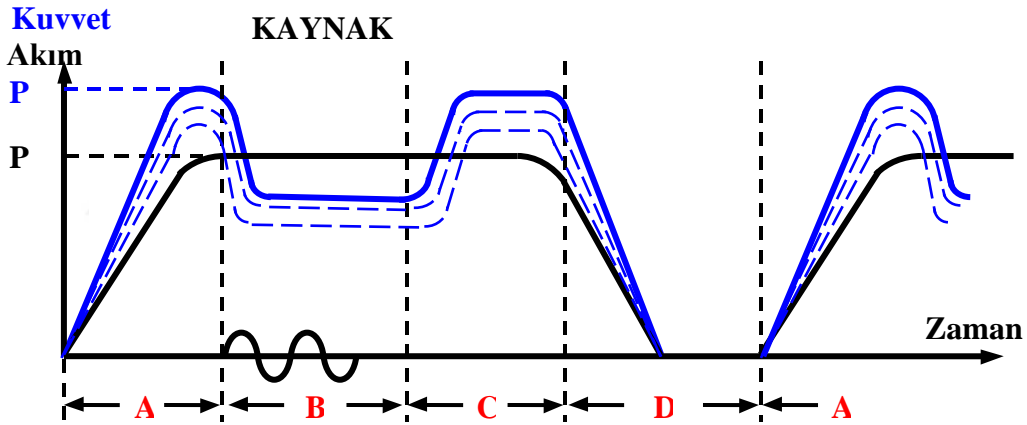
Sertlik ve Mukavemet: Yumuşak metallerde elektrotların derinliği daima fazla olmaktadır. Sert ve yüksek mukavemetli metallerin kaynaklanmasında ise daha yüksek elektrot kuvveti uygulanması gerekmektedir ancak bu durumda elektrotun çabuk deforme olmaması için sert ve mukavemetinin daha yüksek olması gerekmektedir. Yüksek uygulama sıcaklıklarında oda sıcaklığında gösterdiği özelliklerini koruyabilen metaller, uygulanan elektrot kuvvetinin daha yüksek olduğu makinelerde kaynaklanabilmektedir.

Oksitlenme Direnci: Yaygın kullanılan tüm metaller, oksijenle reaksiyon verme eğilimlerinden dolayı yüzeylerinde oksit film meydana getirebilmektedirler. Yüzeyde oluşan oksitler, metallerin elektrik iletkenliğini negatif etkilemektedir. Bu da aynı zamanda metallerin direnç nokta kaynak yapılabilirliğini negatif etkilemektedir. Yüzeyde oluşan koruyucu oksit filmler, nokta direnç kaynağı uygulamasında metal yüzeyinin yanmasına, elektrot ucunun kaplanmasına ve iş parçası yüzeyinin kötü görünmesine neden olmaktadır. Birleştirilecek olan parçaların yüzeyinde oluşan oksit film tabakası üniform ve her yerde eşit kalınlıkta ilerlemiyorsa, bu durum yapılacak olan kaynağın mukavemetinin ve kalitesinin oldukça düşmesine sebep olmaktadır. Bu durum özellikle alüminyum alaşımlarının kaynaklanması esnasında çok büyük problem yaratmaktadır. Alüminyum kaynağından önce metalin yüzeyinin oksit filminden arındırılması gerekmektedir. Yüzey temizliğinin ardından kaynak işlemi gerçekleştirilmelidir ancak çelik malzeme gruplarında herhangi bir yüzey temizleme işlemine gereksinim duyulmamaktadır. Her durumda, haddeleme işleminin ardından yüzeyde kalan cürufaların, ısıl işlem uygulamasının ardından kalan kalın oksitler ve boya, çekme sıvıları veya yağları gibi harici malzemelerin nokta direnç kaynağından önce yüzeyden mutlaka temizlenmesi gerekmektedir (Al Naimi ve ark. 2015).

Plastik Sıcaklık Bölgesi: Eğer bir metalin ergimesi ve akması dar bir sıcaklık aralığında oluşuyorsa, kaynak parametrelerinin daha hassas bir şekilde ayarlanması gerekmektedir (Gawai ve Sedani 2016).

Metalürjik Özellikler: Nokta direnç kaynağında küçük bir hacimde metal, kısa bir sürede içerisinde sıcak dövme ve ergime sıcaklığına çıkarılır ve ardından elektrotlar ve çevresinde bulunan metal tarafından hızla soğutulur. Bu hızlı ısınma ve soğuma, bazı metal ve alaşımlarında sertleşme ve hatta kaynak çekirdeğinde çatlamalara neden olabilmektedir (Gawai ve Sedani 2016).

Kaynak makineleri günümüzde çok değişik elektronik kontrol üniteleri ile kontrol edilmektedir. Nokta direnç kaynağında kullanılan genel bir çevrim eğrisi Şekil 2.2’de verilmektedir (Andersson 2013).



Şekil 2.2. Nokta direnç kaynağına ait genel çevrim eğrisi (Anonim 2013).

A: Sıkma Zamanı

Kaynak komutu geldikten sonra elektrotların kaynak kuvvetine erişmesi için geçen zamandır.

B: Kaynak Zamanı

Kaynak akımının aktığı zaman bölümüdür. Bu bölümde kaynak cinsine göre, ön ısıtma, kaynak, darbeli kaynak ve son ısınma gibi bölümlere ayrılabilir. Kaynağın bu şekilde üç aşamaya ayrılması, kaynak kalitesi artırılmasında etkili olabilmektedir.

Ön Isınma: Kaynak yapılırken malzeme yapısı, durumu, elektrot öpüşme durumu, gibi nedenlerle ön ısıtma (up-slop) uygulaması yapılır. Yani akım, ayarlanan değere birdenbire değil de belli bir eğri üzerinden çıkarılır. Ön ısıtma, Kaynatılacak parçalar üzerinde yağ, pas gibi kirliliklerin uzaklaştırılmasını sağlayabilmektedir.

Darbeli Kaynak: Kaynak akımının bazı durumlarda darbeli akması istenilebilir. Kaplamalı saçlarda, kaynatılacak parçalar arasında mesafe olması durumunda ve çok katlı saçların kaynağı gibi durumlarda darbeli kaynak uygulanabilmektedir. Akım bir seferde akıtılacağına bölünmüş çok parçalı olarak akıtılmaktadır.

Son Isınma: Kaynak işlemi bittikten sonra tavlama amaçlı, kaynak bölgesinde oluşan porozitelerin kapanması gibi nedenlerle azalan bir akım uygulanabilmektedir.

C: Tutma Zamanı

Kaynak işlemi bittikten sonra, elektrotların bir süre kaynak noktası üzerinde tutulması hem malzemenin birbirine nüfuz etmesini sağlamaya yardımcı olur hem de kaynak noktasında oluşan ısının etrafa yayılmadan elektrotlara aktarılmasını sağladığı için kaynak noktasında meydana gelecek kararmanın önüne geçmesini sağlar.

D: Ayrılma Zamanı

Tekrarlı kaynakta, ikinci kaynağa başlamak için geçen ara zamandır. Bu sürede ikinci direnç nokta için iş veya penseye hareket verilir.

2.1.3. Otomotiv Sektöründe Nokta Direnç Kaynağı

Nokta direnç kaynağı otomotiv endüstrisinde en çok tercih edilen birleştirme teknolojilerinden biri olup üretici ana sanayilerin belirlediği kaynak spesifikasyonlarına göre yan sanayilerinden bu kaynak speklerine uygun nokta direnç kaynağını uygulamaları beklenmektedir. Özellikle araçların gövde sac parçalarının birleştirilmesinde hem ser, üretime uygunluğu hem de maliyeti açısından ciddi oranda tercih edilmektedir. Araç üzerinde uygulanan direnç nokta kaynak sayısı aracın marka ve modeline göre değişmektedir. Aşağıdaki çizelge 2.1'de görüldüğü üzere yaklaşık olarak 4000 adet nokta direnç kaynağı ile 6000 adet nokta direnç kaynağı arasında uygulamalar yapılmıştır. Genel olarak nokta direnç kaynağı 2,5 sn/nokta ile 4 sn/nokta arasında uygulanmaktadır.

Çizelge 2.1. Bazı araç modellerindeki direnç nokta kaynak sayıları (Doruk ve Pakdil 2016)

Araç Modeli	Nokta Kaynak Adedi
Alfa Romeo Giulietta	3676
Volvo S60	3966
Citroen C4	3938
Saab 9-5 Sedan	4250
Honda CR-Z	4254
Opel Meriva	4533
Ford Grand C-MAX	5011
Fiat Linea	5031
Renault Latitude	5208
VW Sharan	5600
BMW 5 Series	5800

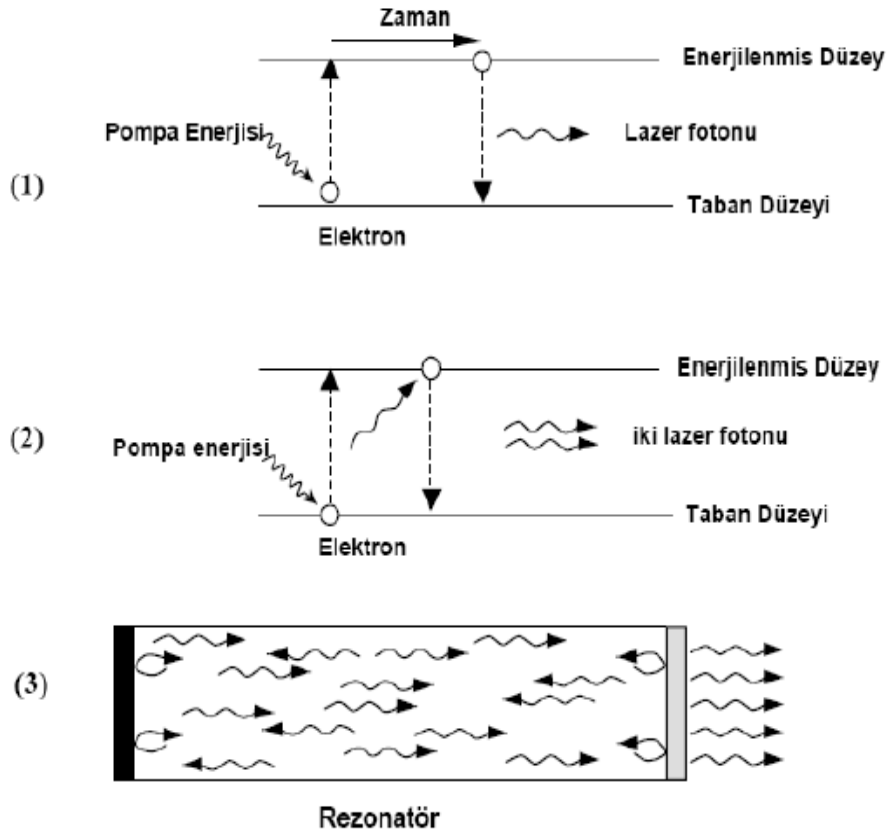
Otomotiv sektöründe uygulanan kaynaklı birleştirmelerden aşağıdaki gibi çeşitli performans beklentileri oluşmaktadır (Doruk 2015);

- 1- Mekanik mukavemet
- 2- Yorulma mukavemeti
- 3- Eğme ve burulma yönünde Rijitlik
- 4- Korozyon dayanımı
- 5- Görsel kalite beklentileri

Nokta direnç kaynağı ile birleştirilen otomotiv parçaları belirtilen her bir performans ölçütü için çeşitli testlere maruz kalırlar.

2.2. Laser Işını Oluşumu ve Kullanım Alanları

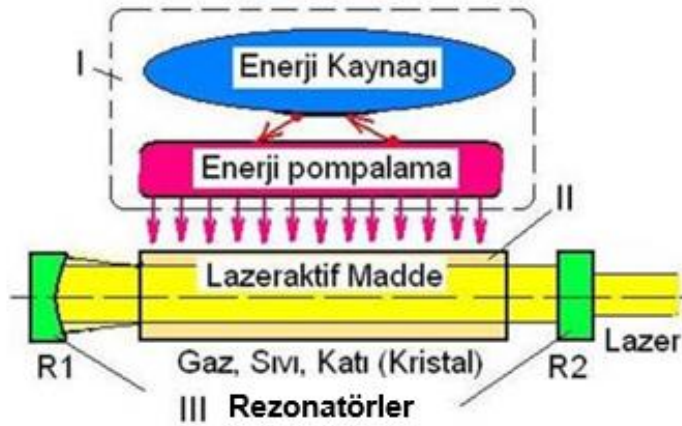
Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) ışını; yüksek genliğe sahip olan, aynı fazda, birbirine paralel, tek renkli ve aynı frekansa sahip dalgalardan oluşmaktadır. Atom, her zaman enerjisini minimumda tutma eğilimi göstermektedir. Atomun daha yüksek enerjiye sahip olması durumunda uyarılmış hale geçer. Alt enerji seviyesinden, bir üst enerji seviyesine çıkmasıyla atomun sahip olduğu enerji seviyesinde artış meydana gelmektedir. Şekil 2.3'te atomların taban enerji seviyesinden uyarılması şematik olarak gösterilmektedir. Uyarılmış atom, kendi konumundan daha alt enerji seviyelerine inerken enerji ile yüklenmiş ışın parçacığı olarak adlandırılan “foton” yani ışın yaymaktadır. Laser ışını oluşumunda da yayılma sırasında açığa çıkan fotonlar aynı dalga boyuna sahip olup, aynı doğrultuda ve fazda birbirlerine uyumlu şekilde hareket etmektedir. Atom ancak basınç uygulaması, ısıtılma, hızlandırılmış elektron bombardımanı ve ışık demetine maruz bırakılma ile uyarılabilmektedir (Tarakçıoğlu ve Özcan 2004).



Şekil 2.3. Taban enerji seviyesi ve uyarılmış durum şekilleri (Anonim 2016).

Laserin çok uzak mesafelere dahi açısal çarpılmaya uğramadan gidebilmesi, oldukça uyumlu olması, enerji ile aynı frekans değerinde yayıldığı için hedeflenen bölgede oldukça yüksek yoğunluğa ulaşabilmesi ve monokromatik özellik göstermesi gibi özelliklerinden dolayı birçok uygulama alanında yerini almıştır (Katayama 2013).

Laser ışınının oluşumunda temel olarak üç ayrı bölge bulunmaktadır. Bunlar laserin oluşumu için kullanılacak enerji kaynağı ve pompalama sistemi, laser ışının ortaya çıkmasını sağlayan maddeyi bulandıran laser aktif madde ve laser ışınının yoğunlaştırılmış bir şekilde yansıtılmasını sağlayan rezonatörlerdir (Kakaçoğlu ve ark. 2014). Laser ışını üretiminde kullanılan ekipmanların şematik görüntüsü Şekil 2.4'te verilmektedir.

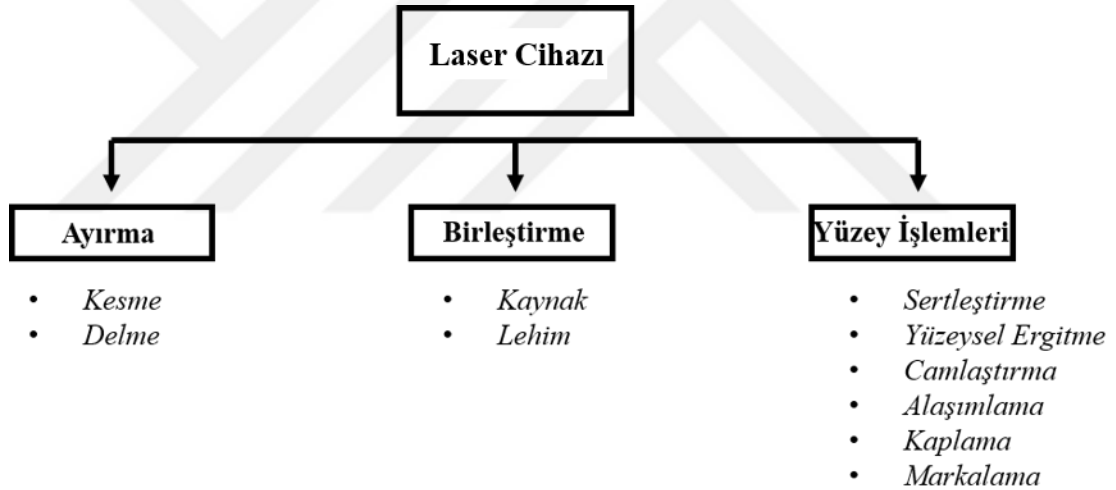


Şekil 2.4. Laser ışınının oluşumunda kullanılan ekipmanların şematik görüntüsü (Kakaçoğlu 2014)

Enerji kaynağında atomların uyarılması için gerekli enerji sağlanmaktadır. Atom uyarılması için üretilen enerji; elektrik pompalama yöntemi ya da optik pompalama yöntemi ile laser aktif maddenin elektrik enerjisi veya ışına ile atomların en üst enerji seviyesine atlatılması ile gerçekleşmektedir. Laser aktif ortamda ise laser ışınının oluşmasını sağlayan maddeler bulunmaktadır. Laser aktif maddelere Nb, Yb, katı kristal olarak Nd:YAG, gaz veya sıvı halde olarak ise CO₂ olarak verilebilmektedir. Laser aktif ortamının belirlenmesi, kullanılacak laser türüne göre farklılık göstermektedir. Bir diğer adı ayna yansıtıcı olan rezonatörler, oluşan laser ışınlarının bir kısmını laser aktif maddesine geri yansıtılmasıyla sürekli bir ışık demeti oluşturarak bu ışınların belirlenen eksene paralel olacak şekilde yayılmasını sağlamaktadır. Rezonatörler, iki farklı aynadan

oluşan optik bir sistem olup; laser aktif maddenin arkasında ışınların yansıtılmasını sağlayan aynanın bulunduğu R1 bölgesi ve laser aktif maddenin önünde ise kısmi geçirgenliğe sahip aynanın bulunduğu R2 bölgesinden oluşmaktadır (Kannatey 2009).

Laser ışını; haberleşme, elektronik ve iletişim, tıp, askeriye, ölçme tekniği ve malzeme işleme gibi birçok alanda kullanılmaktadır. İmalat sanayide oldukça yaygın olarak kullanılan laser ışınları, üretimde mikron ve nano mertebelerde hassasiyet sağlaması, bazı özel alaşımlarda talaşlı imalatla üretim sırasında hassasiyetin artırılması ve katmanlı imalat üretim yöntemlerinde üretim hatlarına entegre edilmesi ile akıllı üretim sistemlerinde kullanımı günden güne yaygınlaşmaktadır. Laser ışınlarının kullanıldığı laser cihazları ile ayırma, birleştirme ve yüzey işlemleri gibi birçok proses gerçekleştirilebilmektedir (Kannatey 2009). Laser teknolojisi ile malzemelere uygulanan işlemler Şekil 2.5'te verilmektedir.



Şekil 2.5. Laser teknolojisi kullanılarak malzemelere uygulanan işlemler (Kannatey 2009)

Laser ışınlarının; uygulamada sağladıkları yüksek işlem hızı, güç gerektirmeden uygulanabilirliği, işlemlerin sürtünme uygulanmaksızın gerçekleştirilmesi, nüfuziyetin derin olması, değiştirilebilir enerji yoğunluğu ve son olarak iş parçasında oluşturduğu ısı yükünün oldukça düşük olması gibi uygulama alanlarına bağlı olarak birçok avantajı bulunmaktadır. Laser ışını ile yapılan işlemlerin hızının yüksek olmasına rağmen yapılan işlerin kalitesi de son işlemlerin azalması veya elimine edilmesi ve malzemede ısı işlem gören bölge alanının daha az olmasından dolayı ısı çekiminin düşük olmasından dolayı oldukça yüksektir. Diğer yöntemler ile bir arada kullanılabilmesinin yanı sıra işlem

parametrelerinin ve malzeme seçiminin esnekliği uygulamalarda oldukça büyük avantaj sağlamaktadır (Kannatey 2009).

2.3 Laser Kaynağı

Laser oluşum mekanizmasından elde edilen laser ışını, yönlendirme amaçlı kullanılan aynalardan yansıtılması ile yoğunlaştırılmış bir şekilde malzemenin yüzeyine ulaşır. Kaynaklanacak bölgenin yerel olarak igitilmesi ile temel olarak kaynak işleminin gerçekleşmektedir (Karaaslan ve ark. 2001). Diğer konvansiyonel kaynak yöntemlerine kıyasla birçok avantaja sahip olan laser kaynağının ark kaynağından farklı olarak; birleşme bölgesine odaklanabilmesi, ark kaynağında harcanan enerjiye kıyasla çok daha az miktarda enerji gerektirmesi ve kaynak bölgesi dışındaki bölgelerin ısı tesiri altında kalmamasını sağladığı için malzemenin mekanik özelliklerinin değişimini engeller ve malzemenin daha yüksek hızda kaynak yapılabilmesini sağlamaktadır (Püskülcü ve Koçlular 2009).

2.3.1. Laser Kaynağının Kullanım Alanları

Laser kaynağı; elektronik, havacılık, otomotiv endüstrisinde geniş çapta kullanılmaktadır. Bu kaynak yöntemi kompleks parçaların kaynağı için oldukça uygun olmakla beraber yüksek güçlü laserler otomotivde, transmisyonlar, ocaklar, katalitik dönüştürücüler, egzoz sistemleri ve dikiş kaynaklı tabakalar gibi pek çok parçada kullanılmaktadır. Ancak yapılan kaynakların yapısında porozite oluşumu, yüzey hataları, tepecikler, katılaşma çatlakları gibi kusurlar görülebilmektedir (Zhao ve ark. 1999).

Laser ışını kullanılarak yapılan kaynak hafif metaller arasında başlıca yer alan alüminyum, magnezyum ve titanyum alaşımlarında, bu malzemelerin kombinasyonlarına ve çelik grubuna uygulanabilmektedir. Malzemelerin çarpılma oranının oldukça düşük olmasını sağlayan bu yöntem, yine de çarpılmaların tamamen önüne geçebilmiş değildir. Laser uygulamaları otomotiv ve elektronik sektörü, ulaşım, uçak ve havacılık endüstrisinde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle parçaların mekanik özelliklerinin oldukça kritik olduğu sektörlerde, laser kaynağı ile birleştirilmiş parçaların mekanik özelliklerinin oldukça yüksek olmasından dolayı bu proses sıklıkla tercih edilmektedir (Dahotre ve Harimkar 2007).

Laser kaynağının paslanmaz çelikler, kesme takımları ve hidrolik valflere kadar birçok potansiyel uygulama alanı mevcuttur. Sert metallerin çelik ile kaynaklanmasında sert lehimleme, yüksek sıcaklık uygulamalarında olan bazı sınırlamalarından dolayı fazla tercih edilmemektedir. Bunun yerine laser kaynağı yapılan birleştirme işleminde, ısı gerilme oranında ve ITAB bölgesinin alanı azaltılabilmektedir. Kaynak yapılabilirliğin yanı sıra elde edilen mekanik özelliklerde oldukça iyi değerler elde edilebilmektedir (Keskin 2009).

Otomotiv sektöründe ise çeliklerin kaynaklanmasının yanı sıra özellikle alüminyum ve alaşımlarının kaynaklanmasında, laser kaynağı ile başarılı sonuçlar elde edilebilmektedir. Kaynak sırasında oluşabilecek mikro çatlak oluşumu azaltılmaktadır ancak yapıda bulunan Mg ve Zn gibi elementler sıcaklığın yüksek olması sebebiyle buharlaşır; bu da kaynak bölgesinde porozite oluşumuna sebebiyet vermektedir (Yusof ve ark. 2014).

2.3.2 Laser Kaynak Türleri

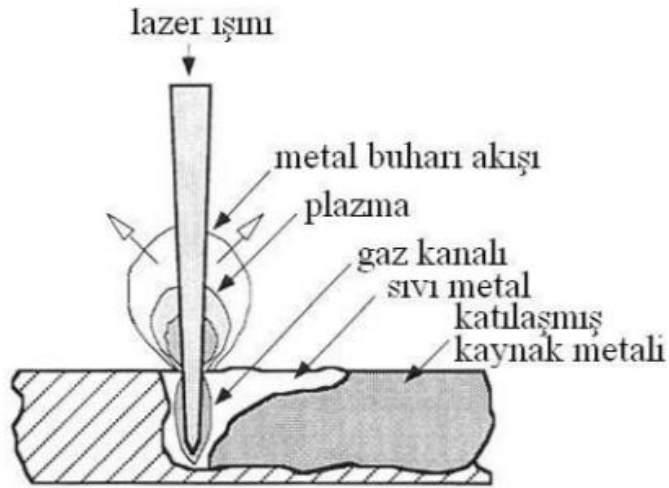
Laser kaynağı ayarlanabilir laser atımlarıyla veya devamlı dalga modunda kaynak yapılmasına izin vermektedir. Endüstride en çok kullanılan laser kaynak türleri aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir (Boyraz ve Yıldız 2016);

- Katı Hal Laserleri
- Gaz Laserleri
- Yarı İletken Laserler
- Sıvı Laserler
- Fiber Laserler

Yukarıda bahsedilen kaynak türleri içerisinde yer alan ve otomotiv endüstrisinde en çok kullanılan kaynak türleri hakkında aşağıda bilgi paylaşılmaktadır.

