ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYA TAŞIYICILARINDA KULLANILAN AL6063 MALZEMESİNİN LAZER KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİ, MEKANİK VE MİKROYAPI ÖZELLİKLERİNİN TAGUCHI METHODUYLA OPTİMİZE EDİLMESİ

Eda BIÇKICI DEMİR

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYA TAŞIYICILARINDA KULLANILAN AL6063 MALZEMESİNİN LAZER KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİ, MEKANİK VE MİKROYAPI ÖZELLİKLERİNİN TAGUCHI METHODUYLA OPTİMİZE EDİLMESİ

Eda BIÇKICI DEMİR

Prof. Dr. Hande GÜLER ÖZGÜL
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2023
Her Hakkı Saklıdır
TEZ ONAYI

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYA TAŞIYICILARINDA KULLANILAN AL6063 MALZEMESİNİN LAZER KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİ, MEKANİK VE MİKROYAPI ÖZELLİKLERİNİN TAGUCHI METHODUYLA OPTİMİZE EDİLMESİ

Eda BIÇKICI DEMİR

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hande GÜLER ÖZGÜL

Günümüzde alüminyum alaşımlarının kullanım alanı/oranı teknolojinin gelişimine paralel olarak artmaktadır. Alüminyum alaşımları birçok sektörde olduğu gibi otomotiv sektöründe de yeri doldurulamaz bir bileşen haline gelmiştir. Şekil verme kolaylığı, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, güçlü termal ve elektrik iletkenliği özellikleri ile hemen hemen her sektörde tercih sebebi olmuştur.
Alüminyum, şekillendirme açısından elverişli bir metal olduğundan bu kapsamda birçok yöntem uygulanmaktadır. Bu yöntemlerden bir tanesi olan ekstrüzyon yöntemi ise; geniş ürün yelpazesinin bulunması, kesit/boy oranının düşük olduğu alanlarda, düz ve karmaşık parçaların üretilebilirliğine izin vermesi yönünden oldukça avantajlı bir yöntemdir.

Bu çalışmada farklı kalınlıklara sahip Al6063 alaşımının lazer kaynak sonrası mikro sertlik değerleri, mekanik özellikleri, porozite durumları ve penetrasyon incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Lazer kaynak uygulamasında; güç (power), büyüklük (amplitude), frekans (frequency) ve hız (speed) parametreleri üzerinde durulmuştur. Bu 4 ana parametreyi değiştirerek mekanik özelliklerin yorumlanmasında büyük rol oyn ayan çekme gerilmesi sonuçları karşılaştırılmıştır. Taguchi methoduyla bu ana parametrelerin mekanik özellikler üzerine etkileri yüzdesel olarak incelenmiştir.

Bu çalışma sonucunda kaynaklı numuneler üzerinde gerçekleştirilen çekme test sonuçlarına paralel olarak kaynak sonrası mekanik özelliklerde düşüş gözlemlenmiştir.
Her iki farklı kalınlığa ait Taguchi methodu çözdürüldüğünde mekanik özelliklere etkinin en yoğun olduğu parametrelerin frekans ve hız olduğu saptanmıştır. Bulunan ideal proses parametreleri ile lazer kaynağı uygulandığında sonuçların optimum seviyede çıkacağı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum ekstrüzyon, Elektrikli araçlarda batarya kutusu, Lazer Kaynağı, Taguchi methodu, Mekanik özellikler, Mikro yapı

2023, ix + 76 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

COMBINING AL6063 USED IN ELECTRIC VEHICLE BATTERY CARRIERS WITH LASER WELDING, OPTIMIZING THE MECHANICAL AND MICROSTRUCTURAL PROPERTIES BY TAGUCHI METHODS

Eda BIÇKICI DEMİR

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

Supervisor: Prof. Dr. Hande GÜLER ÖZGÜL

Nowadays, the usage area/ratio of use of aluminum alloys is increasing in parallel with the development of technology. Aluminum alloys have become an irreplaceable component in the automotive sector as well as in many sectors. Its ease of forming, high strength-to-weight ratio, and strong thermal and electrical conductivity properties have been preferred in almost every sector.
Since aluminum is a metal suitable for forming, many methods are applied in this context. One of these methods is the extrusion method; The availability of a wide range of products is advantageous in that it allows the manufacturability of flat and complex parts in areas where the cross-section/aspect ratio is low.

In this study, post-laser welding microhardness values, mechanical properties, porosity states, and penetration examinations of Al6063 alloy with different thicknesses were performed. In laser welding applications; power, amplitude, frequency, and speed parameters. By changing these 4 main parameters, the tensile stress results are compared, which play a major role in the interpretation of mechanical properties. With the Taguchi method, the effects of these main parameters on mechanical properties were examined as a percentage.

As a result of this study, in parallel with the tensile test results performed on welded samples, a decrease in mechanical properties after welding was observed. When the Taguchi method of both different thicknesses was solved, it was determined that the parameters with the most intense effect on mechanical properties were frequency and speed. With the ideal process parameters found, it was determined that the results would be optimum when the laser source was applied.

Key words: Aluminum extrusion, Battery carrier in electric vehicles, Lazer welding, Taguchi method, Mechanical properties, Microstructure

2023, ix + 76 pages.

ÖNSÖZ VE/VEYA TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince rehberliği, teşviki, kıymetli görüşleri ve destekleri için değerli hocam Prof. Dr. Hande GÜLER ÖZGÜL'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez süresince deneysel ve sayısal çalışmalarıma imkân veren başta Yeşilova Holding Yönetimine daha sonra da değerli katkılarından dolayı Ar-Ge ekibindeki kıymetli çalışma arkadaşlarıma, tecrübeleri ve bilgisinden faydalandığım Doc. Dr. Celalettin Yüce'ye bana ve çalışmamdaki katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım. Ek olarak deneysel çalışmalarımdaki katkısı sebebiyle Fraunhofer-Gesellschaft' e de ayrıca teşekkür ederim.

Son olarak bu çalışmayı bugünlere gelmemde büyük emeği olan, maddi ve manevi her daim yanımda olan canım Annem'e ve biricik eşime adıyorum.

Eda BIÇKICI DEMİR
26/05/2023

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET i
ABSTRACT ii
ÖNSÖZ VE/VEYA TEŞEKKÜR iii
İÇİNDEKİLER iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ vi
ŞEKİLLER DİZİNİ vii
ÇİZELGELER DİZİNİ ix
1.GİRİŞ 1
1.1.Alüminyum Ekstrüzyon 4
1.2.Alüminyumun Otomotivdeki Kullanım Alanları 7
1.3.Alüminyum Alaşımlarının Kaynak Yapılabilirliği: 11
1.3.1.Alüminyumun lazer kaynaktaki kusurları 15
1.3.2. Katılaşma (sıcak çatlama): 15
2.KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI 31
3.MATERYAL ve YÖNTEM 38
3.1.Lazer Kaynağı Parametre Özellikleri 39
3.2.Mekanik Testlerin Yapılışı 40
3.2.1. Çekme testinin yapılışı 40
3.2.2. Mikro sertlik testinin yapılışı 42
3.2.3. Makro yapı analizlerinin yapılışı 43
3.2.4. Mikroyapı (tane yapısı) analizlerinin yapılışı 44
3.3. Kaynak Parametreleri ile Taguchi Optimizasyonunun Tasarlanması 44
3.3.1. Taguchi yöntemi 44
4.BULGULAR 49
4.1. 3mm Ana Metal ve Lazer Kaynaklı Numunelerin Çekme Testi Sonuçları 49
4.2. 5mm Ana Metal ve Lazer Kaynaklı Numunelerin Çekme Testi Sonuçlar 50
4.3. 3 mm Lazer Kaynak Makro Yapı Sonuçları 51
4.3.1. T1 numaralı metalin penetrasyon analizi 51
4.3.2. T2 numaralı metalin penetrasyon analizi 52
4.3.3. T3 numaralı metalin penetrasyon analizi 52
4.3.4. T4 numaralı metalin penetrasyon analizi 53
4.3.5. T5 numaralı metalin penetrasyon analizi 53
4.3.6. T6 numaralı metalin penetrasyon analizi 54
4.3.7. T7 numaralı metalin penetrasyon analizi 54
4.3.8. T8 numaralı metalin penetrasyon analizi 55
4.3.9. T9 numaralı metalin penetrasyon analizi 55
4.4. 5 mm Lazer Kaynak Makro Yapı Sonuçları 56
4.4.1. T11 numaralı metalin penetrasyon analizi 57
4.4.2. T12 numaralı metalin penetrasyon analizi 58

4.4.3. T13 numaralı metalin penetrasyon analizi 59
4.4.4. T14 numaralı metalin penetrasyon analizi 59
4.4.5. T15 numaralı metalin penetrasyon analizi 60
4.4.6. T16 numaralı metalin penetrasyon analizi 60
4.4.7. T17 numaralı metalin penetrasyon analizi 61
4.4.8. T18 numaralı metalin penetrasyon analizi 61
4.4.9. T19 numaralı metalin penetrasyon analizi 62
4.5. Lazer Kaynaklı Numunelerin Mikroyapı Analizi 63
4.6. 3 mm Mikro Sertlik Sonuçları 64
4.7. 5 mm Mikro Sertlik Sonuçları 66
4.8. 3 mm Taguchi Sonuçları 67
4.9. 5 mm Taguchi Sonuçları 70
5. TARTIŞMA ve SONUÇ 72
KAYNAKLAR 74
ÖZGEÇMİŞ 76

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
Al	Alüminyum
Ar	Argon
Cr	Krom
Cu	Bakır
Fe	Demir
He	Helyum
Hz	Hertz
Mg	Magnezyum
Mn	Mangan
Si	Silisyum
Ti	Titanyum
Zn	Çinko

Kısaltmalar	Açıklama
AA	Aluminum Alloy (Alüminyum Alaşım)
AM	Ana Malzeme
ASTM	American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme
EA	Elektrikli Araçlar
HAZ/ITAB	Isı Tesiri Altında Kalan Bölge
HV	Hardness of Vickers (Vickers Sertliği)
ISO	International Organization for Standardization (Uluslararası
IWS	Fraunhofer Gesellschaft (Fraunhofer Enstitüsü) Kurumu)
MIG/MAG	Gaz Metal Ark Kaynağı / Korumalı Metal Ark Kaynağı
	Standardizasyon Örgütü)
TEB	Termomekanik Etkilenen Bölge

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1.	Ekstrüzyon sistematiği (Ayan, 2022).....	5
Şekil 1.2.	Direkt ekstrüzyon yöntemi (Ayan, 2022)	5
Şekil 1.3.	İndirekt ekstrüzyon yöntemi (Ayan, 2022).....	6
Şekil 1.4.	Darbeli ekstrüzyon yöntemi (Ayan, 2022).....	6
Şekil 1.5.	Hidrostatik ekstrüzyon yöntemi (Ayan, 2022)	7
Şekil 1.6.	Elektrikli araçların gelişimi (Lixin, 2009)	10
Şekil 1.7.	Ar ve N2 gaz kullanımının gözenek oluşumuna etkisinin X-ray….. transmisyon görselleri (Katayama, 2009)	15
Şekil 1.8.	Dört farklı alaşım ilavesinin alüminyum çatlak hassasiyeti üzerindeki etkileri (Dudas, 1966).....	16
Şekil 1.9.	Kaynak dikişi boyunca sıcak çatlak oluşumu (Zhao, 1999)	17
Şekil 1.10.	Alüminyumda hidrojen çözünürlüğü (Verhaeghe, 2004)……..	18
Şekil 1.11.	Lazer kaynak sonrası oluşan porozite miktarının mekanik özelliklere olan etkisi (Zhao, 1999)……..	20
Şekil 1.12.	İki farklı malzemede fiber lazer sonrası gözenek oluşumunun X-ray transmisyon görüntüsü (Katayama, 2009)	21
Şekil 1.13.	Lazer mod tipleri (MADA, 2020).....	21
Şekil 1.14.	Lazer ışın fiziği (a) İletim modu (b) anahtar deliği modu (Bunaziv, 2021).....	23
Şekil 1.15.	Kaynak modu ve güç yoğunluğu arasındaki ilişki (MADA,2020).....	23
Şekil 1.16.	Çeşitli elementler için sıcaklık fonksiyonu olarak denge buhar basıncı (Zhao, 1999)	24
Şekil 1.17.	Farklı oskilasyon kaynak şekilleri (Fetzer, 2018).....	24
Şekil 1.18.	Kaynak dikişi kesit görüntüleri a) Oskilasyon yok b) Enine oskilasyon c) Boyuna oskilasyon d) Dairesel oskilasyon (Wang, 2016)	25
Şekil 1.19.	Kaynak içyapısının EBSD sonuçları a. Oskilasyon yok b. Enine oskilasyon c. Boyuna oskilasyon d. Dairesel oskilasyon. (Wang, 2016).....	26
Şekil 1.20.	Gerilme – Gerinim eğrileri (Wang, 2016)	26
Şekil 1.21.	Önemli lazer kaynak parametreleri a) Yandan görünüm b) Üstten görünüm c) Lazer oskilasyon ve güç değişimi (Sun, 2020).....	27
Şekil 1.22.	Farklı hızlardaki fiber lazer kaynağı uygulamalarında anahtar deliği, eriyik akışı, gözenek ve eriyik havuzu geometrisi oluşumunun X-ray aktarımı (Katayama, 2010).....	28
Şekil 1.23.	İnsidans açısının AA5083 lazer kaynağında porozite ve penetrasyona etkisi (Katayama, 2009)	29
Şekil 1.24.	Fiber çapının kaynak kalitesine etkisi (Unt, 2017)	29
Şekil 1.25.	Lazer kaynakta odak noktası etkisi (Diğer parametreler sabit) (Unt, 2017)	30
Şekil 1.26.	AA5052 ve 304 çeliğinde farklı lazer gücü kullanılarak elde edilmiş lazer kaynaklı parçaların penetrasyon görselleri (Katayama, 2010)..	30
Şekil 2.1.	SUS304 L9 deney sonuçları.....	32
Şekil 2.2.	Kaynak parametreleri ve seviyeleri (Adin,2022).....	33
Şekil 2.3.	Taguchi methoduna göre kaynak parametreleri ve seviyeleri	34
Şekil 2.4.	Farklı kaynak köşe mesafelerinde hesaplanmış bölgesel gerinim	35

