



**YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇELİKLER İLE  
ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ LAZER KAYNAĞI  
İLE BİRLEŞTİRİLMESİNDE KAYNAK  
PARAMETRELERİNİN BAĞLANTI ÜZERİNE  
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

**Celalettin YÜCE**



T.C.  
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇELİKLER İLE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ  
LAZER KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİNDE KAYNAK  
PARAMETRELERİNİN BAĞLANTI ÜZERİNE ETKİLERİNİN  
İNCELENMESİ**

**Celalettin YÜCE**

Prof. Dr. Nurettin YAVUZ  
(Danışman)

DOKTORA TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA - 2018

**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ ONAYI

Celalettin YÜCE tarafından hazırlanan “*Yüksek Mukavemetli Çelikler ile Alüminyum Alaşımlarının Lazer Kaynağı ile Birleştirilmesinde Kaynak Parametrelerinin Bağlantı Üzerine Etkilerinin İncelenmesi*” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Prof. Dr. Nurettin YAVUZ

**Başkan:** Prof. Dr. Nurettin YAVUZ

Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Bölümü



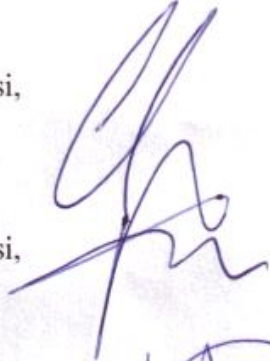
**Üye:** Prof. Dr. Enver ATİK

Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik  
Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Bölümü



**Üye:** Prof. Dr. Necmettin KAYA

Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Bölümü



**Üye:** Doç. Dr. Fatih KARPAT

Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Bölümü



**Üye:** Doç. Dr. Hakan GÖKDAĞ

Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa  
Bilimleri Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Bölümü



**Yukarıdaki sonucu onaylım.**

**Prof. Dr. Ali BAYRAM**

**Enstitü Müdürü**

**28 / 8 /2018**

**Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- 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 tahriyat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

**28/08/2018**  
**Celalettin YÜCE**



## ÖZET

Doktora Tezi

### YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇELİKLER İLE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ LAZER KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİNDE KAYNAK PARAMETRELERİNİN BAĞLANTI ÜZERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

**Celalettin YÜCE**

Bursa Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Prof. Dr. Nurettin YAVUZ

Alüminyum alaşımları ile yüksek mukavemetli çeliklerin bir arada kullanımının hızla artması sonucu farklı termal ve fiziksel özelliklere sahip olan bu malzeme türlerinin birleştirilmesi otomotiv sektörünün öncelikli hedefi haline gelmiştir. Metalürjik olarak uyumsuz olan bu iki malzemenin birleştirilmesinde oluşan ergiyik havuzunda katılaşma esnasında kırılğan intermetalik fazlar oluşmaktadır. Kaynağın mekanik dayanımı ve kalitesi açısından oluşan bu fazların sınırlandırılması ve kontrol edilmesi gerekmektedir.

Bu çalışma kapsamında 6082-T6 alüminyum alaşımı ile DP600 yüksek mukavemetli çelik sacın lazer nüfuziyet kaynağı ile birleştirilmesinde kaynak parametrelerinin ve ısı girdisinin bağlantının mekanik ve metalürjik özelliklerine olan etkileri incelenmiştir. Isı girdisine bağlı olarak ergiyik havuzunun boyutları optik mikroskop görüntüleri yardımı ile incelenmiş, mikro sertlik ölçümleri ve SEM-EDX analizleri ile birleşme bölgesinde oluşan intermetalik fazlar belirlenmiştir. Kaynaklı parçaların çekme testleri yapılarak mekanik dayanımları tespit edilmiş ve kaynak parametreleri ile ilişkilendirilmiştir.

Yapılan değerlendirmede alüminyum-çelik malzemelerin mekanik dayanımını etkileyen en önemli parametrelerin ilerleme hızı ve lazer gücü olduğu görülmüştür. Lazer gücü ve ilerleme hızı ile belirlenen ısı girdisinin kaynak dikiş geometrisi ve bağlantı bölgesinde oluşan intermetalik fazlar üzerinde büyük etkisi olduğu görülmüştür. Artan ısı girdisi ile ergiyik havuzunun boyutlarının ve intermetalik fazların oluşumunun arttığı tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Lazer kaynağı, Alüminyum, Yüksek mukavemetli çelik, İntermetalik fazlar, Mekanik özellikler

**2018, xv + 147 sayfa.**

## **ABSTRACT**

PhD Thesis

**INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF WELDING PARAMETERS ON LASER  
WELDED JOINTS OF DISSIMILAR HIGH STRENGTH STEEL AND ALUMINUM  
ALLOYS**

**Celalettin YÜCE**

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

**Supervisor:** Prof. Dr. Nurettin YAVUZ

Due to the utilizing aluminum alloys and high strength steel in hybrid components, it will become a primary target of the automotive industry to combine these types of materials with different thermal and physical properties. Intermetallic phases are formed during solidification in the melt pool formed by joining these dissimilar materials. In terms of the mechanical strength and quality of the weld, these phases should be limited and controlled.

In this study, the effect of welding parameters and heat input on the mechanical and metallurgical properties of laser welded 6082-T6 aluminum alloy and DP600 high strength steel sheet was investigated. Depending on the heat input, the dimensions of the weld seam were examined with the help of optical microscope. Intermetallic phases formed in the joint were examined by micro hardness measurements and SEM-EDX analyzes. The tensile tests of the welded parts were carried out to determine the mechanical strengths and to relate them to the welding parameters.

It has been seen that the most important parameters affecting the mechanical strength of the aluminum-steel joints are the welding speed and the laser power. It has been found that the heat input determined by laser power and welding speed has a great influence on the weld seam geometry and the intermetallic phases in the connection region. With increasing heat input, it was determined that the size of the melt pool and the formation of intermetallic phases increased.

**Key Words:** Laser weld, Aluminum, High strength steel, Intermetallic phases, Mechanical properties

**2018, xv + 147 pages.**

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca destek ve yardımlarını esirgemeyen değerli danışman hocam Prof. Dr. Nurettin YAVUZ ve çalışmanın her aşamasında görüş ve yönlendirmelerinden faydalandığım değerli hocam Doç. Dr. Fatih KARPAT'a çok teşekkür ederim.

Tez çalışmam kapsamındaki yardımlarından dolayı Dr. Mümin TUTAR ve Arş. Gör. Oğuz DOĞAN'a teşekkür ederim.

Doktora çalışmam boyunca 2211-Yurt içi Doktora Burs Programı kapsamında Bursiyer olarak destekleyen TÜBİTAK kurumuna şükranlarımı sunarım.

Lazer kaynak işlemlerinin gerçekleştirilmesindeki desteklerinden dolayı Coşkunöz Holding'e ve IPG Photonics Eurasia adına Hakan DEMİR'e teşekkür ederim. SEM-EDX analizleri aşamasındaki desteklerinden dolayı Bayburt Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvar birimi ve Arş. Gör. Yusuf Alptekin TÜRKKAN'a teşekkür ederim.

Bütün hayatım boyunca olduğu gibi bu süreçte de desteklerini hiç esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

28/08/2018  
Celalettin YÜCE

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR .....	v
İÇİNDEKİLER .....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	4
2.1. Taşıt Ağırlığında Hafifletme Gerekçeleri ve Stratejileri .....	4
2.2. Otomotiv Sektöründe Birleştirme Yöntemlerinin Önemi .....	9
2.3. Alüminyum Alaşımları ile Çeliklerin Birleştirilmesi .....	11
2.3.1. Mekanik Birleştirme Yöntemleri .....	16
2.3.2. Kimyasal Birleştirme Yöntemleri.....	18
2.3.3. Katı Hal Birleştirme Yöntemleri .....	18
2.3.4. Termal Birleştirme Yöntemleri .....	20
2.4. Lazer Teknolojisi.....	22
2.4.1. Lazer Tanımı ve Tarihçesi .....	22
2.4.2. Lazer Işınının Elde Edilmesi .....	23
2.4.3. Lazer Işınının Özellikleri.....	26
2.4.4. Lazer Çeşitleri.....	30
2.4.4.1. CO <sub>2</sub> Lazerler .....	31
2.4.4.2. Nd:YAG Lazerler .....	31
2.4.4.3. Disk Lazerler .....	31
2.4.4.4. Fiber Lazerler .....	32
2.5. Lazer Kaynak Yöntemi .....	35
2.5.1. Lazer Kaynak İşlem Parametreleri .....	40
2.5.1.1. Lazer Gücü ve İlerleme Hızı .....	40
2.5.1.2. Odak Mesafesi .....	41
2.5.1.3. Koruyucu Gaz Türü ve Debisi .....	43
2.5.2. Lazer Kaynağının Avantajları .....	44
2.6. Lazer Kaynağı ile Alüminyum Alaşımları ile Çeliklerin Birleştirilmesi.....	46
2.6.1. Hibrit Lazer-Ark Kaynak Yöntemi.....	46

2.6.2. Lazer Lehim Birleştirme Yöntemi .....	48
2.6.3. Lazer İletim Kaynak Yöntemi .....	49
2.6.4. Lazer Nüfuziyet Kaynak Yöntemi .....	51
2.7. Galvaniz Kaplama Tabakasının Lazer Nüfuziyet Kaynağına Etkisi .....	55
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	58
3.1. Materyal.....	58
3.2. Yöntem .....	61
3.2.1. Deney Tasarımı ve Parametre Optimizasyonu .....	61
3.2.2. Isı Girdisinin Etkisinin İncelenmesi .....	63
3.3. Metalürjik İncelemeler .....	64
3.4. Mikro Sertlik Ölçümleri .....	65
3.5. Çekme Testleri.....	66
4. BULGULAR .....	68
4.1. Kaynak Dikişinin Karakteristik Bölgeleri .....	68
4.2. Kaynak Parametrelerinin Optimizasyonu.....	70
4.3. Isı Girdisine Bağlı Olarak Metalürjik ve Mekanik Özelliklerin İncelenmesi	80
4.3.1. Ön Deneme Çalışmalarının Sonuçları .....	80
4.3.2. 3000 W Lazer Gücünde Yapılan Kaynaklar.....	84
4.3.2.1. Kaynak Dikiş Yüzeylerinin İncelenmesi .....	84
4.3.2.2. Kaynak Bölgelerinin Makro Yapılarının İncelenmesi.....	85
4.3.2.3. Mikro Sertlik Ölçümleri ve SEM-EDX Analiz Sonuçlarının İncelenmesi	89
4.3.2.4. Mekanik Dayanımlarının İncelenmesi.....	98
4.3.3. 2500 W Lazer Gücünde Yapılan Kaynaklar.....	101
4.3.3.1. Kaynak Dikiş Yüzeylerinin İncelenmesi .....	101
4.3.3.2. Kaynak Bölgelerinin Makro Yapılarının İncelenmesi.....	101
4.3.3.3. Mikro Sertlik Ölçümleri ve SEM-EDX Analiz Sonuçlarının İncelenmesi	105
4.3.3.4. Mekanik Dayanımlarının İncelenmesi.....	114
4.3.4. 2000 W Lazer Gücünde Yapılan Kaynaklar.....	116
4.3.4.1. Kaynak Dikiş Yüzeylerinin İncelenmesi .....	116
4.3.4.2. Kaynak Bölgelerinin Makro Yapılarının İncelenmesi.....	116
4.3.4.3. Mikro Sertlik Ölçümleri ve SEM-EDX Analiz Sonuçlarının İncelenmesi	120
4.3.4.4. Mekanik Dayanımlarının İncelenmesi.....	129
5. TARTIŞMA ve SONUÇ .....	131
KAYNAKLAR.....	135
ÖZGEÇMİŞ.....	144

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

Simgeler	Açıklama
IG	Isı Girdisi (J/mm)
LG	Lazer Gücü (W)
İH	İlerleme Hızı (mm/s)

### Kısaltmalar

Kısaltmalar	Açıklama
SEM	Scanning Electron Microscope – Taramalı Elektron Mikroskobu
EDX	Energy Dispersive X-Ray Spectrometry – Enerji Dağılım Spektrometresi
S/N	Signal to Noise Ratio – Sinyal Gürültü Oranı

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1. Araç gövdesinde kullanılan malzeme oranlarının yıllık % değişimi .....	7
Şekil 2.2. Örnek araçlarda kullanılan malzeme türleri .....	8
Şekil 2.3. Otomotiv endüstrisinde birleştirme yöntemlerinin karşılaştığı zorluklar	9
Şekil 2.4. Örnek araç üzerinde kullanılan birleştirme yöntemleri ve bölgeleri .....	10
Şekil 2.5. Örnek araçlarda yer alan alüminyum-çelik malzemeden üretilmiş parçalar .....	11
Şekil 2.6. Fe-Al denge diyagramı ve intermetalik fazlar .....	12
Şekil 2.7. Farklı intermetalik fazların gerilme-uzama eğrileri .....	14
Şekil 2.8. Örnek intermetalik faz oluşumları ve bölgeleri .....	14
Şekil 2.9. İntermetalik tabaka kalınlığının mekanik dayanıma etkisi .....	15
Şekil 2.10. Demir ve sıvı fazdaki alüminyum arasında 800 °C de zamana bağlı oluşan intermetalik faz kalınlıkları .....	16
Şekil 2.11. Sıkıştırma (Clinching) prosesi şematik gösterimi .....	17
Şekil 2.12. Kendinden delmeli perçinleme (Self-Pierce Riveting) prosesi şematik gösterimi .....	17
Şekil 2.13. Sürtünme karıştırma kaynağı şematik görüntüsü .....	18
Şekil 2.14. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı şematik görüntüsü .....	19
Şekil 2.15. Elektrik direnç kaynaklı parçaların şematik kesit görüntüsü: a) alüminyum-çelik, b) çelik-çelik ve alüminyum-alüminyum .....	21
Şekil 2.16. Elektron enerjisinin uyarım ile arttırılmasının şematik gösterimi .....	23
Şekil 2.17. a) Kendiliğinden yayınım ve b) foton ile uyarılmış yayınım şematik gösterimi .....	24
Şekil 2.18. Lazer üretim cihazının temel parçaları .....	25
Şekil 2.19. Elektromanyetik spektrum .....	27
Şekil 2.20. Lazerde farklı tür enine elektromanyetik mod (TEM) çeşitleri .....	28
Şekil 2.21. Farklı modlardaki ışın demetleri (a) gaussyen, (b) düz ve (c) ters gaussyen .....	29
Şekil 2.22. Farlı lazer türlerinde ışının yönlendirilmesi ve odaklanmasının şematik görüntüsü; a) CO <sub>2</sub> lazerleri, b) Katı hal lazerleri .....	32
Şekil 2.23. Endüstriyel lazer türlerinin özelliklerinin karşılaştırılması .....	33

Şekil 2.24. Endüstriyel lazer türlerinin işlem maliyetlerinin karşılaştırılması .....	33
Şekil 2.25. Endüstriyel lazer türlerinin 2016-2018 yılları satış hasılatları .....	34
Şekil 2.26. Farklı kaynak proseslerinde güç yoğunlukları ve ergiyik havuzunun şematik gösterimi.....	36
Şekil 2.27. (a) sürekli ve (b) darbeli mod lazerlerdeki ortalama güç dağılımları....	37
Şekil 2.28. Güç yoğunluğuna bağlı olarak lazer kaynağının sınıflandırılması a) iletim, b) iletim-nüfuziyet ve c) nüfuziyet.....	37
Şekil 2.29. Lazer nüfuziyet kaynağı şematik görüntüsü.....	38
Şekil 2.30. İlerleme hızı ve lazer gücüne bağlı olarak a) penetrasyon derinliğinin değişimi, b) derinlik/genişlik oranının değişimi.....	40
Şekil 2.31. Gaussyen ışın odak mesafesi ve ışın çapları .....	41
Şekil 2.32. Odak mesafesinin kaynak dikişinin penetrasyon ve dikiş genişliğine olan etkisi.....	42
Şekil 2.33. Lazer nüfuziyet kaynağında odak mesafesine bağlı plazma oluşumu ..	42
Şekil 2.34. Koruyucu gaz türünün lazer gücü ve ilerleme hızına bağlı olarak penetrasyon derinliği üzerindeki etkisi.....	43
Şekil 2.35. Hibrit lazer-ark kaynağının şematik görüntüsü.....	47
Şekil 2.36. Lazer lehim birleştirme yöntemi şematik görüntüsü (a) ilave malzemesiz, (b) ilave tel kullanımı.....	48
Şekil 2.37. Lazer iletim kaynağı şematik görüntüsü .....	50
Şekil 2.38. Lazer nüfuziyet kaynak yönteminin şematik gösterimi .....	51
Şekil 2.39. Farklı ısı girdisi seviyelerinde birleştirilmiş parçaların kesit görüntüleri: a) 45 kJ/m, b) 43,27 kJ/m ve c) 41,67 kJ/m.....	52
Şekil 2.40. Penetrasyonun fazla olduğu durumda kaynak dikişinin görüntüsü ve ortaya çıkan fazlar .....	53
Şekil 2.41. Lazer nüfuziyet kaynağında kaynak bölgesine ilave edilen tozların bağlantının dayanımına olan etkisi .....	55
Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan kaynak fikstürünün a) üç boyutlu tasarımı, b) görüntüsü .....	60
Şekil 3.2. Çalışmada kullanılan lazer kaynak ekipmanları.....	60
Şekil 3.3. Bindirme kaynak bağlantı tipinin şematik olarak gösterimi .....	61
Şekil 3.4. Kaynak dikişinde ölçülen bölgelerin şematik görüntüsü .....	65



Şekil 3.5. Çalışmada kullanılan SEM-EDX cihazının görüntüsü.....	66
Şekil 3.6. Kaynaklı parçalardaki sertlik ölçümü alınan hatlar.....	66
Şekil 3.7. (a) Çekme testi görüntüsü ve (b) çekme testi numunelerinin ölçüleri ....	67
Şekil 4.1. Lazer nüfuziyet kaynaklı alüminyum-çelik bağlantısının kesit görüntüsü .....	68
Şekil 4.2. Lazer nüfuziyet kaynaklı alüminyum-çelik bağlantısındaki karakteristik bölgeler: a) çelik malzeme tarafında ısı etkisi altında kalan bölge, b) intermetalik faz bölgeleri.....	69
Şekil 4.3. Taguchi deneysel tasarım sonucuna elde edilen kaynaklı parçaların kesit görüntüleri.....	71
Şekil 4.4. Kaynak parametrelerinin S/N oranları ve ortalamalara göre etki seviyeleri.....	72
Şekil 4.5. 133 kodlu numunenin mikro sertlik ölçümleri: a) çelik-kaynak dikişi boyunca, b) alüminyum-kaynak dikişi boyunca ve c) kaynak dikişi boyunca dikey ölçüm sonuçları.....	74
Şekil 4.6. 133 kodlu numunenin: a) SEM görüntüsü ve EDX analizi gerçekleştirilen bölgesi, b) EDX analiz sonucu.....	75
Şekil 4.7. 133 kodlu numunenin: a) SEM görüntüsü ve EDX tarama bölgesi, b) EDX analiz sonucu .....	76
Şekil 4.8. 321 kodlu numunenin mikro sertlik ölçümleri: a) çelik-kaynak dikişi boyunca, b) alüminyum-kaynak dikişi boyunca ve c) kaynak dikişi boyunca dikey ölçüm sonuçları.....	77
Şekil 4.9. 321 kodlu numunenin a) SEM görüntüsü ve EDX ölçümü alınan noktası, b) EDX analiz sonucu .....	78
Şekil 4.10. Numunelerin kaynak dikiş geometrileri: a) 133 kodlu numune, b) 321 kodlu numune .....	79
Şekil 4.11. Farklı lazer güçlerindeki minimum ilerleme hızları ile kaynatılmış numunelerin dikiş ve arka yüzey görüntüleri: a) 2000 W – 50 mm/s, b) 2500 W – 65 mm/s ve c) 3000 W – 80 mm/s .....	81
Şekil 4.12. Farklı lazer güçlerindeki minimum ilerleme hızları ile kaynatılmış numunelerin kaynak dikişinin kesit görüntüleri: a) 2000 W – 50 mm/s, b) 2500 W – 65 mm/s ve c) 3000 W – 80 mm/s .....	82

Şekil 4.13. 2500 W lazer gücünde 100 mm/s ilerleme hızı ile birleştirilmiş numunelerin görüntüsü: a) kaynak dikiş yüzey görüntüsü ve b) kesit görüntüsü ...	83
Şekil 4.14. 3000 W lazer gücünde farklı ısı girdisi seviyelerinde birleştirilmiş numunelerin kaynak dikiş yüzey görüntüleri: a) 35,3 J/mm, b) 33,3 J/mm, c) 31,5 J/mm, d) 30 J/mm, e) 28,5 J/mm.....	84
Şekil 4.15. 3000 W lazer gücünde farklı ısı girdileri altında birleştirilen parçaların kaynak kesit görüntüleri: a) 35,3 J/mm, b) 33,3 J/mm, c) 31,5 J/mm, d) 30 J/mm, e) 28,5 J/mm .....	85
Şekil 4.16. 3000 W lazer gücünde farklı ısı girdileri altında birleştirilen parçaların penetrasyon derinlikleri ve kaynak dikiş genişlikleri: a) 35,3 J/mm, b) 33,3 J/mm, c) 31,5 J/mm, d) 30 J/mm, e) 28,5 J/mm.....	87
Şekil 4.17. Isı girdisine bağlı olarak kaynak dikiş geometrisinin değişimi: a) penetrasyon derinliği, b) dikiş genişliği ve c) genişlik/derinlik oranı .....	88
Şekil 4.18. 35,3 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin mikro sertlik dağılımları: a) çelik-kaynak dikişi boyunca, b) alüminyum-kaynak dikişi boyunca ve c) kaynak dikişi boyunca dikey ölçüm sonuçları.....	89
Şekil 4.19. 35,3 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin a) SEM görüntüsü ve EDX tarama bölgesi, b) EDX analiz sonucu .....	90
Şekil 4.20. 33,3 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin mikro sertlik dağılımları: a) çelik-kaynak dikişi boyunca, b) alüminyum-kaynak dikişi boyunca ve c) kaynak dikişi boyunca dikey ölçüm sonuçları.....	91
Şekil 4.21. 33,3 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin a) SEM görüntüsü ve EDX tarama bölgesi, b) EDX analiz sonucu .....	92
Şekil 4.22. 31,5 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin mikro sertlik dağılımları: a) çelik-kaynak dikişi boyunca, b) alüminyum-kaynak dikişi boyunca ve c) kaynak dikişi boyunca dikey ölçüm sonuçları.....	92
Şekil 4.23. 31,5 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin a) SEM görüntüsü ve EDX tarama bölgesi, b) EDX analiz sonucu .....	93
Şekil 4.24. 30 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin mikro sertlik dağılımları: a) çelik-kaynak dikişi boyunca, b) alüminyum-kaynak dikişi boyunca ve c) kaynak dikişi boyunca dikey ölçüm sonuçları.....	94

Şekil 4.25. 30 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin a) SEM görüntüsü ve EDX tarama bölgesi, b) EDX analiz sonucu .....	95
Şekil 4.26. 28,5 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin mikro sertlik dağılımları: a) çelik-kaynak dikişi boyunca, b) alüminyum-kaynak dikişi boyunca ve c) kaynak dikişi boyunca dikey ölçüm sonuçları.....	96
Şekil 4.27. 28,5 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin a) SEM görüntüsü ve EDX tarama bölgesi, b) EDX analiz sonucu .....	97
Şekil 4.28. 3000 W lazer gücünde farklı ısı girdisi seviyelerinde birleştirilen numunenin penetrasyon derinliğine bağlı kaynak dikişindeki ortalama mikro sertlik değerleri.....	98
Şekil 4.29. 3000 W lazer gücünde farklı ısı girdisi seviyelerinde birleştirilmiş numunelerin penetrasyon derinliklerine bağlı olarak mekanik dayanımları.....	99
Şekil 4.30. Çekme testi sonucunda farklı ısı girdisi seviyelerinde gözlenen kopma türleri: a) 28,5 J/mm, b) 31,5 J/mm, c) 33,3 J/mm, d) 35,3 J/mm.....	100
Şekil 4.31. 2500 W lazer gücünde farklı ısı girdisi seviyelerinde birleştirilmiş numunelerin kaynak dikiş yüzey görüntüleri: a) 35,7 J/mm, b) 33,3 J/mm, c) 31,2 J/mm, d) 29,4 J/mm .....	101
Şekil 4.32. 2500 W lazer gücünde farklı ısı girdileri altında birleştirilen parçaların kaynak kesit görüntüleri: a) 35,7 J/mm, b) 33,3 J/mm, c) 31,2 J/mm, d) 29,4 J/mm.....	102
Şekil 4.33. 2500 W lazer gücünde farklı ısı girdileri altında birleştirilen parçaların penetrasyon derinlikleri ve kaynak dikiş genişlikleri: a) 35,7 J/mm, b) 33,3 J/mm, c) 31,2 J/mm, d) 29,4 J/mm .....	103
Şekil 4.34. Isı girdisine bağlı olarak kaynak dikiş geometrisinin değişimi: a) penetrasyon derinliği, b) dikiş genişliği ve c) genişlik/derinlik oranı .....	104
Şekil 4.35. 35,7 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin mikro sertlik dağılımları: a) çelik-kaynak dikişi boyunca, b) alüminyum-kaynak dikişi boyunca ve c) kaynak dikişi boyunca dikey ölçüm sonuçları.....	105
Şekil 4.36. 35,7 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin a) SEM görüntüsü ve EDX tarama bölgesi, b) EDX analiz sonucu .....	106

Şekil 4.37. 33,3 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin mikro sertlik dağılımları: a) çelik-kaynak dikişi boyunca, b) alüminyum-kaynak dikişi boyunca ve c) kaynak dikişi boyunca dikey ölçüm sonuçları.....	107
Şekil 4.38. 33,3 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin a) SEM görüntüsü ve EDX tarama bölgesi, b) EDX analiz sonucu .....	108
Şekil 4.39. 31,2 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin mikro sertlik dağılımları: a) çelik-kaynak dikişi boyunca, b) alüminyum-kaynak dikişi boyunca ve c) kaynak dikişi boyunca dikey ölçüm sonuçları.....	109
Şekil 4.40. 31,2 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin a) SEM görüntüsü ve EDX tarama bölgesi, b) EDX analiz sonucu .....	110
Şekil 4.41. 29,4 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin mikro sertlik dağılımları: a) çelik-kaynak dikişi boyunca, b) alüminyum-kaynak dikişi boyunca ve c) kaynak dikişi boyunca dikey ölçüm sonuçları.....	111
Şekil 4.42. 29,4 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin SEM görüntüsü ve EDX tarama bölgeleri .....	112
Şekil 4.43. 29,4 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin EDX tarama sonuçları .....	112
Şekil 4.44. 29,4 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin sertlik ölçüm ve EDX nokta sonuçları .....	113
Şekil 4.45. 2500 W lazer gücünde farklı ısı girdisi seviyelerinde birleştirilen numunenin penetrasyon derinliğine bağlı kaynak dikişindeki ortalama mikro sertlik değerleri.....	113
Şekil 4.46. 2500 W lazer gücünde farklı ısı girdisi seviyelerinde birleştirilmiş numunelerin penetrasyon derinliklerine bağlı olarak mekanik dayanımları.....	115
Şekil 4.47. Çekme testi sonucunda farklı ısı girdisi seviyelerinde gözlenen kopma türleri: a) 29,4 J/mm, b) 31,2 J/mm, c) 33,3 J/mm, d) 35,7 J/mm.....	115
Şekil 4.48. 2000 W lazer gücünde farklı ısı girdisi seviyelerinde birleştirilmiş numunelerin kaynak dikiş yüzey görüntüleri: a) 36,3 J/mm, b) 33,3 J/mm, c) 30,7 J/mm, d) 28,5 J/mm .....	116
Şekil 4.49. 2000 W lazer gücünde farklı ısı girdileri altında birleştirilen parçaların kaynak kesit görüntüleri: a) 36,3 J/mm, b) 33,3 J/mm, c) 30,7 J/mm, d) 28,5 J/mm.....	117

Şekil 4.50. 2000 W lazer gücünde farklı ısı girdileri altında birleştirilen parçaların penetrasyon derinlikleri ve kaynak dikiş genişlikleri: a) 36,3 J/mm, b) 33,3 J/mm, c) 30,7 J/mm, d) 28,5 J/mm .....	118
Şekil 4.51. Isı girdisine bağlı olarak kaynak dikiş geometrisinin değişimi: a) penetrasyon derinliği, b) dikiş genişliği ve c) genişlik/derinlik oranı .....	119
Şekil 4.52. 36,3 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin mikro sertlik dağılımları: a) çelik-kaynak dikişi boyunca, b) alüminyum-kaynak dikişi boyunca ve c) kaynak dikişi boyunca dikey ölçüm sonuçları.....	120
Şekil 4.53. 36,3 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin a) SEM görüntüsü ve EDX tarama bölgesi, b) EDX analiz sonucu .....	121
Şekil 4.54. 36,3 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin sertlik ölçüm ve bölgesel intermetalik faz tabaka kalınlığı .....	121
Şekil 4.55. 33,3 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin mikro sertlik dağılımları: a) çelik-kaynak dikişi boyunca, b) alüminyum-kaynak dikişi boyunca ve c) kaynak dikişi boyunca dikey ölçüm sonuçları.....	122
Şekil 4.56. 33,3 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin a) SEM görüntüsü ve EDX tarama bölgesi, b) EDX analiz sonucu .....	123
Şekil 4.57. 33,3 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin sertlik ölçüm noktaları ve bölgesel intermetalik faz tabaka kalınlığı .....	123
Şekil 4.58. 30,7 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin mikro sertlik dağılımları: a) çelik-kaynak dikişi boyunca, b) alüminyum-kaynak dikişi boyunca ve c) kaynak dikişi boyunca dikey ölçüm sonuçları.....	124
Şekil 4.59. 30,7 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin a) SEM görüntüsü ve EDX tarama bölgesi, b) EDX analiz sonucu .....	125
Şekil 4.60. 30,7 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin sertlik ölçüm noktaları ve bölgesel intermetalik faz tabaka kalınlığı .....	125
Şekil 4.61. 28,5 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin mikro sertlik dağılımları: a) çelik-kaynak dikişi boyunca, b) alüminyum-kaynak dikişi boyunca ve c) kaynak dikişi boyunca dikey ölçüm sonuçları.....	126
Şekil 4.62. 28,5 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin a) SEM görüntüsü, b) EDX tarama bölgesi ve c) EDX analiz sonucu.....	127

Şekil 4.63. 28,5 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin sertlik ölçüm noktaları ve bölgesel intermetalik faz tabaka kalınlığı .....	128
Şekil 4.64. 2000 W lazer gücünde farklı ısı girdisi seviyelerinde birleştirilen numunenin penetrasyon derinliğine bağlı kaynak dikişindeki ortalama mikro sertlik değerleri.....	128
Şekil 4.65. 2000 W lazer gücünde farklı ısı girdisi seviyelerinde birleştirilmiş numunelerin penetrasyon derinliklerine bağlı olarak mekanik dayanımları.....	130
Şekil 4.66. Çekme testi sonucunda farklı ısı girdisi seviyelerinde gözlenen kopma türleri: a) 28,5 J/mm, b) 30,7 J/mm, c) 33,3 J/mm, d) 36,3 J/mm.....	130



## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1. Alüminyum-çelik birleştirilmesinde ortaya çıkan intermetalik fazlar, sertlik değerleri ve atomik yüzdeleri.....	13
Çizelge 2.2. Alüminyum ve demirin bazı termal ve fiziksel özellikleri.....	14
Çizelge 2.3. Lazer ışını ile gerçekleştirilen işlemlerin güç yoğunluğuna bağlı gösterimi .....	35
Çizelge 2.4. 1 m kaynak için MAG kaynağı ile lazer kaynağının maliyet karşılaştırması.....	45
Çizelge 2.5. Galvaniz kaplamalı malzemelerin bindirme formatında birleştirilmesinde çinko buharının zararlı etkilerinden korunmak için yapılan uygulamalar .....	56
Çizelge 3.1. DP600 ve AA6082-T6 malzemelerinin kimyasal kompozisyonları	58
Çizelge 3.2. DP600 ve AA6082-T6 malzemelerinin mekanik özellikleri .....	59
Çizelge 3.3. Taguchi yönteminde kullanılan proses parametreleri ve seviyeleri.	62
Çizelge 3.4. Isı girdisinin etkisini incelemek için yapılan lazer kaynaklarının işlem parametreleri .....	64
Çizelge 4.1. Taguchi deneysel tasarım tablosu ve mekanik dayanım sonuçları...	70
Çizelge 4.2. Proses parametrelerinin S/N oranlarına etki seviyeleri.....	72
Çizelge 4.3. Proses parametrelerinin ortalama etki seviyeleri.....	72
Çizelge 4.4. Proses parametrelerinin optimum değer tahminleri .....	73
Çizelge 4.5. Proses parametrelerinin etkilerini tespit etmek için oluşturulan ANOVA tablosu.....	73
Çizelge 4.6. 3000 W lazer gücünde farklı ısı girdisi altında birleştirilen numunelerin penetrasyon derinlikleri, mekanik dayanımları ve kopma türleri....	98
Çizelge 4.7. 2500 W lazer gücünde farklı ısı girdisi altında birleştirilen numunelerin penetrasyon derinlikleri, mekanik dayanımları ve kopma türleri....	114
Çizelge 4.8. 2000 W lazer gücünde farklı ısı girdisi altında birleştirilen numunelerin penetrasyon derinlikleri, mekanik dayanımları ve kopma türleri....	129

## 1. GİRİŞ

Küresel enerji ihtiyacının arttığı ve sürdürülebilir çevre kavramının önem kazandığı günümüzde, araçların yakıt tasarrufu sağlayacak şekilde tasarlanıp üretilmesi otomotiv sektörünün öncelikli hedefi haline gelmiştir. Yakıt tüketimini azaltmak için ise araç ağırlığında hafifletmenin gerekli olduğu bilinmekte ve bu yönde çalışmalar yürütülmektedir. Taşıtlarda yapısal ağırlığı hafifletmede en etkili yöntemlerden biri geleneksel malzemelerden üretilmiş parçaların yeni nesil malzemeler (yüksek mukavemetli çelikler, alüminyum ve magnezyum alaşımları, kompozitler ve termoplastikler vb.) ile üretilmesidir. Bu sayede aracın güvenlik ve performansından ödün vermeden taşıt ağırlığının hafifletilmesi ve yakıt tasarrufunun sağlanması mümkün olmaktadır.

Taşıtlarda mevcut malzemelerin tek başlarına istenilen özellikleri sağlamada yetersiz kalması sonucunda son yıllarda yeni malzeme türlerinin yapılar da bir arada kullanımı artmaktadır. Özellikle alüminyum alaşımları ile yüksek mukavemetli çeliklerin araç gövdesinde ve farklı parçalarda bir arada kullanımı yaygınlaşmaktadır. Bunun nedeni ise, alüminyum alaşımlarının diğer alaşım türlerine göre uygun maliyet ve üstün özellikleri ile yüksek mukavemetli çeliklerin mukavemet ve şekillendirilebilirlik özellikleridir. Günümüzde araçların tavanları hafif alüminyum alaşımlarından, gövde ile bağlantı bölgeleri ise (pillar) yüksek mukavemetli çelik malzemelerden üretilip birleştirilmektedir. Araç kapılarında, kaput ve bagaj bölümlerinde yine farklı özelliklere sahip alüminyum alaşımları ile çeliklerin bir arada kullanıldığı uygulamalar artmaktadır. Araç kapılarında da dış sac alüminyum malzemeden üretilirken kapıyı oluşturan iskeletin ve darbe önleyici barların yüksek mukavemetli çelik malzemeden üretildiği görülmektedir.

Farklı tür malzemelerin araç gövde ve komponentlerinde bir arada kullanımının artması sonucunda farklı malzemeleri birleştirmede kullanılan yöntemlerinin geliştirilmesi otomotiv sektörünün öncelikli hedeflerinden biri haline gelmiştir. Rekabetin çok yüksek olduğu bu sektörde birleştirme yöntemi seçiminde güvenilirlik, maliyet, seri üretime uygunluk, yüzey kalitesi, ek işlem gereksinimi gibi birçok parametre göz önünde bulundurularak seçim yapılmaktadır. Lazer kaynağı, yüksek işlem hızı, derin nüfuziyet, kontrol edilebilir ısı girdisi, oldukça dar ısı etkisi altında kalan bölge oluşturması,



kusursuz kaynak profili, yüksek yapısal dayanım, otomasyona uygunluk gibi birçok avantajı nedeni ile birleştirme yöntemleri içerisinde öne çıkmaktadır.

Metalürjik olarak uyumsuz (dissimilar) olan alüminyum ve çeliğin birleştirilmesinde ergime noktalarının, genleşme katsayılarının ve ısı iletkenliklerinin farklı olması nedeni ile bazı sorunlar ortaya çıkmakta ve kaynak kalitesini düşürmektedir. Özellikle ergime bölgesinde demir atomlarının alüminyum içerisinde düşük çözünürlük göstermesi sonucunda oluşan kırılğan intermetalik fazlar kaynağın mukavemetini düşürmektedir. Galvaniz kaplı çeliklerin alüminyum alaşımları ile birleştirilmesinde karşılaşılan bir diğer sorun da kaplama tabakasında bulunan çinko elementidir. Düşük ergime noktası nedeniyle kaynak esnasında buharlaşan çinko, bağlantı bölgesinde porozite, sıçrıntı, korozyon dayanımında düşüş gibi olumsuz durumlar ortaya çıkarmaktadır. Özellikle boşluksuz (zero-gap) olarak gerçekleştirilen lazer nüfuziyet kaynağında çinko buharı önemli sorunlara neden olmaktadır.

Literatürde alüminyum alaşımları ile çeliklerin lazer kaynağı ile birleştirildiği çalışmalarda düşük karbonlu ve paslanmaz çelikler gibi geleneksel malzemelerin kullanıldığı görülmüştür. Son yıllarda otomotiv sektöründe özellikle yapısal parçalarda yoğun kullanım alanı bulmaya başlayan yüksek mukavemetli çeliklerin kullanıldığı çalışmaların kısıtlı sayıda olduğu görülmektedir. Ayrıca galvaniz kaplamalı yüksek mukavemetli çeliklerin ilave malzeme ve donanım kullanılmadan boşluksuz olarak lazer nüfuziyet kaynağı ile birleştirilmesine yönelik çalışmaların da sınırlı kaldığı görülmektedir. Taşıtı oluşturan parçaların genellikle boşluksuz olarak birleştirildiği ve kullanılan çeliklerin tamamına yakının galvaniz kaplı olması nedeniyle bu malzeme türlerinin birleştirilmesine yönelik çalışmaların önemini arttırmıştır.

Bu çalışma kapsamında galvaniz kaplı yüksek mukavemetli çelik saclar ile alüminyum alaşımları fiber lazer kaynağında bindirme formatında boşluksuz (zero-gap) birleştirilmiştir. Lazer kaynak yöntemindeki en etkili işlem parametreleri olarak lazer gücü, ilerleme hızı ve odak mesafesi seçilmiş ve deneysel tasarım metotlarından Taguchi yöntemi kullanılarak optimize edilmiştir. Sonrasında kaynaklı parçaların mekanik dayanımları üzerinde en fazla etkiye sahip olduğu görülen lazer gücü ve ilerleme hızına bağlı olarak farklı ısı girdisi seviyeleri belirlenmiştir. Üç farklı lazer gücünde belirlenen

ısı girdisi seviyelerinde kaynaklar gerçekleştirilmiş, bağlantının mekanik ve metalürjik özellikleri incelenmiştir.

Çalışmanın Kaynak Araştırması bölümünde taşıt ağırlığında hafifletmenin gerekçeleri ve bu amaç ile uygulanan stratejilerden bahsedilmiştir. Araç gövdesinde kullanılan malzeme türlerine değinilmiş ve birleştirme yöntemlerinin otomotiv endüstrisindeki önemi açıklanmıştır. Lazer teknolojisi tanıtılmış ve temel bileşenleri açıklanmıştır. Son olarak otomotiv endüstrisindeki farklı tür (dissimilar) malzemelerin birleştirilmesinde ortaya çıkan sorunlar ve uygulanan yöntemler açıklanmış, lazer kaynak yöntemi ile alüminyum-çelik malzemelerin birleştirilmesine yönelik yapılan çalışmalar incelenerek özetlenmiştir.

Materyal ve Yöntem kısmında çalışma kapsamında kullanılan malzemeler, uygulanan yöntemler ve araçlar açıklanmıştır. Mekanik ve metalürjik özelliklerin incelenmesi aşamasında kullanılan cihazlar ve özelliklerinden bahsedilmiştir.

Çalışmanın Bulgular kısmında ise öncelikle, yüksek mukavemetli çelik saclar ile alüminyum alaşımlarının lazer nüfuziyet kaynağında işlem parametreleri Taguchi yöntemi ile optimize edilmiş ve etkileri belirlenmiştir. Sonrasında üç farklı lazer güç seviyesinde lazer gücü sabit tutularak farklı ilerleme hızlarında kaynaklar gerçekleştirilmiş ve ısı girdisinin bağlantının mekanik ve metalürjik özelliklere olan etkisi tespit edilmiştir. Bu aşamada, ısı girdisi seviyelerinin kaynak dikiş geometrisine olan etkisi optik mikroskop yardımı ile incelenmiş, bağlantı bölgesinde oluşan intermetalik fazlara etkisi ise mikro sertlik ölçümleri, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM - Scanning Electron Microscopy) görüntüleri ve EDX (Energy Dispersive X-Ray Analysis) analizleri ile incelenmiştir. Lazer kaynaklı alüminyum-çelik numunelerinin mekanik dayanımları çekme testleri ile belirlenmiş ve kırılma türleri incelenmiştir.

Çalışmanın Tartışma ve Sonuç kısmında ise çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar ve çıktılar sunulmuştur.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Çalışmanın bu kısmında otomotiv sektöründeki taşıt ağırlığını azaltmaya yönelik beklentilere ve bu doğrultuda uygulanan stratejilere değinilmiştir. Araç gövdesinde alüminyum ve çelik malzemelerin bir arada kullanıldığı hibrit malzemeli yapıların arttığı gösterilmiş ve metalürjik olarak uyumsuz (dissimilar) bu iki farklı malzemenin birleştirilmesi ile ilgili problemler açıklanmıştır. Lazer teknolojisi ile ilgili temel kavramlar açıklanarak lazer kaynak metotları ile alüminyum-çelik malzemelerin birleştirilmesine yönelik yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

### 2.1. Taşıt Ağırlığında Hafifletme Gerekçeleri ve Stratejileri

Küresel enerji ihtiyacının önümüzdeki yirmi yıl içerisinde %50 oranında artacağı ve sanayi sektöründen sonra enerji ihtiyacı bakımından en büyük ikinci sektör olan ulaştırma sektörünün bu artışta önemli bir rol oynayacağı öngörülmektedir. Ulaştırma sektöründeki enerji tüketiminin yaklaşık %80'lik kısmını oluşturan karayolu taşımacılığının enerji ihtiyacının artan taşıt sayısı ile birlikte 2008-2035 yılları arasında yıllık %1,4 oranında artacağı öngörülmektedir (Anonim 2011).

Günümüzde ulaştırma sektöründeki enerji ihtiyacı genellikle petrol ve sıvı yakıtlardan karşılanmaktadır. Hızla artan taşıt sayısına bağlı olarak yakıt tüketimindeki artış dünya üzerindeki enerji tüketiminden kaynaklı karbondioksit (CO<sub>2</sub>) emisyonunu arttırmaktadır. Yapılan araştırmalar akaryakıt kullanımından kaynaklı CO<sub>2</sub> emisyonunun 2035 yılında 43,2 milyar tona ulaşacağını göstermektedir (Anonim 2013). Ulaştırma sektörü özelinde ise ilave tedbirlerin alınmadığı durumda sera gazı salınımlarının önümüzdeki on yılda %35 artacağı öngörülmektedir (Howey ve Ark. 2010).

Tüketilen yakıt miktarının azaltılması ve buna bağlı olarak çevreye zararlı gazların salınımının engellenmesine yönelik uluslararası sivil toplum kuruluşları birçok araştırma yürütmekte ve çeşitli yaptırımlar ile tedbirler almaktadır. Avrupa Komisyonu ile Avrupa Otomobil Üreticileri Birliği arasında varılan anlaşma gereği karayolu taşımacılığında kaynaklı salınan CO<sub>2</sub> miktarının 2015 yılında 130 g CO<sub>2</sub>/km, 2020 yılında ise 95 g CO<sub>2</sub>/km olması istenmektedir (Anonim 2011). Karayolu taşımacılığında kaynaklı sera gazı salınımlarını azaltmaya ve dolayısı ile yakıt tüketimine getirilen bu yasal zorunluluklar otomotiv sektörünü yeni teknolojiler araştırmaya itmiştir. Otomotiv

sektörünün önde gelen kuruluşları araştırma-geliştirme bütçelerinin büyük kısmını ve stratejik hedeflerini bu yöne doğru çevirerek yasal zorunlulukları karşılayabilmeyi ve değişen pazardan pay sahibi olabilmeyi hedeflemektedir. Teknoloji, bu doğrultuda enerji verimliliği yüksek, çevreye daha duyarlı araçların üretilmesi hedefi ile gelişmektedir.

Taşıtların ağırlıkları artan güvenlik beklentileri, konfor şartları ve teknolojideki gelişmelere bağlı olarak son yıllarda artış eğilimine girmiştir. Araç ağırlığındaki bu artış yakıt tüketimini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle otomotiv üreticileri ve yan sanayileri tasarım, malzeme seçimi ve üretim teknikleri üzerine araştırmalar yaparak taşıtları hafifletmeye çalışmaktadırlar. Performans, güvenlik ve konfordan ödün vermeden yapısal ağırlığı azaltmak, motorlu taşıtlarda yakıt tüketimini azaltmanın ve enerji verimliliğini sağlamanın en önemli yollarından birisidir. Taşıtlarda yakıt tüketimini azaltarak enerji verimliliğine katkı sağlayan teknolojiler içerisinde araç ağırlığında hafifletme seçeneği yapılan birçok çalışmada öne çıkarılmaktadır. King ve ark. (2007), Cheah (2010) ve Lutsey (2010) taşıtın yapısal ağırlığının azaltılması ile yakıt tasarrufu ve performansta iyileşme olacağını belirtmişler ve yakıt tasarrufu için alınacak önlemler içerisinde kısa dönemde en hızlı geri dönüş sağlayacak olan stratejinin hafifletme olduğunu belirtmişlerdir. Taşıt ağırlığında sağlanacak olan %10'luk bir hafifletmenin yakıt tüketimine yaklaşık %5-7 oranında katkı sağlayacağını öngörmüşlerdir.

Taşıtların yapısal ağırlıklarının azaltılması için aracı oluşturan parçaların daha hafif malzemelerden üretilmesi, taşıtın boyutunun küçültülmesi, parçaların optimizasyon teknikleri ile yeniden tasarlanıp yeni üretim teknikleri ile üretilmesi gibi farklı metotlar kullanılmaktadır. Cheah ve ark. (2007) ile Bjelkengren (2008) araç ağırlığında hafifletmenin komponentlerin üretiminde geleneksel malzeme türleri yerine düşük yoğunluklu ancak yüksek performanslı malzemelerin kullanılması ve araç gövdesindeki kaynaklı birleştirmelerin optimize edilmesi ile sağlanacağını vurgulamışlardır.

Taşıtların ağırlıklarının azaltılması günümüzde otomotiv endüstrisinin gelişme kaydettiği elektrikli araç teknolojileri için de kritik öneme sahiptir. Bu teknolojilerde bataryadan kaynaklanan ekstra yük aracın diğer parçalarında yapılacak olan hafifletmeler ile elimine edilmeye çalışılacaktır. Henüz yaygın olmaması, şarj istasyonlarının az olması ve dolu bir batarya ile alınabilecek mesafenin oldukça kısa olmasından dolayı hafif olarak

üretilen elektrikli araçlar sayesinde bir batarya ile daha fazla yol gitmek mümkün olacaktır (Liu ve ark. 2013).

Taşıtlarda kullanım miktarı bakımından en büyük orana sahip olan çelikler diğer malzeme türlerine göre endüstride daha fazla tanınmış olduğundan hafifletmede maliyet ve üretim teknikleri açısından daha avantajlıdır. Yüksek mukavemet ve şekillendirilebilirlik gibi özelliklere sahip olan yeni nesil çeliklerin taşıtlarda özellikle yapısal parçalarında kullanımını hızla yaygınlaştırmaktadır (Uchihara 2011). Çarpışma anında gösterdiği dayanım ve üretime yatkınlık gibi özellikler nedeni ile günümüzdeki araçların ağırlık olarak %70'lik bir kısmının çelik malzemelerden üretilmiş parçalar oluşturmaktadır. Gelişen teknoloji ile birlikte yeni nesil çeliklerde mukavemet ve hafiflik açısından önemli başarılar sağlanmıştır. Otomotiv endüstrisindeki yakıt tasarrufu üzerine yapılan çalışmalar için geliştirilen yeni nesil çelikler Yüksek Mukavemetli Çelik - HSS (High Strength Steel) ve Geliştirilmiş Yüksek Mukavemetli Çelik - AHSS (Advanced High Strength Steel) olarak bilinmektedir. Oldukça yüksek değerlerdeki mukavemet ve işlenebilirlik özelliklerinden dolayı HSS ve AHSS malzemelerinin hafifletme için büyük potansiyele sahip olduğu ve parça başına yaklaşık %25 oranında hafifletmenin bu malzemeler ile mümkün olabileceği bilinmektedir (U.S. Department of Energy 2016).

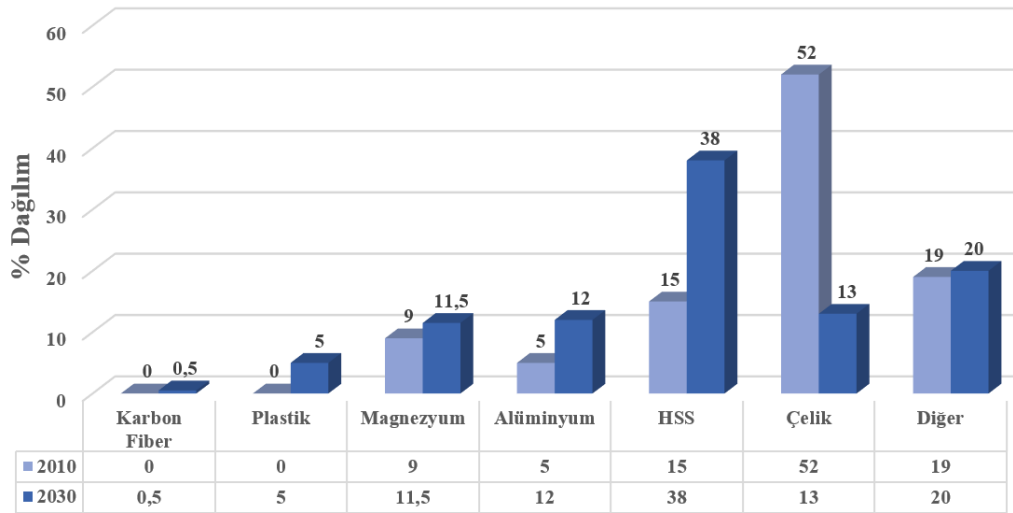
Taşıtların ağırlığının azaltılması ile ilgili uygulamalarda kullanılan bir diğer önemli malzeme türü de alüminyum alaşımlarıdır. Teknolojik geçmişi sadece yüzyılın başlarına uzanan alüminyum, hafifliği, yüksek ısı ve elektrik iletkenliği, korozyon direnci ile araç ağırlığının azaltılmasına yönelik çok farklı uygulamalarda vazgeçilmez malzeme olma özelliğini sürdürmektedir. Alüminyum alaşımları hafifletmenin sağlanabileceği en uygun malzemelerdendir. Döküm parçalarının yansira levha ürünlerinde, kaporta başta olmak üzere birçok parçanın hafifletilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Otomotiv sektöründe yapısına eklenen bakır, magnezyum, çinko gibi alaşım elementleri sayesinde istenilen özellikleri sağlayan alüminyum, maliyet olarak çelikten daha yüksek olsa da büyük oranlarda hafifletmeyi mümkün kılmaktadır. Alüminyum, 2,7 g/cm<sup>3</sup> lük yoğunluğu ile taşıtlarda performans ve emniyetten ödün vermeden taşıta bağlı olarak 300 kg'a kadar ağırlık tasarrufu sağlayan bir malzemedir. Çeliğin yerini alan çoğu alüminyum parçada kalınlık artırılmak suretiyle çelik ile aynı mukavemet sağlanabilmektedir. Fakat

bazı parçalar için alüminyum, aynı kalınlıktaki çeliğin yerini de alabilmektedir. Böylece % 65'e varan bir ağırlık tasarrufuna imkân sağlamaktadır.

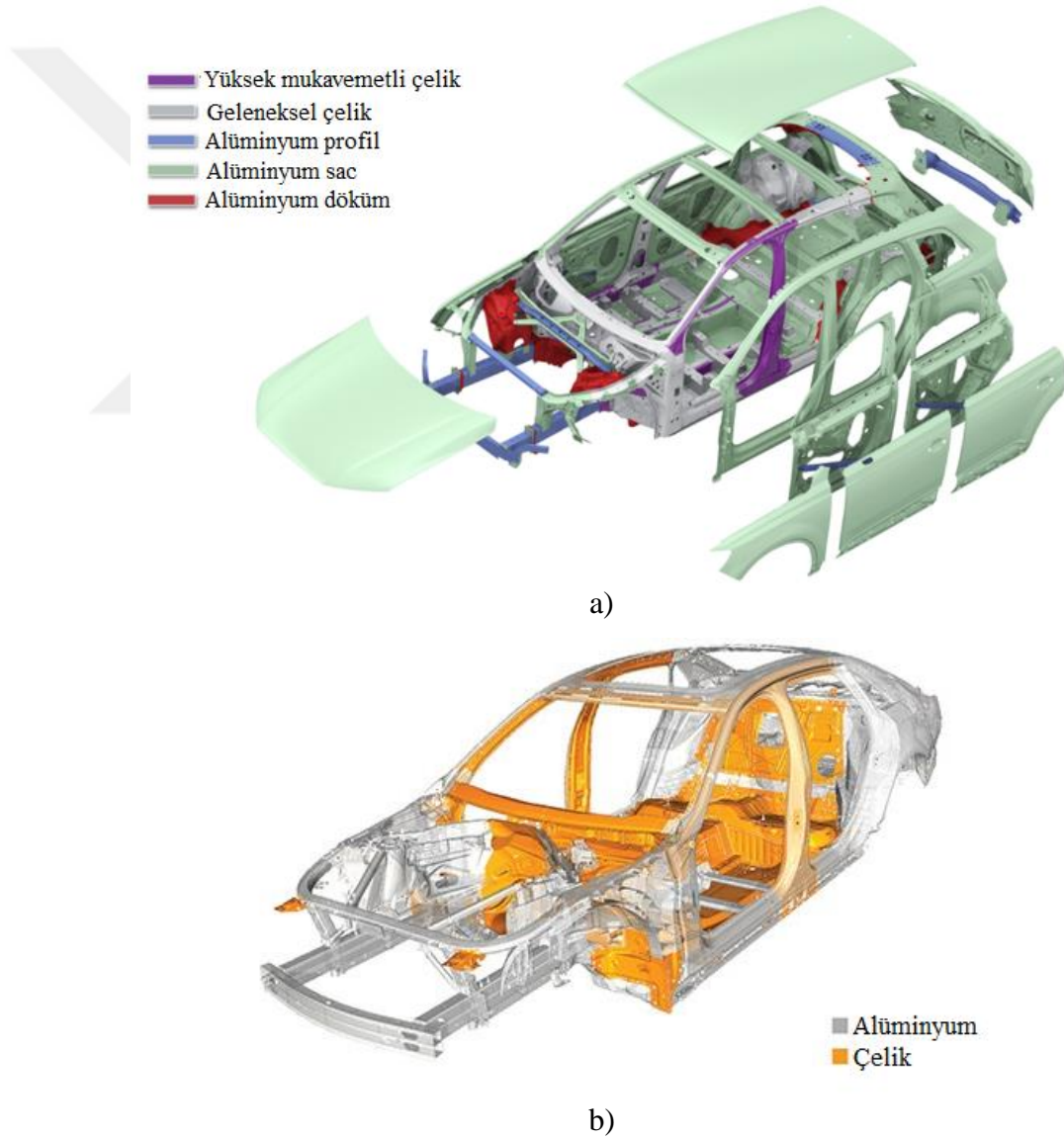
Avrupa Alüminyum Birliği (EAA) tarafından hazırlanan raporda, parçaya ve kullanım yerine bağlı olarak %25-50 oranında bir hafifletmenin alüminyum alaşımları ile mümkün olacağını belirtmiştir. Raporda optimizasyon teknikleri kullanılarak tasarlanmış ve alüminyum alaşımlarından üretilmiş bir araç gövdesinde yaklaşık %40 oranında hafifletmenin mümkün olacağı ancak bunun ekstra bir maliyet ortaya çıkaracağı açıklanmıştır (EAA 2011).

Otomotiv sektöründeki kuruluşların araç ağırlıklarını azaltma amacı ile hafif malzemelere yönelmeleri ile hafif malzeme kullanım oranlarının hızla arttığı görülmüştür. Hafif malzemelerden üretilmiş parçaların 2014 yılında küresel pazardaki değerinin yaklaşık 115 milyar dolar olduğu ve 2020 yılında bu rakamın 188 milyar dolar olacağı öngörülmektedir (Anonim 2018). Ayrıca, araç gövdesinde geleneksel çelik malzemelerin yerine yüksek mukavemetli çeliklerin ve alüminyum alaşımlarının tercih edilmesi sonucunda önümüzdeki on yıl içerisinde bu malzemelerin araç gövdesinde kullanım oranlarının da ikiye katlanacağı öngörülmektedir (Şekil 2.1).



**Şekil 2.1.** Araç gövdesinde kullanılan malzeme oranlarının yıllık % değişimi (Anonim 2018)

Taşıtların hafifletilmesi için doğru malzemenin doğru tasarım ve üretim tekniği ile bir arada kullanılması gerekmektedir. Kullanılacak olan malzemenin güvenlik, üretime yatkınlık, şekillendirilebilirlik, çevresel etkisi ve maliyeti göz önünde bulundurularak seçilmesi gerekmektedir. Geleneksel olmayan malzeme türleri ile üretilmiş parçaların sağladığı hafifletme oranları kullanılan malzemeye ve tasarıma bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Ancak maliyet açısından bakıldığında yüksek mukavemetli çelik ve alüminyum alaşımlarının öne çıktığı görülmektedir. Son yıllarda otomotiv üreticilerinin geliştirdiği birçok projede alüminyum alaşımları ve yüksek mukavemetli çelik malzemelerin taşıtı oluşturan parçalarda bir arada kullanıldığı görülmektedir (Şekil 2.2).

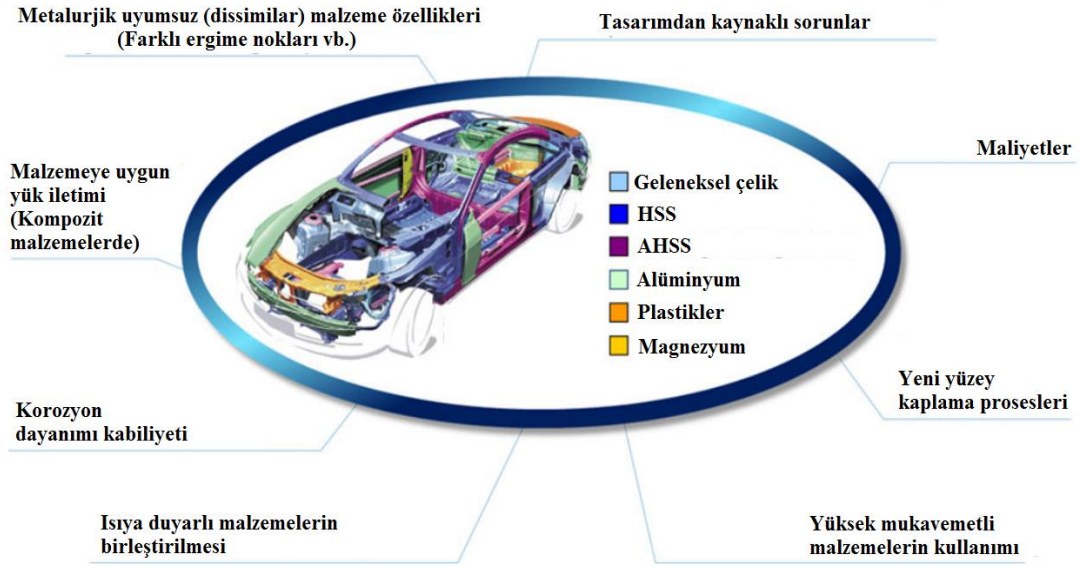


**Şekil 2.2.** Örnek araçlarda kullanılan malzeme türleri: a) Audi (Huetter 2015), b) Cadillac (Vasilash 2015)

## 2.2. Otomotiv Sektöründe Birleştirme Yöntemlerinin Önemi

Birleştirme yöntemleri otomotiv endüstrisindeki vazgeçilemez ve en önemli üretim proseslerinden biridir. Bir aracın 10.000 ile 30.000 parçadan oluşması birleştirme prosesinin ne denli önemli olduğunu ortaya koymaktadır (Mori vd. 2013). Günümüzde birleştirme yöntemleri kullanılmadan araç üretimi imkânsız haldedir. Reisgen ve Geffers (2014) referans alınan bir araçta yaklaşık 2.100 adet mekanik bağlantının ve 1.290 adet punto kaynağının kullanıldığını, yaklaşık 5000 mm lazer kaynağının, 22.000 mm de farklı ark kaynak yöntemlerinin kullanıldığını belirtmiştir.

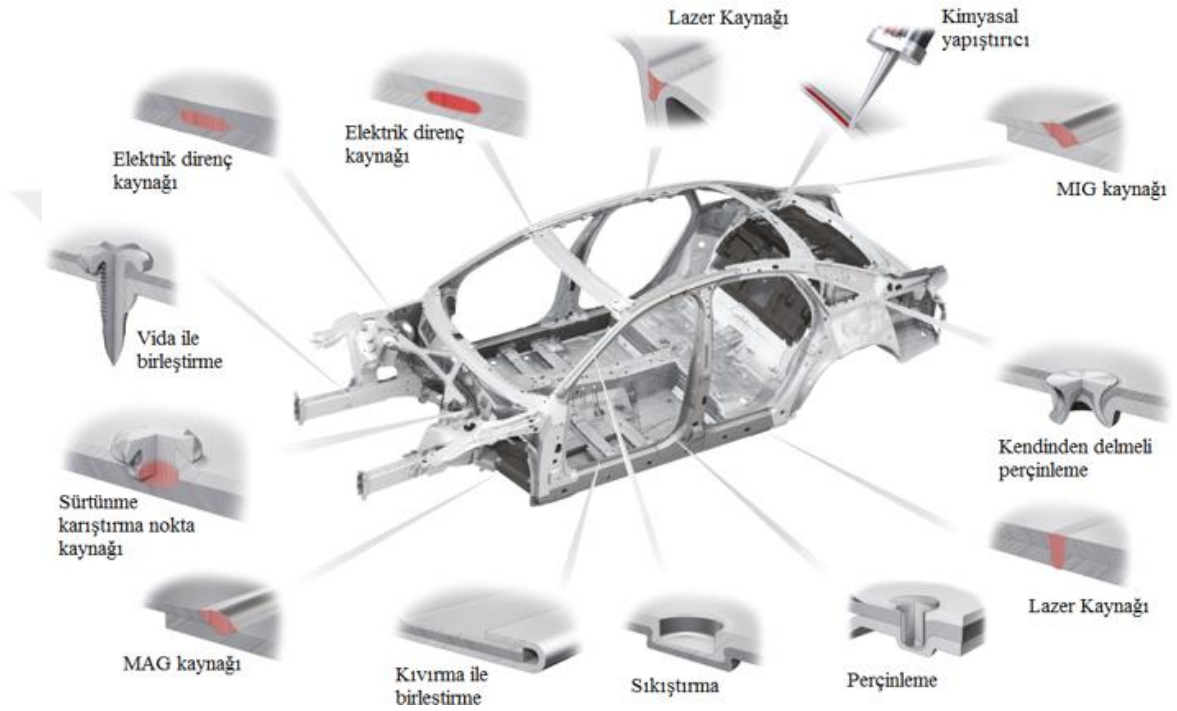
Otomotiv üreticileri araç gövdesinde ve komponentlerinde kullanılacak yöntemin seçiminde otomasyona uygunluk, tekrarlanabilirlik, tasarım kısıtı olmama, düşük yatırım ve bakım maliyeti, proses süreleri, farklı tür malzemelerin birleştirilmesinde uygunluk gibi birçok kriteri göz önünde bulundurmaktadırlar (Şekil 2.3). Araç gövdelerinde kullanılan malzemelerdeki gelişmeler ve farklılaşmalar kullanılacak olan birleştirme yöntemlerinin de gelişmesini zorunlu hale getirmiştir. Isıya duyarlı, farklı tür yüzey kaplama işlemi uygulanmış, otomasyona ve seri üretime uygun birleştirme tekniklerinin geliştirilmesi otomotiv sektörünün öncelikli hedefleri arasına girmiştir



Şekil 2.3. Otomotiv endüstrisinde birleştirme yöntemlerinin karşılaştığı zorluklar (Meschut vd. 2014b)



Taşıtların hafifletilmesinde yeni nesil malzemelerin araç gövdesinde kullanılması sonucunda geleneksel birleştirme yöntemlerinin de teknolojiye ayak uydurarak gelişim sürecine girdiği görülmüştür. Farklı tür malzemelerin araç üzerinde bir arada kullanımının artması birleştirme yöntemlerinin önemini daha da arttırmıştır. Şekil 2.4'te Audi marka bir aracın üretim aşamasında kullanılan birleştirme yöntemleri ve kullanıldığı bölgeler gösterilmektedir (Birch 2017).