CO₂ Laser Kaynağı

Belli bir ortamda oluşturulan laser ışını aynalar vasıtasıyla yönlendirilir. Yönlendirilen laser ışını, odaklama mekanizmasına ulaştıktan sonra çok küçük bir alana yoğunlaştırılır; bu sayede yerel bir ergitme ve buharlaştırma sağlanmış olur. Buharlaştırma sıcaklığında, laser tarafından üretilen enerji malzeme tarafından absorbe edilmeye devam eder. Buharlaşma sonucunda oluşan malzeme ve kaynak sırasında atmosferde bulunan koruyucu gaz karışımının yoğunlaşması sonucu oluşan plazma, oldukça yüksek absorpsiyon yeteneğine sahip olmakla beraber oluşturmuş olduğu ısı, malzemedan iş parçasına iletilir. Ergiyik malzemenin yapısında oluşan sıcaklık ve basınç farkları, akıcı fazlı bir buhar kanalı oluşumuna sebep olur. Buhar kanalı oluşumu ve kaynak sırasında plazma oluşumunun şematik görüntüsü Şekil 2.6'da verilmektedir. Ergiyik malzeme, bu kanaldan sürekli akış sağlar. Ergiyik, ısınmış buharın oluşturmuş olduğu yüksek basınç ile iş parçasının yüzeyine yükselir ve oluşan çekim kuvveti, yüzey gerilmesi ve viskozite etkisiyle yapıda oluşabilecek genleşmeler engellenmiş olur. Bu sayede iş parçası üzerinde oluşan kaynak dikişi, oldukça homojen ve dar bir yapıya sahip olacak şekilde elde edilir. Isı kaynağının enerjisinin yüksek olması durumunda, elde edilen kaynak dikişi yapısında oluşan ITAB bölgesinin boyutu oldukça dar sınıır içerisinde kalır (Karaaslan ve ark. 2001). Şekil 2.6'da buhar deliği ve plazma oluşumunun şematik gösterimi verilmektedir.

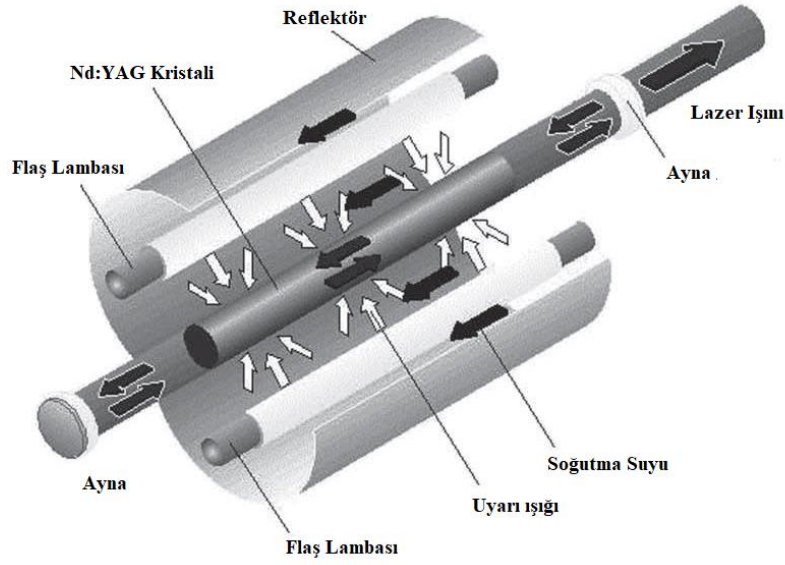


Şekil 2.6. CO₂ laser kaynağında buhar deliği ve plazma oluşumunun şematik gösterimi (Yavuz ve Çam 2005)

Buhar deliği oluşununun ardından delik bölgesindeki ergimiş malzemenin, laser ışını tutma kapasitesi oldukça artar ve ergiyik malzemededen oluşan bir havuz meydana getirir. Laserin iş parçasının üzerinde sabit bir hızla sürüklenmesi veya parçanın sabit olup laser ışını demetinin sabit bir hızla hareket ettirilmesi sonucunda ergiyik havuzunda bulunan metal yol boyunca ilerler. Ergiyik metal, kara cisim ışıması etkisi yaratarak ergime bölgesi dışına düşen laser demetini yutar. Bu sayede, laser ışını sadece istenen bölgenin ertilmesini sağlar ve kalan ergiyik metal bölgesinin katılaşmasına olanak tanır. Kullanılacak laser demetinin gücü oldukça kritik bir rol oynamaktadır. Seçilen güç, kaynak yapılacak metali ertitecek kadar yüksek olmalı ancak kaynak çukurunda bulunan metali buharlaştırıp yok olmasına sebep olmayacak kadar da düşük olmalıdır. Kaynak çukurunun kullanılması kalın kesite sahip saç malzemelerin kaynatılmasında tercih edilebilecek en uygun yöntem olarak verilmektedir (Metzbower 1993).

Nd:YAG Kaynağı

Nd: YAG laser kaynağında kullanılan laser çubuğu, itriyum – alüminyum – granattan (YAG) oluşturulan sentetik bir kristaldir. YAG kristali fiziksel olarak sert, kararlı, optik olarak izotropik ve yüksek iyi bir termal iletkenliğe sahiptir. Neodimyum, laser üretiminde kullanılan diğer malzemelerden daha yüksek seviyede pik gücü üretir. Laser çubukların boyutları kristalin kalitesini ve termal yönetimin sağlanabilmesi için yaklaşık 15 milimetre (mm) çap ve 200 mm uzunluk ile sınırlıdır. Nd:YAG laserinin üretiminde kullanılan ekipmanların şematik görüntüsü Şekil 2.7’de verilmektedir.



Şekil 2.7. Nd:YAG laserde kullanılan ekipmanların şematik görüntüsü
(Katayama 2013)

Şekil 2.7’de şematik görüntüsü verilen flaş lambaları, uyarı ışığı oluşturur ve ışık reflektör yardımıyla Nd: YAG kristalini uyarır. Rezonatör, flaş lambasını ve laser çubuğunu barındıran bir pompa boşluğuna ve lambanın tüm ışığını çubuğa yansıtacak şekilde altın kaplama iç yüzeyi olan eliptik şekilli bir tasarıma sahiptir. Tüm pompa boşluğunu akan su ile doldurmak suretiyle hem flaş lambasını hem de laser çubuğu soğutulmaktadır. Flaş lambası, kullanıma göre değiştirilmesi gereken operasyonel bir sarf malzemesidir. Flaş lambasının ömrü; üretilen ışının kalitesine, darbe parametrelerine ve iş çevrimine bağlı olarak 200.000 ile 150 milyon atış arasında değişiklik göstermektedir. Laser dikiş kaynağında flaş lambasının içerisinde bulunan soğutma suyu ile istenilen çalışma sıcaklığının korunması sağlanarak prosesin ömrü daha uzun tutulabilmektedir.

Fiber Laser Kaynağı

Oldukça küçük parçaların kaynaklanmasında efektif bir yöntem olarak kullanılan fiber laser, çok düşük güç uygulaması ile oldukça yüksek ışın kalitesinin elde edilebilmesini sağlamaktadır. Rayleigh uzunluğu (mm) $-M^2$ değerleri yüksek , iyi kaliteye sahip ve sürekli odaklanmış ışın, çok küçük bir alanda bölgesel ergitme sağlayarak özellikle ince paslanmaz çelik malzemelerin oldukça yüksek kalitede spot kaynağı yapılabilmesini sağlamaktadır. Fiber laser kaynağında kullanılan ekipmanlara ait temsili ekipmanlar Şekil

2.8'de verilmektedir. Fiber laser kaynağının düşük ışın sapması, ışın çıkışının esnek olması, bakım maliyetlerinin düşük olması, verimliliğinin yüksek olması ve son olarak kompakt boyutu sayesinde yüksek güç sağlayabilmesi gibi birçok avantajı bulunmaktadır (You ve ark. 2013).



Şekil 2.8. Fiber laser kaynağında kullanılan ekipmanlar (Anonim 2015).

Fiber laserlerde kullanılan kaynak malzemesi, genellikle 3 ile 9 metre uzunluğunda ve 9 ile 50 mikron çapında cam elyaf katkılı olarak üretilmektedir. Çoğunlukla kaynak elementi olarak iterbiyumun kullanılmasının sebebi çevrim verimliliğinin ve yaklaşık 1 mikron dalga boyunun sağlanabilmesidir (Hull ve Souders 2011).

2.3.3. Laser Kaynağının Önemli Parametreleri

Laser kaynağı ile elde edilen kaynak dikişinin kalitesinin belirlenmesinde etkili iki ana grup mevcuttur. Bunlardan ilki kaynak işleminde kullanılan kaynak parametreleri; diğeri ise kaynaklanacak malzemenin ışını tutma ve yansıtma özellikleridir.

Laser kaynağında kullanılan aşağıdaki parametreler, kaynağın kalitesini oldukça etkilemektedir (El-Batahgy 1997):

- Kullanılan laserin gücü
- Kaynağın hızı
- Kullanılan koruyucu gaz türü, bu gazın akış hızı ve basıncı

Laser kaynağında kaynaklanacak olan iş parçasında kullanılacak malzemenin türü oldukça kritiktir. Kullanılan laserin enerjisinin oluşturduğu ısının absorblanabilirliği, tamamen kullanılan malzemenin türü ile ilişkilidir. Metal, laser ışını geçirmedeği için malzemenin yüzeyine çarpan ışın demeti yansıyarak çarptığı yüzeye yakın bir bölgede derinliği ve boyutu küçük olan bir çukur meydana getirir. Ancak iş malzemesinin sıcaklığının artması durumunda ışın demetinin yansması azalır.

Laser ışınının yutulması, kullanılan iş malzemesinin laser enerjisi ile yüzeye çarpan laser enerjisinin oranı olarak tanımlanmaktadır. Yutma; kullanılan iş malzemesinin cinsine, yüzey koşullarına, kullanılan laser ışınının dalga boyuna ve bu ışın demetinin malzeme yüzeyine çarpma açısına bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Malzemenin gelen ışın demetini maksimum seviyede yutması ancak demetin 90° açı ile çarpmasıyla sağlanabilmektedir (Katayama 2013).

Malzemenin laser demetini yutma yeteneği, laserin iletiminde kullanılan serbest elektronların sayısına bağlı olarak değişmektedir. Metallerin ısınması ile kafes sisteminde bulunan elektronlar titreşimin de artış göstermesi ile serbest hale gelir. Serbest kalan elektron sayısı arttığı için malzemenin demet yutma yeteneği de artış göstermektedir (Katayama 2013).

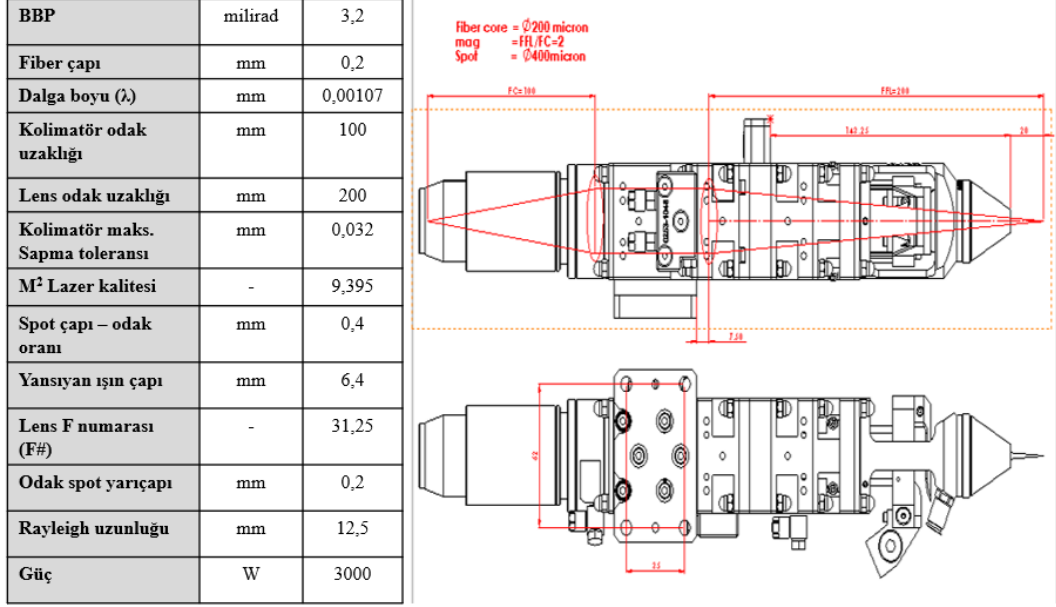
2.3.4. Laser Işını Karakterize Eden Özellikler

Lazer ışınlarının karakterizasyonunda optik açıdan 10-15 arası ana unsur bulunmaktadır. Bu unsurlardan ışın karakterizasyonuna en çok etki edenleri;

- Fiber ölçüsü (μ)
- Rayleigh uzunluğu (mm)
- M^2 ışın kalitesi
- λ Dalgaboyu (nm)

olarak sıralanabilir.

Fiber lazer kaynak üreticinden çıkan lazer ışınının, lazer kafa aracılığı ile birleştirilecek ürünlere yansıtılması esnasında Şekil 2.9’da verilen parametreler önem arz etmektedir.



Şekil 2.9. Kolimatör üzerindeki önemli parametreler (Anonim 2015).

Özellikle fiber lazerlerde M² ve λ değerlerinin iyileşmesi ışının olduğu fiber optik kablodan kolimatöre aktarılması ve dış ortama verilmesi esnasında birim alana uygulanan gücün fazlalığı ve bağlantılı olarak hedeflenen noktaya dağılmadan gidebilmesi gibi özellikleri arttırmaktadır.

Işının enerji transferine etki eden bir başka önemli unsur ise dalga boyudur. Özellikle Cu-Al gibi hafif alaşımların yansıtma oranı yüksek olduğu için malzeme ilk penetrasyon esnasındaki dalga boyunun 512nm olması tavsiye edilirken, Yb Fiber lazerlerdeki 1024nm dalga boyunun çelik türevleri için gereken hızda penetrasyon sağladığı bilinmektedir. Lazer türüne göre sağlanan dalga boyları Şekil 2.10’da paylaşılmıştır.

Dalga boyunu (λ) karakterize eden ana unsur fotonun enerjisi quantum yasaları uyarınca frekansı ve planck sabitinin (h) çarpılması ile elde edilmektedir. Bu eşitlik denkleme ışık hızının(c) katılması ile dalga boyuna indirgenebilir. Özetlemek gerekirse; dalga boyunu karakterize eden unsur, farklı malzeme türlerinde hangi enerji seviyelerinde elektronların uyarıldığı ve bağlantılı olarak kararlı enerji seviyesine geri dönerken fotonun içerdiği birim enerji paketidir.

Foton enerjisinin hesaplanması Eşitlik (2.2)'de gösterilmektedir.

$$E=h\nu= hc/\lambda. \quad (2.2)$$

LAZER TÜRÜ	DALGA BOYU (nm)
Argon Fluoride	193
Xenon Chloride	308 and 459
Xenon Fluoride	353 and 459
Helium Cadmium	325 - 442
Rhodamine 6G	450 - 650
Copper Vapor	511 and 578
Argon	457 - 528 (514.5 and 488 most used)
Frequency doubled Nd:YAG	532
Helium Neon	543, 594, 612, and 632.8
Krypton	337.5 - 799.3 (647.1 - 676.4 most used)
Ruby	694.3
Laser Diodes	630 - 950
Ti:Sapphire	690 - 960
Alexandrite	720 - 780
Nd:YAG	1064
Hydrogen Fluoride	2600 - 3000
Erbium:Glass	1540
Carbon Monoxide	5000 - 6000
Carbon Dioxide	10600

Şekil 2.10. Farklı lazer tiplerinin dalga boyları
(<https://fas.org/man/dod-101/navy/docs/laser/fundamentals.htm>)

2.3.5. Otomotiv Sektöründe Laser Kaynağı

Laser ışın kaynağının (LBW) otomotiv sektöründe kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır. Bunun en etkili sebepleri arasında kaynağın noktasal olarak yoğun enerjinin aktarımının sağlanmasıyla uygulanmasıdır. Bunun yanı sıra kaynağın dar bir alanda derinlemesine gerçekleştirilmesi kontrollü bir birleşme operasyonunun gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Yapılan kaynağın oldukça yüksek hızlarda gerçekleştirilebilmesi, kaynak öncesinde yapılan yüzey hazırlık işlemlerinin ve kaynak işleminin ardından yüzeye uygulanan düzeltme işlemlerinin kalkması ve son olarak aynı veyahut farklı malzeme türlerinin birbiri ile kaynaklanmasını sağlaması laser kaynağını otomotiv sektöründe oldukça önemli bir yere taşımaktadır (Phillips 2016). Araçlarda hafiflik ve dayanım unsurlarının öneminin artmasıyla başlayan farklı özelliklere sahip malzeme kullanımı gereksinimi de laser kaynağını her geçen gün önemli kılmaktadır. Özellikle “Body In White” (BIW) olarak tariflenen gövde bileşenlerinde hem görsel hem de dayanım açısından laser kaynak kullanımı tercih edilmektedir (Zhang ve ark. 2014). Ülkemizde de üretici pozisyonundaki ana sanayiler laser kaynak kullanımının önemini fark etmiş ve uygulamaya başlamışlardır.

2.4 Laser Nokta Kaynağı

Laser kaynağı, yüksek derinlik / genişlik oranı, ısıdan etkilenmiş bölgenin dar olduğu, yüksek güç yoğunluğuna sahip düşük ısı girişli kaynak teknolojilerinden biridir. Ayrıca, yüksek hızlı, yüksek hassasiyetli ve düşük ısı bozulmalarına sahip temassız bir işlemdir. Bu kaynak metodu artık gerilmeleri ve süreksizlikleri azaltır. Laser ışını kaynağı, elektrik, elektronik ve otomobil gibi çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Laser nokta kaynağı, metal levhaları birleştirmek için önemli bir modern işlem olarak kabul edilirken, punto kaynağı geleneksel bir işlemdir. Nokta direnç kaynağı, otomotiv endüstrisinde baskın kullanılan bir birleştirme teknolojisidir (Katayama 2013). Bununla birlikte, laser nokta kaynağının tek taraflı, temassız bir işlem olması ve karmaşık yapılara iyi bir şekilde adapte edilebilirliğinin olması nokta direnç kaynağına göre ciddi avantajlar sağlamaktadır. Sağladığı avantajlar nedeniyle laser nokta kaynağı hafif otomotiv parçaları üretmeye ve yakıt verimliliğini arttırmaya yardımcı olmaktadır (Liao ve Chen 2013). Otomobil yapısal montajlı parçalarında güvenlik unsuru son derece önemlidir. Araçlarda çarpışma sırasında gelen yükü, kaynaklı yapıdan geçirip doğru şekilde absorbe edebilmek önemlidir. Bu nedenle yolcuların kaza sırasındaki korunması büyük ölçüde spot kaynakların kalitesine bağlıdır. Laser nokta kaynağının sağladığı daha yüksek mekanik direnç ve parçalarda yarattığı daha az ısıl deformasyonlar nedeniyle araçların güvenlik seviyelerinin artışı da sağlamaktadır.

2.4.1. Laser Nokta Kaynağının Kullanım Alanları

Laser nokta kaynağı konvansiyel nokta direnç kaynağının kullanıldığı hemen hemen her alanda kullanılabilir. Araçlarda yüksek kopma mukavemeti beklenen birleştirmelerde, gövde parçalarında, şasi parçalarında, yapısal ve modüler parçaların birleştirilmesinde uygulanmaktadır (Yang ve Lee 1999).

Beyaz eşya sektöründe sac parçaların birleştirilmesinde, donanım ve elektronik ürün gruplarının birleştirilmesinde, savunma ve havacılık endüstrilerinde ve denizcilik alanında laser nokta kaynağı kullanımı bulunmaktadır. Özellikle üzerinde yüksek adetli nokta direnç kaynağı bulunan ve yapısal beklentileri yüksek olan ürün gruplarında laser nokta kaynağının kullanımı maliyet ve hafiflik açısından avantajlar sunmaktadır.

2.4.2. Laser Nokta Kaynağının Önemli Parametreleri

Laser nokta kaynağının uygulanacağı ürün ve üründen beklenen özelliklere göre ekipman seçimleri yapılmaktadır. Laser nokta kaynağını etkileyen başlıca kritik parametreler aşağıda vurgulanmıştır (Phillips 2016);

- Laser Gücü
- Odak Uzaklığı
- Laser Uygulama Hızı
- Laser Nokta Geometrisi
- Uygulama Yapılacak Malzemenin Özelliği
- Uygulama Malzeme Yapılacak Malzeme Kalınlığı
- Kullanılacak İşlem Gazı

Ayrıca, laser nokta kaynak prosesinin uygulanacağı malzemenin yansıtma, ışını yutma özelliği mutlaka dikkate alınmalıdır. Yansıtma özelliği yüksek metallerde uygulama yaparken kullanılacak ekipmanların teknik özellikleri doğru seçilmeli ve iş güvenliği şartları sağlanmalıdır.

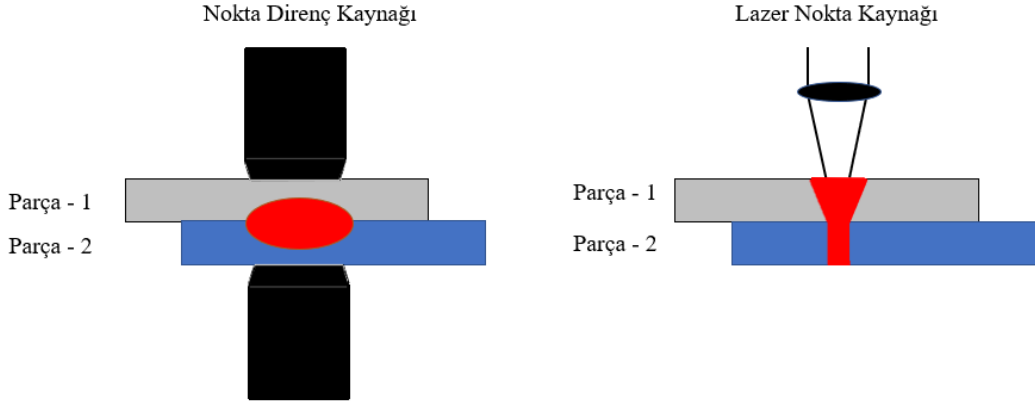
Laser nokta kaynak ile birleştirilecek malzemelerde çinko ve benzeri kaplama var ise kaynak esnasında bu kaplamadan dolayı dışarıya çıkan atıkların doğru bir şekilde atılabilmesi ve uygun kaynağın elde edilebilmesi için gerekli boşluğun verilmesi önem arz etmektedir (Alizadeh-Sh ve ark. 2013).

Bu tez çalışması ile laser gücü, odak uzaklığı, uygulama hızı ve kaynak geometrisi parametrelerinin laser nokta kaynağına olan etkileri detaylı olarak incelenmiştir.

2.4.3. Otomotiv Sektöründe Laser Nokta Kaynağı

Otomotiv sektöründe geçmişte daha yoğun olarak kullanılan karbondioksit (CO₂) ve ND-YAG katı hal laserlerinin yerine son yıllarda fiber laser kaynak kullanımı artmıştır (Masoumi ve ark. 2010). Laser fiber kaynak hem hızı hem sarf giderleri hem de kaliteli kaynak oluşumu açısından avantajlar sağlamaktadır. Bu nedenle laser nokta kaynağı uygulamaları fiber laser kaynak teknolojisi ile uygulanmaya başlanmıştır. Laser fiber kaynağı rezonatörde oluşturulan ışın kaynağının fiber kablolar aracılığı ile kaynak

yapacak kaynak kafası ve robota taşınması sayesinde uygulanmaktadır. Şekil 2.11’de nokta direnç kaynağı ile lazer nokta kaynağının karşılaştırılması şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.11. Nokta direnç kaynağı ile lazer nokta kaynağının gösterimi

Şekilde gösterildiği gibi nokta direnç kaynağı uygulamasında ısı tesiri altındaki bölge lazer nokta kaynağına göre çok daha geniştir. Bu nedenle nokta direnç kaynağı uygulaması yapılan ürünlerde daha fazla ısıl deformasyon etkisi görülerek kaynak sonrası beklenen toleransların dışında ürünler elde edilebilmektedir. Lazer ışını çok daha esnek bir şekilde yönlendirilebildiği için ürünlerin kaynak yapılacak bölgelerine erişim kolaylığı sağlamakta ve özellikle geometrik kısıtlar barındıran ürünler için avantaj sağlamaktadır (Mei 2015).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde tez kapsamında kullanılan araçlar, malzemeler ve yöntemler tanıtılmıştır.

3.1. Problemin Tanımlanması

Otomotiv endüstrisinde kullanılan mevcut birleştirme teknolojileri; çevre kirliliği ile ilgili regülasyonların güncellenmesi, araçların kullanım amaç ve yöntemlerinin değişmesi nedeniyle farklı türde malzemelerin birleştirilebilmesine olanak sağlayacak esnekliğe sahip olmak durumundadır. Günümüzde üst segment araçların birçoğunda çelik, alüminyum, magnezyum, kompozit gibi malzemelerin bir arada kullanılmasının yanı sıra preste şekillendirilmiş, dövme veya dökümden üretilmiş farklı metotlar ile üretilmiş alt parçaları barındırmaktadır. Farklı üretim metotlarının kullanılması ile ürünlerin tasarımları da değişmiş olup kaynak prosesi esnasında kaynak edilmesi gereken yüzeylere erişmekte zorlaşmıştır. Konvansiyonel birleştirme yöntemlerinde kullanılan fikstürleri de göz önüne alırsak kaynak bölgesine olan erişim zorluğu nedeniyle ürünlerde tasarım değişiklikleri yapma zorunlulukları da ortaya çıkabilmektedir. Otomotiv endüstrisinde çoğunlukla kullanılan gaz altı ve nokta direnç kaynak prosesleri birleştirilen malzemelere çok fazla ısı girdi sağladığı için parçalarda istenmeyen deformasyonlara, kalite problemlerine ve üründen istenilen toleransların elde edilmesi yönünde problemlere neden olabilmektedir. Ayrıca günümüzde otomotiv sektöründe verimliliğin son derece önem kazanması ile daha hızlı ve daha az kalite problemleri sunan çözümlere yönelimi arttırmıştır. Bunun yanı sıra endüstrideki en önemli maliyet kalemlerinden biri olan enerji tüketim maliyetlerinin azaltılmasına yönelik çok sayıda araştırma ve çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar maliyetleri azaltmakla kalmayıp doğada sürdürülebilir enerji kaynaklarına ulaşmak için de önem arz etmektedir.