Şekil 2.5. Farklı köşe mesafeleri için kaynak havuzunun arka bölgelerinde ölçülmüş bölgesel gerilme değerleri 35
Şekil 2.6. Deneysel kaynak kurgusu 36
Şekil 2.7. Kaynak hızlarının çatlak oluşumuna etkisi 36
Şekil 3.1. Deney numunesinin boyutları (3mm) 39
Şekil 3.2. (a) Deney numunesinin boyutları (5mm) (b) 3 mm ve 5 mm numunelere ait fotoğraf 39
Şekil 3.3. IPG 2 or 5 kW Single Mode fiber lazer cihazı 40
Şekil 3.4. Instron 34TM-50 çekme cihazı görüntüsü 41
Şekil 3.5. DIN 50125 Standardına ait çekme çubuğu görseli 41
Şekil 3.6. Çekme deneyi sonrası numunelerin görüntüleri (Her iki kalınlık değeri için de) 42
Şekil 3.7. Metkon markasına ait Vickers sertlik ölçüm cihazı 42
Şekil 3.8. Sertlik ölçümü yapılan numuneler (3mm ve 5 mm için) 43
Şekil 3.9. STRUERS markalı penetrasyon ölçüm cihazı 43
Şekil 3.10. NIKON marka mikroyapı inceleme cihazı 44
Şekil 4.1. T1 numaralı metalin lazer kaynak penetrasyon görüntüsü 52
Şekil 4.2. T2 numaralı metalin lazer kaynak penetrasyon görüntüsü 52
Şekil 4.3. T3 numaralı metalin lazer kaynak penetrasyon görüntü 53
Şekil 4.4. T4 numaralı metalin lazer kaynak penetrasyon görüntüsü 53
Şekil 4.5. T5 numaralı metalin lazer kaynak penetrasyon görüntüsü 54
Şekil 4.6. T6 numaralı metalin lazer kaynak penetrasyon görüntüsü 54
Şekil 4.7. T7 numaralı metalin lazer kaynak penetrasyon görüntüsü 55
Şekil 4.8. T8 numaralı metalin lazer kaynak penetrasyon görüntüsü 55
Şekil 4.9. T9 numaralı metalin lazer kaynak penetrasyon görüntüsü 56
Şekil 4.10. T11 numaralı metalin lazer kaynak penetrasyon görüntüsü 58
Şekil 4.11. T12 numaralı metalin lazer kaynak penetrasyon görüntüsü 58
Şekil 4.12. T13 numaralı metalin lazer kaynak penetrasyon görüntüsü 59
Şekil 4.13. T14 numaralı metalin lazer kaynak penetrasyon görüntüsü 59
Şekil 4.14. T15 numaralı metalin lazer kaynak penetrasyon görüntüsü 60
Şekil 4.15. T16 numaralı metalin lazer kaynak penetrasyon görüntüsü 60
Şekil 4.16. T17 numaralı metalin lazer kaynak penetrasyon görüntüsü 61
Şekil 4.17. T18 numaralı metalin lazer kaynak penetrasyon görüntüsü 61
Şekil 4.18. T19 numaralı metalin lazer kaynak penetrasyon görüntüsü 62
Şekil 4.19. EN AW 6063 ana metalin tane yapısı 63
Şekil 4.20. Lazer kaynağın tane yapısına etkisi a) Geçiş bölgesi b) Isıdan etkilenmiş bölge c) Kaynak dikişi 64
Şekil 4.21. 3 mm sertlik ölçümü yapılan numuneler 64
Şekil 4.22. T6 (en kötü) ve T7 (en iyi) numunelerinin sertlik grafikleri 65
Şekil 4.23. 5 mm sertlik ölçümü yapılan numuneler 66
Şekil 4.24. T13 (en kötü) ve T12 (en iyi) numunelerinin sertlik grafikleri 67
Şekil 4.25. S/N oranlarının parametreler üzerine etkisi 69
Şekil 4.26. S/N oranlarının parametreler üzerine etkisi 71

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 1.1.	Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması (Başaran, 2010).....	3
Çizelge 1.2.	Dövme alaşımlar için temel temperlerin tanımları (Georgantzia, 2020).....	4
Çizelge 1.3.	Lazer kaynak teknolojisinin avantajları (Oladimeji, 2016)	11
Çizelge 1.4.	Alüminyum alaşımlarının kaynak yapılabilirliği (Welding, n.d.).	12
Çizelge 1.5.	Farklı malzemeler için koruyucu gaz uygulamalar (Laserdyna, 2022) …… ……	13
Çizelge 1.6.	Lazer kaynakta kullanılan koruyucu gazların karşılaştırılması (Laserdyna, 2022)	14
Çizelge 1.7.	Alüminyum kaynaklarında çatlama nedenleri ve önleyici adımlar (Oladimeji, 2016).....	17
Çizelge 1.8.	Alüminyumda gözenek oluşum nedenleri ve önleyici adımlar (Oladimeji, 2016).....	19
Çizelge 2.1.	Taguchi deneysel metodunun parametreleri (Kuo, 2019).....	32
Çizelge 3.1.	EN AW 6063 alaşımının kimyasal özellikleri	38
Çizelge 3.2.	EN AW 6063 alaşımının mekanik özellikleri.....	38
Çizelge 3.3.	Lazer kaynak parametreleri.....	40
Çizelge 3.4.	DIN 50125 Standardına ait çekme çubuğu ölçüleri.....	41
Çizelge 3.5.	Taguchi yönteminde uygulanan farklı parametre değerleri (3 mm).....	45
Çizelge 3.6.	3 mm kalınlık için 9 adet denemenin eşleştirilmesi.....	46
Çizelge 3.7.	3 mm kalınlık için 9 adet denemenin parametre değerleri ile gösterimi.....	46
Çizelge 3.8.	Taguchi yönteminde uygulanan farklı parametre değerleri (5 mm).....	47
Çizelge 3.9.	5mm kalınlık için 9 adet denemenin eşleştirilmesi.....	47
Çizelge 3.10.	5mm kalınlık için 9 adet denemenin parametre değerleri ile gösterimi.....	48
Çizelge 4.1.	3 mm ana metal ve lazer kaynaklı numunelerin çekme testi sonuç tablosu	49
Çizelge 4.2.	5 mm ana metal ve lazer kaynaklı numunelerin çekme testi sonuç tablosu	50
Çizelge 4.3.	3 mm lazer kaynak makro yapı ölçümleri.....	51
Çizelge 4.4.	3 mm kalınlıklı denemelerde gözlemlenen en uç farklar.....	56
Çizelge 4.5.	5 mm lazer kaynak makro yapı ölçümleri.....	57
Çizelge 4.6.	5 mm kalınlıklı denemelerde gözlemlenen en uç farklar.....	62
Çizelge 4.7.	3 mm ve 5 mm ana metalin üzerinden alınan sertlik sonuçları.....	65
Çizelge 4.8.	5 mm ana metalin sertlik sonuçları	66
Çizelge 4.9.	3 mm için maksimum çekme dayanımı	68
Çizelge 4.10.	Proses parametrelerinin S/N oranlarına etki seviyeleri (çekme)...	68
Çizelge 4.11.	ANOVA tablosu (çekme)	69
Çizelge 4.12.	5 mm için maksimum çekme dayanımı	70
Çizelge 4.13.	Proses parametrelerinin S/N oranlarına etki seviyeleri (çekme)...	70
Çizelge 4.14.	ANOVA tablosu (çekme)	71

1. GİRİŞ

Dünyada en popüler metallerden biri olan alüminyum ve alüminyum alaşımları çelikten hemen sonra gelir. Bunun başlıca sebepleri; iyi elektrik ve ısıl iletkenliklerinin olması, çeliğin yoğunluğuna göre 3'te 1 oranında daha hafif olması, korozyona karşı dirençlerinin yüksek olması ve mukavemet özelliklerinin iyi olmasıdır. Son yıllarda, CO2 salınımı ve enerji tüketimini azaltmaya yönelik konularda alüminyum ve alüminyum alaşımları daha az yakıt harcayan hafif ve ekonomik olması nedeniyle tercih sebebi olmuştur (Başer, 2012).

Birincil enerji kaynaklarıyla yürütülen faaliyetler sonucunda zararlı gazlar açığa çıkmaktadır. Bu da küresel ısınma ve ozon tabakasının delinmesi ya da incelmesi gibi istenmeyen süreçlerin ortaya çıkmasına ve ülkeler arasında yeşil büyüme sürecinin sekteye uğramasına neden olmaktadır. Dolayısıyla otomobil üreticileri alüminyum ve alaşımlarını tercih ederek hem hafifliğinden faydalanacak hem de aynı zamanda enerji tasarrufu sağlamış olacaklardır.

Bir otomotivin toplam ağırlığındaki her %10'luk bir azalma, yaklaşık olarak %5-10 oranında yakıt tasarrufu anlamına gelmektedir. Yalnızca bir araç için kullanılan 1 kg çeliğin yerine 500 gram alüminyum kullanılması durumunda aracın kullanım ömrünün toplamda 10 kg daha az emisyona sebep olması basit bir hesap yapılarak bulunmaktadır (Başer, 2012).

Alüminyumun otomobil endüstrisinde motor, vitesler ve hareket sistemlerinde kullanılmasının yanında elektrikli araçların batarya kutularında da kullanılmaya başlanmıştır. Yukarıda bahsedildiği gibi araç üreticileri emisyonu azaltmak için elektrikli araçların batarya taşıyıcılarında ve diğer yardımcı elemanlarda da alüminyum kullanmaktadırlar. Bu sayede hafiflik ve emisyonun azaltılmasının yanında elektrikli araçlarda menzil artışını da sağlamaktadır.

Bu çalışmada elektrikli aracın batarya kutusunda kullanılan iki farklı kalınlıktaki EN AW 6063 ile EN AW 6082 malzemelerine uygulanan lazer kaynağın incelemesi yapılacaktır.

Alüminyum ve alaşımları:

Alüminyum, bor ve karbon ailesinde yer alan hem metal hem metal olmayan özelliklere sahip metal türevi bir elementtir. Alüminyum Dünya'da en bol olan elementlerden biri olmasına rağmen, ticari olarak kullanıma ve üretime uygun hale gelebilmesi için Boksit cevherinden elde edilmeli ve bir üretim sürecinden geçmelidir.

Saf alüminyum elde edildikten sonra 1xxx ila 8xxx olmak üzere 4 basamaklı bir dizide alaşım elementlerine göre sınıflandırılır. Bu 4 basamağın ilk sayısı alaşımı gruplandırmaya, ikincisi orijinal alaşımda yapılan değişiklikleri gösterir. Son iki basamak ise, alaşımın saflık derecesini gösterir (Başaran, 2010).

Genellikle eklenen elementler olarak; bakır, magnezyum, manganez, silikon ve çinko başta gelir. Bunların dışında yüzlerce alaşım bileşimi mevcuttur. Tüm bu alaşım bileşimleri, görünümü ve üretilebilirliği etkiler. Elementlerin eklenmesi, saf alüminyuma kıyasla gücü, işlenebilirliği, korozyon direncini, elektriksel iletkenliği ve yoğunluğu arttırır (https://www.kloecknermetals.com/blog/what-are-the-major-properties-of-aluminum/, 2021).

Alüminyum alaşım gruplarının özellikleri:

Saf alüminyumun iyi özelliklerinin yanında elverişli olmayan mekanik özellikleri de mevcuttur. Bu özellikleri iyileştirmek adına saf alüminyuma ilave alaşım elementleri katılır. Elde edilen alaşım elementleri kullanım amacına göre sınıflandırılır (Başaran, 2010).

Alüminyuma eklenen alaşım elementleri ve etkileri Çizelge 1'de belirtilmiştir.