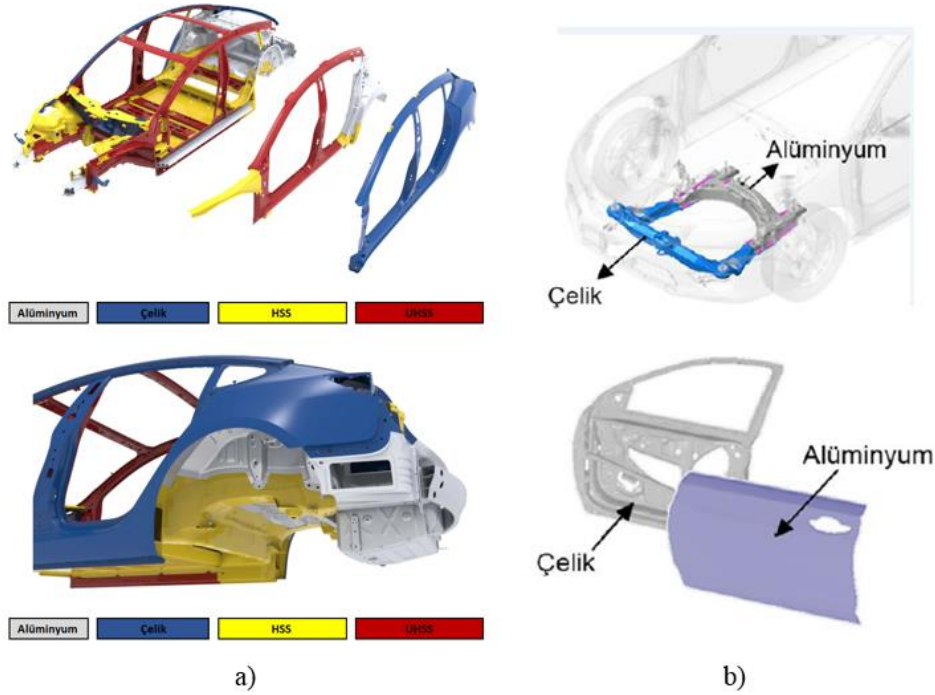
**Şekil 2.4.** Örnek araç üzerinde kullanılan birleştirme yöntemleri ve bölgeleri (Birch 2017)

Şekil 2.4'ten de görüldüğü gibi, araç üzerindeki çeşitli bölgelerde, farklı türdeki malzeme ve tasarımlar kullanılan malzemeye ve istenilen mekanik dayanıma bağlı olarak seçilen yöntem ile birleştirilmektedir. Özellikle metalürjik olarak uyumsuz malzeme çiftlerinin (dissimilar) birleştirilmesinde ortaya çıkan olumsuz durumlar seçilecek birleştirme yöntemi için oldukça önemlidir.

### 2.3. Alüminyum Alaşımları ile Çeliklerin Birleştirilmesi

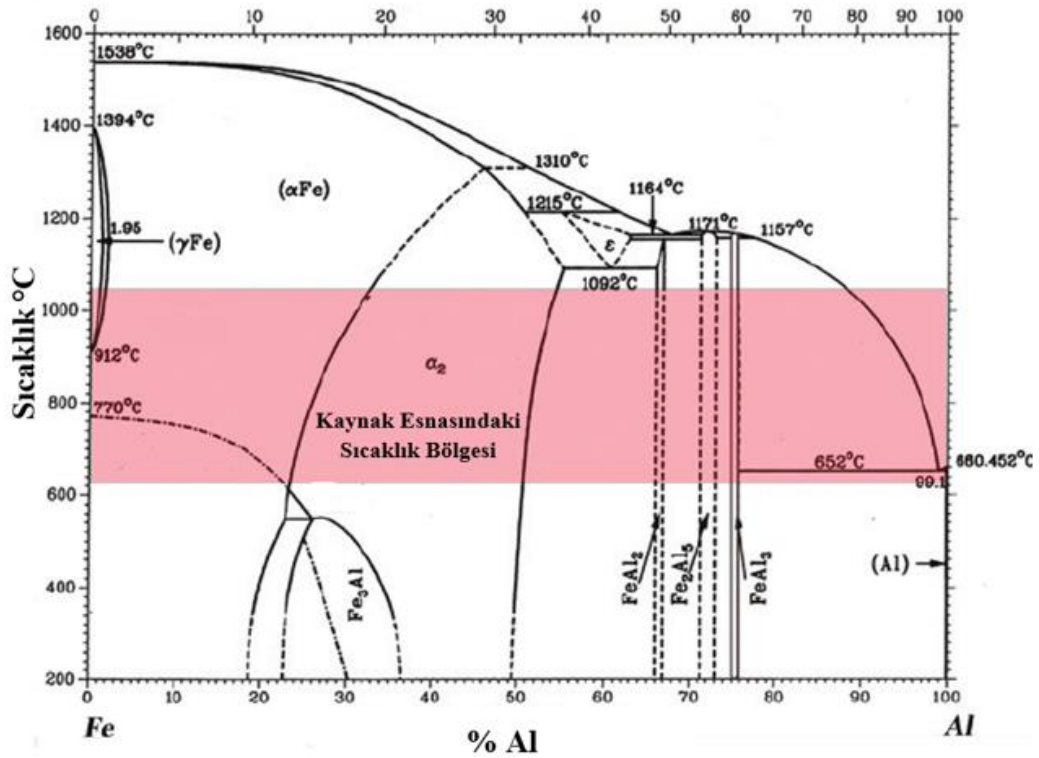
Taşıtların hafifletilmesinde uygun tasarım eşliğinde parçalarda çelik-alüminyum, çelik-kompozit, alüminyum-kompozit vb. çeşitli malzemelerin bir arada kullanılması ile hafifletme sağlanırken aynı zamanda istenilen mukavemet özellikleri de elde edilebilmektedir (Schubert vd. 2001). Bu sayede farklı malzemelerin üstünlükleri kullanılmakta, verim ve kalitenin artırılması mümkün olmaktadır.

Örneğin taşıtların çarpışma esnasında bazı kısımlarının rijitliğini koruması istenirken bazı kısımlarının da enerji absorbe ederek şekil değiştirmesi istenmektedir. Günümüzde araçların tavanları hafif alüminyum alaşımlarından, gövde ile bağlantı bölgeleri ise (pillar) yüksek mukavemetli çelik malzemelerden üretilip birleştirilmektedir. Araç kapılarında, kaput ve bagaj bölümlerinde yine farklı özelliklere sahip alüminyum alaşımları ile çeliklerin bir arada kullanıldığı uygulamalar artmaktadır. Araç kapılarında da dış sac alüminyum malzemeden üretilirken kapıyı oluşturan iskelette ve darbe önleyici barlarda yüksek mukavemetli çelik malzemeler kullanılmaktadır. Şekil 2.5'te örnek araçlar üzerinde alüminyum ve çelik malzemelerin bir arada kullanıldığı bölgeler gösterilmektedir.



**Şekil 2.5.** Örnek araçlarda yer alan alüminyum-çelik malzemeden üretilmiş parçalar: a)Tesla Model 3 (Ayre 2017), b) Honda (Hussein vd. 2015)

Metalürjik olarak uyumsuz (dissimilar) farklı iki tür malzeme birleştirildiğinde ergime bölgesinin karakteristik özellikleri kullanılan malzemelerin metalürjik özelliklerine bağlı olarak değişim göstermektedir. Birbirleri içerisinde sınırlı bir çözünürlüğe sahip metal alaşımlarının (alüminyum-demir, alüminyum-titanyum vb.) birleştirilmesinde ortaya çıkan ergiyik havuzunda katılaşma esnasında belirli oranlarda yeni fazlar oluşur. Oluşan bu yeni fazlar her iki bileşenden de farklı yapılar içermektedir. İntermetalik faz (metaller arası bileşik) olarak adlandırılan bu fazlar düşük plastik şekillendirilebilirlik, düşük yoğunluk, düşük iletkenlik gibi ana metallerin özelliklerinden farklı özelliklere sahiptirler (Callister 2007). Metalürjik olarak uyumsuz farklı iki tür malzemenin birleştirilmesinde bağlantı bölgesinde oluşan intermetalik fazlar sıcaklık, basınç, atomlar arası elektronegatiflik seviyesi ve elektron dizilişleri ile atomik yarıçaplarına bağlı olarak çeşitli farklılıklar göstermektedir (Pardal 2016). Alüminyum alaşımları ile çeliklerin birleştirilmesinde de bağlantının mekanik dayanımını sınırlayan intermetalik faz oluşumu görülmektedir (Şekil 2.6).



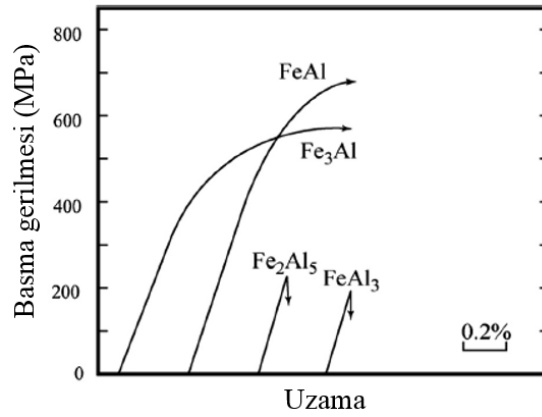
Şekil 2.6. Fe-Al denge diyagramı ve intermetalik fazlar (Ozaki ve Kutsuna 2012)

Alüminyum ile çeliğin birleştirilmesinde alüminyum (Al) ve demir (Fe) elementlerin birbiri içindeki çözünürlükleri önemli bir rol oynamaktadır. Al sıvı halde Fe içinde yaklaşık olarak %18 oranında çözünürken Fe atomları sıvı haldeki Al içerisinde tam çözünmezlik göstermektedir (Liu vd. 2015b). Bu nedenle intermetalik faz tabakası oluşmakta ve buradaki fazlar kırılgan bir yapı oluşturarak bağlantının mekanik dayanımını düşürmektedir (Katayama 2004).

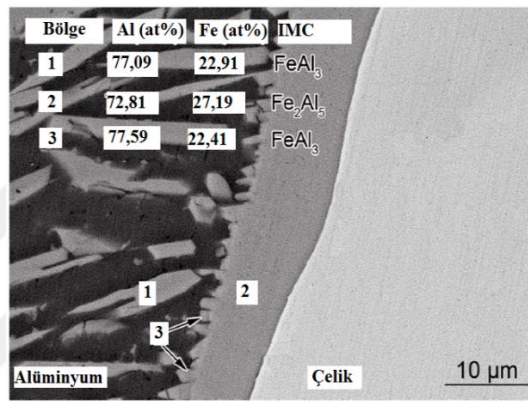
Oda sıcaklığında ve denge koşullarında alüminyum-demir temel olarak beş farklı intermetalik tabaka oluşturmaktadır. Oluşan bu fazlar farklı oranlarda Fe ve Al elementi içermektedirler. Ayrıca içerdikleri elemente göre de farklı sertlik değerlerine sahiptirler (Çizelge 2.1). Alüminyumca zengin olan fazların ( $FeAl_3$ ,  $Fe_2Al_5$  ve  $FeAl_2$ ) sertlik değerleri ve kırılganlıkları daha yüksek olduğu için özellikle önlem alınması gereken fazlardır (Schimek 2012) (Şekil 2.7). Yapılan çalışmalarda oluşan intermetalik fazların sertliklerinin alüminyum ve çeliğin sertlik değerlerinin çok üstünde olduğu görülmüştür. Kaynaklı bir çelikte maksimum sertlik değeri 350-400  $HV_{0.2}$  aralığında gözlenirken  $FeAl_3$  bileşiğinde ölçülen değer 820-980  $HV_{0.2}$  arasında olduğu, hatta  $Fe_2Al_5$  bileşiğinde sertlik değerlerinin 1000-1100  $HV_{0.2}$  değerlerine çıktığı görülmüştür (Atabaki vd. 2014).

**Çizelge 2.1.** Alüminyum-çelik birleştirilmesinde ortaya çıkan intermetalik fazlar, sertlik değerleri ve atomik yüzdeleri (Thomy ve Moller 2013, Ma vd. 2014)

İntermetalik faz	Mikro sertlik değeri (HV)	Alüminyum (%)	Demir (%)
$Fe_3Al$	250-350	12-28	66-80
$FeAl$	400-1050	~43	~53
$FeAl_2$	820-980	~51	~47
$Fe_2Al_5$	1000-1050	51-74	26-37
$FeAl_3$	1000-1100	~79	~20



Şekil 2.7. Farklı intermetalik fazların gerilme-uzama eğrileri (Ozaki ve Kutsuna 2012)



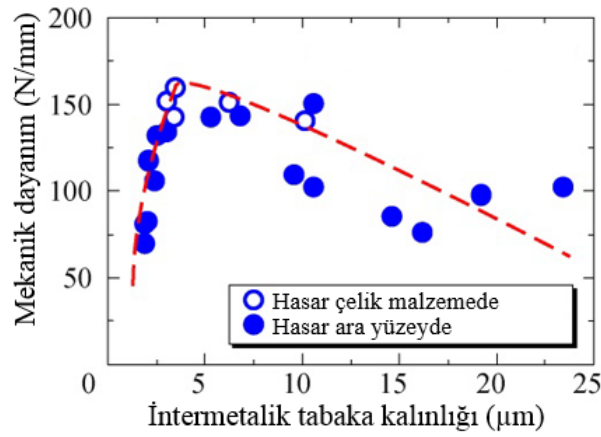
Şekil 2.8. Örnek intermetalik faz oluşumları ve bölgeleri (Cui vd. 2017)

Alüminyum alaşımları ile çeliklerin birleştirilmesinde problem oluşturan bir diğer husus ise ergime noktası, ısı iletim katsayısı gibi termal ve fiziksel özelliklerin birbirlerinden farklı olmasıdır (Çizelge 2.2). Farklı termal ve fiziksel özellikler neticesinde birleştirme sonucunda uniform olmayan ısı dağılımları ve kaynak dikişleri, termal genleşme katsayılarının farklılığı ve iç artık gerilmelerin oluşması nedeniyle soğuma esnasında çatlak oluşumları görülmektedir.

Çizelge 2.2. Alüminyum ve demirin bazı termal ve fiziksel özellikleri (Pardal 2016)

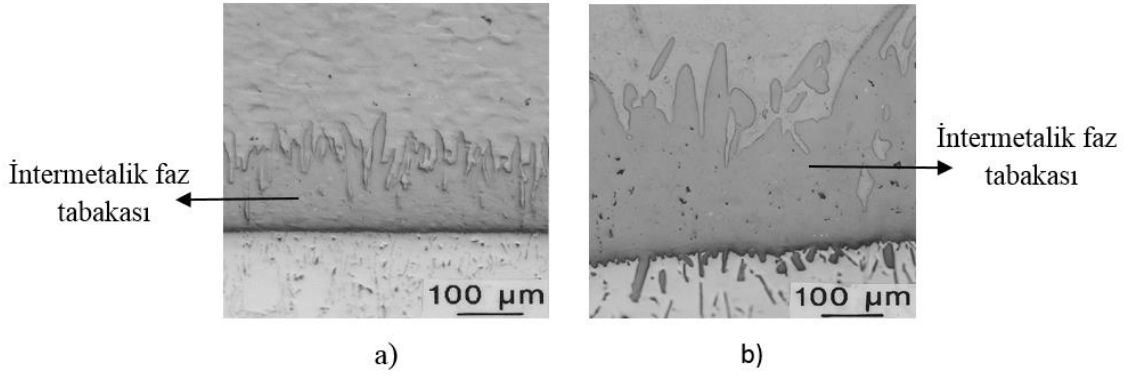
Özellik	Demir	Alüminyum
Ergime noktası (°C)	1538	660
Isıl iletkenlik (W/mK)	80.4	247
Termal genleşme katsayısı (µm//mK) – 25 °C	11.8	23.1

Alüminyum-çelik malzemelerin birleştirilmesinde yüksek mekanik dayanım elde edebilmek için birleşme bölgesinde intermetalik fazların yerine katı çözeltili oluşumuna ihtiyaç duyulur. Ancak, özellikle birleştirilecek her iki malzemenin de sıvı faza geçtiği birleştirme yöntemlerinde intermetalik faz oluşumu kaçınılmaz olmaktadır. Bu durumda oluşan kırılgan intermetalik fazların kalınlıklarını minimum değerlerde tutmak birleştirmenin mekanik dayanımını arttırmaktadır. Yapılan çalışmalarda yeterli mukavemete sahip birleştirme için tabaka kalınlığının 10  $\mu\text{m}$ 'nin altında tutulması gerektiği vurgulanmaktadır (Bouayad vd. 2003, Borrisutthekul vd. 2007, Ozaki ve Kutsuna 2012). İntermetalik tabak kalınlığındaki artış ile birlikte mekanik dayanım hızla düşüş göstermektedir (Şekil 2.9).



**Şekil 2.9.** İntermetalik tabaka kalınlığının mekanik dayanıma etkisi (Ozaki ve Kutsuna 2012)

Bağlantının mukavemetinde önemli rol oynayan intermetalik fazların oluşumu, sıcaklık ve zaman ile ilişkili olarak ortaya çıkmaktadır. Kaynak ilerleme hızı yavaş olduğu zaman yavaş soğuma ve artan ısı girdisi neticesinde alüminyumca zengin kalın intermetalik fazların oluşumu için zaman sağlanmış olur. İntermetalik tabakanın kalınlığı, sıcaklık ve zamana bağlı olarak katılma tamamlanana kadar artmaya devam ederken bağlantı bölgesinde de kırılganlığın arttığı gözlenmektedir (Şekil 2.10).



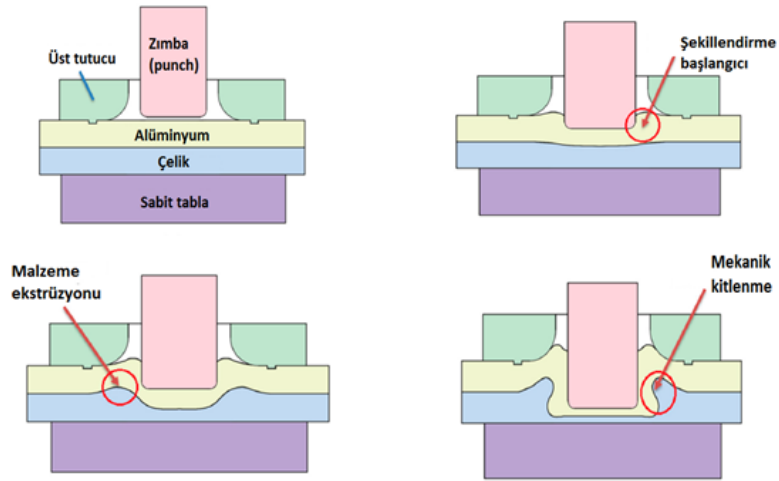
**Şekil 2.10.** Demir ve sıvı fazdaki alüminyum arasında 800 °C de zamana bağlı oluşan intermetalik faz kalınlıkları: a) 30 s, b) 30 dk. (Bouche vd. 1998)

Metalürjik olarak uyumsuz olan alüminyum ile çeliğin birleştirilmesi ile ilgili yapılan çalışmalarda birleşme bölgesinde oluşan ve mekanik dayanımı düşüren intermetalik fazları engellemek için uygulanan yöntemler proses kontrolü (uygun işlem parametreleri altında çalışılması) ve kimyasal kontrol (ara malzeme kullanımı) olmak üzere iki ana başlık altında toplanabilir (Pardal 2016). Kullanılan yöntemler uygulanan işlem koşullarına göre mekanik, kimyasal, katı hal ve termal birleştirme olmak üzere 4 ana gruba ayrılabilir (Meschut vd. 2014a).

### 2.3.1. Mekanik Birleştirme Yöntemleri

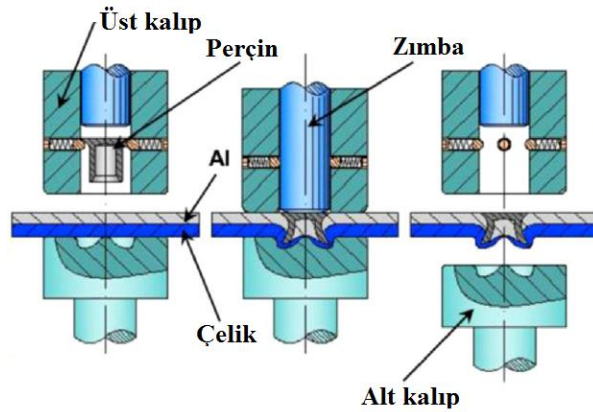
Alüminyum alaşımları ile çeliklerin mekanik birleştirilmesinde sıkıştırma (Cliching), kendinden delmeli perçinleme (Self-Pierce Riveting - SPR) ve form vererek birleştirme yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır (Meschut vd. 2014b). Sıkıştırma yöntemi alüminyum-çelik malzemelerin birleştirilmesinde kullanılan mekanik yöntemler içerisinde ilave perçine ihtiyaç duyulmadığı için tercih edilen bir yöntemdir. Bu proseste iki metal birbiri ile uygulanan kuvvetin etkisinde oluşan kanca (hook) yardımı ile birleşir (Şekil 2.11). Bu yöntemde herhangi bir ısı girdisi olmadığı için intermetalik tabaka oluşumu görülmezse de mukavemeti yüksek çeliklerde proses esnasında oluşan yüksek gerilmelerden dolayı çatlak oluşumu görülmektedir (Abe vd. 2012). Bu durumu ortadan kaldırmak için proses öncesinde ısıtma işlemi uygulanmak zorunda olması ise işlem zorluğuna ve intermetalik fazların oluşmasına neden olmaktadır.





**Şekil 2.11.** Sıkıştırma (Clinching) prosesi şematik gösterimi (Chen vd. 2017a)

Kendinden delmeli perçinleme yöntemi alüminyum ve çelik sacların birleştirilmesinde kullanılan mekanik birleştirme yöntemlerinden bir diğeridir. Mekanik sıkıştırma prosesinden farklı olarak sacların birleştirilmesi perçin yardımı ile yapılmaktadır (Şekil 2.12). Ancak bu yöntemde de birleştirilecek malzemelerin kalınlıkları kullanılan perçinin boyuna uygun olmak zorundadır. Lou vd. (2014) elektrik akımı ile ısıttıkları alüminyum-çelik malzemeleri kendinden delmeli perçin ile birleştirmişler ve ısıtma olmadan yapılan birleştirmeye göre % 12 daha fazla dayanım elde ettiklerini belirtmişlerdir. Ancak, kullandıkları ısıtma prosesi nedeni ile birleşme bölgesinde intermetalik faz oluşumu görülmüş ve uygun ısıtma parametresi seçilmediğinde oluşan fazların mekanik dayanımı düşürdüğünü belirtmişlerdir.



**Şekil 2.12.** Kendinden delmeli perçinleme (Self-Pierce Riveting) prosesi şematik gösterimi (Lou vd. 2014)



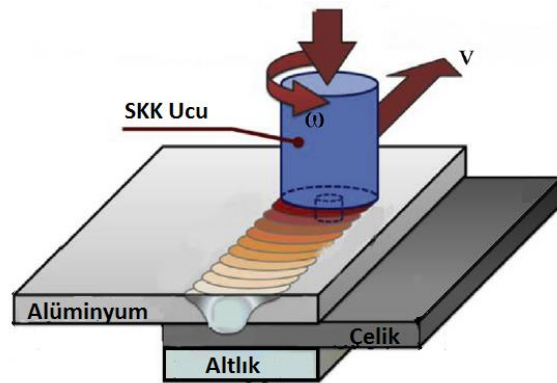
### 2.3.2. Kimyasal Birleştirme Yöntemleri

Bu yöntemde alüminyum-çelik birleştirilmesi ara yüzeye sürülen kimyasal yapıştırıcı ile sağlanmaktadır. Her bir kimyasal yapıştırıcı, kullanılacak malzeme türüne ve birleştirilecek parçanın maruz kalacağı yüklerle uygun olarak seçilmekte ve kullanılmaktadır. Sürekli bir bağlantı bölgesinin oluşması, yüksek korozyon dayanımı, birleşme bölgesinde gerilme oluşturmaması, titreşimleri azaltması ve bağlantı bölgesinin gizli olması gibi avantajlara sahiptir. Ancak birleştirme işlemi öncesinde hassas yüzey temizliği gerektirmesi, polimerizasyon için süre ihtiyacı, düşük ısıl dayanımları ve atmosferik koşullarda çabuk zarar görmesi gibi dezavantajları da bulunmaktadır (Martinsen vd. 2015).

### 2.3.3. Katı Hal Birleştirme Yöntemleri

Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi (Friction Stir Welding - FSW) ve Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynak Yöntemi (Friction Stir Spot Welding - FSSW) alüminyum-çelik malzemelerin birleştirilmesinde kullanılan katı hal kaynak yöntemleridir.

Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi The Welding Institute (TWI) tarafından geliştirilen bir yöntem olup bu yöntemde birleştirilecek parçalardan daha sert bir malzemedен üretilmiş karıştırıcı ucun kendi eksenini etrafında dönerek malzemeye dalması ve birleşme bölgesinde ısı meydana getirmesi esasına dayanır (Şekil 2.13).

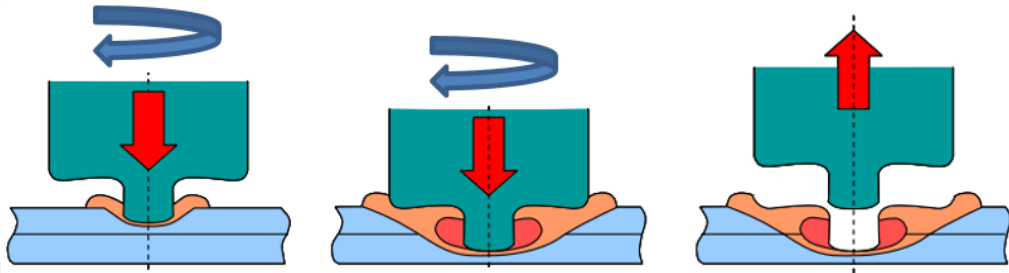


**Şekil 2.13.** Sürtünme karıştırma kaynağı şematik görüntüsü (Pourali vd. 2017)

Karıştırıcı ucun birleşme bölgesine girmesi ile geniş çaplı omuz (shoulder) diye tarif edilecek metal kısım birleştirilecek yüzeylere önce bir temas yapar. Karıştırıcı ucun

dalma derinliği kaynak nüfuziyetini belirler. Omzun malzemeye teması kaynak bölgesine ilave bir ısı sağlar ve bu ısı sayesinde birleşme bölgesindeki malzemeler yumuşar.

Sürtünme karıştırma kaynak yönteminden türetilen Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynak yöntemi ile de bu malzeme türlerinin birleştirilmesi mümkündür (Şekil 2.14). Mazda ve Kawasaki Heavy Industries (KHI) tarafından geliştirilen bu kaynak yöntemi ilk olarak 2003 yılında Mazda RX-8 seri üretim otomobilinde kullanılmıştır. Elde edilen bağlantılarda ısı girdisine bağlı olarak distorsiyon miktarının az olması yöntemin avantajlarındanır. İlk geliştirildiği dönemde alüminyum alaşımlarının birleştirilmesinde kullanılan bu yöntem günümüzde farklı tür malzemelerin birleştirilmesinde de kullanım alanı bulmaktadır. Pim çapı, dalma derinliği, devir sayısı ve kaynak süresi gibi belli parametrelere bağlı olarak bağlantının özelliği değişmektedir.



**Şekil 2.14.** Sürtünme karıştırma nokta kaynağı şematik görüntüsü

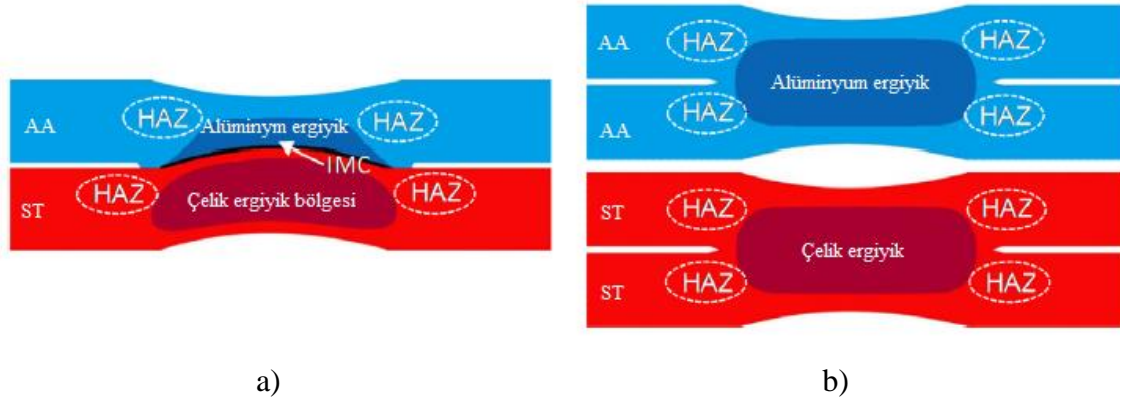
Literatürde birçok araştırmacı sürtünme karıştırma kaynağı ve sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile alüminyum-çelik bağlantıları elde etmeye çalışmış, işlem parametrelerinin bağlantıların mekanik ve metalürjik özelliklerine olan etkilerini incelemişlerdir. Liu vd. (2015a) AA6061 alüminyum alaşımları ile TRIP780 çelik sacı alın kaynak formatında sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirmişlerdir. Optimum dalma derinliği ve ilerleme hızı altında bağlantının mekanik dayanımını alüminyum ana malzeme dayanımının %85'i seviyelerine kadar çıkarmayı başarmışlardır. Pourali vd. (2017) proses parametrelerinin intermetalik faz oluşumuna olan etkisini incelemişlerdir. En yüksek mekanik dayanımın düşük ilerleme hızlarında ve yüksek devirlerde yapılan kaynaklarda elde edildiğini belirtmişlerdir. Endüstriyel uygulamalarında ise Honda firması ön şasede alüminyum-çelik bağlantısını sürtünme karıştırma kaynağı ile gerçekleştirerek ağırlıkta %25 oranında bir hafifletme sağladıklarını belirtmişlerdir (Hussein vd. 2015). Ding vd. (2017) sürtünme karıştırma nokta kaynak yöntemi ile alüminyum ile çeliği birleştirdikleri çalışmalarında

batma derinliğinin artması ile mekanik dayanımın arttığına vurgu yapmışlardır. Piccini ve Svoboda (2015) pin boyunun mekanik özelliklere olan etkisini incelemişler ve bağlantı bölgesinin kısa uçlu pin ile yapılan kaynaklarda daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Bir diğer çalışmalarında ise mekanik dayanımın batma derinliğinin artması ile arttığını açıklamışlardır (Piccini ve Svoboda 2017).

Bu yöntemler katı hal birleştirme yöntemi olsa da proses esnasında ısı oluşumu gözlenebilmektedir. Oluşan ısı neticesinde de bağlantının mekanik dayanımını düşüren intermetalik fazların oluşumu kaçınılmaz olmaktadır. Ayrıca birleştirilecek parçalara temas etme zorunluluğu, otomasyona elverişli olmaması ve konvansiyonel tezgâhlara sahip olmaması bu birleştirme yöntemlerinin dezavantajları arasındadır.

#### **2.3.4. Termal Birleştirme Yöntemleri**

Alüminyum alaşımları ile çelik malzemelerin birleştirilmesinde termal birleştirme yöntemlerinden olan elektrik direnç kaynağı da kullanım alanı bulmaktadır. Şekil 2.15'te şematik olarak elektrik direnç kaynağı ile birleştirilmiş aynı tür malzemelerin ve alüminyum-çelik malzemesinin kesit görüntüsü verilmiştir. Şekil 2.15'ten de görüldüğü gibi alüminyum malzeme ile çelik arasındaki birleşme bölgesinde intermetalik faz oluşumu söz konusudur. Bu yöntemde her iki malzeme de sıvı faza geçtiği için intermetalik tabaka oluşumu görülmektedir. Bağlantının mekanik dayanımını düşüren bu fazların oluşumunu azaltmak için çeşitli tedbirler alınmaktadır. Elektrik direnç kaynağında ayrıca aşırı akım verilmesi sonucunda alüminyum malzemedeki incelmeye oluşumu da gözlenmektedir (Chen vd. 2017b). Ayrıca alüminyum malzeme üzerindeki oksit tabakası birleşme öncesinde kaldırılmazsa olumsuz sonuçlar doğurmaktadır. Literatürde birçok araştırmacı elektrik direnç kaynağı ile alüminyum alaşımları ile çelik malzemelerin birleştirilmesini incelemiş ve kaynak esnasında ortaya çıkan olumsuz durumları (intermetalik tabaka, oluşumu, alüminyumun eriyerek incelmeye, elektrotlardaki aşınmalar vb.) giderebilmek adına çeşitli yöntemler geliştirmiştir (Qui vd. 2010, Zhang vd. 2011).



**Şekil 2.15.** Elektrik direnç kaynaklı parçaların şematik kesit görüntüsü: a) alüminyum-çelik, b)çelik-çelik ve alüminyum-alüminyum (Chen vd. 2017b)

Yapılan literatür araştırması sonucunda alüminyum çelik malzemelerin birleştirilmesinde farklı türde birleştirme metotlarının kullanıldığı görülmüştür. Bu uygulamalar içerisinde mekanik birleştirme yöntemlerinde çeliğin şekillendirilmesinde zorluklar yaşandığı, kimyasal yöntemlerde proses değişkenlerinin oldukça fazla olduğu ve katı hal ve termal birleştirme yöntemlerinde ise proses esnasında oluşan ısının intermetalik fazların kısıtlanması için kontrol edilmesi gerektiği görülmüştür.

Lazer kaynak yöntemi tüm bu birleştirme yöntemlerine göre oldukça avantaja sahip bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Termal yöntemler ile kıyaslanacak olursa, elektrik direnç kaynağında kaynak tabancaları birleştirilecek bölgedeki noktaya iki adet elektrot ile ulaşmak zorundadır. Bunun olması için tasarım aşamasında parçalar üzerinde erişim delikleri öngörülür. Ayrıca elektrot taşıyıcısının erişimi tasarımda dar alanlar oluşmasını da engellemektedir. Lazer kaynak yönteminde ise tek taraflı ve temassız bir işlem gerçekleştirildiği için tasarım özgürlüğünü arttırmaktadır.

## 2.4. Lazer Teknolojisi

### 2.4.1. Lazer Tanımı ve Tarihçesi

Lazer sözcüğü İngilizce “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation - LASER” cümlesindeki sözcüklerin baş harflerinden oluşmuş olup, “Uyarılmış Işınım Yayımıyla Işığın Yükseltilmesi” anlamına gelmektedir.

Lazer ile ilgili ışık yayılım teorisi ve uyarılmış yayılım kavramlarını ilk olarak 1917 yılında Albert Einstein ortaya koymuştur. Daha sonra 1951 yılında Charles Townes tarafından “Microwave Amplification of Stimulated Emission of Radiation - MASER“ yani “Işınmanın Uyarılmış Yayılım ile Mikrodalga Yükseltilmesi” icat edilmiştir. Townes ve Schawlow ise 1958 yılında ilk defa “Optik Maser” yani günümüzdeki lazerin ilk halini icat etmişlerdir.

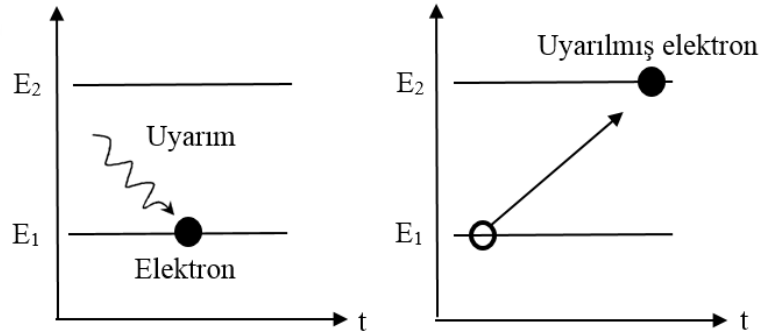
1960’lı yıllarda lazer ile ilgili çalışma ve icatlar hız kazanmıştır. 1960 yılında Maiman ilk Ruby lazerini icat etmiş, 1961 yılında ise Fox ve Li optik rezonatörlerin analizini gerçekleştirmiştir. 1963 yılında Kumar ve Patel tarafından kızıl ötesi bölgede ışıma veren ve kesme, delme kaynak gibi endüstriyel işlemlerde günümüzde yaygın kullanım alanı bulan CO<sub>2</sub> lazeri geliştirilmiştir. Endüstriyel anlamda kullanım alanı bulan bir diğer lazer türü olan Nd:YAG lazeri ise Geusic ve arkadaşları tarafından 1964 yılında icat edilmiştir. Sorakin ve Stevenson flaş pompalı çubuk tasarımı ile uranyum katkılı kalsiyum flüorür lazerlerini geliştirmeye çalışmışlardır. Bu yıllarda birçok araştırmacı lazer etkisini gösterebilecek yeni malzemeler bulmak için çalışmalar yapmışlardır. Javan ve arkadaşları neon-helyum (Ne-He) gaz karışımı ortamında lazer etkisini elde etmişlerdir (Özdemir 2012).

Lazer ile ilgili çalışmalar 1970’li yıllarda da gelişmeler göstermiş ve ilk dinamik gaz lazeri Gerry tarafından geliştirilmiştir. Bu lazerin çalışma mantığı CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>’nin oksijen ile yakılarak karbondioksit ve su ortaya çıkarılması ile ışıma yapılmasına dayanmaktadır. 1970’li yıllardaki gelişmelerden sonra lazer teknolojisinin endüstriyel üretim prosesleri içerisindeki yeri artmaya başlamıştır. Daha sonraki yıllarda diğer lazer türleri geliştirilmiş ve günümüzde savunma, uzay, havacılık, tıp, haberleşme, bilgisayar gibi neredeyse bütün sektörlerde kullanım alanı bulmuştur (Steen ve Mazumder 2010).

## 2.4.2. Lazer Işınının Elde Edilmesi

Lazer ışığı, aynı frekanslı, yüksek genlikli, birbirine paralel, aynı fazda ve tek renkli dalgalardan oluşmaktadır (Steen ve Mazumder 2010). En temel hali ile lazer ışınının elde edilmesi ısıtılıp sıcaklığı artırılmış bir metalin kızarıp ışık yayması olarak ifade edilebilir.

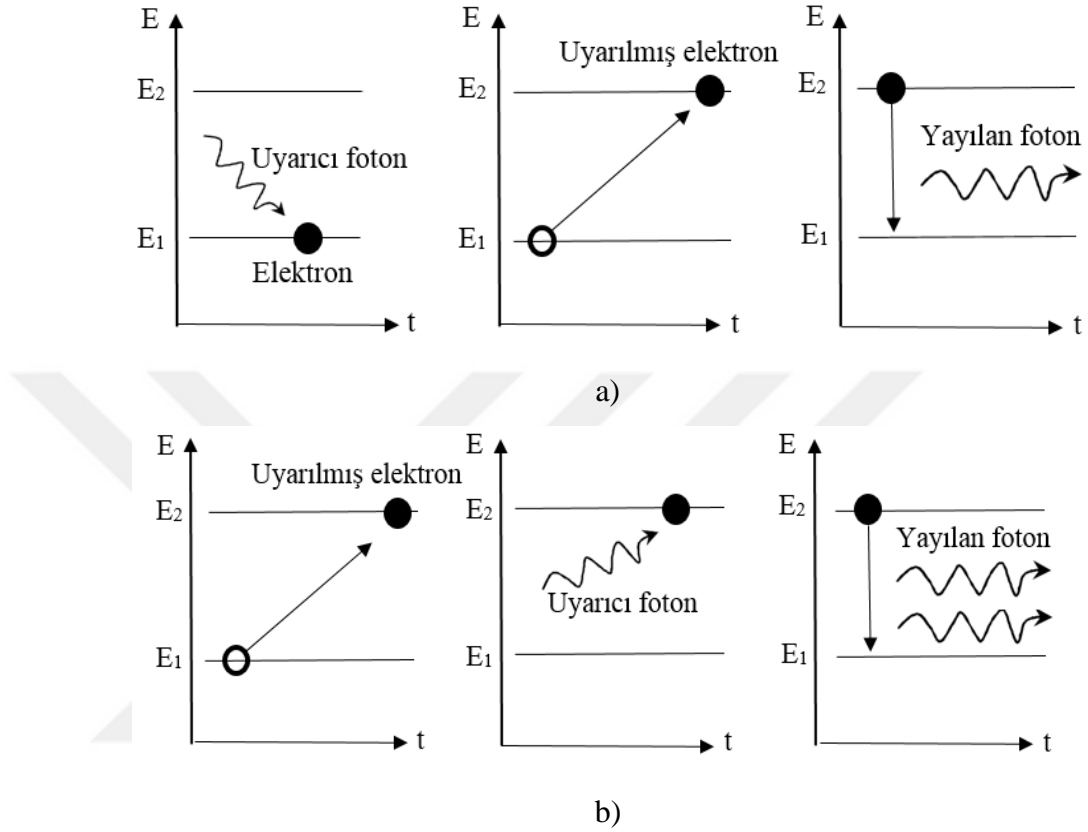
Evrendeki her elementin temel yapısını oluşturan atomlar bir çekirdek ve bunu çevreleyen elektron bulutundan oluşmaktadır. Her bir atom farklı seviyelerde ve belirli bir iç enerjisine sahiptir. Minimum enerji seviyesine göre de atomlar bu enerjilerini en düşük seviyede tutma eğilimindedirler. Atomun minimum enerjili durumdaki enerjisine taban enerji seviyesi ( $E_1$ ) denir. Bu enerji seviyesindeki atomun elektron miktarı ise  $N_1$  ile ifade edilsin. Atom bulunduğu bu taban enerji seviyesinden ısıtma, basınç uygulama, elektron veya hızlandırılmış parçacık bombardımanına maruz tutma ve ışık demeti etkisi uygulama gibi tahrik yöntemleri ile daha yüksek enerji seviyesine ( $E_2$ ) ulaştırılır. Bu mekanizmalar ile tahrik edilerek enerji seviyesi artırılan atoma uyarılmış atom denir. Enerji seviyesi artan bu atomdaki elektron sayısı ise  $N_2$  ile ifade edilsin. Enerji seviyesindeki bu artış Şekil 2.16'da gösterilmiştir.



**Şekil 2.16.** Elektron enerjisinin uyarım ile artırılmasının şematik gösterimi

Tahrik edilerek bir üst enerji seviyesine çıkarılan atom dışarıdan herhangi bir etki olmadığı durumda  $10^{-8}$  saniye gibi kısa bir sürede kendiliğinden temel enerji seviyesine yani minimum enerjili ( $E_1$ ) haline geri döner. Bu enerji seviyesindeki geçiş esnasında daha önceden almış olduğu enerjisi ( $E_2-E_1$ ) elektromanyetik dalga yani foton olarak ortama geri verir. Dışarıdan herhangi bir etki olmadan gerçekleşen bu olaya kendiliğinden yayınım (spontaneous emission) denir (Şekil 2.17a). Dışarıdan bir mekanizma ile uyarılarak enerji seviyesi  $E_2$ 'ye çıkarılmış olan atom bir alt enerji seviyesine geçiş

yaparken enerji farkını foton olarak ortaya çıkartır. Tam bu esnada atoma belirli bir dalga boyunda foton çarptırılırsa atom kendisine çarptırılan foton ile eşit frekansa ve enerjiye sahip iki tane foton yayar (Şekil 2.17b) (Amada Miyachi 2015).



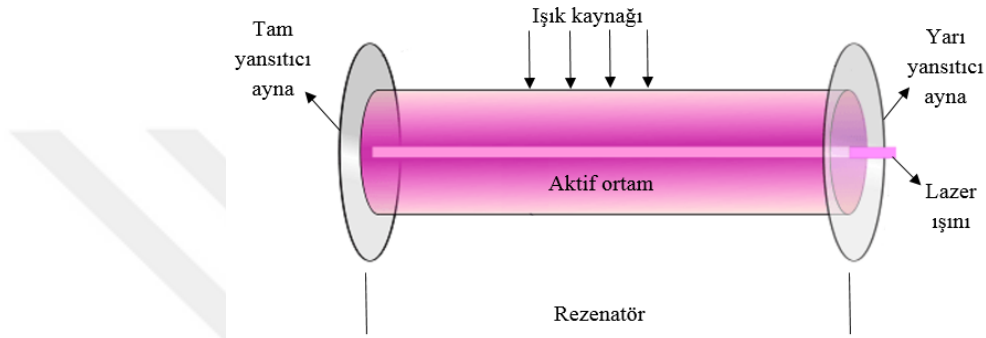
**Şekil 2.17.** a) Kendiliğinden yayılım ve b) foton ile uyarılmış yayılım şematik gösterimi

Bu uyarma işlemi devam ettiği sürece atomun enerji seviyeleri ve bu enerji seviyelerinden geri dönüşlerde yayılan foton sayısı katlanarak artar. Bu artış neticesinde de aynı fazda fotonların bir araya toplanması ile ışın demeti elde edilir. Aynı frekansta yani, aynı dalga boyunda yapılan foton üretimine uyarılmış yayılım, oluşan ışınım da kendiliğinden ışınım adı verilir.

Uyarım işlemi sonucunda oluşan fotonların paralel iki ayna arasında toplanması sonucunda aynı yöne doğru çok sayıdaki fotonun paralel ışınlar halinde bir noktadan yayılması sağlanır. Lazer ışınının enerjisinin büyümesinin temelinde de milyonlarca küçük enerji kaynaklarının çok dar bir hüzmeye halinde aynı yönde hem yan yana hem de art arda birleşmesi bulunmaktadır. Lazerin çalışması için enerji seviyesi düşen atom

sayısından daha fazla sayıdaki atomun uyarılacak enerji seviyelerine yükseltilmesi gerekir. Bunu sağlayabilmek için bir ışık kaynağı (pompa ünitesi) kullanılır.

Lazer ışınının elde edilmesi için optik bir rezonatör içerisine yerleştirilmiş ışık kaynağı, bu ışığın etkilemesi sonucunda lazer ışını üretecek olan aktif maddeyi içerisinde bulunduran bir aktif ortam ve aktif ortamın bir ucunda tam diğer ucunda yarı yansıtıcı aynalar bulunmalıdır. Bu sistem içerisinde üretilen lazer ışını da optik mercek sistemi üzerinden çıkış yapmaktadır (Şekil 2.18).



**Şekil 2.18.** Lazer üretim cihazının temel parçaları

Işık kaynağı ve aktif ortam lazer türüne göre değişiklik göstermektedir. Örneğin pompalama kaynağı olarak rezonatör içerisine yerleştirilmiş flaş lambası kullanılabilir. Uyarma lazer türüne göre farklılık gösterir. Örneğin, yarı iletken ve gaz lazerlerde ortamdan elektrik akımı geçirilmesiyle gerçekleştirilirken katı ve sıvı lazerlerde ise optik pompalama yöntemi ile uyarma işlemi gerçekleştirilir.

Lazer ışını üretecek olan aktif ortam gaz, katı, sıvı veya yarı iletken olabilmektedir. Işık kaynağını etkileyerek lazerin oluştuğu bu ortamın türüne göre lazerler isimlendirilir. Örneğin aktif ortamda CO<sub>2</sub> gazı kullanılıyorsa CO<sub>2</sub> lazeri, helyum-neon kullanılıyorsa He-Ne lazeri ismini alır. Katı ortam (solid-state) kristal kullanılan durumlarda kristalin optik özelliklerini arttırmak için düşük konsantrasyonlarda kristale katılan “dopant” madde ismi (Neodimiyum vb.) ve kristalin ismi (İtriyum-Aluminum-Garnet - YAG) bir araya getirilerek Nd:YAG lazeri ismi ile anılır.

Aktif ortamda fotonlar tarafından oluşturulan ışın demetinin üretim türüne göre de lazerler sınıflandırılmaktadır. Lazer ışını sürekli olarak üreten lazerlere sürekli



(continuous) dalga lazerler denir. Lazer ışını periyodik darbeler ya da atımlar halinde üreten lazerlere ise darbeli (pulsed) lazerler denir.

### 2.4.3. Lazer Işınının Özellikleri

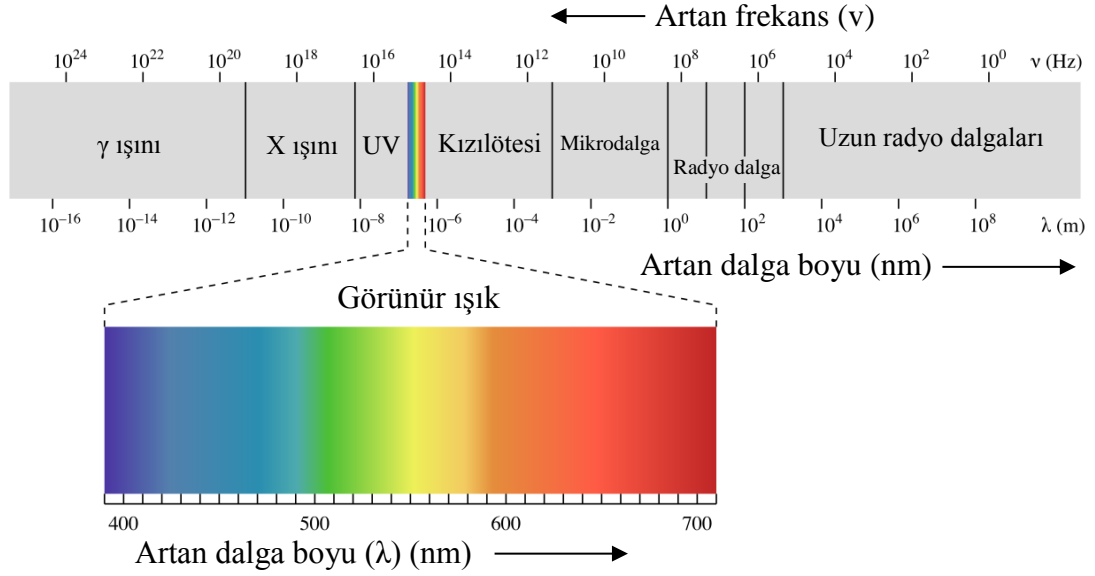
Lazer ışını diğer geleneksel ışın türlerine göre şiddet, yönlendirilebilirlik, uyumluluk ve bant genişliği gibi üstün özelliklere sahiptir. Lazer ışınının geleneksel ışınlardan farkını anlamak için bir ampulün yaydığı ışın ile kıyaslanabilir. Ampulün içindeki wolfram teli elektrik enerjisi ile uyarılarak bir fotonu çevreye salar ve tekrar eski enerji konumuna geri döner ve yeni bir uyarıya kadar bulunduğu enerji konumunda bekler. Bekleme süresince diğer atomlar foton yaymaya devam eder ve elde edilen ışık demet halinde bir yüzeye yönlendirilirse düzensiz bir foton yığını sonucunda oluşan ışında düzensiz olduğu görülür. Fotonlar yönlendirildikleri malzeme üzerinde sürekli aynı noktaya çarpmayıp, wolfram telinin şekline bağlı olarak belirli bir bölgede dağılırlar. Enerjinin geniş bir hacme uzun bir zaman aralığında dağılması nedeni ile de güç yoğunlukları çok düşük seviyelerde kalır (Soydan 2015). Lazer ışınında ise üretilen fotonların tek, ince ve yüksek genlikte olması nedeni ile milyonlarca foton çok kısa süre içerisinde yönlendirildiği bölgedeki dar bir alana çok yüksek güç yoğunluk seviyelerinde etki edebilir.

Uygulamanın gerektirdiği özel durumlara göre lazer ışını mikron seviyesindeki küçük çaplara bile odaklanabilir. Bu denli küçük boyutlarda odaklanabilmesi sayesinde lazerler ışın kaynağından çıkıştaki güçlerinden çok daha fazla güçlerde işlem yapabilmeye olanak sağlarlar. Lazer kaynağına göre değişiklik gösterse de örnek verilecek olursa, çıkışta  $10^3$  W/cm<sup>2</sup> güç yoğunluğuna sahip lazer ışını, ışın yarıçapının 0,5 mm'nin altına düşmesi ile  $10^6$  ile  $10^8$  W/cm<sup>2</sup> gibi oldukça yüksek güç yoğunluklarına çikabilir.

Normal ışık, çeşitli dalga boylarında, çok renkli (farklı faz ve frekansta) dalgalardan meydana gelir. Ancak lazer ışını monokromatik yani tek renkli bir ışındır. Dalga boyu ve lazer özelliği belirli olan elektromanyetik dalgadan oluşur. Lazer ışınının tek renkli olmasının sebebi fotonların dalga boyunun çok dar bir alanda toplanmış olmasıdır. Farklı tür uygulamalar için farklı tipte lazerler kullanılıyor olsa da lazerlerin büyük bir kısmının dalga boyları kızılötesi alanda bulunur.

Lazer ışınının optik frekans bölgesi yaklaşık olarak bir trilyon hertz ile üç bin trilyon hertz arasında yer alır. Bu bölge, kırmızı ötesi ışınları, görülebilen ışınları ve elektromanyetik

spektrumun morötesi ışınlarını kapsar (Şekil 2.19). Buna karşılık mikro dalga frekans bölgesi yaklaşık olarak 300 milyon hertzden 300 milyar hertze kadar uzanır. Yani, lazer çok yüksek frekanslarda çalışmaktadır.



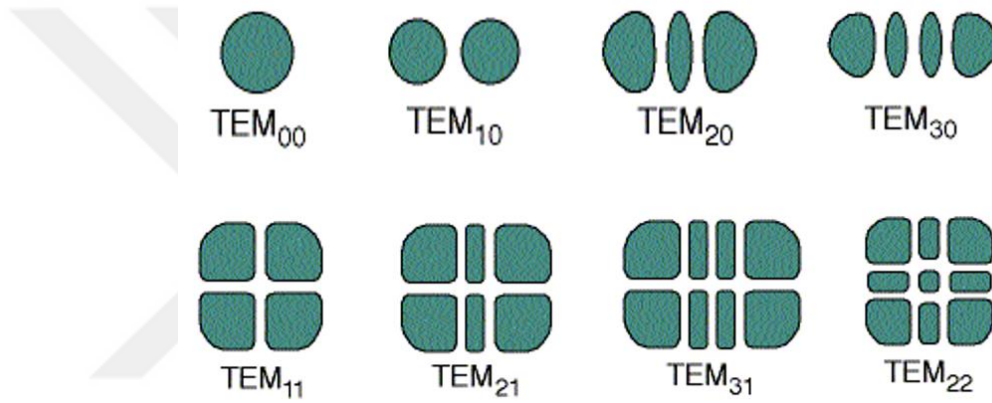
**Şekil 2.19.** Elektromanyetik spektrum (Anonim 2017)

Ultraviyole lazerler adından da anlaşılacağı gibi ultraviyole (UV) ışık bölgesinde 355 nm dalga boyunda çalışırlar. Fiber lazerler ise kızılötesi bölgesinde yani 1070 nm dalga boylarında çalışırlar. En yüksek dalga boyuna sahip lazerler ise CO<sub>2</sub> lazerleridir. Bu tür lazerler kızılötesi bölgesinde 10604 nm dalga boyunda çalışırlar (Şekil 2.19). Nd:YAG lazerleri 1,06  $\mu$ m dalga boyunda kızıl ötesi bölgede çalışmaktadır. Alüminyum – Galyum – Arsenit lazeri yine kızıl ötesi bölgede 0,85 – 0,90  $\mu$ m arasındaki dalga boyunda çalışmaktadır. İlk geliştirilen lazer olan Ruby lazeri görünür bölgenin kırmızı dalga boyu kısmında 0,6943  $\mu$ m dalga boyunda çalışmaktadır. Helyum – Neon lazeri görünür bölgenin turuncu ve 0,6328  $\mu$ m dalga boyu bölgesinde çalışmaktadır. Argon lazeri ise görünür bölgede mavi ile yeşil renk bölgesinde çalışmaktadır.

Lazer ışınının önemli bir diğer özelliği de çok dar bant genişliğinde çalışıyor olmasıdır. Lazer ışını elde edilme yöntemi açısından oldukça yüksek derecede demetlenmektedir. Geleneksel ışınların demetlenmesi için mercekle ve aynalar yeterli olabilirken lazer ışınında elektromanyetik dalga sadece optik eksene paralel yönde kuvvetlendirilerek paketlenmektedir. Çıkan ışın bu nedenle paraleldir. Ancak, lazer kaynağından

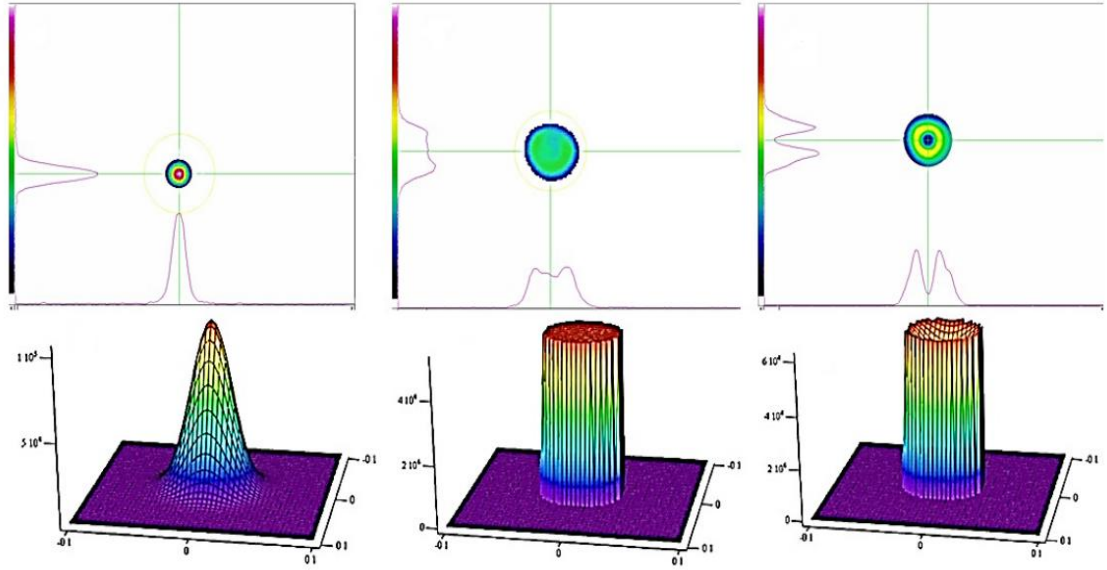
uzaklaştıkça ıraksama eğilimi görülmektedir. Bu eğilim lazer kaynağına göre farklılık göstermekle birlikte gaz lazerler için bir kilometrede yaklaşık 10 cm seviyesindedir.

Odaklanmış haldeki lazer ışını, endüstriyel alanda kullanılan en yüksek güç yoğunluğuna sahip ışın kaynaklarından biridir. Bir lazer ışınının çıkış noktası enine elektromanyetik mod (Transverse Electro Magnetic Mode –  $TEM_{m,n}$ ) ile ifade edilir. Mod terimi ile lazer ışın kesitindeki yoğunluk dağılımı ifade edilmektedir. Yani, bir lazer ışınının  $TEM_{m,n}$  değeri ışınının ışın üretimine dik düzlemdeki ölçülen ışınım yoğunluğunu gösterir ve m ile n indisleri çıkan ışık demetine dik doğrultudaki enine düğüm sayılarını gösteren tamsayılardır (Şekil 2.20).



**Şekil 2.20.** Lazerde farklı tür enine elektromanyetik mod (TEM) çeşitleri

Endüstriyel alanda kullanılan lazerlerin büyük bir kısmı  $TEM_{0,0}$  modunda çalışmaktadır. Gaussyen (gaussien) olarak adlandırılan bu modun kullanım sebebi ışının dik kesiti üzerindeki akı yoğunluğu ideal bir gaussyen halinde olmasıdır (Şekil 2.21). Bu tür bir ışınım modunda diğer modlarda görülen ışının dik kesitindeki elektrik alan içinde faz kayması görülmemektedir. Bu nedenle, tam olarak konumsal faz uyumludur ve ışın demetinin açısal sapması çok küçüktür. Bu sayede ışın demeti çok küçük bir nokta şeklinde odaklanabilmektedir. Çok küçük bir noktada odaklanabilir olması sayesinde endüstriyel işlemler (delme, kesme, kaynak) için çok yüksek güç yoğunlukları sağlamaktadır.



**Şekil 2.21.** Farklı modlardaki ışın demetleri (a) gaussyen, (b) düz ve (c) ters gaussyen (Okunkova vd. 2014)

Gaussyen enerji dağılımı, optik sistem aralığında yayılım yolu boyunca her noktada sabit (gaussyen) olarak kalmaktadır. Bu sayede ışının optik sistemdeki her bir noktada hangi profilde olduğu tespit edilebilmektedir.

Lazerde ışın modları içerisinde gaussyen mod en basit simetridir. Bu moddaki güç yoğunluk profili incelenirse güç yoğunluğunun ışın merkezinde en yüksek seviyede olduğu kenarlara doğru ise bu yoğunluğun azaldığı görülür. Gaussyen modun dışında nispeten karmaşık geometriye sahip dalgalı modlarda vardır. Çeşitli modların arka arkaya veya çakışacak şekilde oluşması ile de çoklu modlar ortaya çıkar.

Gaussyen profildeki ışın demeti rezonatör özelliklerine bağlı olarak bazı sapmalar göstermektedir. Lazer ışınındaki bu sapmalar ışın kalitesini etkilemektedir. Örneğin  $TEM_{0,0}$  gaussyen profile sahip bir ışının kalitesi  $M^2 = 1$  olarak ifade edilir. Lazer ışını düşük kalitede olduğu durumlarda  $M^2 > 1$  olarak gösterilir. Lazer kaynağı için kullanılan ışınlarda  $M^2$  değeri 1'den küçük 0,1'den ise büyüktür (Çelen 2006)

#### 2.4.4. Lazer Çeşitleri

Lazerler, ışının üretildiği aktif ortamın türüne göre isimlendirilirler. Bu sınıflandırmaya göre katı, sıvı, gaz ve yarı iletken lazerler olmak üzere temel olarak dört gruba ayrılırlar.

Katı lazerler, aktif ortam olarak katı haldeki lazer materyallerini kullanan lazerlerdir. Bu tür lazerlerde iyonlar iletim elemanı olarak kullanılmaktadır. Bu iyonlar genellikle nadir elementler (Nd, Yb, Er vb.) veya geçiş metallere (Cr, Ti, vb.) oluşmaktadır. Bunların dışında  $Al_2O_3$ ,  $YLiF_4$ , YAG, LiSAF gibi kristaller ile  $SiO_2$ ,  $P_2O_5$  gibi bileşiklerde kullanılır. Katı hal lazerlerinin aktif ortamında katı bir cismin olduğu için ve katı cismin atomlarının yoğun dizilim göstermesi sonucunda amplifikasyonları ve çıkış yoğunlukları yüksektir. Yüksek titreşim kapasitesi ve kısa dalga boylarında çalışabilmeleri endüstride yansıtıcı yüzeylerin lazer ile işlenmesinde katı hal lazerlerine avantaj sağlar.

Sıvı lazerler, aktif madde olarak saydam bir bölme konmuş sıvı kullanılır. Sıvının içine konduğu bu bölge istenilen boyutlarda yapılarak yüksek güçlerin elde edilmesi mümkün olabilmektedir. Sıvı lazerlerde sıvı aktif madde optik pompalama yöntemi ile harekete geçirilir. Enerjisi artan sıvı molekülleri foton üretimi gerçekleşir ve üretilen fotonlar aynalar tarafından geri beslenir. Belirli bir değerin üzerine çıktığında da yarı yansıtıcı aynaya gelen ışın demeti aynadan geçerek lazer ışığını üretir. Bu tür lazerler ayarlanabilir prizmaya sahip oldukları için kimyasal analiz işlemleri için uygundur.

Gaz lazerlerde ise aktif ortam gaz karışımından oluşmaktadır. Karışımındaki gazlardan biri uyarımını çarpışmalar ile diğer elemente aktarır. En yaygın gaz lazerleri düşük güçlü olan helyum-neon (He-Ne) lazerleridir. İyon lazerleri de, aktif ortamının iyonlaştırılmış argon gazı olduğu için gaz lazerler sınıfında sayılabilir. En yaygın olan türü ise argon lazerleridir. En yaygın gaz lazeri ise  $CO_2$  lazerlerdir. Bu lazer türünde  $CO_2$  moleküllerinin temel elektron durumundaki titreşim geçişlerinden yararlanır. Bu lazerlerin aktif ortamlarındaki gaz karışımı  $CO_2$ , azot ( $N_2$ ) ve helyumdan oluşur. Uyarılma  $N_2$  molekülleri üzerinden  $CO_2$  moleküllerine aktarılır.

Yarı iletken lazerler ise farklı türden katkılanmış iki yarı iletken maddenin düz bir konumda yan yana getirilmesi ve bu iki madde arasından yüksek şiddette bir elektrik akımı geçirilmesi ile lazerin üretildiği sistemlerdir. Çıkış güçleri diğer lazer türlerine göre

düşük olsa da maliyet ve boyut avantajları nedeni ile uzaklık ölçme ve iletişim teknolojisinde yer almaktadır.

Lazer ile malzeme işlemede endüstride bu lazer türlerinden olan farklı lazer cihazları kullanılmaktadır. Aşağıda en yaygın kullanım alanı bulan endüstriyel lazer makineleri açıklanmıştır.