Yukarıda belirtilen bu nedenlerden dolayı daha hızlı, daha az maliyetli, daha kaliteli çözümler sunabilen teknolojilerin otomotiv sektörüne entegrasyonu noktasında firmaların teknolojik dönüşüme olan ihtiyacının her geçen gün daha fazla artması beklenmektedir.

3.2. Kazanılacak Çıktılar

Bu tez çalışması ile otomotiv sektöründe kullanılan gaz altı, nokta direnç kaynak gibi konvansiyonel uygulamalara alternatif geliştirilen ve her geçen yıl yeni çözümler sunan laser kaynağın mevcut yöntemlere göre karşılaştırılması yapılmıştır.

Araçlardaki kaynak tiplerini incelediğimizde en çok direnç nokta kaynak tipinin kullanıldığı belirlenmiş olup bu tez çalışması ile konvansiyonel nokta direnç kaynağına alternatif laser nokta kaynağı denemeleri yapılarak kaynak esnasında ve sonrasında elde edilen çıktılar ile kıyaslamalar yapılmıştır.

Laser nokta kaynağı uygulaması ile aşağıda belirtilen alanlarda iyileşmeler beklenmektedir;

- Kaynak bölgesine erişim
- Toplam kaynak süresi
- Tüketilen enerji
- Birleştirilen parçalardaki ısıl girdi ve deformasyon
- Toplam yatırım

3.3. Materyal

Bu tez kapsamında öncelikle laser kaynak prosesindeki işlem parametrelerinin etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda 0,65 mm, 0,75 mm ve 0,95 mm kalınlığında galvaniz kaplamalı DX54D+Z çeliği kullanılmıştır. Bu çelik sıcak daldırma ile galvaniz kaplanmış bir çelik türüdür. EN standartlarına göre D harfi soğuk şekil verildiğini, +Z ifadesi ise çinko kaplama yapıldığını ifade etmektedir.

Tezin ikinci kısmında ise farklı dikiş geometrisine sahip laser kaynaklı numuneler ile nokta direnç kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin mekanik dayanımları ve mikro yapıları karşılaştırılmıştır. Bu doğrultuda 1,8 mm kalınlığında galvaniz kaplı HX340LAD çelik sac kullanılmıştır. Sıcak daldırma ile yapılan galvaniz kaplama işlemi sacın her iki yüzeyine de 50 g/m² olacak şekilde uygulanmıştır.

Bu çelikler otomotiv sektöründe soğuk şekillendirmeye uygun düşük karbonlu çinko ile kaplanmış galvanize çelik olarak adlandırılır. Kullanılan çelikler TS EN 10346 sıcak daldırmayla sürekli olarak kaplanmış yassı mamuller standardında tanımlanmıştır. DX54D+Z çeliğinin çelik numarası 1.0952 olarak tanımlanmış olup HX340LAD çeliğinin çelik numarası 1.0933 olarak standartta belirtilmiştir.

Kullanılan çelik malzemelerin kimyasal kompozisyonları Çizelge 3.1’de verilmiştir. Kullanılan malzemenin mekanik özellikleri ise Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan çelik sacların kimyasal bileşimleri

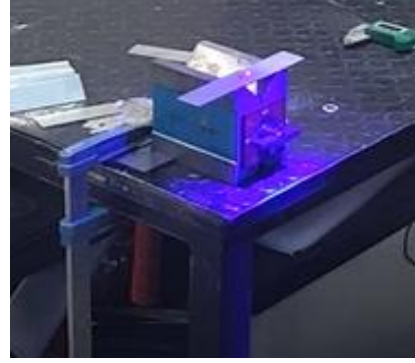
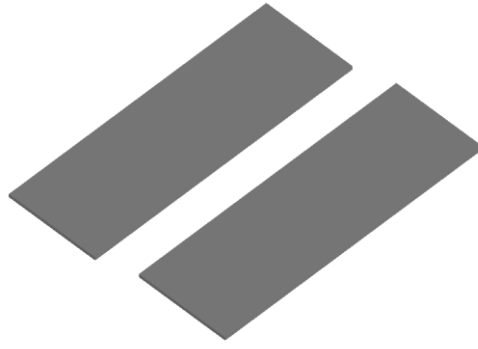
Malzeme	C	Si	Mn	P	S	Ti
1.0952	0,18	0,5	1,2	0,12	0,045	0,3
1.0933	0,11	0,5	1	0,025	0,025	0,15

Çizelge 3.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan çelik sacların mekanik özellikleri

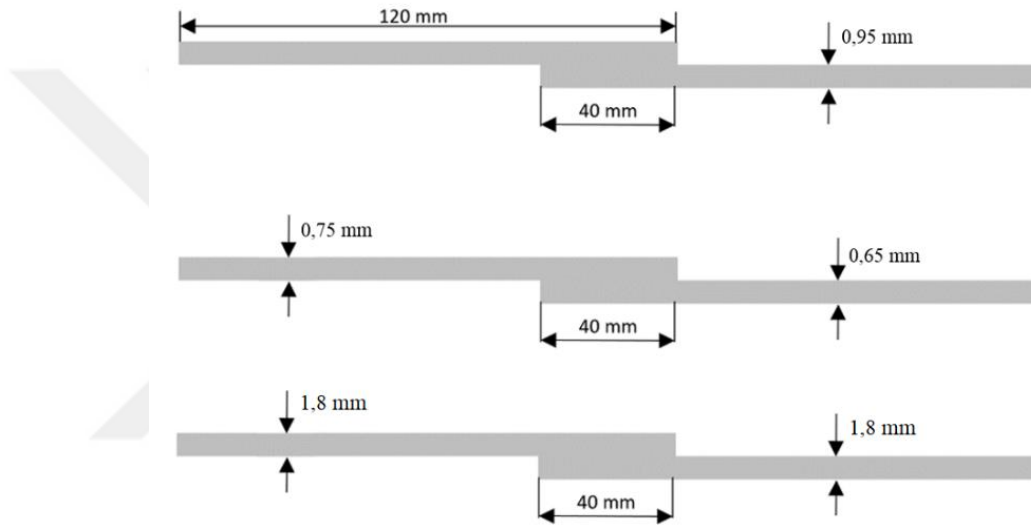
Malzeme	Akma Mukavemeti ($R_{p0.2}$, MPa)	Çekme Mukavemeti (R_m , MPa)	Kopma Uzaması
1.0952	120-220	260-350	36
1.0933	340-420	410-510	21

3.4. Deney Numuneleri

Laser kaynak işlemleri için kullanılan çelik saclar, giyotin ile 120 x 40 x 0,95 mm, 120 x 40 x 0,75 mm, 120 x 40 x 0,65 mm ve 120 x 40 x 1,8 mm boyutlarında kesilmiştir. Ayrıca nokta direnç kaynağı ile birleştirilen numunelerde yine giyotin makas ile 120 x 40 x 1,8 mm boyutlarında kesilmiştir. Kesilen numuneler zımpara kâğıdı ile temizlenmiş ve aseton ile silinmiştir. Şekil 3.1’de numunelerin kaynak öncesi konumlandırmaları ve Şekil 3.2’de numune boyutları verilmiştir. Birleştirmeler tüm numuneler için bindirme kaynağı formatında gerçekleştirilmiştir.

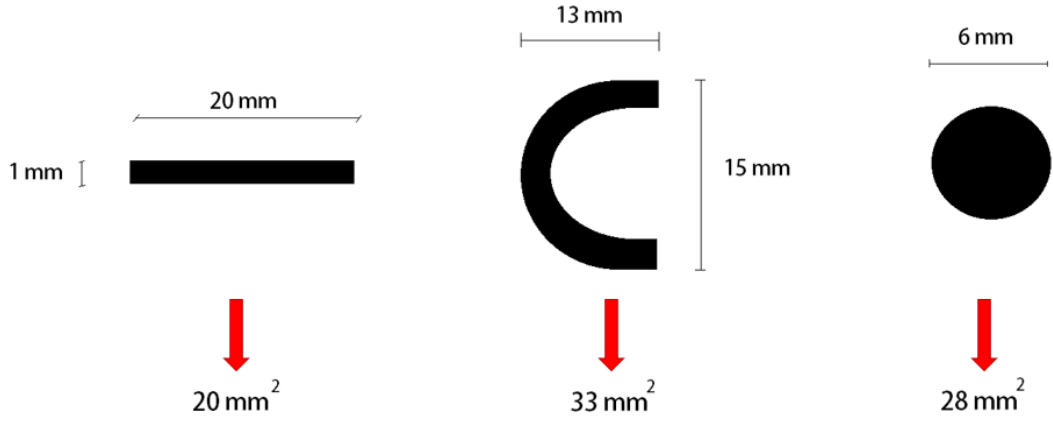


Şekil 3.1. Numunelerin kaynak öncesi konumlandırmaları



Şekil 3.2. Numune boyutları

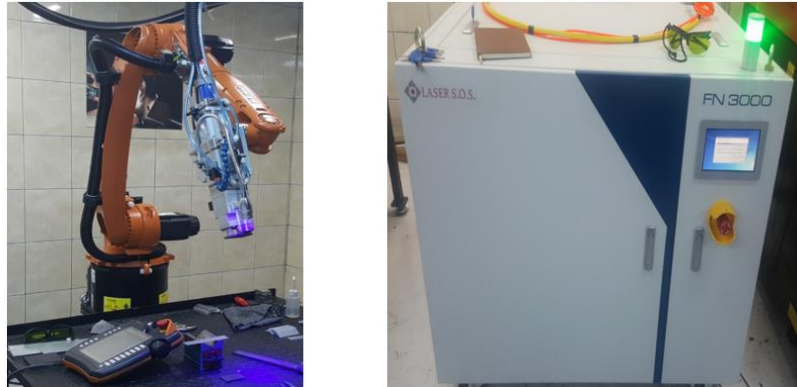
Kaynak dikiş geometrisinin etkisini incelemek ve nokta direnç kaynağı ile kıyaslamak yapmak için numuneler farklı dikiş geometrisi ile laser kaynağında birleştirilmiştir. Laser kaynaklı numuneler I – Tipi, C – Tipi ve O – Tipi olmak üzere üç farklı dikiş geometrisinde kaynatılmıştır. Ayrıca nokta direnç kaynağı ile de numuneler birleştirilip kıyaslama yapılmıştır. Kaynak dikişlerinin farklı alanlara sahip olduğu bu numunelerde çekme dayanımlarını hesaplamak adına kaynak dikişlerinin alanları hesaplanmıştır. Şekil 3.3’de kıyaslamada kullanılan dikiş geometrileri ve kaynak alanları gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Farklı kaynak dikiş geometrileri ve alanları

3.5. Laser Cihazı ve Yardımcı Ekipmanları

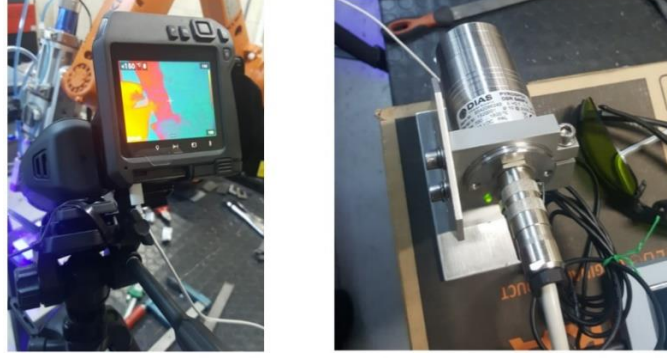
Tez kapsamında laser kaynak çalışmaları KUKA KR8 R1620 robot kolu ile entegre çalışan 3 kW gücünde TurcWeld FW-150200-502 model laser kafası ile gerçekleştirilmiştir. Fiber laser sistemi 200 mm odak uzaklığına sahip odaklama ünitesi ve kollimatör ünitesinden meydana gelmektedir. Çalışmada kullanılan robot, laser kafası ve laser güç ünitesi Şekil 3.4’te verilmiştir.



Şekil 3.4. Çalışmada kullanılan robot, laser kafası ve laser güç ünitesi

Laser kaynak esnasında proses Dias marka PYROSPOT Series 40 DSR54NFV modelinde pirometre ve FLIR marka T540 modelinde termal kamera ile kaynak sırasında oluşan ısıl değişimler ölçülmüş ve değerlendirmelerde kullanılmak için kaydedilmiştir (Şekil 3.5). Termal kamera hızlı ve hassas laser yardımcı odaklamaya sahip olup 180°

dönen optik blok içermektedir. 4" kapasitif dokunmatik ekran ile 464 x 348 piksel çözünürlüğe sahiptir. Pirometre ise 700 °C – 2500 °C sıcaklık ölçümü yapabilmekte ve sıcaklık doğrusal çıkış 0/4 ila 20 mA'dır.



Şekil 3.5. Çalışmada kullanılan termal kamera ve pirometre

Nokta direnç kaynağı işlemi için ise aro pense kullanılmıştır. Numuneler belirli bir baskı kuvveti altında önceden belirlenmiş parametrelere bağlı olarak birleştirilmiştir. Şekil 3.6'da çalışmada kullanılan nokta direnç kaynak makinasına ait görüntü verilmektedir.



Şekil 3.6. Çalışmada kullanılan direnç nokta kaynağı donanımı

3.6. Laser Kaynak İşlemi

Laser kaynak işleminde ışının odak noktası üstte olan çelik sacın üzerinde olacak şekilde ayarlanmıştır. Laser kafasından gelen laser ışınları parçaların yüzeylerine dik olarak etki edecek şekilde ayarlanmıştır. Kaynak esnasında koruyucu gaz kullanılmamıştır. Odak

mesafesinin etkisini incelerken negatif değerleri elde etmek için laser ışının odak noktası birleştirilecek parçaların içi olarak belirlenmiştir. Pozitif odak ise laser ışınının odak mesafesinin parça üst yüzeyinden olan uzaklığını ifade etmektedir.

Laser kaynak işleminde proses parametrelerinin etkilerini incelemek adına öncelikle sabit laser gücünde ve odak mesafesinde kaynak hızının etkileri incelenmiştir (Çizelge 3.3). Sonrasında ise sabit laser gücü ve kaynak hızında odak mesafesinin etkileri incelenmiştir (Çizelge 3.4). En son aşamada ise sabit kaynak hızı ve odak mesafesinde laser gücünün etkisi incelenmiştir (Çizelge 3.5).

Çizelge 3.3. Sabit laser gücünde ve odak mesafesinde kaynak hızının etkisi için parametre çizelgesi

Numune No	Malzeme	Kalınlık (mm)	Laser Gücü (W)	Odak Uzaklığı (mm)	Hız (mm/s)	Spot Geometrisi
6	1.0952	0,65 – 0,75	1750	0	80	Dairesel
5					100	
4					120	
13				80		
14				100		
15				120		
24		-3	80			
23			100			
22			120			
7		0,95 – 0,95	2000	0	80	
8					100	
9					120	

Çizelge 3.4. Sabit laser gücünde ve kaynak hızında odak mesafesinin etkisi için parametre çizelgesi

Numune No	Malzeme	Kalınlık (mm)	Laser Gücü (W)	Hız (mm/s)	Odak Uzaklığı (mm)	Spot Geometrisi
1	1.0952	0,95 – 0,95	1500	80	0	Dairesel
10					+1,5	
28					-1,5	
19					+3	
37					-3	
2			1500	100	0	
11					+1,5	
29					-1,5	
20					+3	
38					-3	
3			1500	120	0	
12					+1,5	
30					-1,5	
21					+3	
39					-3	

Çizelge 3.5. Sabit kaynak hızı ve odak mesafesinde laser gücünün etkisi için parametre çizelgesi

Numune No	Malzeme	Kalınlık (mm)	Hız (mm/s)	Odak Uzaklığı (mm)	Laser Gücü (W)	Spot Geometrisi
28	1.0952	0,95 – 0,95	80	-1,5	1500	Dairesel
31					1750	
34					2000	
3		0,65 – 0,75	120	0	1500	
4-6					1750	
9					2000	

Farklı kaynak dikiş geometrilerinin etkilerinin incelenmesi ve birleştirilen numunelerin nokta direnç kaynağı ile birleştirilen numuneler ile kıyaslanması aşamasında I – Tipi ve C – Tipi kaynak dikişine sahip numuneler laser ile birleştirilmiştir. Ardından aynı malzeme ve boyutlara sahip numuneler nokta direnç kaynağı ile de birleştirilmiş ve çekme dayanımları ile kaynak dikiş geometrileri incelenmiştir. Bu kapsamda Çizelge 3.6’da farklı dikiş kaynağı geometrilerine sahip numunelerin parametrelerine ve Çizelge 3.7’de nokta direnç kaynağı ile birleştirilen numunelerin parametrelerine göre birleştirme işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.6. Farklı dikiş geometrilerine sahip laser kaynaklı numunelerin parametre çizelgesi

Laser Kaynağı						
Numune No	Malzeme	Kalınlık (mm)	Hız (mm/s)	Odak Uzaklığı (mm)	Laser Gücü (W)	Spot Geometrisi
1	1.0933	1,8 – 1,8	40	0	2250	I - Tipi
2	1.0933	1,8 – 1,8	40	0	2250	C - Tipi

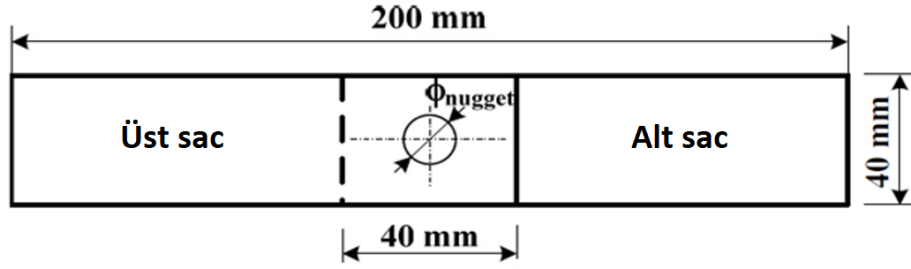
Çizelge 3.7. Direnç nokta kaynağı ile birleştirilen numunelerin parametre çizelgesi

Nokta Direnç Kaynağı						
Numune No	Malzeme	Kalınlık (mm)	Kaynak Basıncı (N)	Sıkma Zamanı (cycle)	Kaynak Akımı (kA)	Kaynak Zamanı (cycle)
3	1.0933	1,8 – 1,8	2400	25	9	17

3.7. Çekme Testi

Birleştirilen numunelerin çekme dayanımlarını tespit etmek üzere çekme deneyleri uygulanmıştır. Çekme testinde kullanılan numunelerin boyutları Şekil 3.7’de verilmiştir. Her bir kaynaklı numune için en az üç adet test yapılarak ortalaması alınmıştır. Çekme deneyleri, 100 kN’luk Shimadzu marka çekme cihazında yapılmıştır. Deneyler oda

sıcaklığında ve 5 mm/dak çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Testler DIN EN 10002 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.7. Çekme test numune ölçüleri

3.8. Mikroyapı İncelemeleri

Kaynak işlemlerinden sonra, kaynaklı numuneler, makro ve mikro yapı incelemeleri için kaynak merkezi boyunca kesiti alınacak şekilde metalografik numune kesme cihazı ile kesilmiştir (Şekil 3.8-a). Sonrasında, numune kalıplama cihazı ile enine kaynak kesitleri kalıplanarak (Şekil 3.8-b), metalografik taşlama ve parlatma cihazı ile yeterli seviyeye kadar elmas solüsyon ile parlatma işlemleri yapılmıştır parlatma cihazı ile yeterli seviyeye kadar elmas solüsyon ile parlatma işlemleri yapılmıştır (Şekil 3.8-c). Kaynak makro ve mikro yapısını ortaya çıkarmak için %4 Nital dağılayıcısı kullanılmıştır. Optik mikroskop görüntüleri polarize ışık altında Clemex görüntü analiz sistemine sahip Huvitz marka mikroskop ile alınmıştır (Şekil 3.8-d).



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.8. Malzeme karakterizasyonu çalışmalarında kullanılan cihazların görüntüsü, (a) numune kesme cihazı, (b) kalıplama cihazı, (c) taşlama ve parlatma cihazı, (d) optik mikroskop

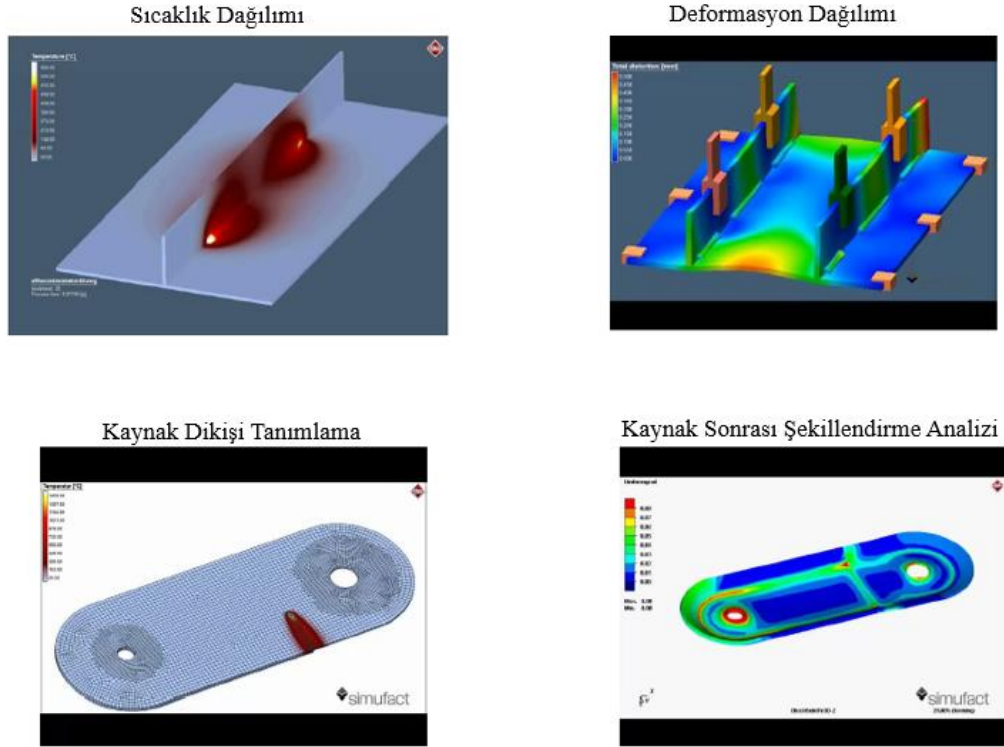
3.9. Sayısal Model

Diğer bazı birleştirme işlemlerine kıyasla, kaynak birleştirilen parçaların formu ve gerekli boşlukların kapatılması için önemlidir. Bileşen ağırlığını ve tekrarlı onarımları azaltmak için minimum kaynak kalınlığında maksimum güç aktarımına izin veren sistemlere ihtiyaç vardır. Kaynağın dezavantajları, kaynak tertibatında termal bozulma, kaynak bölgesinde yapısal değişiklikler ve kalite riskleri içerir. Kaynak hataları sadece X-ışını veya ultrasonik analiz gibi pahalı ve zaman alan yöntemler kullanılarak tespit edilebilir. Bunun üzerine proses güvenilirliği ve sağlamlığı son derece önemlidir. Bu ve benzeri birçok nedenden ötürü kaynak prosesinin uygunluğunu, proses sonrası elde edilmesi hedeflenen sonuçları kontrol etmek üzere bazı yazılımlar geliştirilmiştir.

Otomotiv sektöründe kaynaklı parçaların simülasyonu için genellikle özel yazılımlara ihtiyaç vardır. Bu çalışma kapsamında Ansys ve Simufact Welding programları kullanılarak ısı analiz gerçekleştirilmiştir. Kaynak prosesi Ansys programında modellenerek lazer kaynak prosesi esnasında uygulanan ısı girdisi sınır şartları olarak tanımlanmış ve kaynak bölgesindeki dağılım incelenmiştir.