Çizelge 1.1. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması (Başaran, 2010)

Alaşım Grubu	Başlıca Alaşım Elementi ve Özellikleri
1XXX	*Alaşımsız Alüminyum %99 Alüminyum;* Korozyon direnci, termal iletkenliği ve elektrik iletkenliği yüksek, düşük işleme kabiliyeti
2XXX	*Bakır;* çok iyi işleme kabiliyeti, yüksek dayanım, düşük korozyon direnci
3XXX	*Magnezyum;* korozyon direnci iyi, işleme kabiliyeti düşük, düşük-orta arası dayanım
4XXX	*Silisyum;* özellikle ekstrüzyon işlemi için elverişsiz, döküm kabiliyetinin iyi olmasından kaynaklı iyi aşınma dayanımı ve iyi süneklik
5XXX	*Magnezyum;* çok iyi korozyon direnci, çok iyi kaynak kabiliyeti, düşük dayanım
6XXX	*Silisyum ve Magnezyum;* iyi kaynak kabiliyeti, iyi korozyon direnci, iyi ekstrüzyon edilebilme özelliği
7XXX	*Çinko;* ısıl işleme kabiliyeti iyi, yüksek dayanım, talaşlı işlem kabiliyeti iyi
8XXX	*Demir ve Silisyum*
9XXX	*Yeni alaşımlar* (Örnek: Lityum)

Al alaşımlarının malzeme özellikleri:

Alaşım sınıflandırmasını, üretim prosesleri hakkında daha fazla bilgi edinmek için Temper bilgisine ihtiyaç duyulur. Temper gösterimi, alaşım gösteriminden sonra belirtilir. Temper tanımlanması beş temel temperden oluşur. Çizelge 2'de açıklandığı gibi fabrikasyon işlemi hakkında daha fazla ayrıntı için ek rakamlarla birlikte kullanılır. (Georgantzia, 2020)

Çizelge 1.2. Dövme alaşımlar için temel temperlerin tanımları (Georgantzia, 2020)

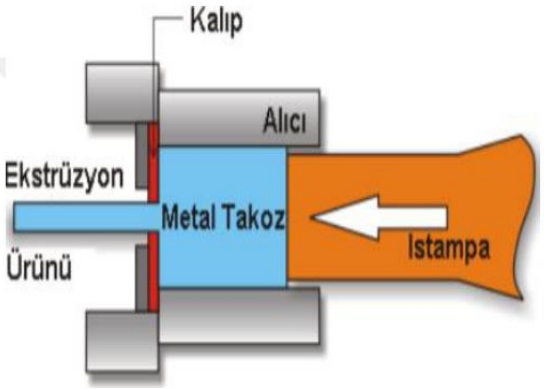
Temper çeşidi	Tanımı
F (Fabrikasyon)	Belirli malzeme özelliklerini elde edebilmek için gerinim sertleştirme işlemi esnasındaki ısıl koşullar özel bir kontrol gerektirmez
O (Tavlanmış)	Tokluk, süneklik ve maksimum işlenebilirlik elde etmek için yüksek sıcaklık koşulları altında işlem
H (Gerinimle sertleştirilmiş)	Isıl işlem görmemiş alaşımların mukavemetlerini stabilize etmek için gerinim sertleştirme yöntemiyle soğuk işlenmiş olarak kullanılır
W (Isıl işlem görmüş çözelti)	Çözelti ısıl işleminden sonra doğal yaşlanmaya maruz kalan alaşımlara uygulanır
T (Termal işlem görmüş)	Isıl işlem uygulanabilen alaşımlar için kullanılır.

1.1. Alüminyum Ekstrüzyon

Ekstrüzyon yöntemleri

Genellikle billet olarak tanımlanan alüminyumu belirli bir sıcaklıkta ısıtarak kalıptan geçirilmesi ve bir delik boyunca itilerek malzemeye şekil vermesi olarak tanımlanır. Ekstrüzyon işleminin ardından sıcaklık anlık olarak ölçülür ve kaydedilir. Ekstrüzyon işlemi esnasında, ekstrüzyon çıkışında hava veya su ile soğutma gerçekleşir. Soğutma işlemlerinin akabinde alüminyum sertleştirme işlemi yapılır. Son olarak kesme testeresinde boylanarak istenen uzunluklarda ekstrüzyon profiller elde edilmiş olur.
Bu üretim yöntemi ile profil içine farklı yönlerde federler eklenebilir ve karmaşık geometriler üretilebilir.

Malzeme olarak alüminyum, paslanmaz çelik, bakır ve plastik malzemeler kullanılabilir. Fakat en çok tercih edilen malzeme alüminyumdur. Bunun sebebi ise; alüminyumun yüksek sünekliği sebebiyle ekstrüzyon işlemine uygun olmasıdır.

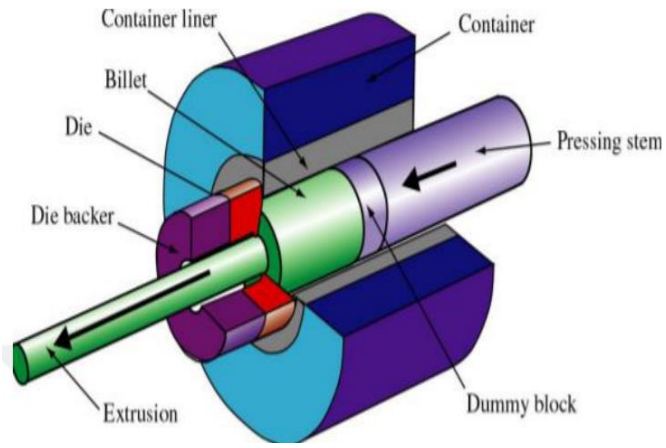


Şekil 1.1. Ekstrüzyon sistematiği (Ayan, 2022)

Ekstrüzyon yöntemi 4 farklı şekilde yapılabilir. Bunlar:

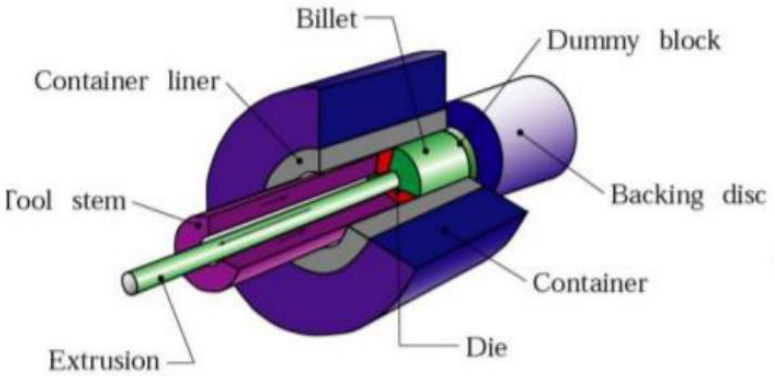
1. Direkt Ekstrüzyon
2. İndirekt Ekstrüzyon
3. Darbeli Ekstrüzyon
4. Hidrostatik Ekstrüzyon

1) Direkt Ekstrüzyon Yöntemi: Şekil 1'de gösterildiği gibi metal takoz, alıcı kovan içine konur ve ıstampa ile bastırılır. Matris içinden geçirilerek nihai ürün elde edilmiş olur. İstenilen hassasiyet ve ölçülere göre pres gücünün sürekliliği değiştirilebilir. Bu yöntem sonunda "Artık Malzeme" adı verilen ürün kalıbın içine giremez kesilip atılması gerekir. Hacmin yaklaşık %18-20'si artık malzemedir. (*No Title*, 2022)



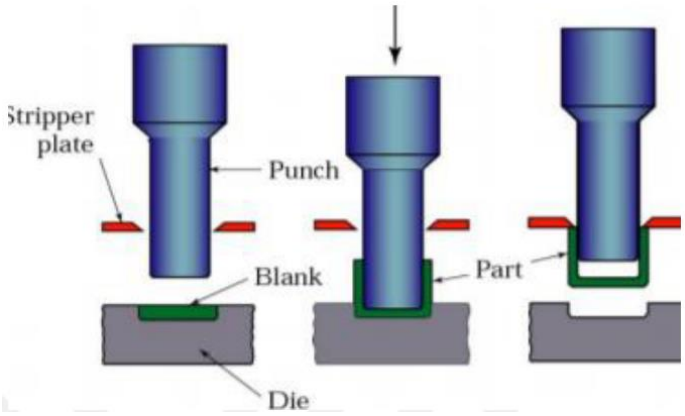
Şekil 1.2. Direkt ekstrüzyon yöntemi (Ayan, 2022)

2) İndirekt Ekstrüzyon Yöntemi: Bu yöntemin direkt ekstrüzyondan farkı metal takozun sabit durması ve kalıbın metal takoza doğru gelmesidir. Böylece alıcı kovan ile metal takoz arasında sürtünme olmaz. Ürün ıstampanın içinde kalmak zorundadır. "Artık Malzeme" hacminin %5-6 sı kadardır. Kuvvet ihtiyacı ise direk ekstrüzyondakinin %75 i kadardır.



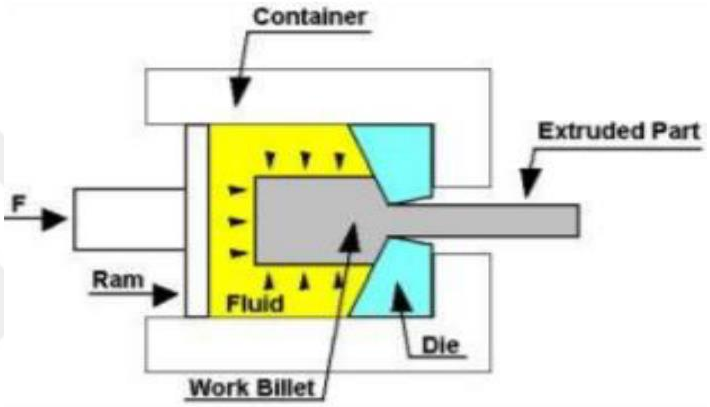
Şekil 1.3. İndirekt ekstrüzyon yöntemi (Ayan, 2022)

3) Darbeli Ekstrüzyon Yöntemi: Bu yöntem birçok hafif metallerin yani Pb, Al, Mg, Cu gibi hafif metallerin soğuk olarak (herhangi bir ısıl işlem görmeden) ekstrüze edilmesidir. Bu yöntem indirekt ekstrüzyon ile soğuk ekstrüzyonun birleşik şekli gibidir. Ekstrüzyondan elde edilen parçaların kalınlığı zımba ile kalıp arasındaki boşluğa bağlıdır. Macun ve ilaç tüpleri bu yolla üretilirler.



Şekil 1.4. Darbeli ekstrüzyon yöntemi (Ayan, 2022)

4) Hidrostatik Ekstrüzyon: Alıcı ile takoz arasındaki sürtünmenin bir akışkan vasıtasıyla yok edildiği yöntemdir. Direkt ekstrüzyona benzerdir. Bu yöntemde metal takozun alıcıya sürtünmesi yoktur. Oda sıcaklığında mum, polimer, bitkisel yağ kullanılırken, yüksek sıcaklıklarda "cam"ın erimiş hali kullanılır. Gevrek olan malzemeler bu yolla şekillendirilirler. Bu yöntemde; düşük sürtünme, küçük kalıp açıları ve yüksek ekstrüzyon oranları elde etmek mümkündür. Bu proses, diğer yöntemlere kıyasla daha karmaşık takım gerektirmesi, uzun zaman aralıklarında nadiren tekrarlanması nedeniyle endüstride daha az kullanılmaktadır.



Şekil 1.5. Hidrostatik ekstrüzyon yöntemi (Ayan, 2022)

1.2. Alüminyumun Otomotivdeki Kullanım Alanları

Ekonomik kısıtlar ve çevresel faktörler nedeniyle otomobil üreticileri yakıt tüketimini azaltmak için pek çok yenilikçi çözüm araştırmakta ve geliştirmektedir. Buna ilave yeni teknoloji araçlarda lüks ve konfor, performans ve güvenlik sistemlerindeki gelişmeler aracın ağırlığını arttırmaktadır. Bunun dezavantajı ise yakıt tüketiminin artmasıdır. Bir otomobilin ağırlığının %10 azaltılması yakıt tüketiminde yaklaşık %5,5 iyileşme sağlar. Bu sebeple alüminyum, otomobil üreticileri için önemli bir malzeme haline gelmiştir. Düşük yoğunluğu hafif şasi ve araba parçaları üretebilmekte ve sonucunda yakıt tasarrufu sağlamaktadır.

Yakıt tüketimindeki azalma, ekonomik faydaların yanı sıra küresel ısınmanın temel sorunu olan CO2 emisyonunu da azaltmaktadır.

Alüminyum kullanımı, alüminyumun çelik kadar yeterli mekanik özellikleri gösterdiği hafif bir yapı elde edilmesini sağlar. Böylece çeliğe göre kullanılan mukavemet/ağırlık oranı avantajı elde edilirken yolcu güvenliğinde de herhangi bir değişiklik olmaz. (Demirel, 2012).

Avantajları

- Hafiflik: Yoğunluğu çeliğe göre düşük olduğu için yaklaşık %30-40 oranında ağırlık tasarrufu sağlar. Bunun sonucunda aracın toplam ağırlığı azalır, yük kapasitesi artar ve yakıt ekonomisi sağlanır.

- Tasarım Esnekliği: Alüminyumun yüksek ekstrüde edilebilirliği sayesinde daha karmaşık parçalar hızla üretilebilir. Alüminyum kullanılarak tek bir işlemde hazır olan basit kapalı borular kullanılarak montajda bazı çelik parçalar elenebilir. Bunun sonucunda daha az parça ile üretim hızlanırken montaj işlemi kolaylaşır. Alüminyum kullanılması geleneksel çelik yapı yerine bileşen sayısını %25 oranında azaltır.

- Enerji Emilimi: Kaza sırasında yolcuların güvenliği için, yolcunun kabini yeterli güçte olmalıdır. Ek olarak, ön, arka ve yan çerçevelerin yeterli enerjiyi emmesi ve yolculara iletmemesi gerekir. Diğer geleneksel metallerle karşılaştırıldığında, uygun alaşım ve ısıl işlem seçimi ile, çarpışma sırasında burkulma kontrollü bir şekilde gerçekleşir ve daha fazla enerji emilimi sağlanır.

- Korozyon Direnci: Doğal oksit kaplaması sayesinde çevre ile bağlantısı kesilir ve çelik gibi herhangi bir ek koruma gerektirmez. Oksijen, diğer gazlar ve sıvılar yüzeydeki bu sert ve kalın tabakadan geçemez.