#### **2.4.4.1. CO<sub>2</sub> Lazerler**

Gaz lazer sınıfında bulunan CO<sub>2</sub> lazerlerin aktif ortamlarında CO<sub>2</sub> gazı, N<sub>2</sub> gazı ve He gazları bulunmaktadır. 10,6 µm dalga boyunda çalışan bu lazerlerin verimliliği %5-10 arasındadır (Kellens vd. 2014). Maksimum lazer çıkış güçleri 100 kW'lara kadar ulaşsa da endüstriyel uygulamalarda genellikle 15 kW seviyelerinde çalışmaktadırlar.

#### **2.4.4.2. Nd:YAG Lazerler**

Katı lazerler sınıfında yer alan Nd:YAG lazerlerin aktif ortam maddesi "neodmiyum:itriyum aluminyum garnet" kristal çubuktur. Verimleri %5'in altında olan bu lazer türlerinde diyot lazerler ile enerji pompalanması ile %5 seviyelerine çıkmaktadır. Dalga boyu 1,06 µm olan bu lazerlerde maksimum çıkış gücü 4 kW civarındadır. Ancak darbeli atımlar ile maksimum çıkış gücü 10 kW seviyelerine çıkabilmektedir. Nd:YAG lazerleri verim açısından CO<sub>2</sub> lazerlerin gerisinde olsa da dalga boyunun kısa olması nedeni ile daha küçük alana odaklanarak metal malzemelerin yüzeylerinde daha az yansıma oluşturur. Bunun yanı sıra fiber optik kablo kullanımına uygun oldukları için daha esnek çalışma ortamlarında kullanılabilirler.

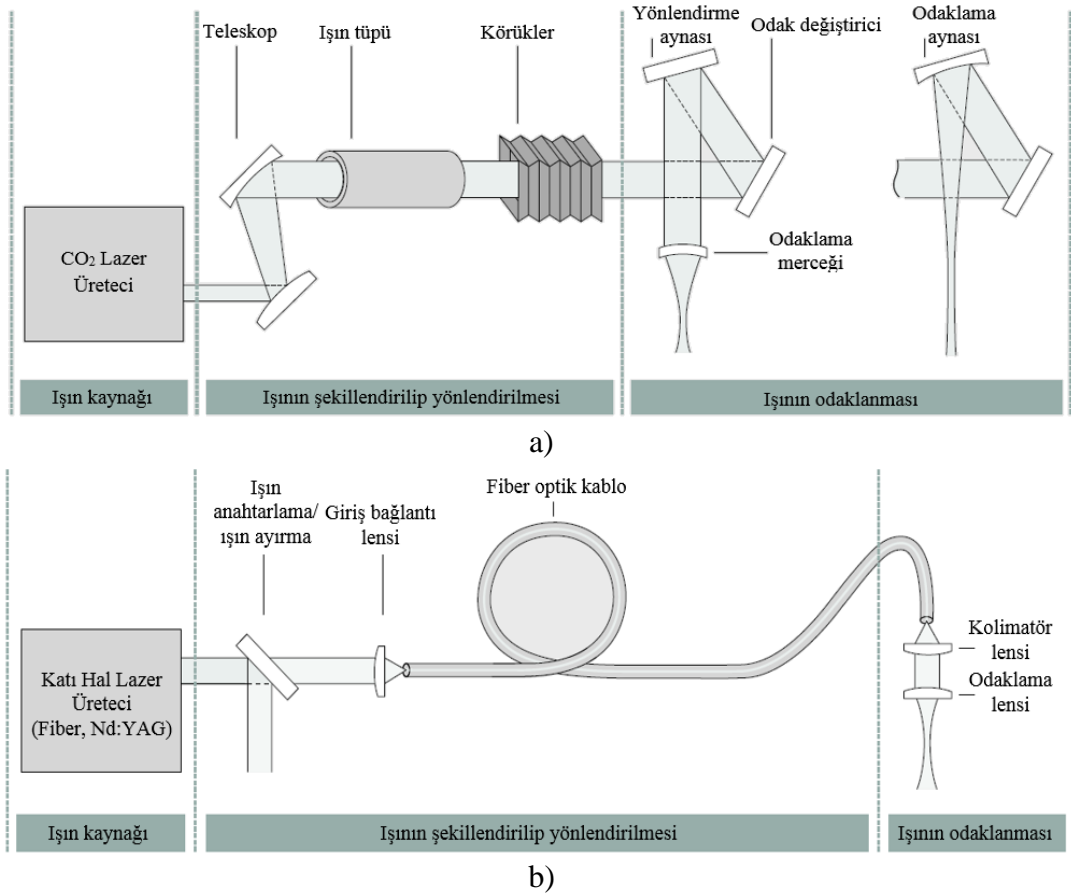
#### **2.4.4.3. Disk Lazerler**

Bir diğer katı lazer sınıfında yer alan diyot pompalı yüksek güçlü disk lazerleridir. Katı hal lazerlerden farkı aktif ortamı oluşturan Yb:YAG maddesinin silindirik bir çubuk yerine bir disk şeklinde olmasıdır. 1,03 µm dalga boyuna sahip bu lazerler Nd:YAG lazerlere göre daha küçük dalga boylarına sahiptirler. 16 kW maksimum çıkış gücüne sahip disk lazerlerde verim %50 seviyelerindedir (Çavuşoğlu 2011).

#### 2.4.4.4. Fiber Lazerler

Fiber lazerlerin aktif ortamında en yaygın kullanılan malzemeler erbiyum ve iterbiyumdur. 1,07  $\mu\text{m}$  dalga boyuna sahip fiber lazerlerin verimi Nd:YAG ve CO<sub>2</sub> lazerlerine göre oldukça fazladır. Yaklaşık %30 verim ile çalışırlar. Fiber lazerler, mükemmel bir doğrusallık ve lazer ışının çok küçük odak çapı içinde yoğunlaştırılmasını sağlarlar. Bu sayede oldukça kalın malzemelerin bile kaynağına imkân vererek çok yaygın kullanım alanı bulurlar. Aynı koşullar altında CO<sub>2</sub> lazerine göre 3 kat daha hızlı malzeme işleyebilirler ve maliyetleri daha düşüktür.

Lazer cihazlarında lazer ışınının işlenecek malzemeye ulaştırılması farklı yöntemler ile gerçekleştirilir (Şekil 2.22). Lazer ışını katı hal lazerlerinde işlem noktasına fiber optik kablo ile ulaştırılırken gaz lazerlerde aynalar kullanılmaktadır. Bu özelliklerinden dolayı katı hal lazerleri daha esnek çalışma koşulları sunmaktadır.



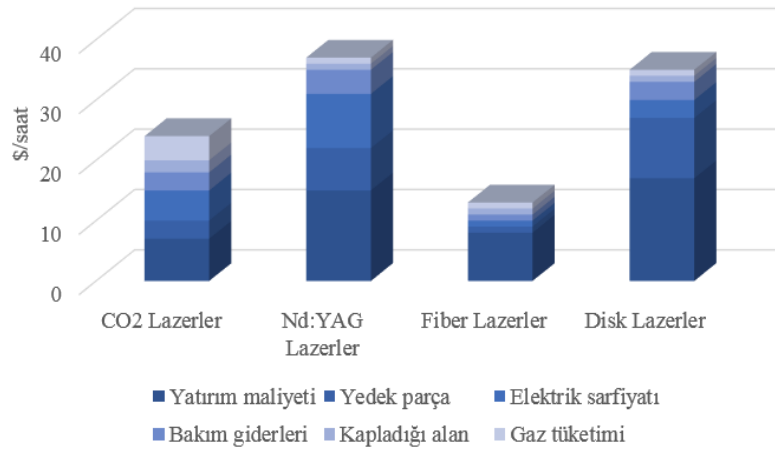
**Şekil 2.22.** Farlı lazer türlerinde ışının yönlendirilmesi ve odaklanmasının şematik görüntüsü; a) CO<sub>2</sub> lazerleri, b) Katı hal lazerleri (Buchfink 2007)

Endüstriyel alanlarda malzemelerin kesilmesi, kaynak edilmesi, yüzey işleme gibi farklı operasyonlarda kullanılan bu dört farklı lazer türünün güç, ışın kalitesi, dalga boyu, bakım masrafları, çevresel etkileri ve maliyetleri Şekil 2.23'te verilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi fiber lazerler diğer lazer türlerine göre oldukça yüksek kalitede işlem yapabilmektedirler (Şekil 2.23).

	Işın Dalga			Çevresel			
	Güç	Kalitesi	Boyu	Bakım	Etki	Maliyet	
Fiber lazer	●	●	●	●	●	●	● En iyi ○ En kötü
CO <sub>2</sub> lazer	●	◐	◑	◐	○	◐	
Nd:YAG lazer (lamba pompalı)	◐	◐	◑	◐	◐	◐	
Nd:YAG lazer (diyot pompalı)	◐	◐	◑	◐	◐	◐	
Disk lazer	◐	◐	◑	◐	◐	◐	

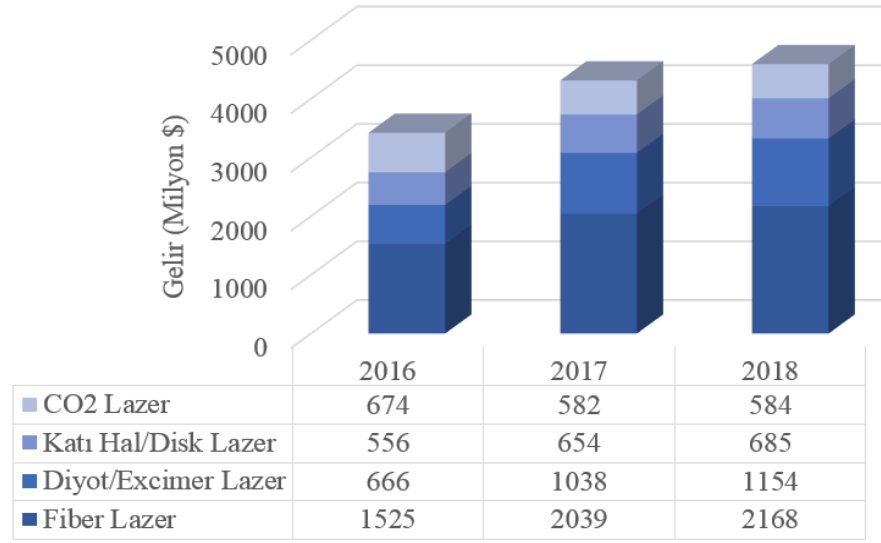
**Şekil 2.23.** Endüstriyel lazer türlerinin özelliklerinin karşılaştırılması (Shiner 2012)

Dört farklı endüstriyel lazer türünün 8 yıllık bir çalışma periyodunda 4 kW lazer gücü ile çalışması esnasında işlem maliyetleri karşılaştırıldığında en düşük maliyetli, en az bakım ve sarf gideri olan lazer türünün fiber lazerler olduğu görülmektedir (Şekil 2.24). Bu avantajları fiber lazerlerin endüstriyel alanda kullanımını da hızla arttırmaktadır (Şekil 2.25).



**Şekil 2.24.** Endüstriyel lazer türlerinin işlem maliyetlerinin karşılaştırılması (Assuncao vd. 2010)





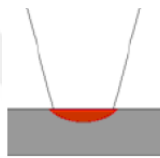
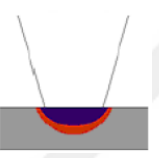
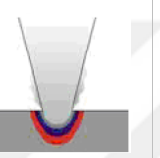
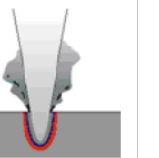
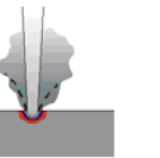
**Şekil 2.25.** Endüstriyel lazer türlerinin 2016-2018 yılları satış hasılatları (Overton vd. 2017)

Yapılan literatür araştırmasında lazer teknolojisinin endüstriyel anlamda kullanımının her geçen gün arttığı tespit edilmiştir. Diğer ışın türlerine göre üstün özelliklere sahip lazer ışını ile malzemelerin işlenmesinde avantajların olduğu görülmüştür. Endüstriyel lazer türleri arasında bakım ve yedek parça maliyetleri, işletme giderleri ve ışın kalitesi açısından fiber lazerlerin öne çıktığı ve kullanım alanının her geçen gün arttığı tespit edilmiştir.

## 2.5. Lazer Kaynak Yöntemi

Lazer ışını ile yapılacak imalat işlemlerinde ışının malzeme yüzeyinde soğurulması ile oluşan ısı kullanıldığı için kullanılan lazer ışınının ve malzemenin özellikleri oldukça önemlidir. Lazer ışınının yoğunluğuna ve malzeme yüzeyinde soğurulma oranına bağlı olarak malzemede ısınma, ergime ve buharlaşma olayları görülür. Çizelge 2.3'te farklı lazer güç yoğunluklarına bağlı olarak gerçekleştirilen işlemler gösterilmektedir.







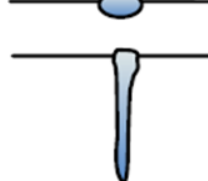
**Çizelge 2.3.** Lazer ışını ile gerçekleştirilen işlemlerin güç yoğunluğuna bağlı gösterimi (Çavuşoğlu 2011)

					
Prosesin tanımı	Serleştirme, lehim	Isı iletim kaynağı	Derin nüfuziyet kaynağı	Delme	Malzeme kaldırma
Lazer Etkisi	Isıtma	Ergitme	Ergitme, buharlaştırma	Buharlaştırma	Buharlaştırma, iyonizasyon
Güç Yoğunluğu	30 W/mm <sup>2</sup>	1 kW/mm <sup>2</sup>	10 kW/mm <sup>2</sup>	1 MW/mm <sup>2</sup>	10 MW/mm <sup>2</sup>
Etkileşim Süresi	Saniye	Milisaniye	Milisaniye	Milisaniye	Nanosaniye

Lazer kaynağında lazer ışını ile malzemenin etkileşimi söz konusudur. Lazer ışını tarafından aktarılan enerji malzeme tarafından yutulur ve bu enerji ile malzeme ergiyerek kaynak işlemi gerçekleştirilir. Malzeme yüzeyine gönderilen lazer ışını sadece malzeme tarafından yutulduğu kadar ile birleştirilecek bölgeyi ısıtır. Doğru bir şekilde odaklanmış lazer ışınının etkilediği bölgedeki sıcaklık dengededir. Çünkü malzeme bu bölgede yutabileceği kadar ısıyı yutmuştur. Lazer kaynağında ısı kaybı iletim yolu ile gerçekleşmektedir. Kaynak esnasında çıkan yüksek sıcaklıklarda ışın yolu ile oluşan ısı kaybı ihmal edilebilir seviyelerdedir. İletim yolu ile ısı kaybı ergimiş kaynak metalinin

tekrardan katılaştırmasını sağlar. Lazer ışınının etki ettiği bölgedeki sıvı metal havuzu lazer ışınının uzaklaştırılması ile tekrardan katılaştırır.

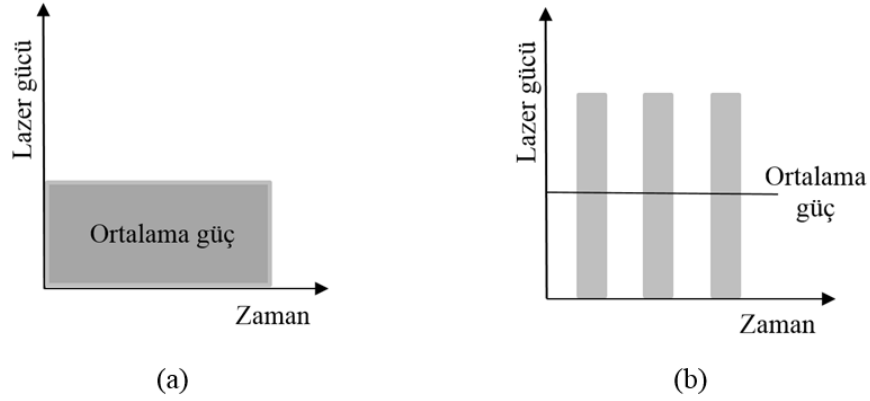
Lazer ışını ile çok düşük güç seviyelerinden çok yüksek güç seviyelerine kadar farklı seviyelerde ve çok kısa etkileşim zamanlarında lazer gücü malzeme üzerine iletilebilmektedir. Odaklanmış haldeki lazer ışınının sahip olduğu güç yoğunluğu elektron ışını hariç diğer tüm enerji kaynaklarından daha büyüktür. Şekil 2.26'da farklı kaynak yöntemlerindeki güç yoğunlukları ve ergiyik havuzunun profili şematik olarak gösterilmektedir.

Kaynak prosesi	Isı kaynağı yoğunluğu (W/m <sup>2</sup> )	Ergiyik havuzu şematik görüntüsü
Ark kaynağı (fluks korumalı)	$5 \times 10^6 - 10^8$	
Ark kaynağı (gaz korumalı)	$5 \times 10^6 - 10^8$	 Düşük
		 Yüksek
Plazma kaynağı	$5 \times 10^6 - 10^{10}$	 Düşük
		 Yüksek
Lazer veya Elektron ışın kaynağı	$10^{10} - 10^{12}$	 Odaklanmamış
		 Odaklanmış

**Şekil 2.26.** Farklı kaynak proseslerinde güç yoğunlukları ve ergiyik havuzunun şematik gösterimi (Steen ve Mazumder 2010)

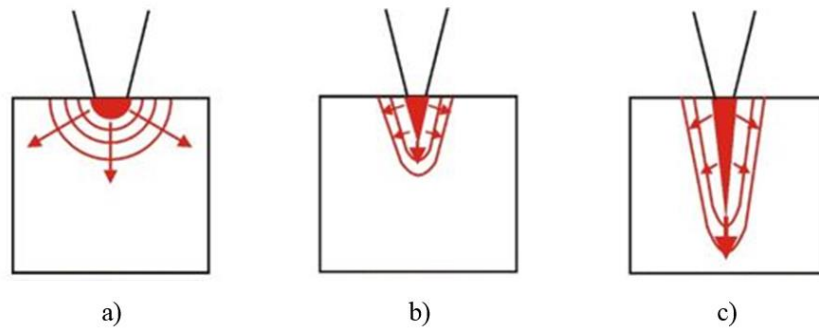
Lazer kaynağı, sürekli mod (Continuous Wave - CW), darbeli mod (Pulsed) veya Q-anahtarlama mod (darbe içerisinde lazer ışın yoğunluğunun artırılması) olmak üzere üç farklı modda gerçekleştirilebilmektedir. Bu modlar kullanılan lazer cihazına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Lazerin darbeli modda kullanılması genellikle malzeme üzerine uygulanan ısının azaltılması içindir. Sürekli lazerlerde ise lazer çıkışı sürekli olmakta ve aynı güç yoğunluğuna sahip (zamana göre değişmeyen, sabit bir güç değerinde) lazer ışınları kullanılmaktadır (Şekil 2.27). Darbeli lazerlerde ise, optik

pompalama kaynağı olarak bir flaş kullanılarak yüksek genlikli titreşimlerden oluşan lazer ışınları aralıklı olarak parça üzerine gönderilmektedir (Çelen 2006).



**Şekil 2.27.** (a) sürekli ve (b) darbeli mod lazerlerdeki ortalama güç dağılımları

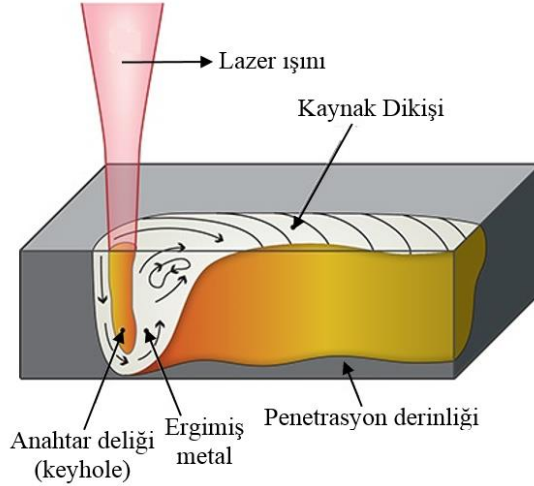
Lazer ışınının güç yoğunluğuna bağlı olarak metal malzemeler üzerindeki absorpsiyonu farklılık göstermektedir. Uygulanan güç yoğunluğuna bağlı olarak iletim, iletim-nüfuziyet ve nüfuziyet olmak üzere üç farklı kaynak türü ortaya çıkmaktadır (Şekil 2.28).



**Şekil 2.28.** Güç yoğunluğuna bağlı olarak lazer kaynağının sınıflandırılması a) iletim, b) iletim-nüfuziyet ve c) nüfuziyet (Amada Miyachi 2015)

Lazer nüfuziyet kaynağında (Laser Keyhole Welding) odaklanmış lazer ışını ile birleşme bölgesindeki küçük bir alana yüksek güç yoğunlukları uygulanır. Lazerin odaklanmasıyla bir noktayı ergime sıcaklığının üzerine ısıtarak erimiş metal içerisinde buharla çevrelenmiş bir ergime bölgesi oluşturulur. Metalin bir kısmı buharlaşmaya kadar ısınarak bir boşluk oluşturur. Lazer enerjisinin malzeme tarafından emilimi devam ederken buharlaşmış malzeme ve kullanılıyorsa koruyucu gazdan oluşan plazma yoğunlaşır. Oluşan plazmadaki ısı erimekte olan malzemeye geçerek birleştirilecek

parçalar içerisinde iletilir. Bu durum sonucunda lazer ışının etki ettiği ergimiş bölgede çok yüksek sıcaklık ve basınç seviye farklılıkları neticesinde anahtar deliği (keyhole) görünümlü akıcı fazlı bir buhar kanalı oluşur (Şekil 2.29). Oluşan bu anahtar deliği malzeme yüzeyinde ilerletilir. Eriyik, ısınan buharın basıncıyla iş parçasının yüzeyine yükselir ve bu arada çekim kuvveti, viskozite ve yüzey gerilmeleriyle devam eden genleşmeler de engellenir.



**Şekil 2.29.** Lazer nüfuziyet kaynağı şematik görüntüsü

Lazer nüfuziyet kaynağında lazer ışının etkisi ile birleştirilecek bölgede ortaya çıkan ergiyik havuzu hızlı bir karışım halindedir. Bu kaynak havuzundaki hareketi sağlayan en önemli etken yüzey gerilmeleri ile ilgili olan Marangoni etkisidir. Sıvı hareketi kaynak dikiş yüzeyinde olan yüzey gerilmelerinin yerel değişimleri ile kontrol edilmektedir. Yüzey gerilmelerindeki farklılıklar yüzey sıcaklığındaki yerel değişimlerden kaynaklanmaktadır. Yüzey geriliminin bölgesel değişimleri ergimiş metalin yüzey boyunca yüzey gerilimi düşük bölgeden büyük olan bölgeye çekilmesine ve buna bağlı olarakta büyük yüzey akışlarının oluşmasını sağlar. Sıcaklıkların düşük olduğu katı-sıvı ara yüzey bölgelerinde ise yüzey gerilmeleri en yüksek seviyelerdedir. Sıvı havuzun akışı havuz merkezinden uzakta ve dışarıya doğru gerçekleşir.

Artan ısı girdisi ile malzemede buharlaşma sıcaklığına kadar sıcaklık artışı görülür. Bu esnada lazer ışını sıvı metal boyunca ortaya çıkan buharı delmiştir. Bu buharı aşan lazer ışını deliğin altındaki sıvı bölgeye ulaşır ve delme işlemine devam eder. Lazer ışınının hareketi ile de bu deliğin önünde sürekli bir ergime gerçekleşir. Sıvı haldeki bu malzeme

lazer ışınının yanlarından hareket ederek geçer ve deliğin arkasında yeniden katılaştır ve birleştirilir.

Lazer nüfuziyet kaynağında birleşme bölgesinde oluşan anahtar deliğinin çevresindeki malzeme lazer ışınından gelen tüm enerjiyi soğurur. Böylece lazer enerjisinin % 95 civarı bir silindirik hacim içerisine hapsedilir. Anahtar deliği içerisindeki sıcaklık 25.000° C'ye kadar ulaşabilir. Enerji tüm anahtar deliği boyunca aktarıldığı için lazer kayıp vermeden malzemenin içerisine doğru nüfuz edebilir. Böylece derin penetrasyon elde etmek mümkün olur.

Lazer nüfuziyet kaynağında anahtar deliğinin boyutları malzemenin lazer ışını yutma oranına, uygulanan güç yoğunluğuna, kaynak hızına, lazer ışınının odaklanmasına, koruyucu gaz türü ve uygulanma şekline bağlı olarak değişmektedir. Bu işlem parametrelerinin doğru seçilmediği durumlarda parçalarda kaynak yerine kesilmeler görülebilmektedir.

Lazer iletim kaynağında (Laser Conduction Welding) düşük enerji yoğunluğuyla yüzeysel, derine inmeyen, sığ ve geniş bir kaynak dikişi oluşturulur. İletim kaynağında lazer ışını kaynaklı parçanın içine nüfuz edemediği için daha az karmaşık bir yapıya sahiptir. Derin kaynak dikişi oluşmadığı için boşluk oluşumu gözlenmez.

Lazer iletim ve lazer nüfuziyet kaynak yöntemleri arasındaki en temel fark kaynak dikişinin özellikleridir. İletim kaynağında ergiyik havuzu lazer ışını ile kesilmez yani anahtar deliği formunda bir yarıma görülmez. Ancak nüfuziyet kaynağında ergiyik havuzu lazer ışınının içeriye nüfuz etmesi için dikiş boyunca açılır. Bir diğer farklılık ise kaynak dikişi boyunca görülen porozite oluşumudur. İletim kaynağı kaynak esnasında daha az gaz tutucu özelliğe sahip olduğu için boşluk oluşumu görülmez. Ancak nüfuziyet kaynağında ergiyik havuzunun içerisinde buharlaşmalardan kaynaklı gözenek oluşumu görülmektedir.

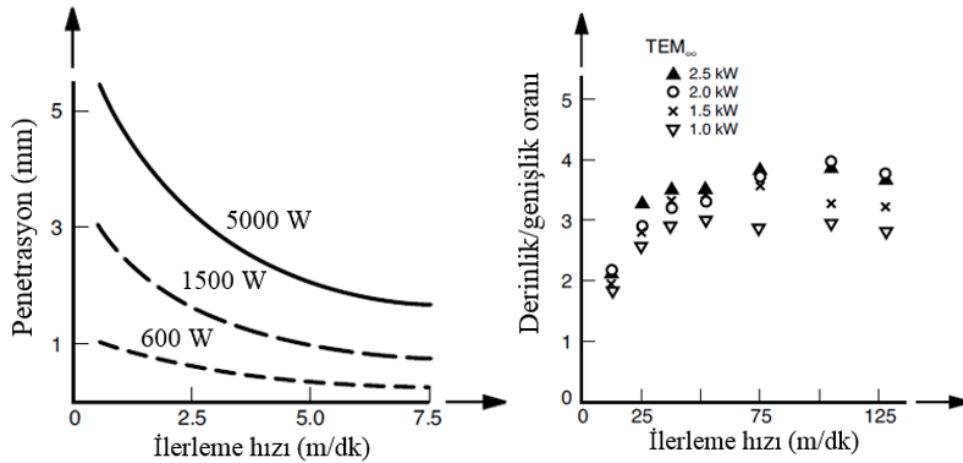
Lazer iletim kaynağında proses parametrelerinin etkisi oldukça önemlidir. Yüksek lazer güçlerinde çalışıldığında birleştirilecek parçanın yüzeyinde delinme meydana gelirken düşük lazer güçlerinde ise birleştirme yerine yüzey sertleştirme işlemi gerçekleştirilmiş olur. Kaynak bölgesinin derinlik/genişlik oranı nüfuziyet kaynağında 10 civarında iken iletim kaynağında bu oran 3 civarındadır.

### 2.5.1. Lazer Kaynak İşlem Parametreleri

Lazer kaynak işleminde lazer gücü, ilerleme hızı, lazer modu (darbeli veya sürekli), odak mesafesi, koruyucu gaz türü ve debisi gibi doğrudan işlem kalitesini etkileyen parametreler bulunmaktadır. Bu işlem parametreleri doğru seçilmediği takdirde birçok olumsuzluk ve kaynak hatasının görülmesi kaçınılmazdır. İşlem parametrelerinin lazer kaynağına olan etkileri yapılan çalışmalarda ortaya konulmuş ise de farklı malzeme türlerinde ve farklı çalışma şartlarında aynı sonuçları elde etmek mümkün olmayabilir. Bu nedenle genel kabuller çerçevesinde ön denemelerin gerçekleştirilip sonrasında optimum işlem parametre seviyelerinin belirlenmesi gerekmektedir.

#### 2.5.1.1. Lazer Gücü ve İlerleme Hızı

Lazer kaynağındaki en önemli parametrelerden biri lazer gücüdür. Lazer gücü, ışının malzeme içerisindeki penetrasyonunu ve kaynak yöntemini (iletim veya nüfuziyet) doğrudan etkilemektedir. Lazer gücü ile birlikte düşünülmesi gereken diğer önemli parametre ise ilerleme hızıdır. Bu iki parametre birbirlerinden bağımsız düşünülemezler. Diğer işlem parametreleri sabit tutulduğunda artan lazer gücünde penetrasyon miktarı ve kaynak dikişinin derinlik/genişlik oranı artmaktadır. İlerleme hızı için ise bu etkinin tersi görülmektedir. Diğer işlem parametrelerinin sabit tutulduğu durumda artan ilerleme hızı ile kaynak dikişinin penetrasyonu azalmaktadır (Şekil 2.30).

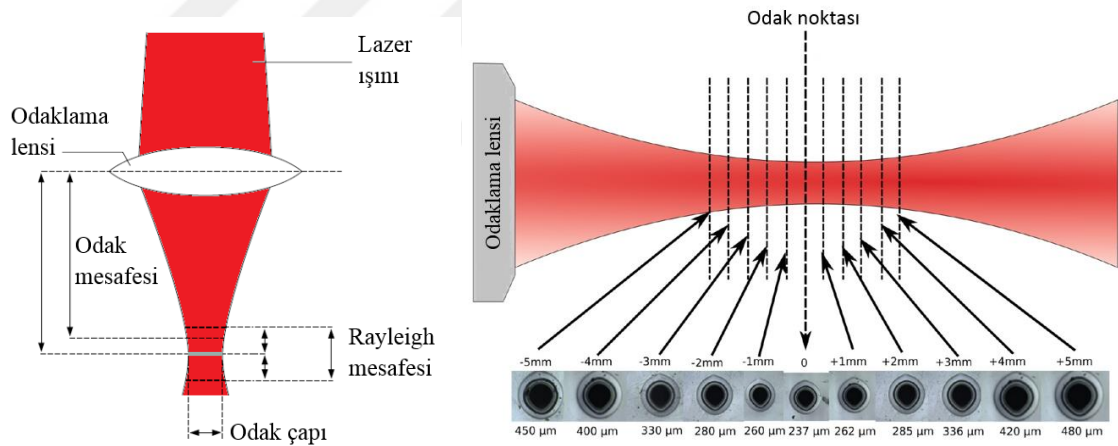


Şekil 2.30. İlerleme hızı ve lazer gücüne bağlı olarak a) penetrasyon derinliğinin değişimi, b) derinlik/genişlik oranının değişimi (Kannatey-Asibu, E. 2008)

Bu iki parametre ayrıca birlikte kaynak işlemi esnasında uygulanan ısı girdisini de belirlemektedir. Diğer tüm proses parametreleri sabit tutulduğunda artan lazer gücü ve azalan ilerleme hızı ile kaynak işleminde uygulanan ısı girdisinin seviyesi artmış olur. Bu durumun tersinde de, artan ilerleme hızı ve azalan lazer gücü ile ısı girdisi seviyesinde azalma olur.

### 2.5.1.2. Odak Mesafesi

Lazer kaynak prosesinde lazer ışınının yoğunluğunu ve spotun çapını belirleyen odak mesafesi de oldukça önemli bir parametredir. Lazer kaynağında lazer ışını optik mercekler yardımı ile kaynak yapılacak bölgeye odaklanmaktadır. Kaynak işlemi son odaklama (focusing lens) merceğinin odak noktasında gerçekleştirilmektedir. Kullanılan lazer ışınının çapı ve optik merceklerin boyutlarına göre odaklanmış ışının çapı belirlenmektedir. Çalışılacak odak mesafesi değiştiğinde lazer spotunun boyutları değişmeye başlar (Şekil 2.31).

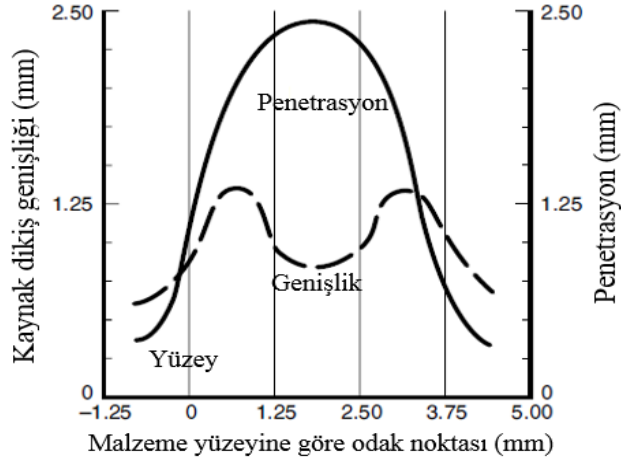


**Şekil 2.31.** Gaussiyen ışın odak mesafesi ve ışın çapları (Prakash ve Kumar 2017)

Odak mesafesinin parça yüzeyinde, parçanın içinde ve parça yüzeyinden yukarıya olmak üzere üç farklı durumu olabilmektedir. Her bir durum farklı kaynak sonuçlarına yol açmaktadır. Şekil 2.32’de çelik bir malzemenin 1,45 kW lazer gücünde ve 1,25 m/dk ilerleme hızında kaynak edilmesinde odak mesafesindeki değişimin kaynak dikişinin penetrasyonu ve dikiş genişliği üzerindeki etkisi verilmiştir (Şekil 2.32). Şekilde negatif odak noktası lazer ışınının odağının parça yüzeyinden yukarı yönde uzaklaşmasını ifade

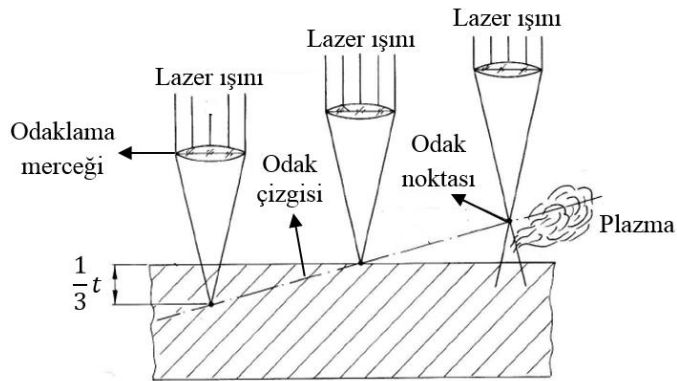


etmektedir. Şekil 2.32’den de görüleceği gibi lazer ışınının parçanın içerisine odaklanması belirli bir seviyeye kadar penetrasyonu arttırmaktadır.



**Şekil 2.32.** Odak mesafesinin kaynak dikişinin penetrasyonu ve dikiş genişliğine olan etkisi (Kannatey-Asibu, E. 2008)

Odak mesafesinin lazer nüfuziyet kaynağında malzeme kalınlığının üçte biri kadar malzeme içerisinde tutulması penetrasyonu arttırmaktadır (Karaaslan 2009). Odak noktasının hatalı seçildiği durumlarda lazer ışını malzemenin buharlaşmasına neden olabilir. Ortaya çıkan buharda plazma oluşturarak istenilen lazer gücünün malzemeye ulaşmasını engeller (Şekil 2.33).

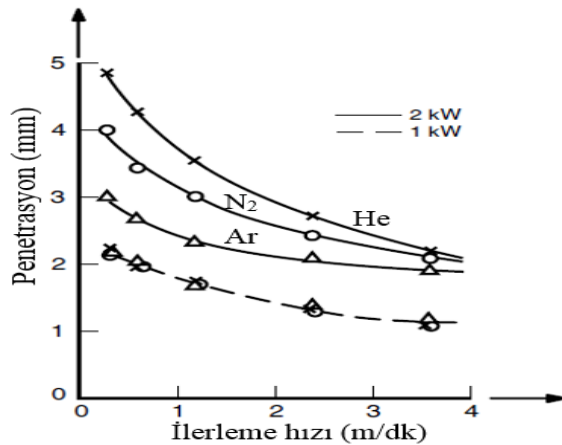


**Şekil 2.33.** Lazer nüfuziyet kaynağında odak mesafesine bağlı plazma oluşumu (Karaaslan 2009).

### 2.5.1.3. Koruyucu Gaz Türü ve Debisi

Lazer kaynağında bir diğer önemli işlem parametresi koruyucu gazdır. Koruyucu gazın türü, kaynak bölgesine iletim türü ve debisi kaynak dikişini etkilemektedir. Lazer nüfuziyet kaynağında kullanılan koruyucu gaz yardımı ile kaynak dikişinde ortaya çıkan plazma uzaklaştırılır ve bu sayede lazer ışını parçanın içine daha fazla nüfuz edebilir. Koruyucu gaz ayrıca sıvı haldeki kaynak dikişi için koruyucu bir ortam oluşturur. Koruyucu gazlar koaksiyel, yandan ve alttan olmak üzere üç farklı metotla kaynak bölgesine yönlendirilmektedir. Koruyucu gazın debisi ise ilerleme hızına bağlı olarak değişiklik gösterse de genellikle 10-40 litre/dk olarak uygulanır.

Lazer kaynak proseslerinde kullanılan malzeme türüne bağlı olmakla birlikte, genelde argon (Ar) ve helyum (He) gazları kullanılmaktadır. İyonizasyon değeri argona göre daha yüksek olan helyum plazmanın uzaklaştırılmasında daha etkili olduğu için derin nüfuziyet kaynaklarında tercih edilir. Plazma uzaklaştırmak için iyonizasyon seviyesi argon ile helyum arasında yer alan azot gazı da kullanılmaktadır. Ancak bu uygulamalarda nitrür oluşumu görülebileceği için kırılabilirliğin artma ihtimali bulunmaktadır. Şekil 2.34'te çelik bir malzemenin lazer kaynağında 20 litre/dk debide He, Nitrojen (N<sub>2</sub>) ve Ar gazlarının farklı güçlerde ve ilerleme hızlarında kaynak penetrasyonuna olan etkisi gösterilmektedir. Düşük lazer gücünde gaz türlerinin penetrasyona etkisi oldukça sınırlıdır. Ancak yüksek güç seviyesinde koruyucu gaz türüne bağlı olarak penetrasyon derinliğine bariz farklılıklar görülmektedir.



**Şekil 2.34.** Koruyucu gaz türünün lazer gücü ve ilerleme hızına bağlı olarak penetrasyon derinliği üzerindeki etkisi (Kannatey-Asibu, E. 2008)

### 2.5.2. Lazer Kaynağının Avantajları

Literatürde farklı birleştirme türlerinin bağlantının mekanik ve metalürjik özelliklere etkilerinin incelendiği çalışmalar sonucunda lazer kaynağının hassas ve yüksek kalitede birleştirmeler için oldukça avantajlı olduğu görülmüştür. Diğer kaynak yöntemlerine göre lazer kaynağının en önemli avantajları ise aşağıda sunulmuştur;

- Lazer, çevresel etkileri bakımından temiz bir enerji kaynağıdır.
- Lazer ışınının sağladığı avantajlar sayesinde düşük distorsiyon, yüksek kaynak hızı, dar ısı etkisi altında kalan bölge oluşturması gibi özellikleri nedeni ile geleneksel kaynak yöntemleri ile karşılaştırıldığında lazer kaynağı birleştirilmesi zor olan malzeme türlerinde dahi birçok avantaja sahiptir.
- Lazer kaynağı yüksek hızlarda çalışabilmesi sayesinde daha düşük ısı girdisi ile birleştirmelerin gerçekleşmesine izin vermektedir.
- İlave malzeme gerektirmeden malzemelerin birleştirilmesine imkan vermektedir.
- Lazer kaynak prosesi kolaylıkla otomasyon ile entegre olabilmektedir.
- Lazer ışınının temassız olarak çalışması sayesinde birleştirilecek parçalar ile temas etmeden kaynak gerçekleştirilebilmektedir.
- İş parçası ile lazer ışını arasında hiçbir mekanik temas oluşmadığı için kaynak bölgesinin istenmeyen alaşımlanması veya distorsiyonu görülmez.
- Yüksek güç yoğunluklu kaynak yöntemlerinden olan elektron ışın kaynağı gibi manyetik alandan etkilenmezler. Vakum veya X-ışını koruması gerektirmez.
- Lazer ışını optik elemanlar kullanılarak kolaylıkla odaklanıp, doğrultulup yönlendirilebildiği için diğer kaynak yöntemleri ile ulaşılması zor olan yerlerde kaynak yapılabilmesini sağlar. Bu sayede tasarımlarda kısıtlamaları azaltır.
- Geniş bir malzeme aralığı ve bunların kombinasyonunu kaynaklamak mümkündür. Dar ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) ve düşük ısı girdisi sayesinde farklı tür malzemelerin birleştirilmesinde kullanılabilir.

**Çizelge 2.4.** 1 m kaynak için MAG kaynağı ile lazer kaynağının maliyet karşılaştırması  
(Steen ve Mazumdar 2010)

	<b>MAG Kaynağı</b>	<b>Lazer Kaynağı</b>
Kullanılan kaynak donanımı	300-A	2 kW CO <sub>2</sub> Laser + Modülü
Yatırım maliyeti (£)	850	150.000
Sarf malzemesi	4 mm kalınlık, 1 m boyunda fluks kaplı çelik tel	Koruyucu Gaz 5 £/saat
Kaynak hızı	1 mm/s	10 mm/s
Proses süresi	1.000 s	100 s
Sermaye amortismanı yılda 1800 saat için yıllık %20 (£)	0,026	0,46
Sarf malzemesi maliyeti (£)	0,5	0,11
İşçilik maliyeti (MAG kaynağı için 24 £/saat) (Lazer kaynağı için 24 £/saat)	6,66	0,55
Güç tüketimi 0,06 kWh (£) (4 kW MAG kaynağı için) (10 kW lazer kaynağı için)	0,066	0,016
Kaynak sonrası temizlik (£) (MAG kaynağı süresinin %40'ı)	2,20	-
Toplam maliyet (£/metre)	8,95	1,13

## **2.6. Lazer Kaynağı ile Alüminyum Alaşımları ile Çeliklerin Birleştirilmesi**

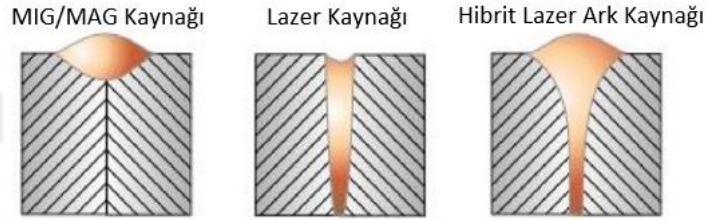
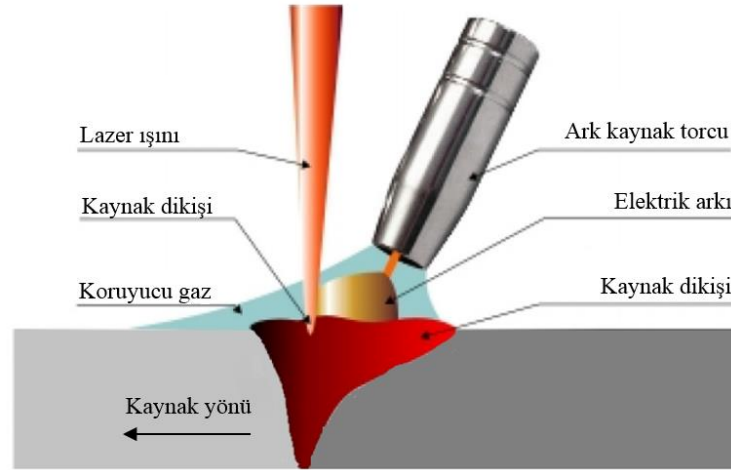
Alüminyum alaşımları ile çeliklerin birleştirilmesinde bağlantının mekanik dayanımını sınırlayan kırılğan intermetalik fazların oluşumu ergiyik havuzuna her iki malzemenin de dâhil olduğu durumlarda kaçınılmazdır. Yüksek tokluk ve dayanıma sahip bağlantıların istendiği durumlarda intermetalik faz boyutunun minimum tutulması gerekir. İntermetalik faz oluşumu difüzyon esasına dayalı bir olay olduğundan kullanılan birleştirme yöntemi ve işlem parametrelerinin seçimi oldukça önemlidir. İntermetalik faz oluşumunu minimuma indirmek için ise ergiyik havuzunun boyutlarını azaltmak ve toplam ısı girdisini sınırlamak gerekmektedir (Shahverdi vd. 2002, Groche vd. 2014).

Geleneksel kaynak yöntemlerine göre birçok üstün özelliklere sahip olan lazer kaynağının otomotiv sektöründeki kullanımı otomasyona uygunluğu nedeniyle son yıllarda artış göstermektedir. Yüksek kaynak hızı, derin nüfuziyet, kontrol edilebilir ısı girdisi, oldukça dar ısı etkisi altında kalan bölge oluşturması, kusursuz kaynak profili, yüksek yapısal dayanım gibi birçok avantajları nedeniyle geleneksel ergitme kaynak yöntemlerinin yerini alan lazer kaynağı, konvansiyonel yöntemler ile birleştirilmesi mümkün olmayan karmaşık tasarımlı parça birleştirmelerine olanak sağlamaktadır (Chen vd. 2011). Otomotiv sektöründe kullanılan lazer sistemleri içerisinde ise kusursuz ışın kalitesi ve yüksek odaklanma kabiliyeti sayesinde fiber lazerler öne çıkmakta ve hızlı üretim gerektiren proseslerde düşük enerji ile kaliteli bağlantıların oluşturulmasına imkân sağlamaktadırlar (Peyre vd. 2007).

Alüminyum alaşımları ile çelik malzemelerin birleştirilmesinde farklı lazer kaynak metotları kullanılmaktadır. Bu metotlar kullanılan ısı yoğunluğuna, ilave kaynak ekipman ve donanımına bağlı olarak dört ana başlık altında incelenecektir.

### **2.6.1. Hibrit Lazer-Ark Kaynak Yöntemi**

Lazer-Ark Hibrit Kaynak Yöntemi (Hybrid Laser Arc Welding), yeni ve kendisini oluşturan her bir kaynak metodundan daha iyi sonuçlar veren bir kaynak metodudur. Bu yöntem, daha geniş toleranslarda daha kaliteli ve hızlı kaynak yapılabilmesine olanak verdiği için alüminyum alaşımları ile çeliğin birleştirilmesinde kullanılmaktadır. Bu yöntem iki farklı kaynak donanımının bir arada ve koordineli olarak çalıştırılmasına dayanmaktadır (Şekil 2.35). Bu nedenle ilave ekipmana ihtiyaç duyulmaktadır.



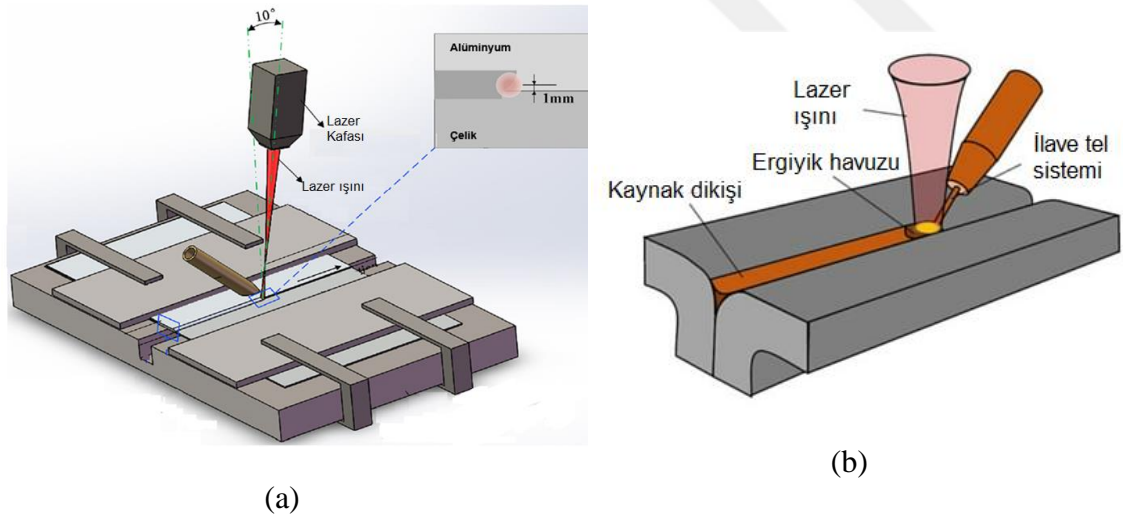
**Şekil 2.35.** Hibrit lazer-ark kaynağının şematik görüntüsü (Acherjee 2018)

Literatürde araştırmacılar iki farklı kaynak yönteminin avantajlarını kullanarak alüminyum-çelik birleştirmelerini gerçekleştirmişler ve işlem parametrelerinin intermetalik fazlara olan etkisini incelemişlerdir. Sierra vd. (2008) düşük karbonlu galvaniz kaplı çelik ile 6016 serisi Al alaşımını lazer-TIG hibrit kaynak yöntemi ile birleştirmiş ve intermetalik tabakanın kalınlığı ile çatlak başlangıcı arasında bağıntı oluşturmuştur. Qin vd. (2014a) geleneksel lazer-ark hibrit kaynaklarından farklı olarak kaynak bölgesine geniş lazer ışını göndererek arkı dengelemiş ve iş parçasında ön ısıtmayı sağlamışlardır. Çalışma sonucunda yöntemin geleneksel yöntemlere göre daha kısa sürede kaynağı gerçekleştirdiğini ve kırılma faz oluşumunun sınırlandırıldığını belirtmişlerdir. Qin vd. (2014b) katı hal lazer ile MIG kaynağını bir arada kullanan lazer-ark hibrit kaynağı ile 6013 serisi Al alaşımı ile galvaniz kaplı çelik malzemeyi birleştirmiş ve kaynak kabiliyetini incelemişlerdir. Çalışmalarında odaklanmamış lazer ışını parçaların yüzeylerini ısıtmada kullanarak birleşme yüzeyinin boyutlarını arttırmayı başarmışlardır. Huang vd. (2017) alüminyum ve galvaniz kaplı çelik malzemeleri lazer-ark kaynağı ile birleştirmiş ve kaynak parametrelerinin kaynağın çekme dayanımına olan

etkisini incelemiştir. En yüksek çekme dayanımının 8,7  $\mu\text{m}$  kalınlığındaki intermetalik tabakaya sahip kaynaklarda olduğunu açıklamışlardır.

### 2.6.2. Lazer Lehim Birleştirme Yöntemi

Alüminyum alaşımı ile çelik malzemelerin birleştirilmesinde kullanılan bir diğer yöntem lazer lehim birleştirme yöntemidir (Laser Welding Brazing). Bu yöntem düşük ergime noktasına sahip metalin (alüminyum alaşımı) ergitilerek katı haldeki ergime noktası yüksek olan (çelik) malzemenin üzerinde bir dolgu tabakası oluşturması esasına dayanır. Bu yöntemde ilave kaynak teli ya da kaynak tozu da kullanılabilir. Bu durumda bağlantı alüminyum ile ilave malzeme arasında kaynak şeklinde (welding) oluşurken çeliğin üzerinde bir dolgu tabakası (brazing) şeklinde gerçekleşir (Şekil 2.36). Geleneksel ergitme kaynaklarına göre çelik malzemede ergime olmaması nedeni ile sıvı haldeki alüminyum-demir etkileşimi en aza indirildiği için bu yöntemde intermetalik fazların boyutlarını sınırlı tutmak mümkün olmaktadır (Dharmendra vd. 2011). Bu yöntem ile alüminyum-çelik birleştirmeleri alın veya bindirme formatında gerçekleştirilebilmektedir (Li vd. 2018, Wang vd. 2017).



**Şekil 2.36.** Lazer lehim birleştirme yöntemi şematik görüntüsü (a) ilave malzemesiz, (b) ilave tel kullanımı (Wang 2017)

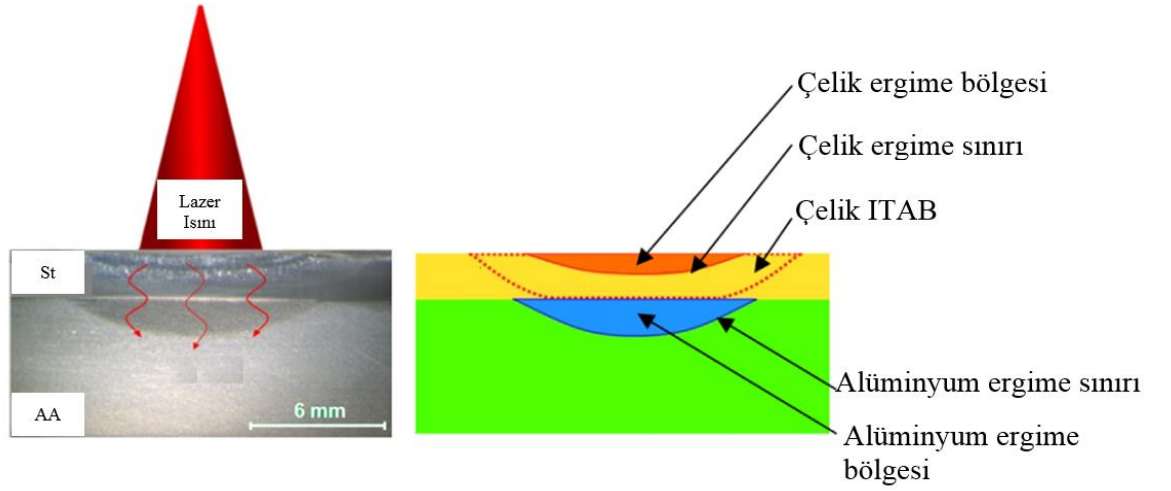
Lazer lehim birleştirme yönteminde bağlantının kalitesi ve mekanik dayanımı kaynak esnasında sıvı hale gelen alüminyumun (kullanılıyorsa ilave malzemenin de) katı haldeki çeliğin üzerindeki oluşturduğu birleşme yüzeyinin “wetting surface” boyutları ve

metalürjik özellikleri ile doğrudan ilişkilidir (Kügler ve Vollertsen 2013). Sağlıklı bir birleştirme bölgesinin oluşması için malzeme yüzeylerindeki kalıntıların ve oksit tabakalarının fluks işlemi ile kaldırılması gerekmektedir. Fakat bu uygulama işlem süresi ve maliyetleri olumsuz etkilemekte birlikte aynı zamanda fluks işleminin uygulanmasından sonra korozyon dayanımı açısından kalıntıların temizlenmesini de gerektirmektedir (Gatzen vd. 2014). Bu nedenle araştırmacılar fluks işlemine gerek kalmadan yüzeylerdeki oksit tabakasını temizlemeye yönelik çözümleri araştırmışlardır. Mathieu vd. (2007) fluks işlemine gerek kalmadan çinko bazlı ilave tel kullanarak lazer lehim kaynağını gerçekleştirmiş ve intermetalik tabaka kalınlığının proses parametrelerinin optimum seviyelerinde seçilmesi ile kısıtlanabileceğini belirtmiştir. Frank (2015) darbeli (pulsed) ve sürekli (continuous) lazer ışınlarını bir arada kullanarak fluks işlemi olmadan kaynağı gerçekleştirmiştir. Çalışmasında darbeli ışınları alüminyum oksit tabakasını kaldırmak için kullanırken sürekli lazer ışınını da ilave telin ergitilmesi için kullanmıştır. Bu sayede kırılğan intermetalik fazların kalınlığını sınırlayarak yüksek dayanımlı birleştirmeler elde etmiştir.

### **2.6.3. Lazer İletim Kaynak Yöntemi**

Alüminyum alaşımları ile çelik malzemeleri birleştirmede kullanılan bir diğer yöntem lazer iletim kaynağıdır (Laser Conduction Welding). Lazer lehim birleştirme yönteminden farkı ilave malzeme kullanılmadan birleştirmenin yapılabilir olmasıdır. Bu yöntemin temeli malzemenin lazer ışın enerjisini yutarak, ergime noktasına ulaşmasıdır. Genellikle çelik parçanın üstte alüminyum parçanın altta olacak şekilde bindirme kaynağı türünde yerleştirilen parçaların arasındaki yüzeye odaklanan lazer ışın demetinin gezdirilerek alüminyum alaşımının yüzeyine çarptırılması esasına dayanır. Bu demetin bir kısmı malzeme tarafından yutulur bir kısmı ise yansıtılır. Malzeme tarafından yutulan lazer ışını sayesinde oluşan ısı, konveksiyon ve radyasyon şeklinde yayılma imkânı bulmadan iletim yolu ile malzemenin kalınlık eksenini boyunca derinliklere yayılır (Şekil 2.37). Bu yöntemde de mekanik dayanım sıvı alüminyum ile katı haldeki çelik malzeme arasındaki bağlantı yüzeyinin “wetting surface” boyutuna ve intermetalik fazların özelliklerine bağlıdır.



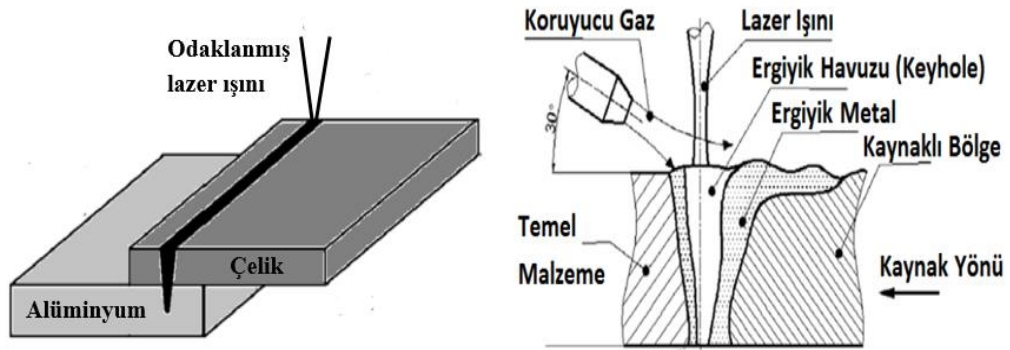


**Şekil 2.37.** Lazer iletim kaynağı şematik görüntüsü (Meco vd. 2015)

Literatürde Lee vd. (2005) lazer iletim kaynağı ile düşük karbonlu çelik ile 6111 alüminyum alaşımını lazer iletim kaynağı ile birleştirmiş ve bağlantı yüzeyinde 1  $\mu\text{m}$  kalınlığında uniform bir intermetalik tabaka oluşumunun mukavemeti arttırdığını belirtmişlerdir. Peyre vd. (2007) bağlantıların mekanik özelliklerini ve alüminyumun ergimesi sonucunda katı haldeki çeliğin üzerinde oluşturduğu intermetalik tabaka kalınlıklarını incelemişlerdir. Meco vd. (2013) nüfuziyet kaynağına göre ısıl girdisinin daha kontrol edilebilir olduğunu ve bu nedenle intermetalik tabaka boyutlarının azaltmanın mümkün olduğunu belirtmişlerdir. Alüminyum alaşımının ergimesinin kısıtlanması ile intermetalik tabakanın azaltılabileceği, bununda lazer gücü ile bağıntılı olduğunu açıklamışlardır. Kouadri-David ve PSM Team (2015) bu yöntem ile birleştirmede alüminyum ile çelik arasındaki bağlantının oluştuğu reaksiyon bölgesinin içyapı özelliklerinin kaynağın mukavemeti açısından önemli olduğunu ve parametreler ile kontrol edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Meco vd. (2015) sürekli dalga fiber lazer cihazı yardımı ile 2 mm kalınlığındaki çeliği 6 mm kalınlığındaki alüminyum alaşımını lazer iletim kaynağı ile birleştirmişlerdir. Bu sayede hasarsız kaynak elde edildiğini, demir atomlarının alüminyum içerisinde sınırlı oranda çözündüğünü ve intermetalik tabakanın 4  $\mu\text{m}$  ile 21  $\mu\text{m}$  arasında değişen bir kalınlığa sahip olduğunu açıklamışlardır. Meco vd. (2017) iki farklı kaynak parametresi için intermetalik tabaka kalınlığını incelemiş ve lazer güç yoğunluğunun kaynak süresinden daha fazla maksimum sıcaklık üzerinde etkili olduğunu açıklamışlardır.

#### 2.6.4. Lazer Nüfuziyet Kaynak Yöntemi

Lazer kaynak yöntemleri arasında alüminyum alaşımları ile çeliklerin birleştirilmesinde lazer nüfuziyet kaynağı da (Lazer Keyhole Welding) geniş kullanım alanı bulmaktadır. Lazer nüfuziyet kaynağında odaklanmış lazer ışını çok küçük bir alana yoğunlaşarak malzemede yerel bir ergime ve buharlaşma oluşturarak birleştirme işlemini gerçekleştirir. Lazer enerjisinin malzeme tarafından emilimi devam ederken buharlaşmış malzeme ve kullanılıyorsa koruyucu gazdan oluşan plazma yoğunlaşır ve lazerin plazmada oluşturduğu ısı, erimekte olan malzemeye geçerek iş parçasına iletilir (Şekil 2.38). Malzeme içinde, eriyik maddenin çok yüksek sıcaklık ve basınç seviye farklılıklarından kaynaklanan şiddetli dolaşımın olduğu, akıcı fazlı bir buhar kanalı (keyhole) oluşur (Çavuşoğlu ve Özden 2014). Ergiyik, ısınan buharın basıncıyla iş parçasının yüzeyine yükselir ve bu arada çekim kuvveti, viskozite ve yüzey gerilmeleriyle devam eden genişlemeler de engellenir. Bu yolla metal, lazer ışınının hareket yönünde ergitilir, geride kalan ergimiş kısım ise katılaşır. Lazer ışını sayesinde katılaşmadan sonra homojen bir yapıya sahip dar bir kaynak dikişi oluşur. Düşük ısı girdisi ile oluşturulan kaynak dikişinde, iş parçasındaki ısı tesiri altındaki alan çok dar sınırlar içinde kalır.



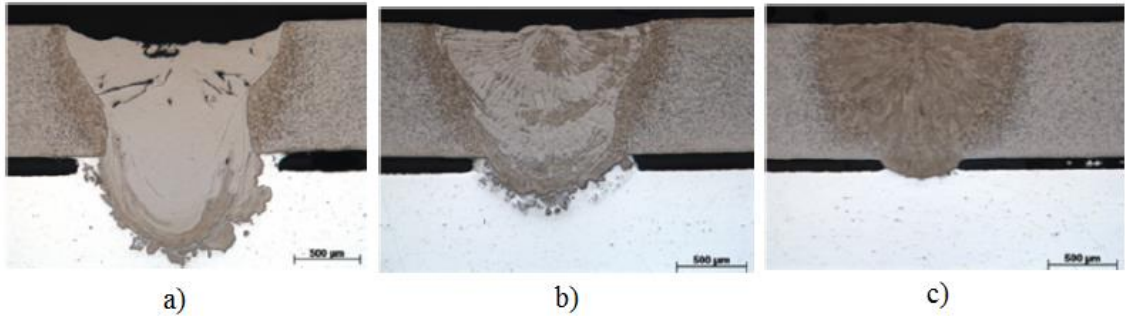
**Şekil 2.38.** Lazer nüfuziyet kaynak yönteminin şematik gösterimi

Alüminyum-çelik malzemelerin lazer nüfuziyet kaynağında birleştirilmesinde intermetalik fazların yapısı ısı girdisi ve kaynak dikişinin boyutları ile doğrudan ilişkilidir. Sierra vd. (2007) düşük karbonlu çelik ile alüminyumu birleştirdikleri çalışmalarında penetrasyon miktarının proses parametreleri ile kontrol edilmesi neticesinde kırılğan intermetalik faz oluşumunun azalacağını ve bu fazların kalınlıklarının 20 µm seviyelerine getirilebileceğini belirtmişlerdir. Schimek vd. (2011) ise kaynak dikişinin alüminyum tarafındaki nüfuziyet derinliğine bağlı olarak

intermetalik faz yapısının ve kalınlığının değiştiğini açıklamışlar, penetrasyon derinliğindeki artışın kırılğan intermetalik fazların artışına neden olduğunu ve bunun sonucunda bağlantının mekanik dayanımının azaldığını belirtmişlerdir. Fan vd. (2011) ise ısı girdisine ve buna bağlı olarak soğuma hızının intermetalik fazlar üzerindeki etkisini incelemişler ve soğuma hızının azaltılmasının kırılğan tabaka kalınlığının artmasındaki en etkili parametre olduğunu belirtmişlerdir.

avuşoğlu ve zden (2014) 1,2 mm kalınlığındaki DC04 eliği ile 2 mm kalınlığında 6061-T6 alüminyum alaşımlarını birleştirilmesinde farklı ısı girdisi seviyelerinin etkilerini incelemişler ve artan ısı girdisinin kaynak dikişinin nüfuziyetini arttırdığını bunun da mekanik dayanımı dışürdüğünü belirtmişlerdir. Metalürjik birleşmenin olduğu ara yüzeyde  $Fe_3Al$ ,  $FeAl$  ve  $FeAl_2$  intermetalik fazlarının olduğunu EDX analizleri ve sertlik ölçümleri ile tespit etmişlerdir.