Kaynak simülasyon yazılımları ile aşağıdaki özellikler tespit edilebilir;

- Deformasyonlar (Çarpılmalar)
- Sıcaklık dağılımı
- Artık gerilmeler
- Şekillendirmeden gelen etkiler
- Ön ısıtma
- Akma gerilmesi
- Sertlik
- Mikro yapı
- Fikstür elemanları

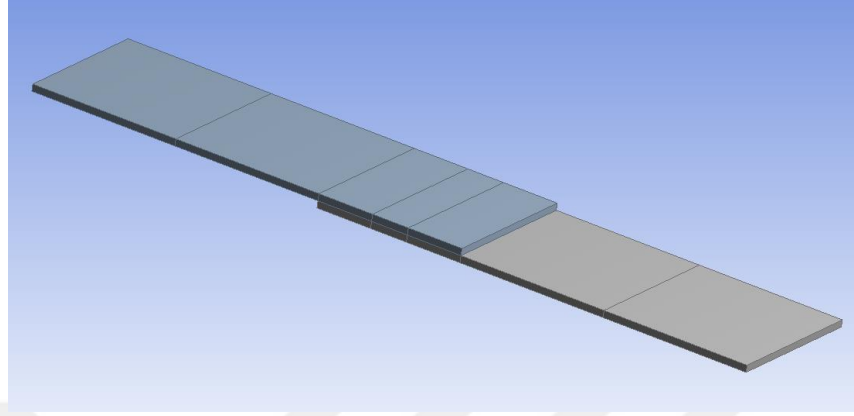


Şekil 3.9. Simufact Kaynak Simülasyon Görüntüleri

3.10. Sayısal Modelin Kurulması

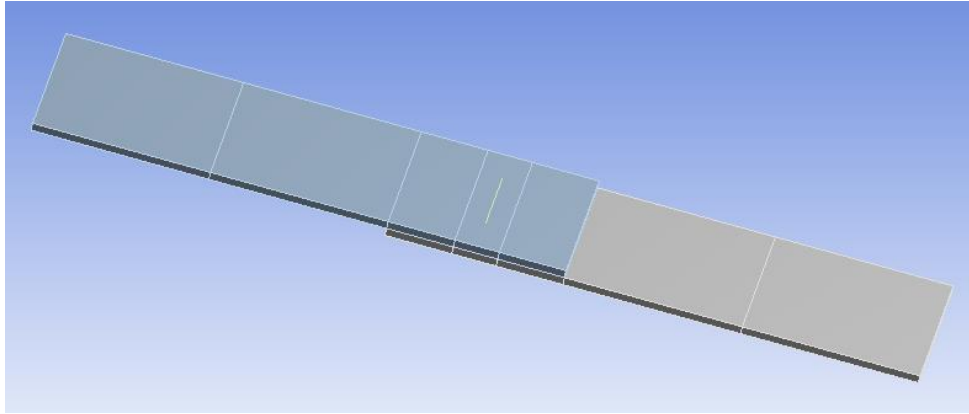
Lazer kaynak prosesinin sonlu elemanlar modeli hazırlanırken öncelikle Solidworks programında kaynaklarda kullanılan numunelerin geometrilerinde üç boyutlu çizimler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda 1,8 mm kalınlığında iki adet plakanın katı modeli

oluşturulmuştur. Oluşturulan modelde kaynak bölgesinde örtüşen tabakanın genişliği 40 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.10. Numunelerin CAD datası

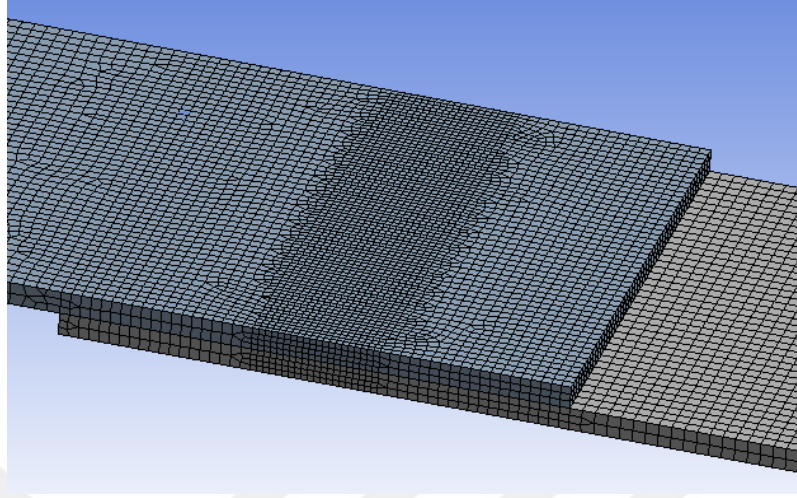
Hazırlanan CAD datasında analiz öncesinde lazer ışınının takip edeceği yol ANSYS DesignModeler yardımı ile oluşturulmuştur. I – Tipi lazer kaynak dikişi için 20 mm genişliğinde ve birleşme yüzeylerinin tam orta noktasına gelecek şekilde bir kaynak hattı tanımlanmıştır (Şekil 3.11). Malzeme olarak çelik tanımlanmıştır.



Şekil 3.11. I tipi lazer kaynak dikişi için tanımlanan kaynak hattı

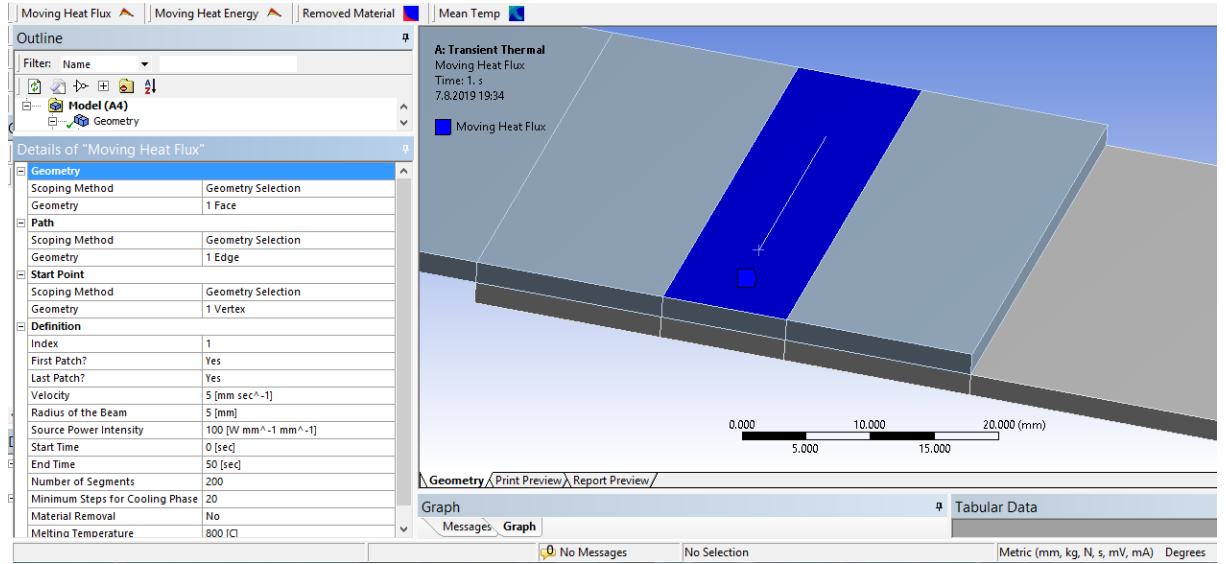
Oluşturulan CAD datasına sonlu elemanlar analizi için mesh atılmıştır. Atılan mesh iki kısımdan oluşmaktadır. Kaynak dikişinin bulunduğu alanı daha detaylı görebilmek adına mesh boyutu 0,5 mm olarak seçilmiştir. Diğer alanlar çözümün daha hızlı gerçekleşmesi adına 0,8 mm olarak nispeten daha büyük boyutlu mesh atılmıştır. Modelin genelinde

Hex-Dominant mesh yapısı tercih edilmiştir (Şekil 3.12). Oluşturulan sonlu elemanlar modelinin mesh yapısı 44717 eleman, 171407 noktadan oluşmaktadır.



Şekil 3.12. Oluşturulan modelin mesh yapısı

Sonlu elemanlar analizinde lazer ışının birleştirilecek numuneler üzerindeki etkisini incelemek adına “Moving Heat Flux” tanımlanmıştır. Bu koşulda aşağıdaki Şekil 3.13’de görülen güç yoğunluğu, hız, lazer ışınının çapı gibi parametrelerin girilmesi gerekmektedir. Analiz için gerekli şartlar dikkatlice tanımlanmıştır.



Şekil 3.13. Analiz kapsamında girilmesi gereken bilgiler

Analiz koşullarının belirlenmesinde önemli bir yeri olan güç yoğunluğunun hesaplanmasında Eşitlik (3.1) kullanılmıştır.

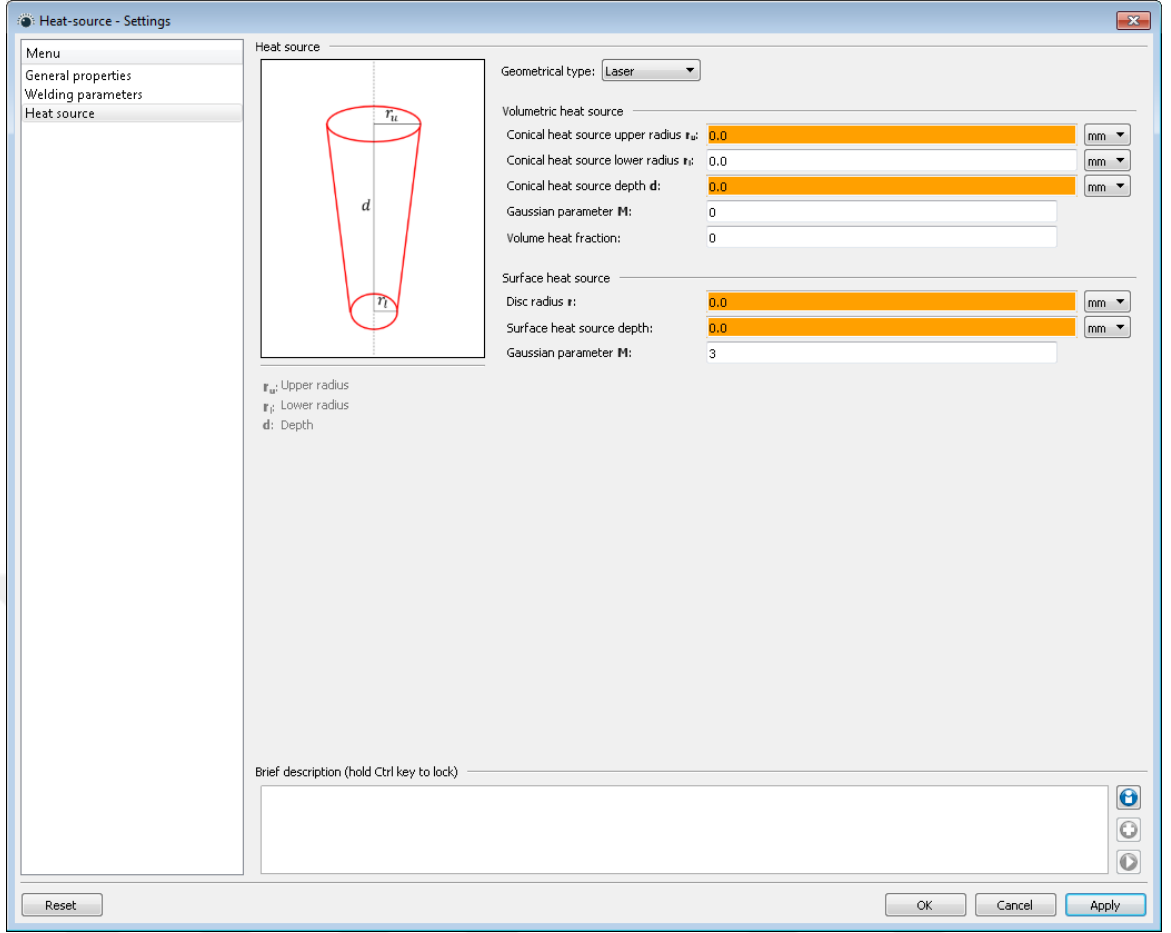
$$\text{Güç Yoğunluğu (W/mm}^2\text{)} = \text{Lazer gücü (W)} / \text{Lazer ışın alanı (mm}^2\text{)} \quad (3.1)$$

Denemelerde kullanılan lazer ışınının çapı 0,3 mm'dir. Analiz koşturulup kaynak bölgesindeki ısı dağılımları incelenmiştir. Elde edilen dağılım analiz koşulları ile eşit şartlarda kaynak edilmiş numunelerin mikro yapıları ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

Ansys ile yapılan çalışmaya ilaveten Simufact Welding yazılımı ile lazer kaynak simülasyonu oluşturulmuştur. Bu modelde belirlenen önemli parametreler aşağıdaki gibidir;

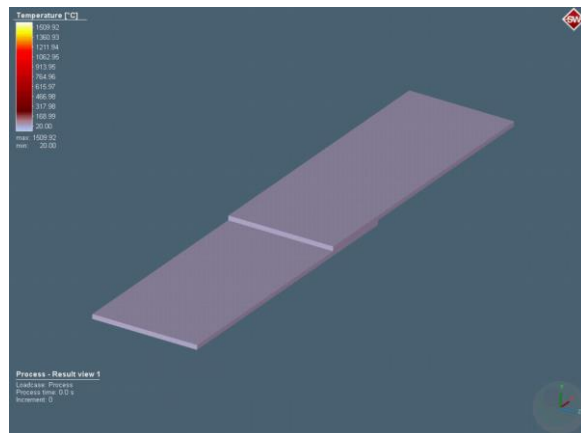
- Proses tipi: Laser beam welding
- Komponent Sayısı: 2
- Fikstür Sayısı: 1
- Robot Sayısı: 1

Simufact kaynak analiz programı ile analiz yapılmadan önce bazı verilerin girilmesi gerekmektedir. Öncelikle kaynak ile birleştirilecek malzemeler seçilmiştir, malzemenin faz değerleri yüzdelik olarak belirtilmiştir. Sabitlenmiş komponent fixed geometry olarak belirlenmiştir ve kaynak yolları tanımlanmıştır. Şekil 3.14'te görüldüğü üzere heat source bölümünden lazer ışın çapı ve derinliği ile lazer gücü ve lazer hızı bilgileri tanımlanmıştır. Bu parametreler ile gaussian ısı yayılım profili altında ışının belli bir alanda uyguladığı birim enerji yoğunluğunun dağılımı hesaplanabilmektedir. Proses parametreleri bölümünden yapılacak kaynak prosesine ilişkin parametreler olan; hız, spot çapı, lazer gücü parametreleri girilir ve analiz başlatılır.



Şekil 3.14. Simufact Welding yazılımında Laser ışın çapı, laser derinliği, laser gücü ve laser hızı bilgilerinin oluşturulması

Şekil 3.15'te verilen kaynak simülasyonu görüntüsünde görüldüğü üzere kaynak esnasında oluşan sıcaklık dağılımı elde edilebilmektedir.

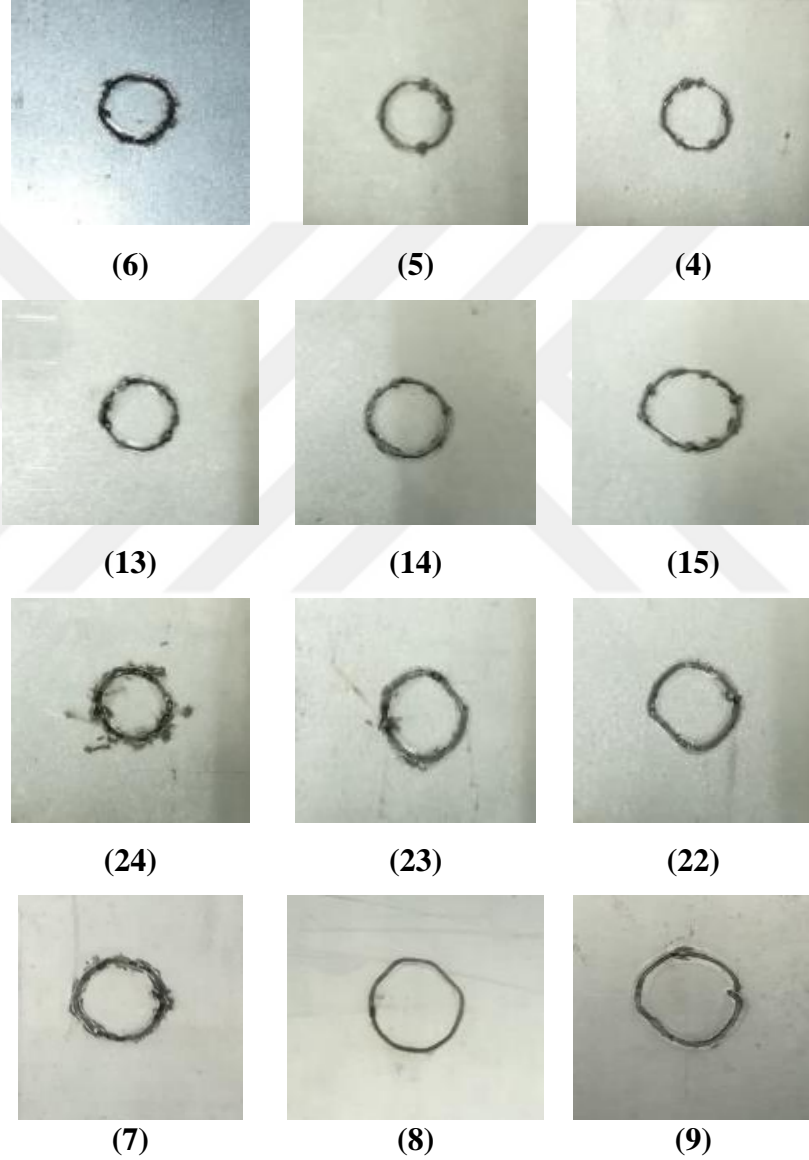


Şekil 3.15. Simufact Welding kaynak simülasyonu

4. BULGULAR

4.1. Kaynak Hızının Etkisi

Kaynak hızının bağlantının mekanik dayanımı üzerindeki etkisini incelemek adına, sabit laser gücünde ve odak mesafesinde farklı kaynak hızları ile birleştirilen numunelerin görüntüleri Şekil 4.1’de verilmiştir.



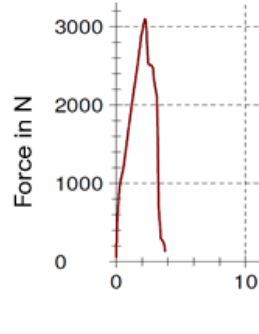
Şekil 4.1. Sabit laser gücünde ve odak mesafesinde farklı kaynak hızları ile birleştirilen numunelerin görüntüleri

Birleştirilen numuneler DIN EN 10002 standardına uygun olarak çekme testlerine tabi tutulmuşlardır. Elde edilen çekme dayanımları Çizelge 4.1’de verilmiştir. Numunelerden

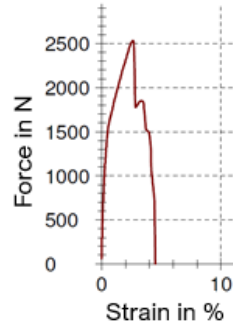
çekme testi sonucunda elde edilen eğrilerinden örnekler ise Şekil 4.2’de verilmiştir. Elde edilen grafikler incelendiğinde kaynak hızının azalması ile dayanımın düştüğü görülmüştür. Bunun en temel nedeni ise artan hız neticesinde kaynak penetrasyonu için gerekli olan süre sağlanamamasıdır.

Çizelge 4.1. Sabit laser gücünde ve odak mesafesinde farklı kaynak hızları ile birleştirilen numunelerin çekme dayanımları

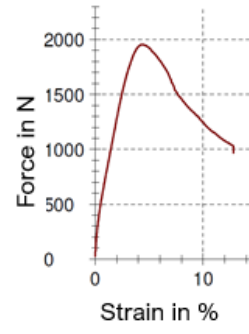
Numune No	Malzeme	Kalınlık (mm)	Laser Gücü (W)	Odak Uzaklığı (mm)	Hız (mm/s)	Spot Geometrisi	Çekme Kuvveti (N)
6	1.0952	0,75 – 0,65	1750	0	80	Dairesel	1955
5					100		2531
4					120		3097
13				+3	80		2295
14					100		1490
15					120		1106
24				-3	80		3149
23					100		856
22					120		712
7		0,95 – 0,95	2000	0	80		1033
8					100		2038
9					120		5326



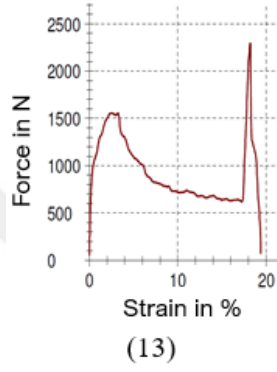
(6)



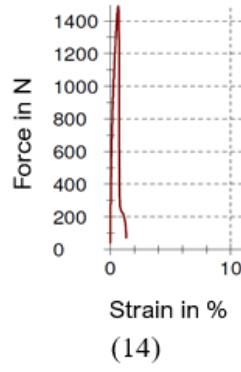
(5)



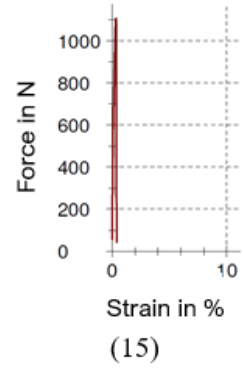
(4)



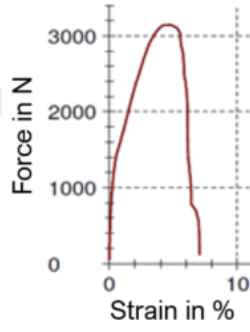
(13)



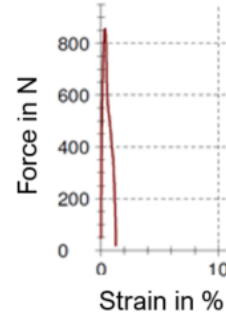
(14)



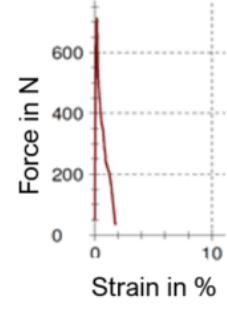
(15)



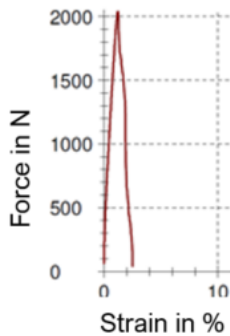
(24)



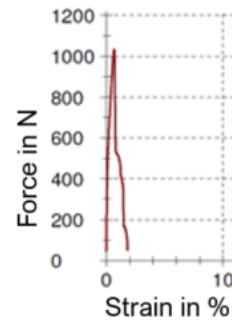
(23)



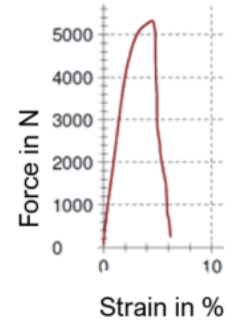
(22)



(7)



(8)



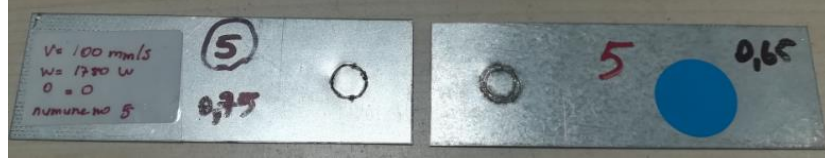
(9)

Şekil 4.2. Sabit laser gücünde ve odak mesafesinde farklı kaynak hızları ile birleştirilen numunelerin çekme testi sonucunda elde edilen eğrileri

Çekme testi sonucunda kopan numunelerin görüntüleri Şekil 4.3'te verilmiştir.