- Geri Dönüştürülebilirlik: Alüminyum hurda kullanılırken herhangi bir kalite kaybı olmaz ve birincil alüminyum üretimine kıyasla geri dönüşüm sürecinde sadece %5 enerji girdisine ihtiyaç duyulur. Son yıllarda artan alüminyum kullanımı ile birlikte otomobil parçalarının %30-50'si geri dönüştürülebilmektedir.

Tüm bunlara ek olarak; daha rijit bir gövde elde edilir, yol tutuş ve sürüş özellikleri iyileştirilir (Demirel, 2012).

Dezavantajları

- Maliyet: Bilindiği gibi alüminyumun malzeme maliyeti çelikten daha pahalıdır ancak, alüminyum geri dönüştürülebilir ve çelik kalıp takım maliyetlerini dikkate alırsak, bu durum dengelenir. Ayrıca, tasarım esnekliği, nihai ürünü elde etmek için gereksiz süreçleri ortadan kaldırır. Karşılaştırıldığında, çelik kalıpları yine ekstrüzyon kalıplarından daha pahalıdır. Alüminyum, yılda 100.000 otomobilin altındaki üretim hacmindeki üreticiler için ucuz bir malzemedir.

- Young's Modulü: Çelik ve alüminyum arasındaki Young Modülünün karşılaştırıldığında, 1/3 gibi bir oran vardır. Young'ın çelik modülü 206 MPa iken, alüminyum 69 MPa'dır. Bu, aynı tasarım kriterinde, alüminyum yapının çelik yapıdan 3 kat daha fazla sapacağı anlamına gelir. Çelik ile aynı sertliği telafi etmek için, alüminyum yapıdaki enine kesitin tasarımı ve kalınlığı değiştirilmelidir.

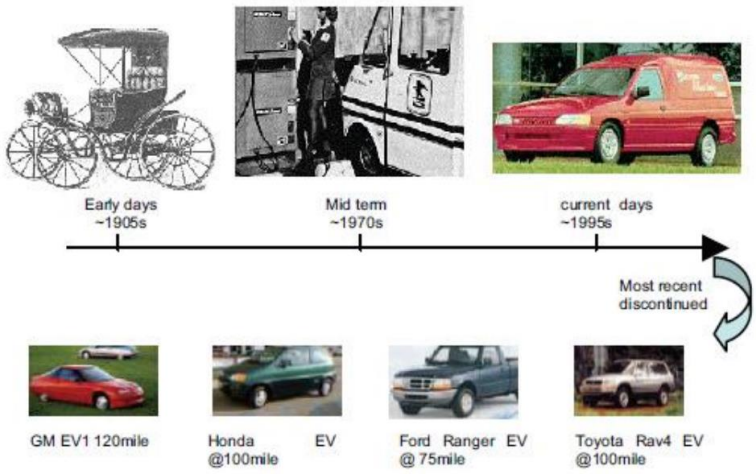
- Kaynaklanabilirlik: Isıl işlem görmüş alüminyum alaşımları, özellikle HAZ'da kaynak sonrası sertleşme özelliklerini kaybeder. Çelik ile karşılaştırıldığında, alüminyum HAZ'da daha düşük sertlik ve mukavemet özellikleri gösterir. Ek olarak, kaynak işlemi sırasında, sıcak çatlama riski vardır. Bu durum alaşım, temper ve kaynak seçimine bağlıdır (Demirel, 2012).

Elektrikli araçların gelişimi:

Elektrikli araçlar son yıllarda hızla gelişmeye devam ediyor. Endüstriyel ve motor teknolojisindeki yenilikler nedeniyle elektrikli araçlar hem daha uzun süre seyahat edebiliyor hem de daha yüksek hıza ulaşabiliyor. Son yıllarda çevreye bilincinin artması, dünyada fosil yakıtların tükenmesi ile elektrikli araçlar, benzinli-dizel araçlar için çözümler sundukları için benzinli dizel araçlara ciddi bir alternatif haline gelmiştir. Gelişmiş sanayiye devi devletlerin istikrarı sayesinde, elektrikli araçlar yakında iyi bir

alternatiften ziyade bir zorunluluk haline gelecektir. Bu nedenlerden dolayı, elektrikli araçlar çeşitli toplulukların odak noktasında yer alan ciddi bir yatırım ve gelişme meselesi haline geldi. Elektrikli araçlardaki gelişmelerin ana odak noktası, daha düşük enerji ile daha uzun mesafelere gitmek ve hem hafif hem de daha az kapasiteli akülerde daha çok daha fazla enerji depolamak haline geldi. Üretim aşamaları da güncel sorunlardan biridir. Elektrikli araçların seri üretimindeki donanım eksikliği, farklı teknolojiler kullanılarak çözülmeye çalışılmaktadır. (Koten, 2018)

Basit şarj edilemez sistemden modern son teknoloji ürünü kontrol sistemine kadar, Elektrikli aracın gelişimi geçmişten günümüze Şekil 5'te açıklandığı gibi 3 aşamada sınıflandırılabilir. (Lixin, 2009)



Şekil 1.6. Elektrikli araçların gelişimi (Lixin, 2009)

Elektrikli araçlar en eski otomobiller arasında ve içten yanmalı motorlu araçların önünde yer alıyordu. 1920'nin sonlarından 1930'lara kadar benzinli araçlara kıyasla 3 kat daha fazlaydı ve 1900'lerin başında kara aracı kullanımında birinci sırada yer alan önemli bir ulaşım aracıydı. Birçok etkende dolayı elektrikli araçların gelişimi içten yanmalı motorlar kadar belirli bir süre ilerlemedi. Bu etkenlerin başında maliyet, düşük menzil ve seri üretilebilirlik vardı. (Lixin, 2009)

Çizelge 1.3. Lazer kaynak teknolojisinin avantajları (Oladimeji, 2016)

Lazer Kaynak Özellikleri	**Kaynakla İlgili Faydalar**	**Lazer Ekonomisi**
Koşutlanmış ve tutarlı ışın	Daha küçük ayakizi/odaklanmış çap	Yüksek üretilebilirlik/performans
Yüksek güç yoğunluğu	Daha dar HAZ	Malzeme çeşitliliği
Sıkı odaklanabilirlik	Küçük mekanik hasarlar	Otomasyon/robotizasyon
Yüksek hassaslık	Düşük termal ve mekanik gerilmesi	İyi esneklik
Düşük ısı girdisi	İyi tane yapısı	İnsan gücünün azaltılması
Yüksek kaynak hızı	Çeşitli bağlantı konfigürasyonlarının kaynağı	İyi tekrarlanabilirlik
Temassız kaynak işlemi	Full penetrasyon	Üretim çizgisinin şematizasyonu
Ark kaynaklara kıyasla daha temiz	Kalın iş parçalarının kaynaklanabilmesi	Zamana bağlı alet değişimi/aşınması olmaz
Geniş çalışma mesafesi mümkün	Karmaşık yapılara erişebilirlik	Tek geçişli kaynak
Manyetizmadan etkilenmez	Boşluk köprülenebilirliği	Tek taraflı erişilebilirlik

1.3Alüminyum Alaşımlarının Kaynak Yapılabilirliği:

Alüminyum alaşımlarının kaynağı belli zorluklar içermekte olup kısaca aşağıdaki başlıklar altında açıklanmıştır;

- Yüksek yüzey yansıması
- Yüksek ısı iletimi
- Düşük kaynama noktasına sahip bileşenlerin buharlaşması

- Yüzey oksitleri

Alüminyum alaşımlarının yukarıdaki özelliklerine paralel aşağıdaki kusurlar oluşabilmektedir;

- Düşük penetrasyon
- Gözenek
- Gaz boşlukları (blowholes)
- Kaynak ve ısıdan etkilenmiş bölge çatlakları
- Mekanik özelliklerde düşüş
- Kaynak performansında sürekliliğin sağlanamaması

Çizelge 1.4. Alüminyum alaşımlarının kaynak yapılabilirliği (Welding, n.d.)

Alaşım	**Bileşim**	**Uygulama Alanları**	**Kaynaklanabilirlik**
1000 serisi	Al	Kimyasal	İyi
2000 serisi	Al-Cu	Havacılık	Çatlak oluşumu, porozite
3000 serisi	Al-Mn	Bataryalar	İyi
5000 serisi	Al-Mg	Otomotiv	Genel olarak poroziteli, fakat çatlak oluşumu Magnezyumun yüzdesine bağlı
6000 serisi	Al-Mg-Si	Havacılık, Otomotiv	Çatlak oluşumu, porozite
7000 serisi	Al-Zn	Otomotiv	Porozite (Zn den dolayı)
8000 serisi	Al-Li	Havacılık	Porozite

Lazer kaynakta koruyucu gaz uygulamaları:

Lazer kaynak esnasında koruyucu gaz üç ana rolü bulunmaktadır;

1. Kaynak eriyiğinin ortamdaki gazlar ile reaksiyonunu önlemek (Oksijen, nitrojen, hidrojen vb.)
2. Plazma (İyonlaşmış gaz) oluşumunu önlemek. Plazma oluşumu lazer ışınının ana malzemeye olan etkisini azaltabilir.
3. Proses ve kaynak havuzunun kararlılığını sürdürebilmek

Genel olarak, yüksek güçlü lazer kaynak işlemi sırasında kullanılan koruyucu gaz türü, işlemde önemli bir rol oynayabilir. Özellikle kaynak hızı, kaynak dikiş geometrisi ve içyapı üzerinde etkileri olabilir.

Çizelge 1.5. Farklı malzemeler için koruyucu gaz uygulamalar (Laserdyna, 2022)

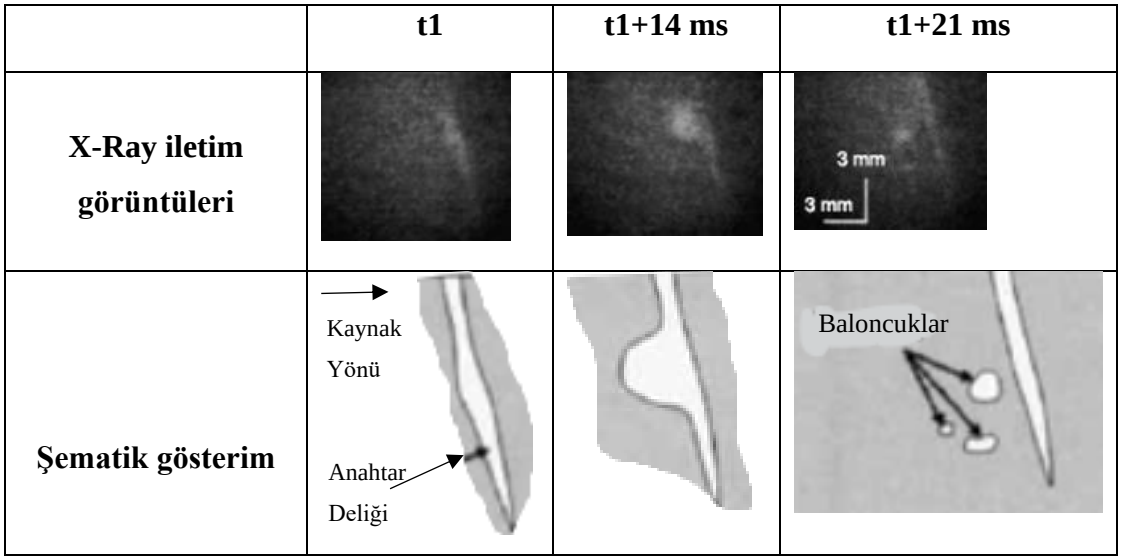
Malzeme	**Gaz Tipi**	**İzlenilebilirlik Oranı (Üst Kaynak Dikişi)**	**İzlenilebilirlik Oranı (Alt Kaynak Dikişi)**
Paslanmaz çelikler	Argon-Nitrojen	30-40 l/min	<10 l/min
Nikel bazlı alaşımlar	Argon-Nitrojen	30-40 l/min	<10 l/min
Titanyum bazlı alaşımlar	Argon-Helyum	30-40 l/min-Argon 50-60 l/min-Helyum	<10 l/min
Alüminyum bazlı alaşımlar	Argon- Nitrojen	30-40 l/min	<10 l/min
Bakır bazlı alaşımlar	Nitrojen	30-40 l/min	<10 l/min
Düşük karbon çelikleri	Gazsız		<10 l/min

Çizelge 1.6. Lazer kaynakta kullanılan koruyucu gazların karşılaştırılması (Laserdyna, 2022)

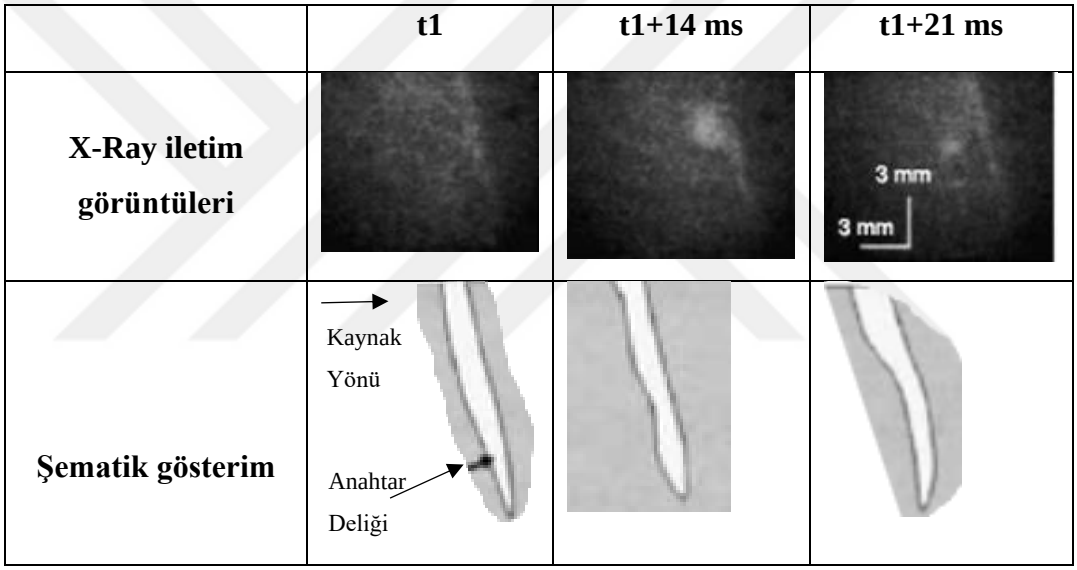
Tip	Plazma Baskısı	Oksidasyona Karşı	Maliyet	İzlenilebilirlik oranı	Kaynak profili	Limitler
He	Mükemmel (24.5eV)	İyi	Yüksek	30-40 l/min	En derin	Yok
Ar	Düşük (15.7eV)	Mükemmel	Orta	20-25 l/min	Geniş	Düşük Pd's
N2 O2 siz	Düşük (15.7eV)	İyi	Düşük	20-25 l/min	Derin	Belirli çeliklerde gevrekleşme
CO2	Düşük (14.4eV)	Zayıf	En düşük	30-45 l/min	Ortalama	Reaktif malzemelerde iyi değil
He+Ar	İyi	Çok iyi	Orta	30-35 l/min	Ortalama	-

Fiber lazer kaynağı için Helyum Alüminyum kaynağında kullanılabilir. Helyum'un düşük kütlesi nedeniyle atmosferden korunmak için akış hızlarının yüksek olması gerekebilir. Helyum'un yüksek maliyeti endüstride kullanımını genellikle kısıtlar.