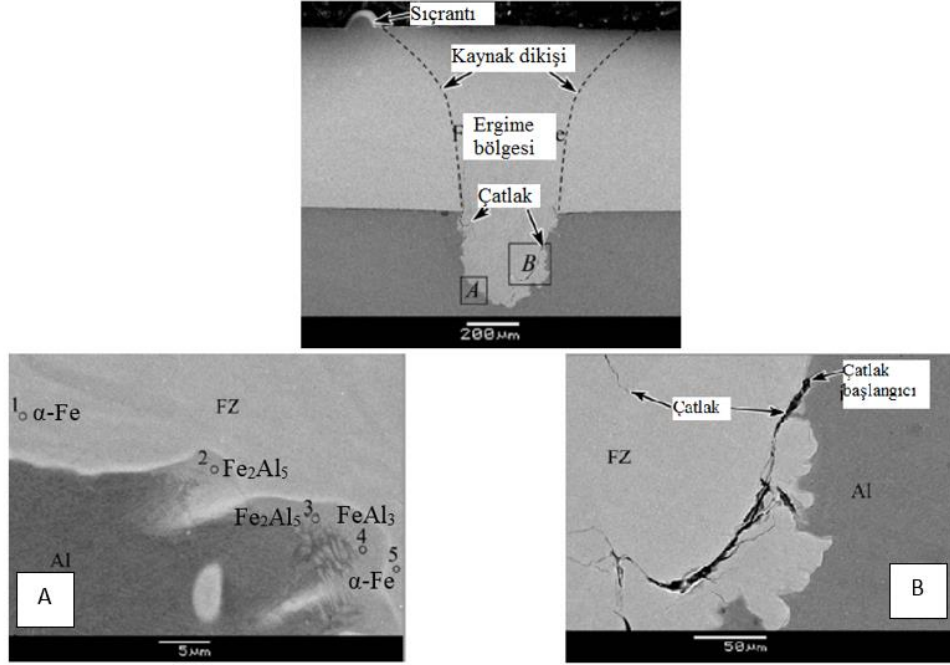
Seffer vd. (2016) farklı türde elik malzemeler ile alüminyumların birleştirilmesinde ısı girdisi, malzeme çeşidi ve malzeme kalınlığının etkisini incelemişlerdir. alışmalarında ısı girdisindeki azalma ile penetrasyonunu azaldığını bu sayede ergiyik havuzuna karışan sıvı alüminyumun azalarak daha az kırılğan intermetalik fazların olduğunu açıklamışlardır (şekil 2.39).



**şekil 2.39.** Farklı ısı girdisi seviyelerinde birleştirilmiş parçaların kesit görümleri: a) 45 kJ/m, b) 43,27 kJ/m ve c) 41,67 kJ/m (Seffer vd. 2016)

Yang vd. (2016) alüminyum ile paslanmaz çeliğin birleştirilmesinde kaynak dikiş geometrisinin ara yüzeyde oluşan intermetalik fazlar üzerindeki etkisini incelemişler, penetrasyon derinliğinin azaldığı durumda demir oranı bakımından zengin intermetalik fazların olduğunu ve 46 N/mm mekanik dayanım elde edildiğini belirtmişlerdir.

Penetrasyon miktarının artması ile kırılgen intermetalik fazların arttığını da açıklamışlardır (Şekil 2.40).



**Şekil 2.40.** Penetrasyonun fazla olduğu durumda kaynak dikişinin görüntüsü ve ortaya çıkan fazlar (Yang vd. 2016)

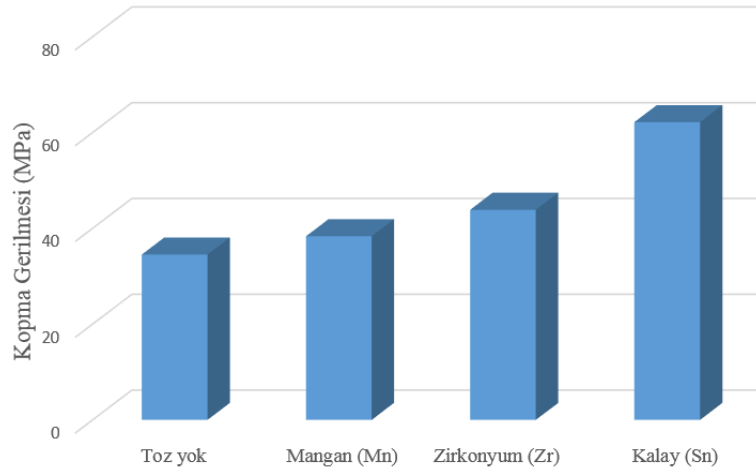
Cui vd. (2018) 1,5 mm kalınlığında düşük karbonlu çelik ile yine 1,5 mm kalınlığında 6061 alüminyum alaşımını çift lazer ışını (dual laser beam) kullanarak birleştirmişler ve lazer ışınları arasındaki uzaklık ve güç yoğunluğunun etkisini incelemişlerdir. Kaynak hatalarının oluşumunda penetrasyon derinliğinin çok önemli olduğunu ve penetrasyonun 700 µm'nin altında tutulması gerektiğini vurgulamışlardır. Daha kırılgen olan alüminyumca zengin intermetalik fazların da penetrasyon derinliğinin azalması ile azaldığını belirtmişlerdir.

Alüminyum-çelik malzemelerin lazer nüfuziyet kaynağı ile birleştirilmesinde darbeli lazer ışınlarının da etkisi araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Yan vd. (2010) darbeli lazer ışını kullanarak daha düşük güç ile daha derin penetrasyon elde edildiğini ve bu sayede bağlantının mekanik dayanımının arttığını belirtmişlerdir. Darbeli lazer ışınları ile güç yoğunluğunun optimize edilmesi sayesinde bağlantı bölgesindeki intermetalik tabaka kalınlığı 10 µm seviyelerine kadar indirilmiştir. Torkamany vd. (2010) darbeli mod lazer ışınlarının lazer gücü, darbe süresi ve tekrarlanmasının intermetalik faz oluşumuna

etkisini incelemişler ve kaynak dikişinde görülen çatlak ve porozite gibi kaynak hatalarının uygun işlem parametrelerinin seçilmesi sonucu azaldığını belirtmişlerdir.

Lazer nüfuziyet kaynağı ile alüminyum-çelik malzemelerin birleştirilmesinde her iki malzemede sıvı faza geçtiği için intermetalik faz oluşumu kaçınılmazdır. Ancak ara yüzeye eklenen farklı alaşım elementleri ile oluşan fazların türleri değiştirilebilmektedir. Bu doğrultuda da farklı çalışmalar yapılmıştır. Çavuşoğlu (2011) parçaların ara yüzeyine bakır ve nikel ara malzemeleri yerleştirerek ara malzeme kullanımının kaynak bağlantısının mekanik ve metalürjik özellikleri üzerine etkilerini incelemiş ve bakır ara malzeme kullanılan birleştirmelerde daha kırılgan olan intermetalik fazların ( $FeAl_2$  ve  $FeAl_3$ ) azaldığını açıklamışlardır. Chen vd. (2012) ise paslanmaz çelik-alüminyum birleştirilmesinde ara yüzeye yerleştirilen 0,1 mm kalınlığındaki nikel folyo ile daha az kırılgan bir intermetalik faz olan  $Al_{0,9}Ni_{1,1}$  oluştuğunu ve bu sayede bağlantının mekanik dayanımının arttığını belirtmişlerdir. Chen vd. (2014) de nikel ara malzemenin kaynak bölgesinde çatlak oluşumunu azaltarak mekanik özellikleri iyileştirdiğini vurgulamışlardır.

Wang vd. (2016) ara yüzeyde  $Al_5Si$  folyo kullanımının etkisini incelemişler ve ara malzemesiz duruma göre daha yüksek dayanıma sahip kaynaklar elde etmişlerdir. Silisyum sayesinde intermetalik faz tabakasının kalınlığının 2  $\mu m$  seviyelerine kadar düşürüldüğünü ve intermetalik fazlardaki alüminyum oranının azaltıldığını belirtmişlerdir. Zhou vd. (2017a) kaynak dikişine eklenen mangan ve silisyum tozlarının etkisini incelemişler, eklenen bu alaşım tozları sayesinde kaynak dikişinde görülen sıçrıntı, çökme gibi hataların azaldığını ve penetrasyon miktarının arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca eklenen mangan ve silisyum tozları sayesinde kırılgan faz kalınlığının azaldığını ve bağlantının mukavemetinin arttığını açıklamışlardır. Zhou vd. (2017b) ise mangan, zirkonyum ve kalay tozlarının intermetalik faz oluşumunda etkisini incelemişler, kalay tozu ile yapılan kaynaklarda porozite ve çatlak oluşumu görülmediğini ve en ince intermetalik tabakanın bu toz ile yapılan birleştirmelerde elde edildiğini belirtmişlerdir. Ara yüzeyde intermetalik fazların yerine oluşan  $FeSn$  fazları ile daha yüksek mekanik dayanım elde edildiğini açıklamışlardır (Şekil 2.41).



**Şekil 2.41.** Lazer nüfuziyet kaynağında kaynak bölgesine ilave edilen tozların bağlantının dayanımına olan etkisi (Zhou vd. 2017b)

## 2.7. Galvaniz Kaplama Tabakasının Lazer Nüfuziyet Kaynağına Etkisi

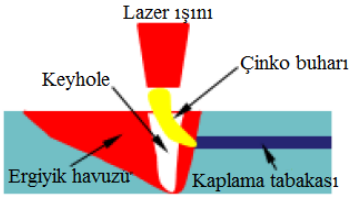

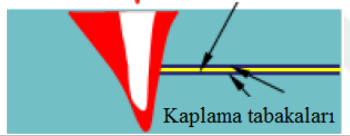
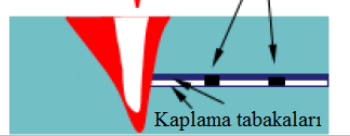
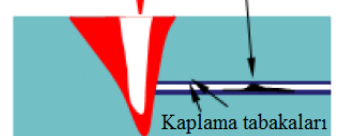
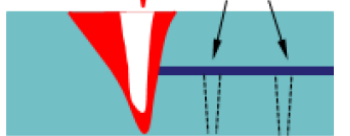
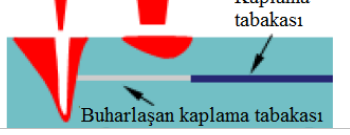
Yüzey kaplama teknikleri metallerin korozyon dayanımlarını arttırmak amacıyla otomotiv sektöründe yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında galvaniz kaplama olarak bilinen ve metalin yüzeyinin çinko ile kaplanması esasına dayanan yöntem en geniş kullanım alanına sahiptir. Özellikle seri üretim hatlarında kullanılan parçaların daldırma yöntemi ile kaplanması sonucunda parçaların tüm yüzeyleri çinko ile kaplanmakta ve kaynak edilecek kısımlarda da bu kaplama tabakası bulunmaktadır.

Galvaniz kaplı malzemelerin bindirme formatında birleştirilmesinde kaplama tabakasında kullanılan çinkonun ergime noktası (420 °C) ve kaynama noktası (907 °C) çeliğin ergime noktasından (1538 °C) oldukça düşüktür. Bu nedenle ergiyik havuzu oluşana kadar çinko kaplama tabakası buharlaşarak sıçrantı, porozite, düşük korozyon dayanımı gibi çeşitli sorunlar ortaya çıkmaktadır. Gerekli tedbirler alınmadığı ve uygun kaynak parametreleri seçilmediği durumda çinko buharlaşarak dengesiz bir ergiyik havuzu oluşmasına, porozite, sıçrantı, düşük korozyon dayanımı gibi olumsuzlukların ortaya çıkmasına neden olmaktadır (Chen vd. 2011).

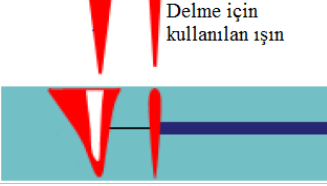
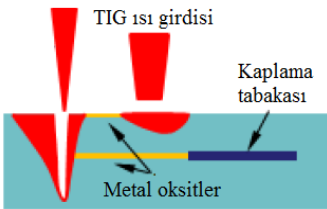
Literatürde birçok araştırmacı galvaniz kaplı çeliklerin bindirme formatında lazer nüfuziyet kaynağı ile birleştirilmesinde farklı teknikler kullanarak buharlaşan çinkonun kaynak dikişine girmeden kaynak bölgesinden uzaklaşması için ön ısıtma, parçalar arası

boşluk bırakma, darbeli lazer ışınlar kullanma, ara yüzeye ilave folyo veya toz yerleştirme gibi çeşitli önlemler geliştirmişlerdir (Çizelge 2.5).

**Çizelge 2.5.** Galvaniz kaplamalı malzemelerin bindirme formatında birleştirilmesinde çinko buharının zararlı etkilerinden korunmak için yapılan uygulamalar (Ma vd. 2012)

Uygulanan metot	Şematik görüntüsü	Olumsuzlukları
Lazer ışınının uzatılması veya düşük güçte, düşük hızda kaynak yapılması		Düşük işlem hızları ve stabil olmayan kaynak dikişleri ortaya çıkmaktadır.
Darbeli lazer ışınlarının kullanılması		
Ara yüzeyde ince folyo veya ilave toz kullanılması		Uygulama zorlukları vardır.
Malzemeler arasında belirli bir boşluk bırakılması		
Lazer ışını ile çıkıntı oluşturulması		Ön hazırlık gerektirdiği için süre ve maliyetleri artırır.
Alt malzeme yüzeyinde delikler oluşturulması		
Lazer ışını ile ön ısıtma yapılması		Donanım karmaşıklığı oluşturur.



Lazer ışını ile yarık açılması		
TIG Kaynağı ile ön ısıtma yapılması		Takip mesafesinin doğru ayarlanması gereklidir.

Literatürde galvaniz çeliklerin alüminyum alaşımlar ile lazer nüfuziyet kaynağı ile birleştirilmesi ile ilgili sınırlı çalışma bulunmaktadır. Chen vd. (2011) galvaniz kaplı 1 mm kalınlığındaki düşük karbonlu çelik ile 1 mm kalınlığındaki 5754 serisi alüminyum alaşımının birleştirilmesinde ilerleme hızı, lazer gücü, kaynak paso sayısı ve koruyucu gaz türünün kaynak kalitesine olan etkisini incelemişlerdir. Koruyucu gaz türüne bağlı olarak penetrasyon derinliğinin değişiklik gösterdiğini ve N<sub>2</sub> gazının kullanıldığı durumlarda daha yüksek mekanik dayanım elde edildiğini açıklamışlardır.

Kouadri-David (2014) galvaniz kaplı 1,2 mm kalınlığında DP600 çeliği ile 1,2 mm kalınlığında 6082 alüminyum alaşımını lazer nüfuziyet kaynağı ile birleştirmişlerdir. Çalışmalarında alüminyumun üstte olduğu durumlarda ergiyik havuzunda çökmeler, derin çatlak oluşumları ve alüminyumca zengin intermetalik tabakaların oluştuğunu bu nedenle bu tür bir kaynağın başarısız olacağını açıklamışlardır. Ayrıca buharlaşan çinko buharının dışarı çıkabilmesi için iki parça arasında 0,1 mm boşluk bırakılması ile daha yüksek dayanıma sahip kaynakların elde edildiğini, çinko buharının dışarı taşınmadığı durumlarda ve penetrasyon derinliğinin 600 µm'nin üzerine çıktığı durumlarda mekanik dayanımın düştüğünü vurgulamışlardır.

Ma vd. (2014) galvaniz kaplı DP590 çeliği ile 6061 alüminyum alaşımını birleştirmiş ve galvaniz kaplama tabakasının olumsuz etkilerini engelleyebilmek için kaynak öncesinde odaklanmamış lazer ışını ile ön ısıtma işlemi uygulanmasını önermişlerdir. Galvaniz kaplamanın mekanik olarak kaldırılması ile elde edilen mekanik dayanımın ön ısıtma ile belirli oranda galvaniz tabaka içeren bağlantılardan daha düşük olduğunu vurgulamışlardır.



### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, çalışma kapsamında yapılan kaynaklarda kullanılan malzeme türleri, yöntemler ve araçlar tanıtılmıştır. Birleştirilecek malzeme türlerinin seçiminde otomotiv endüstrisindeki kullanım oranları göz önüne alınmıştır. Bu doğrultuda araç gövdesinde kaput, bagaj, tampon ve ekstrüde gövde ve şasi komponentlerinde tercih edilen AA6082 alüminyum alaşımı tercih edilmiştir. Bu alaşım türünün esas alaşım elementleri magnezyum ve silisyumdur ve bu elementler yapıdaki sertleştirici özelliğe sahip Mg<sub>2</sub>Si metalleri arası bileşimini oluştururlar. Mükemmel korozyon direncine sahip olup 6XXX serisi alüminyum alaşımları içerisinde en yüksek dayanıma sahip alaşımlardan biridir. Yüksek mukavemetli çelik olarak DP600 seçilmiştir. DP600 saclar araçlarda çarpışma performansını arttıran ve daha çok yapısal parçalarda kullanılan bir çelik türüdür. Genellikle 0,8-1 mm kalınlık aralığında kullanımı yaygındır. Ayrıca bu sacların büyük bir kısmı korozyon dayanımı açısından araç gövdesinde galvaniz kaplamalı olarak kullanıldığı için malzeme seçiminde bu kriter de göz önünde bulundurulmuştur.

Çalışma kapsamında deneysel tasarım metodlarından Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem ile parametre optimizasyonu gerçekleştirilmiş ve kaynak parametrelerinin etkileri tekil olarak belirlenmiştir.

#### 3.1. Materyal

Çalışma kapsamında 1 mm kalınlığında AA6082-T6 alüminyum levha ve 0,8 mm kalınlığında galvaniz kaplı DP600 çelik sac kullanılmıştır. Galvaniz kaplama sacın her iki yüzeyinde de 50 g/m<sup>2</sup> olarak uygulanmıştır. Kullanılan malzemelerin kimyasal kompozisyonları Çizelge 3.1’de mekanik özellikleri ise Çizelge 3.2’de verilmiştir.

**Çizelge 3.1.** DP600 ve AA6082-T6 malzemelerinin kimyasal kompozisyonları (%Ağırlık)

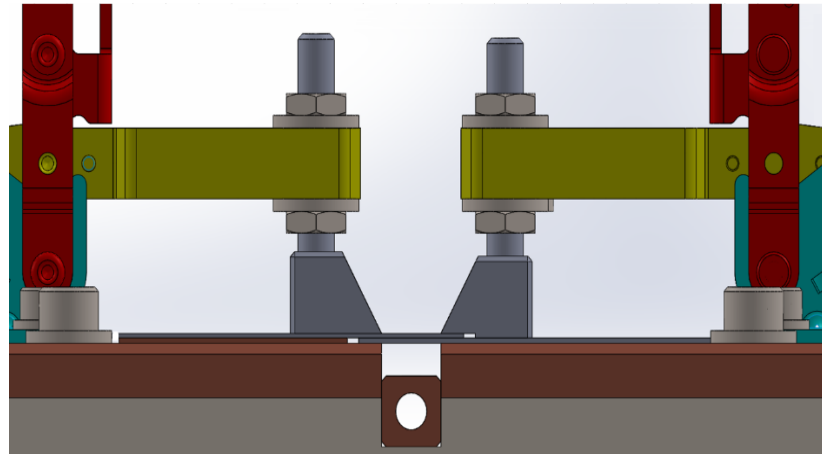
Malzeme	C	Mn	Mo	Si	Cr	Al	Ti	Fe	Zn	Mg
DP600	0,04	1,4	0,2	0,48	0,21	0,04	-	Temel	-	-
AA6082-T6		1	-	1,31	0,25	Temel	0,1	0,5	0,2	1,2

**Çizelge 3.2.** DP600 ve AA6082-T6 malzemelerinin mekanik özellikleri

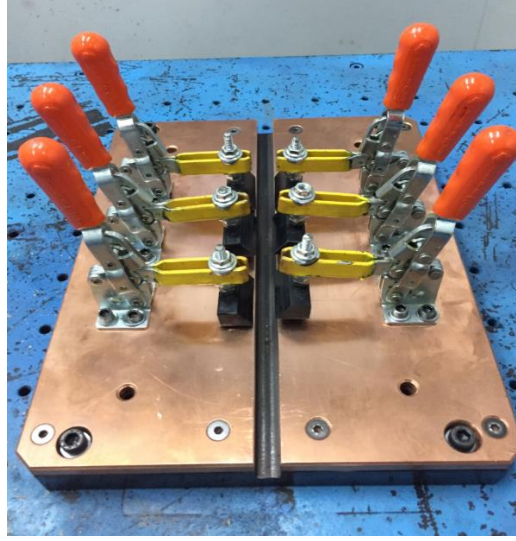
<b>Malzeme</b>	<b>Akma mukavemeti (MPa)</b>	<b>Çekme mukavemeti (MPa)</b>	<b>Uzama (%)</b>
DP600	270-330	640-660	23
AA6082-T6	250-310	300-330	12

Lazer kaynak işlemlerinde kullanılan çelik saclar ve alüminyum levhalar 150x80 mm boyutlarında kesilmiştir. Giyotinde kesilmiş parçalar olası kalıntıları gidermek adına aseton ile temizlenmiştir. Alüminyum levhalar ise ayrıca 1200 mesh'lik SiC taneli zımpara kâğıdı kullanılarak parlatılarak kaynak öncesi oksit tabakasından arındırılmıştır.

Bindirme kaynak yönteminde birleştirilecek parçaların ara yüzeyinde boşluk kalmaması önemlidir. Bu nedenle, çalışma kapsamında kullanılacak malzeme boyutlarına uygun bir kaynak fikstürü tasarlanıp imal edilmiştir. Bakır malzemedan üretilen fikstür üzerine parçalar dikey bağlantı elemanları (clamp) yardımı ile bir çok noktadan sabitlenerek kaynaklar gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.1'de parçaları sabitlemek için kullanılan kaynak fikstürü görülmektedir.



a)



b)

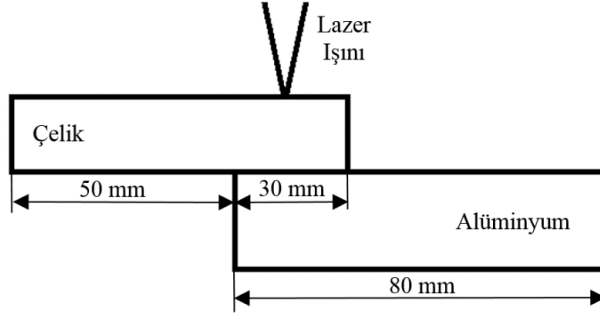
**Şekil 3.1.** Çalışmada kullanılan kaynak fikstürünün a) üç boyutlu tasarımı, b) görüntüsü

Çalışma kapsamındaki lazer kaynakları 6 eksenli KUKA robot kolu ile entegre çalışan fiber lazer ile gerçekleştirilmiştir. Maksimum 3 kW lazer gücüne sahip IPG marka lazer 1070  $\mu\text{m}$  dalga boyunda ışık üretmektedir. 0,2 mm proses fiberi kullanılan kaynak cihazında 100 mm kolimatör lensi, 300 mm ise odak lensi kullanılmaktadır (Şekil 3.2). Odaklanmış haldeki lazerin spot çapı 0,6 mm'dir.



**Şekil 3.2.** Çalışmada kullanılan lazer kaynak ekipmanları

Lazer kaynak işleminde çelik sac ile alüminyum levha bindirme formatında 30x150 mm boyutlarında üst üste gelecek şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 3.3). Lazer ışınının odak noktası üst kısımda olan çelik sacın üst yüzeyi olarak belirlenmiştir. Lazer kafa açısı parça yüzeyine dik olarak konumlandırılmıştır. Denemelerde koruyucu gaz kullanılmamıştır.



**Şekil 3.3.** Bindirme kaynak bağlantı tipinin şematik olarak gösterimi

## 3.2. Yöntem

### 3.2.1. Deney Tasarımı ve Parametre Optimizasyonu

Çalışmanın ilk kısmında lazer kaynak prosesindeki en etkili parametreler olan lazer gücü, ilerleme hızı ve odak mesafesinin optimum değerleri Taguchi deneysel tasarım metodu yardımı ile tespit edilerek mekanik dayanım üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Klasik deneysel tasarım yöntemleri sistemi etkileyen faktörlerin sayısındaki artışa bağlı olarak deney sayısını da arttırmakta, süre ve maliyet açısından verimsiz sonuçlar ortaya çıkarmaktadır. Taguchi yöntemi ile daha az sayıda deney ile faktörlerin doğru bir şekilde etkilerinin değerlendirilmesi mümkün olabilmektedir.

Taguchi metodunda öncelikle uygun ortogonal düzenin seçilmesi gereklidir. Taguchi metodunda çok sayıda deneysel durumu açıklamak için farklı ortogonal diziler oluşturulmuştur. Ortogonal dizinin en önemli özellikleri birçok faktörün en az sayı ile test edilmesine imkân sağlaması ve klasik metottan farklı olarak faktör kademelerini teker teker değiştirmek yerine eş zamanlı olarak değiştirme yapmayı önermesidir. Ortogonal diziler problemin özelliğine göre farklı kademe sayılarında belirlenmektedir. Genel olarak kullanılan diziler 2 seviyeliler için L4, L8, L16 ve L32 ve 3 seviyeliler için L9, L18 ve L27 dizileri olmaktadır. Dizilerin seçimi düzey sayısı ve toplam serbestlik

derecesine göre yapılmaktadır. Ortogonal dizinler sayesinde tam faktöriyel deneysel tasarımlarda çok sayıda yapılması gereken denemeler büyük oranda azaltılmaktadır. Örneğin tam faktöriyel tasarıma göre  $3^4=81$  adet deneme yapılması gerekirken, ortogonal dizinler sayesinde 9 adet deneme yeterli olmaktadır.

Bu çalışma kapsamında üç farklı işlem parametresinin üç farklı seviyesi için L9 ortogonal dizini kullanılmıştır. Yani Taguchi deneysel tasarımı üç sütun ve 9 satırdan oluşmuştur. Proses parametreleri olarak lazer gücü, ilerleme hızı ve odak mesafesi seçilmiştir. Her bir parametre içinde ön deneme sonuçlarına bağlı olarak üç seviye seçilmiştir. Seçilen proses parametreleri ve seviyeleri Çizelge 3.3'te verilmiştir. Odak mesafesinde seçilen eksi seviyeler lazer ışının parça yüzeyinden ne kadar içeride odaklandığını göstermektedir.

**Çizelge 3.3.** Taguchi yönteminde kullanılan proses parametreleri ve seviyeleri

Proses parametresi	Birimi	Seviye - 1	Seviye - 2	Seviye - 3
Lazer gücü	W	2800	2900	3000
İlerleme hızı	mm/s	90	95	100
Odak mesafesi	mm	-0,2	0	0,2

Taguchi yöntemindeki temel amaç hedef değer etrafındaki değişkenlerin azaltılmasıdır. Bu yöntemde belirlenen karakteristiklerinin ölçülmesinde ve değerlendirilmesinde kullanılan ölçüt, ölçülmek istenen sinyalin (S), gürültü faktörüne (N) oranıdır (S/N). Sinyal değeri sistemin verdiği ve ölçülmek istenen gerçek değeri, gürültü faktörü ise ölçülen değer içerisindeki istenmeyen faktörlerin payını temsil eder. S/N oranı değeri küçük olan değer iyi, büyük olan değer iyi, nominal değer iyi olarak kalite değerlerinin hedeflendiği değere göre farklı şekillerde hesaplanır ve analiz edilir. Çalışma kapsamında maksimum mekanik dayanım hedeflendiği için büyük olan değer iyi (larger the better) aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır:

$$S/N = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (3.1)$$

Bu formülde “y” karakteristik değeri (mekanik dayanımı), “n” ifadesi ise gerçekleştirilen deney sayısını belirtmektedir. Bütün bu hesaplamalar sonucunda her faktör için belirlenen en yüksek S/N oranı en yüksek mekanik dayanıma işaret eder.

Taguchi yöntemine göre deneylerin yapılmasından sonra hesaplanan S/N oranlarına bağlı olarak her bir parametrenin etkisini belirlemek amacı ile varyans analizleri (Analysis of Variance - ANOVA) gerçekleştirilmiştir. Varyans analizi test edilen parça gruplarının performansları arasındaki farklılığı göstermektedir. Varyans analizine F testi de denmektedir. Varyans değerinin hesaplanması, varyans analizi tabloları ile yapılmakta ve faktörlerin varyansları faktörlerin kareler toplamının serbestlik derecesine bölünmesi ile hesaplanmaktadır. Hata varyansı ise hata kareler toplamının serbestlik derecesine bölünmesi ile elde edilir. Varyans analizi tablosu oluşturulduktan sonra, faktörlerin önemini tespit etmek için F testi uygulanır. F testi uygulanırken hesaplanan F değerleriyle, istenen güven düzeyindeki F tablo değerleri karşılaştırılır ve F değeri tablodaki değerden büyükse  $1-\alpha$  güvenli olarak kabul edilir. Varyans analizi (ANOVA) tablosundan elde edilen F değeri ise faktör ya da etkileşim varyansının hata varyansına oranıdır.

Yapılan deneyin analiz sonuçları optimum parametre seviyelerini vermektedir. Elde edilen bu değer uygulanan test seviyeleri arasında değil ise doğrulama deneyi yapılarak sonuçları karşılaştırılır.

### **3.2.2. Isı Girdisinin Etkisinin İncelenmesi**

Bu kapsamda öncelikle proses parametrelerinin aralığını belirlemeye yönelik ön deneme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Farklı lazer gücü ve ilerleme hızlarında kaynaklar gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlara göre kaynak kalitesi açısından değerlendirilebilir olan birleşmenin sağlandığı numuneler incelenmiştir. Sonrasında alüminyum-çelik lazer kaynağında oluşan kaynak bölgesi incelenmiş ve genel karakteristik özellikleri açıklanmıştır.

Lazer gücü ve ilerleme hızı lazer kaynak işlemindeki en önemli ve kaynak kalitesini doğrudan etkileyen parametrelerdir. Bu parametreler ayrıca ısı girdisini de belirleyen parametreler olduğu için oldukça önemlidir. Çalışmanın üçüncü kısmında kaynak bölgesi mikro yapılarının şekillenmesinde ve buna bağlı olarak da kaynaklı bağlantıların mekanik

dayanımlarını etkileyen temel unsurlardan biri olan ısı girdisinin etkisi incelenmiştir. Esas itibariyle, lazer kaynağında sabit odak mesafesinde çalışıldığında ısı girdisi aşağıdaki gibi formüle edilir:

$$Isı\ Girdisi\ (IG)\ (J/mm) = \frac{Lazer\ Gücü\ (LG)\ (W)}{İlerleme\ Hızı\ (İH)\ (\frac{mm}{s})}$$

(3.2)

Bu kapsamda üç farklı lazer güç seviyesinde farklı ilerleme hızları ile denemeler yapılmıştır (Çizelge 3.4). Denemelerde koruyucu gaz kullanılmamıştır.

**Çizelge 3.4.** Isı girdisinin etkisini incelemek için yapılan lazer kaynaklarının işlem parametreleri

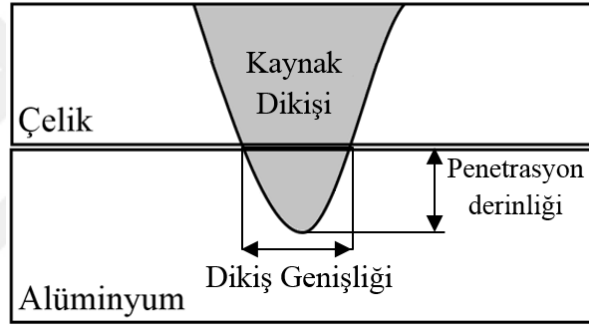
Lazer Gücü (W)	Odak Mesafesi (mm)	İlerleme Hızı (mm/s)	Isı Girdisi (J/mm)
3000	0	105	28,5
		100	30
		95	31,5
		90	33,3
		85	35,3
2500	0	85	29,4
		80	31,2
		75	33,3
		70	35,7
2000	0	70	28,5
		65	30,7
		60	33,3
		55	36,3

### 3.3. Metalürjik İncelemeler

Kaynak işlemlerinden sonra, kaynaklı numunelerden makro ve mikro yapı incelemeleri için numuneler alınmıştır. Numuneler kaynak bölgesinin ısı girdisine maruz kalıp hasar görmemesi için tel erozyon tezgâhında hazırlanmıştır. Makro ve mikro yapı incelemesi için alınan numuneler öncelikle Metkon ECOPRESS 100 marka numune kalıplama cihazı

ile enine kaynak kesitleri kalıplanarak, Metkon FORCIPOL 2V metalografik zımparalama ve parlatma cihazı ile zımparalanmış ve parlatılmıştır. Zımparalama adımlarında sırası ile 180-400-600-800-1000-1200 ve 2000 mesh'lik SiC taneli zımpara kâğıtları kullanılmıştır. Parlatma işlemi ise 0,3 µm'ye kadar alümina solüsyon kullanılarak tamamlanmıştır. Kaynak makro ve mikro yapısını ortaya çıkarmak için çelik malzeme için %3 Nital dağlayıcısı, alüminyum malzeme için ise Keller dağlayıcı iki ayrı adım olarak uygulanmıştır.

Optik mikroskop görüntüleri polarize ışık altında Clemex görüntü analiz sistemine sahip Nikon Eclipse MA100 ters metal mikroskobu ile alınmıştır. Yine aynı cihaz kullanılarak kaynak dikişinin boyutları (penetrasyon derinliği ve kaynak dikiş genişliği) ölçülmüştür (Şekil 3.4).

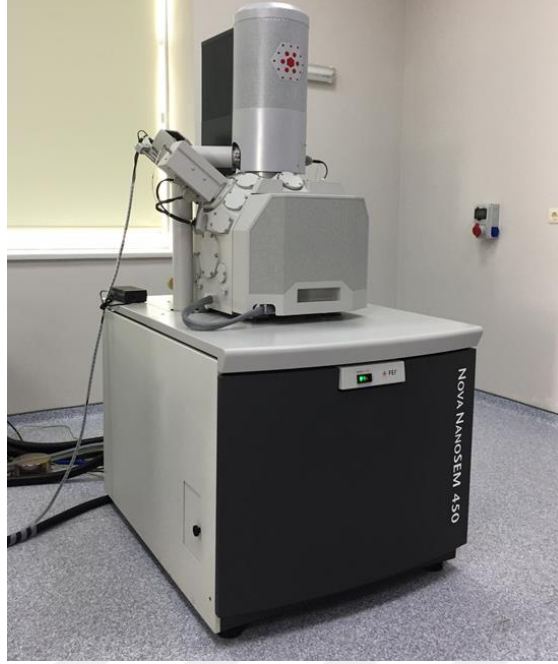


**Şekil 3.4.** Kaynak dikişinde ölçülen bölgelerin şematik görüntüsü

Mikro yapı görüntülemelerinde, optik mikroskop incelemelerine ek olarak FEI marka Nova Nano SEM 450 model taramalı elektron mikroskobundan da (SEM) yararlanılmıştır. Cihaz 1,2 mm çözünürlüğe sahip olup, yüksek kalitede görüntü alımına imkân sağlamaktadır (Şekil 3.5).

Kaynak bölgesinde oluşan fazların tespitinde SEM cihazı ile entegre olarak çalışan enerji yayımlı X-Işını (EDX) modülü kullanılmıştır. Hat tarama ve noktasal EDX ölçümleri ile elementlerin atomik yüzdeleri belirlenmiş ve fazlar literatürde yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar da göz önüne alınarak tespit edilmiştir. Ayrıca mikro sertlik ölçümleri ile de elde edilen sonuçlar doğrulanmıştır.

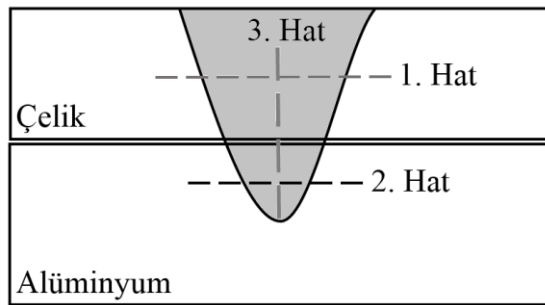




Şekil 3.5. Çalışmada kullanılan SEM-EDX cihazının görüntüsü

### 3.4. Mikro Sertlik Ölçümleri

Optik mikroskop incelemelerinden sonra Metkon Duroline–M mikro sertlik cihazı ile Vickers metoduna göre mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır. Mikro sertlik ölçümleri üç farklı hat üzerinde gerçekleştirilmiştir. Önce çelik malzeme-kaynak dikişi doğrultusunda yatay eksende (1. Hat), sonra alüminyum malzeme-kaynak dikişi doğrultusunda yatay eksende (2. Hat) ve son olarak kaynak dikişinde yukarıdan aşağıya doğru dikey doğrultuda (3. Hat) ölçümler alınmıştır (Şekil 3.6). Bunlara ek olarak kaynak dikişinin farklı noktalarında sertlik ölçümleri yapılarak oluşmuş olan fazların belirlenmesinde yararlanılmıştır. Ölçümlerde 100 gf yük 10 saniye boyunca uygulanmıştır.



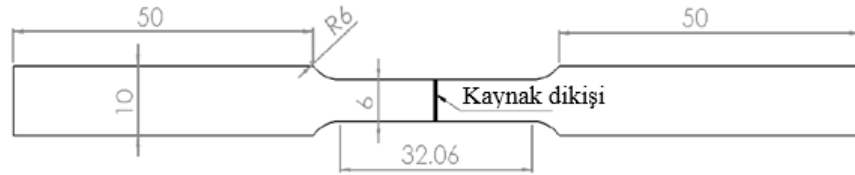
Şekil 3.6. Kaynaklı parçalardaki sertlik ölçümü alınan hatlar

### 3.5. Çekme Testleri

Çalışma kapsamındaki çekme testleri, Celtron marka yük hücresi ve MF (Mess- & Feinwerktechnik) marka otomatik ekstensometre ile donatılmış UTEST-7014 marka universal çekme-basma test cihazı ile yapılmıştır. Her bir kaynaklı parçadan beş adet ASTM E8/E8M standartlarına uygun numune tel erozyon tezgâhında çıkarılmış, çekme testlerinde elde edilen çekme kuvvetlerinin ortalaması alınmıştır (Şekil 3.6).



(a)



(b)

**Şekil 3.7.** (a) Çekme testi görüntüsü ve (b) çekme testi numunelerinin ölçüleri

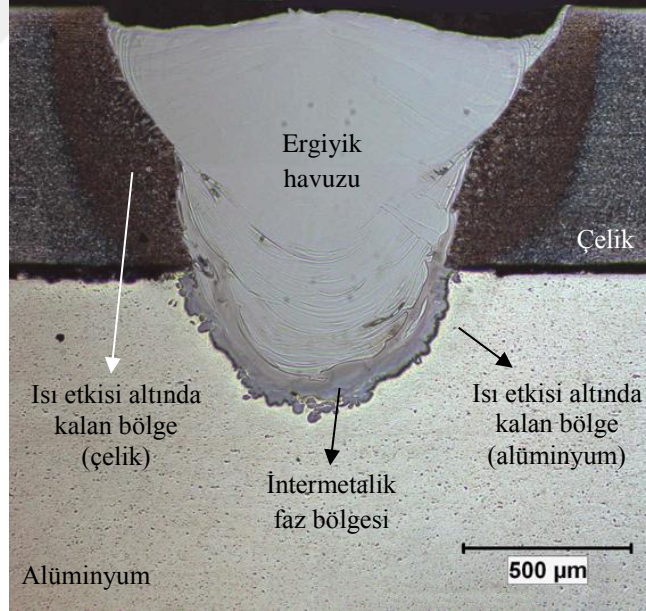
Kaynaklı parçaların mekanik dayanımlarının tespitinde literatürde genel değerlendirme kriteri olarak kabul edilen doğrusal dayanım değeri göz önüne alınmıştır. Doğrusal dayanım, çekme deneylerinde elde edilen çekme kuvvetinin (N) kaynaklı numune üzerindeki kaynak dikişinin uzunluğuna (mm) bölünmesi ile elde edilmektedir (N/mm) (Ma vd. 2014).

## 4. BULGULAR

Bu bölümde öncelikle alüminyum-çelik lazer kaynaklı bir numunenin kaynak bölgesinin karakteristik bölgeleri ve Taguchi yöntemi ile yapılan parametre optimizasyonu çalışmalarının sonuçları açıklanmıştır. Sonrasında proses parametrelerinin sınırlarını belirlemek adına yapılan ön denemelerin sonuçları verilmiştir. Ön denemelerde elde edilen kaynaklı bağlantıların özellikleri görsel, mekanik ve metalürjik olarak incelenmiş ve çalışılabilecek parametre seviye aralıkları tespit edilmiştir. Üçüncü aşamada ön denemeler sonucunda belirlenen çalışma aralıklarındaki ısı girdisi seviyelerinin bağlantının mekanik ve metalürjik özelliklerine olan etkisi açıklanmıştır.

### 4.1. Kaynak Dikişinin Karakteristik Bölgeleri

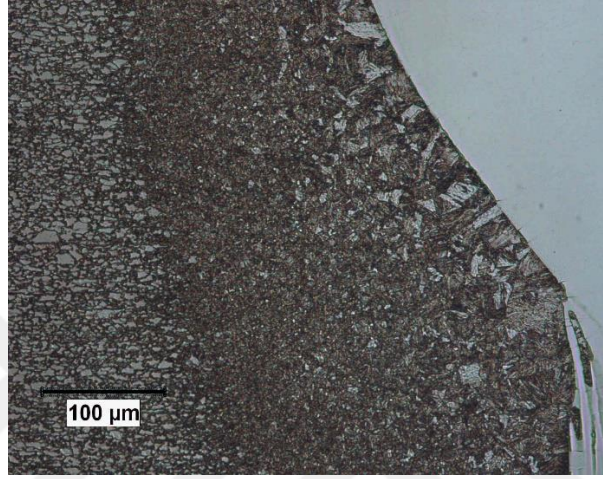
Lazer nüfuziyet kaynağında kaynak bölgesi temel olarak kaynak metali, ısı etkisi altında kalan bölgeler ve ana malzemeler olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır (Şekil 4.1). Kaynak metali alüminyum ile çeliğin sıvı halde karıştığı bölge olup içerisine dâhil olan alüminyum miktarına bağlı olarak yapısı ve görüntüsü değişmektedir.



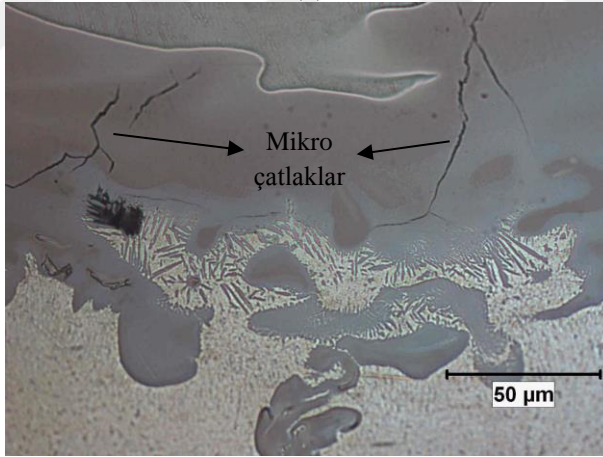
Şekil 4.1. Lazer nüfuziyet kaynaklı alüminyum-çelik bağlantısının kesit görüntüsü

Kaynak işlemi için uygulanan ısıya bağlı olarak çelik malzemede kaynak metalinin her iki yanında ısıdan etkilenen bölge oluşmaktadır (Şekil 4.2a). Alüminyum malzemede de

kaynak dikişinin çevresinde ısıdan etkilenen bir bölge oluşumu görülmektedir. Alüminyum-çelik malzemelerin nüfuziyet kaynak yöntemleri ile birleştirilmesinde intermetalik fazlar oluşmaktadır (Şekil 4.2b). Oluşan intermetalik fazlar kırılgan olup bağlantının mekanik özelliklerini düşürmektedir. Kaynak bölgesinde kaynak metali ile alüminyum ergime bölgesi arasında düzensiz sınırlar boyunca meydana gelmektedir. Oluşan bu tabaka rengi ile diğer bölgelerden görsel olarak ayırt edilebilmektedir.



(a)



(b)

**Şekil 4.2.** Lazer nüfuziyet kaynaklı alüminyum-çelik bağlantısındaki karakteristik bölgeler: a) çelik malzeme tarafında ısı etkisi altında kalan bölge, b) intermetalik faz bölgeleri

## 4.2.Kaynak Parametrelerinin Optimizasyonu

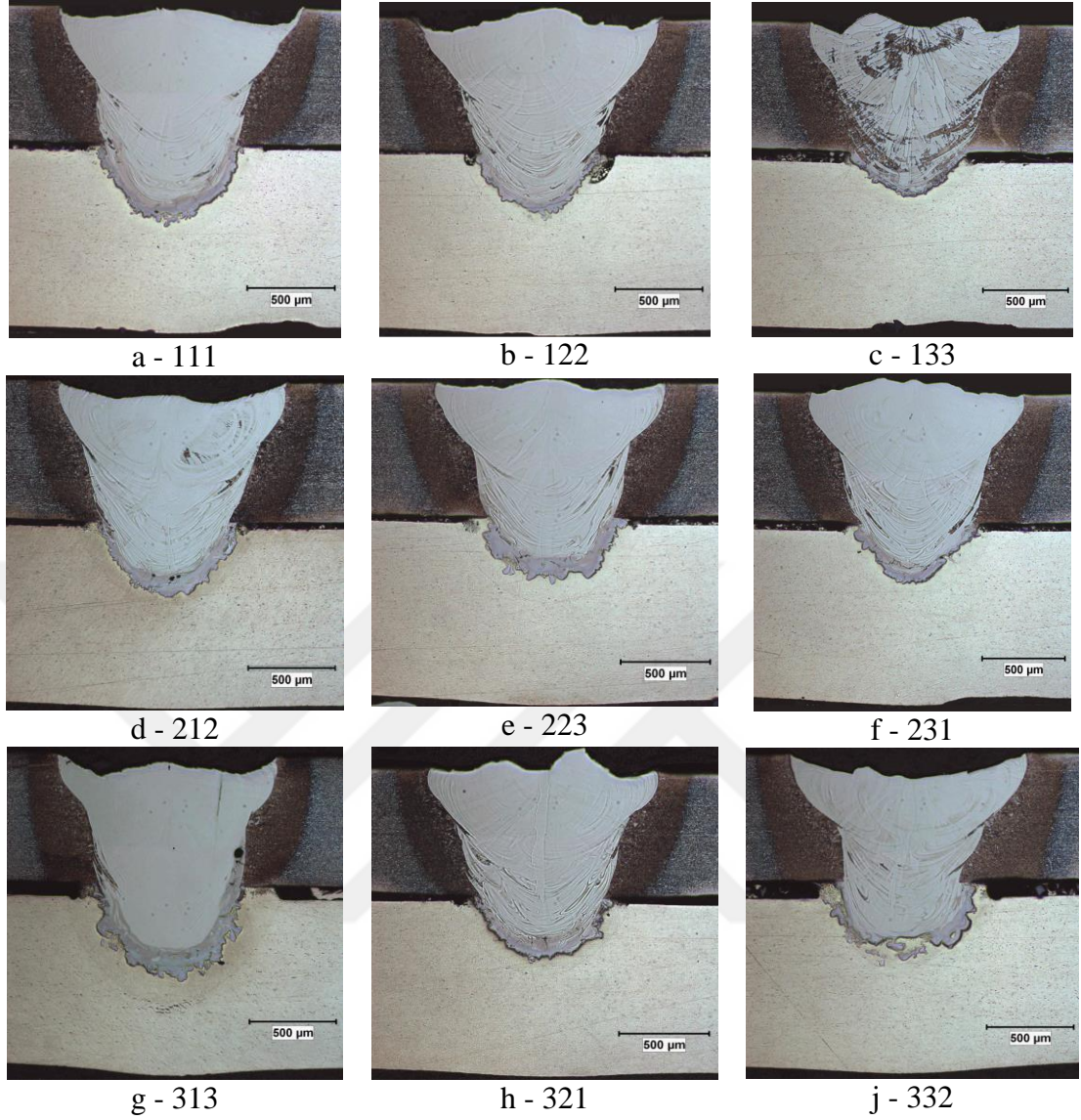
Çalışma kapsamında kaynak parametrelerinin optimizasyonu ve etkilerini belirlemek adına Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Parametrelerin alt ve üst sınırları ön denemeler ile belirlenmiştir. Lazer gücü için 2800 W – 2900 W – 3000 W, ilerleme hızı için 90 mm/s – 95 mm/s – 100 mm/s seviyeleri seçilmiştir. Odak mesafesi için ise -0,2 mm (parçanın içinde), 0 mm (parça yüzeyinde) ve 0,2 mm (parça yüzeyinden yukarıda) seviyeleri belirlenmiştir. Oluşturulan Taguchi L9 ortogonal dizini ve bu numunelerin mekanik dayanımları ile “büyük olan değer iyi” kriteriyle hesaplanan S/N oranları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

**Çizelge 4.1.** Taguchi deneysel tasarım tablosu ve mekanik dayanım sonuçları

Numune Kodu	Lazer Gücü (W)	İlerleme Hızı (mm/s)	Odak Mesafesi (mm)	Ort. Mekanik Dayanım (N/mm)	S/N Oranı
111	2800	90	-0,2	69,7	36,36
122	2800	95	0	81,5	38,19
133	2800	100	0,2	103	40,11
212	2900	90	0	73,2	36,98
223	2900	95	0,2	71,8	37,06
231	2900	100	-0,2	86,4	38,64
313	3000	90	0,2	65,4	36,15
321	3000	95	-0,2	63,9	36,07
332	3000	100	0	78,4	37,79

Çizelge 4.1’de belirtilen parametreler ile yapılan kaynaklara ait kesit görüntüleri optik mikroskop ile alınmıştır (Şekil 4.3.). Kaynak parametresine bağlı olarak kesit geometrisinin değişim gösterdiği görülmüştür. Numunelerin kaynak dikişlerinde çatlak oluşumu, porozite gibi kaynak hatalarına rastlanmamıştır.





**Şekil 4.3.** Taguchi deneysel tasarım sonucuna elde edilen kaynaklı parçaların kesit görüntüleri

Proses parametrelerinin S/N oranları ve ortalama değerlere etkileri Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3'te verilmiştir. Ayrıca, bu etki seviyeleri Şekil 4.4'te grafik olarak gösterilmiştir. Şekil 4.4'te de görüldüğü üzere, proses parametrelerinin hem S/N oranlarına hem de ortalamalara etkileri birbirleri ile uyum göstermektedir.

**Çizelge 4.2.** Proses parametrelerinin S/N oranlarına etki seviyeleri

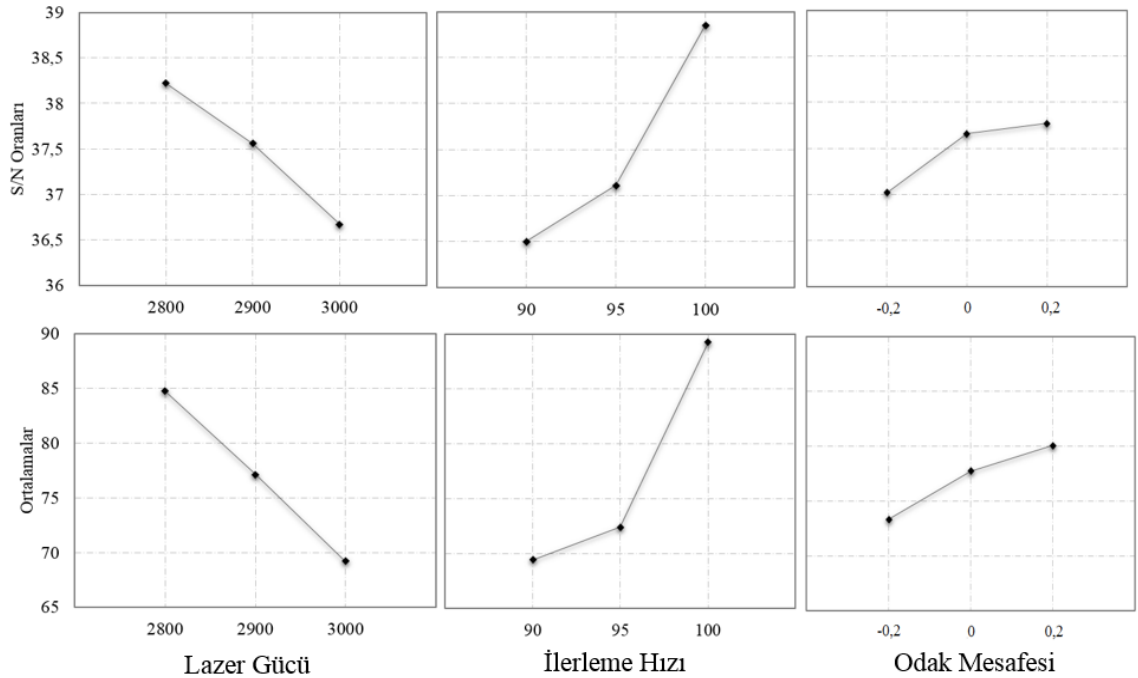
Seviye	Lazer Gücü	İlerleme Hızı	Odak Mesafesi
1	38,23*	36,50	37,03
2	37,57	37,11	37,66
3	36,68	38,85*	37,78*
Delta	1,55	2,35	0,75
Rank	2	1	3

\*Optimum seviyeler

**Çizelge 4.3.** Proses parametrelerinin ortalama etki seviyeleri

Seviye	Lazer Gücü	İlerleme Hızı	Odak Mesafesi
1	84,74*	69,42	73,32
2	77,12	72,40	77,70
3	69,20	89,23*	80,04*
Delta	15,54	19,81	6,72
Rank	2	1	3

\*Optimum seviyeler



**Şekil 4.4.** Kaynak parametrelerinin S/N oranları ve ortalamalara göre etki seviyeleri

Sonuçlar incelendiğinde mekanik dayanımı etkileyen en önemli proses parametresinin ilerleme hızı olduğu görülmüştür. Hem S/N oranlarını hem de ortalamaları maksimum yapan parametre seviyeleri lazer gücü için 1, ilerleme hızı için 3 ve odak mesafesi için 3 olarak tespit edilmiştir. Bu parametre seviyeleri sırası ile 2800 W, 100 mm/s ve 0,2 mm'dir. Bu parametre seviyeleri deney tasarımında yer aldığı için doğrulama deneyi yapmaya gerek kalmamıştır (133 kodlu numune).

Deneysel tasarımda kullanılan Taguchi yönteminin belirlediği optimum parametre seviyeleri için yapılan tahminler ve hataları Çizelge 4.4'te verilmiştir. Çizelgeden de görülebileceği gibi Taguchi yöntemi ile ortalama mekanik dayanım değeri %2.99 oranında bir hata ile tahmin edilebilmektedir. Bu hata oranı kullanılan deneysel tasarım yönteminin optimizasyon için uygun olduğunu göstermektedir.

**Çizelge 4.4.** Proses parametrelerinin optimum değer tahminleri

	Ortalama mekanik dayanım (N/mm)	S/N oranı
Deneysel sonuç	102,97	40,11
Tahmin sonucu	99,97	39,87
Tahmin hatası (%)	2,99	

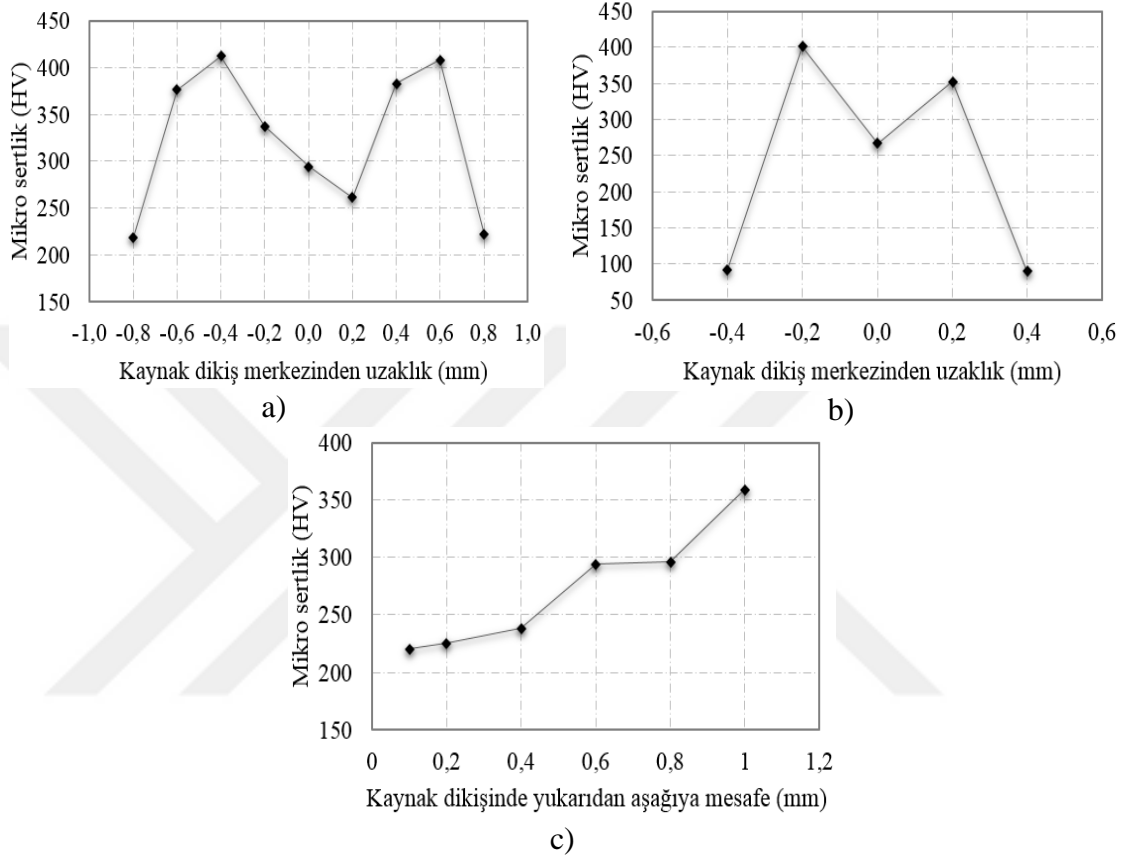
İşlem parametrelerinin ortalama mekanik dayanım üzerindeki etkilerini tespit etmek için ANOVA uygulanmıştır (Çizelge 4.5). ANOVA sonucundan da görüldüğü gibi mekanik dayanım üzerindeki en etkili parametre %57,67 oranı ile ilerleme hızıdır. İkinci etkili parametre ise %30,53 katkı oranı ile lazer gücüdür. Odak mesafesinin ise seçilen parametre seviyelerinde etkisi %5,89 olarak hesaplanmıştır.

**Çizelge 4.5.** Proses parametrelerinin etkilerini tespit etmek için oluşturulan ANOVA tablosu

Parametre	DF	Adj SS	Adj MS	F	P	%Katkı
Lazer gücü	2	362,36	181,18	5,18	0,162	30,53
İlerleme hızı	2	684,58	342,29	9,78	0,093	57,67
Odak mesafesi	2	69,92	34,96	1,00	0,500	5,89
Kalan hata	2	70,02	35,01			5,91
Toplam	8	1186,88				



Taguchi yöntemi ile elde edilen sonuçlara göre en iyi ortalama mekanik dayanıma sahip numune (133) ile en kötü ortalama mekanik dayanıma sahip numune (321) üzerinden mikro sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.5'te 133 kodlu en iyi mekanik dayanımı gösteren numunenin sertlik ölçüm sonuçları verilmiştir.

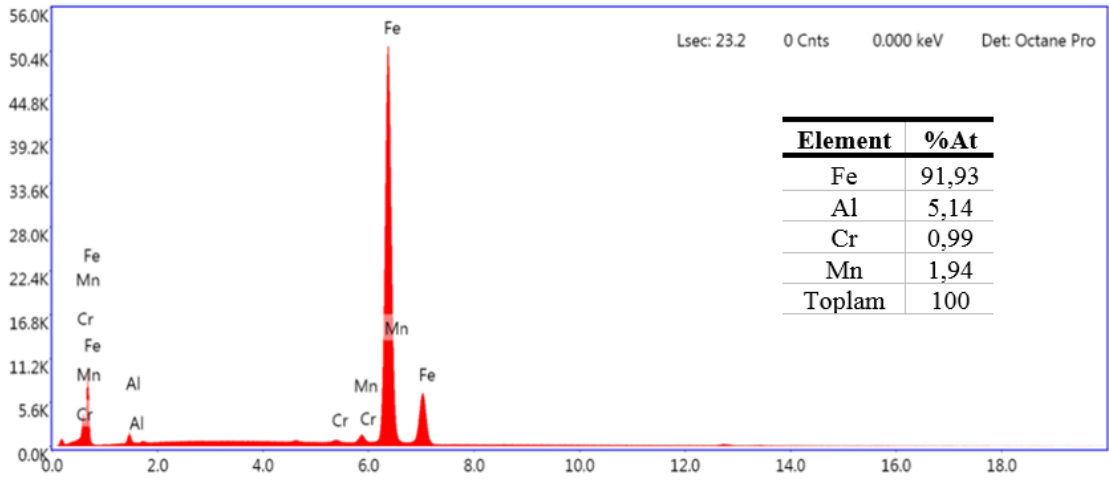


**Şekil 4.5.** 133 kodlu numunenin mikro sertlik ölçümleri: a) çelik-kaynak dikişi boyunca, b) alüminyum-kaynak dikişi boyunca ve c) kaynak dikişi boyunca dikey ölçüm sonuçları

Yapılan sertlik ölçümlerinde kaynak bölgesindeki intermetalik fazların oluştuğu bölgelerde sertlik değerlerinde artış olduğu görülmüştür. En büyük mikro sertlik değeri alüminyum-kaynak dikişi boyunca gerçekleştirilen ölçümlerde, kaynak bölgesinin sınırlarında 401 HV olarak ölçülmüştür. Kaynak dikişindeki ortalama sertlik değeri 271 HV olduğu görülmüştür. Kaynak dikişinin orta noktasında ve intermetalik fazların oluştuğu bölgelerde EDX analizleri ile oluşan fazlar tespit edilmiştir. Şekil 4.6'da 133 kodlu numunenin SEM görüntüsü, EDX ölçümü yapılan bölgesi ve analiz sonucu verilmiştir.



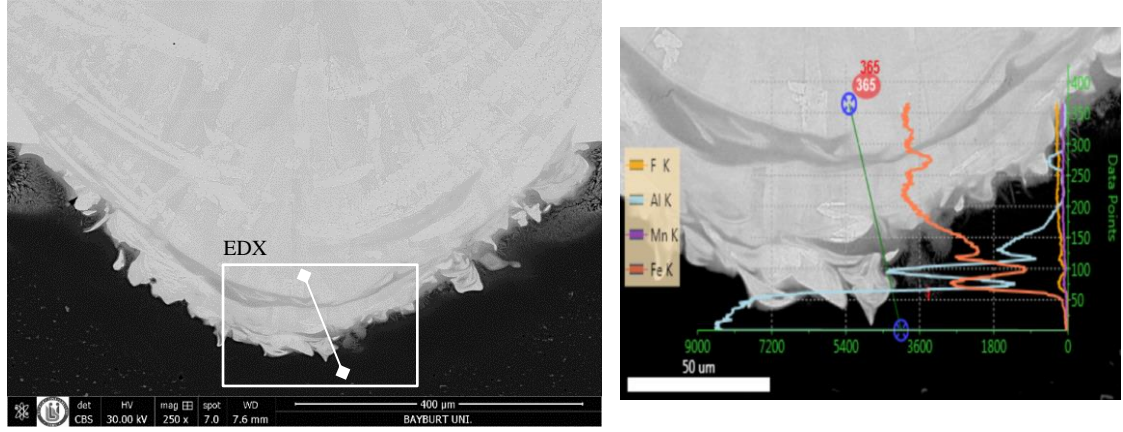
a)



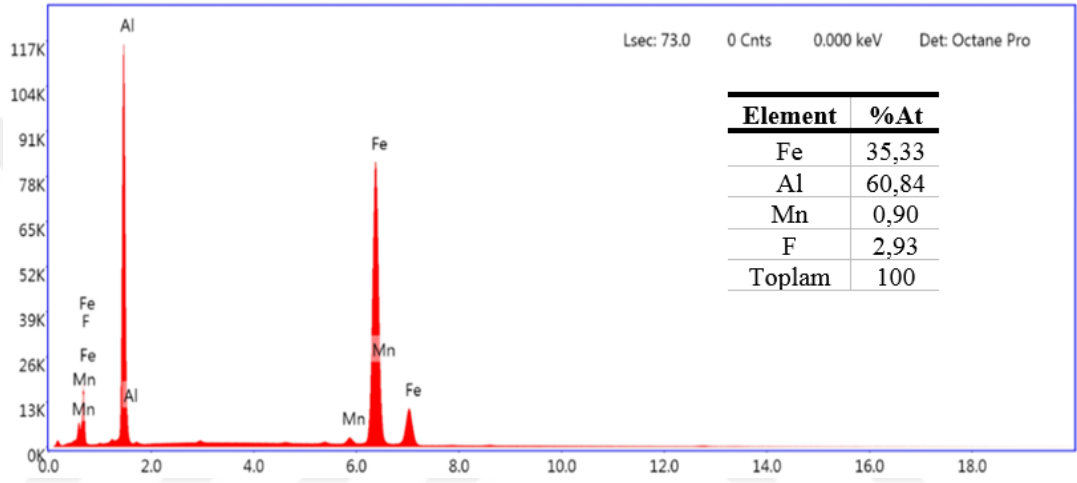
b)

**Şekil 4.6.** 133 kodlu numunenin: a) SEM görüntüsü ve EDX analizi gerçekleştirilen bölgesi, b) EDX analiz sonucu

Şekil 4.6'dan da görüleceği gibi kaynak dikişinde Fe elementinin atomik yüzdesi %92 seviyelerinde iken Al atomunun yüzdesi %5'te kalmıştır. Bu sonuç kaynak dikişinde alüminyumca zengin intermetalik faz oluşumu olmadığını göstermiştir. Ayrıca bu numunenin kaynak dikişinde intermetalik fazların oluştuğu sınır bölgesinde EDX alan taraması yapılarak oluşan fazlar tespit edilmiştir. 70 µm uzunluğunda bir hat 365 noktadan ölçüm alınarak taranmıştır (Şekil 4.7). Elde edilen sonuçlara göre taranan alanda atomik yüzde olarak Al %60, Fe ise %35 oranında gözlenmiştir. Bu sonuçlara göre bu bölgede Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> intermetalik fazının oluştuğu tespit edilmiştir.