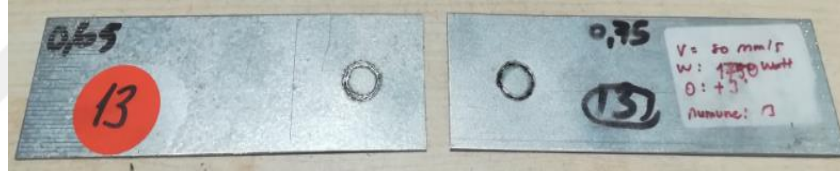
(6)



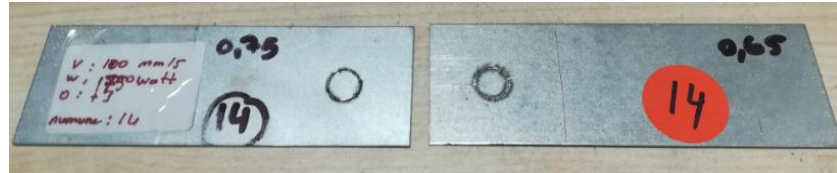
(5)



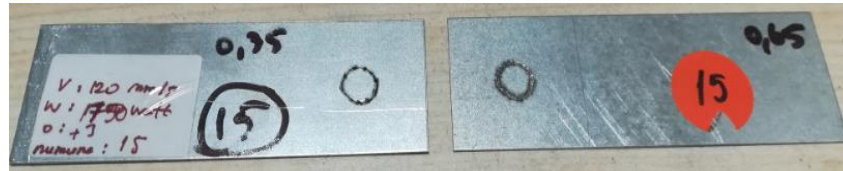
(4)



(13)



(14)



(15)

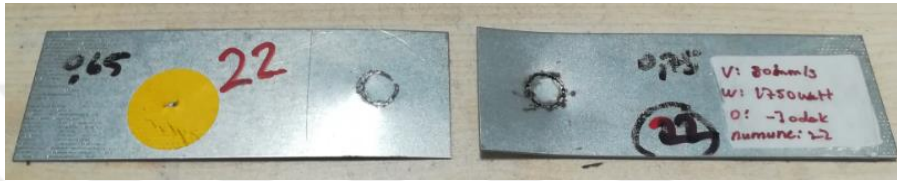
Şekil 4.3. Sabit laser gücünde ve odak mesafesinde farklı kaynak hızları ile birleştirilen numunelerin çekme testi sonucunda hasarlı görüntüleri



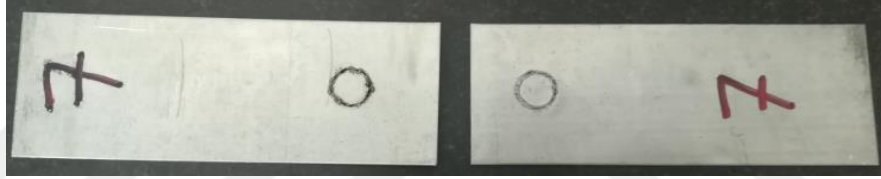
(24)



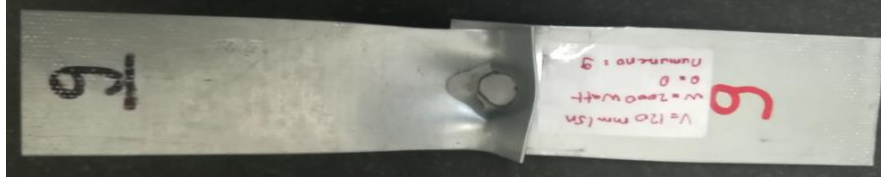
(23)



(22)



(7)



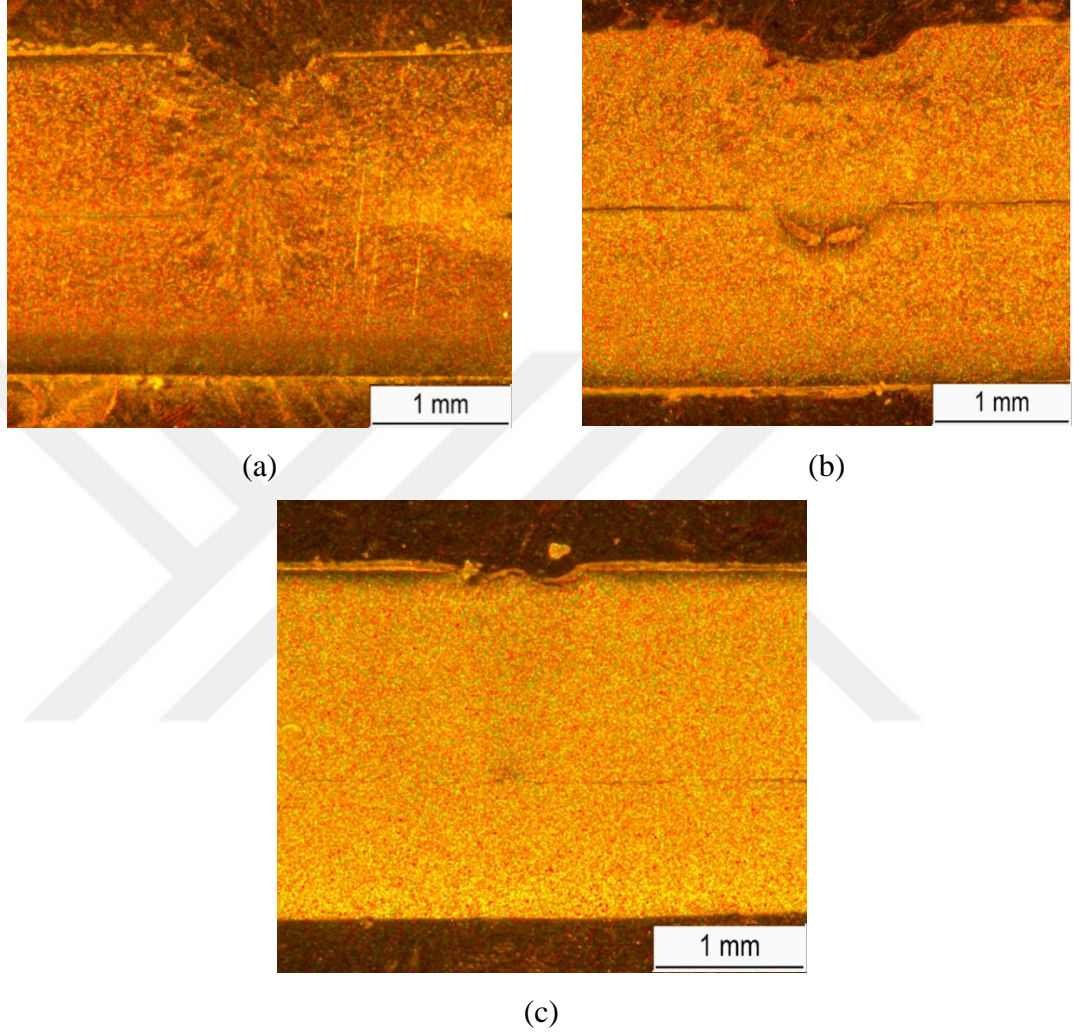
(9)

Şekil 4.3. Sabit laser gücünde ve odak mesafesinde farklı kaynak hızları ile birleştirilen numunelerin çekme testi sonucunda hasarlı görüntüleri (devam)

Sabit laser gücü ve odak mesafesinde farklı ilerleme hızlarında birleştirilen parçaların makro yapı özellikleri ve geometrileri üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Bu doğrultuda 2000 W laser gücünde, 0 mm odak mesafesinde 80 mm/s, 100 mm/s ve 120 mm/s hızlarında kaynaklar yapılmıştır. Elde edilen mikroskop görüntüleri Şekil 4.4'te verilmiştir.

Şekil 4.4'ten de görüldüğü gibi artan hızlar birleştirilen parçalardaki nüfuziyetin düşmesine neden olmuştur. En yüksek hızda yapılan kaynaklı numune en düşük

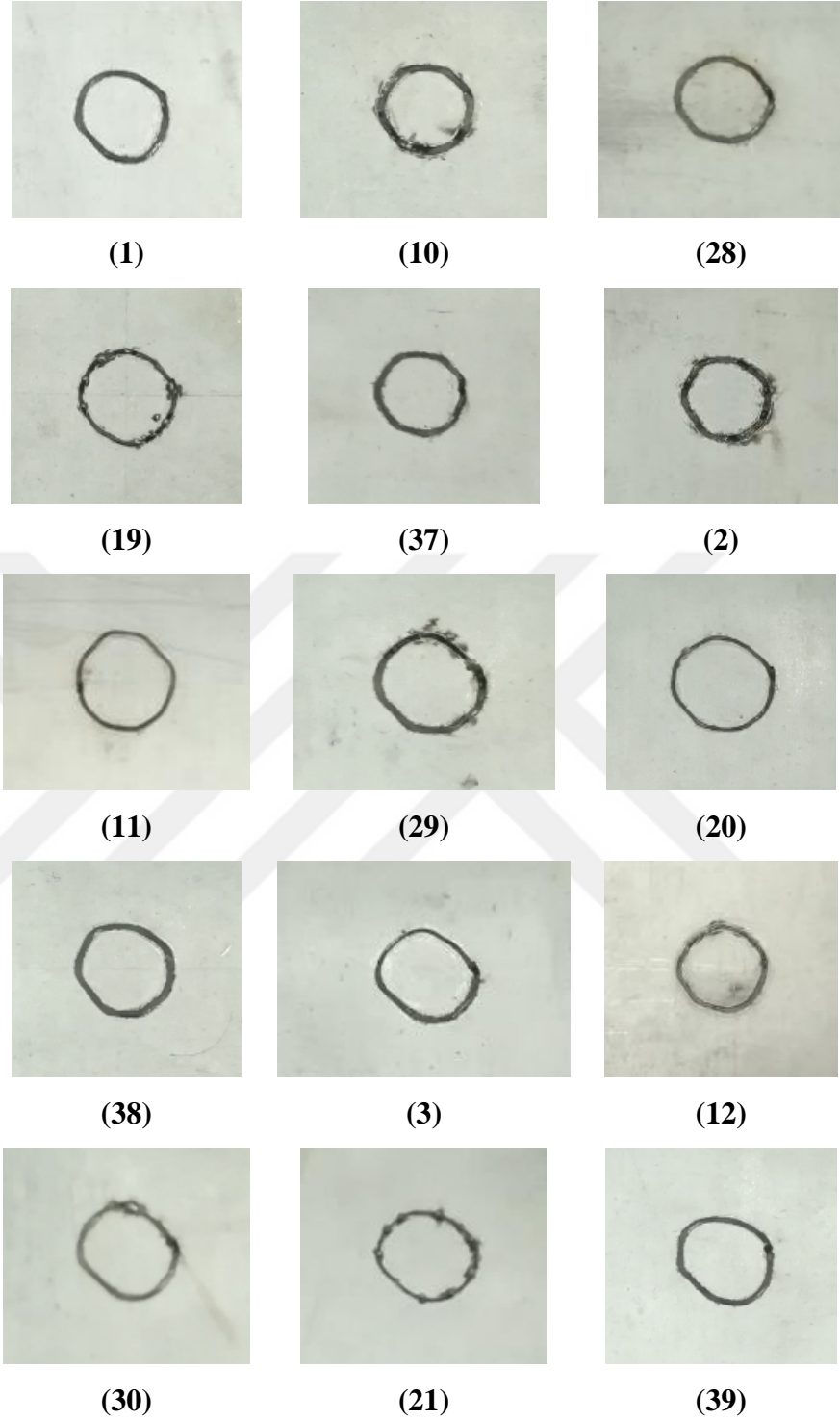
penetrasyon, en düşük hızda kaynak yapılan numune de ise en yüksek penetrasyon elde edilmiştir. Bu penetrasyon farklılığı çekme testinde elde edilen çekme kuvvetlerini de değiştirmiştir. En yüksek çekme dayanımı en düşük hızda kaynak yapılan numunede elde edilmiştir.



Şekil 4.4. Sabit laser gücü ve odak mesafesinde numunelerin kaynak kesit görüntüleri
(a) 80 mm/s, (b) 100 mm/s ve (c) 120 mm/s

4.2. Odak Mesafesinin Etkisi

Odak mesafesinin bağlantının mekanik dayanımı üzerindeki etkisini incelemek adına, sabit laser gücünde ve kaynak hızında, farklı odak mesafelerinde birleştirilen numunelerin görüntüleri Şekil 4.5'te verilmiştir.

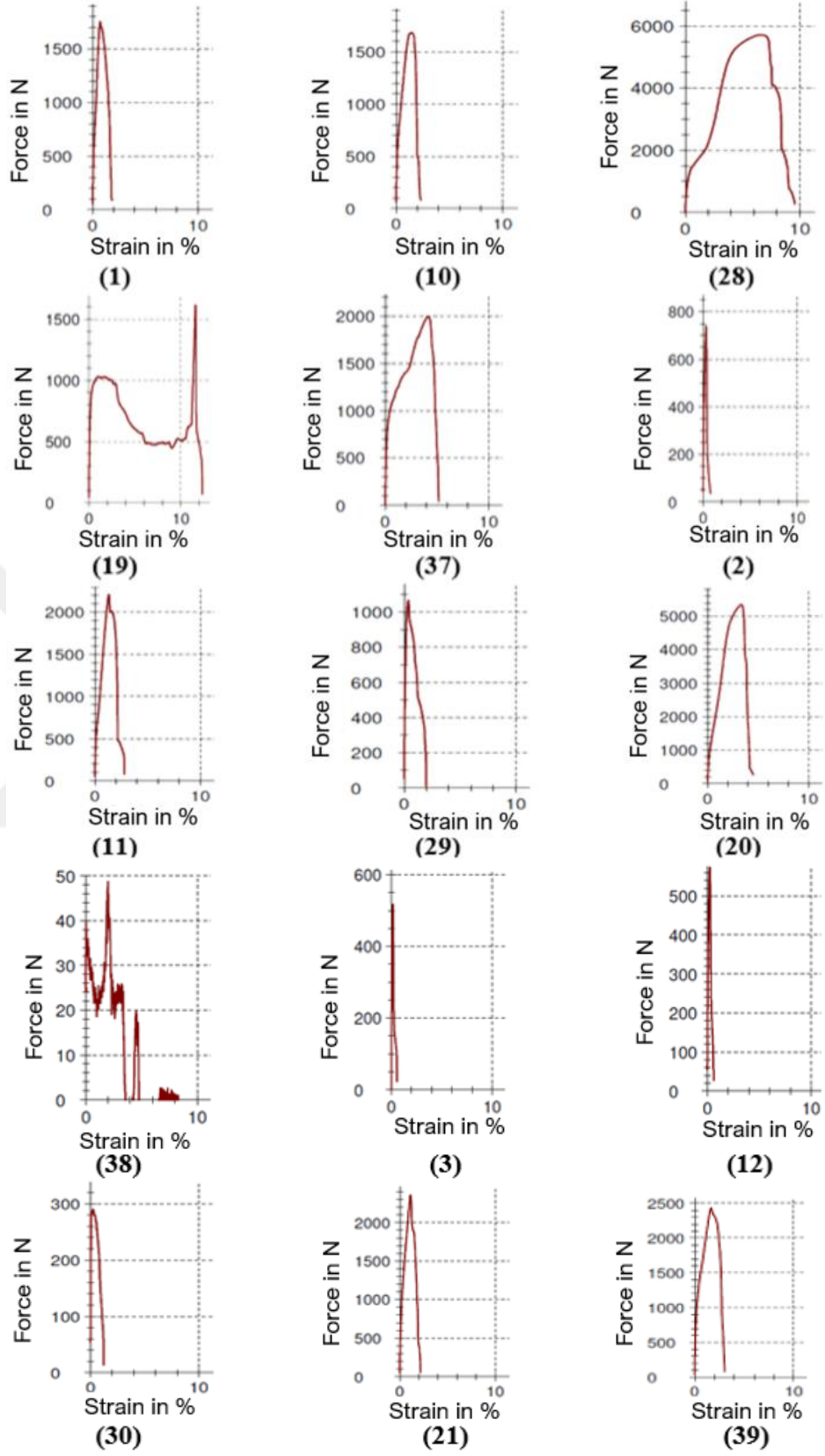


Şekil 4.5. Sabit laser gücünde ve kaynak hızında farklı odak mesafelerinde birleştirilen numunelerin görüntüleri

Birleştirilen numuneler DIN EN 10002 standardına uygun olarak çekme testlerine tabi tutulmuşlardır. Elde edilen çekme dayanımları Çizelge 4.2’de verilmiştir. Numunelerden çekme testi sonucunda elde edilen eğrilerinden örnekler ise Şekil 4.6’da verilmiştir.

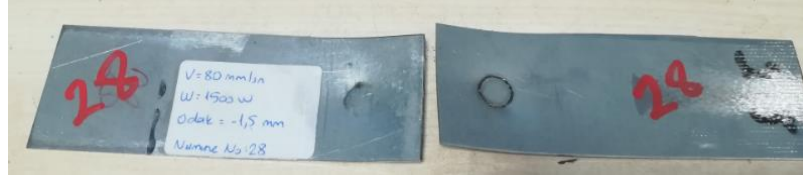
Çizelge 4.2. Sabit laser gücünde ve kaynak hızında farklı odak mesafelerinde birleştirilen numunelerin çekme dayanımları

Numune No	Malzeme	Kalınlık (mm)	Laser Gücü (W)	Hız (mm/s)	Odak Uzaklığı (mm)	Spot Geometrisi	Çekme Kuvveti (N)
1	1.0952	0,95 – 0,95	1500	80	0	Dairesel	1754
10					+1,5		1685
28					-1,5		5712
19					+3		1614
37					-3		1994
2			1500	100	0		740
11					+1,5		2213
29					-1,5		1067
20					+3		5343
38					-3		48
3			1500	120	0		518
12					+1,5		574
30					-1,5		290
21					+3		2359
39					-3		2433

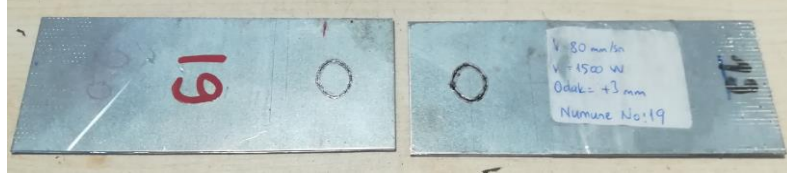


Şekil 4.6. Sabit laser gücü ve kaynak hızında farklı odak mesafelerinde birleştirilen numunelerin çekme testi sonucunda elde edilen eğrileri

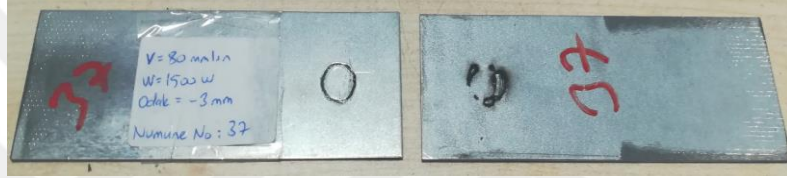
Çekme testi sonucunda kopan numunelerin görüntüleri Şekil 4.7’de verilmiştir.



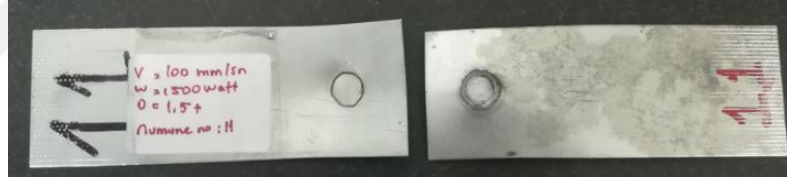
(28)



(19)



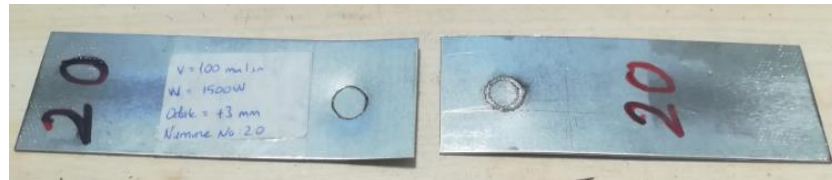
(37)



(11)

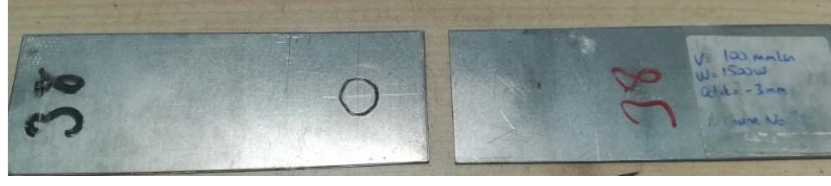


(29)

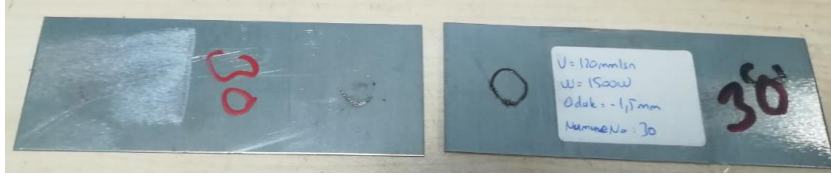


(20)

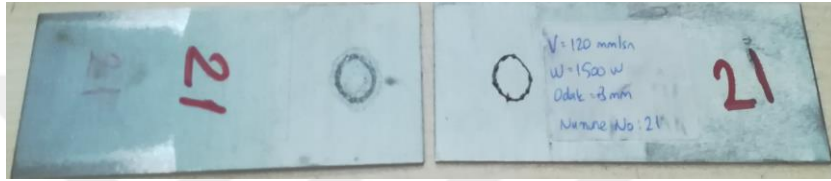
Şekil 4.7. Sabit laser gücü ve kaynak hızında farklı odak mesafelerinde birleştirilen numunelerin çekme testi sonucunda elde edilen hasarlı görüntüleri



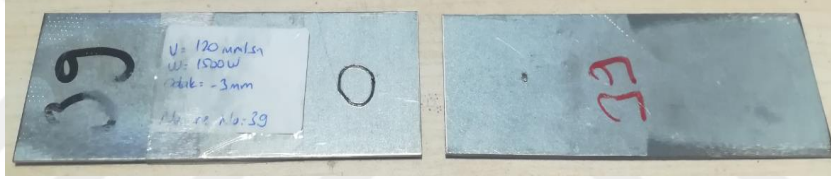
(38)



(30)



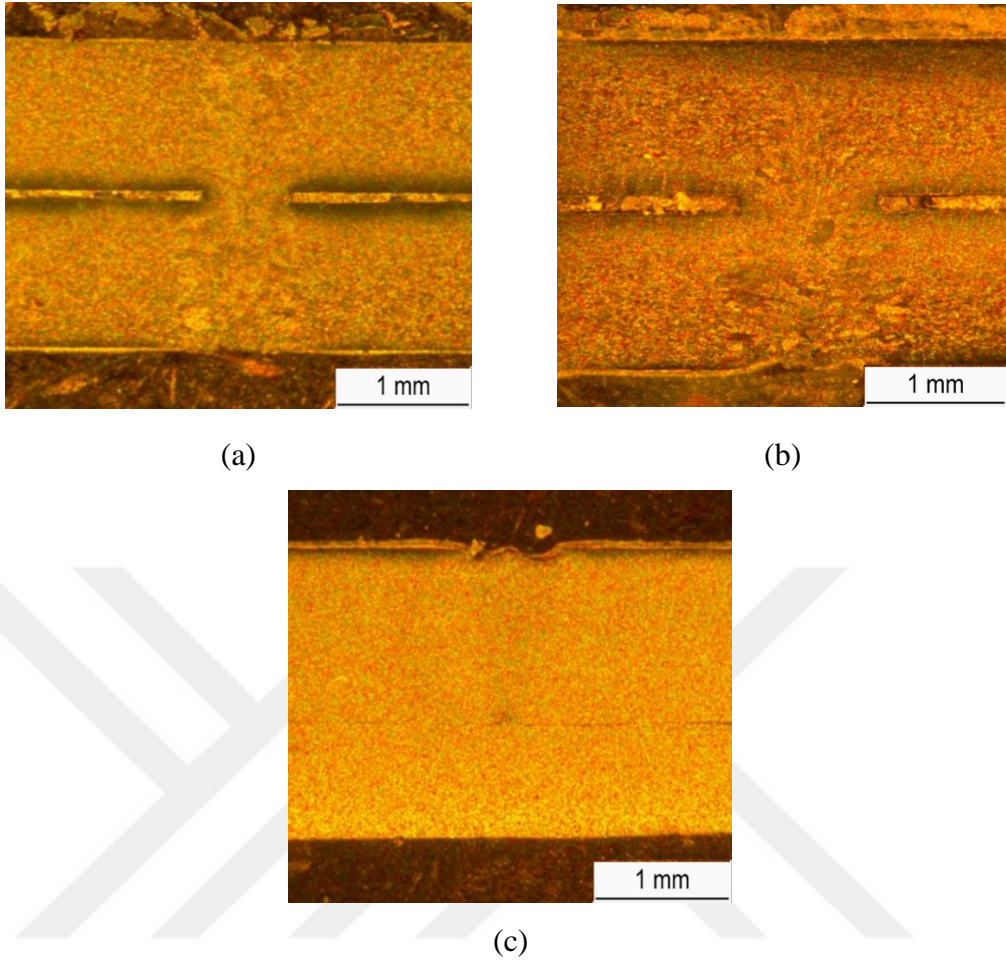
(21)



(39)

Şekil 4.7. Sabit laser gücü ve kaynak hızında farklı odak mesafelerinde birleştirilen numunelerin çekme testi sonucunda elde edilen hasarlı görüntüleri (devam)

Sabit laser gücü ve ilerleme hızlarında odak mesafesindeki değişimin kaynaklı parçaların makro yapı özellikleri ve geometrileri üzerindeki etkisi de çalışma kapsamında incelenmiştir. Bu doğrultuda 1750 W laser gücünde, 80 mm/s ilerleme hızında -3 mm, -1,5 mm ve +3 mm olmak üzere üç farklı odak uzaklığında kaynaklar yapılmıştır. Elde edilen mikroyapı görüntüleri Şekil 4.8’de verilmiştir.

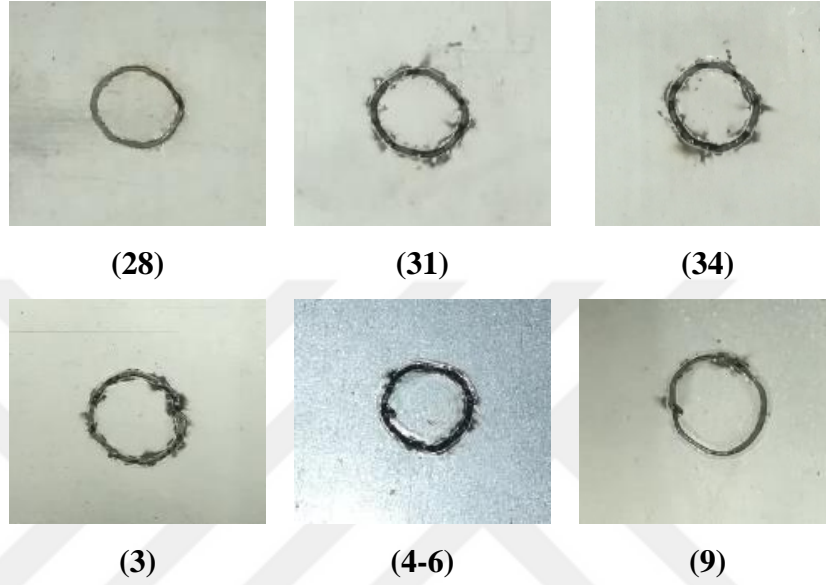


Şekil 4.8. Sabit kaynak hızı ve laser gücünde odak mesafesinin kaynak kesit görüntüsüne etkisi (a) -3 mm, (b) -1,5 mm ve (c) +3 mm

Şekil 4.8'den de görüldüğü gibi odak mesafesinin değişimi kaynaklı parçaların kesit görüntüsünü değiştirmiştir. Elde edilen sonuca göre laser ışınının odağı parçanın alt yüzeyine doğru girdiği durumda (- 3 mm) kaynak dikişinin penetrasyon artmıştır. -1,5 mm odak mesafesinde ise penetrasyonun nispeten azaldığı görülmüştür. Işının odağı parçaların yüzeyinden yukarı taşındığında ise nüfuziyet problemleri yaşandığı görülmüştür. Bu numunelere uygulanan çekme testi sonucunda da en yüksek dayanımın 3250 N ile -1,5 mm odak mesafesinde kaynak yapılan numunede olduğu görülmüştür. En düşük çekme kuvveti ise nüfuziyetin en az olduğu 3 mm odak mesafesinde yapılan kaynakta 263 N olarak görülmüştür.