Aşağıdaki çalışmada iki farklı koruyucu gaz kullanımının lazer kaynak sonrası gözenek oluşumuna etkisi incelenmiştir. Ar gaz kullanılan kaynakta gözenek oluşumu gözlenirken N_2'de ise gözlemlenmemiştir.



(a) Ar Koruyucu Gaz



(b) N2 Koruyucu Gaz

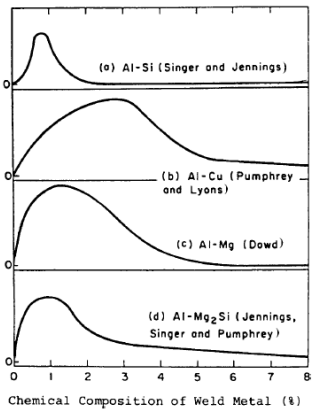
Şekil 1.7. Ar ve N2 gaz kullanımının gözenek oluşumuna etkisinin X-ray transmisyon görselleri (Katayama, 2009)

1.3.1Alüminyumun lazer kaynaktaki kusurları

1.3.2. Katılaşma (sıcak çatlama):

Sıcak çatlama, alüminyum kaynaklı bağlantılardaki hemen hemen tüm çatlamaların nedenidir. Sıcak çatlama, yüksek sıcaklıkta bir çatlama mekanizması olup, esas olarak metal alaşım sistemlerinin nasıl katılaştığının bir fonksiyonudur. Sıcak çatlama olayında

üç husus öne çıkmaktadır. Bunlar ana metalin alaşımı, kaynak teli seçimi ve kaynak geometrisi olarak sıralanabilir. Alüminyum çatlak hassasiyeti eğrileri, alüminyum kaynaklarının sıcak çatlak oluşum riski konusunda yardımcı olmaktadır. Aşağıdaki grafik dört farklı alaşım ilavesinin Silikon (Si), Bakır (Cu), magnezyum (Mg) ve magnezyum silisitin (Mg2Si) alüminyum çatlak hassasiyeti üzerindeki etkilerini göstermektedir. Aşağıdaki grafik yorumlandığında 6xxx alüminyum alaşımlarının lazer kaynak gibi eriyik temelli uygulamalarda kaynak teli kullanılmadığı taktirde sıcak çatlak oluşumuna maruz kalabileceğini göstermektedir. Alüminyum kaynaklarında sıcak çatlak oluşumunu etkileyen belki de en önemli faktör dendrit koheransının sıcaklık aralığı ve donma işlemi sırasında mevcut olan sıvının türü ve miktarıdır. Dendrit koheransı dendritler birbiriyle kilitlenmeye başladığında oluşur böylece erimiş malzeme çamursu bir yapı oluşturur. Tutarlılık aralığı birbirine kenetlenen dendritlerin oluşumu ile katılaşma sıcaklığı arasındaki sıcaklıktır. Bu aralık ne kadar geniş olursa birbirine kenetlenen dendritler arasında oluşan katılaşma gerilimi nedeniyle sıcak çatlama meydana gelme olasılığı o kadar artar.

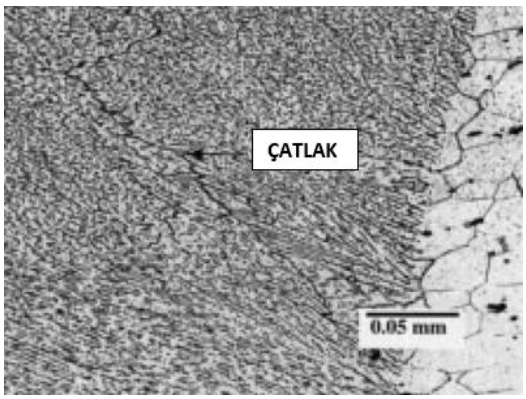


Şekil 1.8. Dört farklı alaşım ilavesinin alüminyum çatlak hassasiyeti üzerindeki etkileri (Dudas, 1966)

Çizelge 1.7. Alüminyum kaynaklarında çatlama nedenleri ve önleyici adımlar (Oladimeji, 2016)

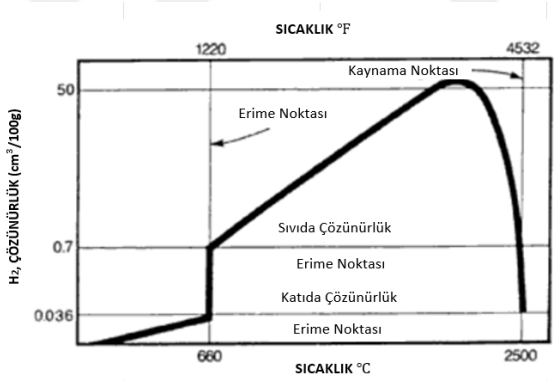
Çatlak Tipi	Nedenleri	Termal Yaklaşım	Metalurjik Yaklaşım
Kaynak metali katılaşma çatlaması	En/boy oranının artması	Çift ışın lazer kaynağı	Buharlaşan alaşım elementini telafi etmek için dolgu metalin uygun kullanımı
Sıvılaşma Çatlaması	Artık gerilim ve gerinim	Çift darbeli lazer kaynağı	Termal etkiye atfedilen mikroyapısal değişiklik
	Güç yoğunluğu, aşırı yükleme faktörü gibi kaynak parametreleri	Soğutma oranının değişikliği	
	Elde edilen kaynak mikroyapısı	Lazer kaynağın güç yoğunluğundaki en yüksek seviyenin (peak) azalışı	

Aşağıdaki şekilde 6111-T4 alaşımının lazer kaynak sonrası kaynak dikişinde gözlemlenen sıcak çatlak oluşumunun içyapısı gösterilmiştir. Sıcak çatlak oluşum riskinin kaynak hızı artışı ve dolayısıyla yüksek soğuma oranları nedeniyle artığı tespit edilmiştir.



Şekil 1.9. Kaynak dikişi boyunca sıcak çatlak oluşumu (Zhao, 1999)

Gözenek oluşumu alüminyum kaynaklarda yaygın olarak gözlemlenen bir kaynak kusurudur. Lazer kaynak uygulamalarında da bu kusur ile sıkça karşılaşılabilir. Gözeneklerin kök nedeni üzerine araştırmalar incelendiğinde bazı alüminyum alaşımlarındaki düşük kaynama noktasına sahip bileşenlerin buharlaşmasının anahtar deliği dengesizliklerine neden olduğunu öne sürerken, diğerleri koruyucu gazın katılaşma esnasında tutulduğu üzerine çıkarımlar yapmıştır. Bir başka yaklaşım ise kaynak havuzunun katılaşması esnasında hidrojenin tutulmasına bağlamaktadır. Gözeneklilik ince veya kaba olarak sınıflandırılabilir ve 0,5 mm lik ortalama gözenek büyüklüğü referans alınır. İnce gözeneklilik küresel gözeneklerin bir dağılımı olarak görünür ve genellikle hidrojenden veya katılaşma sırasında çözünmüş koruyucu gazların reddedilmesinden kaynaklandığı anlaşılır. Kaba gözeneklilik kaynak dikişi boyunca rastgele dağılmış daha büyük, daha düzensiz şekilli boşluklar ile karakterize edilir. Bunların genellikle anahtar deliği dengesizliklerinin bir sonucu olduğu düşünülür. Aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi hidrojen eriyik alüminyumda yüksek çözünürlüğe sahip iken katılaşma esnasında ise bu özelliğini kaybeder ve gözenek oluşumuna neden olabilir.

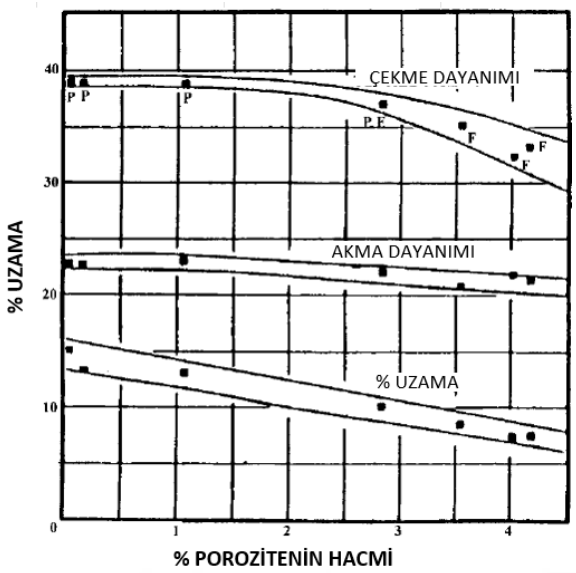


Şekil 1.10. Alüminyumda hidrojen çözünürlüğü (Verhaeghe, 2004)

Çizelge 1.8. Alüminyumda gözenek oluşum nedenleri ve önleyici adımlar (Oladimeji, 2016)

Kaynak Porozitelerinin Tipi	**Nedenleri**	**Yenileyici Lazer Modifikasyonları Yoluyla Önleyici Tedbirler**	**Geleneksel Önleyici Tedbirler**
İyi porozite veya küresel mikro boyuttaki poroziteler	Kaynak malzemesinde hidrojen birikmesi	Uygun frekansta darbe şekillendirme ve modülasyon	Alüminyum alaşımlarının kaynak işleminden önce ön-temizlenmesi
Kaba porozite veya büyük düzensiz şekildeki boşluklar	Akış türbülansından dolayı anahtar deliğinin görünürlüğü	Atmosfer altı basınçlı lazer kaynağı	Düşük çiğ noktalı araştırma sınıfı koruyucu gaz kullanımı
	Gaz kabarcıklarının hapsolması	Salınan manyetik alan uygulaması	Azaltılmış veya daha düşük kaynak hızı
	Alaşım elementinin buharlaşması	Kaynak havuzunun uzamasını sağlamak için çift nokta lazer kaynağı	Kimyasal aşındırma, işleme yoluyla alüminyum oksidin gidermesi
	Derinlemesine olan kaynağın soğuma oranının yüksekliği	Tam nüfuziyetle kaynak için uygun çift ışınlı lazer kaynağı (öncü/gecikmeli lazer ışını güç oranı >1 olduğunda)	-
	Yüksek kaynak hızı	-	

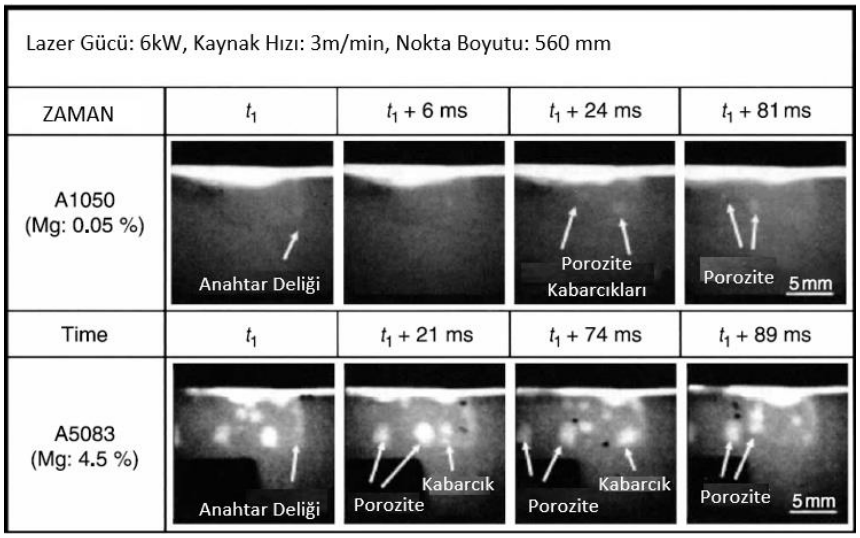
Aşağıdaki şekilde lazer kaynak sonrası oluşan porozite miktarının mekanik özelliklere olan etkisi incelenmiştir. Porozite miktarı belli bir seviyeyi geçtikçe özellikle çekme ve uzama değerlerinde düşüş gözlemlenmektedir. Eğme test sonuçları da çekme ve uzama değerlerine paralel kötüleşmektedir.