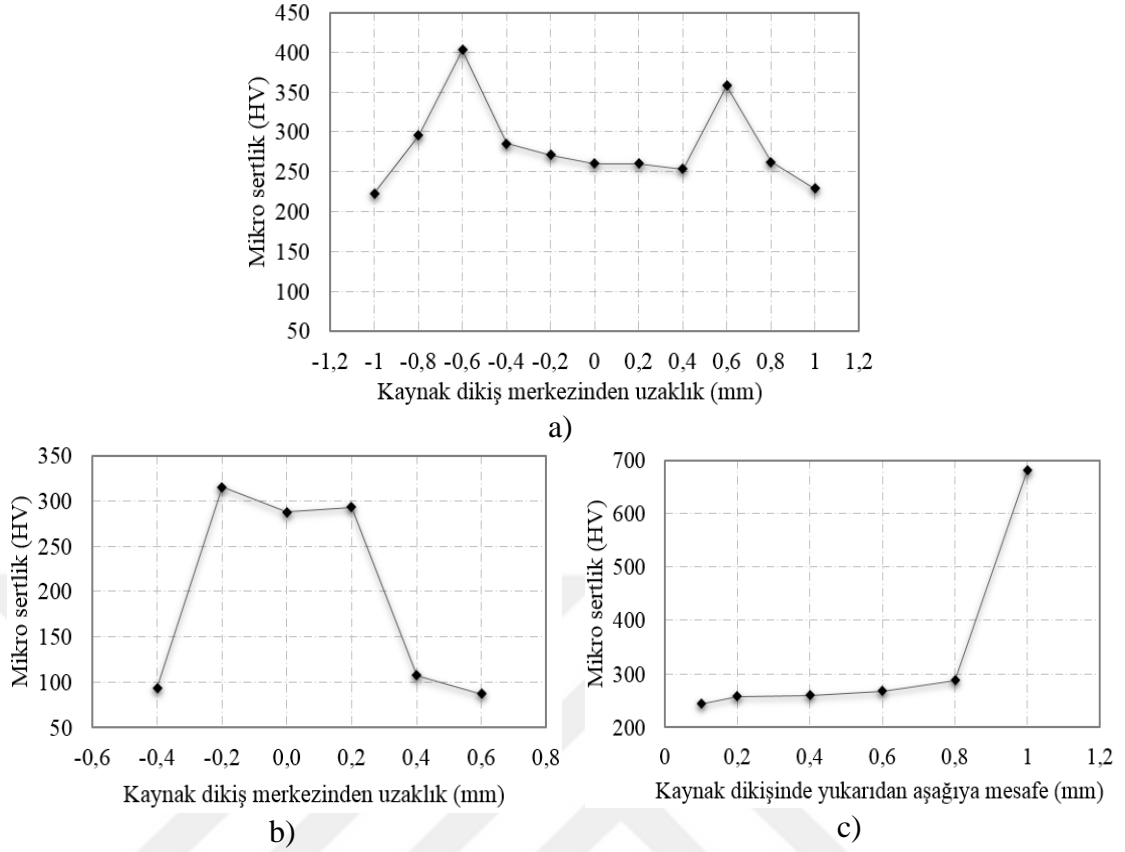
a)



b)

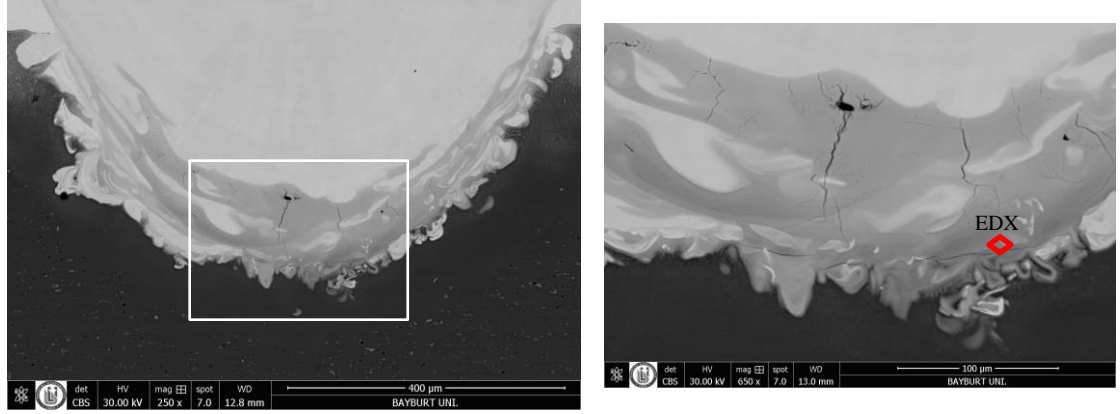
**Şekil 4.7.** 133 kodlu numunenin: a) SEM görüntüsü ve EDX tarama bölgesi, b) EDX analiz sonucu

En kötü mekanik dayanıma sahip olan 321 kodlu numunenin sertlik ölçüm sonuçları ise Şekil 4.8’de verilmiştir. Kaynak dikişindeki ortalama sertlik değeri bu numunede 332 HV değerlerine yükselmiştir. Bunun yanı sıra Şekil 4.8’den de görüleceği gibi alüminyum ile kaynak dikişinin kesiştiği bölgede sertlik değerlerinde ani bir yükselme meydana gelmiştir. Bu sertlik artışının sebebi bu bölgede oluşan intermetalik fazlardır. Fazları tespit etmek için EDX analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu numunede ayrıca, kaynak dikişinin alt kısmında mikro çatlakların oluştuğu tespit edilmiştir.

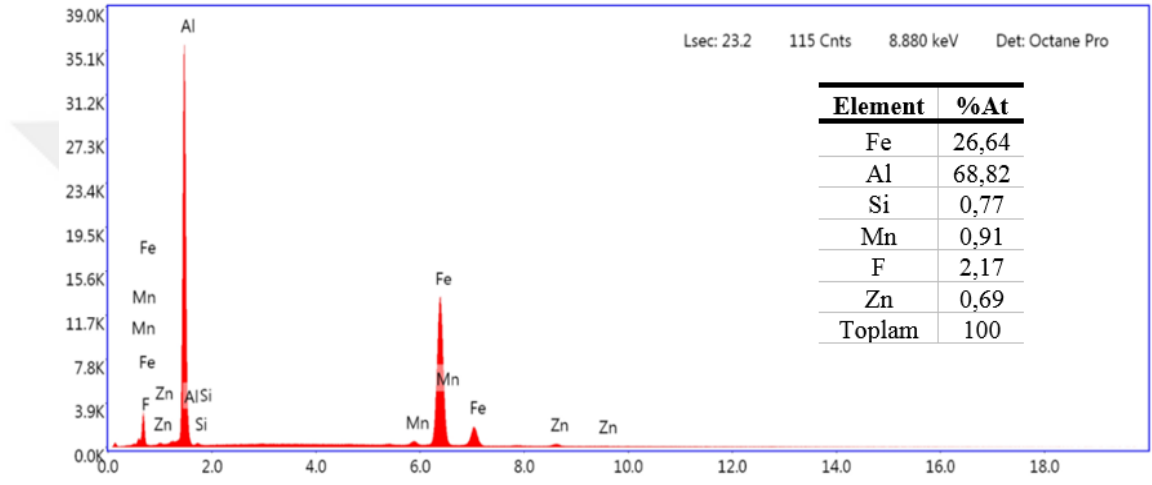


**Şekil 4.8.** 321 kodlu numunenin mikro sertlik ölçümleri: a) çelik-kaynak dikişi boyunca, b) alüminyum-kaynak dikişi boyunca ve c) kaynak dikişi boyunca dikey ölçüm sonuçları

Şekil 4.9’da 321 kodlu numunenin SEM görüntüsü ve EDX ölçümü gerçekleştirilen noktaları ile ölçüm sonuçları verilmiştir. Yapılan analiz sonucunda kaynak dikişinde çatlak oluşumu görülen bölgede alüminyumca zengin intermetalik fazların oluşumu görülmüştür. Bu bölgede Al elementinin atomik yüzdesi %68 ölçülürken, Fe elementinin ise %26 oranında olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca bu bölgede yapılan sertlik ölçümleri sonucunda intermetalik fazların sertlik değerlerinin 850-1000 HV<sub>0,1</sub> olduğu görülmüştür. EDX analiz sonuçları ve yapılan mikro sertlik ölçümleri sonucunda kaynaklı numunenin alüminyum ile birleşme bölgelerinde kırılğan ve alüminyumca zengin Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> intermetalik fazının oluştuğu tespit edilmiştir. Diğer numuneden farklı olarak oluşan bu kırılğan fazın kalınlığının daha fazla olduğu görülmüştür.



a)



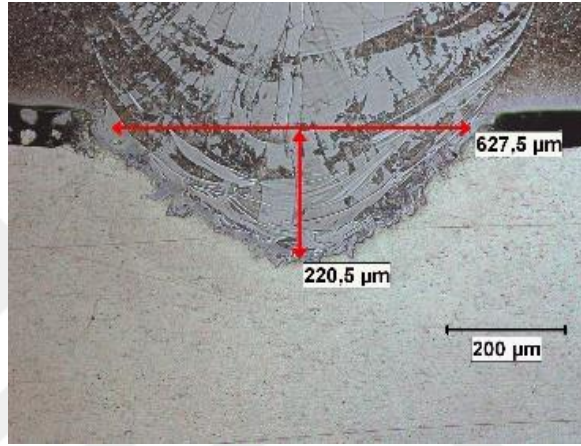
b)

**Şekil 4.9.** 321 kodlu numunenin a) SEM görüntüsü ve EDX ölçümü alınan noktası, b) EDX analiz sonucu

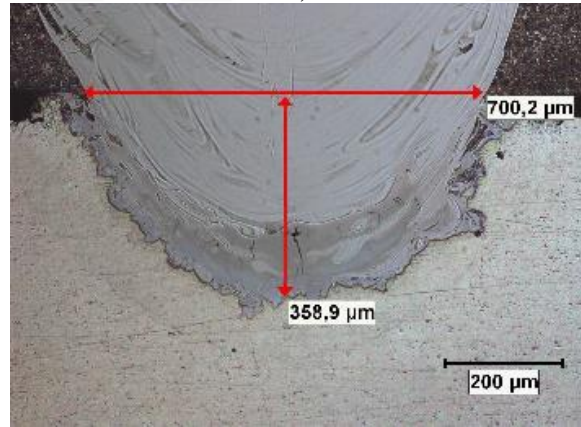
Elde edilen sonuçlar ışığında yapılan değerlendirmede mekanik dayanım üzerinde en etkili parametrelerin ilerleme hızı ve lazer gücü olduğu tespit edilmiştir. Odak mesafesinin ortalama mekanik dayanım üzerinde etkisinin çalışılan parametre seviye aralığında düşük kaldığı görülmüştür.

Maksimum ortalama dayanım 133 kodlu ve 2800 W lazer gücü, 100 mm/s ilerleme hızı ve 0,2 mm odak mesafesi ile kaynatılmış numunede elde edilmiştir. En düşük ortalama mekanik dayanım ise 3000 W lazer gücünde 95 mm/s ilerleme hızı ve -0,2 mm odak mesafesinde birleştirilen numunede (321) elde edilmiştir. Mekanik dayanımdaki düşüşün nedeni kaynak dikişinin çevresinde düzensiz olarak kalın tabaka halindeki kırılğan intermetalik fazların ve bu fazların çevresinde oluşan çatlaklar olduğu görülmüştür.

Yapılan mikro sertlik ölçümleri ve EDX analizlerinde kötü mekanik dayanıma sahip numunede kalın ve alüminyumca zengin intermetalik fazların oluştuğu görülmüştür. Ayrıca kaynak dikişindeki ortalama sertlik dayanımının daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu kırılma intermetalik fazların oluşmasında kaynak esnasında daha yüksek ısı girişi uygulanması ve buna bağlı olarak penetrasyon derinliğinin artması sonucunda kaynak dikişine daha fazla alüminyumun dâhil olması neden olmuştur (Şekil 4.10). En yüksek mekanik dayanıma sahip numunede penetrasyon derinliği 220,5 µm ölçülürken en düşük mekanik dayanıma sahip numunede penetrasyon derinliği 359,9 µm olarak ölçülmüştür.



a)



b)

**Şekil 4.10.** Numunelerin kaynak dikiş geometrileri: a)133 kodlu numune, b)321 kodlu numune

Kaynak parametrelerinin optimizasyonu ile ilgili yapılan çalışma sonucunda mekanik dayanım üzerindeki en etkili iki parametrenin ilerleme hızı ve lazer gücü olduğu görülmüştür. Bu nedenle çalışmanın üçüncü kısmında ısı girişinin etkisi incelenmiştir.

### **4.3. Isı Girdisine Bağlı Olarak Metalürjik ve Mekanik Özelliklerin İncelenmesi**

Çalışmanın bu bölümünde farklı ısı girdisi seviyelerinin kaynaklı parçaların mekanik ve metalürjik özelliklerine olan etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda üç farklı lazer gücü kullanılarak (3000 W, 2500 W ve 2000 W) farklı ilerleme hızlarında kaynaklar yapılmıştır. Kaynak işlemlerinde odak mesafesi çelik üst yüzeyinde olacak şekilde ayarlanmış (0 mm) ve koruyucu gaz kullanılmamıştır. Birleştirilen parçaların kaynak dikiş yüzeyleri, kaynak kesitlerinin makro yapıları ve boyutları incelenmiştir. Çekme testleri ile mekanik dayanımları tespit edilmiştir. Ayrıca mikro sertlik ölçümleri ve SEM-EDX analizleri ile kaynak bölgesinde oluşan fazlar incelenmiştir.

#### **4.3.1. Ön Deneme Çalışmalarının Sonuçları**

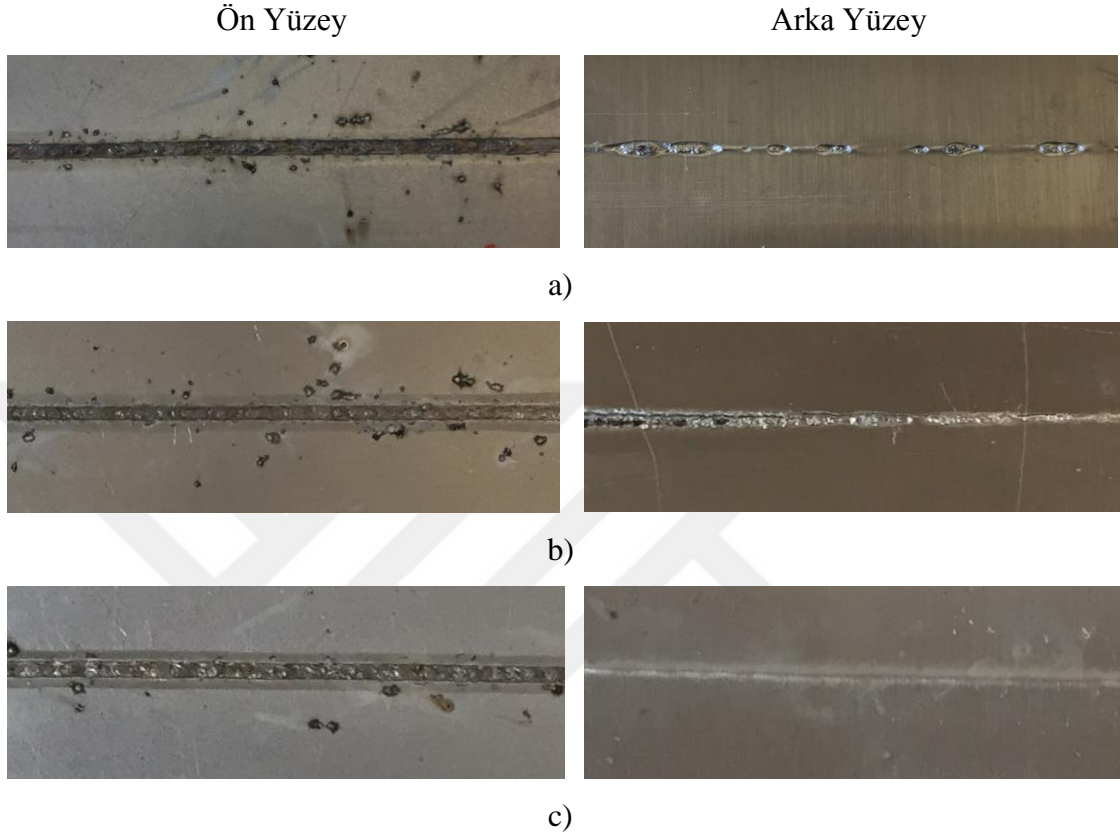
Çalışma kapsamında yapılan ön denemelerde proses parametrelerinin sınırları ve bağlantı türünün şekli (alüminyum levhanın üstte veya altta olma durumu) belirlenmiştir. Yapılan denemelerde bindirme kaynak türünde alüminyumun üstte olduğu durumlarda kaynak dikişinde çökme gözlenmiş, porozite ve çatlak gibi kaynak hatalarının oluştuğu tespit edilmiştir. Alüminyumca zengin bir ergiyik havuzunun oluşumu bu tür bir birleştirme türünde kaçınılmaz olmaktadır. Bu nedenle alüminyumun üstte çeliğin altta olduğu birleştirme türü ile ilgili denemeler sonlandırılmıştır. Elde edilen bu sonuç literatürde yapılan diğer çalışmalarda da gözlenmiştir (Kouadri-David 2014, Sierra vd. 2007). Bunun sonucunda çalışma kapsamında çelik malzemenin üstte olacak bindirme formatında kaynakların yapılmasına karar verilmiştir.

Odak mesafesinin çelik sacın üst yüzeyine odaklanarak sabit tutulduğu lazer gücü ve ilerleme hızının değiştirildiği denemelerde çalışılabilecek parametre seviye aralığı araştırılmıştır. Bu kapsamda kaynak dikiş yüzeyleri ve makro yapı görüntüleri incelenmiştir. Lazer gücü olarak 2000, 2500 ve 3000 W seçilmiştir. Bu lazer güç seviyelerinde çalışılabilecek minimum ilerleme hızları tespit edilmiştir. 2000 W gücünde 45 mm/s'de, 2500 W gücünde 60 mm/s'de ve 3000 W gücünde 70 mm/s'de kaynak yapılamadığı, aşırı ısı girdisi nedeni ile numunelerin kesildiği görülmüştür.

2000, 2500 ve 3000 W lazer güç değerlerinde, kesilmenin olmadığı minimum ilerleme hızlarında yapılan kaynakların ön ve arka yüzey görüntüleri Şekil 4.11'de



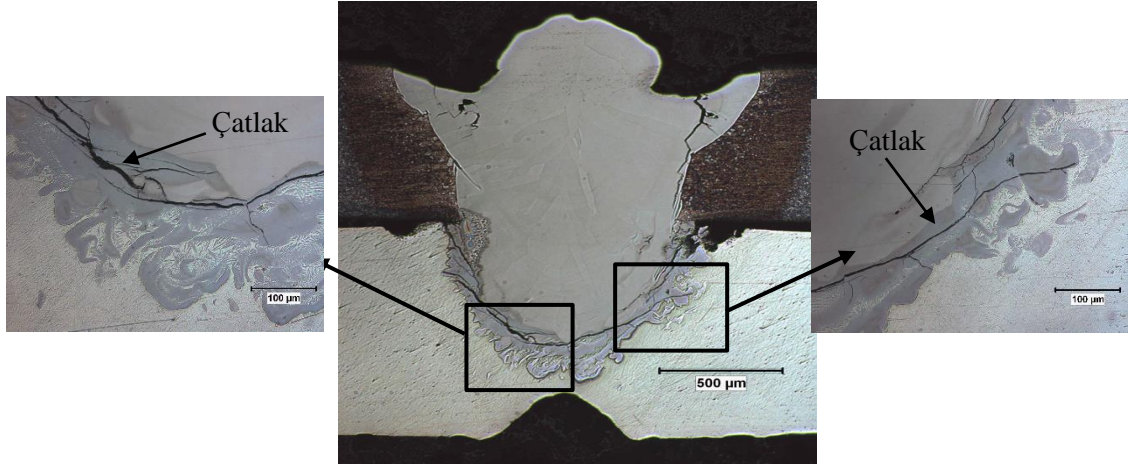
gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, kaynak dikişinde düzensizlikler, sıçrıntı oluşumu, bazı bölgelerde kesilmeler aşırı ısı girdisi nedeni ile gözlenmiştir. Numunelerde aşırı ısı girdisi olduğu için çarpılmalar da meydana gelmiştir.



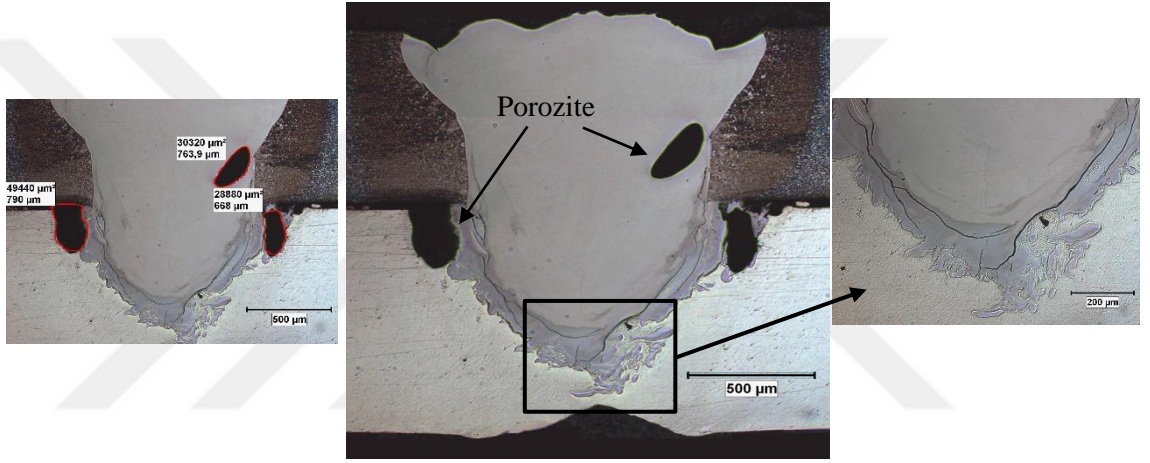
**Şekil 4.11.** Farklı lazer güçlerindeki minimum ilerleme hızları ile kaynatılmış numunelerin dikiş ve arka yüzey görüntüleri: a) 2000 W – 50 mm/s, b) 2500 W – 65 mm/s ve c) 3000 W – 80 mm/s

Birleştirilen numunelerin kaynak kesit görüntüleri Şekil 4.12’de görülmektedir. Kesit görüntüleri incelendiğinde birleştirilen parçalarda yoğun bir şekilde kaynak hatalarının olduğu görülmektedir. Çatlakların genel olarak kaynak dikişi ile alüminyum malzeme ara yüzeyinde, kaynak dikişinde ve kaynak dikişi ile çelik malzemenin ara yüzeyinde olduğu görülmektedir. Ayrıca kaynak dikişinde ve alüminyum malzemenin üst yüzeylerinde büyük porozitelerin olduğu da tespit edilmiştir. Farklı tür malzemelerin birleştirilmesinde ortaya çıkan intermetalik fazların da kaynak dikişi ile alüminyum malzeme ara yüzeyinde düzensiz ve farklı kalınlıklarda ortaya çıktığı görülmektedir.

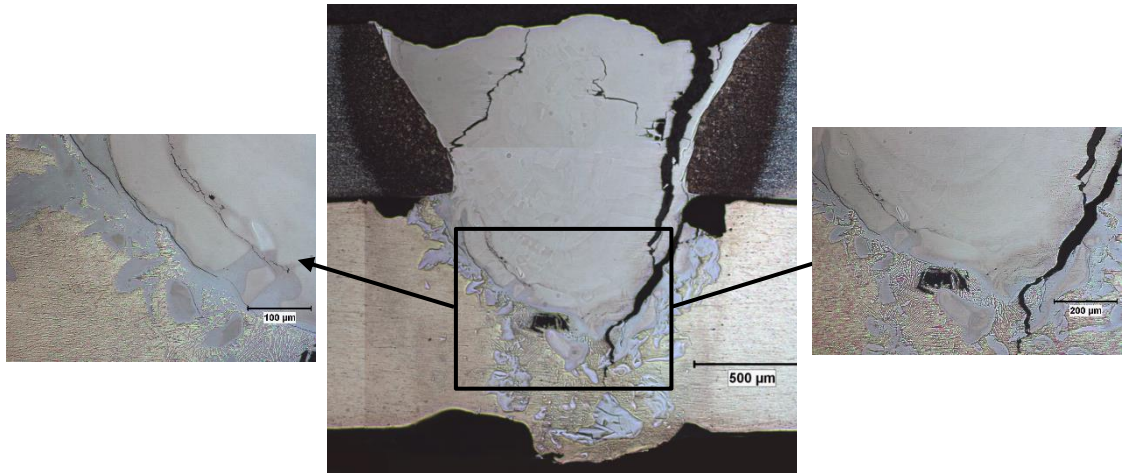




a)



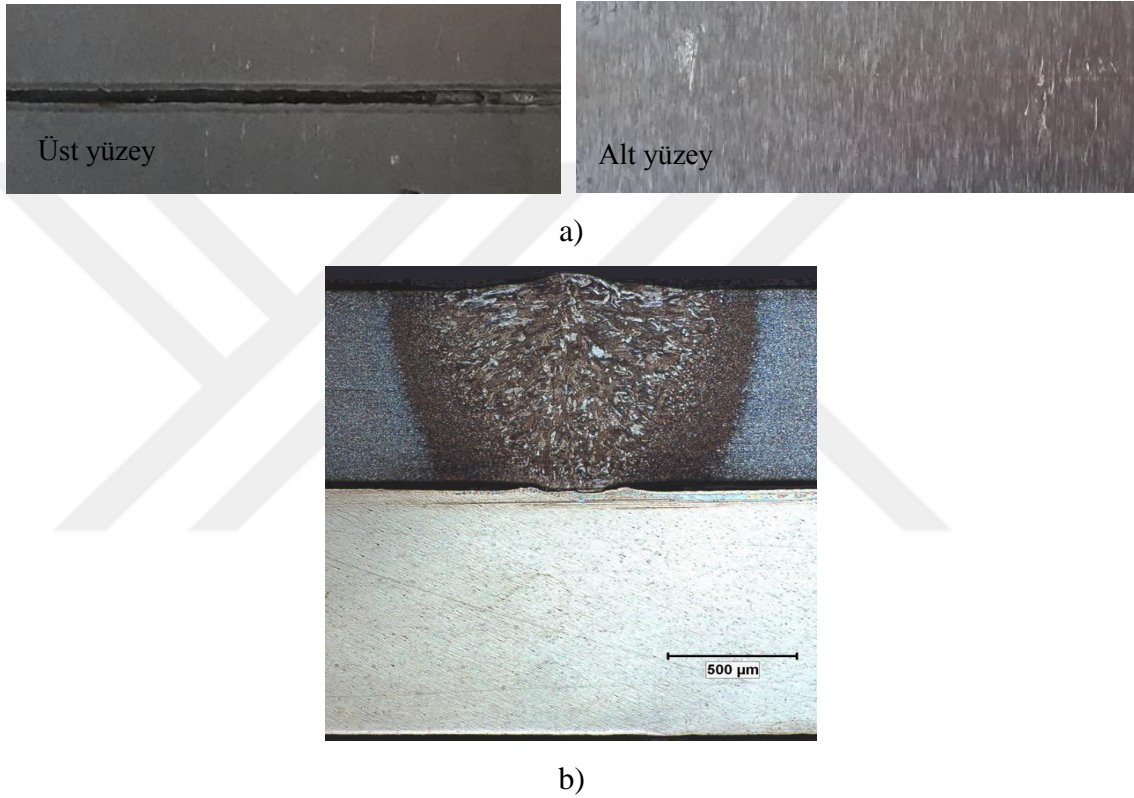
b)



c)

**Şekil 4.12.** Farklı lazer güçlerindeki minimum ilerleme hızları ile kaynatılmış numunelerin kaynak dikişinin kesit görüntüleri: a) 2000 W – 50 mm/s, b) 2500 W – 65 mm/s ve c) 3000 W – 80 mm/s

Seçilen lazer güç seviyelerinde ilerleme hızları yüksek seçildiğinde ise nüfuziyet problemi yaşanmaktadır. Örneğin 2500 W lazer gücünde 100 mm/s ilerleme hızında yapılan denemede çelik malzemede ergime görülürken alüminyum malzemede herhangi bir nüfuziyet oluşmamıştır. Yapılan deneme sonucunda elde edilen dikiş yüzey görüntüsü ve kaynak bölgesinin kesit görüntüsü Şekil 4.13'te verilmiştir. Aşırı penetrasyon ve nüfuziyet oluşmama durumları da göz önüne alınarak çalışılacak ilerleme hızları belirlenmiştir.



**Şekil 4.13.** 2500 W lazer gücünde 100 mm/s ilerleme hızı ile birleştirilmiş numunelerin görüntüsü: a) kaynak dikiş yüzey görüntüsü ve b) kesit görüntüsü

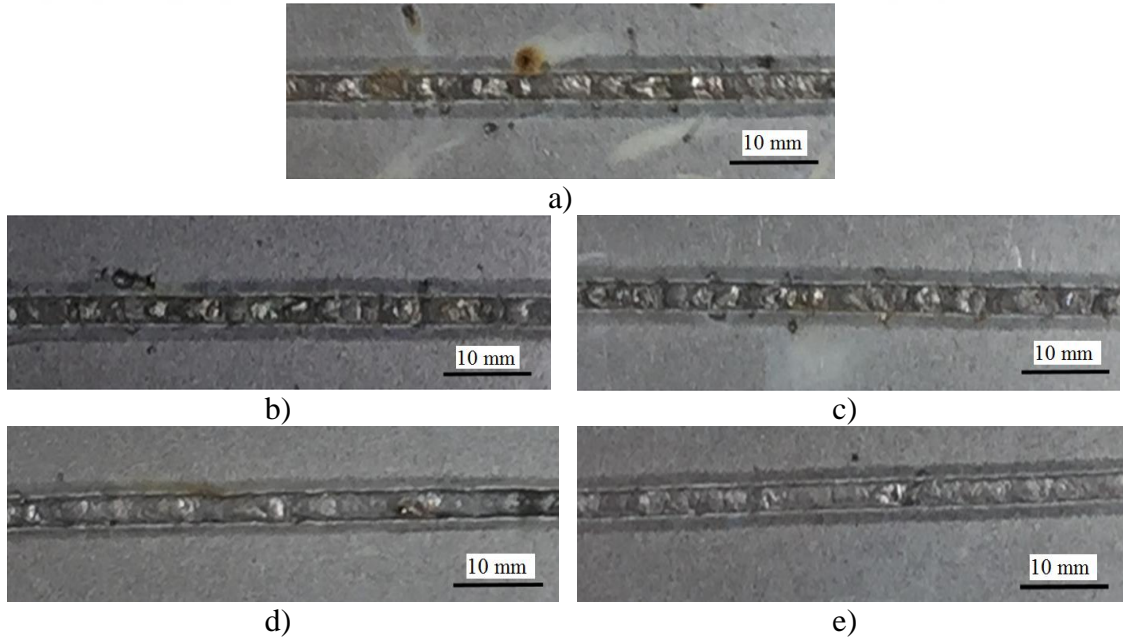
Yapılan ön denemeler sonucunda alüminyum-çelik malzemelerin lazer kaynağında, ısı girdisinin kaynak kalitesini doğrudan etkilediği ve uygun ısı girdisi seçilmediği takdirde kaynak dikişinde düzensizlikler, parçalarda kesilme, çarpılma, sıçrıntı, porozite, çatlak oluşumu, birleşme olmaması gibi kaynak kalitesini olumsuz etkileyen durumların ortaya çıktığı görülmüştür. Yapılan ön denemeler neticesinde kesilme ve yetersiz nüfuziyet olmayan ısı girdisi aralığında numuneler kaynakla birleştirilmiş ve bağlantının mekanik ve metalürjik özellikleri incelenmiştir.

### 4.3.2. 3000 W Lazer Gücünde Yapılan Kaynaklar

Bu kapsamda beş farklı ısı girdisi seviyesi (35,3 J/mm, 33,3 J/mm, 31,5 J/mm, 30 J/mm ve 28,5 J/mm) uygulanarak, sabit lazer gücü (3000 W) ve lazer ışınının odak noktası parça yüzeyinde olacak şekilde (0 mm) kaynaklar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

#### 4.3.2.1. Kaynak Dikiş Yüzeylerinin İncelenmesi

Kaynak dikiş yüzeyleri incelendiğinde ısı girdisinin artması ile kaynak hatalarının arttığı görülmüştür (Şekil 4.14). En yüksek ısı girdisi olan 35,3 J/mm'de kaynak dikişinde yanmaların olduğu, boşluklar ve sıçrantıların olduğu görülmüştür. Artan ısı girdisine bağlı olarak kaynak dikişinde düzensizlikler tespit edilmiştir. Bunlar iki parçanın kaynak aparatında bir arada tutturulmasında sırasında mikro boşluklardan dolayı oluşabilmektedir. Isı girdisinin artması ile kaynak dikişinde genişleme görülmüştür. Isı girdisinin azalması ile bu kaynak kusurlarının azaldığı, kaynak dikişinin daha istikrarlı hale geldiği görülmüştür. En düşük ısı girdisi (28,5 J/mm) ile birleştirilmiş numunede kaynak dikişinde yanma, sıçrantı ya da düzensizliklerin en az olduğu tespit edilmiştir.

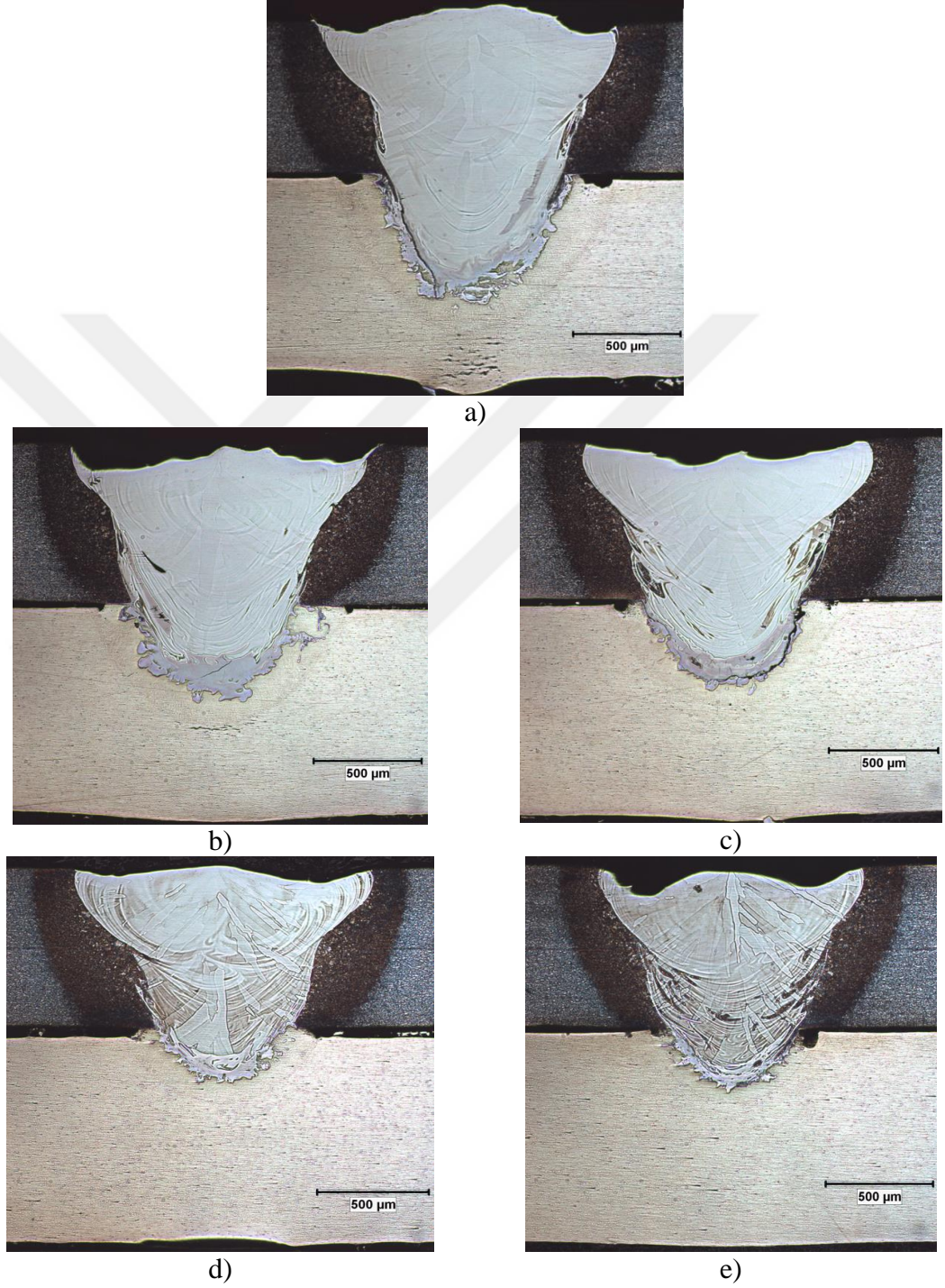


**Şekil 4.14.** 3000 W lazer gücünde farklı ısı girdisi seviyelerinde birleştirilmiş numunelerin kaynak dikiş yüzey görüntüleri: a) 35,3 J/mm, b) 33,3 J/mm, c) 31,5 J/mm, d) 30 J/mm, e) 28,5 J/mm



#### 4.3.2.2.Kaynak Bölgelerinin Makro Yapılarının İncelenmesi

Farklı ısı girdisi seviyelerinde birleştirilen numunelerin kaynak bölgelerinin kesit görüntüleri alınarak ısı girdisine bağlı olarak incelenmiştir (Şekil 4.15).

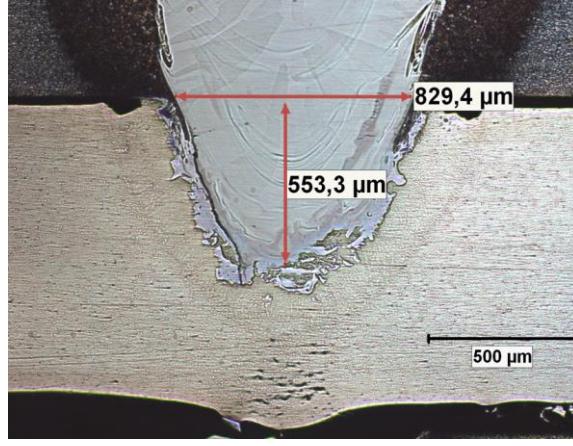


**Şekil 4.15.** 3000 W lazer gücünde farklı ısı girdileri altında birleştirilen parçaların kaynak kesit görüntüleri: a) 35,3 J/mm, b) 33,3 J/mm, c) 31,5 J/mm, d) 30 J/mm, e) 28,5 J/mm

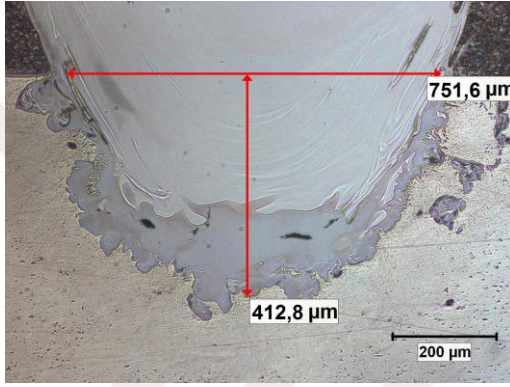
Ön denemelerdeki yüksek lazer gücü ve düşük ilerleme hızlarında yapılmış kaynaklarda gözlenen kaynak dikişinde büyük çatlak oluşumu bu numunelerde gözlenmemiştir. 3000 W lazer gücünde ısı girdisinin 35,3 J/mm ve 31,5 J/mm olduğu numunelerde kaynak dikişi ile alüminyum malzeme arasındaki ara yüzeyde çatlakların olduğu gözlenmiştir. Düşük ısı girdisi seviyelerinde (30 J/mm ve 28,5 J/mm) gerçekleştirilen kaynaklarda ise kaynak dikişinde çatlak oluşmadığı görülmüştür.

Farklı ısı girdisi seviyelerinde birleştirilen numunelerin kaynak dikişlerin mikro yapısı incelendiğinde, ergime bölgesinde katılaşmanın çelik ile kaynak dikişinin ara yüzeyinden kaynak dikişinin merkezine doğru yönelmiş taneler şeklinde olduğu görülmektedir. Kaynak dikişine dâhil olan alüminyum miktarının da ısı girdisi ile değiştiği bunun sonucunda da kaynak metalinin görüntüsünün değiştiği tespit edilmiştir. Artan ısı girdisi ile alüminyum tarafında daha geniş bir ısı etkisi altında kalan bölge oluştuğu gözlenmiştir. Ayrıca alüminyum levhanın alt yüzeyinden dışarı doğru çıkıntılarında olduğu tespit edilmiştir.

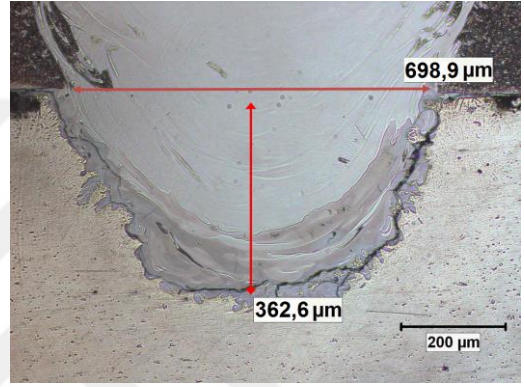
Farklı ısı girdileri ile birleştirilmiş numunelerin kaynak dikişinin alüminyum tarafındaki penetrasyon derinliği ve genişliği ölçülmüştür (Şekil 4.16). Yapılan ölçümler sonucunda artan ısı girdisi ile penetrasyon derinliği ve kaynak genişliğinin arttığı görülmüştür. En yüksek ısı girdisi ile birleştirilmiş parçada maksimum penetrasyon derinliğinin 553,3 µm olduğu görülmüştür. Kaynak dikiş genişliği de bu numunede 829,4 µm ile maksimum değerdedir. Isı girdisinin azalması ile penetrasyon derinliğinin 212 µm seviyelerine gerilediği gözlenmiştir. Penetrasyon derinliğinin 350 µm altında olduğu numunelerde kaynak bölgesinde çatlak oluşumuna rastlanmamıştır.



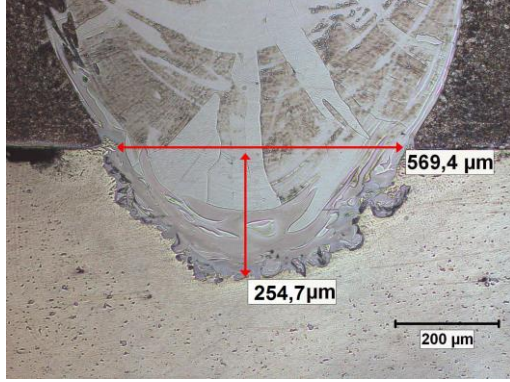
a)



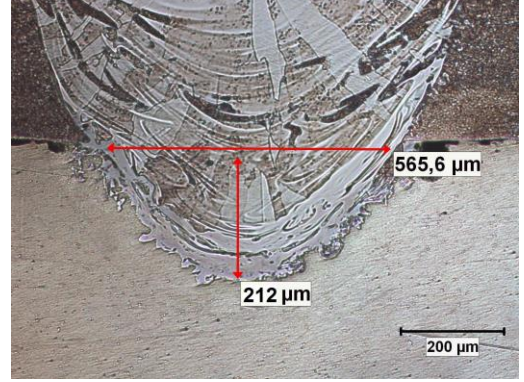
b)



c)



d)



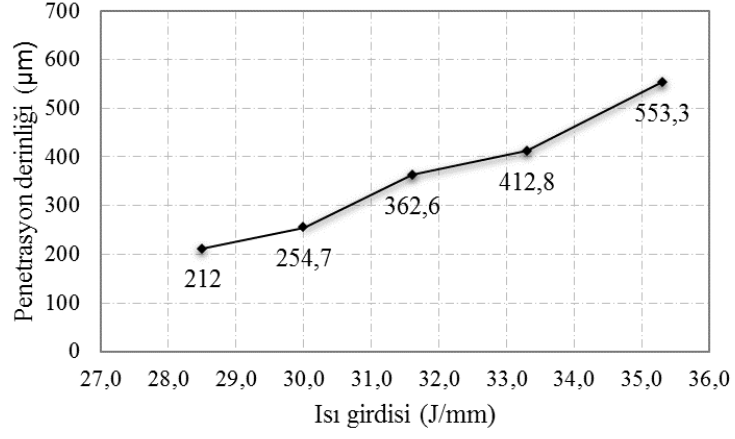
e)

**Şekil 4.16.** 3000 W lazer gücünde farklı ısı girdileri altında birleştirilen parçaların penetrasyon derinlikleri ve kaynak dikiş genişlikleri: a) 35,3 J/mm, b) 33,3 J/mm, c) 31,5 J/mm, d) 30 J/mm, e) 28,5 J/mm

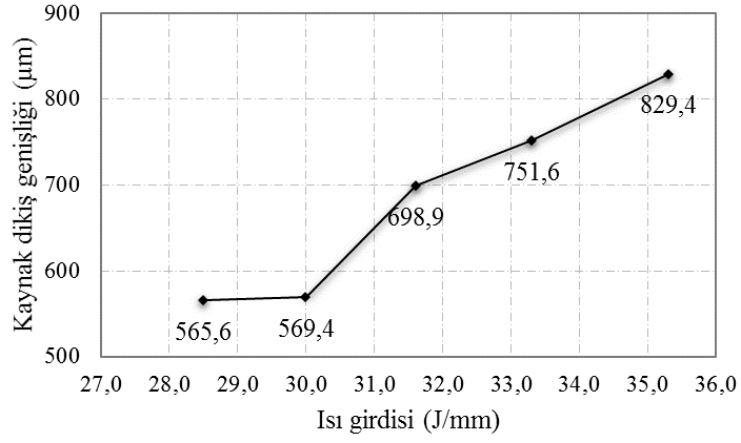
3000 W lazer gücünde farklı ısı girdisi seviyeleri altında birleştirilmiş numunelerin ısı girdisine bağlı olarak penetrasyon derinliğindeki ve kaynak dikiş genişliğindeki değişimleri ile genişlik/derinlik oranları Şekil 4.17'de verilmiştir. Yapılan inceleme



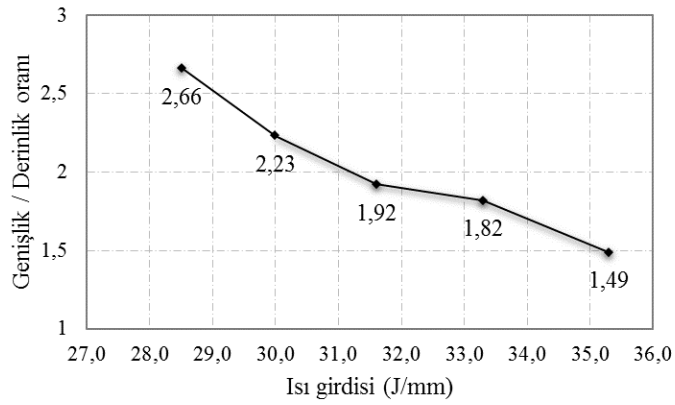
sonucunda, kaynak dikişinin penetrasyon derinliği ve genişliğinin ısı girdisi ile doğrudan ilişkili olduğu tespit edilmiştir.



a)



b)

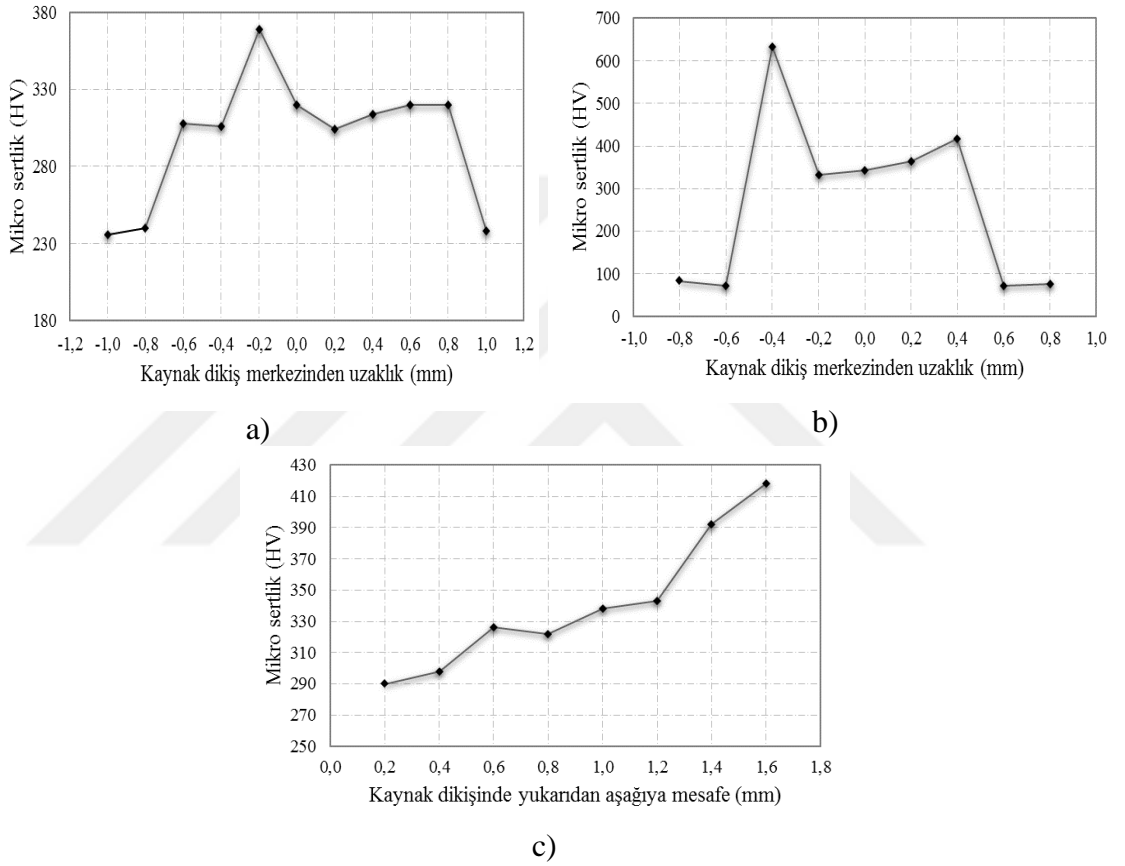


c)

**Şekil 4.17.** Isı girdisine bağlı olarak kaynak dikiş geometrisinin değişimi: a) penetrasyon derinliği, b) dikiş genişliği ve c) genişlik/derinlik oranı

### 4.3.2.3. Mikro Sertlik Ölçümleri ve SEM-EDX Analiz Sonuçlarının İncelenmesi

3000 W lazer gücünde farklı ısı girdisi seviyeleri altında birleştirilen lazer kaynaklı numunelerin mikro sertlik ölçümleri üç farklı hat üzerimde gerçekleştirilmiştir. 35,3 J/mm ısı girdisi ile birleştirilmiş numuneye ait sertlik dağılımları Şekil 4.18'de verilmiştir. Bu numunenin kaynak dikişindeki mikro sertlik değeri ortalama 360 HV<sub>0,1</sub> olarak ölçülmüştür.

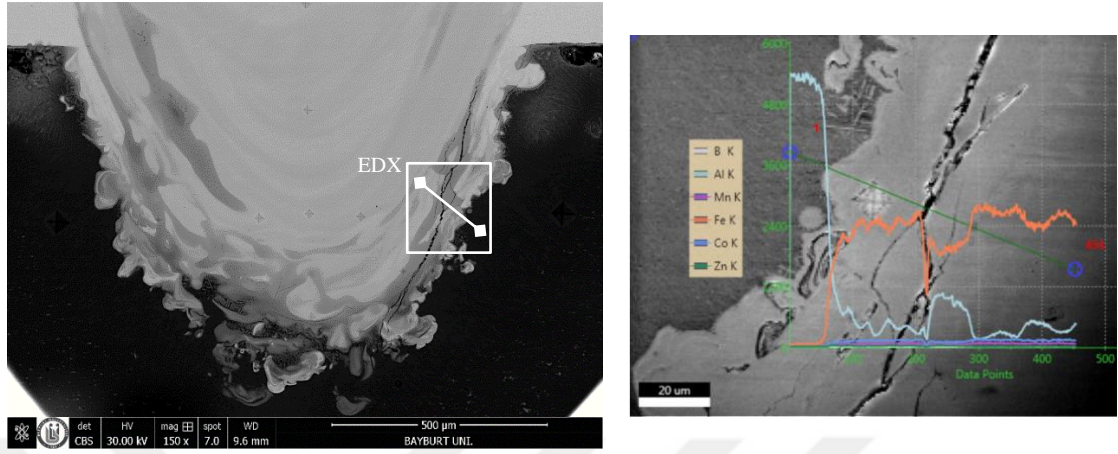


**Şekil 4.18.** 35,3 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin mikro sertlik dağılımları: a) çelik-kaynak dikişi boyunca, b) alüminyum-kaynak dikişi boyunca ve c) kaynak dikişi boyunca dikey ölçüm sonuçları

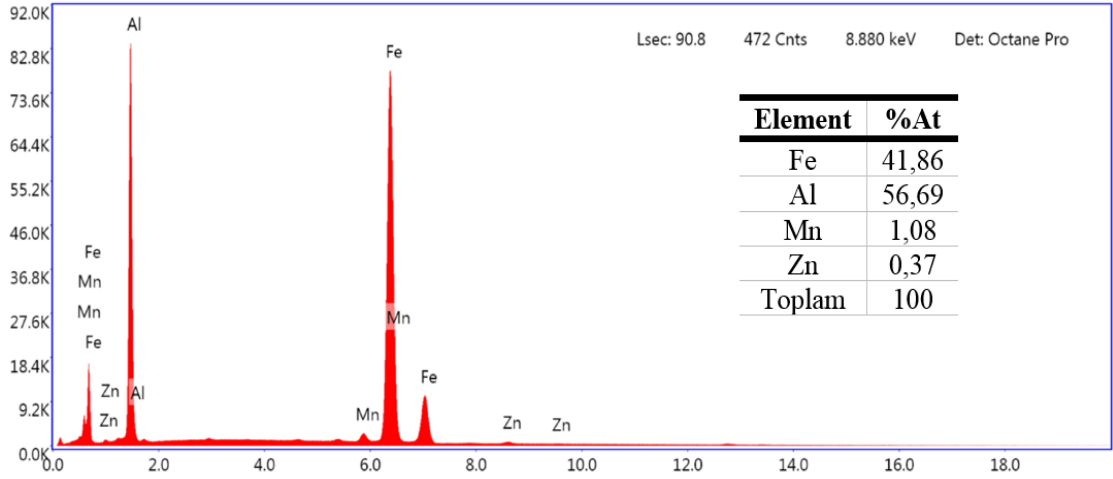
Kaynak dikişinin alüminyum ana malzeme ile birleştiği bölgelerde alüminyum yüzdesi fazla olan kırılgan intermetalik tabakaların oluştuğu tespit edilmiştir (Şekil 4.19). Kaynak dikişinin kenarlarında oluşan çatlakların çevresinde de kalın bir hat şeklinde kırılgan intermetalik fazların oluştuğu ( $Fe_2Al_5$ ) ve bu bölgelerde ölçülen sertlik değerlerinin 800



- 1000 HV<sub>0,1</sub> seviyelerine çıktığı tespit edilmiştir. Bu numunede ayrıca kaynak dikişinin içerisinde bölgesel olarak katılmış intermetalik fazların oluştuğu da görülmüştür.



a)

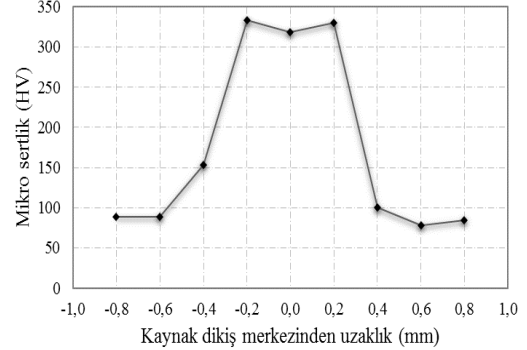
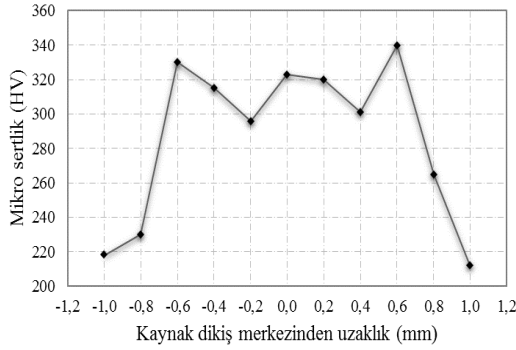


b)

**Şekil 4.19.** 35,3 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin a) SEM görüntüsü ve EDX tarama bölgesi, b) EDX analiz sonucu

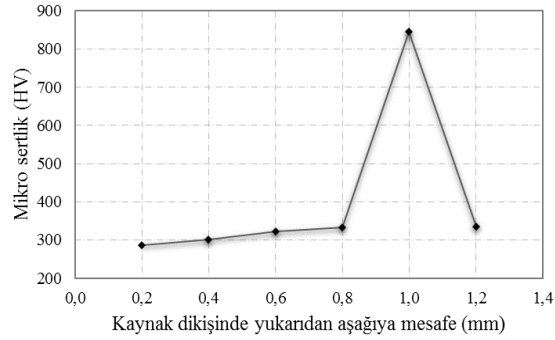
33,3 J/mm ısı girdisi ile birleştirilmiş olan numunenin mikro sertlik ölçüm sonuçları Şekil 4.20'de verilmiştir. Azalan ısı girdisi ile birlikte kaynak dikişindeki sertliğin de azaldığı ve ortalama 345 HV<sub>0,1</sub> civarında olduğu gözlenmiştir. Bu numunede kaynak bölgesinde çatlak oluşumu gözlenmemiş olmasına rağmen alüminyumca zengin fazların kaynak dikişinin alt kısmında kalın bir tabaka halinde oluştuğu tespit edilmiştir. Yapılan EDX ölçümünde Al elementinin atomik olarak %65, Fe elementinin ise %29 oranında olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca alüminyumca zengin bu intermetalik faz bölgesinde ölçülen mikro sertlik değerleri 800-950 HV<sub>0,1</sub> aralığındadır. Mikro sertlik ölçümleri ve EDX

analiz sonuçlarına bağlı olarak  $Fe_2Al_5$  intermetalik fazının oluştuğu tespit edilmiştir (Şekil 4.21).



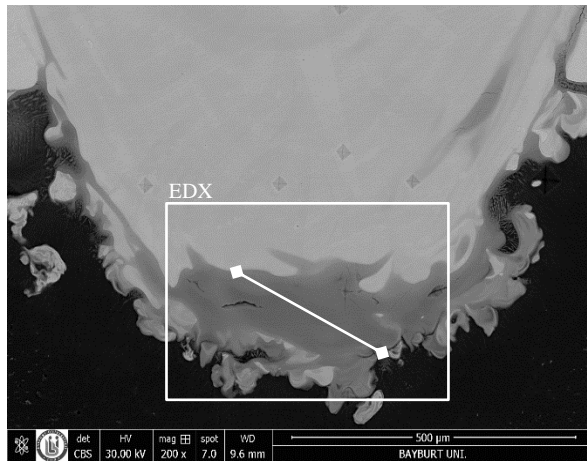
a)

b)

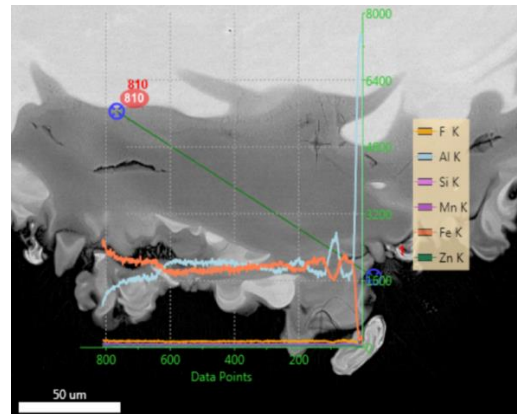


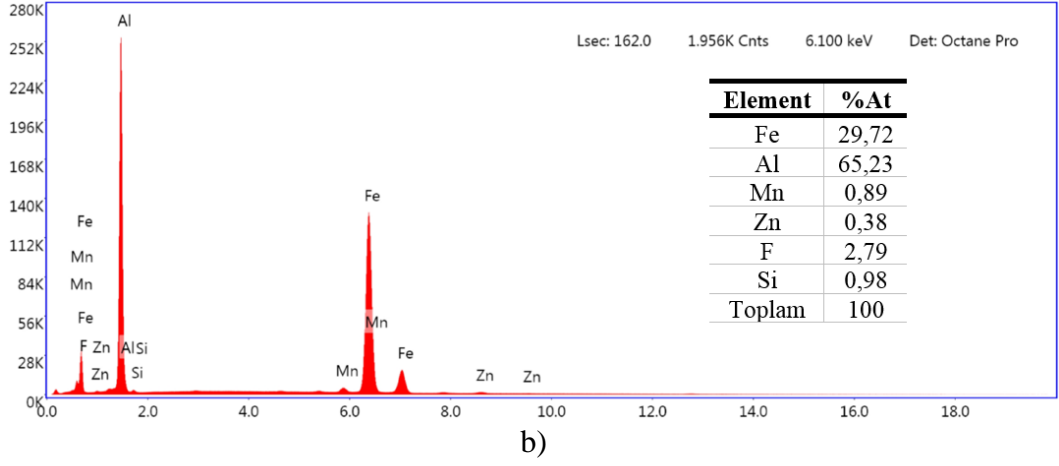
c)

**Şekil 4.20.** 33,3 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin mikro sertlik dağılımları: a) çelik-kaynak dikişi boyunca, b) alüminyum-kaynak dikişi boyunca ve c) kaynak dikişi boyunca dikey ölçüm sonuçları



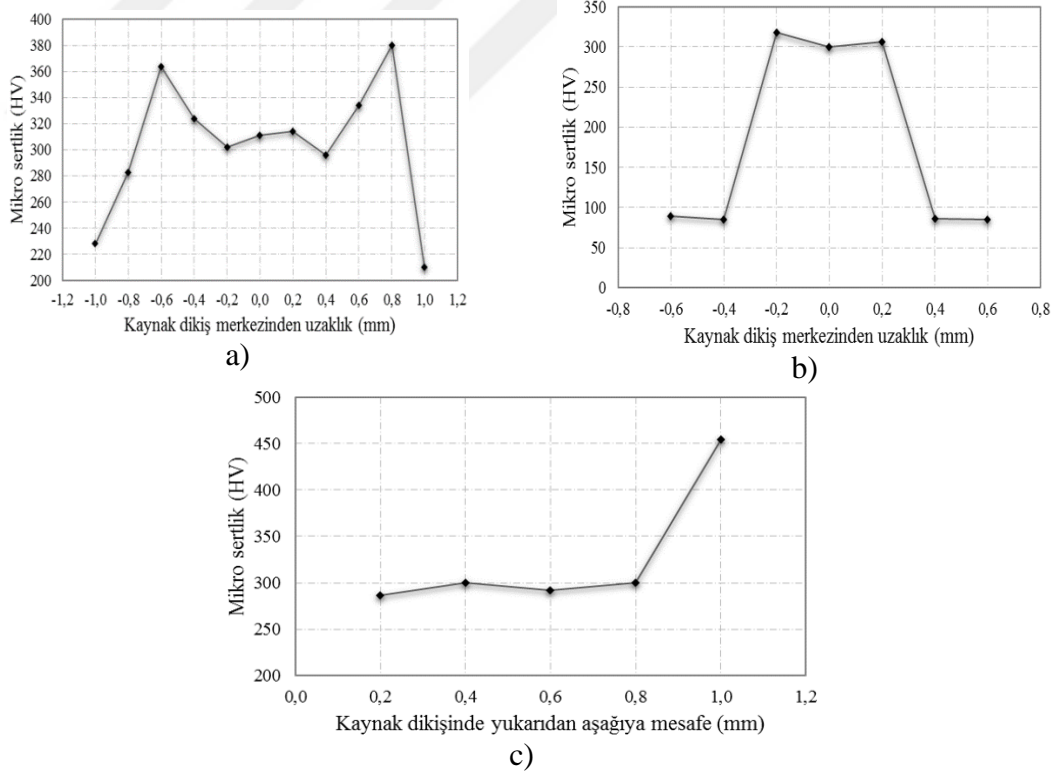
a)





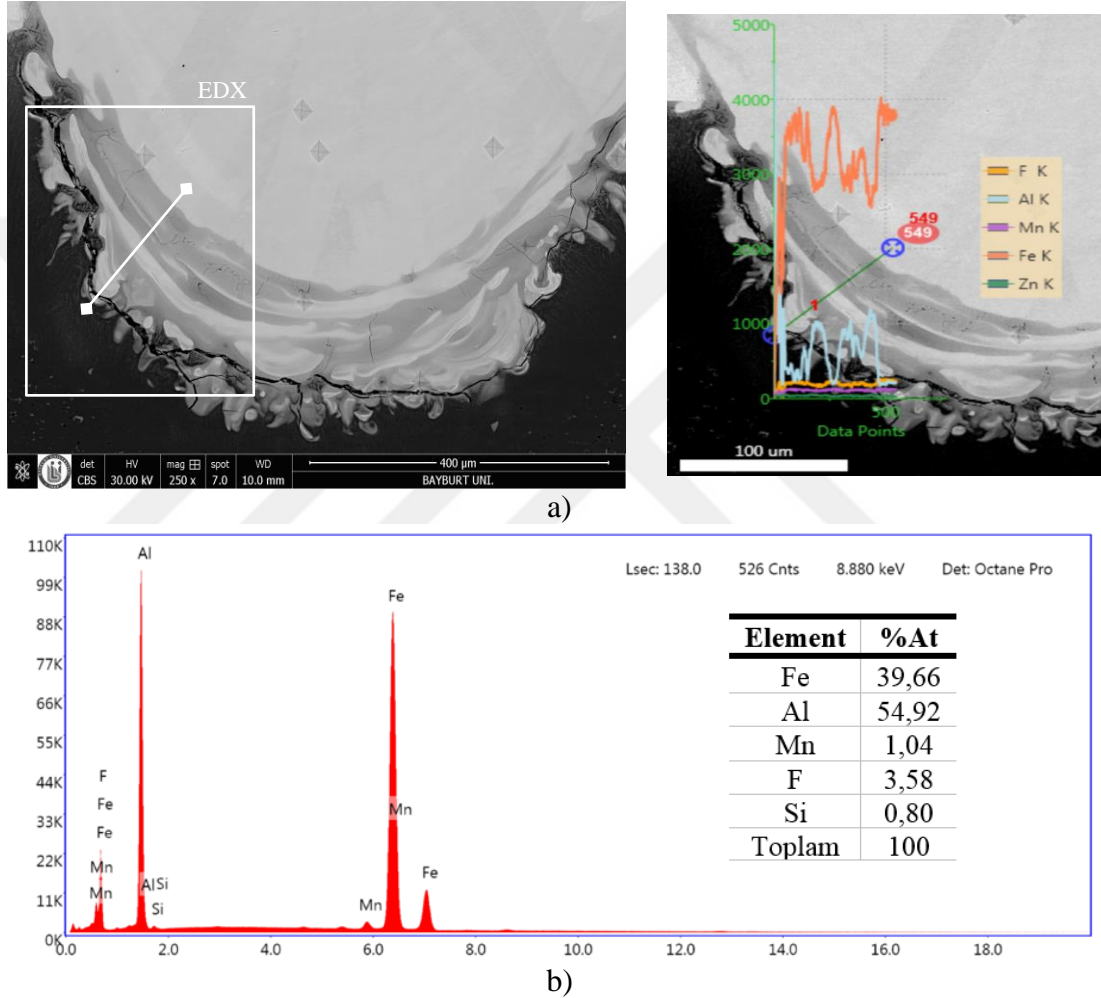
**Şekil 4.21.** 33,3 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin a) SEM görüntüsü ve EDX tarama bölgesi, b) EDX analiz sonucu

Isı girdisinin bir düşük seviyesi olarak 31,5 J/mm ile birleştirilmiş numunenin mikro sertlik ölçüm sonuçları Şekil 4.22’de verilmiştir. Bu numunenin kaynak dikişinde ölçülen ortalama sertlik değeri 290 HV<sub>0,1</sub>’dir.