4.3. Laser Gücünün Etkisi

Laser gücünün bağlantının mekanik dayanımı üzerindeki etkisini incelemek adına, sabit kaynak hızında ve odak mesafesinde, farklı laser güçlerinde birleştirilen numunelerin görüntüleri Şekil 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4.9. Sabit kaynak hızında ve odak mesafesinde, farklı laser güçlerinde birleştirilen numunelerin görüntüleri

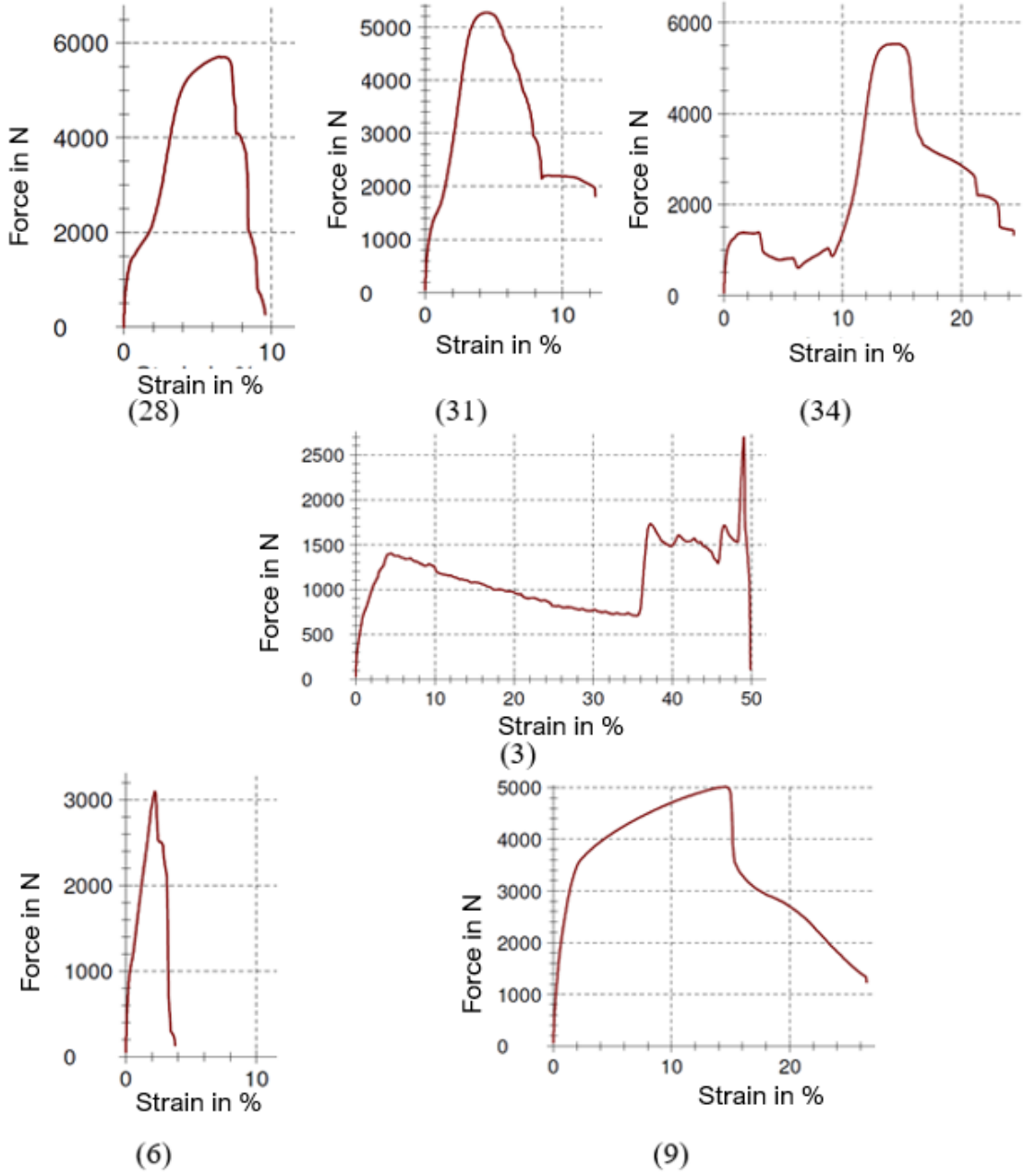
Birleştirilen numuneler DIN EN 10002 standardına uygun olarak çekme testlerine tabi tutulmuşlardır. Elde edilen çekme dayanımları Çizelge 4.3’te verilmiştir. Numunelerden çekme testi sonucunda elde edilen eğrilerinden örnekler ise Şekil 4.10’da verilmiştir.

Çizelge 4.3. Sabit kaynak hızında ve odak mesafesinde, farklı laser güçlerinde birleştirilen numunelerin çekme dayanımları

Numune No	Malzeme	Kalınlık (mm)	Hız (mm/s)	Odak Uzaklığı (mm)	Laser Gücü (W)	Spot Geometrisi	Çekme Kuvveti (N)
28	1.0952	0,95 – 0,95	80	-1,5	1500	Dairesel	5712
31					1750		5275
34					2000		5533

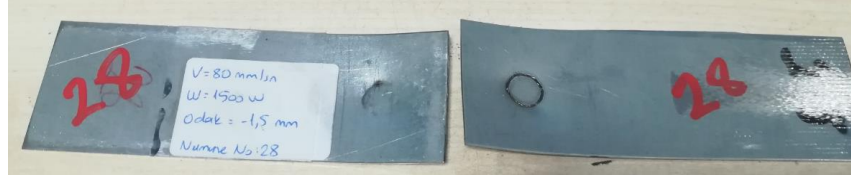
Çizelge 4.3. Sabit kaynak hızında ve odak mesafesinde, farklı laser güçlerinde birleştirilen numunelerin çekme dayanımları (devam)

3					1500		2703
4-6		0,75 – 0,65	120	0	1750		1955- 3097
9					2000		5013



Şekil 4.10. Sabit kaynak hızında ve odak mesafesinde, farklı laser güçlerinde birleştirilen numunelerin çekme testi sonucunda elde edilen eğrileri

Çekme testi sonucunda kopan numunelerin görüntüleri Şekil 4.11’de verilmiştir.



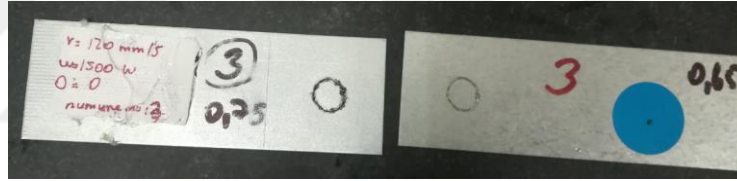
(28)



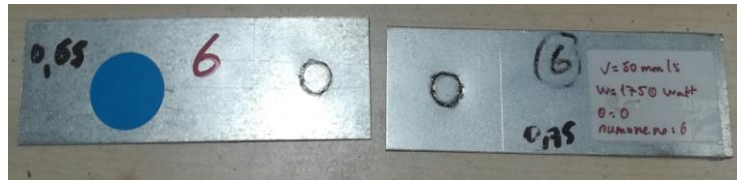
(31)



(34)



(3)



(6)

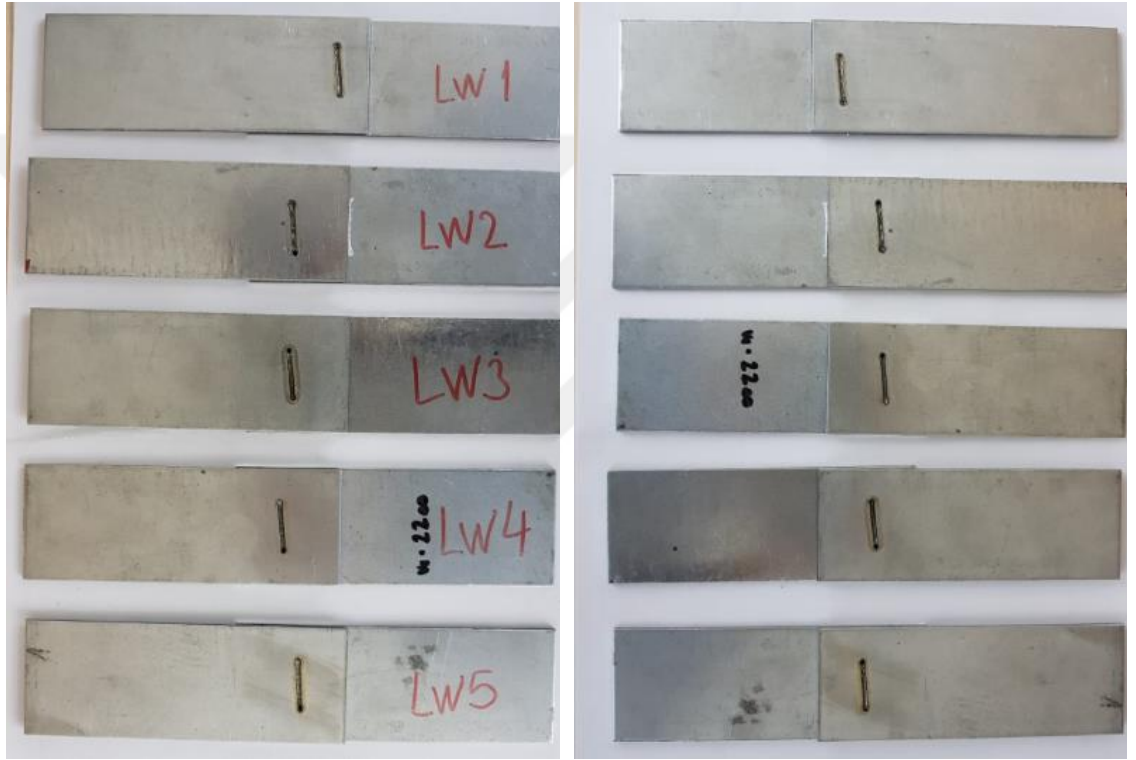


(9)

Şekil 4.11. Sabit laser gücünde ve odak mesafesinde farklı kaynak hızları ile birleştirilen numunelerin çekme testi sonucunda hasarlı görüntüleri

4.4. Kaynak Dikiş Geometrisinin Etkisi ve Nokta Direnç Kaynağı ile Kıyaslanması

Laser kaynak ile nokta direnç kaynağının karşılaştırılması amacı ile farklı kaynak geometrilerine sahip laser kaynakları ile nokta direnç kaynağı ile birleştirilmiş numuneler incelenmiştir. Bu amaçla C – Tipi ve I – Tipi kaynak geometrisine sahip laser kaynaklar yapılmıştır. Bu kapsamda 1,8 mm kalınlığındaki HX340LAD malzemesi bindirme kaynağı formatında birleştirilmiştir. Birleştirilen numunelere ait görüntüler Şekil 4.12’de verilmiştir.

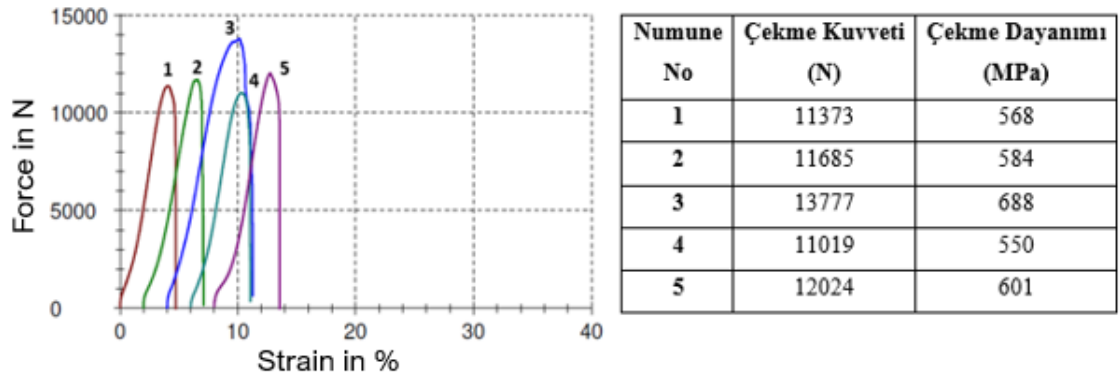


Üst yüzey

Alt yüzey

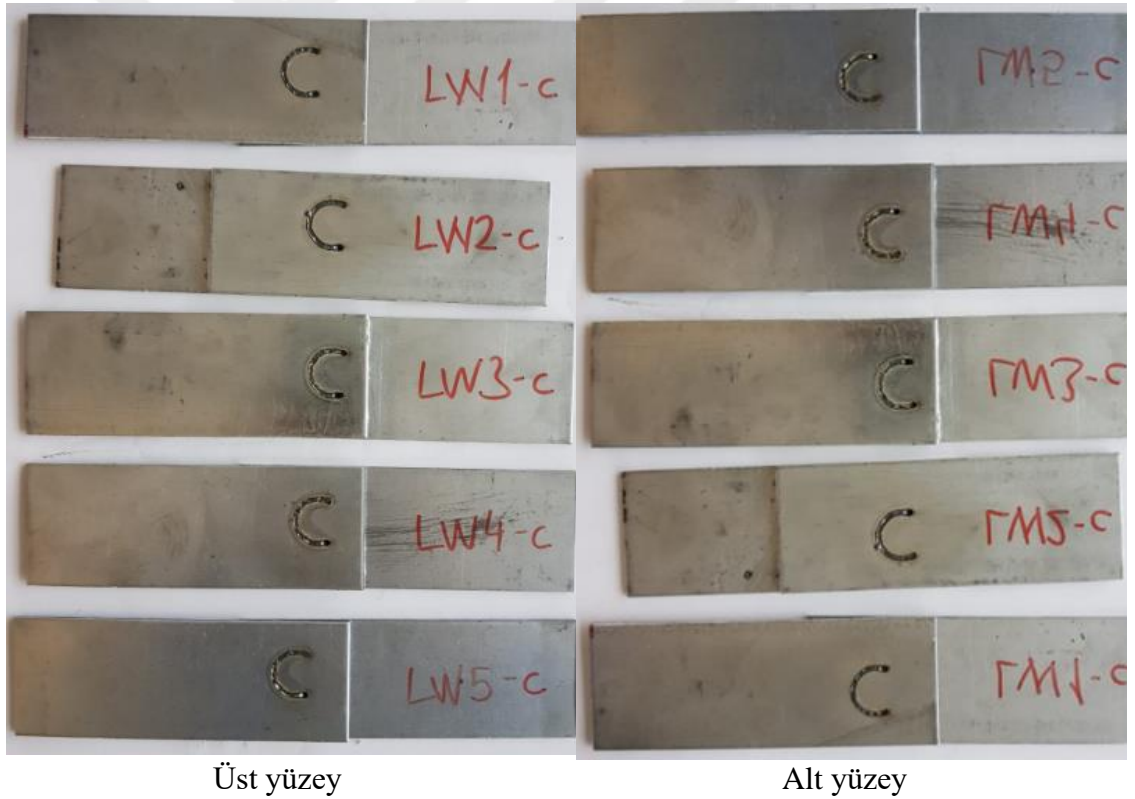
Şekil 4.12. I – Tipi kaynak dikişine sahip laser kaynaklı numunelerin ön ve arka yüzey görüntüleri

Birleştirilen numuneler dayanımlarını incelemek adına çekme testlerine tabi tutulmuşlardır. Şekil 4.13’te çekme testi sonucunda elde edilen eğriler verilmiştir.



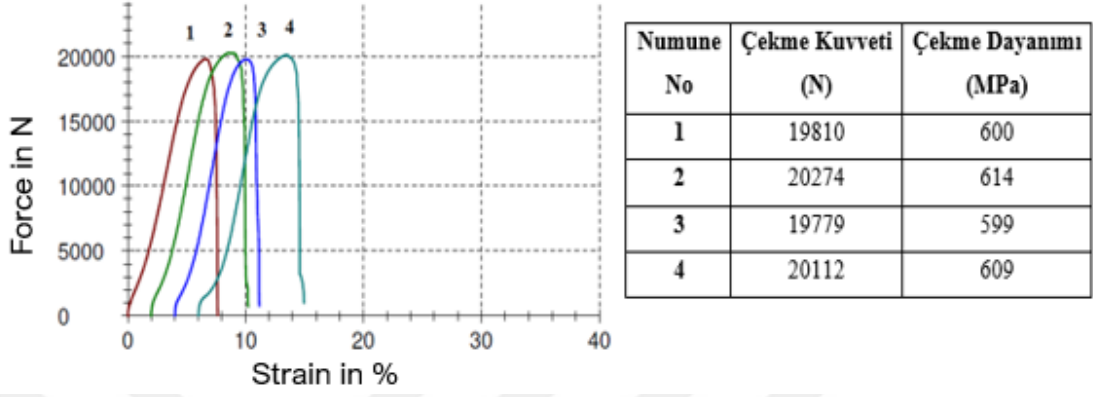
Şekil 4.13. I – Tipi kaynak dikişine sahip laser kaynaklı numunelerin çekme testi sonucu elde edilen grafikleri

Farklı kaynak dikiş geometrilerinin etkilerini incelemek adına C –Tipi kaynak dikişi ile de numuneler birleştirilmiştir (Şekil 4.14).



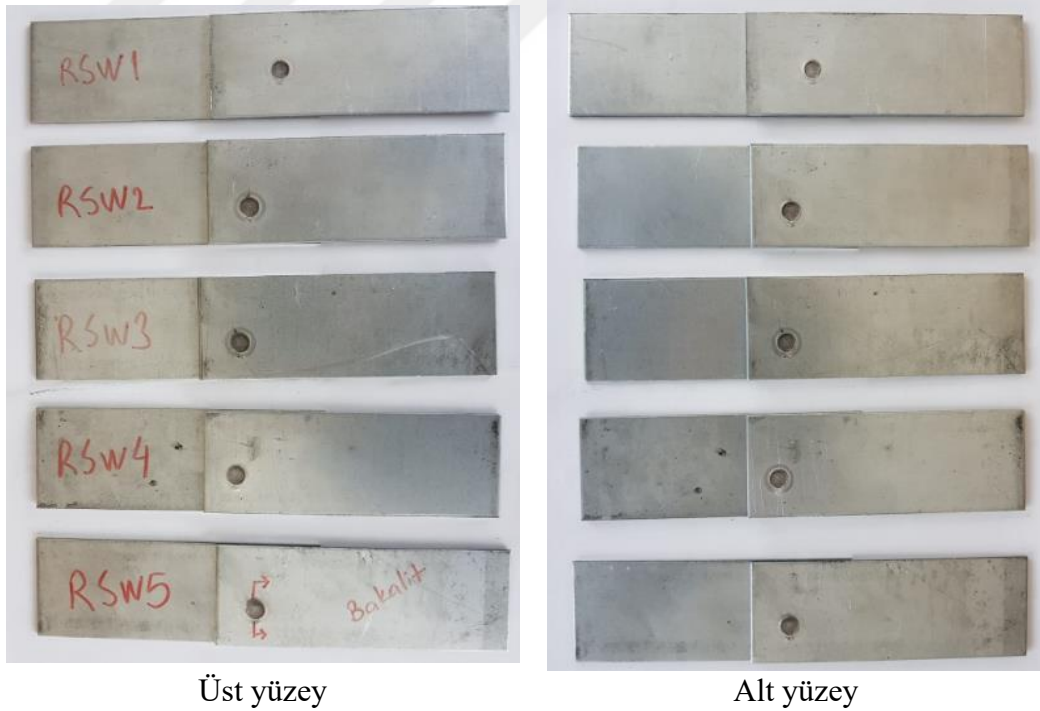
Şekil 4.14. C – Tipi kaynak dikişine sahip laser kaynaklı numunelerin ön ve arka yüzey görüntüleri

C – Tipi kaynak dikişine sahip numunelerinde çekme testleri gerçekleştirilmiş ve çekme dayanımları kaynak dikiş alanına bağlı olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.15'te çekme testi sonucunda elde edilen eğriler verilmiştir.



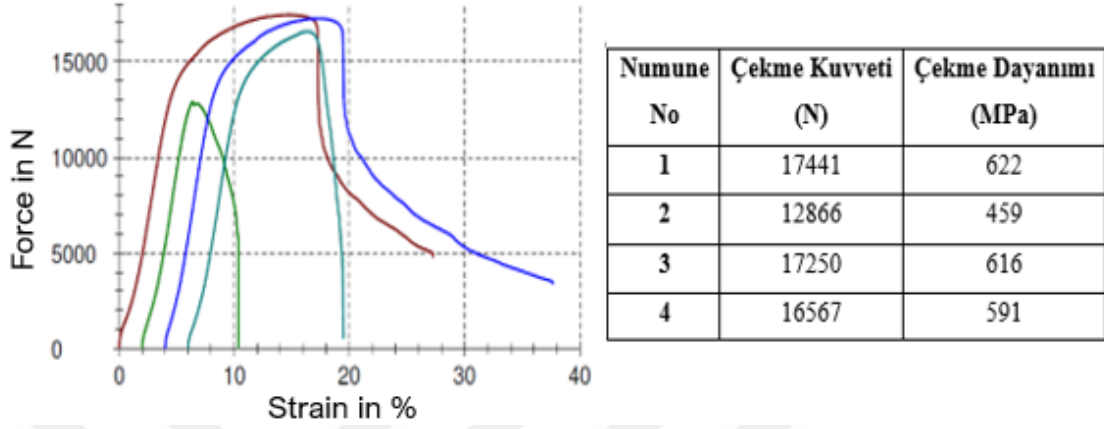
Şekil 4.15. C – Tipi kaynak dikişine sahip laser kaynaklı numunelerin çekme testi sonucu elde edilen eğrileri

Laser nokta kaynağı ile kıyaslayabilmek adına aynı malzeme türleri nokta direnç kaynağı ile de birleştirilmiştir. Birleştirilen numunelerin görüntüleri Şekil 4.16'da verilmiştir.



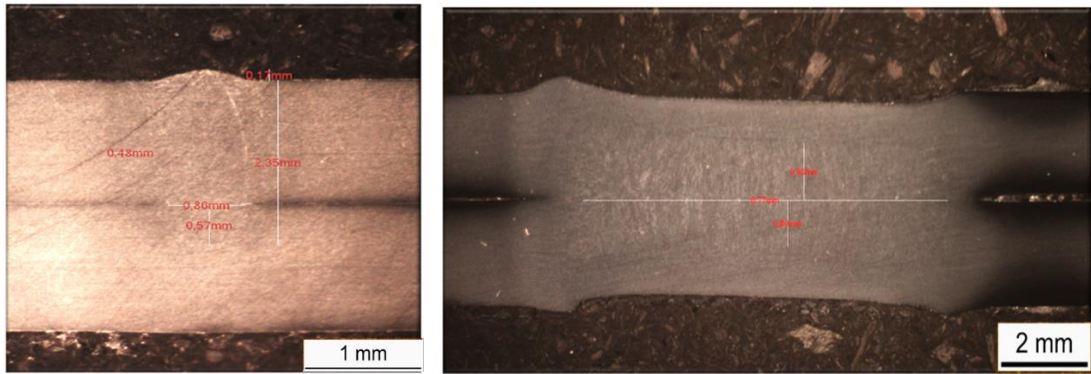
Şekil 4.16. Nokta direnç kaynağı ile birleştirilen numunelerin ön ve arka yüzey görüntüleri

Nokta direnç kaynağı ile birleştirilen numunelerin dayanımlarını görmek adına çekme testleri uygulanmış ve çekme dayanımları kaynak dikiş alanına bağlı olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.17’de çekme testi sonucunda elde edilen eğriler verilmiştir.



Şekil 4.17. I – Tipi kaynak dikişine sahip laser kaynaklı numunelerin çekme testi sonucu elde edilen eğrileri

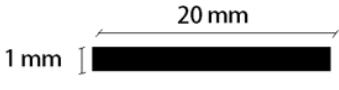
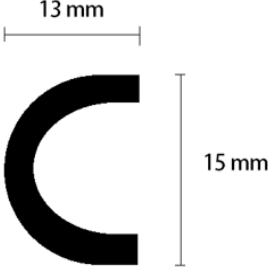

Numunelerin mekanik dayanımları ile ilişkilendirmek adına kaynak dikişlerinin kesit görüntüleri optik mikroskop yardımı ile incelenmiştir. Şekil 4.18’de laser kaynağı ve direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin kaynak dikişlerinin kesit görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.18. Laser kaynaklı ve nokta direnç kaynaklı numunelerin kaynak dikişlerinin kesit görüntüleri

Laser kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin kaynak dikiş genişliklerinin nokta direnç kaynağı ile kıyaslanamayacak ölçüde dar olduğu görülmüştür. Ayrıca, ısı etkisi altında kalan bölgelerinde laser kaynağında daha sınırlı kaldığı ortaya çıkmıştır.

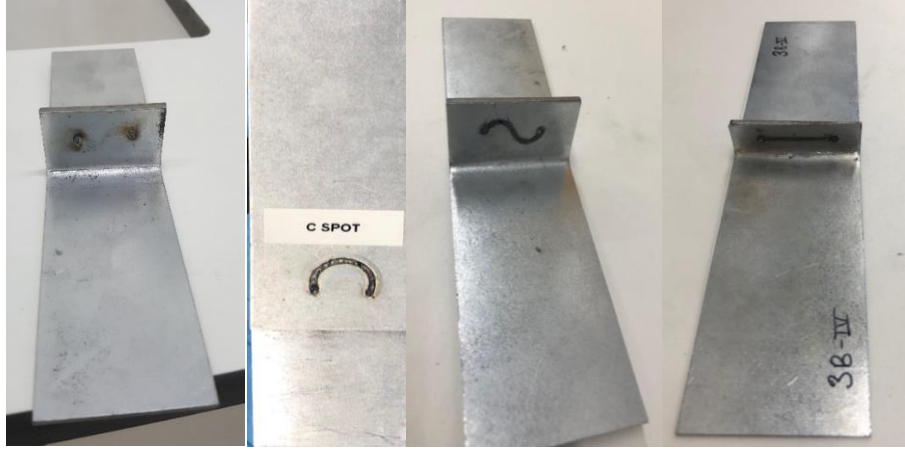
Yapılan çalışma sonucunda birim alana gelen yüke bağlı olarak I – Tipi, C – Tipi ve nokta direnç kaynağı ile birleştirilmiş numuneler kıyaslanmıştır. Elde edilen çekme dayanımları Şekil 4.19’da verilmiştir.