Şekil 1.11. Lazer kaynak sonrası oluşan porozite miktarının mekanik özelliklere olan etkisi (Zhao, 1999)

5086-H116 malzemenin 5356 kaynak teli ile birleştirilmesi sonrası Şekil 1.12'de gösterildiği gibi kaynak dikişindeki porozitenin çekme ve eğme test sonuçlarına etkisi (P: Eğme testi uygun, F: Eğme testi uygun değil)

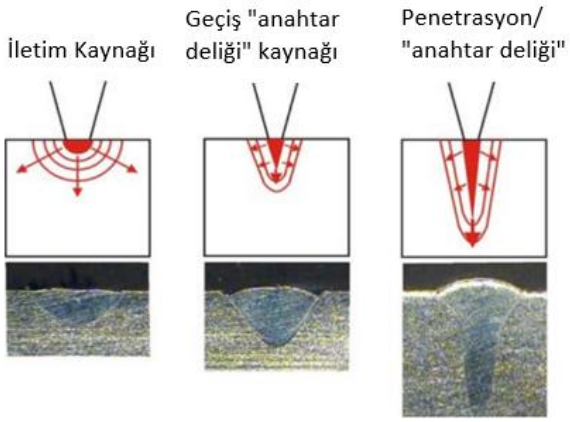
A1050 ve A5083 malzemelerin x-ray analizleri yorumlandığında AA5083 malzemesinin yüksek Mg içeriği nedeniyle düşük yüzey gerilimi ve yüksek buhar geri tepme kuvveti oluşumu sonucu anahtar deliği geometrisinin alt uç noktasında gözenek oluşumu gözlemlenmiştir.



Şekil 1.12. İki farklı malzemede fiber lazer sonrası gözenek oluşumunun X-ray transmisyon görüntüsü (Katayama, 2009)

Lazer Kaynak Modları:

Lazer yüksek yoğunluğa sahip bir proses olmasının verdiği avantaja paralel kaynak uygulamaları için çok özel bir yöntemdir. Kaynak oluşumu çok hızlı bir şekilde yoğun lazer ışının odaklanması ile sağlanır. Bu durum lazer kaynak uygulamasının yüksek penetrasyon ve düşük ısı girdisi avantajlarını ortaya çıkarır. Güç yoğunluğu ve odak nokta boyutu temelinde üç farklı kaynak yapısı ortaya çıkabilir.

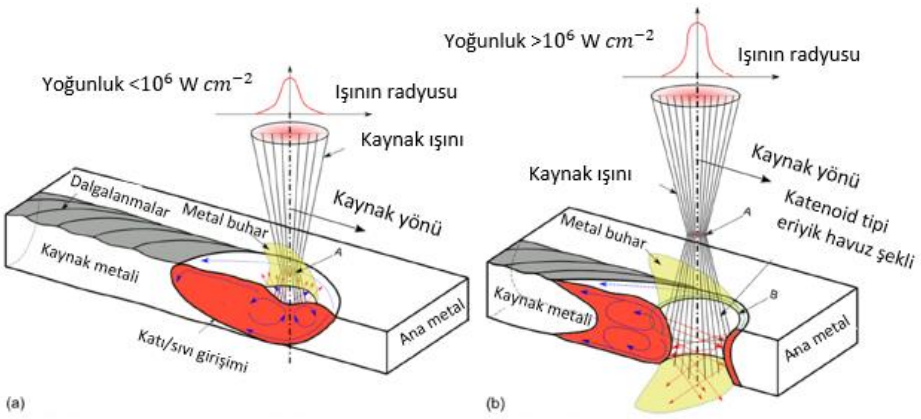


Şekil 1.13. Lazer mod tipleri (MADA, 2020)

- İletim modu (Conduction mode): Bu mod düşük enerji yoğunluğu (0,5 W/cm3) esnasında oluşur. Düşük penetrasyonda geniş kaynak dikişi elde edilir.Bu mod genellikle estetik görünümlü veya sıçrama istenmeyen kaynak uygulamalarında tercih edilebilir.

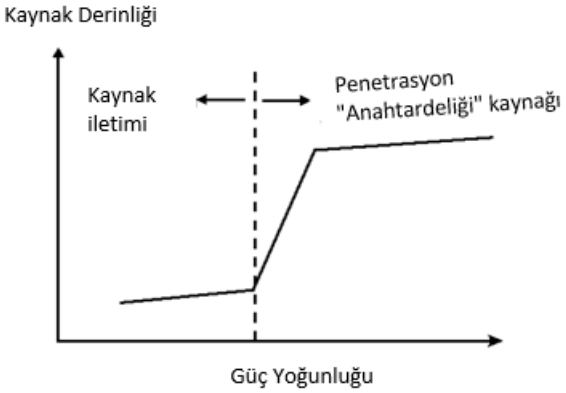
- Geçiş anahtar deliği modu (Transition keyhole welding): Genellikle orta güç yoğunluğu (1 MW/cm3) esnasında oluşur. Güç yoğunluğuna paralel iletim moduna göre daha yüksek penetrasyon elde edilir. Yüksek penetrasyonun nedeni anahtar deliği (keyhole) oluşumudur. Bu yapı buharlaşmış metal oluşumu sayesinde ortaya çıkar. Bu oluşumun genişliği kaynak dikişinden küçük olup buhar basıncı sayesinde etrafındaki eriyik metale karşı koyar. Anahtar deliği oluşumunun derinliği güç yoğunluğu ve zaman ile paralellik gösterir. Bu oluşumun optik yoğunluğu düşük olmasından dolayı lazer gücünü malzemeye aktarmakta kanal görevi görür. Geçiş modunda güç yoğunluğu ve zaman anahtar deliği oluşumu için yeterli iken anahtar deliğini metalin içine doğru büyütecek değerlerde değildir. Bu yöntem Darbeli Nd:YAG ve fiber lazer yöntemleri ile punta ve dikiş kaynağı uygulamalarında kullanılır.

- Penetrasyon anahtar deliği kaynağı (Penetration keyhole welding): Güç yoğunluğu belli bir değeri geçtiği (1.5 MW/cm3) taktirde lazer kaynak anahtar deliği modu ve dolayısıyla yüksek penetrasyon elde edilebilir. Aşağıdaki grafikte modlar arasındaki değişim güç yoğunluğuna paralel gösterilmiştir.



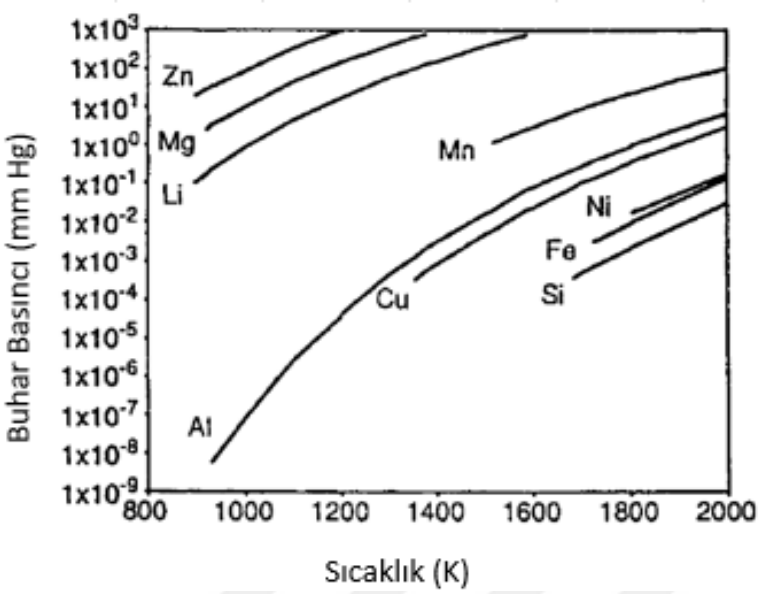
Şekil 1.14. Lazer ışın fiziği (a) İletim modu (b) anahtar deliği modu (Bunaziv, 2021)

Penetrasyon anahtar deliği modu sayesinde dar fakat derin penetrasyona sahip kaynak dikiş geometrisi elde edilebilir. Bu durum ince parçalarda hızlı kaynağı ve kalın parçalarda ise uygun penetrasyonun elde edilmesini sağlar.



Şekil 1.15. Kaynak modu ve güç yoğunluğu arasındaki ilişki (MADA,2020)

Buharlaşma oranı alüminyum alaşımların uçucu elementlerin varlığı nedeniyle önemli bir şekilde artış gösterebilmektedir. Aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi 5xxx ve 6xxx serilerinde alaşım elementi olarak kullanılan Mg elementinin buhar basıncı alüminyumdan çok daha yüksektir. Bu duruma paralel olarak Magnezyumun çok az katkısı bile buharlaşma oranını önemli bir şekilde artırabilir.

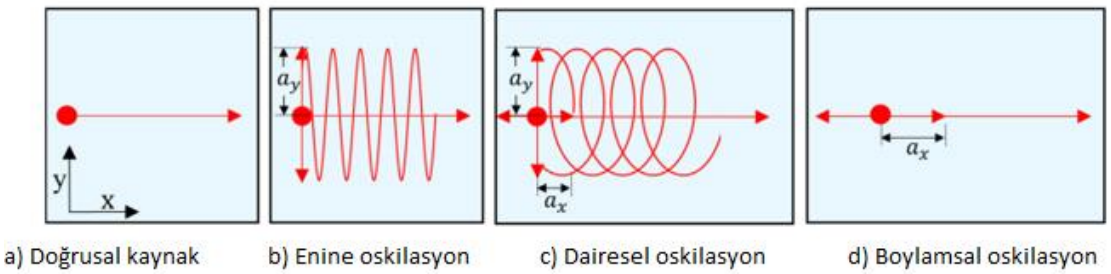


Şekil 1.16. Çeşitli elementler için sıcaklık fonksiyonu olarak denge buhar basıncı (Zhao, 1999)

Lazer Oskilasyon: Lazer oskilasyon yöntemi lazer ışınını farklı geometrilerde hareket ettirilmesi elde edilir. Başlıca avantajları;

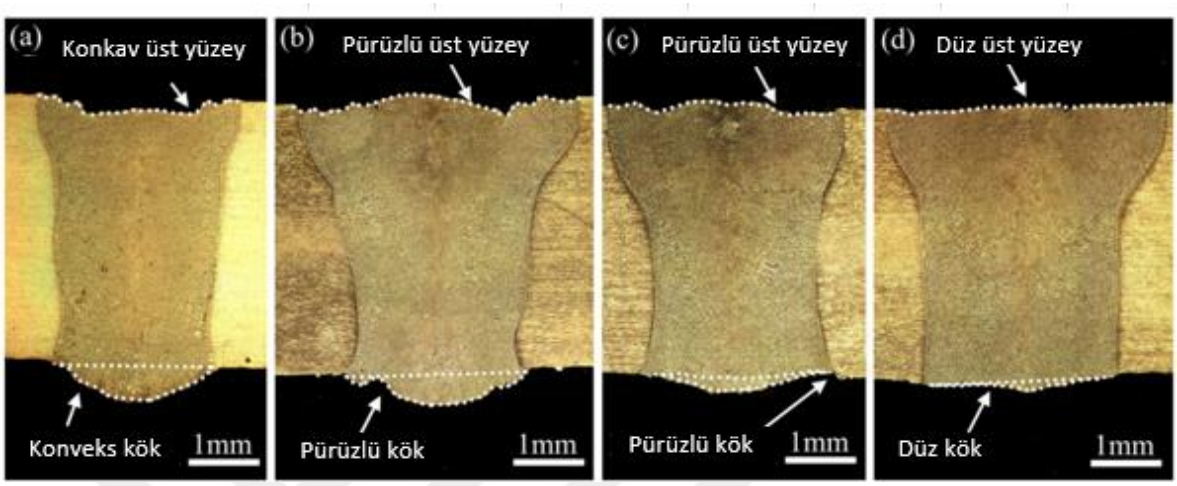
- Kaynak dikişi ve kaynak genişliği bağımsız olarak kontrol edilebilir.
- Kaynak boşluklarına daha az hassasiyete sahiptir.
- Sıcak çatlak riski azaltılabilir.

Aşağıdaki geometrilerde oskilasyon gerçekleştirilebilir. Oskilasyon genliği ve frekansı optimum kaynak için uygun bir şekilde ayarlanmalıdır.



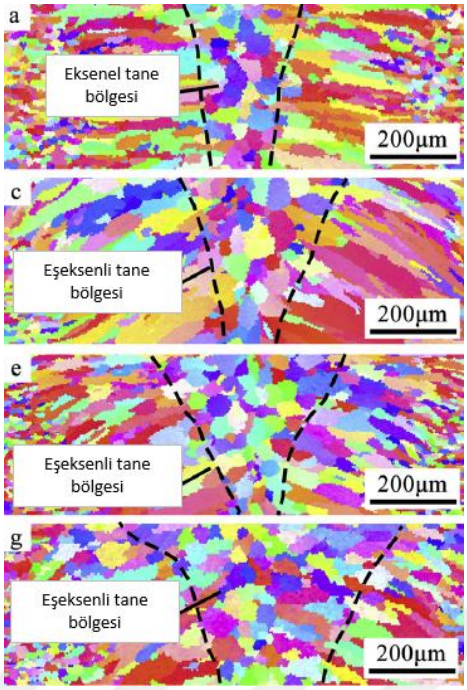
Şekil 1.17. Farklı oskilasyon kaynak şekilleri (Fetzer, 2018)

Aşağıdaki görselde farklı oskilasyon geometrilerinin kaynak dikiş geometrisine etkileri gösterilmiştir. Dairesel oskilasyon kaynak dikiş yüzeyi ve kökünde de en iyi sonuçlar elde edilmiştir.