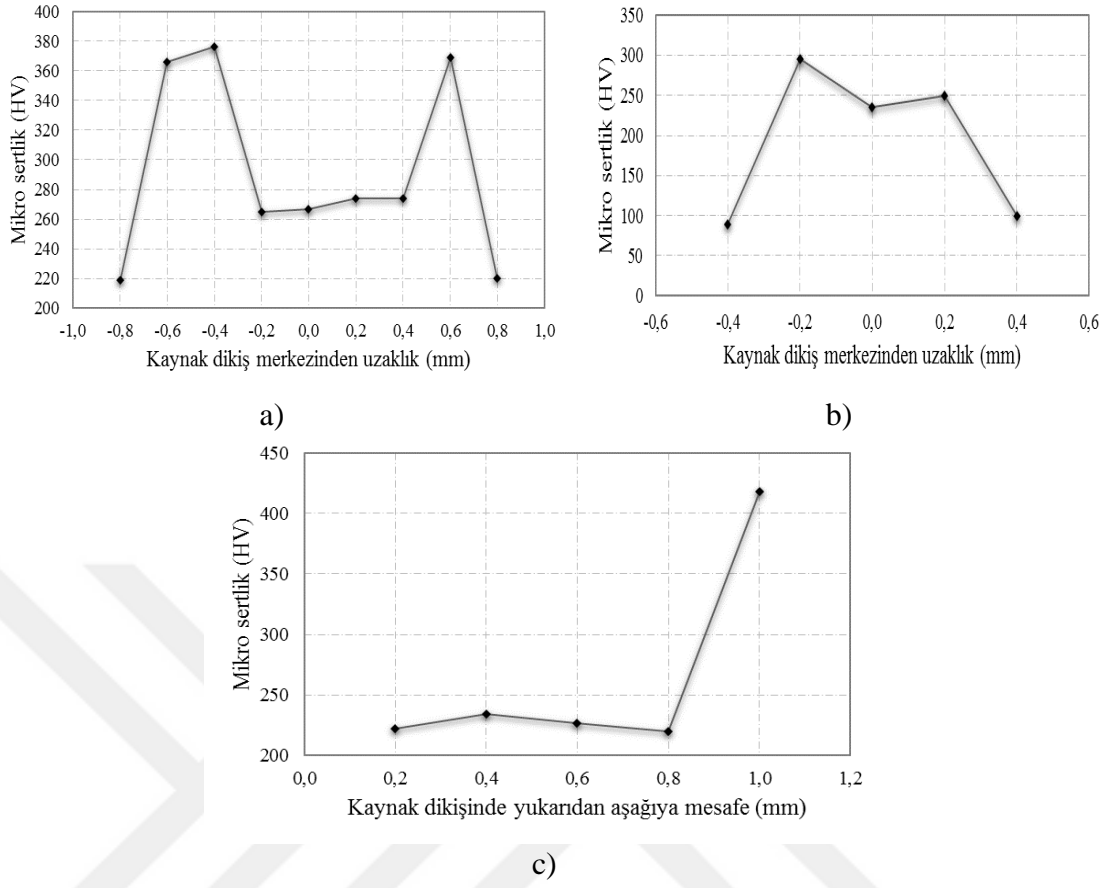
**Şekil 4.22.** 31,5 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin mikro sertlik dağılımları: a) çelik-kaynak dikişi boyunca, b) alüminyum-kaynak dikişi boyunca ve c) kaynak dikişi boyunca dikey ölçüm sonuçları

Alüminyum-kaynak dikişi ara yüzeyinde çatlak oluşumu görülen numunenin bu bölgesinde kırılmalı intermetalik fazların oluştuğu tespit edilmiştir (Şekil 4.23). Ölçüm yapılan bölgede Al elementi %54, Fe elementi %39 oranında tespit edilmiştir. Bu sonuçlar ışığında oluşan intermetalik fazın alüminyumca zengin  $Fe_2Al_5$  olduğu tespit edilmiştir. Yapılan sertlik ölçümlerinde de bu bölgedeki mikro sertlik değerlerinin 500-900  $HV_{0,1}$  aralığında olduğu görülmüştür.



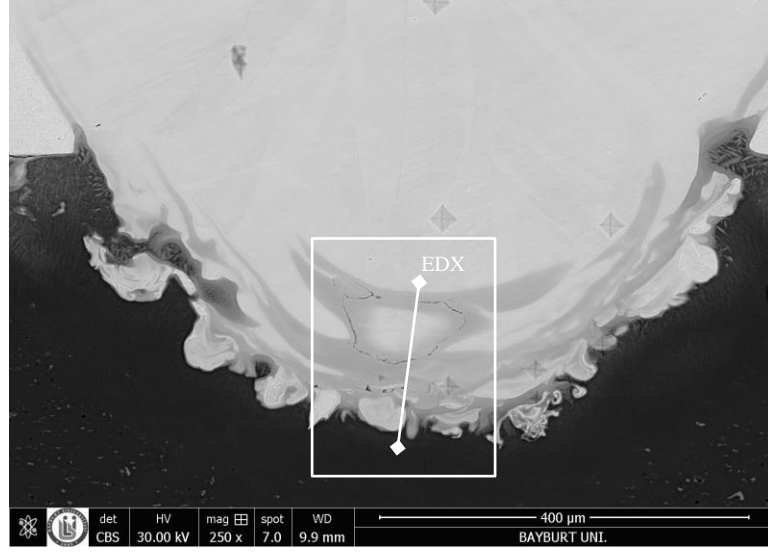
**Şekil 4.23.** 31,5 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin a) SEM görüntüsü ve EDX tarama bölgesi, b) EDX analiz sonucu

Nispeten düşük ısı girdisi ile (30 J/mm) birleştirilmiş numunenin mikro sertlik dağılımları Şekil 4.24'te verilmiştir. Kaynak dikişinde ölçülen ortalama sertlik 250  $HV_{0,1}$ 'dir. Kaynak dikişine dikey doğrultuda yapılan mikro sertlik ölçümünde görülen ani artışın sebebi o bölgede oluşan intermetalik fazlardır.

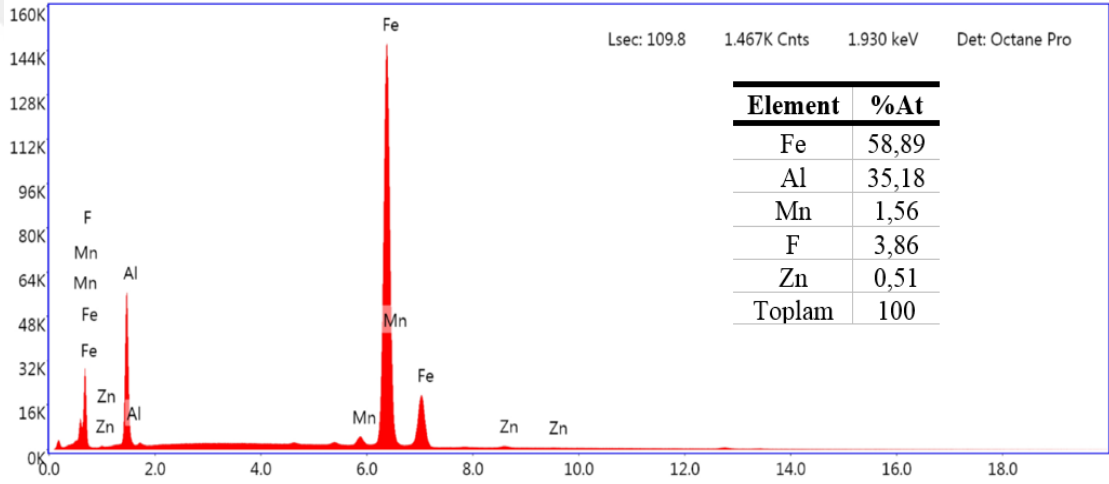


**Şekil 4.24.** 30 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin mikro sertlik dağılımları: a) çelik-kaynak dikişi boyunca, b) alüminyum-kaynak dikişi boyunca ve c) kaynak dikişi boyunca dikey ölçüm sonuçları

Bu numunenin alüminyum malzeme ile kaynak dikişinin birleştiği ara yüzeyinde yine intermetalik faz oluşumu görülmüştür. Ancak oluşan intermetalik fazların nispeten daha az kırılğan, demirce zengin fazlar olduğu yapılan EDX analizlerinde ve mikro sertlik ölçümlerinde görülmüştür. Yapılan EDX analizi sonucunda Fe elementinin atomik yüzdesi %58 olarak ölçülürken Al elementinin %35 olarak ölçülmüştür (Şekil 4.25). Ayrıca oluşan fazların kalınlıkları da yüksek ısı girdisi ile birleştirilmiş numunelere göre sınırlı kalmıştır Bu bölgelerde yapılan sertlik ölçümlerinde 400-620 HV<sub>0,1</sub> arası sonuçlar elde edilmiştir. EDX analiz sonuçları ve mikro sertlik ölçümleri incelendiğinde bu bölgede FeAl intermetalik fazının oluştuğu görülmektedir.



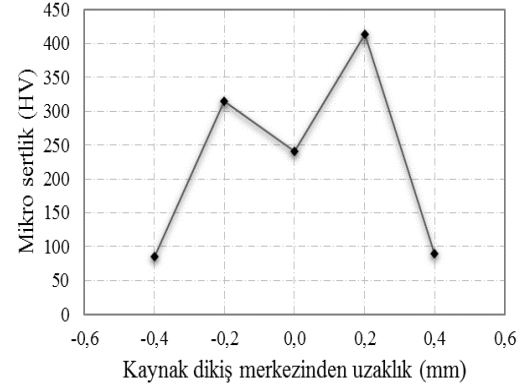
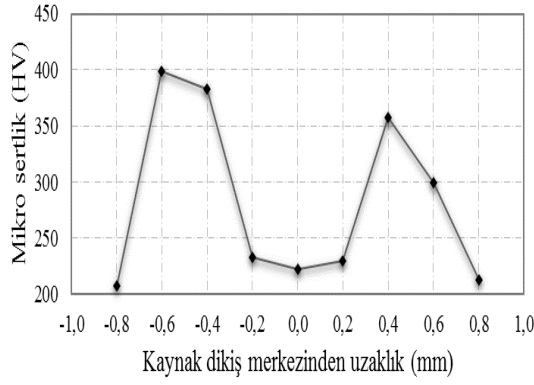
a)



b)

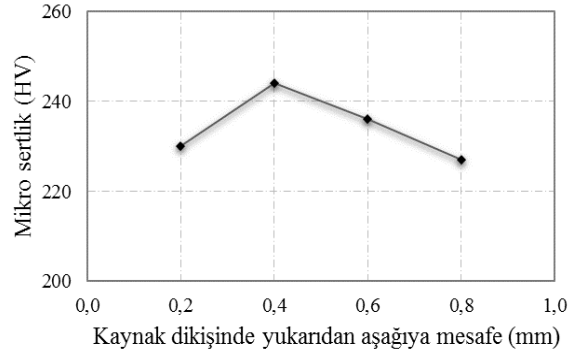
**Şekil 4.25.** 30 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin a) SEM görüntüsü ve EDX tarama bölgesi, b) EDX analiz sonucu

En düşük ısı girdisi (28,5 J/mm) ile birleştirilmiş olan numunenin mikro sertlik dağılımları Şekil 4.26'da verilmiştir. Bu numunenin kaynak dikişindeki ortalama sertlik değeri 235 HV<sub>0,1</sub> olarak ölçülmüştür. Kaynak dikişinin alüminyum tarafındaki bölgesinde en yüksek ölçülen sertlik değeri ise 485 HV<sub>0,1</sub> civarındadır. Bu sertlik artışı intermetalik fazlardan kaynaklanmaktadır.



a)

b)

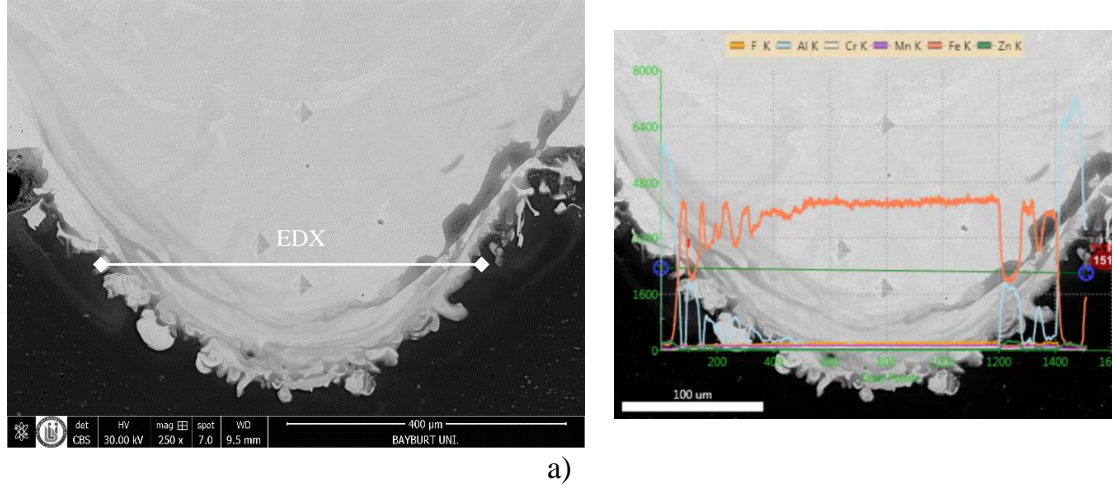


c)

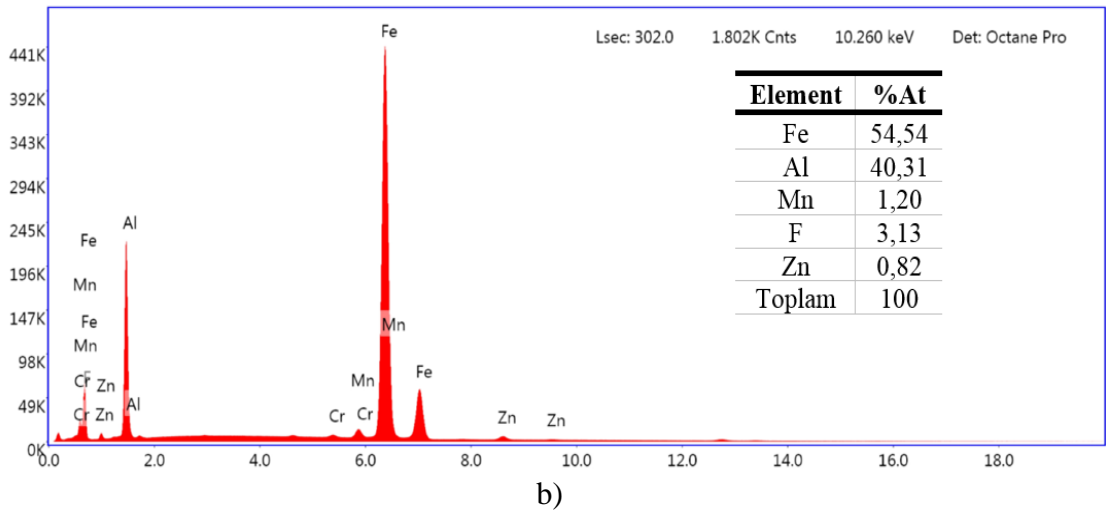
**Şekil 4.26.** 28,5 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin mikro sertlik dağılımları: a) çelik-kaynak dikişi boyunca, b) alüminyum-kaynak dikişi boyunca ve c) kaynak dikişi boyunca dikey ölçüm sonuçları

Çok ince bir tabaka şeklinde olsa da bu numunenin de alüminyum malzeme ile kaynak dikişinin birleştiği bölgede intermetalik fazlara rastlanmıştır. Ancak bu tabakaların sertlikleri yüksek ısı girdisi ile birleştirilen numunelere göre düşük seviyelerde kalmıştır. Sertlik ölçülen bölgenin EDX analizlerinde oluşan fazın demir bakımından zengin ve nispeten daha az kırılğan olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.27). EDX analizleri sonucunda Al elementinin atomik oranı %40 iken Fe elementinin oranı %54 seviyelerindedir. Oluşan intermetalik fazın FeAl olduğu tespit edilmiştir.





a)

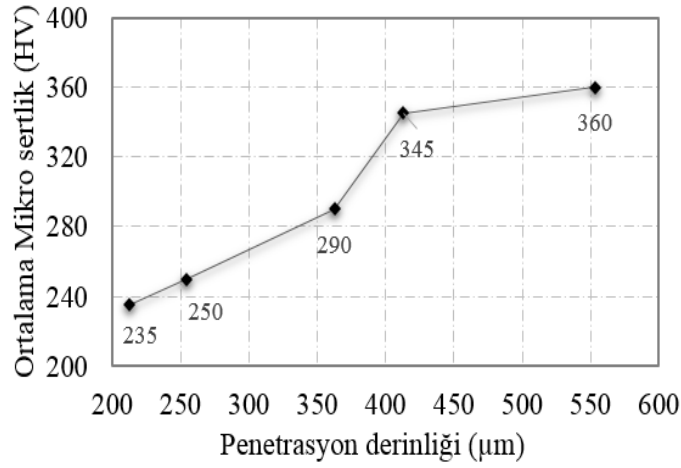


b)

**Şekil 4.27.** 28,5 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin a) SEM görüntüsü ve EDX tarama bölgesi, b) EDX analiz sonucu

Yapılan optik mikroskop incelemeleri ve kaynak dikiş geometrisindeki ölçümler sonucunda, artan ısı girdisi ile penetrasyon derinliğinin ve kaynak dikiş genişliğinin arttığı görülmüştür. Buna bağlı olarak ergiyik havuzuna dâhil olan alüminyum miktarının artması ile kaynak dikişindeki ortalama sertlik değerinin arttığı da mikro sertlik ölçümleri sonucunda tespit edilmiştir (Şekil 4.28). Yapılan EDX analizlerinde de kaynak dikişindeki alüminyum miktarının arttığı görülmüştür.





**Şekil 4.28.** 3000 W lazer gücünde farklı ısı girdisi seviyelerinde birleştirilen numunenin penetrasyon derinliğine bağlı kaynak dikişindeki ortalama mikro sertlik değerleri

#### 4.3.2.4.Mekanik Dayanımlarının İncelenmesi

3000 W lazer gücünde beş farklı ısı girdisi seviyesinde birleştirilen alüminyum-çelik malzemelerin mekanik dayanımlarının ısı girdisine ve penetrasyon derinliğine bağlı olarak sonuçları ve oluşan kopma türleri Çizelge 4.6’da verilmiştir.

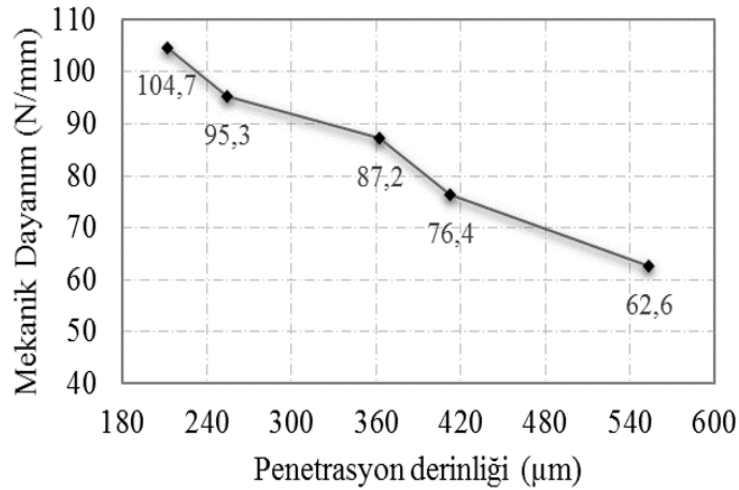
**Çizelge 4.6.** 3000 W lazer gücünde farklı ısı girdisi altında birleştirilen numunelerin penetrasyon derinlikleri, mekanik dayanımları ve kopma türleri

Lazer Gücü (W)	İlerleme Hızı (mm/s)	Isı Girdisi (J/mm)	Penetrasyon Derinliği (µm)	Mekanik Dayanım (N/mm)	Kopma Şekli
3000	105	28,5	212	104,7	Ara yüzeyde ayrılma (Decohesion)
	100	30	254,7	95,3	Ara yüzeyde ayrılma
	95	31,5	362,6	87,2	Ara yüzeyde ayrılma
	90	33,3	412,8	76,4	Ara yüzeyde ayrılma/çelikte kesilme
	85	35,3	553,3	62,6	Çelikte kesilme

Maksimum mekanik dayanım 104 N/mm olarak 28,5 J/mm ısı girdisi ile birleştirilmiş numunede elde edilmiştir. Artan ısı girdisi ile mekanik dayanım düşmüş ve 35,3 J/mm ısı girdisi ile birleştirilen numunede mekanik dayanım 62 N/mm olarak ölçülmüştür. Numunelerin penetrasyon derinliğine bağlı olarak mekanik dayanımları Şekil 4.29'da verilmiştir. Isı girdisine bağlı olarak artan penetrasyon derinliği ile numunelerin mekanik dayanımlarının düştüğü görülmektedir.

Mekanik dayanımdaki düşüş kaynak dikişinin çevresinde oluşan kırılgen intermetalik fazlar ile açıklanabilmektedir. Artan ısı girdisi ve buna bağlı olarak penetrasyon derinliğindeki artış kaynak dikişine dahil olan alüminyum miktarını arttırmakta ve daha kırılgen olan alüminyumca zengin ve daha kalın intermetalik tabakalar oluşmaktadır. Artan ısı girdisi ile ortaya çıkan yavaş soğuma bu fazların oluşması için gerekli süreye olanak sağlamaktadır.

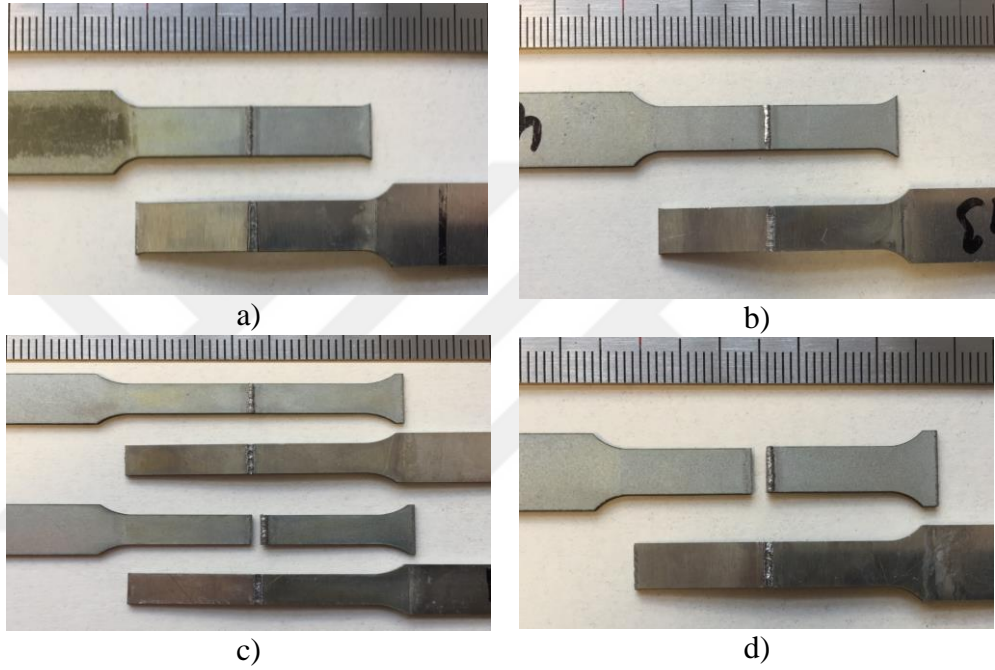
Mekanik dayanımda elde edilen bu sonuçlar literatürdeki değerler ile uyum göstermektedir. Kullanılan çelik-alüminyum türüne ve lazer kaynak prosesine bağlı olarak literatürde, 80 N/mm (Chen vd. 2016), 100 N/mm (Zhou vd. 2017a), 120 N/mm (Chen vd. 2011, Çavuşoğlu ve Özden 2014) mekanik dayanım değerlerinin elde edildiği görülmüştür.



**Şekil 4.29.** 3000 W lazer gücünde farklı ısı girdisi seviyelerinde birleştirilmiş numunelerin penetrasyon derinliklerine bağlı olarak mekanik dayanımları

Yapılan çekme testleri sonucunda numunelerde ısı girdisi seviyesi ve bununla ilişkili olarak penetrasyon derinliğine bağlı farklı kopma türleri gözlenmiştir (Şekil 4.30).

Artan ısı girdisi ve penetrasyon derinliği neticesinde kaynak dikişi ile alüminyum malzemenin birleşiği bölgelerde oluşan kırılđan intermetalik tabakalar hasarın alüminyum tarafından kırılma veya elik tarafından kırılma olarak oluşmasına neden olmaktadır. Düşük ısı girdisi seviyelerinde birleştirilen, yani düşük penetrasyon derinliklerine sahip numunelerde ise kırılma ayrılma (decohesion) şeklinde gerçekleşmiştir. En yüksek ısı girdisi ile birleştirilen numunede hasar elik malzemeden kopma olarak gözlenmiştir.



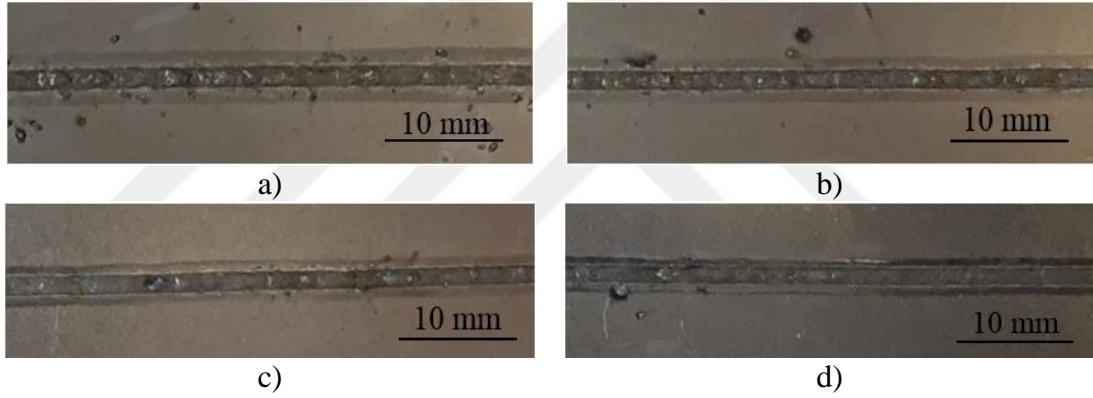
**şekil 4.30.** ekme testi sonucunda farklı ısı girdisi seviyelerinde gözlenen kopma türleri:  
a) 28,5 J/mm, b) 31,5 J/mm, c) 33,3 J/mm, d) 35,3 J/mm

### 4.3.3. 2500 W Lazer Gücünde Yapılan Kaynaklar

Bu kapsamda 2500 W sabit lazer gücünde ve lazer ışınının odak mesafesi çelik parçanın üst yüzeyinde (0 mm) olarak dört farklı ısı girdisi seviyesinde (35,7 J/mm, 33,3 J/mm, 31,2 J/mm ve 29,4 J/mm) kaynaklar yapılmıştır.

#### 4.3.3.1.Kaynak Dikiş Yüzeylerinin İncelenmesi

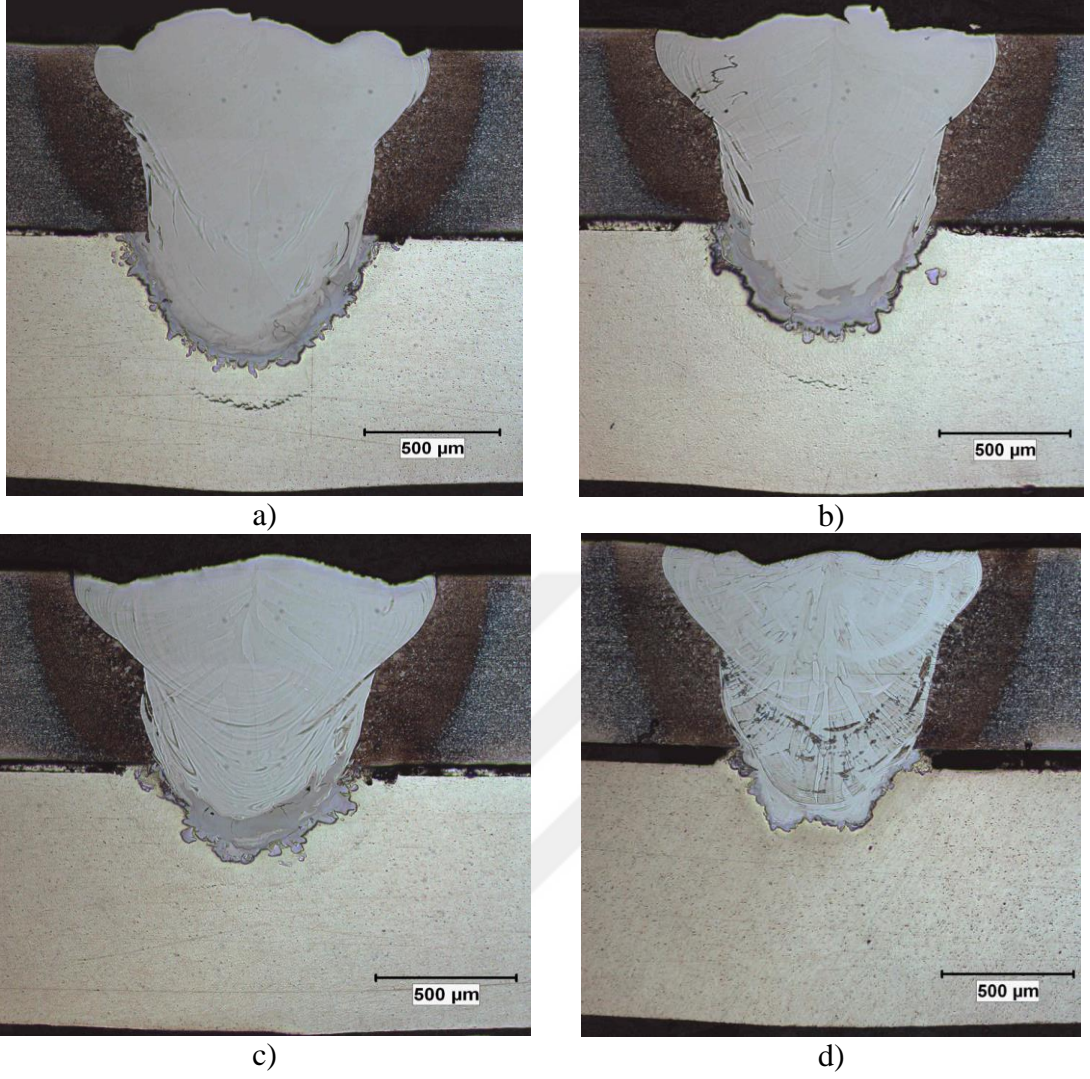
Kaynak dikiş yüzeyleri incelendiğinde artan ısı girdisi ile sıçrıntı oluşumu ve kaynak dikişindeki düzensizliklerin arttığı görülmüştür (Şekil 4.31). Yine artan ısı girdisine bağlı olarak kaynak dikişinde genişleme görülmüştür. Parçaların alt yüzeylerinden artan ısı girdisi ile kabarmalar yaşanmıştır. En iyi yüzey kalitesi en düşük ısı girdisi ile yapılan parçada elde edilmiştir.



**Şekil 4.31.** 2500 W lazer gücünde farklı ısı girdisi seviyelerinde birleştirilmiş numunelerin kaynak dikiş yüzey görüntüleri: a) 35,7 J/mm, b) 33,3 J/mm, c) 31,2 J/mm, d) 29,4 J/mm

#### 4.3.3.2.Kaynak Bölgelerinin Makro Yapılarının İncelenmesi

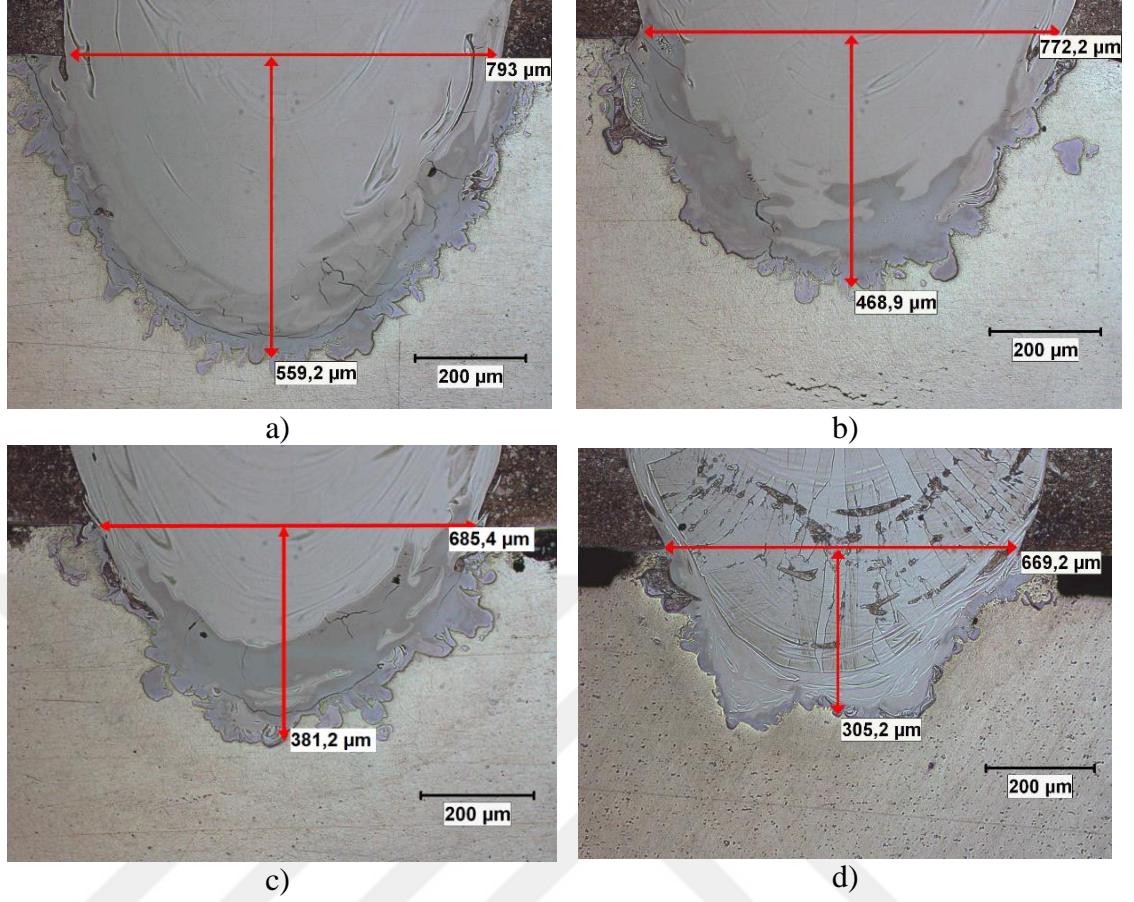
Farklı ısı girdisi seviyelerinde birleştirilen numunelerin kaynak bölgelerinin kesit görüntüleri alınarak ısı girdisine bağlı olarak incelenmiştir (Şekil 4.32). Isı girdisinin belirli sınırlar içerisinde seçilmesinden dolayı kaynak bölgelerinde derin çatlak oluşumu görülmemiştir. Artan ısı girdisi ile alüminyum malzemedeki ısı etkisi altında kalan bölgenin sınırlarında çatlakların oluştuğu görülmüştür. Artan ısı girdisi neticesinde ergiyik havuzuna dâhil olan alüminyum miktarının da arttığı ve bu nedenle birleşme bölgesindeki kaynak metalinin görüntüsünün değiştiği tespit edilmiştir.



**Şekil 4.32.** 2500 W lazer gücünde farklı ısı girdileri altında birleştirilen parçaların kaynak kesit görüntüleri: a) 35,7 J/mm, b) 33,3 J/mm, c) 31,2 J/mm, d) 29,4 J/mm

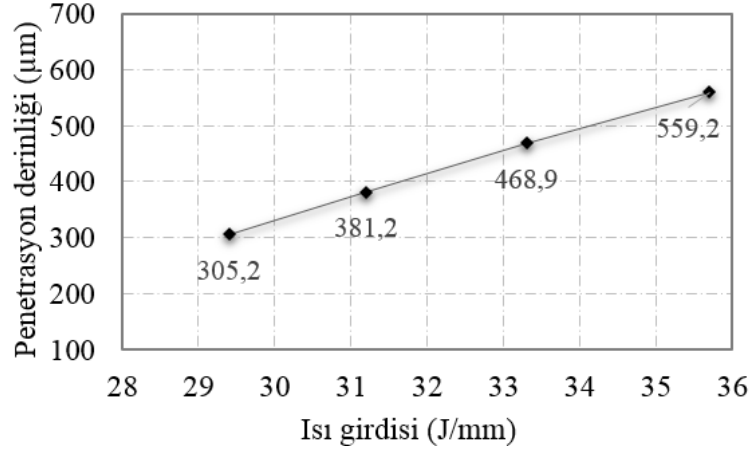
2500 W lazer gücü ile farklı ısı girdileri ile birleştirilmiş numunelerin kaynak dikişlerinin alüminyum tarafındaki penetrasyon derinlikleri ve genişlikleri optik mikroskop yardımı ile ölçülmüştür (Şekil 4.33). Yapılan ölçümler sonucunda ısı girdisindeki artış ile kaynak dikiş genişliğinin ve kaynak dikişinin alüminyum malzemedeki penetrasyon derinliğinin arttığı görülmüştür. Maksimum penetrasyon derinliği en yüksek ısı girdisi ile birleştirilen parçada 559,2  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. Bu numunede kaynak dikiş genişliği ise 793  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. Azalan ısı girdisi ile penetrasyon derinliği 305,2  $\mu\text{m}$  seviyelerine düşmüştür. Bu numunenin kaynak dikişinin sınırlarında çatlak oluşumu gözlenmiştir.



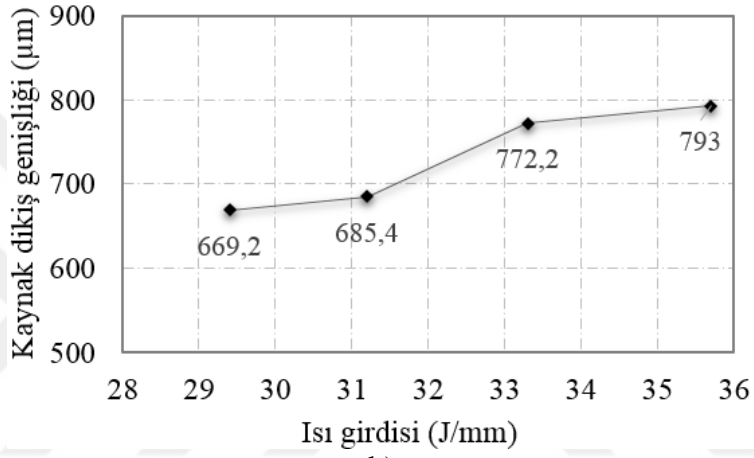


**Şekil 4.33.** 2500 W lazer gücünde farklı ısı girdileri altında birleştirilen parçaların penetrasyon derinlikleri ve kaynak dikiş genişlikleri: a) 35,7 J/mm, b) 33,3 J/mm, c) 31,2 J/mm, d) 29,4 J/mm

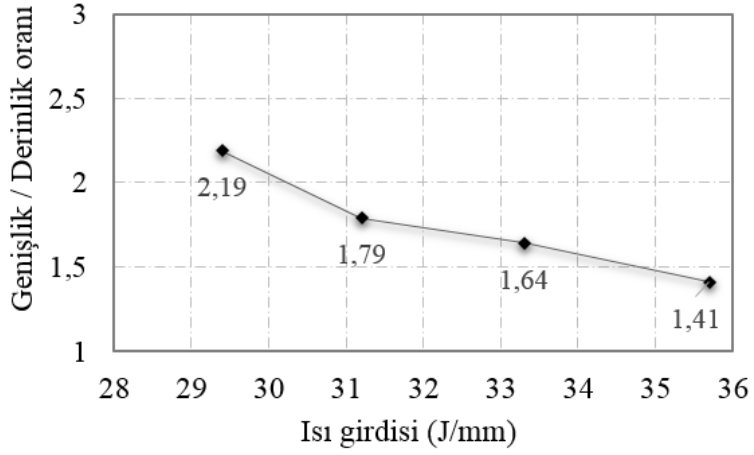
2500 W lazer gücünde dört farklı ısı girdisi seviyesinde birleştirilmiş numunelerin ısı girdisine bağlı olarak penetrasyon derinliğindeki ve kaynak dikiş genişliğindeki değişimleri ile genişlik/derinlik oranları Şekil 4.34'te verilmiştir. Kaynak dikiş genişliği ve penetrasyon derinliği ile ısı girdisi arasındaki ilişki görülmektedir. Kaynak dikişinin genişlik/derinlik oranının artan ısı girdisi ile azaldığı da ortaya çıkmıştır. En yüksek genişlik/derinlik oranı en düşük ısı girdisi seviyesinde yapılan kaynakta 2,19 olarak hesaplanmıştır. En düşük oran ise 35,7 J/mm ısı girdisinde yapılan kaynaklı numunede 1,41 olarak ölçülmüştür.



a)



b)

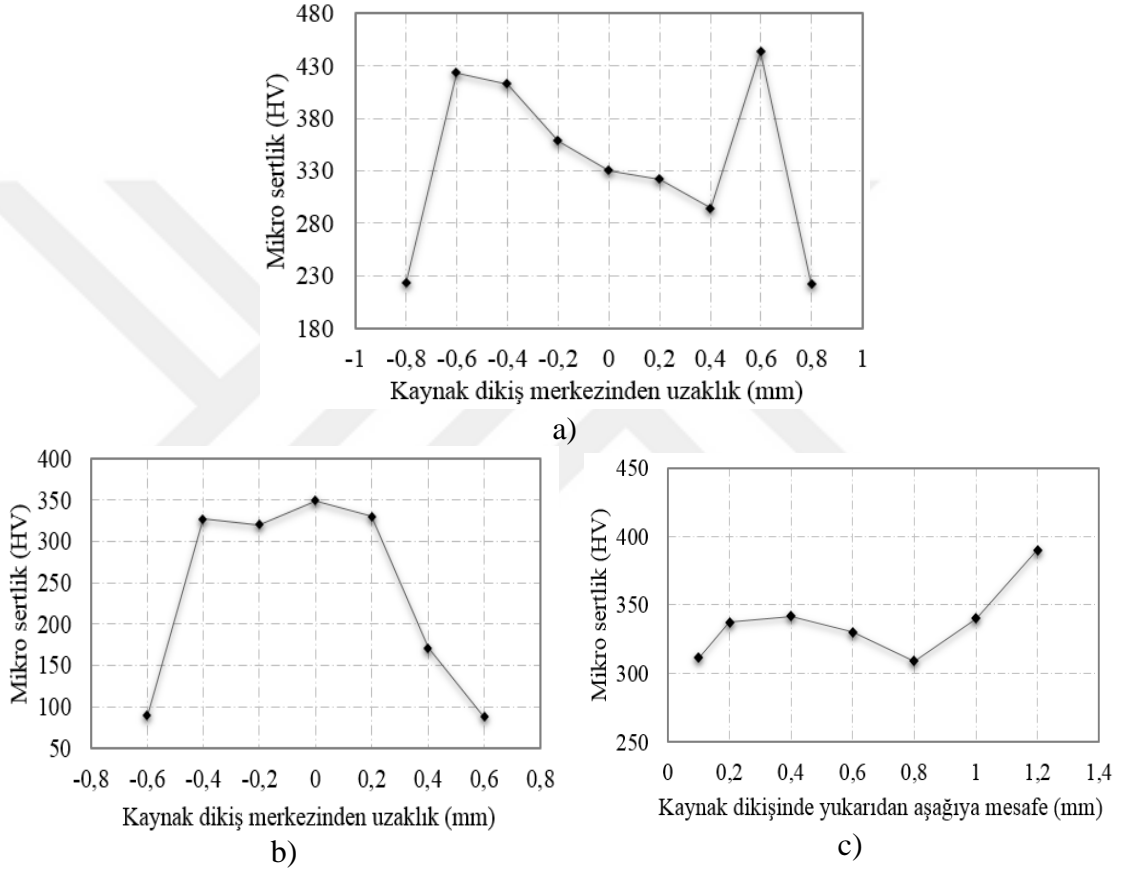


c)

**Şekil 4.34.** Isı girdisine bağlı olarak kaynak dikiş geometrisinin değişimi: a) penetrasyon derinliği, b) dikiş genişliği ve c) genişlik/derinlik oranı

### 4.3.3.3. Mikro Sertlik Ölçümleri ve SEM-EDX Analiz Sonuçlarının İncelenmesi

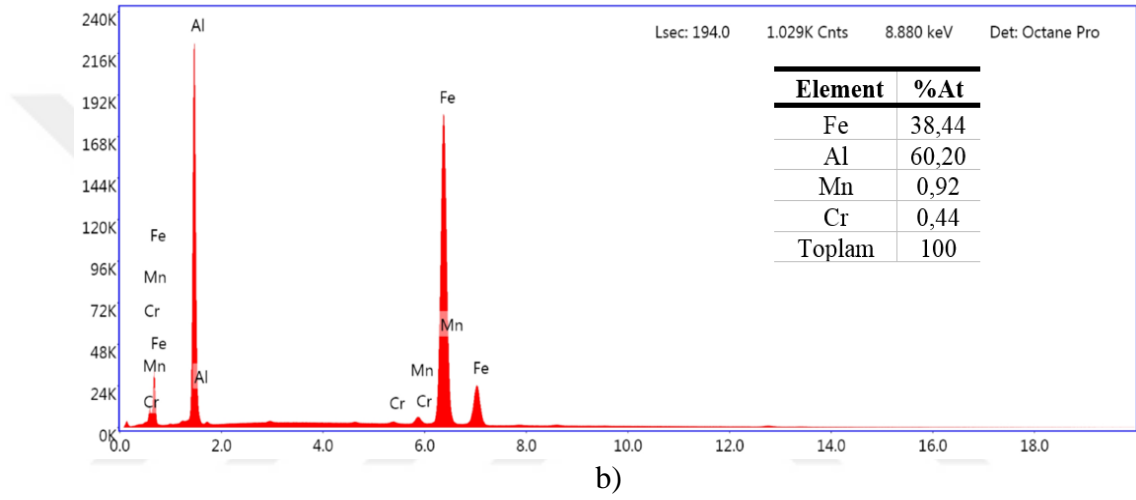
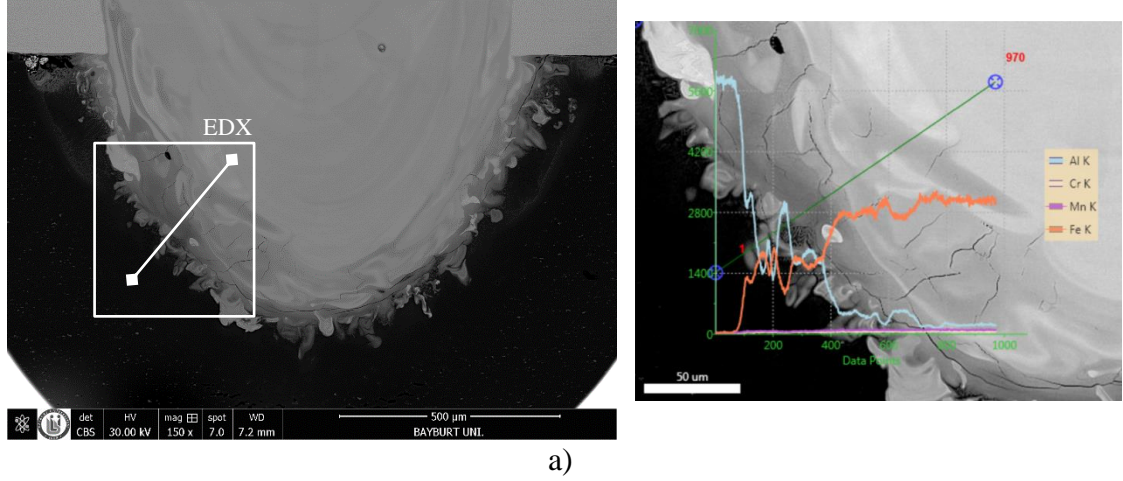
2500 W lazer gücünde farklı ısı girdisi seviyeleri altında birleştirilen lazer kaynaklı numunelerin mikro sertlik ölçümleri üç farklı hat üzerinde gerçekleştirilmiştir. 35,7 J/mm ısı girdisi ile birleştirilmiş numuneye ait sertlik dağılımları Şekil 4.35'te verilmiştir. Bu numunenin kaynak dikişinde ölçülen mikro sertlik değerlerinin ortalaması 337 HV<sub>0,1</sub>'dir.



**Şekil 4.35.** 35,7 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin mikro sertlik dağılımları: a) çelik-kaynak dikişi boyunca, b) alüminyum-kaynak dikişi boyunca ve c) kaynak dikişi boyunca dikey ölçüm sonuçları

Numunenin kaynak dikişinde kalın tabaka halinde oluşan intermetalik fazlar tespit edilmiştir. Ayrıca bu tabakaların üzerinde mikro çatlakların oluştuğu da gözlenmiştir. Yapılan EDX analizlerinde bu bölgelerde alüminyumca zengin intermetalik fazların oluştuğu görülmüştür (Al: %60, Fe: %38). Bu oranlara bağlı olarak Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> ve FeAl<sub>2</sub> fazlarının oluştuğu tespit edilmiştir (Şekil 4.36).

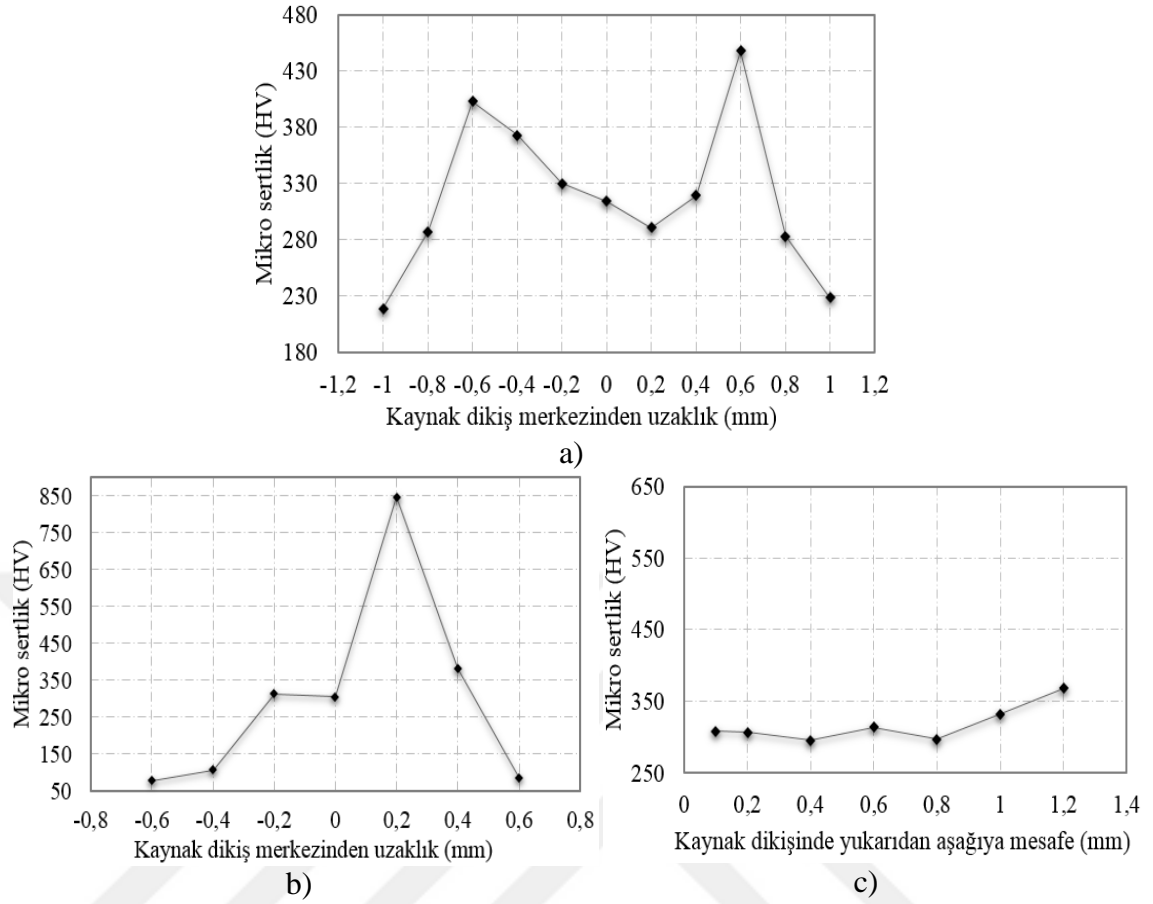




**Şekil 4.36.** 35,7 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin a) SEM görüntüsü ve EDX tarama bölgesi, b) EDX analiz sonucu

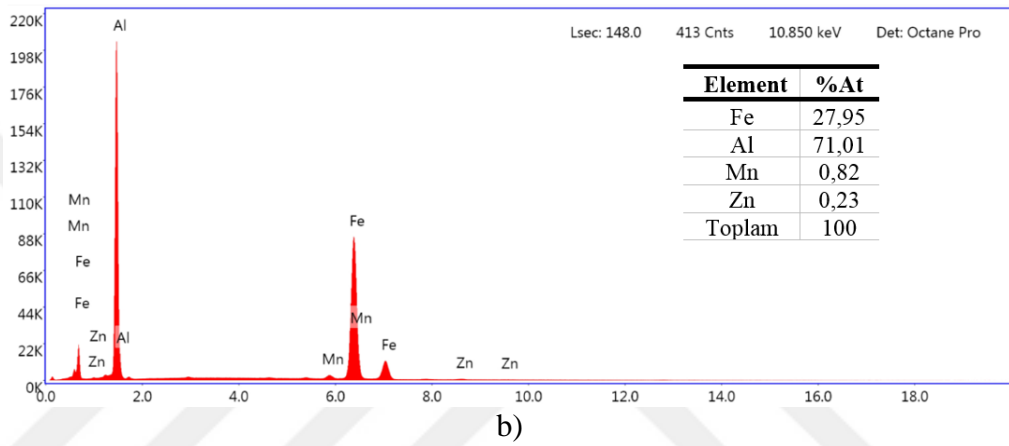
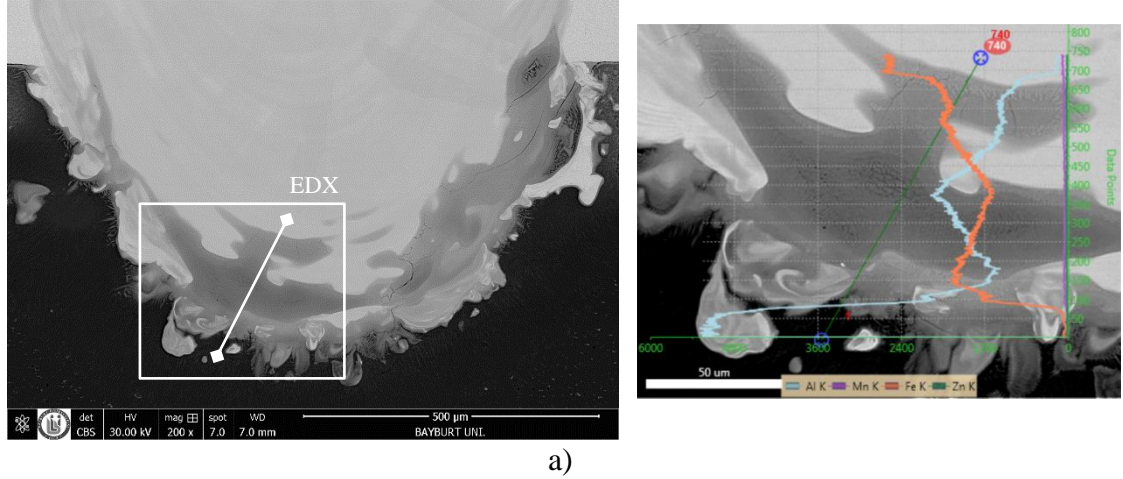
Kaynak dikişi boyunca değişkenlik göstermekle birlikte yaklaşık 100  $\mu\text{m}$  kalınlığına sahip bu faz bölgelerinde yapılan mikro sertlik ölçümlerinde sertlik değerlerinin 950-1050  $\text{HV}_{0,1}$  aralığında olduğu tespit edilmiştir. Mikro sertlik ölçüm sonuçları ile EDX analiz sonuçlarının uyumlu olduğu görülmüştür.

2500 W lazer gücünde, 33,3 J/mm ısı girdisi ile birleştirilmiş olan numunenin mikro sertlik ölçüm sonuçları Şekil 4.37'de verilmiştir. Alüminyum tarafında yapılan sertlik ölçümlerinde kaynak dikişinin sınır bölgesinde oluşan intermetalik faz bölgesi nedeni ile ani bir sertlik artışı görülmüştür. Bir önceki numuneye göre daha düşük ısı girdisi ile birleştirilen bu numunenin kaynak dikişindeki ortalama sertliğin de 327  $\text{HV}_{0,1}$  değerine düştüğü görülmüştür.



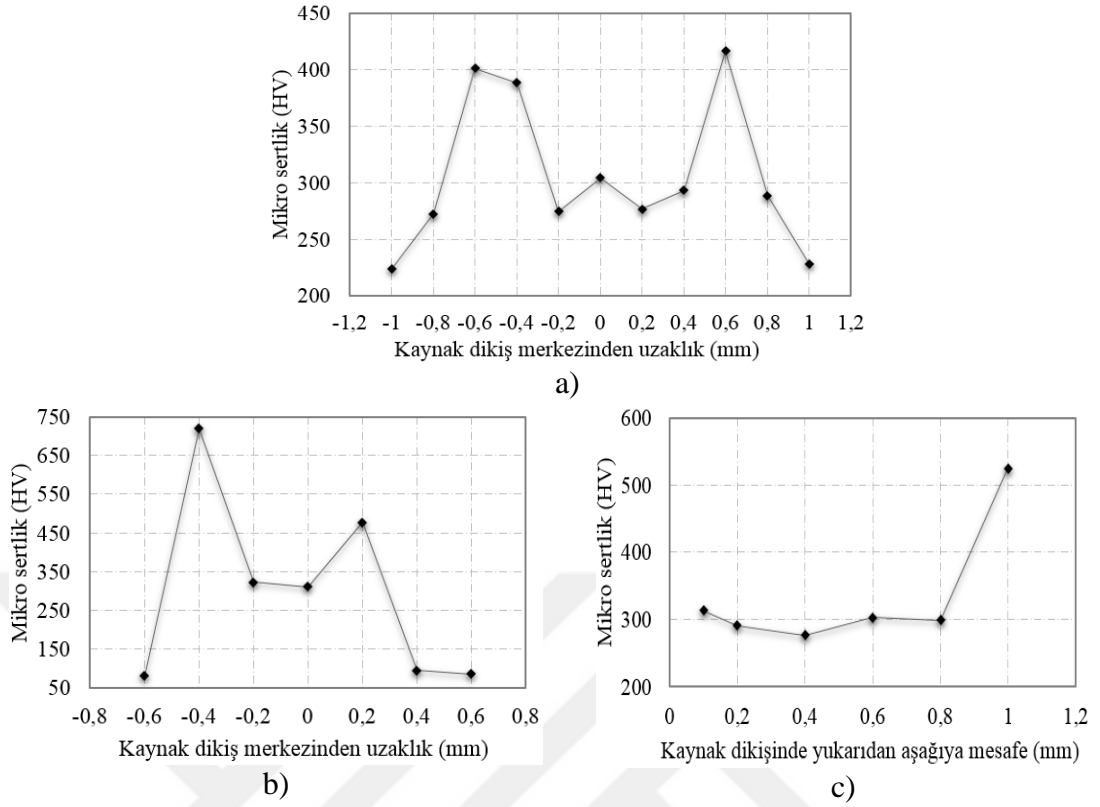
**Şekil 4.37.** 33,3 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin mikro sertlik dağılımları: a) çelik-kaynak dikişi boyunca, b) alüminyum-kaynak dikişi boyunca ve c) kaynak dikişi boyunca dikey ölçüm sonuçları

33,3 J/mm ısı girdisi ile birleştirilen numunenin kaynak dikişinde EDX analizleri de gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.38). SEM görüntülerinde kaynak dikişinin alt kısmında, alüminyum ile sınır oluşturan bölgelerde uniform olmayan ve kalın bir tabak halinde katılaştıran intermetalik faz bölgelerinin oluştuğu tespit edilmiştir. Bu bölgelerde yapılan EDX analizlerinde Al elementinin atomik olarak %71, Fe elementinin ise %27 olduğu görülmüştür. Bu değerler ışığında alüminyumca zengin  $FeAl_3$  ve  $Fe_2Al_5$  fazlarının oluştuğu tespit edilmiştir. İntermetalik fazların oluştuğu bölgelerde yapılan mikro sertlik ölçümleri sertliğin 850-1000  $HV_{0,1}$  aralığına yükseldiğini göstermiş ve EDX analiz sonuçları ile uyum sağlamıştır.