Birleştirme Tipi	Dikiş Tipi	Boyutları	Dikiş Alanı (mm ²)	Ort. Çekme Dayanımı (MPa)
Laser Kaynağı	I – Tipi		20	598
Laser Kaynağı	C – Tipi		33	605
Nokta Direnç Kaynağı	Punta		28	572

Şekil 4.19. I – Tipi, C – Tipi ve direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin çekme dayanımları

4.5. Laser Nokta Kaynağı ile Nokta Direnç Kaynağı Sertlik Test Sonuçları

Lazer I – tipi kaynaklı numune ile direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş numunelerde sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçümlerde her iki numunenin de ısı etkisi altında kalan bölgelerinde ortalama sertliğin benzer olduğu görülmüştür. Kaynak bölgesinde yapılan ölçümlerde de yine her iki kaynak metodunda da ortalama sertlik değerlerinin birbirlerine çok yakın çıktığı görülmüştür. Ancak, kaynak dikiş geometrisinin oldukça fazla olması nedeni ile nokta direnç kaynağı dezavantajlı haldedir.

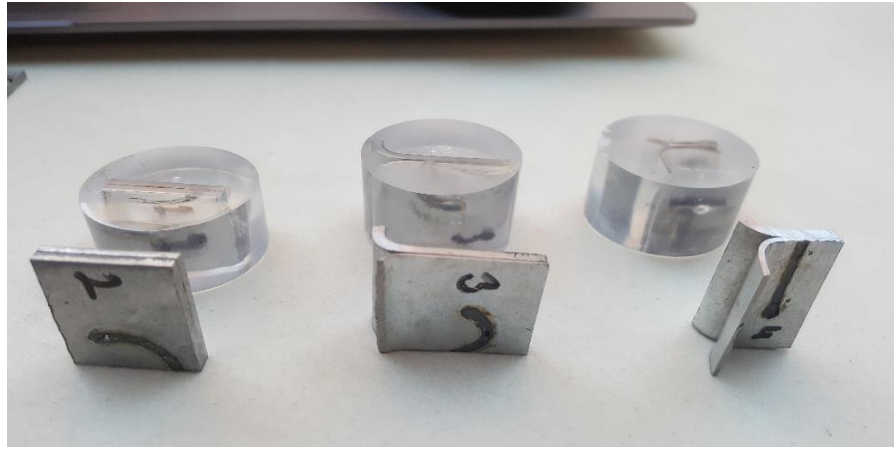


Şekil 4.20. Farklı geometrilerde laser kaynağı denemeleri

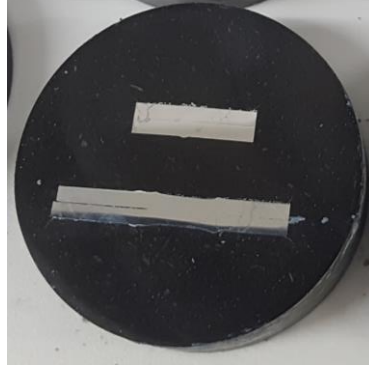
Şekil 4.20, Şekil 4.21, Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'te görselleri paylaşılan numunelerin çekme dayanımı ve sertlik testi sonuçları Şekil 4.19 ve Çizelge 4.4'te verilmiştir.



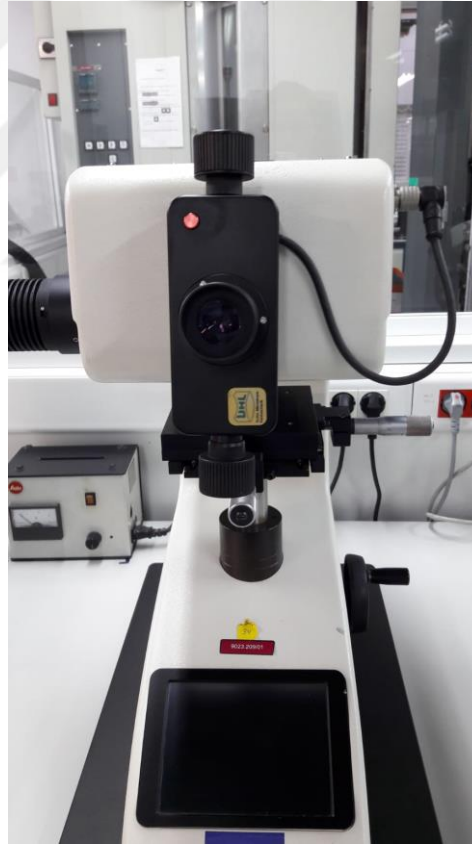
Şekil 4.21. Farklı geometrilerde laser kaynağı denemeleri



Şekil 4.22. Farklı geometrilerde laser kaynağı denemeleri



Şekil 4.23. Laser nokta kaynağı ve nokta direnç kaynağı bakalite alınmış numuneler Sertlik testleri UHL VMHT marka test cihazı ile 1 kg yük uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Testlerin yapıldığı mikro sertlik test cihazı Şekil 4.24'te verilmektedir.



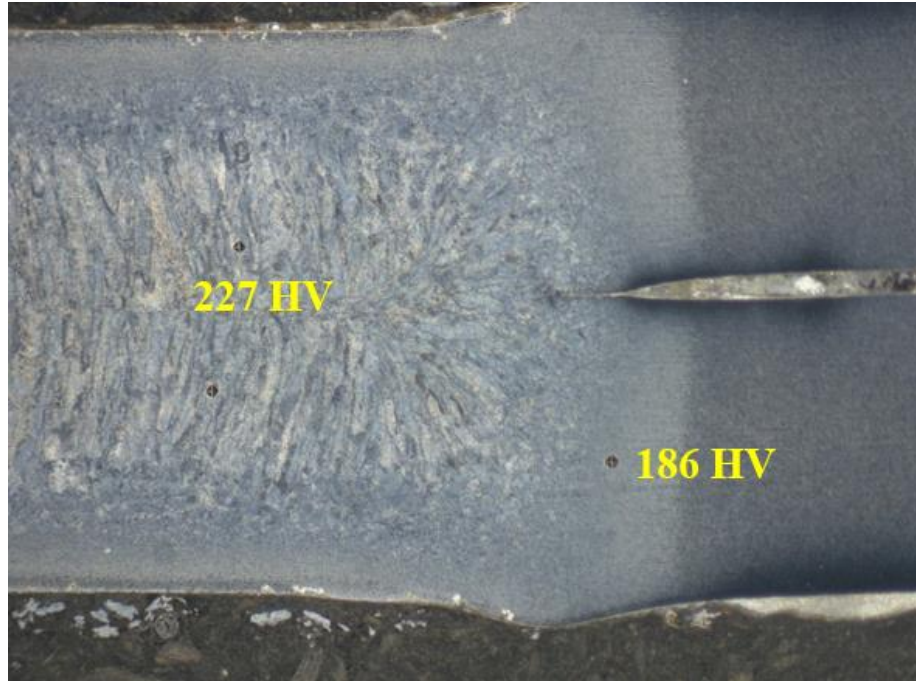
Şekil 4.24. Testlerin yapıldığı mikro sertlik cihazı

Numunelere yapılan sertlik ölçümleri ve ölçümlerin alındığı bölgeleri gösteren makro görüntüler Şekil 4.25, Şekil 4.26, Şekil 4.27 Şekil 4.28 ve Şekil 4.29'da gösterilmektedir. Mikro sertlik ölçümleri; kaynaklanan saçlardan, kaynak bölgesinden ve ITAB

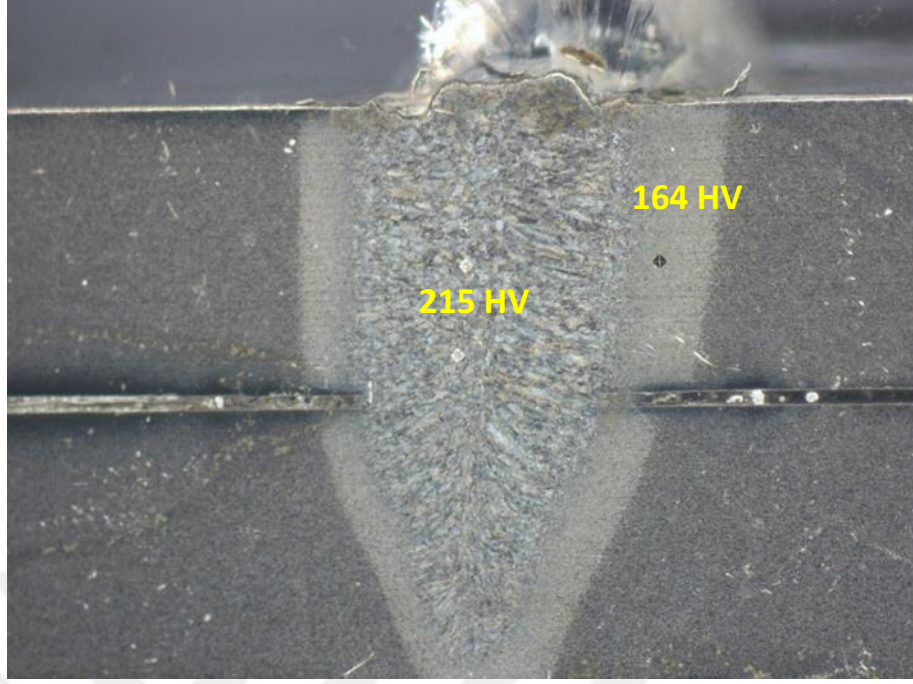
bölgesinden alınmıştır. Laser kaynak ile hazırlanan numuneler ISO6507 Vickers sertlik testi standardına göre test edilmiştir. Yapılan testler sonucunda elde edilen sonuçlar Çizelge 4.4'te paylaşılmıştır.



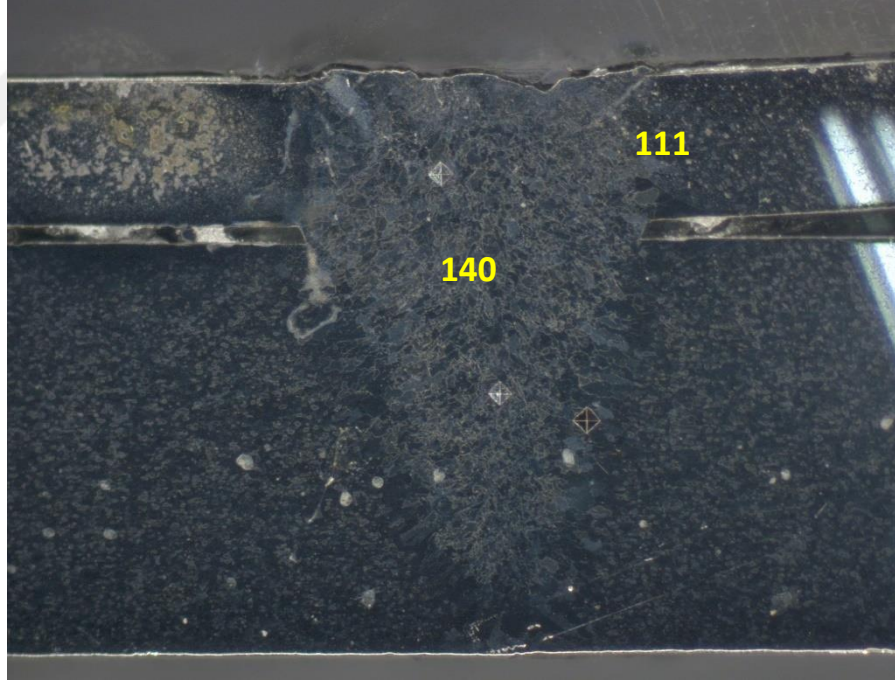
Şekil 4.25. Laser nokta kaynağı numunesinden sertlik ölçümü alınan noktalar



Şekil 4.26. Nokta direnç kaynağı numunesinden sertlik ölçümü alınan noktalar



Şekil 4.27. 2 nolu numuneden sertlik ölçümü alınan noktalar



Şekil 4.28. 3 nolu numuneden sertlik ölçümü alınan noktalar



Şekil 4.29. 4 nolu numuneden sertlik ölçümü alınan noktalar

Çizelge 4.4. Vickers sertlik deney sonuçları

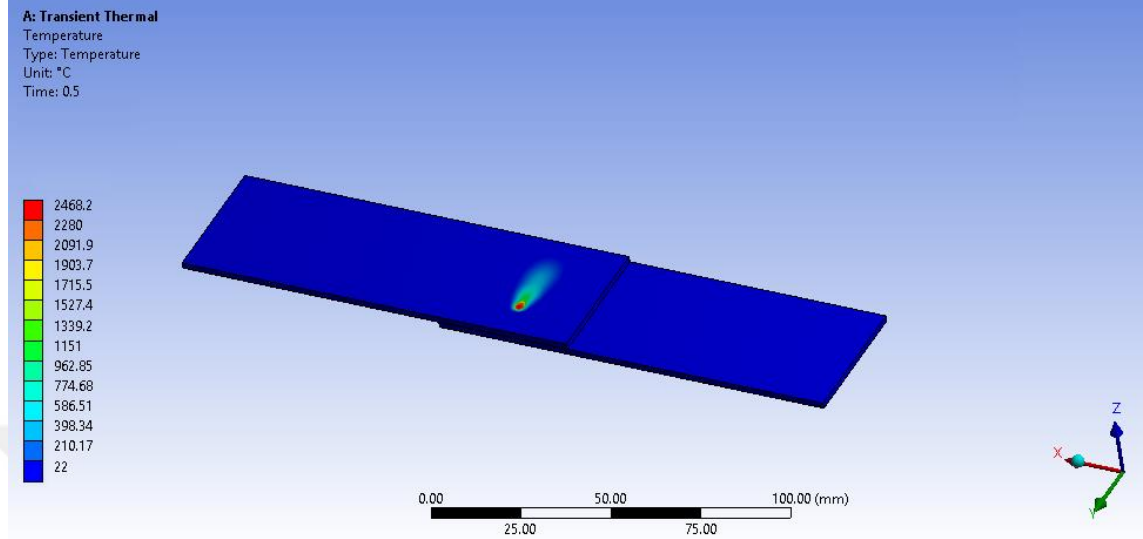
VICKERS SERTLİK DENEY SONUCU (HV)				
	Üst Saç	Alt Saç	ITAB Bölgesi	Kaynak Bölgesi
2 Nolu Numune	135	144	164	215
3 Nolu Numune	92	100	111	140
4 Nolu Numune	91	92	101	145
Lazer Nokta Kaynağı	133	140	181	229
Nokta Direnç Kaynağı	128	131	186	227

4.6. Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları

Oluşturulan sonlu elemanlar modeli 2250 W lazer gücü, 40 mm/s ilerleme hızı ve 0 mm odak mesafesinde kaynak prosesi için oluşturulmuştur. Bu kapsamda aşağıda belirtilen değerler analiz şartları olarak tanımlanmıştır;

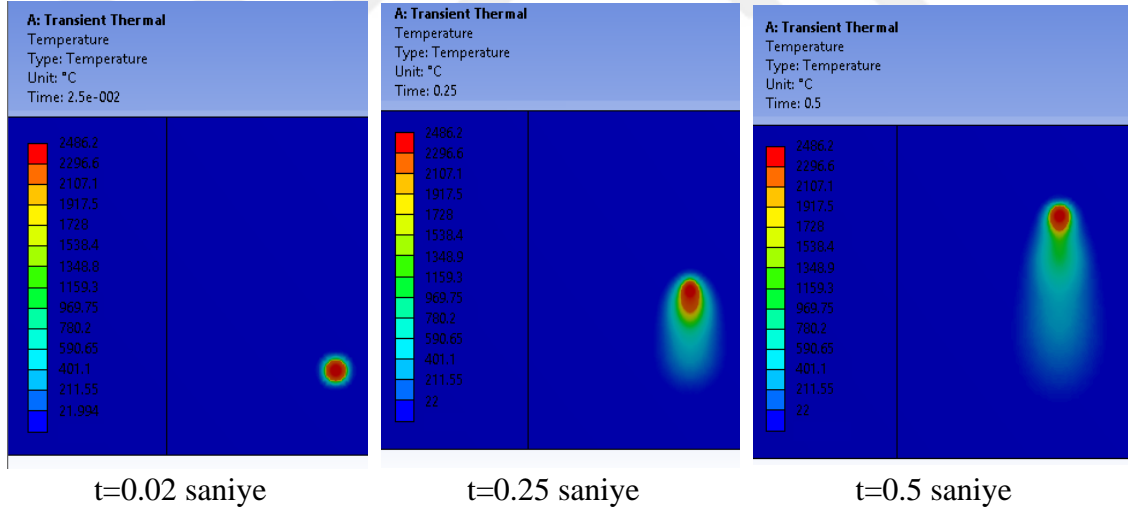
- Lazer Gücü = 2250 W
- İlerleme Hızı = 40 mm/s
- Lazer Spot Alanı = 0,28275 mm²
- Lazer Güç Yoğunluğu = 7950 W/mm²

Ansyes programında Transient Thermal modülü kullanılarak çözüm gerçekleştirilmiştir. Analizin çözümün ekranı şekil 4.30’da gösterilmiştir.



Şekil 4.30 $t=0.5$ saniye için elde edilen sıcaklık dağılımı

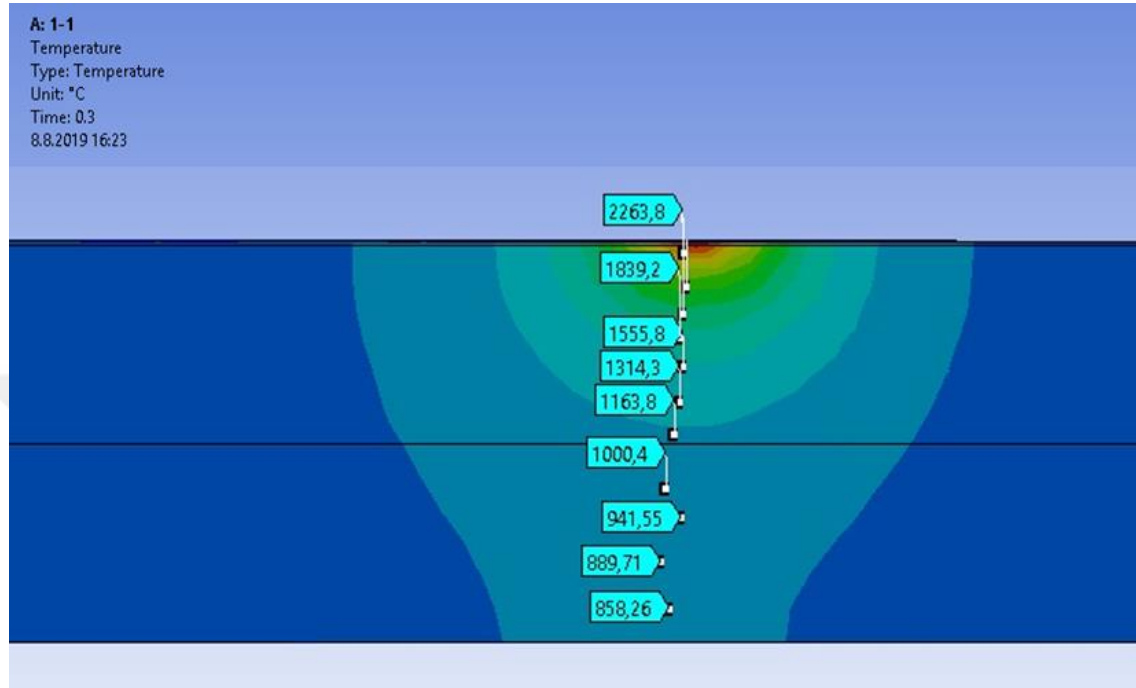
Farklı işlem sürelerinde alınan ekran görüntüleri Şekil 4.31’de verilmiştir.



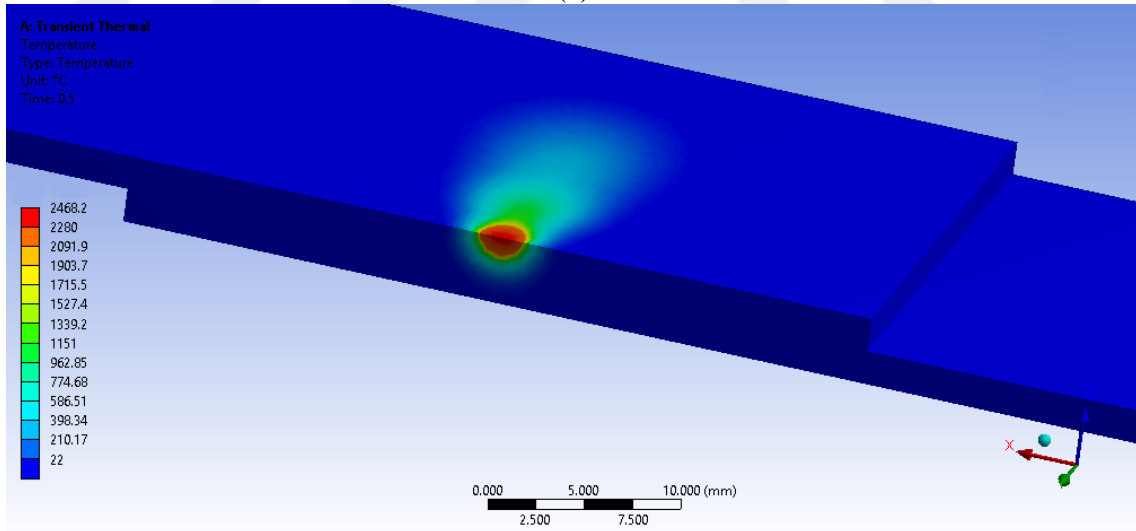
Şekil 4.31. Farklı proses sürelerinde sıcaklık dağılımı

Yapılan literatür araştırmaları da farklı işlem sürelerinde elde edilen sıcaklık dağılımlarının benzer olduğunu göstermiştir. (Kong ve Kovacevic 2010, Liu ve ark. 2015)

0,3 ve 0,5. saniyede kaynak kesit görüntüsü ve sıcaklık dağılımları Şekil 4.32’de verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere en yüksek sıcaklık kaynak dikişinin en üst noktasında oluşmaktadır. Aşağıya doğru sıcaklık dağılımının azaldığı görülmektedir.



(a)

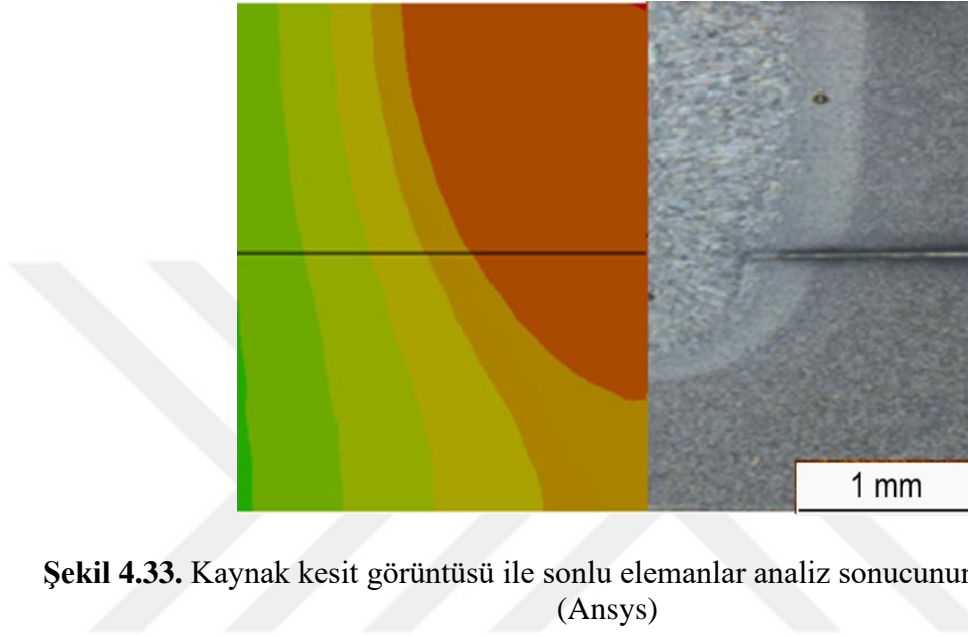


(b)

Şekil 4.32. Sonlu elemanlar analizi ile elde edilen sıcaklık dağılımı

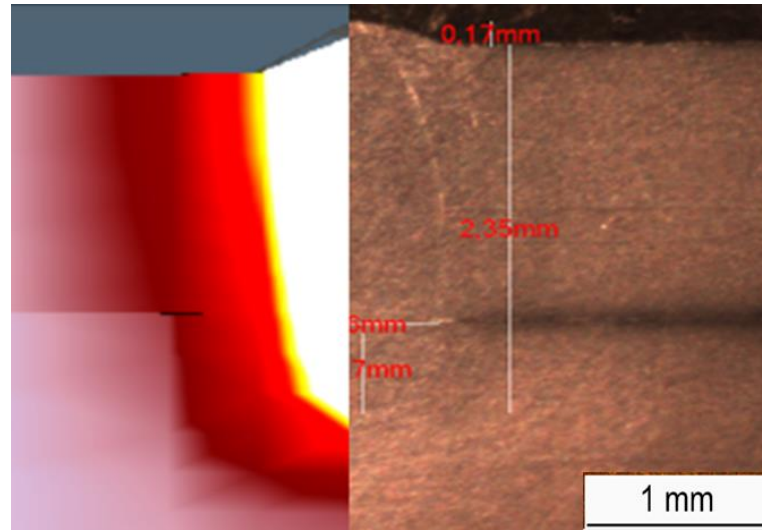
Sonlu elemanlar analizindeki sınır şartları ile (2250 W, 40 mm/s ve 0 mm odak mesafesi) kaynak edilmiş olan numunenin kaynak dikiş boyutları analiz sonucu elde edilen sonuçlar ile benzerlik göstermektedir. Kaynaklı numunenin penetrasyonu 2,35 mm olarak

ölçülmüştür. Bu penetrasyon sonlu elemanlar analizi sonucunda 2,68 mm olarak ölçülmüştür. Şekil 4.33'te ise sonlu elemanlar analiz sonucundan elde edilen görüntü ile kaynak sonrası kaynak bölgesinin makro görüntüsünün karşılaştırması gösterilmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi tez çalışmasında yapılan sonlu elemanlar analizinin gerçeği temsil ettiği açıkça görülmektedir.