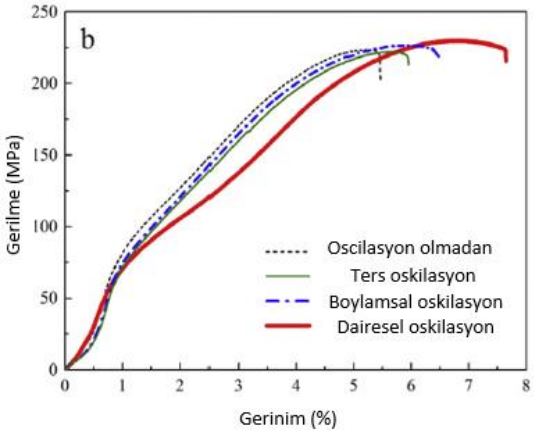
Şekil 1.18. Kaynak dikişi kesit görüntüleri a) Oskilasyon yok b) Enine oskilasyon c) Boyuna oskilasyon d) Dairesel oskilasyon (Wang, 2016)

Oskilasyon yöntemi kaynak dikişi boyunca eş eksenli tanelerin oluşumunu tetikler. Bu durum kaynak dikişinin genişlemesi neticesinde sıcaklık farklılıklarının azalması ve oskilasyonun oluşturduğu karışım nedeniyle sütunsal dendrit yapıların kırılması ile açıklanabilir.



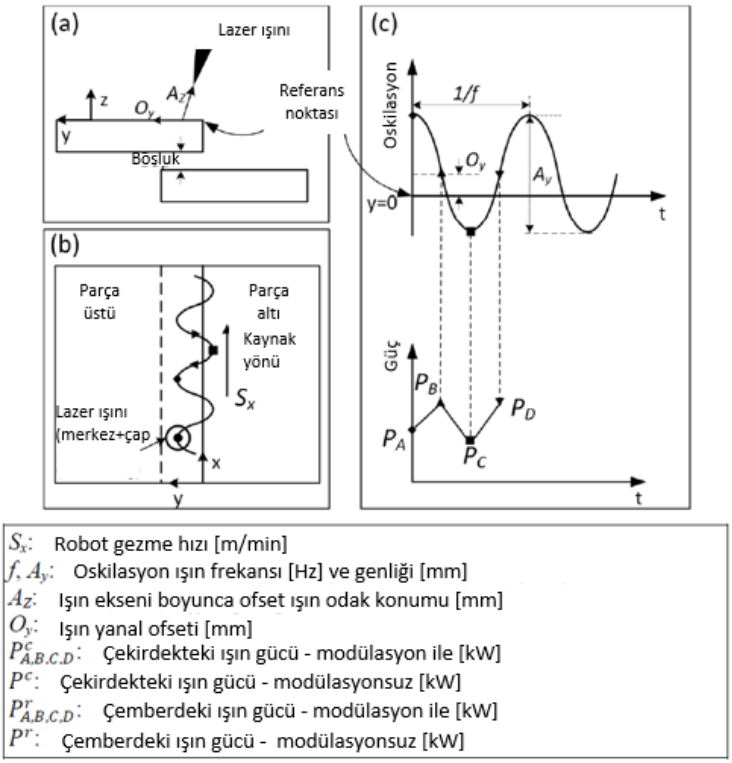
Şekil 1.19. Kaynak içyapısının EBSD sonuçları a. Oskilasyon yok b. Enine oskilasyon c. Boyuna oskilasyon d. Dairesel oskilasyon. (Wang, 2016)

İlave olarak oskilasyon yöntemi çekme dayanımında bir iyileşme sağlamazken uzama değerinde eş eksenel tanelerin oluşumunun tetiklenmesi neticesinde bir iyileşme gözlemlenir.



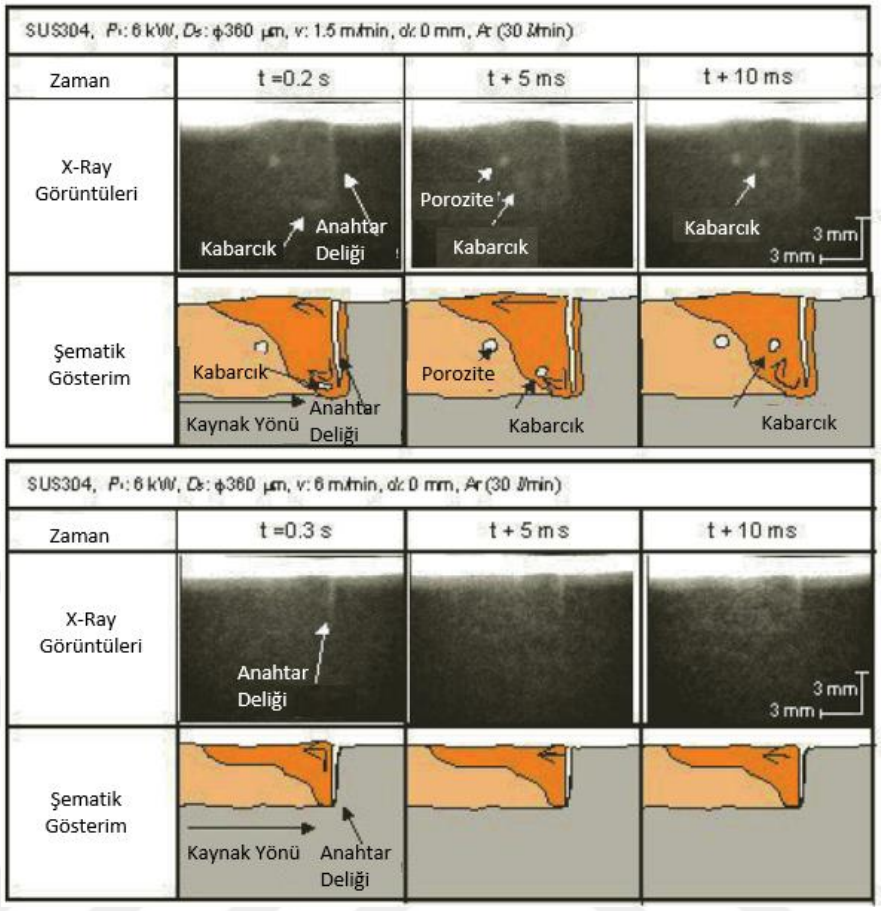
Şekil 1.20. Gerilme – Gerinim eğrileri (Wang, 2016)

Lazer kaynak parametreleri



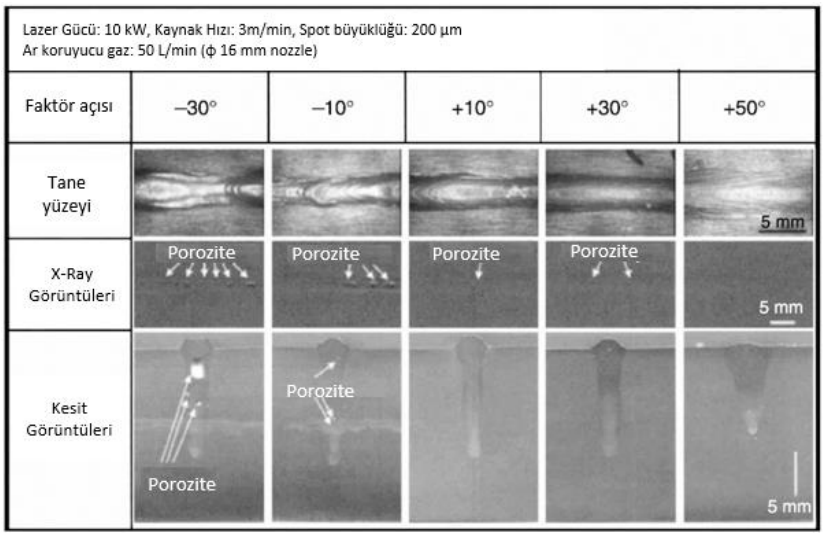
Şekil 1.21. Önemli lazer kaynak parametreleri a) Yandan görünüm b) Üstten görünüm c) Lazer oskilasyon ve güç değişimi (Sun, 2020)

Kaynak hızı ve porozite oluşumu arasındaki ilişki aşağıdaki görselde ortaya konulmuştur. Yavaş kaynak hızlarında gözenekler anahtar deliğinin aşağı bölgesinde oluşmaktadır. Fakat yüksek kaynak hızlarında bu gözlemlenmemiştir. Bu durum düşük kaynak hızlarında anahtar deliği yapısının aşağı bölgelerde çökmesi ile açıklanabilir.



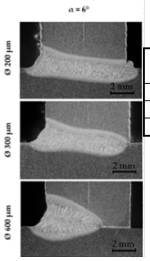
Şekil 1.22. Farklı hızlardaki fiber lazer kaynağı uygulamalarında anahtar deliği, eriyik akışı, gözenek ve eriyik havuzu geometrisi oluşumunun X-ray aktarımı (Katayama, 2010)

Lazer insidans açısı (Lazerin ışının ana metale vurma açısı) lazer kaynak kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir. Aşağıdaki görselde insidans açısının porozite ve penetrasyon oluşumuna etkisi ortaya konulmuştur. İnsidans açısı +50°'ye ulaştığında porozite oluşumu ortadan kalkmış olup, yaklaşık 10 mm penetrasyon elde edilmiştir.



Şekil 1.23. İnsidans açısının AA5083 lazer kaynağında porozite ve penetrasyona etkisi (Katayama, 2009)

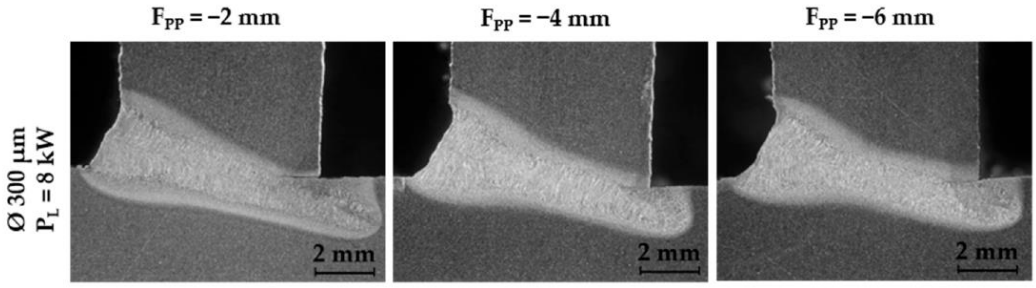
Fiber çapı azaldıkça daha yüksek ısı girdisi ve penetrasyon elde edilmiştir. Isı girdisine paralel sertlik değerinde kısmı bir düşüş gözlemlenmiştir.



Fiber Çapı [µm]	Penetrasyon Derinliği [mm]	Tane Genişliği [mm]	Füzyon Bölgesi mm^2	HAZ Bölgesi mm^2	Derinliğin genişliğe Oranı	Maximum Dayanıklılık HV5 [FZ/HAZ]
200	8,7	2,3	13,2	6,5	4	386/373
300	7,8	2,4	12,6	6	3,3	392/359
600	5,6	2,7	12	5,5	2	393/365

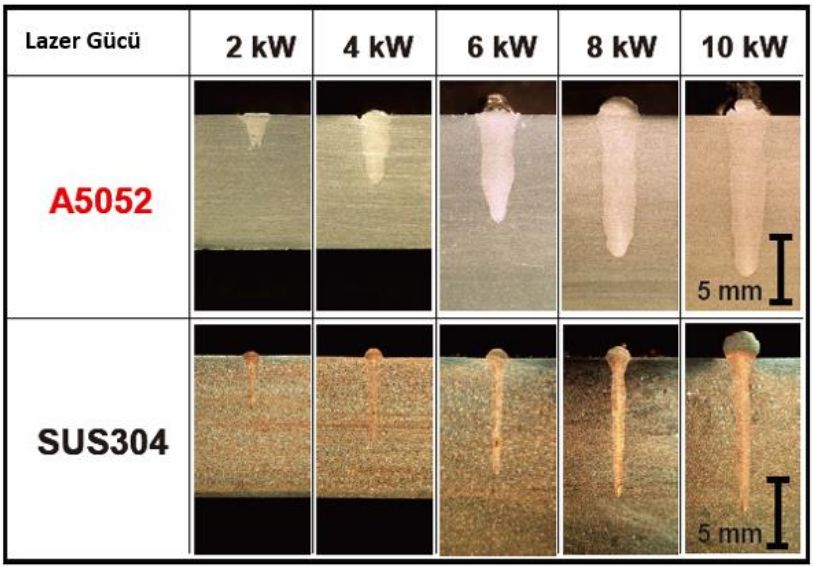
Şekil 1.24. Fiber çapının kaynak kalitesine etkisi (Unt, 2017)

Odak noktasındaki değişim kaynak penetrasyonunu kısmi olarak etkilemiştir, aşağıdaki görselde odak noktası kullanılan kaynak parametreleri ile de ilişkili olarak tam penetrasyona elde edilememiştir.



Şekil 1.25. Lazer kaynakta odak noktası etkisi (Diğer parametreler sabit) (Unt, 2017)

Lazer gücü artıkça daha yüksek penetrasyon elde edilebilmektedir. Aşağıdaki görselde iki farklı malzeme için farklı lazer güçlerindeki penetrasyon sonuçları incelenmiştir.