**Şekil 4.38.** 33,3 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin a) SEM görüntüsü ve EDX tarama bölgesi, b) EDX analiz sonucu

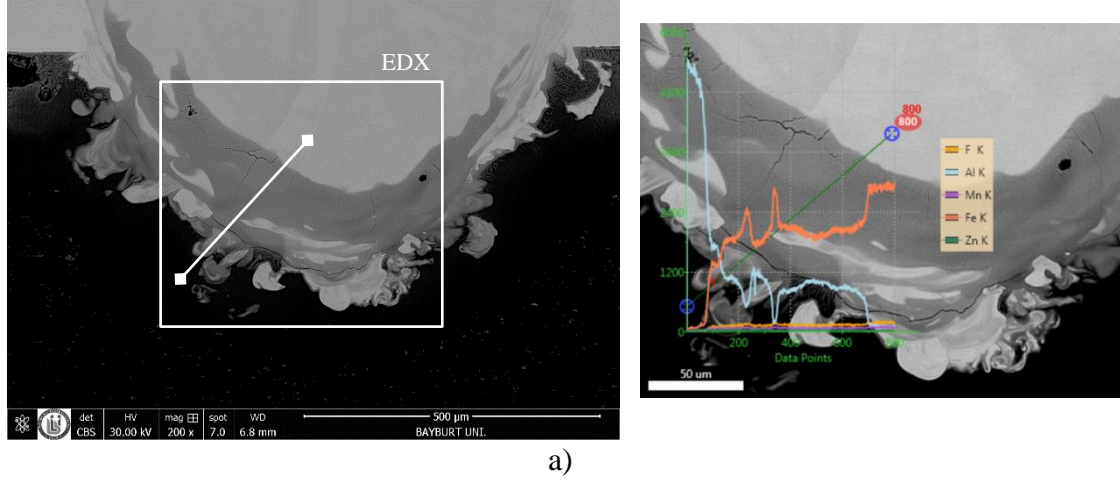
2500 W lazer gücünde 31,2 J/mm ısı girdisi ile birleştirilen numunede de mikro sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.39). Yapılan ölçümlerde yine alüminyum ile kaynak dikişinin birleştiği bölgelerde, intermetalik fazlar neticesinde ani sertlik yükselişlerinin olduğu ve sertlik değerinin 750 HV<sub>0,1</sub> seviyelerine kadar çıktığı tespit edilmiştir. Azalan ısı girdisi ve azalan penetrasyon derinliği neticesinde kaynak dikişindeki mikro sertlik ölçümleri sonucunda ortalama sertlik değerinin 296 HV<sub>0,1</sub> seviyelerine gerilediği görülmüştür.



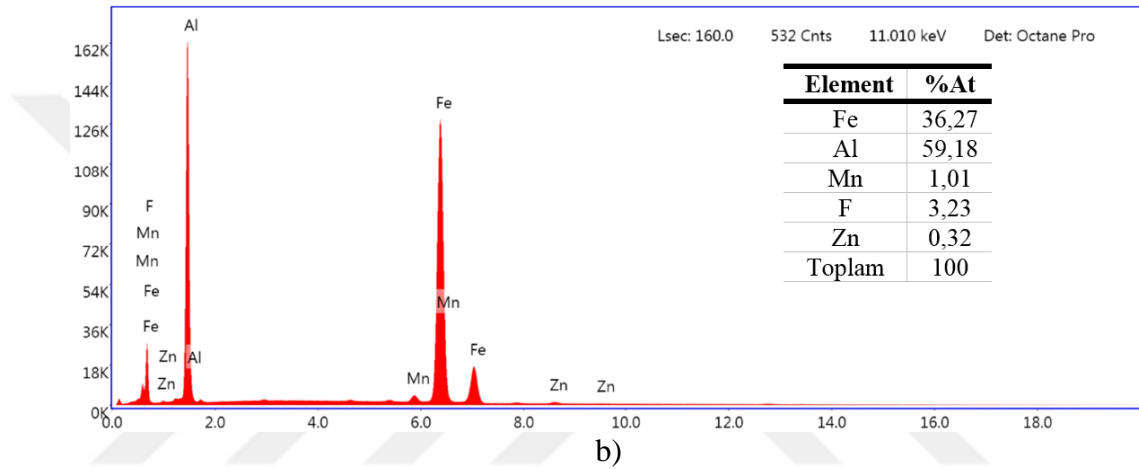
**Şekil 4.39.** 31,2 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin mikro sertlik dağılımları: a) çelik-kaynak dikişi boyunca, b) alüminyum-kaynak dikişi boyunca ve c) kaynak dikişi boyunca dikey ölçüm sonuçları

31,2 J/mm ısı girdisi ile birleştirilen numunenin kaynak dikişinin SEM görüntülerinde alt kısımlarda yine kalın tabaka halinde intermetalik fazların katlaştığı görülmektedir (Şekil 4.40). Bu bölgelerde gerçekleştirilen EDX analiz sonuçlarına göre alüminyumca zengin fazların oluştuğu tespit edilmiştir.

EDX tarama sonuçlarına göre, Şekil 4.40a’da gösterilen hat boyunca Al elementi atomik olarak %59 iken Fe elementi %36 çıkmıştır. Bu değerlere göre alüminyumca zengin  $FeAl_2$  ve  $Fe_2Al_5$  fazlarının oluştuğu tespit edilmiştir. Aynı hat üzerinde yapılan mikro sertlik ölçümleri sonucunda beklenildiği gibi 900-1000  $HV_{0,1}$  arasında sertlik değerleri elde edilmiştir.



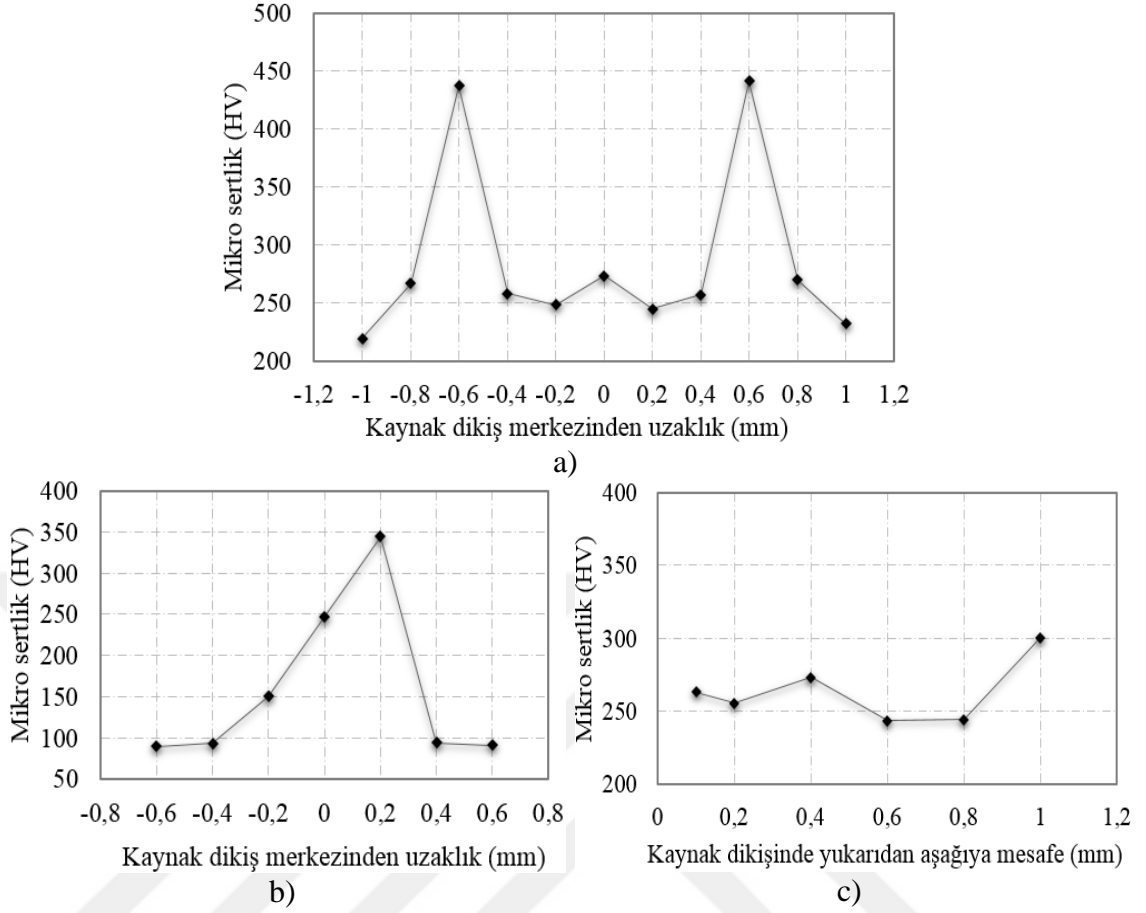
a)



b)

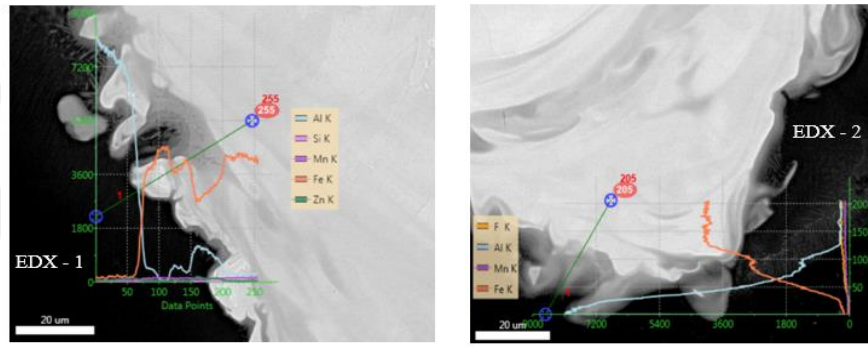
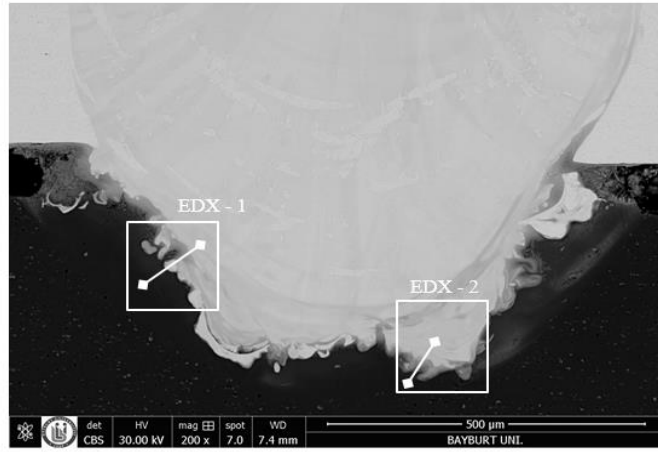
**Şekil 4.40.** 31,2 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin a) SEM görüntüsü ve EDX tarama bölgesi, b) EDX analiz sonucu

2500 W lazer gücündeki en düşük ısı girdisi seviyesi olan 29,4 J/mm ile birleştirilmiş numunenin mikro sertlik dağılımları Şekil 4.41’de verilmiştir. Yapılan ölçüm sonuçları incelendiğinde yüksek ısı girdisi seviyelerinde birleştirilen numunelerde olduğu gibi kaynak dikişi ile alüminyum malzemenin sınır bölgelerinde 700-800 HV<sub>0,1</sub> seviyelerine çıkan ani sertlik artışları görülmemiştir. Alüminyum tarafında yapılan ölçümlerde mikro sertliğin maksimum 350 HV<sub>0,1</sub> seviyelerine çıktığı görülmüştür. 2500 W lazer gücünde, en düşük ısı girdisi ile birleştirilen ve en düşük penetrasyon derinliğine sahip bu numunenin kaynak dikişindeki ortalama sertlik değeri de 263 HV<sub>0,1</sub> olarak diğer numunelere göre en düşük seviyededir.

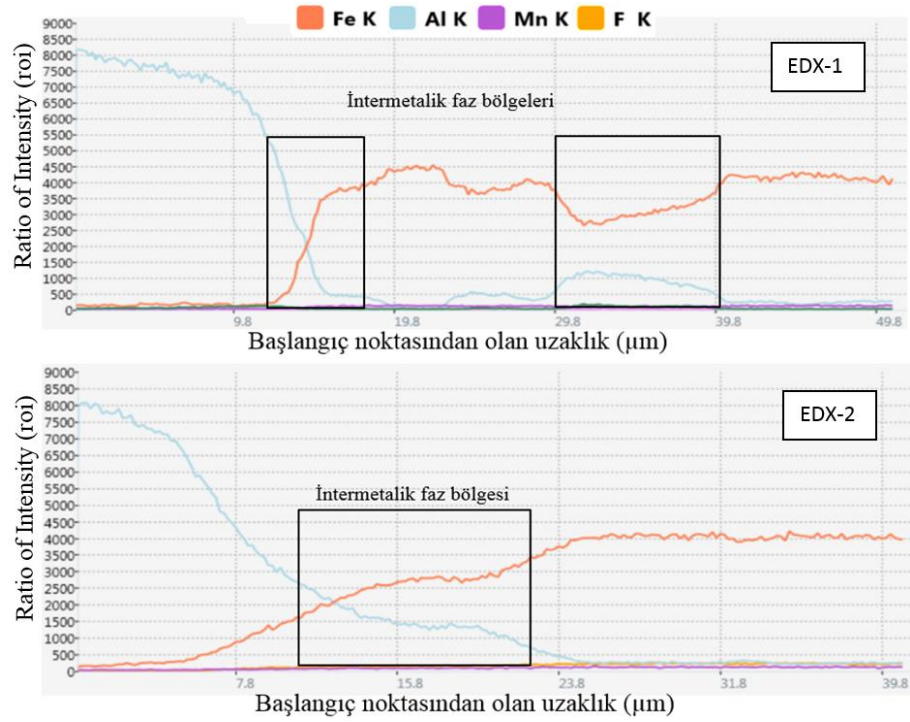


**Şekil 4.41.** 29,4 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin mikro sertlik dağılımları: a) çelik-kaynak dikişi boyunca, b) alüminyum-kaynak dikişi boyunca ve c) kaynak dikişi boyunca dikey ölçüm sonuçları

Numunenin kaynak dikişinde yapılan SEM-EDX incelemelerinde çatlak oluşumu ve kalın tabakalar şeklinde intermetalik faz oluşumu görülmemiştir. Kaynak dikişinin belirli bölgelerinde alüminyum malzeme ile kaynak dikişinin birleştiği kısımlarda ince tabakalar halinde intermetalik fazların oluştuğu tespit edilmiştir. (Şekil 4.42). EDX analiz sonuçlarına göre tarama yapılan her iki uç birleşme bölgesinde de alüminyumca zengin olmayan  $Fe_3Al$  ve  $FeAl$  intermetalik fazlarının oluştuğu görülmüştür. (Şekil 4.43). İntermetalik faz bölgelerinde gerçekleştirilen mikro sertlik ölçümleri ve EDX nokta analizlerinde de en yüksek sertlik değerine sahip fazın ( $FeAl$ ) kaynak dikişindeki farklı bölgelerde 5-15  $\mu m$  kalınlıklarında oluştuğu tespit edilmiştir (Şekil 4.44).

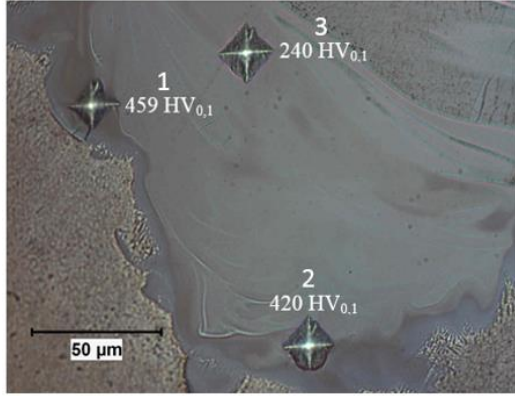


Şekil 4.42. 29,4 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin SEM görüntüsü ve EDX tarama bölgeleri



Şekil 4.43. 29,4 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin EDX tarama sonuçları

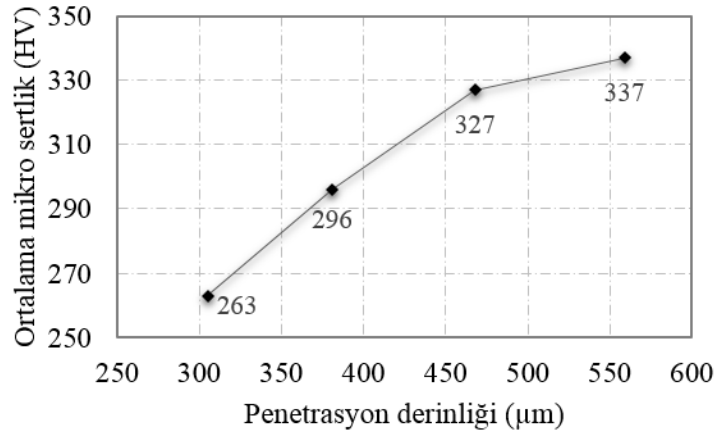




Element (%At)	1	2	3
Fe	65,8	70,33	76,56
Al	30,01	25,01	19,01
Mn	1,01	0,68	0,25
F	3,18	3,98	4,18

**Şekil 4.44.** 29,4 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin sertlik ölçüm ve EDX nokta sonuçları

Optik mikroskop incelemeleri, mikro sertlik ölçümleri ve SEM-EDX analizleri sonucunda ısı girdisindeki artışa bağlı olarak penetrasyon derinliğinin ve kaynak dikiş genişliğinin arttığı görülmüştür. Artan penetrasyon miktarı ve yüksek ısı girdisi sonucunda ortaya çıkan yavaş soğuma ile kaynak dikişindeki ortalama sertlik değerinin arttığı tespit edilmiştir (Şekil 4.45). Isı girdisindeki artış neticesinde kaynak dikişinde mikro çatlak oluşumu görüldüğü ve difüzyon esasına bağlı olarak oluşan intermetalik fazların oluşumunun arttığı da gözlenmiştir. Yapılan SEM-EDX analizlerinde intermetalik tabakaların yüksek ısı girdisi ile birleştirilen numunelerde alüminyumca zengin ve daha kalın olduğu tespit edilmiştir.



**Şekil 4.45.** 2500 W lazer gücünde farklı ısı girdisi seviyelerinde birleştirilen numunenin penetrasyon derinliğine bağlı kaynak dikişindeki ortalama mikro sertlik değerleri



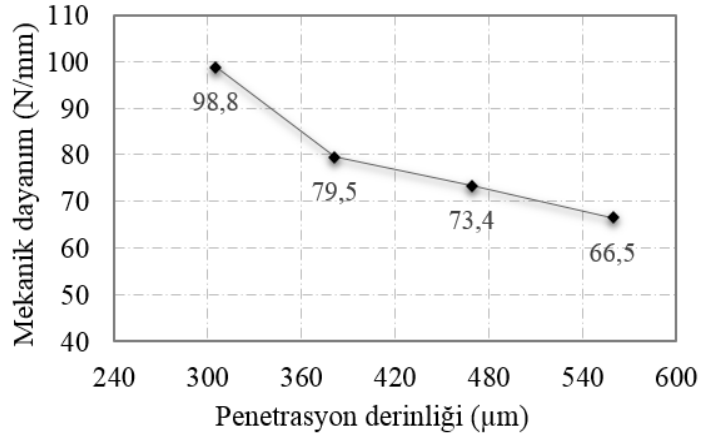
#### 4.3.3.4.Mekanik Dayanımlarının İncelenmesi

2500 W lazer gücünde, farklı ısı girdisi seviyelerinde birleştirilen lazer kaynaklı alüminyum-çelik malzemelerin çekme testleri sonucunda elde edilen mekanik dayanımları ısı girdisine ve penetrasyon derinliğine bağlı olarak Çizelge 4.7’de verilmiştir. Maksimum mekanik dayanım 98,8 N/mm olarak 29,4 J/mm ısı girdisi ile birleştirilmiş numunede elde edilmiştir. Artan ısı girdisi ile mekanik dayanım düşmüş ve 35,7 J/mm ısı girdisi ile birleştirilen numunede mekanik dayanım 56,5 N/mm olarak ölçülmüştür.

**Çizelge 4.7.** 2500 W lazer gücünde farklı ısı girdisi altında birleştirilen numunelerin penetrasyon derinlikleri, mekanik dayanımları ve kopma türleri

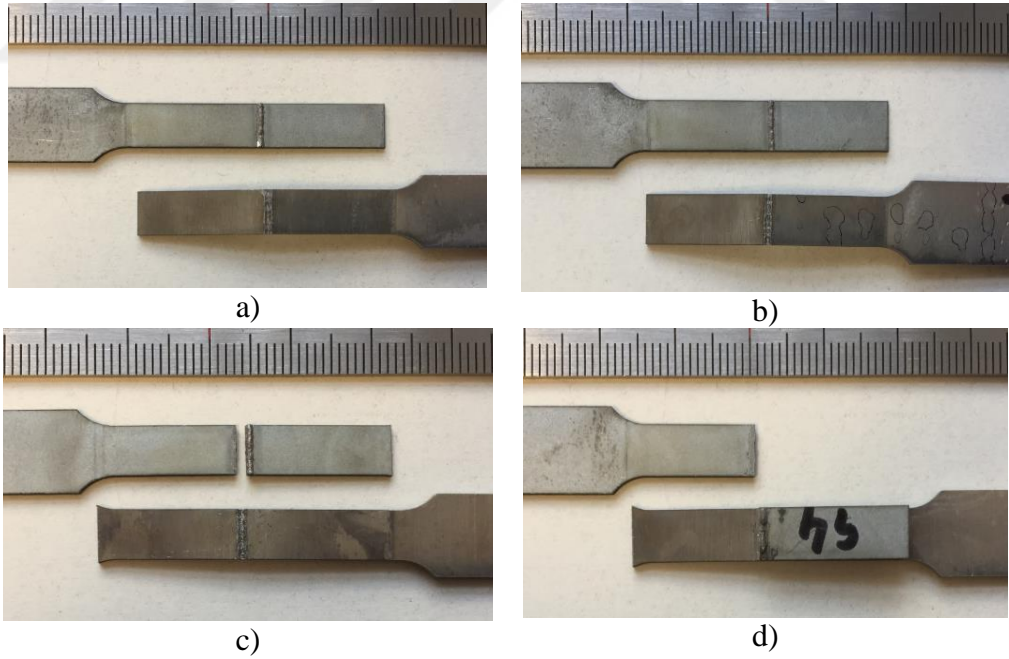
Lazer Gücü (W)	İlerleme Hızı (mm/s)	Isı Girdisi (J/mm)	Penetrasyon Derinliği (µm)	Mekanik Dayanım (N/mm)	Kopma Şekli
2500	85	29,4	305,2	98,8	Ara yüzeyde ayrılma
	80	31,2	381,2	79,5	Ara yüzeyde ayrılma
	75	33,3	468,9	73,4	Çelikte kesilme
	70	35,7	559,2	66,5	Çelikte kesilme

Numunelerin penetrasyon derinliğine bağlı olarak mekanik dayanımları ise Şekil 4.46’da verilmiştir. Isı girdisindeki artışın kaynak dikişinin genişliğini ve penetrasyonunu arttırması sonucunda kaynak dikişine dâhil olan alüminyum miktarı artmıştır. Ayrıca yüksek ısı girdisi seviyelerinde gerçekleşen yavaş soğuma difüzyon esasına dayalı oluşan intermetalik fazların kalınlıklarını arttırmıştır. Bunun neticesinde penetrasyon derinliği arttıkça, birleşme bölgesinde kırılğan intermetalik fazların oluşumu artmış ve kaynaklı parçaların mekanik dayanımları düşmüştür.



**Şekil 4.46.** 2500 W lazer gücünde farklı ısı girdisi seviyelerinde birleştirilmiş numunelerin penetrasyon derinliklerine bağlı olarak mekanik dayanımları

Yapılan çekme testleri sonucunda yüksek ısı girdisi seviyelerinde birleştirilmiş numunelerde kopmanın çelik malzeme ile kaynak dikiş i arasında olduğu görülmüştür. Düşük ısı girdisi ile birleştirilen numunelerde ise hasar ara yüzeyden ayrılma şeklinde gerçekleşmiştir (Şekil 4.47).



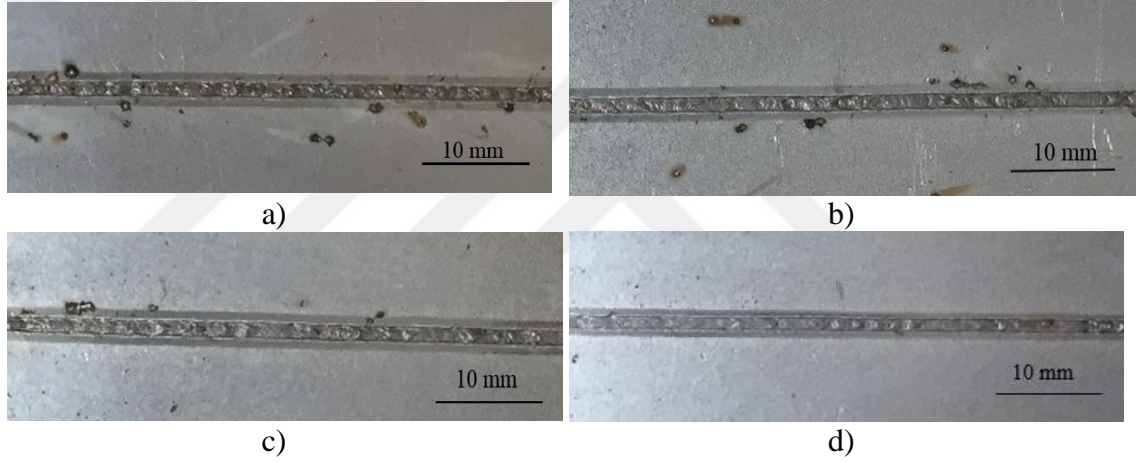
**Şekil 4.47.** Çekme testi sonucunda farklı ısı girdisi seviyelerinde gözlenen kopma türleri: a) 29,4 J/mm, b) 31,2 J/mm, c) 33,3 J/mm, d) 35,7 J/mm

#### 4.3.4. 2000 W Lazer Gücünde Yapılan Kaynaklar

2000 W sabit lazer gücü ve lazer ışınının parçanın üst yüzeyine sabitlendiği yani odak mesafesinin 0 mm olarak kabul edildiği durumda dört farklı ısı girdisi seviyesinde (36,3 J/mm, 33,3 J/mm, 30,7 J/mm ve 28,5 J/mm) kaynaklar yapılmıştır.

##### 4.3.4.1.Kaynak Dikiş Yüzeylerinin İncelenmesi

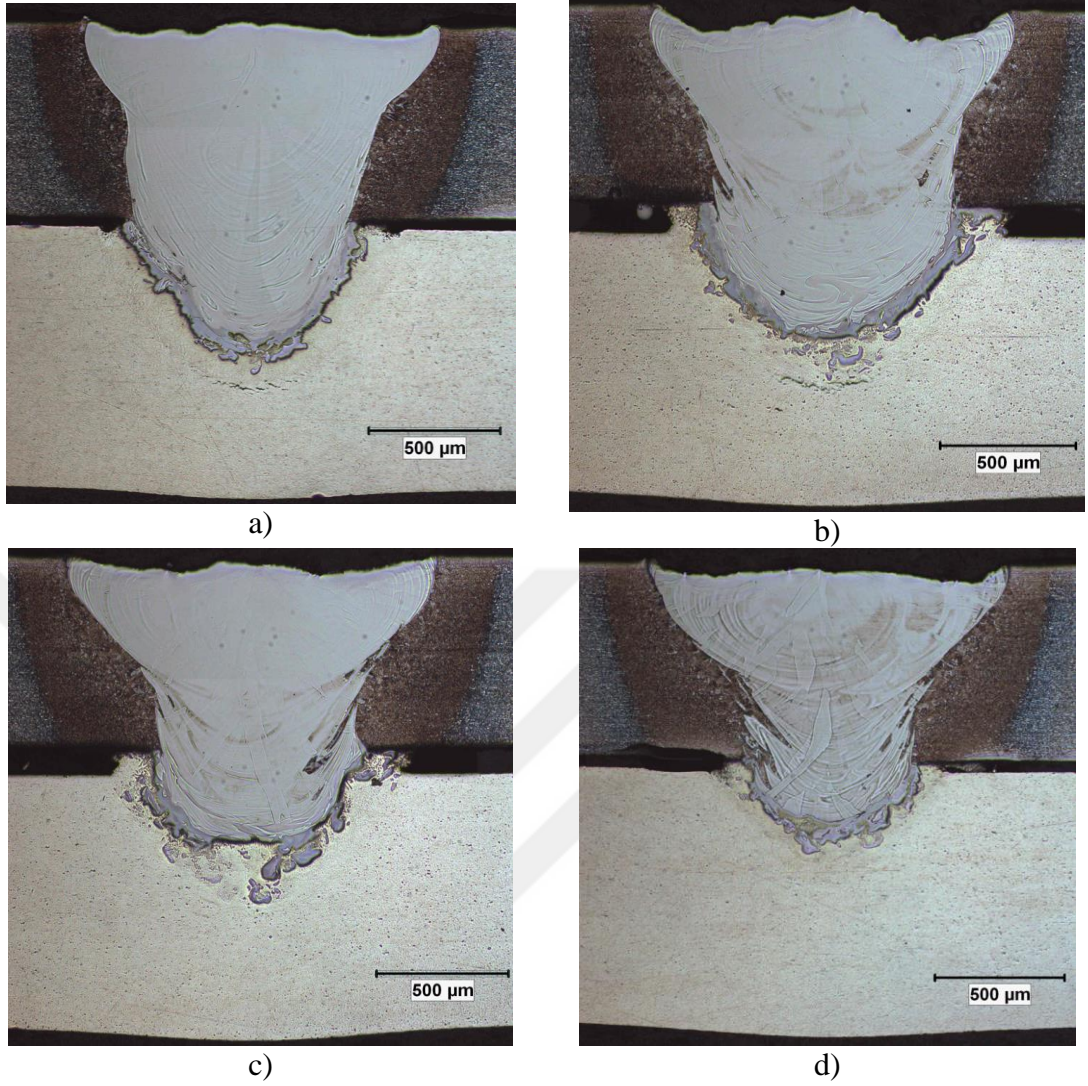
2000 W lazer gücünde farklı ısı girdisi seviyelerinde birleştirilen numunelerin yüzey görüntüleri Şekil 4.48’de verilmiştir. Isı girdisindeki azalma ile birlikte kaynak dikişinin genişliğinin azaldığı, daha düzenli hale geldiği ve sıçrıntı oluşumu gibi kaynak hatalarının ortaya çıkmadığı görülmüştür.



**Şekil 4.48.** 2000 W lazer gücünde farklı ısı girdisi seviyelerinde birleştirilmiş numunelerin kaynak dikiş yüzey görüntüleri: a) 36,3 J/mm, b) 33,3 J/mm, c) 30,7 J/mm, d) 28,5 J/mm

##### 4.3.4.2.Kaynak Bölgelerinin Makro Yapılarının İncelenmesi

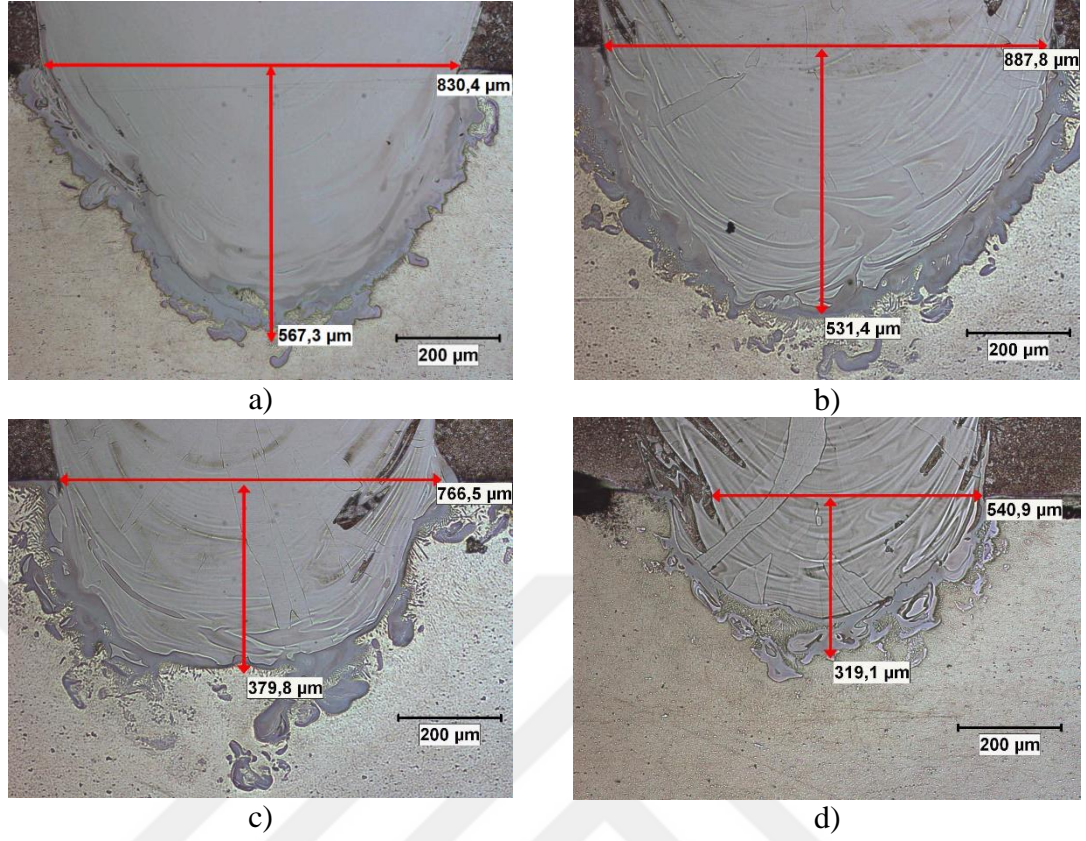
Farklı ısı girdisi seviyelerinde birleştirilen numunelerin kaynak bölgelerinin kesit görüntüleri alınarak optik mikroskop ile incelenmiştir (Şekil 4.49). 2500 W ve 3000 W lazer güçlerinde yapılan kaynaklarda bölgesel olarak görülen çatlak oluşumları bu numunelerde görülmemiştir. Sadece artan ısı girdisi ile alüminyum malzeme ile kaynak dikişinin birleştiği bölgedeki fazlarda yüzeysel mikro çatlaklar görülmüştür. Azalan ısı girdisi ile kaynak havuzuna dâhil olan alüminyum miktarının azalması ile kaynak metalinin görüntüsü değişmiştir.



**Şekil 4.49.** 2000 W lazer gücünde farklı ısı girdileri altında birleştirilen parçaların kaynak kesit görüntüleri: a) 36,3 J/mm, b) 33,3 J/mm, c) 30,7 J/mm, d) 28,5 J/mm

2000 W lazer gücü ile farklı ısı girdileri ile birleştirilmiş numunelerin kaynak dikişlerinin alüminyum tarafındaki penetrasyon derinlikleri ve genişlikleri ölçülmüştür (Şekil 4.50). Yapılan ölçümler sonucunda penetrasyon derinliği, kaynak dikiş genişliğinin ısı girdisindeki artış ile arttığı görülmüştür. Diğer ısı girdisi seviyelerindeki numune gruplarından farklı olarak bu numune grubunda en yüksek kaynak dikiş genişliği en yüksek ısı girdisi seviyesinde elde edilmemiştir. Ancak ısı girdisi ile orantılı olarak bir artış olduğu görülmektedir. Genişlik/derinlik oranı da diğer numune gruplarında olduğu gibi yine artan ısı girdisi ile azalmıştır.

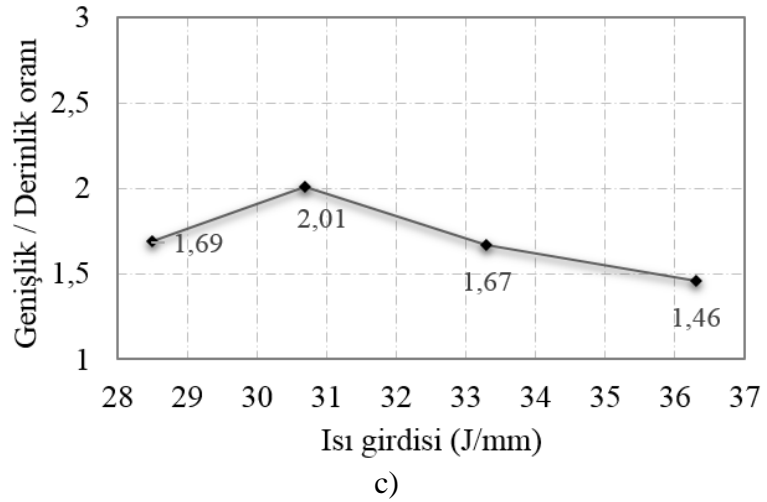
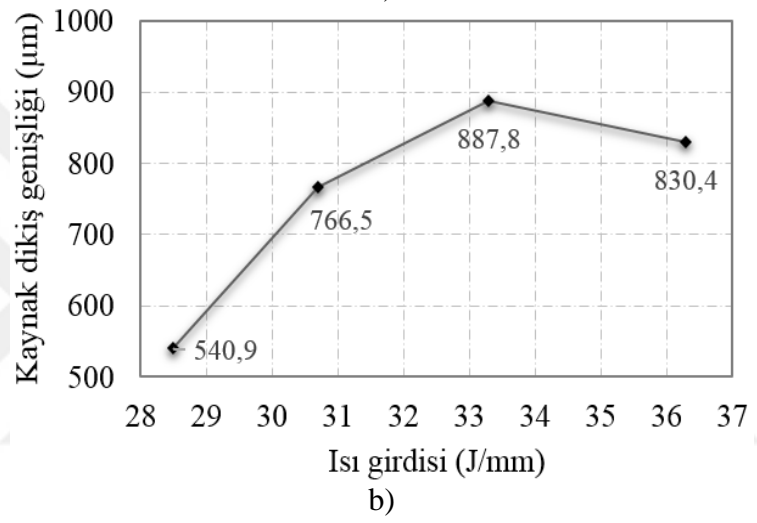
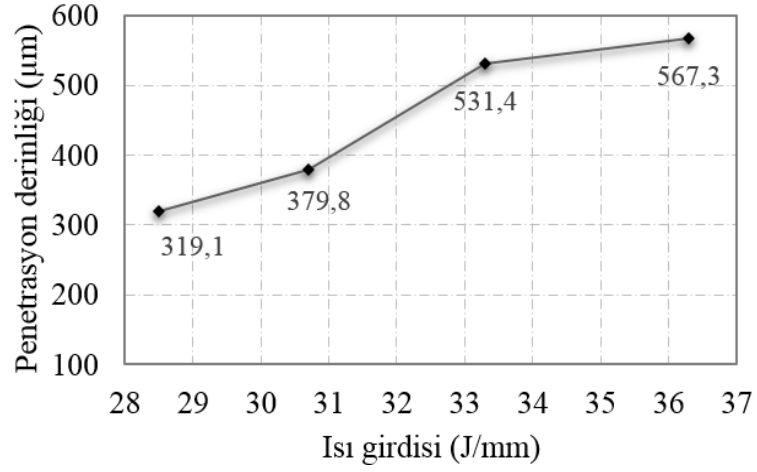




**Şekil 4.50.** 2000 W lazer gücünde farklı ısı girdileri altında birleştirilen parçaların penetrasyon derinlikleri ve kaynak dikiş genişlikleri: a) 36,3 J/mm, b) 33,3 J/mm, c) 30,7 J/mm, d) 28,5 J/mm

2000 W lazer gücü ile yapılan kaynaklarda maksimum penetrasyon derinliği en yüksek ısı girdisi ile birleştirilen parçada 567,3 µm olarak ölçülmüştür. Bu numunede kaynak dikiş genişliği ise 830,4 µm olarak ölçülmüştür. Azalan ısı girdisi ile penetrasyon derinliğinin 319,1 µm seviyelerine düştüğü görülmüştür (Şekil 4.50).

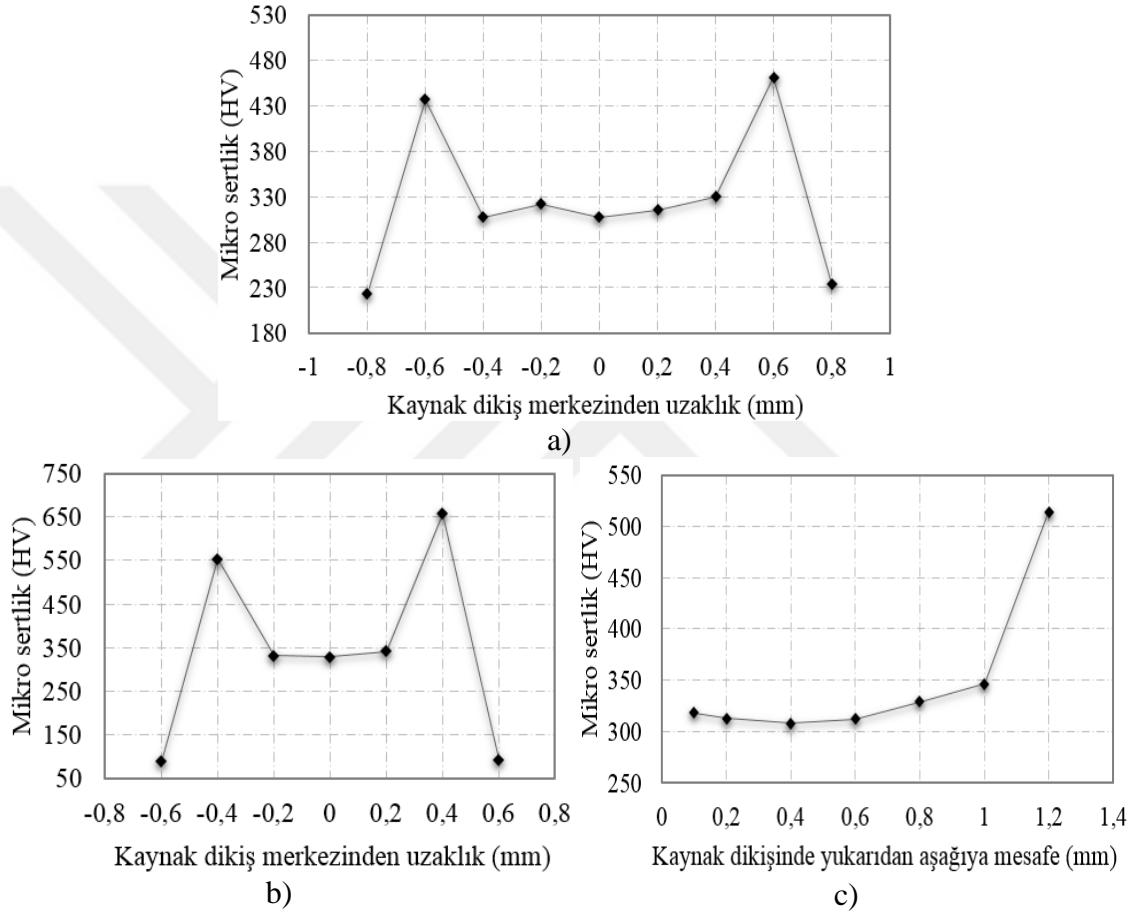
2000 W lazer gücünde dört farklı ısı girdisi seviyesinde birleştirilmiş numunelerin ısı girdisine bağlı olarak penetrasyon derinliğindeki ve kaynak dikiş genişliğindeki değişimleri ile genişlik/derinlik oranları Şekil 4.51’de verilmiştir. Yapılan inceleme sonucunda, kaynak dikişinin penetrasyon derinliğinin ısı girdisi ile arttığı görülmüştür. Ancak diğer numunelerin aksine en büyük dikiş genişliği maksimum ısı girdisi ile birleştirilen numunede değil 33,3 J/mm ısı girdisi ile yapılan kaynakta elde edilmiştir.



**Şekil 4.51.** Isı girdisine bağlı olarak kaynak dikiş geometrisinin değişimi: a) penetrasyon derinliği, b) dikiş genişliği ve c) genişlik/derinlik oranı

#### 4.3.4.3. Mikro Sertlik Ölçümleri ve SEM-EDX Analiz Sonuçlarının İncelenmesi

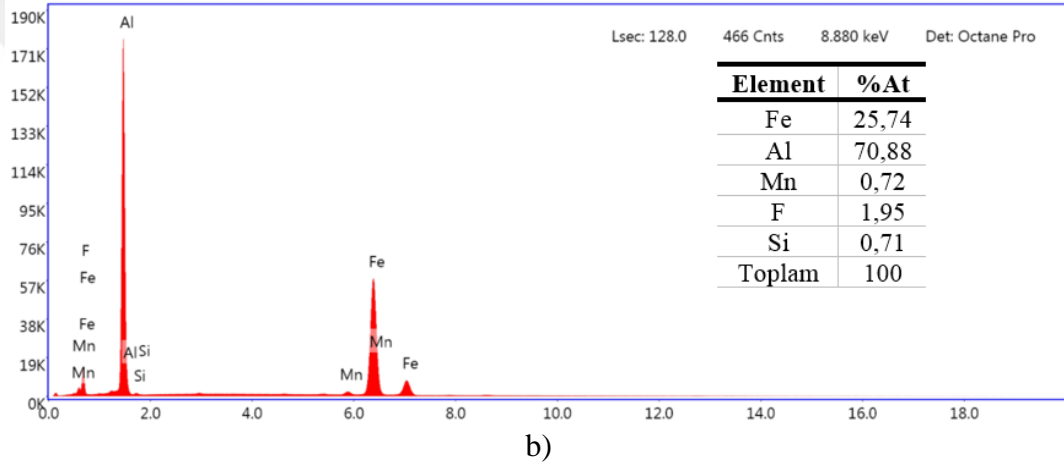
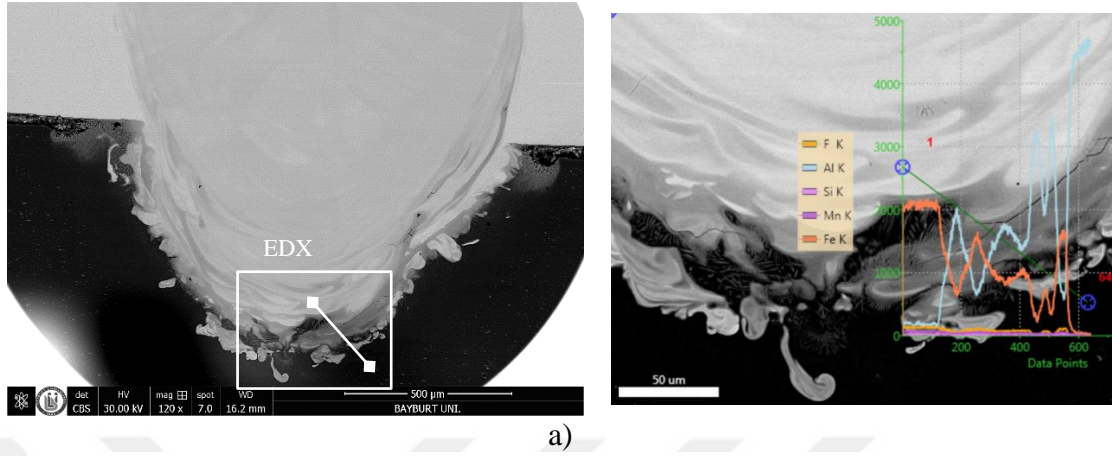
2000 W lazer gücünde dört farklı ısı girdisi seviyesinde birleştirilen lazer kaynaklı numunelerin mikro sertlik ölçümleri üç farklı hat üzerinde gerçekleştirilmiştir. 36,3 J/mm ısı girdisi ile birleştirilmiş numuneye ait sertlik dağılımları Şekil 4.52’de verilmiştir. Bu numunenin kaynak dikişinde ölçülen mikro sertlik değerlerinin ortalaması 348 HV<sub>0,1</sub>’dir.



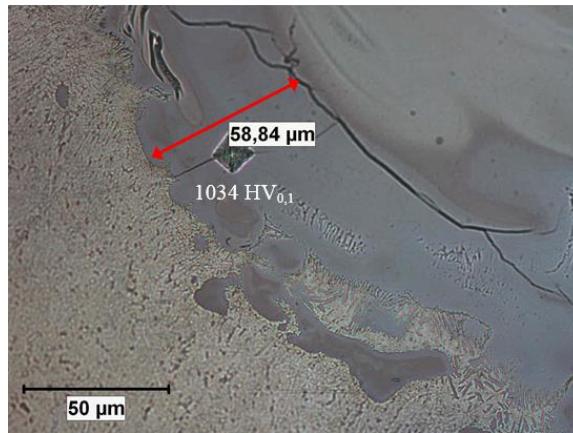
**Şekil 4.52.** 36,3 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin mikro sertlik dağılımları: a) çelik-kaynak dikişi boyunca, b) alüminyum-kaynak dikişi boyunca ve c) kaynak dikişi boyunca dikey ölçüm sonuçları

SEM incelemelerin 2000 W lazer gücünde en yüksek ısı girdisi seviyesi ile birleştirilen numunede kaynak dikişinin çevresinde intermetalik faz oluşumu gözlenmiştir (Şekil 4.53). Bu bölgelerde yapılan EDX analizlerinde oluşan fazların alüminyumca zengin Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> ve FeAl<sub>3</sub> olduğu tespit edilmiştir. Özellikle kaynak dikişinin alt kısmında ve köşelerinde kalınlığı bölgesel olarak 50-80 µm aralığında değişen kırılğan intermetalik

fazların oluştuğu gözlenmiştir (Şekil 4.53). Bu bölgede gerçekleştirilen mikro sertlik ölçümlerinde 750-1050 HV<sub>0,1</sub> arası sertlik değerleri elde edilmiştir (Şekil 4.54).



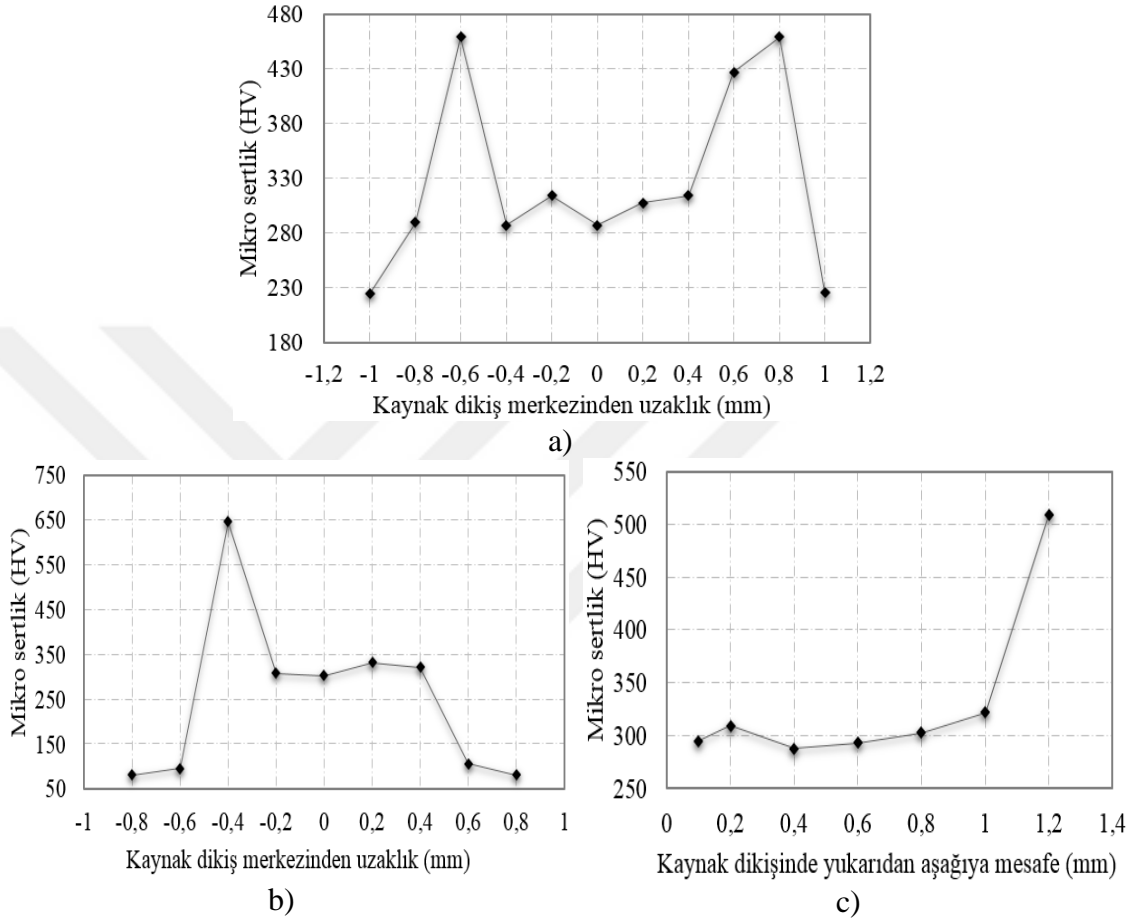
Şekil 4.53. 36,3 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin a) SEM görüntüsü ve EDX tarama bölgesi, b) EDX analiz sonucu



Şekil 4.54. 36,3 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin sertlik ölçüm ve bölgesel intermetalik faz tabaka kalınlığı

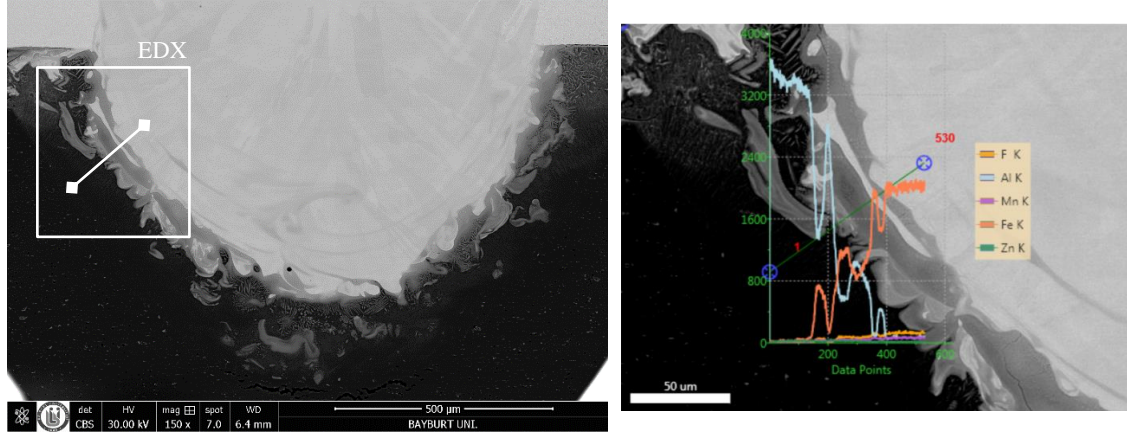


2000 W lazer gücünde, 33,3 J/mm ısı girdisi ile birleştirilmiş olan numunenin mikro sertlik ölçüm sonuçları Şekil 4.55'te verilmiştir. Azalan ısı girdisi ile birlikte kaynak dikişindeki ölçülen sertlik değerlerinin ortalamasınının 331 HV<sub>0,1</sub> seviyelerine azaldığı görülmüştür.

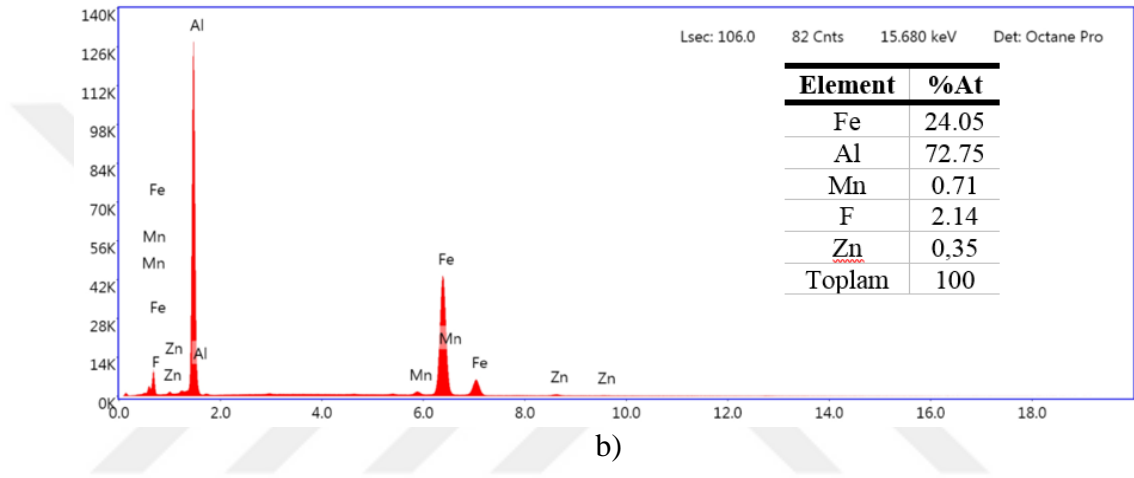


**Şekil 4.55.** 33,3 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin mikro sertlik dağılımları: a) çelik-kaynak dikişi boyunca, b) alüminyum-kaynak dikişi boyunca ve c) kaynak dikişi boyunca dikey ölçüm sonuçları

SEM incelemeleri sonucunda bu numunede çatlak oluşumu görülmemiş olmasına rağmen belirli bölgelerde intermetalik fazların oluştuğu tespit edilmiştir. EDX analizlerinde bu bölgedeki Al oranı %72 çıkarken Fe oranı %24 seviyelerindedir (Şekil 4.56). Bu oranlara göre Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> ve FeAl<sub>3</sub> intermetalik fazlarının oluştuğu tespit edilmiştir. Ayrıca bu faz bölgelerinde yapılan mikro sertlik ölçümlerinde 950-1050 HV<sub>0,1</sub> arası sertlik değerleri elde edilmiştir (Şekil 4.57). Kaynak dikişi boyunca farklılık gösterse de intermetalik fazların kalınlıklarının 50 µm'dan fazla olduğu görülmüştür (Şekil 4.57).

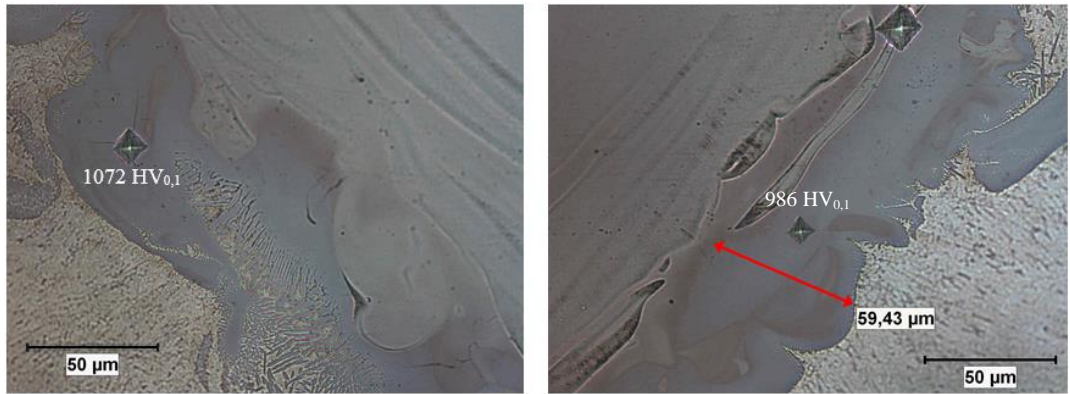


a)



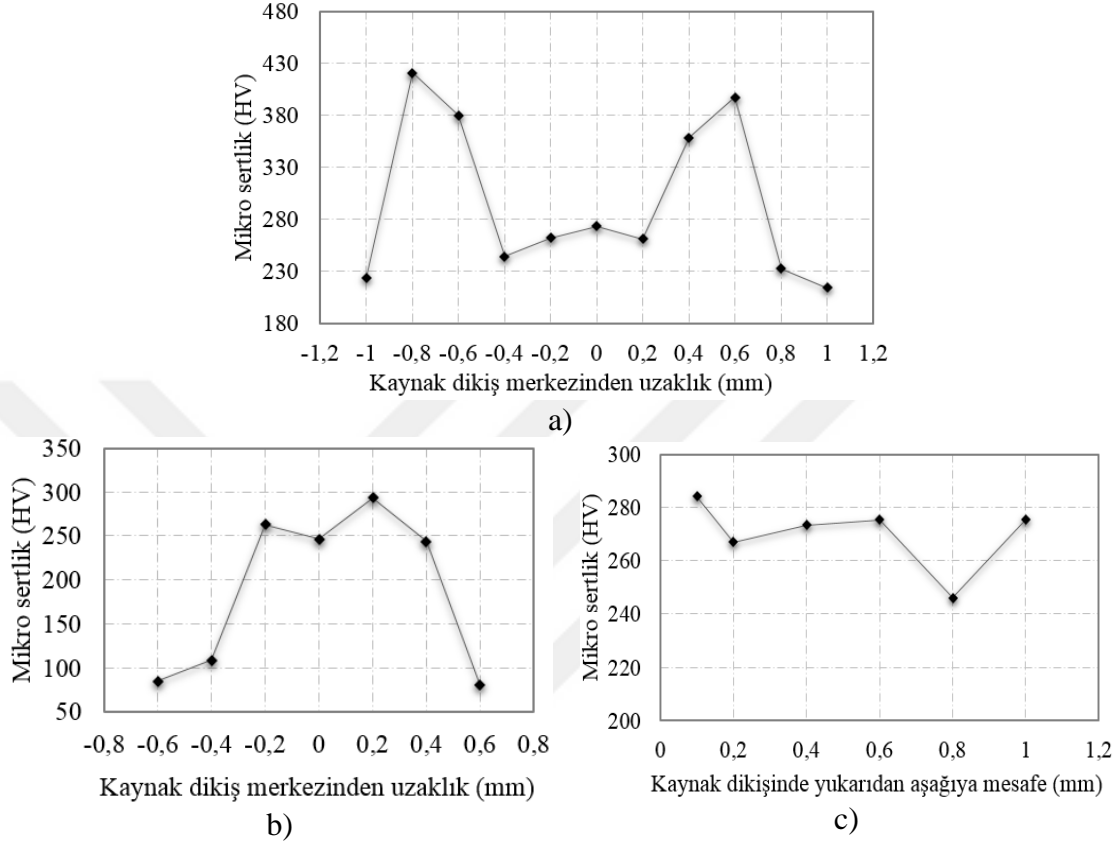
b)

Şekil 4.56. 33,3 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin a) SEM görüntüsü ve EDX tarama bölgesi, b) EDX analiz sonucu



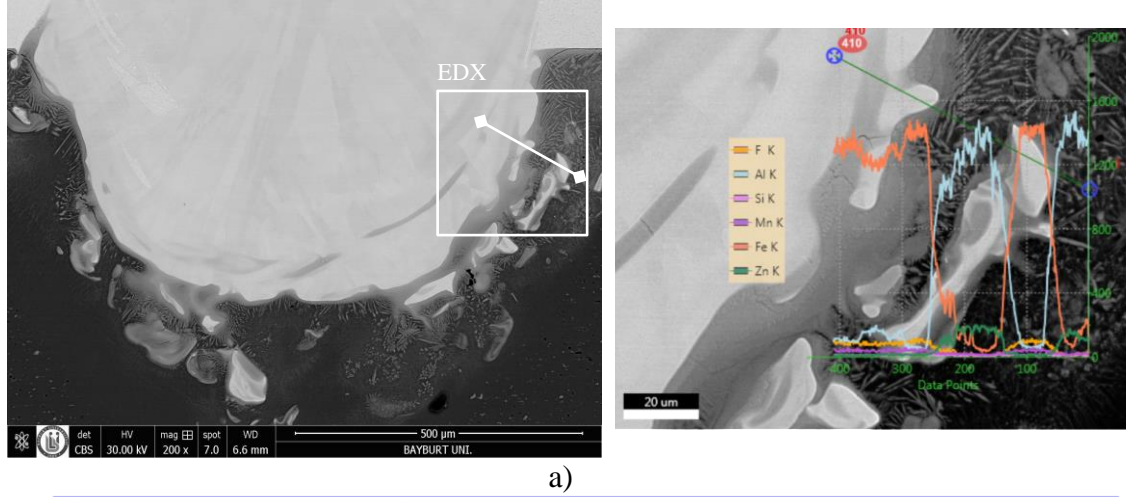
Şekil 4.57. 33,3 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin sertlik ölçüm noktaları ve bölgesel intermetalik faz tabaka kalınlığı

30,7 J/mm ile birleştirilmiş numunenin mikro sertlik ölçüm sonuçları Şekil 4.58’de verilmiştir. Bu numunenin kaynak dikişinde ölçülen mikro sertlik değerlerinin ortalaması ise 270 HV<sub>0,1</sub>’dir.