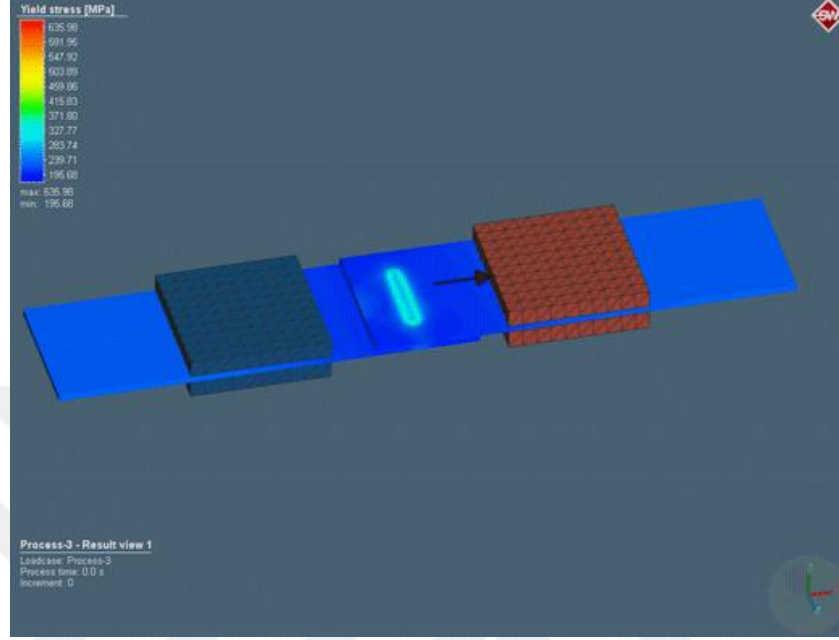
Şekil 4.33. Kaynak kesit görüntüsü ile sonlu elemanlar analiz sonucunun karşılaştırması (Ansys)

Şekil 4.34'te ise hem simülasyon ortamında hem de gerçekte elde edilen kaynak ITAB bölgelerinin çok benzer sonuçları verdiği görülmüştür.

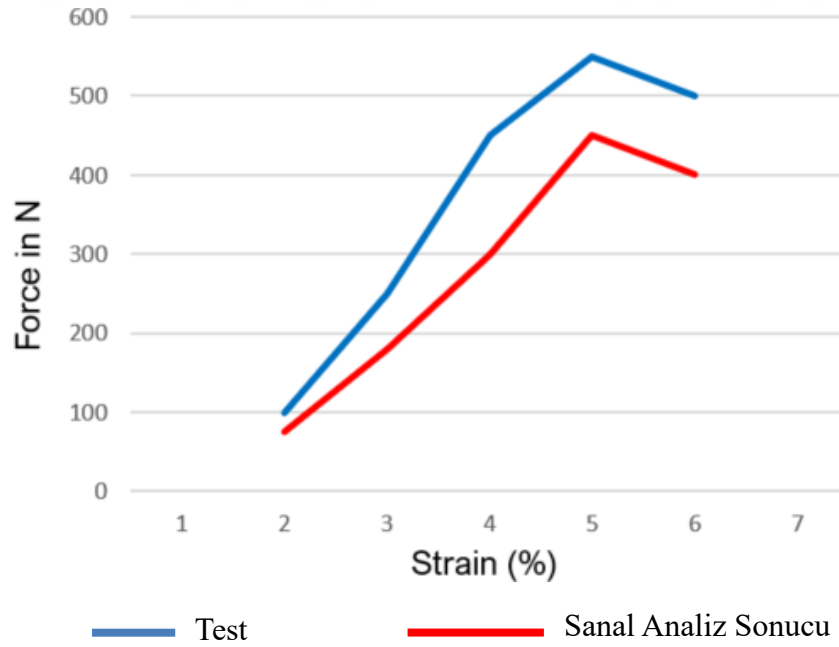


Şekil 4.34. Kaynak kesit görüntüsü ile sonlu elemanlar analiz sonucunun karşılaştırması (Simufact)

Şekil 4.35 ve 4.36’da ise simülasyon ortamında çıkan akma dayanımı değeri ile fiziksel test sonuçları ortaya çıkan sonucun kıyaslanması bulunmaktadır.



Şekil 4.35. Akma dayanımı değişimi



Şekil 4.36. Gerçek ve sanal test sonuçlarının kıyaslanması

4.7. Mali Fizibilite Çalışması

Yapılan deneyler esnasında alınan ölçümler göstermiştir ki laser spot kaynağının nokta direnç kaynağına kıyasla enerji tüketimi çok daha azdır. Bu sonuçlar aynı otomotiv parçasının aynı ortam koşullarında birleştirilmesi esnasında elde edilmiştir. Çizelge 4.5'te görüldüğü üzere laser nokta kaynağı ve direnç nokta kaynağı prosesleri ile birleştirilen numunelerden tüketilen enerji miktarları ölçümü alınmıştır. Bu değere kullanılan kaynak robotunun tükettiği enerji miktarı, soğutma gideri ve sarf malzeme giderleri eklenmiştir.

Çizelge 4.5. Laser nokta kaynağı ile nokta direnç kaynağının proses maliyetlerinin kıyaslanması

	Laser Nokta Kaynağı	Nokta Direnç Kaynağı
1 nokta için gereken enerji miktarı (kWh)	0,003	0,005
1 parça için gereken enerji maliyeti (₺)	0,53	0,76
1 parça için gereken robot enerji maliyeti (₺)	0,016	0,014
1 parça için gereken soğutma gideri (₺)	-	0,009
1 parça için gereken sarf malzeme gideri (₺)	-	0,179

Aynı otomotiv parçasında uygulanan kaynak prosesleri sonrasında yalnızca birleştirme operasyonundan oluşan toplam maliyet Çizelge 4.6'da gösterilmiştir. Bu durumda birim parça maliyetinde yalnızca birleştirme prosesinden gelen yaklaşık olarak %75 oranında bir fark oluşmuştur. Ancak oluşan bu değer birleştirilecek ürünün malzemesi, kaynak uzunluğu, yıllık tüketimi, birleştirilecek bölgenin laser kaynağı uygulamasına uygun olup olmadığı gibi değişkenlere göre değişkenlik göstermektedir.

Çizelge 4.6. Laser nokta kaynağı ile nokta direnç kaynağının ürüne oluşturduğu maliyet

Lazer Kaynak ile Yapılan parça maliyeti	0,546₺
Direnç Nokta Kaynak ile Yapılan parça maliyeti	0,962₺

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışma kapsamında otomotiv sektöründe yaygın kullanım alanı bulan nokta direnç kaynağına alternatif olan lazer kaynak yöntemi ile farklı tür ve kalınlıklardaki çelik sacların birleştirilebilirliği incelenmiştir.

Bu kapsamda öncelikle lazer kaynak prosesindeki işlem parametrelerinin etkileri incelenmiştir. Proses parametreleri incelenirken 0,65 mm, 0,75 mm ve 0,95 mm kalınlığında galvaniz kaplamalı DX54D+Z çeliği kullanılmıştır. Lazer gücü, ilerleme hızı ve odak mesafesinin kaynaklı parçaların mekanik özelliklerine ve kaynak geometrisi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda sabit lazer gücü ve odak mesafesinde, artan ilerleme hızının tüm numune gruplarında penetrasyonu düşürdüğü için mekanik dayanımı azalttığı görülmüştür. İlerleme hızı ve odak mesafesinin sabit değerde tutulduğu ve lazer gücünün etkisinin incelendiği durumlarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Artan lazer gücü ısı girdisini arttırarak penetrasyonu ve mekanik dayanımı arttırmıştır. Odak mesafesinin de mekanik dayanım ve kaynak dikiş geometrisi üzerinde etkisi bulunmaktadır. Lazer ışınının odağının parçanın içerisine taşındığı durumlarda (negatif odak mesafesi) penetrasyon derinliğinin arttığı görülmüştür. Ancak bu artış belirli bir odak mesafesine kadar gözlenmiştir. Odak mesafesinin parça yüzeyinden yukarı taşındığı durumlarda ise penetrasyonun azaldığı görülmüştür.

Tezin ikinci kısmında ise farklı dikiş geometrisine sahip lazer kaynaklı numuneler ile nokta direnç kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin mekanik dayanımları ve mikro yapıları karşılaştırılmıştır. Bu doğrultuda 1,8 mm kalınlığında galvaniz kaplı HX340LAD çelik sac kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda daha dar bir kaynak dikişi ve ısıdan etkilenen alana sahip olan lazer kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin çekme mukavemetinin nokta direnç kaynağı ile benzer olduğu, proses hızı ve maliyet avantajlarından dolayı lazer kaynağının daha avantajlı olduğu görülmüştür.

Çalışma kapsamında kurgulanan sonlu elemanlar modeli ile lazer kaynak prosesi simule edilmiştir. Kaynak esnasında uygulanan lazer gücüne bağlı olarak kaynak bölgesindeki ısı dağılımları incelenmiş ve aynı şartlar altında lazer kaynağı ile birleştirilen numunelerin kaynak dikişleri ile kıyaslanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde kurulan modelin benzer ısı dağılımı gösterdiği tespit edilmiştir.

Yapılan deneyler sonrası elde edilen çekme testi sonuçlarına göre uygun numunelerden mikro yapı görüntüleri elde edilmiştir. Laser nokta kaynağı ile birleştirilen numunelerde kaynak genişliğinin 0,8 mm ile 1,6 mm aralığında olduğu tespit edilmiştir. Nokta direnç kaynağı ile birleştirilen numunelerde ise kaynak genişliği 7,8 mm ile 9 mm aralığında olduğu tespit edilmiştir. Bu durumda ısı tesiri altında kalan bölgelerde (ITAB) oluşan farkı net bir şekilde ortaya koymaktadır. Buradan yola çıkarak nokta direnç kaynağı ile birleştirilen ürünlerdeki kaynak prosesi sonrası oluşan çarpılmanın daha fazla olacağı aşıkardır. Mikro yapılar incelendiğinde, lazer nokta kaynağının birleştirilen numunelerde çok az ısı tesiri yarattığı, bu nedenle kaynak sonrası çarpılmaların çok daha az olduğu tespit edilmiştir.

Ayrıca, laser nokta kaynağı kaynaklanacak ürünlere laser ışını sayesinde erişim kolaylığı sağlıyor olmasından dolayı ürünlerin tasarım değişikliği ile hafifleyebileceği de tespit edilmiştir.

Otomotiv sektöründe birleştirilecek ürünler için oluşturulan direnç nokta kaynak hücresinde bulunan kaynak robotu, kaynak fikstürü, kaynak tabancası ve kullanılan alan gibi tüm yatırımları göz önüne aldığımızda laser kaynak yatırımının uygun ürünler seçildiği takdirde çok daha avantajlı olduğu tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Akkaş, N., İlhan, E., Varol, F., Aslanlar, S. 2016.** Welding time effect on mechanical properties in resistance spot welding of S235JR(Cu) steel sheets used in railway vehicles. *Acta Physica Polonica A*, 129(4): 541–543.
- Akyol, M. 2001.** Otomotiv Sanayiinde Kullanılan Direnç Nokta Kaynak Uygulamaları ve Karşılaşılan Sorunlar. *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat ve Konstrüksiyon Anabilim Dalı, İstanbul.
- Al Naimi, I. K., Al Saadi, M. H., Daws, K. M., Bay, N. 2015.** Influence of surface pretreatment in resistance spot welding of aluminum AA1050. *Production and Manufacturing Research*, 3(1): 185–200.
- Alizadeh-Sh, M., Falsafi, F., Masoumi, M., Marashi, S. P. H., Pournavari, M. 2013.** Laser spot welding of AISI 304L metallurgical and mechanical properties. *Ironmaking and Steelmaking*, 41(3): 161–165.
- Andersson, O. 2013.** Process planning of resistance spot Welding. *MSc Thesis*, Faculty of production engineering, Royal Institute of Technology University, Stockholm, Sweden.
- Anonim, 2013.** Coşkunöz Kaynak Eğitim Notları, 2013, Bursa.
- Anonim, 2015.** IPG Laser kaynak eğitim notları, 2015, Bursa
- Anonim, 2016.** Amada Miyachi, Laser Welding Fundamentals, [http://www.amadamiyachi.com/servlet/servlet.FileDownload?retURL=%2Fapex%2Feducationalresources_articles&file=01580000001Jz8A-\(Erişim Tarihi: 17.06.2019\)](http://www.amadamiyachi.com/servlet/servlet.FileDownload?retURL=%2Fapex%2Feducationalresources_articles&file=01580000001Jz8A-(Erişim Tarihi: 17.06.2019))
- Boyras, İ., Yıldız, A. 2016.** Lazer Çeşitleri ve Yüksek Yoğunluklu Lazer Kullanımı. *Journal of Contemporary Medicine*, 6: 104–109.
- Çelen, S. 2006.** Paslanmaz Çeliklerin Lazer Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Bağlantının Dayanım ve Korozyon Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, DEÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat ve Konstrüksiyon Anabilim Dalı, İzmir.
- Dahotre, N., Harimkar, S. 2007.** Laser Fabrication and Machining of Materials (1st ed.). Springer International Publishing, New York, USA, 557 pp.
- Kopeliovich, D., 2012.** Resistance Welding (RW). Substances and Technologies, [\(Erişim Tarihi: 19.07.2019\)](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=resistance_welding_rw&s=resistance%20spot%20welding).
- Doruk, E., Pakdil, M., Çam, G., Durgun, İ., Kumru, U. C. 2016.** Otomotiv Sektöründe Direnç Nokta Kaynağı Uygulamaları. *Mühendis ve Makina*, 57(673): 48-53.
- Doruk, E., Pakdil, M., Çam, G., Durgun, İ., Kumru, U. C. 2015.** Otomotiv Sektöründe Direnç Nokta Kaynağı Tofaş Uygulamaları. Kaynak Kongresi IX. Ulusal Kongre ve Sergisi, 20-21 Kasım 2015, TBB Litai Konukevi, Ankara.
- El-Batahgy, A. M. 1997.** Effect of laser welding parameters on fusion zone shape and solidification structure of austenitic stainless steels. *Materials Letters*, 32(2–3): 155–163.
- Gallagher, M. 2003.** Electrode wear in the resistance spot welding of galvanized steel sheet. *MSc Thesis*, Faculty of electrical and computer engineering, University of Windsor, Detroit, USA.
- Gawai, B. S., Sedani, C. M. 2016.** Optimization of Process Parameters for Resistance Spot Welding Process of HR E-34 Using Response Surface Method. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 5(3): 2002–2008.
- Gugel, M.D., 1995.** Electrode Wear Mechanisms During The Resistance Spot Welding Of Hot-Dipped Galvanized Steel. *PhD Thesis*, MTU, Michigan, USA.

- Hull, D., Souders, J. 2011.** Fiber Laser Applications. The National Center for Optics and Photonics Education, Texas, USA, 19.
- Spitz, M. 2014.** Electrode degradation during resistance spot welding of conversion coated hot dip galvanized steel sheets. *PhD Thesis*, Vienna University of Technology, Vienna, Austria.
- Kakaçoğlu, G., Sığırtmaç, T., Karaaslan, A., Kısasöz, A. 2014.** Al-Si Kaplamalı Otomotiv Çeliklerinde Lazer Kaynaklı Birleştirme Uygulamaları. 7. Otomotiv Teknolojileri Kongresi, 26-27 Mayıs 2014, Bursa
- Kannatey, E. 2009.** Principles of Laser Materials Processing. John Wiley and Sons Inc., New Jersey, 820.
- Karaaslan, A., Yumurtacı, S., Sönmez, N., 2001.** Lazer ışını ile birleştirilmiş farklı malzemelerin kaynak dikişlerinde sertlik değişimleri. II Makine Malzemesi ve İmalat Teknolojisi Sempozyumu, 7-9 Kasım 2001, Celal Bayar Üniversitesi, Manisa.
- Katayama, S. 2013.** Handbook of Laser Welding Technologies. Woodhead Publishing, Cambridge, 632.
- Keskin, M. S. 2009.** Östenitik Paslanmaz Çeliğin Lazer Kaynağı Yöntemiyle Birleştirilmesinin İncelenmesi. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, 13-15 Mayıs 2009, Karabük.
- Kitani, Y., Oi, K., Tamai, Y. 2015.** Application of laser welding technologies to automotive bodies. JFE Steel Corporation. Tokyo.
- Kong, F., Kovacevic, R. 2010.** 3D finite element modeling of the thermally induced residual stress in the hybrid laser/arc welding of lap joint. *Journal of Materials Processing Technology*, 210: 941–950.
- Kopeliovich, D., 2012.** Resistance Welding. SubsTech, https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=resistance_welding_rw-(Erişim Tarihi: 18.08.2019)
- Liao, H. Te, Chen, Z. W. 2013.** A study on fiber laser micro-spot welding of thin stainless steel using response surface methodology and simulated annealing approach. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(5–8): 1015–1025.
- Liu, W., Ma, J., Kong, F., Liu, S., Kovacevic, R. 2015.** Numerical modelling and experimental verification of residual stress in autogenous laser welding of high-strength steel. *Lasers Manuf. Mater. Process*, 2:24-42.
- Masoumi, M., Marashi, S. P. H., Pournavari, M. 2010.** Metallurgical and mechanical characterization of laser spot welded low carbon steel sheets. *Steel Research International*, 81(12): 1144–1150.
- Mei, L., Yan, D., Chen, G., Xie, D., Zhang, M., Ge, X. 2015.** Comparative study on CO₂ laser overlap welding and resistance spot welding for automotive body in white. *Materials and Design*, 78: 107–117.
- Phillips, D. H. 2016.** Welding Engineering. John Wiley & Sons Ltd., UK, 276.
- Püskülcü, G., Koçlular, F. 2009.** Lazer Kaynak Yöntemi ve Uygulamaları. Kaynak Teknolojisi VII. Ulusal Kongre ve Sergisi, 13-14 Kasım 2009, Milli Kütüphane Konferans Salonu, Ankara.
- Tarakçıoğlu, N., Özcan, M., 2004.** Lazerler ve materyal işleme uygulamaları. Atlas yayın dağıtım, İstanbul, 128.
- Thomson, E. 1891.** Method of electric welding. USPTO US396011 A, <https://patents.google.com/patent/US396011->(Erişim Tarihi: 27.05.2019).
- Ünlükal, E. 2007.** Otomotiv Sanayinde Kullanılan Direnç Nokta Kaynak Kalitesinin Arttırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ, Makine Mühendisliği, İstanbul.

- Wolff, M., Vargas, J., Vilarinho, L. 2007.** Comparison between AC and MF-DC resistance spot welding by using high speed filming. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 24(1): 333–339.
- Yang, Y. S., Lee, S. H. 1999.** Study on the joining strength of laser spot welding for automotive applications. *Journal of Materials Processing Technology*, 94(2): 151–156.
- Yavuz, H., Çam, G. 2005.** Lazer Ark Hibrit Kaynak Yöntemi. *Mühendis ve Makina*, 46(543): 14–19.
- You, D. Y., Gao, X. D., Katayama, S. 2013.** Review of laser welding monitoring. *Science and Technology of Welding and Joining*, 19(3): 181–201.
- Yusof, F., Jamaluddin, M. F., Lumpur, K. 2014.** Welding Defects and Implications on Welded Assemblies. Elsevier Ltd., Malaysia, 133.
- Zhang, Y., Tan, L.-P., Li, S.-C., Chen, G.-Y., Cai, X. 2014.** Using a car body in white (BIW) to study the feasibility of applying laser welding. *Lasers in Engineering*, 0(1–2): 107–120.
- Zhao, H., White, D. R., Debroy, T. 1999.** Current issues and problems in laser welding of automotive aluminium alloys. *International Materials Reviews*, 44(6): 238–266.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Gökhan TEKİN
Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa 16/06/1981
Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Bursa Hürriyet Anadolu Teknik Lisesi (1995 - 1999)
Lisans : Gazi Üniversitesi – Makina Teknik Öğretmenliği (2001 - 2007)
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi – Otomotiv Mühendisliği (2014 - 2019)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl : Yeşilova Holding – Ar-Ge Müdürü
(2018 – Devam ediyor)
Coşkunöz Holding – Ar-Ge Kısım Müdürü
(2012-2018)
Rollmech Otomotiv – Proje ve Ür-Ge Lideri
(2010-2012)
Butgem – Eğitmen
(2010-2010)
Özkurt Makine – Tasarım Mühendisi
(2008-2009)
TDM Otomotiv – Tasarım Mühendisi
(2007-2008)
TMS Raf Sistemleri – Tasarım Mühendisi
(2006-2007)

İletişim (e-posta) : tekingokhan@gmail.com

Yayınları* :

Tekin, G., Sığırtmaç, T. 2013. Bir araç metal yakıt deposu saclarının nd-yag laser kaynak ile birleştirilmesi ve laser kaynak parametre optimizasyonu ile karşılaştırmalar. Matit 2013, 6-7 Aralık, İstanbul, Türkiye.

- Sığırtmaç, T., Tekin, G., Çallı, M., Yıldız, AR., Demirci, E. 2014.** Yüksek performanslı yeni bir araç ön gövdesinin geliştirilmesi. Otekon 2014, 26-27 Mayıs, Bursa, Türkiye
- Kılıç, S., Öztürk, F., Sığırtmaç, T., Tekin, G. 2015.** Effects of pre-strain and temperature on bake hardening of TWIP900CR steel. *Journal of iron and steel research international*, 22(4): 361-365.
- Çıbık, M., Tekin, G. 2015.** Salıncak kolu ve yeni nesil saclar. Otosem 2015, 13-14 Kasım, İstanbul, Türkiye
- Mastar, E., Tekin, G. 2015.** Otomotiv sektöründe farklı malzemelerden oluşan araç gövdelerinin birleştirilmesinde kullanılan yöntemler. Otosem 2015, 13-14 Kasım, İstanbul, Türkiye
- Çıbık, M., Tekin, G., Metuçin, Y., Çallı, M., Kaya, M. 2016.** Ön süspansiyon sisteminde ağırlık hafifletme çalışmaları. Otekon 2016, 23-24 Mayıs, Bursa, Türkiye
- Metuçin, Y., Çallı, M., Çıbık, M., Yiğitoğlu, E., Tekin, G., Kaya, M. 2016.** V formlanmış ara bağlantı borusuna sahip bir otomobil arka dingilinin araç ağırlığı azaltmadaki etkileri. Otekon 2016, 23-24 Mayıs, Bursa, Türkiye
- Yüce, C., Karpat, F., Yavuz, N., Tekin, G., Çapar, N. 2016.** Effect of fiber laser welding parameters on the penetration depth and weld bead geometry. 1st International Mediterranean Science and Engineering Congress, IMSEC, October 26-28, 2016, Adana, Turkey
- Çapar, N., Kumru, U., Başer, T., Tekin, G., Saray, O. 2017.** Friction Stir Spot Welding For Automotive Applications. *International Journal Of Advances On Automotive And Technology*, 1(3): 114-118.
- Yüce, C., Tutar, M., Karpat, F., Yavuz, N., Tekin, G. 2017.** Effect Of Process Parameters On The Microstructure And Mechanical Performance Of Fiber Laser-Welded AA5182 Aluminium Alloys. *Strojniški Vestnik - Journal Of Mechanical Engineering*, 63(2017)9: 510-518.
- Yüce, C., Karpat, F., Yavuz, N., Tekin, G., Çapar, N. 2017.** The optimization of process parameters for laser welded galvanized automobile steel sheets using a taguchi method. International Conference On Engineering, Tecnology, Innovations IACETI 2017, 13-14 July 2017, Paris , France.
- Sapmaz, İ., Vardar, Ö., Zeybek, A., Şen, E., Tekin, G., Uludağ, M. 2019.** Oksijen Atmosferinin AlSi9Cu3 Yüksek Basıncılı Döküm Alaşımının Metal Kalitesi Üzerine Etkisinin Araştırılması. International Conference on Material Science, Mechanical and Automotive Engineerings and Technology, 21-23 June, 2019, Perissia Hotel, Cappadocia, Turkey.
- Sapmaz, İ., Vardar, Ö., Zeybek, A., Şen, E., Tekin, G., Uludağ, M. 2019.** Yüksek Basıncılı Dökümde Kullanılan Ergiyik Tutma Potası Sistemlerine Göre EN AC 46000 Yüksek Basıncılı Döküm Alaşımının Döküm Kalitesinin Belirlenmesi. International Conference On Material Science, Mechanical And Automotive Engineerings And Technology, 21-23 June, 2019, Perissia Hotel, Cappadocia, Turkey.
- Göl, U., Özyayın, M., Tekin, G., Uludağ, M. 2019.** Sr Modifikasyonun A356 Alaşımında Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi. International Conference On Material Science, Mechanical And Automotive Engineerings And Technology, 21-23 June, 2019, Perissia Hotel, Cappadocia, Turkey.
- Sapmaz, İ., Vardar, Ö., Zeybek, A., Tekin, G., Uludağ, M. 2019.** Effect of Oxygen Atmosphere in High Pressure Die Casting Melt Holder Crucible on Metal Quality and

Cast Part of AlSi9Cu3. TMS – Liquid Metal Casting and Processing (LMPC) 2019, 8-10 September, Birmingham, UK.

Sapmaz, İ., Vardar, Ö., Zeybek, A., Tekin, G., Uludağ, M. 2019. Effects of High Pressure Die Casting Melt Holder Crucible Systems on Metal Quality in EN AC 46000 Alloy. LightMAT – 2019, 5-7 November, Manchester, UK.