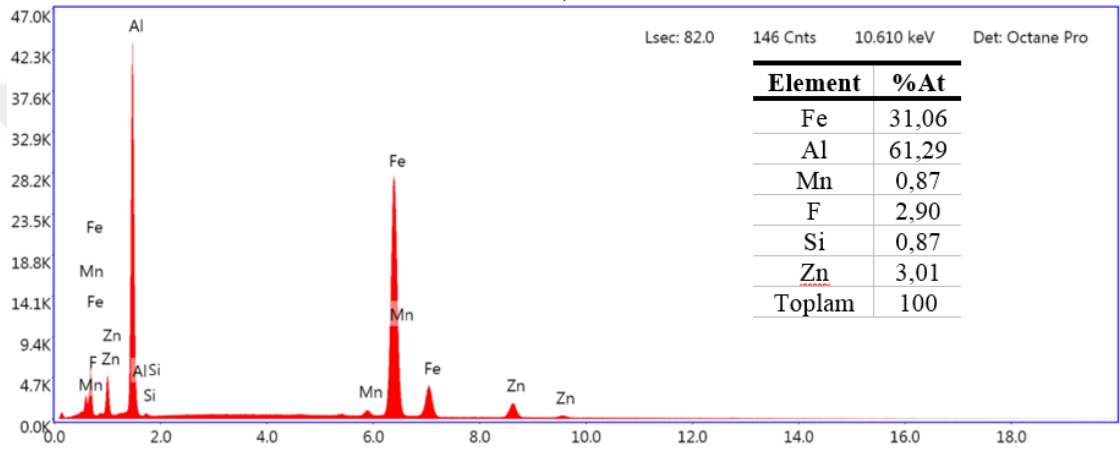


**Şekil 4.58.** 30,7 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin mikro sertlik dağılımları: a) çelik-kaynak dikişi boyunca, b) alüminyum-kaynak dikişi boyunca ve c) kaynak dikişi boyunca dikey ölçüm sonuçları

SEM-EDX analizlerinde numunenin kaynak dikişinin alüminyum ile kesiştiği bölgelerde atomik olarak Al elementi %61 çıkarken Fe elementi %31 civarında ölçülmüştür (Şekil 4.59). Bu değerlere göre Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> intermetalik fazının oluştuğu tespit edilmiştir. Ancak, yüksek ısı girdisi ile birleştirilmiş numunelere göre intermetalik faz tabakalarının kalınlıklarının kısıtlı kaldığı ve herhangi bir çatlak oluşmadığı görülmüştür. İntermetalik faz kalınlıkları kaynak dikişinin sınırları boyunca farklılık gösterse de 10-18 µm aralığında ölçülmüştür. Numunenin kaynak dikişi üzerindeki en yüksek mikro sertlik değerleri bu fazların oluştuğu bölgelerde 1000-1100 HV aralığında ölçülmüştür (Şekil 4.60).

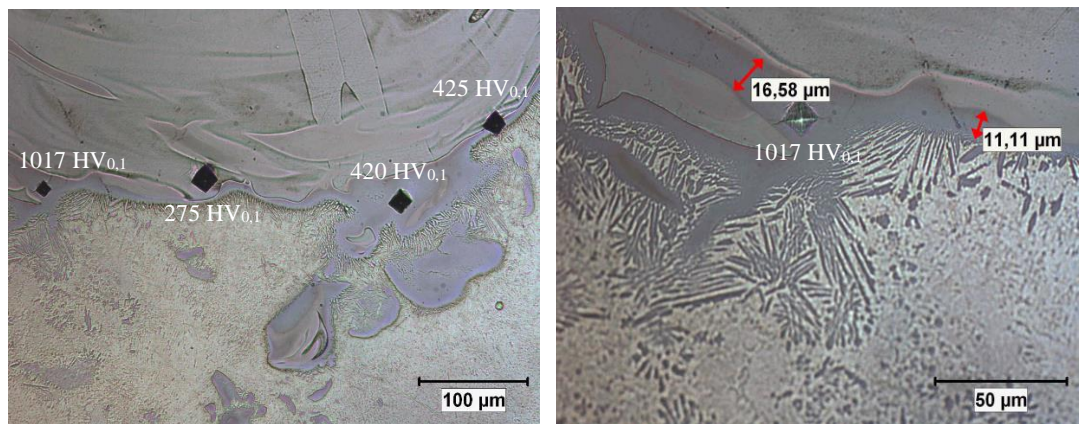


a)



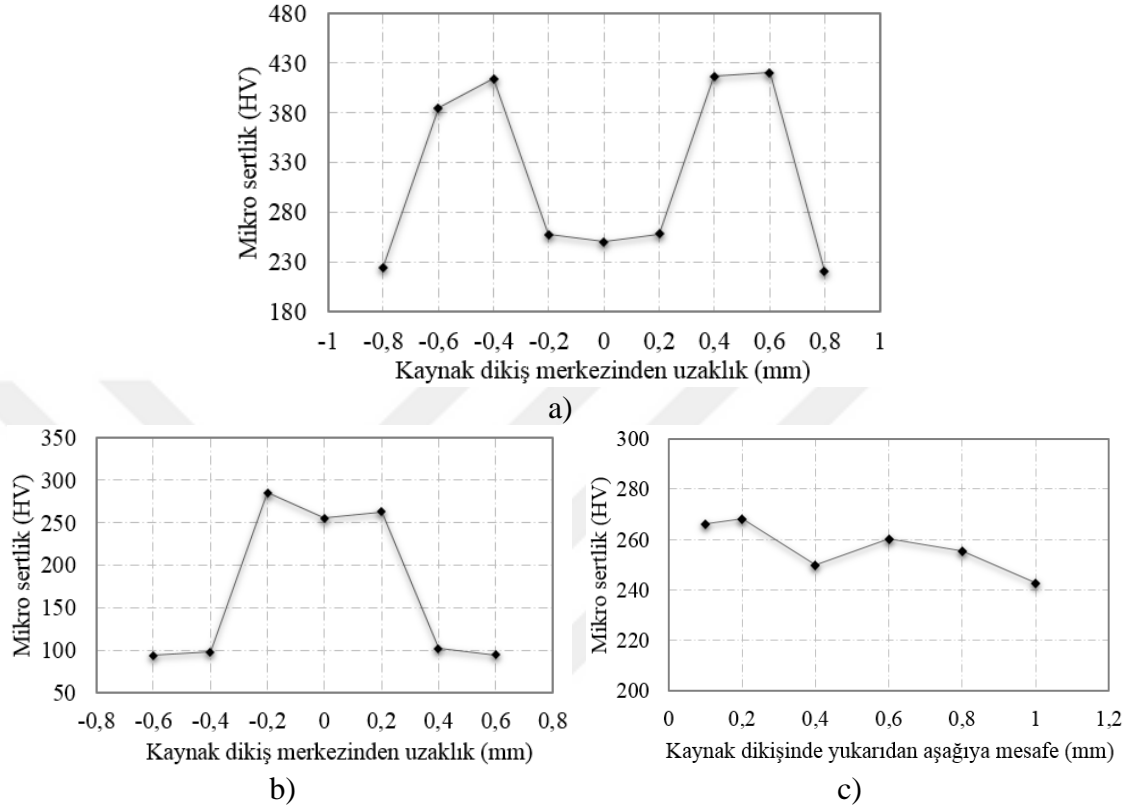
b)

**Şekil 4.59.** 30,7 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin a) SEM görüntüsü ve EDX tarama bölgesi, b) EDX analiz sonucu



**Şekil 4.60.** 30,7 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin sertlik ölçüm noktaları ve bölgesel intermetalik faz tabaka kalınlığı

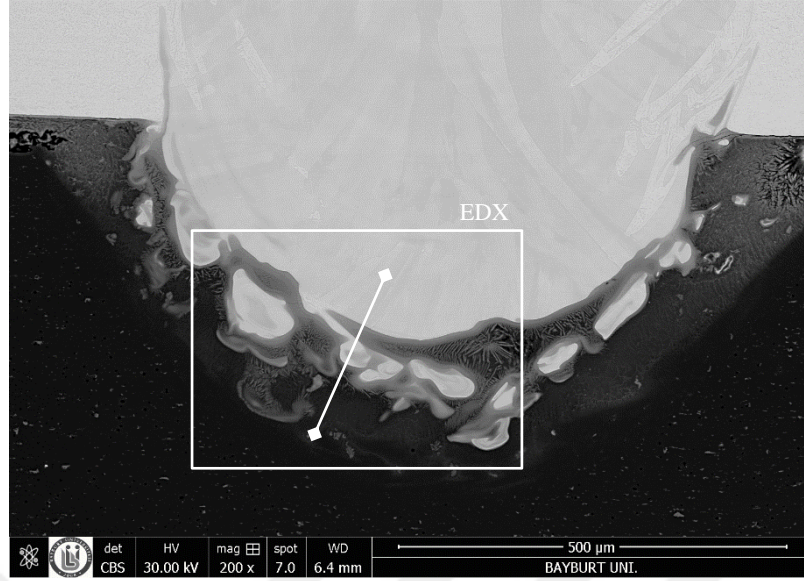
2000 W lazer gücünde en düşük ısı girdisi olan 28,5 J/mm ile birleştirilmiş numunenin mikro sertlik ölçüm sonuçları Şekil 4.61’de verilmiştir. Bu numunenin kaynak dikişinde ölçülen mikro sertlik değerlerinin ortalaması ise 256 HV<sub>0,1</sub>’dir.



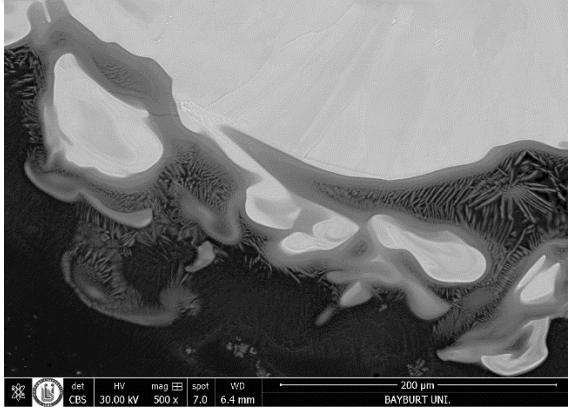
**Şekil 4.61.** 28,5 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin mikro sertlik dağılımları: a) çelik-kaynak dikişi boyunca, b) alüminyum-kaynak dikişi boyunca ve c) kaynak dikişi boyunca dikey ölçüm sonuçları

Yapılan SEM incelemelerinde 2000 W lazer gücünde en düşük ısı girdisi ile birleştirilen bu numunede çatlak oluşumuna rastlanmamıştır (Şekil 4.62). Kaynak dikişinin belirli bölgelerinde alüminyumca zengin intermetalik faz oluşumu görülmüş (Al: %at 61, Fe: %at 36) ancak genel anlamda daha az kırılğan fazların oluştuğu tespit edilmiştir (Şekil 4.62). Yapılan mikro sertlik ölçümleri sonucunda intermetalik fazların olduğu bölgelerde sertlik değerlerinin 400-600 HV<sub>0,1</sub> aralığında olduğu görülmüştür (Şekil 4.63). Bu sertlik değerlerine ve EDX analiz sonuçlarına bağlı olarak FeAl intermetalik fazlarının kaynak dikişi çevresinde oluştuğu tespit edilmiştir. Numune boyunca yapılan ölçümlerde oluşan bu intermetalik fazların kalınlıklarının 10 µm’nin altında olduğu görülmüştür (Şekil 4.63).

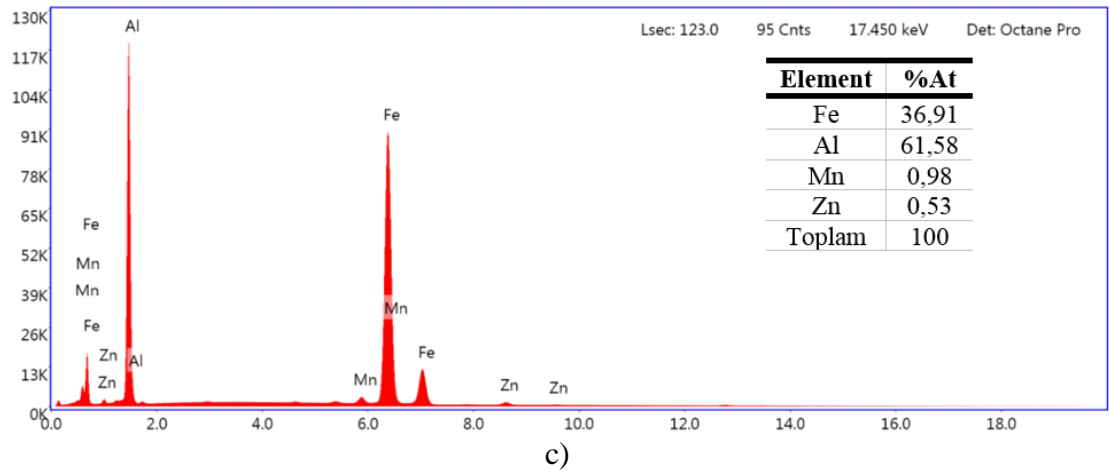
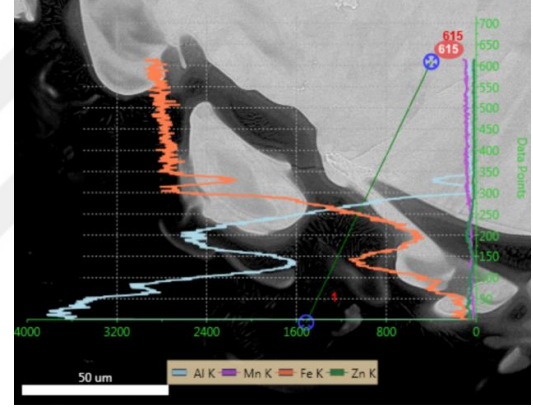




a)

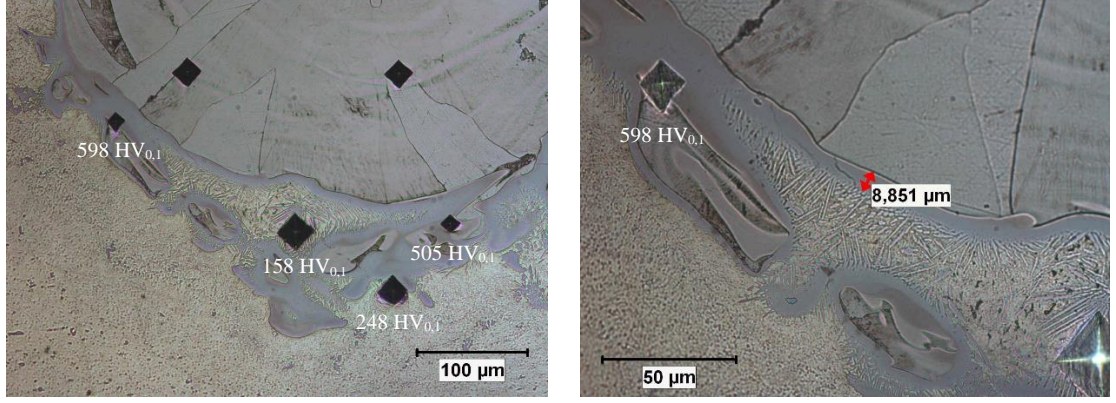


b)



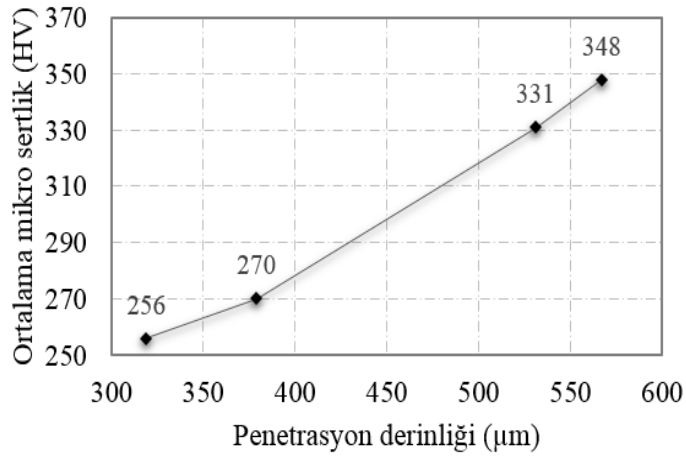
c)

**Şekil 4.62.** 28,5 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin a) SEM görüntüsü, b) EDX tarama bölgesi ve c) EDX analiz sonucu



**Şekil 4.63.** 28,5 J/mm ısı girdisi altında birleştirilmiş numunenin sertlik ölçüm noktaları ve bölgesel intermetalik faz tabaka kalınlığı

2000 W lazer gücünde dört farklı ısı girdisi seviyesinde birleştirilen numunelerin kaynak dikişinin kesitinde optik mikroskop yardımı ile yapılan ölçümlerde artan ısı girdisinin kaynak dikişinin genişliği, penetrasyon derinliği ve genişlik/derinlik oranını arttırdığı görülmüştür. Artan bu oran neticesinde kaynak dikişine dahil olan alüminyum miktarının artması diğer numune gruplarında olduğu gibi bu grupta da kaynak dikişindeki ortalama sertlik değerinin artmasına neden olmuştur (Şekil 4.64). Yine diğer numune gruplarında olduğu gibi artan ısı girdisine bağlı olarak intermetalik faz tabaka kalınlığının arttığı ve alüminyumca zengin tabakaların oluştuğu yapılan SEM-EDX analizlerinde görülmüştür.



**Şekil 4.64.** 2000 W lazer gücünde farklı ısı girdisi seviyelerinde birleştirilen numunenin penetrasyon derinliğine bağlı kaynak dikişindeki ortalama mikro sertlik değerleri

#### 4.3.4.4.Mekanik Dayanımlarının İncelenmesi

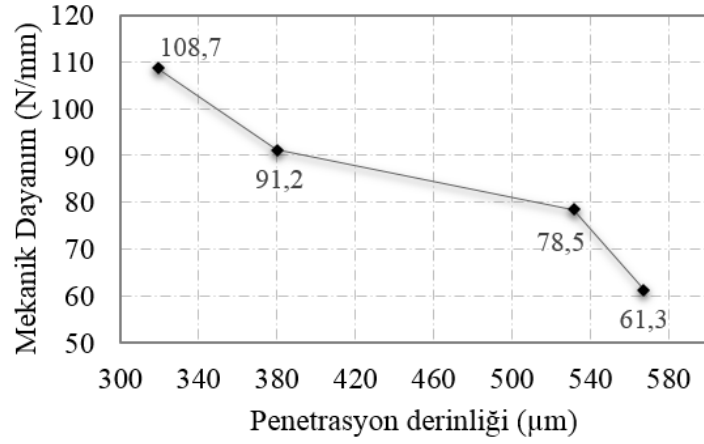
2000 W lazer gücünde, farklı ısı girdisi seviyelerinde birleştirilen lazer kaynaklı alüminyum-çelik malzemelerin çekme testi sonucunda elde edilmiş olan mekanik dayanım değerleri ısı girdisine ve penetrasyon derinliğine bağlı olarak Çizelge 4.8’de verilmiştir. Maksimum mekanik dayanım 108,7 N/mm olarak 29,4 J/mm ısı girdisi ile birleştirilmiş numunede elde edilmiştir. Artan ısı girdisi ile mekanik dayanım düşmüş ve 35,7 J/mm ısı girdisi ile birleştirilen numunede mekanik dayanımın 61,3 N/mm olduğu görülmüştür.

**Çizelge 4.8.** 2000 W lazer gücünde farklı ısı girdisi altında birleştirilen numunelerin penetrasyon derinlikleri, mekanik dayanımları ve kopma türleri

Lazer Gücü (W)	İlerleme Hızı (mm/s)	Isı Girdisi (J/mm)	Penetrasyon Derinliği (µm)	Mekanik Dayanım (N/mm)	Kopma Şekli
2000	70	28,5	319,1	108,7	Ara yüzeyde ayrılma
	65	30,7	379,8	91,2	Ara yüzeyde ayrılma
	60	33,3	531,4	78,5	Ara yüzeyde ayrılma
	55	36,3	567,3	61,3	Çelikte kesilme

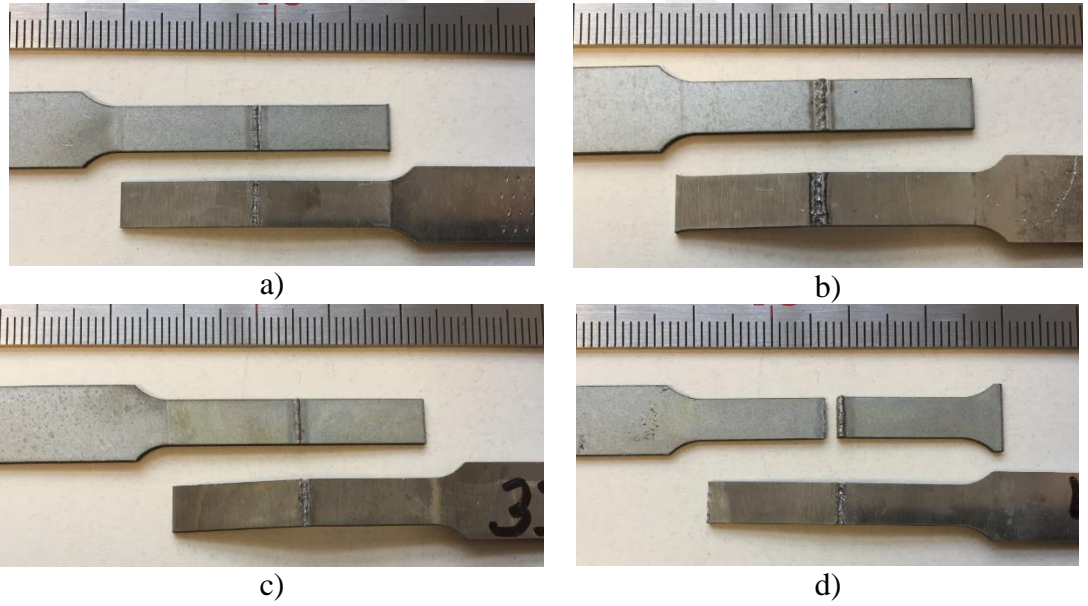
Numunelerin penetrasyon derinliğine bağlı olarak mekanik dayanımları ise Şekil 4.65’te verilmiştir. Isı girdisindeki artışın ergiyik havuzunun boyutunu (genişlik/derinlik oranını) arttırması ile kaynak dikişine dâhil olan alüminyum miktarı artarak kırılma intermetalik fazların kaynak dikişi sınırlarında katılaşmasına neden olmuştur. Bunun sonucu olarak kaynaklı bağlantının mekanik dayanımı düşmüştür. Penetrasyon derinliğindeki ve ısı girdisindeki artışa bağlı olarak numunelerin mekanik dayanımlarının düştüğü Şekil 4.65’te de görülmektedir.





**Şekil 4.64.** 2000 W lazer gücünde farklı ısı girdisi seviyelerinde birleştirilmiş numunelerin penetrasyon derinliklerine göre mekanik dayanımları

Yapılan çekme testleri sonucunda sadece 36,3 J/mm ile birleştirilmiş numunede kopma çelik malzeme ile kaynak dikişi arasında oluşmuştur. Diğer tüm ısı girdisi seviyelerinde hasar, kaynak dikişi ile alüminyum malzeme arasındaki intermetalik fazların kırılması ile ara yüzeyden ayrılma şeklinde gerçekleşmiştir (Şekil 4.65).



**Şekil 4.65.** Çekme testi sonucunda farklı ısı girdisi seviyelerinde gözlenen kopma türleri: a) 28,5 J/mm, b) 30,7 J/mm, c) 33,3 J/mm, d) 36,3 J/mm

## 5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışma kapsamında galvaniz kaplı yüksek mukavemetli çelik DP600 ile AA6082-T6 alüminyum alaşımı boşluksuz olarak bindirme formatında fiber lazer kaynağı ile birleştirilmiştir. Çalışmanın birinci kısmında deneysel tasarım metotlarından Taguchi yöntemi kullanılarak kaynak parametreleri optimize edilmiş ve tekil etkileri belirlenmiştir. İkinci kısımda ise lazer gücü sabit tutularak farklı ilerleme hızlarında kaynaklar gerçekleştirilmiş ve ısı girdisinin bağlantının mekanik ve metalürjik özelliklerine olan etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda kaynak dikişi optik mikroskop yardımı ile incelenmiş, mikro sertlik ölçümleri ve SEM-EDX analizleri ile kaynak dikişinde oluşan intermetalik fazlar tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Alüminyum-yüksek mukavemetli çelik malzeme çiftinin lazer kaynağı ile boşluksuz olarak (zero-gap) bindirme kaynak formatında birleştirilmesinde alüminyumun çelik malzeme üzerine konumlandığı durumlarda kaynak hatalarının çok fazla olduğu ve mekanik dayanımın çok düşük kaldığı görülmüştür. Çelik malzemenin alüminyumun üzerine konumlandırıldığı durumda uygun kaynak parametrelerinin seçimi ile sağlıklı sonuçların alınabileceği görülmüştür.

Boşluksuz olarak bindirme kaynak türünde alüminyum-çelik malzemelerin birleştirilmesinde kaynak fikstürünün prosesin doğruluğu için oldukça önemli olduğu görülmüştür. Birleştirilecek parçalar arasındaki boşluklardan kaynaklı düzensizlikler kaynak prosesini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle birleştirilecek parçaların eşit bir kuvvet ile sıkıştırılması gerektiği görülmüştür.

Alüminyum-yüksek mukavemetli çelik malzeme çiftinin lazer kaynağı ile birleştirilmesinde lazer gücü, ilerleme hızı ve odak mesafesi deneysel tasarım metotlarından Taguchi yöntemi kullanılarak optimize edilmiştir. En yüksek ortalama mekanik dayanım 2800 W lazer gücü, 100 mm/s ilerleme hızı ve 0,2 mm odak mesafesi ile birleştirilen numunede, en düşük ortalama mekanik dayanımın ise 3000 W lazer gücünde 95 mm/s ilerleme hızında ve -0,2 mm odak mesafesinde birleştirilen numunede elde edilmiştir.

Kaynak parametrelerinin ortalama mekanik dayanım üzerindeki tekil etkilerini tespit etmek için uygulanan ANOVA yöntemi sonucunda mekanik dayanım üzerindeki en etkili parametrenin %57,67 oranı ile ilerleme hızı olduğu tespit edilmiştir. İkinci etkili parametrenin ise %30,53 katkı oranı ile lazer gücü olduğu görülmüştür. Odak mesafesinin ise seçilen parametre seviyelerinde etkisinin %5,89'de kaldığı görülmüştür.

Mekanik dayanım üzerinde en etkili iki parametre olan ilerleme hızı ve lazer gücünü bir arada değerlendiren ve kaynak işlemi açısından en önemli parametre olan ısı girdisine bağlı olarak kaynak dikişinin geometrisi, bağlantının mekanik ve metalürjik özellikleri incelenmiştir.

2000 W lazer gücünde 45 mm/s, 2500 W lazer gücünde 60 mm/s ve 3000 W lazer gücünde 70 mm/s ilerleme hızlarında kaynak yapılamadığı, aşırı ısı girdisi nedeni ile parçalarda kesilmelerin olduğu görülmüştür. Bu lazer güç seviyelerinde ilerleme hızının yüksek seçildiği durumlarda da nüfuziyet problemi yaşanmış ve birleşme olmamıştır.

Numunelerin kaynak dikiş yüzeyleri incelendiğinde ısı girdisinin artması ile dikiş genişliğinin arttığı görülmüştür. Artan ısı girdisi ve dolayısı ile artan penetrasyon derinliği neticesinde kaynak dikişinde bazı bölgelerde çökmeler ve sıçrıntı oluşumu gözlenmiştir. En iyi yüzey kalitesi her bir lazer gücü için de en düşük ısı girdisi seviyelerinde elde edilmiştir.

Çalışılan üç farklı lazer güç seviyesinde de artan ısı girdisi ile kaynak dikişinin geometrisinde artış gözlenmiştir. Isı girdisi ile orantılı olarak kaynak dikişinin alüminyum malzemedeki penetrasyon derinliği ve kaynak dikiş genişliği artmıştır. Kaynak dikişinin genişlik/derinlik oranı ısı girdisi ile azalmıştır. 33,3 J/mm ısı girdisi ile yapılan birleştirmelerde en büyük penetrasyon derinliği 2000 W lazer gücü ile birleştirilen numunede 531,4 µm olarak ölçülmüştür. 2500 W lazer gücünde 468,9 µm ölçülürken en düşük penetrasyon derinliği 3000 W lazer gücünde 412,8 µm olarak ölçülmüştür. Bu sonuca göre sabit ısı girdisi seviyesinde en yüksek penetrasyon derinliğinin düşük lazer güç seviyelerinde olduğu görülmektedir.

3000 W lazer gücünde 35,3 J/mm, 33,3 ve 31,5 J/mm ısı girdisi seviyelerinde birleştirilen numunelerin kaynak dikişlerinde çatlak oluşumu görülmüştür. Bu numunelerin mikro sertlik ölçümleri ve EDX analizleri sonucunda alüminyumca zengin kırılğan Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>

intermetalik fazının kalın bir tabaka halinde oluştuğu tespit edilmiştir. 30 J/mm ve 28,5 J/mm ısı girdisi ile birleştirilmiş numunelerin kaynak dikişlerinde, ısı girdisindeki düşüş ve azalan penetrasyon derinliği neticesinde alüminyumca zengin intermetalik fazların oluşmadığı FeAl fazının oluştuğu tespit edilmiştir.

2500 W lazer gücünde 35,7 J/mm, 33,3 J/mm ve 31,2 J/mm ısı girdisi seviyelerinde birleştirilen numunelerin kaynak dikişlerinde çatlak oluşumu gözlenmiştir. Mikro sertlik ölçümleri ve EDX analizlerinde bu numunelerin kaynak dikişlerinde alüminyumca zengin, farklı kalınlıklarda FeAl<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>, FeAl<sub>2</sub> intermetalik fazlarının oluştuğu tespit edilmiştir. Bu lazer gücünde yapılan kaynakla arasında en düşük ısı girdisi seviyesi olan 29,4 J/mm ile birleştirilen numunenin kaynak dikişinin sınırlarında ise düşük ısı girdisi neticesinde daha az kırılğan olan Fe<sub>3</sub>Al ve FeAl intermetalik fazlarının oluştuğu görülmüştür.

2000 W lazer gücünde 36,3 J/mm, 33,3 J/mm ve 30,7 J/mm ısı girdisi seviyelerinde birleştirilmiş numunelerin kaynak dikişlerinde FeAl<sub>3</sub> ve Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> intermetalik fazlarının oluştuğu tespit edilmiştir. 28,5 J/mm ısı girdisi ile birleştirilen numunenin kaynak dikişinin sınırlarında ise FeAl intermetalik fazı tespit edilmiştir.

Isı girdisindeki azalmaya bağlı olarak intermetalik faz tabakasının kalınlığının azaldığı görülmüştür. 2000 W lazer gücünde 36,3 J/mm ısı girdisi ile birleştirilen numunenin kaynak dikişinde bölgesel olarak değişiklik gösteren 50-80 µm aralığında kalınlığa sahip intermetalik faz tabakası tespit edilmiştir. 30,7 J/mm ısı girdisi ile birleştirilen numunede bu kalınlık 10-18 µm'ye, 28,5 J/mm ısı girdisi ile birleştirilen numunede ise 10 µm'nin altına düştüğü görülmüştür.

Artan ısı girdisi nedeni ile kaynak dikişinin alüminyum malzemedeki penetrasyon derinliği artış göstermiştir. Penetrasyon derinliğinin artması ile kaynak dikişine karışan alüminyum miktarı artarak kaynak dikişindeki ortalama sertlik değerinin artmasına neden olmuştur. Artan ısı girdisi ile numunelerin kaynak dikişlerindeki ortalama sertlik değerleri 3000 W lazer gücünde 235 HV<sub>0,1</sub>'den 360 HV<sub>0,1</sub>'e, 2500 W lazer gücünde 263 HV<sub>0,1</sub>'den 337 HV<sub>0,1</sub>'e, 2000 W lazer gücünde ise 256 HV<sub>0,1</sub>'den 348 HV<sub>0,1</sub>'e artış göstermiştir.

Kaynaklı numunelerin mekanik dayanımları incelendiğinde artan ısı girdisi ve dolayısı ile artan penetrasyon derinliği ile düştüğü görülmüştür. En yüksek mekanik dayanım değeri 2000 W lazer gücünde 28,5 J/mm ısı girdisi ve 319,1 µm penetrasyon derinliğine sahip numunede 108,7 N/mm olarak elde edilmiştir. 3000 W lazer gücünde 28,5 J/mm ısı girdisi ve 212 µm penetrasyon derinliğine sahip numunede 104,7 N/mm, 2500 W lazer gücünde 29,4 J/mm ısı girdisi ve 305,2 µm penetrasyon derinliğine sahip numunede 98,8 N/mm mekanik dayanım elde edilmiştir.

Yapılan çekme testleri sonucunda oluşan hasarın ısı girdisi ve penetrasyon derinliği ile ilişkili olduğu görülmüştür. Üç farklı lazer güç seviyesinde de düşük ısı girdisi ile birleştirilmiş numunelerde kırılma kaynak dikişi ile alüminyum malzeme ara yüzeyinde gerçekleşmiştir. Kırılma kaynak dikişi ile alüminyum malzeme ara yüzeyinde oluşan intermetalik faz bölgesinde gerçekleşmiş ve kaynak dikişi çelik malzeme ile birlikte alüminyumdan ayrılmıştır. Yüksek ısı girdisi ile birleştirilmiş numunelerde ise kırılma çelik parçanın sertlik artışı görülen ısı etkisi altında kalan bölgesinde gerçekleşmiştir.

## KAYNAKLAR

**Abe, Y., Mori, K. ve Kato, T. 2012.** Joining of high strength steel and aluminium alloy sheets by mechanical clinching with dies for control of metal flow. *Journal of Materials Processing Technology*, 212, 884–889.

**Acherjee, B. 2018.** Hybrid laser arc welding: State-of-art review. *Optics and Laser Technology* 99, 60–71.

**Amada Miyachi, America, I. 2015.** Laser Welding Fundamentals. [http://www.amadamiyachi.com/servlet/servlet.FileDownload?retURL=/apex/educationaIresources\\_fundamentals&file=01580000001Jz8A](http://www.amadamiyachi.com/servlet/servlet.FileDownload?retURL=/apex/educationaIresources_fundamentals&file=01580000001Jz8A) – (Erişim Tarihi: 02.01.2018).

**Anonim, 2011.** International Council on Clean Transportation Global Passenger Vehicles Program, Global Light-duty Vehicles: *Fuel Economy and Greenhouse Gas Emissions Standards*.

**Anonim, 2013.** U.S. Energy Information Administration, Annual Energy Outlook 2013, Report Number: DOE/EIA-0383(2013) USA.

**Anonim, 2017.**

[https://chem.libretexts.org/Textbook\\_Maps/Introductory\\_Chemistry\\_Textbook\\_Maps/Map%3A\\_Introductory\\_Chemistry\\_\(Tro\)/09%3A\\_Electrons\\_in\\_Atoms\\_and\\_the\\_Periodic\\_Table/9.3%3A\\_The\\_Electromagnetic\\_Spectrum](https://chem.libretexts.org/Textbook_Maps/Introductory_Chemistry_Textbook_Maps/Map%3A_Introductory_Chemistry_(Tro)/09%3A_Electrons_in_Atoms_and_the_Periodic_Table/9.3%3A_The_Electromagnetic_Spectrum) – (Erişim Tarihi: 08.04.2018).

**Anonim, 2018.** Lightweight material split in the automotive industry from 2010-2030. <https://www.statista.com/statistics/619283/light-weight-material-split-automotive/> - (Erişim Tarihi: 23.03.2018).

**Assuncao, E., Quintino, L ve Miranda, R. 2010.** Comparative study of laser welding in tailor blanks for the automotive industry. *Int J Adv Manuf Technol*. 49:123–131 DOI 10.1007/s00170-009-2385-0.

**Atabaki, M. M., Nikodinovski, M., Chenier, P., Ma, J., Harooni, M. ve Kovacevic, R. 2014,** Welding of Aluminum Alloys to Steels: An Overview. *J. Manuf. Sci. Prod.*, 14(2), 59–78.

**Ayre, J. 2017.** Tesla Model 3 Blending Steel & Aluminum — More Details. <https://cleantechnica.com/2017/08/24/tesla-model-3-blending-steel-aluminum-details/> - (Erişim Tarihi: 15.02.2018).

**Birch, S. 2017.** Audi reveals new A8 technologies, tightens links with Porsche. *SAE International Articles*. <https://www.sae.org/news/2017/04/audi-reveals-new-a8-technologies-tightens-links-with-porsche> - (Erişim Tarihi: 16.03.2018).

- Bjelkengren, C. 2008.** The Impact of Mass Decomposition on Assessing the Value of Vehicle Lightweighting, Master of Science in Materials Science and Engineering *Master of Science in Engineering Systems*, Massachusetts Institute of Technology, USA.
- Borrisutthekul, R., Yachi, T., Miyashita, Y., ve Mutoh, Y. 2007.** Suppression of Intermetallic Reaction Layer Formation by Controlling Heat Flow in Dissimilar Joining of Steel and Aluminum Alloy. *Mater. Sci. Eng. A*, 467(1–2), 108–113.
- Bouayad, A., Gerometta, C., Belkebir, A., ve Ambari, A. 2003.** Kinetic Interactions between Solid Iron and Molten Aluminium. *Mater. Sci. Eng. A*, 363(1–2), 53–61.
- Bouche, K., Barbier, F. ve Coulet A. 1998.** Intermetallic compound layer growth between solid iron and molten aluminium. *Mater. Sci. Eng. A*. 249, 167–175.
- Buchfink, G. 2007.** The Laser as a Tool - A light beam conquers industrial production, 1st edition, Vogel Buchverlag, Wuzburg.
- Callister, W.D. 2007.** Material Science and Engineering an Introduction. *John Wiley & Sons Inc.*, USA, 975p.
- Cheah, L., Evans, C., Bandivadekar, A. ve Heywood, J. 2007.** Factor of Two: Halving the Fuel Consumption of New U.S. Automobiles by 2035. *Laboratory for Energy and Environment, Publication No. LFEE 2007-04 RP* Massachusetts Institute of Technology.
- Cheah, L. 2010.** Cars on a Diet: The Material and Energy Impacts of Passenger Vehicle Weight Reduction in the U.S. *Doctor of Philosophy in Engineering Systems*, The Massachusetts Institute Of Technology, USA.
- Chen, W., Ackerson, P. ve Molian, P. 2009.** CO2 laser welding of galvanized steel sheets using vent holes. *Mater. Des.* 30, 245–251. doi:10.1016/j.matdes.2008.05.009.
- Chen, H.C., Pinkerton, A.J., Li, L., Liu, Z. ve Mistry, A.T. 2011.** Gap-free fibre laser welding of Zn-coated steel on Al alloy for light-weight automotive applications. *Mater. Des.* 32, 495–504. doi:10.1016/j.matdes.2010.08.034.
- Chen, S., Huang, J.I. Ma, K., Zhang, H. ve Zhao, X. 2012.** Influence of a Ni-foil interlayer on Fe/Al dissimilar joint by laser penetration welding. *Materials Letters* 79, 296–299.
- Chen, S., Huang, J., Ma, K., Zhao, X. ve Vivek, A. 2014.** Microstructures and mechanical properties of laser penetration welding joint with/without Ni-foil in an overlap steel-on-aluminum configuration. *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.* 45, 3064–3073. doi:10.1007/s11661-014-2241-1.



**Chen, C., Zhao, S., Han, X., Zhao, X. ve Ishida, T. 2017.** Experimental Investigation on the Joining of Aluminum Alloy Sheets Using Improved Clinching Process. *Materials*, 10(8), 887.

**Chen, N., Wang, H.P., Carlson, B., Sigler, D. ve Wang, M. 2017.** Fracture mechanisms of Al/steel resistance spot welds in lap shear test. *Journal of Materials Processing Technology* 243: 347–354.

**Cui, L., Chen, B., Qian, W., He, D. ve Chen, L. 2017.** Microstructures and Mechanical Properties of Dissimilar Al/Steel Butt Joints Produced by Autogenous Laser Keyhole Welding. *Metals* 2017, 7, 492; doi:10.3390/met7110492

**Cui, L., Chen, B., Chen, L. ve He, D. 2018.** Dual beam laser keyhole welding of steel/aluminum lapped joints. *J. Mater. Process. Technol.* 256, 87–97. doi:10.1016/j.jmatprotec.2018.02.016.

**Çavuşoğlu, N. 2011.** DC04 kalite çelik ile 6061-T6 alüminyum alaşımı sacların laser bindirme kaynağında kaynak parametrelerinin kaynaklı birleştirmenin mekanik ve metalürjik özellikleri üzerine etkisi. *Doktora Tezi*. Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

**Çavusoglu, N. ve Özden, H. 2014.** Lazer Bindirme Kaynaklı Çelik - Alüminyum Bağlantılarının Mekanik ve Metalürjik Özellikleri. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, Cilt: 11, No: 1, (31-45).

**Çelen, S. 2006.** Paslanmaz çeliklerin lazer kaynağında kaynak parametrelerinin bağlantının dayanım ve korozyon özelliklerine etkisinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Bölümü, Konstrüksiyon-İmalat Anabilim Dalı.

**Dharmendra, C., Rao, K.P., Wilden, J. ve Reich, S. 2011.** Study on laser welding-brazing of zinc coated steel to aluminum alloy with a zinc based filler. *Mater. Sci. Eng. A*. 528, 1497–1503. doi:10.1016/j.msea.2010.10.050.

**Ding, Y., Shen, Z., ve Gerlich, A. P. 2017.** Refill Friction Stir Spot Welding of Dissimilar Aluminum Alloy and AlSi Coated Steel. *J. Manuf. Process.*, 30, 353–360.

**EAA, 2011.** European Aluminium Association, The Aluminium Automotive Manual 2011, Design with Aluminium - <http://www.alueurope.eu/wpcontent/uploads/2012/03/AAM-Design-2-Design-with-aluminium.pdf> - (Erişim Tarihi: 01.03.2018).

**Fan, J., Thomy, C. ve Vollertsen, F. 2011.** Effect of thermal cycle on the formation of intermetallic compounds in laser welding of aluminum-steel overlap joints. *Phys. Procedia*. 12, 134–141. doi:10.1016/j.phpro.2011.03.017.

- Frank, S. 2015.** Flux-free laser joining of aluminum and galvanized steel, *J. Mater. Process. Technol.* 222, 365–372. doi:10.1016/j.jmatprotec.2015.03.032.
- Gatzen, M., Radel, T., Thomy, C. ve Vollertsen, F. 2014.** The role of zinc layer during wetting of aluminium on zinc-coated steel in laser brazing and welding. *Phys. Procedia.* 56, 730–739. doi:10.1016/j.phpro.2014.08.080.
- Groche, P., Wohletz, S., Brenneis, M., Pabst, C., ve Resch, F. 2014.** Joining by Forming - A Review on Joint Mechanisms, Applications and Future Trends. *J. Mater. Process. Technol.*, 214(10), 1972–1994.
- Howey, D., North. R. ve Martinez-Botas, R. 2010.** Road transport technology and climate change mitigation. *Grantham Institute for Climate Change Briefing Paper No 2.* Imperial College London.
- Huang, J., He, J., Yu, X., Li, C. ve Fan, D. 2017.** The study of mechanical strength for fusion-brazed butt joint between aluminum alloy and galvanized steel by arc-assisted laser welding, *J. Manuf. Process.* 25, 126–133. doi:10.1016/j.jmapro.2016.11.014.
- Huetter, J. 2015.** Audi: Aluminum helped cut 716.5 pounds out of 2017 Q7 on sale soon. <http://www.repairerdrivennews.com/2015/12/28/audi-aluminum-helped-cut-716-5-pounds-out-of-2017-q7-on-sale-soon/>- (Erişim Tarihi: 20.03.2018).
- Hussein, S.A., Tahir, A.S. ve Hadzley, A.B. 2015.** Characteristics of aluminum-to-steel joint made by friction stirwelding: A review. *Materials Today Communications* 5: 32–49.
- Kannatey-Asibu, E. 2009.** Principles of laser materials processing. *A John Wiley & Sons, Inc.*, Publication.
- Karaaslan, A. 2009.** Laser İle Malzeme İşlemleri, *Literatür Yayınları*, 580, İstanbul.
- Katayama, S. 2004.** Laser Welding of Aluminium Alloys and Dissimilar Metals. *Weld. Int.*, 18(8), 618–625.
- Kellens, K., Rodrigues, G.C., Dewulf, W. ve Duflou, J. 2014.** Energy and Resource Efficiency of Laser Cutting Processes. *Physics Procedia* 56: 854 – 864.
- King, J. 2007.** The King Review of low-carbon cars - Part I: the potential for CO2 reduction, London
- Kügler, H. ve Vollertsen, F. 2013.** Inductive preheating in laser beam welding of multimaterial joints of 22MnB5 and AA6016, *Phys. Procedia.* 41, 41–48. doi:10.1016/j.phpro.2013.03.050.

- Kouadri-David, A. 2014.** Study of metallurgic and mechanical properties of laser welded heterogeneous joints between DP600 galvanised steel and aluminium 6082, *Mater. Des.* 54, 184–195. doi:10.1016/j.matdes.2013.07.093.
- Lee, K.J., Kumai, S. ve Arai, T. 2005.** Interfacial Microstructure and Strength of Steel to Aluminum Alloy Lap Joints Welded by a Defocused Laser Beam. *Mater. Trans.* 46, 1847–1856. doi:10.2320/matertrans.46.1847.
- Li, L., Xia, H., Tan, C. ve Ma, N. 2018.** Effect of groove shape on laser welding-brazing Al to steel, *Journal of Materials and Process Technology*, 252, 573–581. doi:10.1016/j.jmatprotec.2017.10.025.
- Liu, Q., Lin, Y., Zong, S. ve Sun, G. 2013.** Lightweight design of carbon twill weave fabric composite body structure for electric vehicle. *Composite Structures* 97, 231–238.
- Liu, X., Lan, S., ve Ni, J. 2015a.** Experimental Investigation on Joining Dissimilar Aluminum Alloy 6061 to TRIP 780/800 Steel Through Friction Stir Welding. *J. Eng. Mater. Technol.*, 137(4), 41001.
- Liu, J., Jiang, S., Shi, Y., Kuang, Y., Huang, G. ve Zhang, H., 2015b.** Laser Fusion-Brazing of Aluminum Alloy to Galvanized Steel with Pure Al Filler Powder. *Opt. Laser Technol.*, 66, 1–8.
- Lou, M., Li, Y., Wang, Y., Wang, B., ve Lai, X. 2014.** Influence of Resistance Heating on Self-Piercing Riveted Dissimilar Joints of AA6061-T6 and Galvanized DP590. *J. Mater. Process. Technol.*, 214(10), 2119–2126.
- Lutsey, N. 2010.** Review of technical literature and trends related to automobile mass reduction technology. *Institute of Transportation Studies UCD-ITS-RR-10-10*, University of California.
- Ma, J., Kong, F., Carlson, B. ve Kovacevic, R. 2012.** Mitigating Zinc Vapor Induced Weld Defects in Laser Welding of Galvanized High-Strength Steel by Using Different Supplementary Means. *In Welding Processes* (117–138). <https://doi.org/10.5772/53562>.
- Ma, J., Harooni, M., Carlson, B. ve Kovacevic, R. 2014.** Dissimilar joining of galvanized high-strength steel to aluminum alloy in a zero-gap lap joint configuration by two-pass laser welding, *Mater. Des.* 58, 390–401. doi:10.1016/j.matdes.2014.01.046.
- Martinsen, K., Hu, S.J. ve Carlson, B.E. 2015.** Joining of dissimilar materials. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 64, 679–699.
- Mathieu, A., Shabadi, R., Deschamps, A., Suery, M., Mattei, S., Grevey, D. ve Cicala, E. 2007.** Dissimilar material joining using laser (aluminum to steel using zinc-based filler wire), *Opt. Laser Technol.* 39, 652–661. doi:10.1016/j.optlastec.2005.08.014.

**Meco, S., Pardal, G., Ganguly, S., Miranda, R.M., Quintino, L. ve Williams, S. 2013.** Overlap conduction laser welding of aluminium to steel. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 67, 647–654. doi:10.1007/s00170-012-4512-6.

**Meco, S., Pardal, G., Ganguly S., Williams, S. ve McPherson, N. 2015.** Application of laser in seam welding of dissimilar steel to aluminium joints for thick structural components. *Opt. Lasers Eng.* 67, 22–30. doi:10.1016/j.optlaseng.2014.10.006.

**Meco, S., Cozzolino, L., Ganguly, S., Williams, S. ve McPherson, N. 2017.** Laser welding of steel to aluminium: Thermal modelling and joint strength analysis. *J. Mater. Process. Technol.* 247, 121–133. doi:10.1016/j.jmatprotec.2017.04.002.

**Meschut, G., Janzen, V., ve Olfermann, T. 2014a.** Innovative and Highly Productive Joining Technologies for Multi-Material Lightweight Car Body Structures. *J. Mater. Eng. Perform.*, 23(5),1515–1523.

**Meschut, G., Hahn, O., Janzen, V., ve Olfermann, T. 2014b.** Innovative Joining Technologies for Multi-Material Structures. *Weld. World*, 58(1), pp. 65–75.

**Mori, K. I., Bay, N., Fratini, L., Micari, F., ve Tekkaya, A. E. 2013.** Joining by Plastic Deformation. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, 62(2), 673–694.

**Okunkova, A., Volosova, M., Peretyagin, P. ve Vladimirov, Y. 2014.** Experimental approbation of selective laser melting of powders by the use of non-Gaussian power density distributions. *Physics Procedia*, 56, 48–57.

**Overton, G., Nogee, A., Belforte, D. ve Holton, C. 2017.** Annual Laser Market Review & Forecast: Where have all the lasers gone?. <https://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-53/issue-01/features/annual-laser-market-review-forecast-where-have-all-the-lasers-gone.html> – (Erişim Tarihi: 14.03.2018)

**Ozaki, H. ve Kutsuna, M. 2012.** Dissimilar Metal Joining of Zinc Coated Steel and Aluminum Alloy by Laser Roll Welding. *Weld. Process.* Ch 2, p. 35.

**Özdemir, U. 2012.** Lazer kaynaklı alüminyum alaşım bağlantıların kırılma mekaniği ve mukavemet açısından incelenmesi. *Doktora Tezi.* Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

**Pardal, G. 2016.** Joining of steel to aluminium and stainless steel to titanium for engineering applications. *PhD Thesis*, School of Aerospace, Transport and Manufacturing Welding Engineering and Laser Processing Centre, Cranfield Universtiy.

- Peyre, P., Sierra, G., Deschaux-Beaume, F., Stuart, D. ve Fras, G. 2007.** Generation of aluminium-steel joints with laser-induced reactive wetting. *Mater. Sci. Eng. A.* 444, 327–338. doi:10.1016/j.msea.2006.09.111.
- Piccini, J. M. ve Svoboda, H. G. 2015.** Effect of Pin Length on Friction Stir Spot Welding (FSSW) of Dissimilar Aluminum-Steel Joints. *Procedia Mater. Sci.*, 9, 504–513.
- Piccini, J. M. ve Svoboda, H. G. 2017.** Tool Geometry Optimization in Friction Stir Spot Welding of Al-Steel Joints. *J. Manuf. Process.*, 26, 142–154.
- Pourali, M., Abdollah-zadeh, A., Saeid, T. ve Kargar, F. 2017.** Influence of Welding Parameters on Intermetallic Compounds Formation in Dissimilar Steel/aluminum Friction Stir Welds. *J. Alloys Compd.*, 715, 1–8.
- Prakash, S. ve Kumar, S. 2017.** Experimental and theoretical analysis of defocused CO2 laser microchanneling on PMMA for enhanced surface finish. *J. Micromech. Microeng.* 27, 025003,
- Qiu, R., Shi, H., Zhang, K., Tu, Y., Iwamoto, C. ve Satonaka, S. 2010.** Interfacial Characterization of Joint between Mild Steel and Aluminum Alloy Welded by Resistance Spot Welding. *Materials Characterization*, 61:684–688.
- Qin, G., Lei, Z., Su, Y., Fu, B., Meng, X. ve Lin, S. 2014a.** Large spot laser assisted GMA brazing-fusion welding of aluminum alloy to galvanized steel. *J. Mater. Process. Technol.* 214, 2684–2692. doi:10.1016/j.jmatprotec.2014.06.011.
- Qin, G., Su, Y.H. ve Wang, S.J. 2014b.** Microstructures and properties of welded joint of aluminum alloy to galvanized steel by Nd:YAG laser + MIG arc hybrid brazing-fusion welding. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China.* 24:4, 989-995. doi:10.1016/S1003-6326(14)63153-8.
- Reisgen, U. ve Geffers, C. 2014.** Joining Challenges in Automotive Lightweight Applications. *AMAP Kolloquium*, Aachen, 1–46.
- Schimek, M. Springer, A., Kaierle, S., Kracht, D. ve Wesling, V. 2012.** Laser-welded Dissimilar Steel-aluminum Seams for Automotive Lightweight Construction, *Phys. Procedia.* 39, 43–50. doi:10.1016/j.phpro.2012.10.012.
- Schubert, E., Klassen, M., Zerner, I., Walz, C. ve Sepold, G. 2001.** Light-Weight Structures Produced by Laser Beam Joining for Future Applications in Automobile and Aerospace Industry. *J. Mater. Process. Technol.*, 115(1), 2–8.
- Shahverdi, H. R., Ghomashchi, M. R., Shabestari, S. ve Hejazi, J. 2002.** Microstructural Analysis of Interfacial Reaction between Molten Aluminium and Solid Iron. *J. Mater. Process. Technol.*, 124(3), 345–352.

- Shiner, B. 2012.** High-power fiber lasers gain market share. Industrial laser solutions for manufacturing. <http://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-21/issue-2/features/high-power-fiber-lasers-gain-market-share.html> – (Erişim Tarihi: 14.03.2018)
- Seffer, O., Pfeifer, R., Springer, A. ve Kaielerle, S. 2016.** Investigations on laser beam welding of different dissimilar joints of steel and aluminum alloys for automotive lightweight construction. *Physics Procedia*, 83:383-395.
- Sierra, G., Peyre, P., Deschaux-Beaume, F., Stuart, D. ve Fras, G. 2007.** Steel to aluminium key-hole laser welding, *Mater. Sci. Eng. A.* 447, 197–208. doi:10.1016/j.msea.2006.10.106.
- Sierra, G., Peyre, P., Deschaux Beaume, F., Stuart, D. ve Fras, G. 2008.** Galvanised steel to aluminium joining by laser and GTAW processes. *Mater. Charact.* 59, 1705-1715 doi:10.1016/j.matchar.2008.03.016.
- Soydan, F. 2015.** Laser kesim parametrelerinin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi. *Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Steen, W. ve Mazumder, J. 2010.** Laser Material Processing. Fourth Edition, *Springer*, London.
- Thomy, F. ve Moller, C. 2013.** Laser welding and brazing of dissimilar materials - Chap 9, in: *Handbook of Laser Welding Technologies*. 255–279.
- Torkamany, M.J., Tahamtan, S. ve Sabbaghzadeh, J. 2010.** Dissimilar welding of carbon steel to 5754 aluminum alloy by Nd:YAG pulsed laser. *Mater. Des.* 31, 458–465. doi:10.1016/j.matdes.2009.05.046.
- Uchihara, M. 2011.** Joining Technologies for Automotive Steel Sheets. *Welding International* 25(4): 249–59.
- U.S. Department of Energy. 2016.** Lightweight Materials 2016 Annual Report. [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/11/f46/FY\\_2016\\_Lightweight\\_APR.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/11/f46/FY_2016_Lightweight_APR.pdf) - (Erişim Tarihi: 01.02.2018).
- Vasilash, G.S. 2015.** Steel: Where It Is & Where It Is Going. <https://www.adandp.media/articles/steel-where-it-is-where-it-is-going> - (Erişim Tarihi: 20.03.2018).
- Wang, D., Wang, H., Cui, H. ve He, G. 2016.** Enhancement of the laser welded AA6061-carbon steel joints by using Al5Si intermediate layer. *Journal of Materials Processing Technology* 237, 277–285.
- Wang, C., Cui, L., Mi, G., Jiang, P., Shao, X. ve Rong, Y. 2017.** The influence of heat input on microstructure and mechanical properties for dissimilar welding of galvanized

steel to 6061 aluminum alloy in a zero-gap lap joint configuration. *J. Alloys Compd.* 726, 556–566. doi:10.1016/j.jallcom.2017.08.015.

**Yan, S., Hong, Z., Watanabe, T. ve Jingguo, T. 2010.** CW/PW dual-beam YAG laser welding of steel/aluminum alloy sheets, *Opt. Lasers Eng.* 48, 732–736. doi:10.1016/j.optlaseng.2010.03.015.

**Yang, J., Li, Y. ve Zhang, H. 2016.** Microstructure and mechanical properties of pulsed laser welded Al/steel dissimilar joint. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 26:994–1002.

**Zhang, W.H., Qiu, X.M., Sun, D.Q. ve Han, L.J. 2011.** Effects of Resistance Spot Welding Parameters on Microstructures and Mechanical Properties of Dissimilar Material Joints of Galvanised High Strength Steel and Aluminium Alloy. *Science and Technology of Welding and Joining*, 16:153–161.

**Zhou, D.W., Liu, J.S., Lu, Y.Z. ve Xu, S.H. 2017a.** Effect of adding powder on joint properties of laser penetration welding for dual phase steel and aluminum alloy. *Opt. Laser Technol.* 94, 171–179. doi:10.1016/j.optlastec.2017.03.025.

**Zhou, D., Xu, S., Zhang, L., Peng, Y. ve Liu, J. 2017b.** Microstructure, mechanical properties, and electronic simulations of steel/aluminum alloy joint during deep penetration laser welding. *Int J Adv Manuf Technol*, 89:377–387.

## ÖZGEÇMİŞ

**Adı Soyadı:** Celalettin YÜCE

**Doğum Yeri ve Tarihi:** Bursa / 1987

**Yabancı Dili:** İngilizce

### **Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)**

**Lise:** Bursa Gazi Anadolu Lisesi, 2005

**Lisans:** Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 2009

**Yüksek Lisans:** Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, 2013

### **Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl:**

Bodo-Bode Doğrusan Otomotiv, Proje Geliştirme Mühendisi, 2011

Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Araştırma Görevlisi, 2011-...

**İletişim (e-posta):** cyuce@uludag.edu.tr

### **Yayınları:**

---

#### **YAYINLAR (SCI & SCI-Exp)**

- Yuce, C.,** Karpat, F., Yavuz, N., Sendeniz, G. (2014). A Case Study: Designing for Sustainability and Reliability in an Automotive Seat Structure. *Sustainability*, 6(7):4608-4631. doi:10.3390/su6074608.
- Tutar, M., Aydin, H., **Yuce, C.,** Yavuz, N., Bayram, A. (2014). The optimisation of process parameters for friction stir spot-welded AA3003-H12 aluminium alloy using a Taguchi orthogonal array. *Materials and Design*, 63;789-797. doi:10.1016/j.matdes.2014.07.003.
- Aydin, H., Tuncel, O., **Yuce, C.,** Tutar, M., Yavuz, N., Bayram, A. (2014). Effect of Rotational Speed and Dwell Time on Mechanical Properties of Dissimilar AA1050-AA3105 Friction Stir Spot Welded Joints. *Materials Testing*, 56(10):818-825. doi: 10.3139/120.110636.
- Dogan, O., Karpat, F., **Yuce, C.,** Kaya, N., Yavuz, N., Sen, H. (2016). A Novel Design Procedure for Tractor Clutch Fingers by Using Optimization and Response Surface Methods. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30(6):2615-2625. doi: 10.1007/s12206-016-0522-x.
- Yuce, C.,** Tutar, M., Karpat, F., Yavuz, N. (2016). The Optimization of Process Parameters and Microstructural Characterization of Fiber Laser Welded Dissimilar HSLA and MART Steel Joints. *Metals*, 6,245:1-17. doi:10.3390/met6100245.
- Yuce, 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 Aluminum Alloys. *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, 63(9):510-518. doi:10.5545/sv-jme.2017.4442
7. Karpat, F., Dogan, O., **Yuçe, C.**, Ekwaro-Osire, S. (2017). An Improved Numerical Method for the Mesh Stiffness Calculation of Spur Gears with Asymmetric Teeth on Dynamic Load Analysis. *Advances in Mechanical Engineering*, 9(8):1-12. doi: 10.1177/1687814017721856.
  8. Karpat, F., **Yuçe, C.**, Dogan, O., Genc, M.O., Kaya, N. (2017). Design and Development of Tractor Clutch Using Combined Field and Bench Tests. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 42(2):136-146. doi: 10.1139/tcsme-2017-0032.

### YAYINLAR (DİĞER İNDEKS)

9. **Yuçe, C.**, Karpat, F., Yavuz, N., Dogan, O. (2015). A Review on advanced joining techniques of multi material part manufacturing for automotive industry. *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, Volume- 3, Issue-5, pp. 63-68.
10. Tufekci, M., Karpat, F., **Yuçe, C.** Dogan, O., Yılmaz, T.G., Kaya, N. (2015). Design Optimization of Aluminum Hinge Parts For Lightweight Vehicles: Performance, Durability and Manufacturability. *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, Volume- 3, Issue-12, pp. 11-18.
11. Kaynaklı, O., **Yuçe, C.**, Dogan, O., Kaynaklı, Z. (2015). A study on determination of optimum thermal insulation thickness using life cycle cost analysis. *International Journal of Advances in Mechanical and Civil Engineering*, Volume- 2, Issue-6, pp. 1-5.
12. Karpat, F., Dogan, O., **Yuçe, C.** Genc, M.O. (2017). Design Verification of Tractor Clutch Cover under High Centrifugal Effect. *International Journal of Automotive Science and Technology*, Vol:1, No:1, pp:29-33.
13. **Yuçe, C.**, Karpat, F., Yavuz, N., Tekin, G., Capar, N. (2017). The Optimization of Process Parameters for Laser Welded Galvanized Automobile Steel Sheets Using A Taguchi Method. *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, Volume- 5, Issue-9, ISSN: 2320-2092.
14. Karpat, F., Dogan, O., **Yuçe, C.** (2017). Shape Optimization of an Overdesigned Chain Link by using Design of Experiment and Graphical Optimization. *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, Volume- 5, Issue-10, ISSN: 2320-2092.

### BİLİMSEL TOPLANTILAR

1. **Yuçe, C.**, Karpat, F., Yavuz, N., Kaynaklı, Ö., Dolaylar, E., Şendeniz, G., Prototyping a Lightweight Passenger Seat, ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, IMECE2013-64381, Volume 13: Transportation Systems, V013T14A034. November 15, 2013, San Diego/USA (doi: 10.1115/IMECE2013-64381).

2. Karpat, F., Ekwaro-Osire, S., **Yuce, C.**, Karpat, E., A Virtual Tool for Wear Simulation of Plastic Gear Pairs, ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, IMECE2013-65254, Volume 9: Mechanics of Solids, Structures and Fluids, V009T10A108.November 15, 2013, San Diego/USA (doi: 10.1115/IMECE2013-65254).
3. Karpat, F., Dogan, O., **Yuce, C.**, Kaya, N., Cengiz, N., The Investigation of Stress Distribution on the Tractor Clutch Finger Mechanism by Using Finite Element Method, ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, IMECE2014-39230, Volume 9: Mechanics of Solids, Structures and Fluids, V009T12A011.November 14, 2014, Montreal/Canada (doi: 10.1115/IMECE2014-39230).
4. Karpat, F., Dogan, O., Ekwaro-Osire, S., **Yuce, C.**, A Novel Method for Calculation Gear Tooth Stiffness for Dynamic Analysis of Spur Gears With Asymmetric Teeth, ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, IMECE2014-39402, Volume 4A: Dynamics, Vibration, and Control, V04AT04A058.November 14, 2014, Montreal/Canada (doi: 10.1115/IMECE2014-39402).
5. Karpat, F., Engin, B., Dogan, O., **Yuce, C.**, Yılmaz, T.G., Effect of Rim Thickness on Tooth Root Stress and Mesh Stiffness of Internal Gears, ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, IMECE2014-39181, Volume 11: Systems, Design, and Complexity, V011T14A004.November 14, 2014, Montreal/Canada (doi: 10.1115/IMECE2014-39181).
6. Tutar M., Aydın H., **Yuce C.**, Tunçel O., Yavuz N., Bayram A., Influence of Welding Parameters on Mechanical Properties And Microstructure of Friction Stir Spot Welded AA5754 Aluminium Alloys, International Materials Symposium (IMSP 2014), 15-17 October 2014, Denizli/Turkey.
7. Karpat, F., Osire, S.E., Yılmaz, T.G., Doğan, O., **Yuce, C.**, Design and Analysis of Internal Gears With Different Rim Thickness and Shapes, ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, IMECE2015-52211, Volume 9: Mechanics of Solids, Structures and Fluids, V009T12A017.November 13, 2015, Houston/USA. (doi: 10.1115/IMECE2015-52211).
8. Dogan, O., Karpat, F., Kaya, N., **Yuce, C.**, Genc, M.O., Yavuz, N., Optimum Design of Tractor Clutch PTO Finger by Using Topology and Shape Optimization, ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, IMECE2015-52008, Volume 9: Mechanics of Solids, Structures and Fluids, V009T12A016.November 13, 2015, Houston/USA. (doi: 10.1115/IMECE2015-52008).
9. **Yuce, C.**, Karpat, F., Yavuz, N., Tekin, G., Capar, N., Effect of Fiber Laser Welding Parameters on the Penetration Depth and Weld Bead Geometry, International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC2016), 26-28 October 2016, Adana/Turkey.

10. **Yuce, C.**, Karpat, F., Yılmaz, T.G., Yavuz, N., Prototype Conveyor Line Monitoring System, ISERD -218th International Conference on Recent Innovations in Engineering and Technology (ICRIET) Florence, Italy 21st-22nd July, 2017.
11. Yılmaz, T.G., Dogan, O., **Yuce, C.**, Karpat, F., Improvement of Loading Capacity of Internal Spur Gear with Using Asymmetric Trochoid Profile, Proceedings of the ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition IMECE2017 November 3-9, 2017, Tampa, Florida/USA.
12. **Yuce, C.**, Körüstan, C., Yavuz, N., Farkli Malzemelerin Lazer Kesiminde İşlem Parametrelerinin Etkilerinin İncelenmesi, 9th International Automotive Technologies Congress (OTEKON 2018), 7-8 May 2018, BURSA.
13. **Yuce, C.**, Dogan, O., Bekar, S.S., Karpat, F., Yavuz, N., Konveyör Hatlarına Özgü Bir İyileştirme Ve Bakım Modelinin Geliştirilmesi, 9th International Automotive Technologies Congress (OTEKON 2018), 7-8 May 2018, BURSA.