Şekil 1.26. AA5052 ve 304 çeliğinde farklı lazer gücü kullanılarak elde edilmiş lazer kaynaklı parçaların penetrasyon görselleri (Katayama, 2010)

Lazer ışın çapı azaldıkça kaynak dikiş yapısı daha dar ve derin görünüm almaktadır. İlişkili olarak gözenek oluşum değerlerinde de farklılıklar oluşmaktadır.

.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

Alüminyum alaşımlarının uygulama alanları son yıllarda büyük bir artış yaşamıştır. Yüksek mukavemete, düşük ağırlığa ve yüksek korozyon direncine sahip alüminyum alaşımları üzerine yoğun araştırma faaliyetleri son yıllarda teşvik edilmiştir. Bu da daha önce çelik olan konstrüksiyonların alüminyuma dönüşümüne katkı sağlamıştır.

Son yıllarda alüminyum alaşımlarının kaynaklanabilirlik avantajları üzerine yapılan çalışmalar artış göstermiştir. Üretici tarafından kaynak prosesi uygulanabilir, ekonomik ve kabul edilebilir olmalıdır. Bu nedenle, kaynaklanabilirlik bir malzemenin yaygın olarak kullanılması için önemli bir faktördür.

6000 serisi alüminyum alaşımları, metal bileşime uygun bir dolgu malzemesi kullanılmadığı takdirde katılaşma çatlaması gösterir. Kaynak füzyon sınırında nispeten erimiş baz metalde taneler arası çatlama sorunu 6000 serisi alaşımlarda daha çok gözlemlenmiştir (Pakdil, 2005).

Alüminyum alaşımlarına uygulanan lazer kaynağının başarısı; alaşımın bileşimine, işleme parametrelerine ve malzeme hazırlama tekniklerine bağlıdır. Çeliklerle kıyaslandığında kaynak prosedürlerinin geliştirilmesi daha zordur fakat işçilik standartlarının en zorlayıcı gereksinimlerini karşılayabilen çoğu alüminyum serisinde lazer kaynak tercih edilmektedir (Pakdil, 2005).

2019 yılında ‘Taguchi method for 304 Stainless Steel Nd-YAG Laser Beam Welding’ isimli makalede paslanmaz çeliğin Nd-YAG lazer ışın kaynağında Taguchi analizi için bir kalite faktörü olarak kaynaklı ve ana metalin bağıl çekme mukavemetini kullanmaktadır. Optimum işlem parametlerinin Taguchi metoduyla çeşitli varyasyonlarının yapılması, iyi bir sonuç elde edilmesine sebep olmuştur.

Numunelere lazer kaynağı uygulandıktan sonra; mikroyapı, kaynak özelliğinin yapısı, çekme testi ve Vickers sertlik testi yapılmıştır.

Bu çalışmada Taguchi analizi için 9 tane parametre seçilerek ve Minitab programı yardımıyla analizleri gerçekleşmiştir.

Çizelge 2.1. Taguchi deneysel metodunun parametreleri (Kuo, 2019)

Parametreler	Vuruş oranı (Hz)	Katı Çözüm	En yüksek güç (W)	Taban güç (W)	İş çevrimi (%)	Gezme hızı (mm/min)	Ön gaz akış hızı (l/min)	Arka gaz akış hızı (l/min)	Gaz tipi
	A	B	C	D	E	F	G	H	J
Seviye 1	100	Yok	2300	1700	30	1400	10	10	Ar
Seviye 2	200	Var	2000	1000	50	1600	16	16	He
Seviye 3	-	-	1700	300	70	1800	22	22	N2

Taguchi en uygun kombinasyonu B1C1D1E2F1 olarak seçer. Bu çalışmada kaynaklı numunelerin çekme dayanımının ana metalin çekme dayanımına orası "R" yerine yeni bir kalite faktörü tanımlanmıştır. Bu sabitin en iyi koşul olacağı düşünülmüştür.

Bu iyileştirmenin "R" aralığı 0.38852~1.01062 değerleri arasında kalır ve proses parametresinin optimum aralığı A1B1C1D1E2F1G3H3J3 olarak tespit edilmiştir. Kaynak sonuçlarının değişimini azaltmak için ise J, A, F, G faktörleri seçilmiştir. Akabinde öngörülen en optimum sonuç olarak R değeri 1,14 çıkmıştır.

304	J	A	F	G	$\sigma_{ult,\,weld}$, X		$\sigma_{ult,\,base}$, Y	R (X/Y)			
Treatment					X1 (MPa)	X2 (MPa)	Y (MPa)	R1	R2	SNR (db)	R-mean
N1	1	1	1	1	741.56	667.6	732.08	1.01295	0.911922	22.589	0.96244
N2	1	2	2	2	728.2	657.38	678.833	1.07272	0.968397	22.8192	1.02056
N3	1	3	3	3	694.2	655.76	696.847	0.9962	0.941039	27.9005	0.96862
N4	2	1	2	3	661.5	660.1	665.067	0.99464	0.992532	56.4891	0.99358
N5	2	2	3	1	669	658.95	772.587	0.86592	0.852914	39.41	0.85942
N6	2	3	1	2	702.6	655.67	682.847	1.02893	0.960201	26.2204	0.99456
N7	3	1	3	2	655.4	643.8	666.607	0.98319	0.965787	37.9741	0.97449
N8	3	2	1	3	655.2	656.77	666.047	0.98371	0.986072	55.4302	0.98489
N9	3	3	2	1	651	650.59	662.173	0.98313	0.982507	67.0235	0.98282

Şekil 2.1. SUS304 L9 deney sonuçları

Taguchi analizi sonrası ortaya çıkan sonuçlar;

- Ana metalin çekme mukavemetinin kaynaklı numunelerin çekme mukavemetine oranı olarak tanımlanan önerilen kalite faktörü "R" nin diğer varyasyonlar ile kontrol edildiğinde uygun bir faktör olduğu doğrulandı.
- İki aşamalı Taguchi analizi SUS304 paslanmaz çeliğin lazer ışın kaynağı için uygun bir çalışma olduğu sonucuna varılmıştır.
- Baz metalin daha büyük özellik varyasyonu ile başa çıkmak için, önerilen kalite faktörü R, Taguchi analizindeki kaynağın çekme mukavemetinden daha iyidir.

2022 yılında "Investigation of Mechanical Properties of Aluminum Alloys Welded by Laser Welding and Optimization of Welding Parameters Using Taguchi and ANOVA Methods" isimli çalışmada AA2024 malzemelerin lazer kaynağında uygulanan farklı kaynak parametrelerinin çekme mukavemeti üzerindeki etkileri incelenmiş ve en optimum kaynak parametreleri elde etmek için Taguchi ve ANOVA yöntemleri kullanılmıştır. Bu çalışmada 4 ana kaynak parametresi kullanılmıştır. Bunlar; lazer gücü, darbe süresi, ışın güç yoğunluğu ve darbe enerjisidir.

Kaynak parametreleri ve seviyeleri			
Parametre	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Lazer gücü (W)	1800	2200	2600
Darbe süresi (ms)	5	5,5	6
Işın güç yoğunluğu (W/mm^2)	6000	6500	7000
Darbe enerjisi (Joule)	9,5	10	10,5

Şekil 2.2. Kaynak parametreleri ve seviyeleri (Adin,2022)

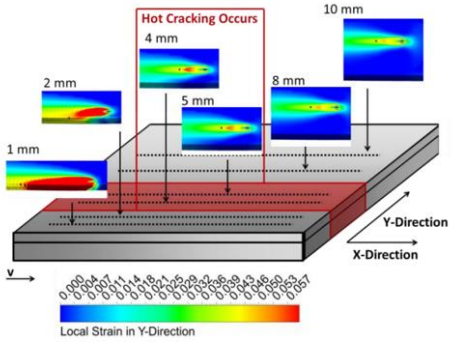
Taguchi deney tasarımı (Orthogonal array design, L9)				
Deney No	Lazer gücü (W)	Darbe süresi (ms)	Işın güç yoğunluğu (W/mm^2)	Darbe enerjisi (Joule)
D1	1800	5	6000	9.5
D2	1800	5.5	6500	10
D3	1800	6	7000	10.5
D4	2200	5	6500	10.5
D5	2200	5.5	7000	9.5
D6	2200	6	6000	10
D7	2600	5	7000	10
D8	2600	5.5	6000	10.5
D9	2600	6	6500	9.5

Şekil 2.3. Taguchi methoduna göre kaynak parametreleri ve seviyeleri

Sonuç olarak:

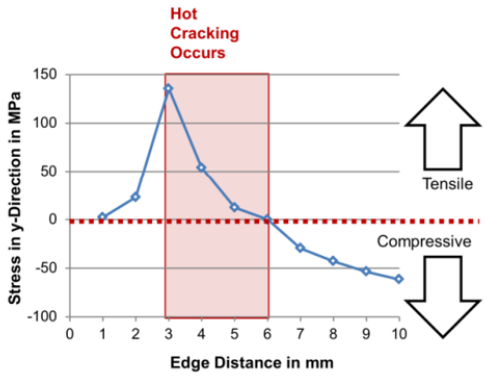
- Çekme testleri sonucunda, en düşük çekme dayanımı 113 MPa, en yüksek çekme dayanımı ise 174 MPa olarak elde edilmiştir.
- En düşük çekme dayanımı, 1800 W lazer gücü, 5 ms darbe süresi, 6000 W/mm2 ışın güç yoğunluğu ve 9,5 Joule darbe enerjisi kullanılan kaynak parametrelerinde, en yüksek çekme dayanımı ise 2600 W lazer gücü, 6 ms darbe süresi, 6500 W/mm2 ışın güç yoğunluğu ve 9,5 Joule darbe enerjisi kullanılan kaynak parametrelerinde elde edilmiştir.
- Yapılan çekme testleri sonucunda, genel olarak, kaynak parametre ve seviyelerinin artışına bağlı olarak çekme dayanımının olumlu etkilendiği görülmüştür. (Science & Abstract, 1800)

2012 yılında yapılan (Stritt et al., 2012) isimli çalışmada lazer kaynak esnasındaki sıcak çatlak oluşumu kaynak havuz geometrisi, bölgesel gerinim ve gerilimler ele alınarak 6xxx sac malzeme üzerinde incelenmiştir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Farklı kaynak köşe mesafelerinde hesaplanmış bölgesel gerinim

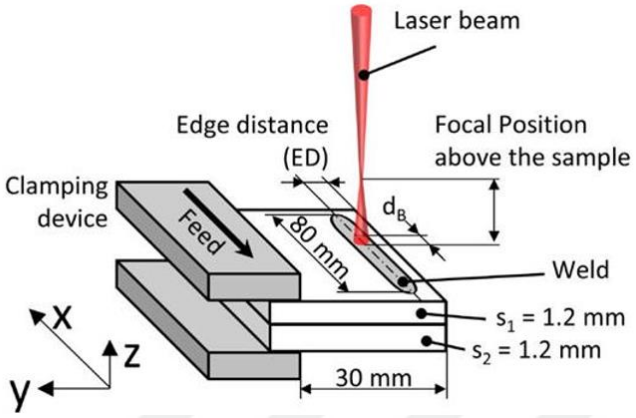
Kaynak dikiş geometrisi tekyönlü katılaşmadan çok yönlü katılaşmaya doğru geçiş yaptığı 3 mm'yi aşan köşe mesafesinde gözlemlenmiştir. Sıcak çatlak oluşumunun başlaması için çok yönlü katılaşma ve ilave olarak pozitif gerinim varlığının kaynak havuzunun arka tarafında oluşması gerekmektedir. Birincil gerilim analizi (First stress analysis) çalışması sonucunda kaynak havuzunun arka tarafında köşe mesafesi 3 mm olan çekme geriliminin maksimuma ulaştığı 6mm'den daha uzak mesafelerde ise basma gerilimine dönüş olduğu tespit edilmiştir (Şekil 2.5). Bu durum bölgesel stres analizi ile sıcak çatlak hassasiyeti arasındaki ilişkiyi ortaya koymuştur.



Şekil 2.5. Farklı köşe mesafeleri için kaynak havuzunun arka bölgelerinde ölçülmüş bölgesel gerilme değerleri

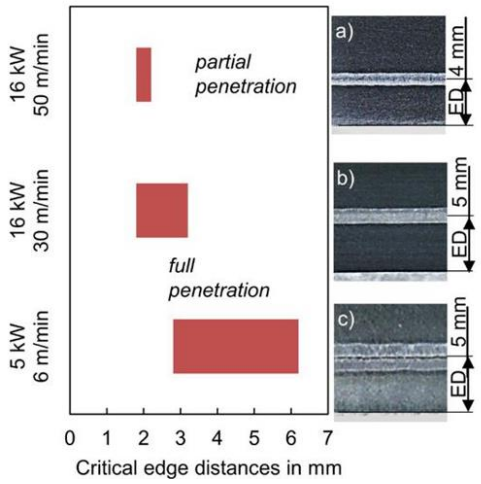
Diğer bir çalışmada ise (Hagenlocher, 2018) alüminyum alaşımları üzerinde lazer ışın kaynağının yüksek ilerleme hızları ile ilgili veriler sunulmuştur.

Alüminyum alaşımının köşe mesafesinin kaynak üzerinden etkisi Şekil 2.6'daki görselde gösterilmiştir. Bu çalışma 1,2 mm kalınlığındaki EN AW 6016 alüminyum saclar üzerinde yapılmıştır.



Şekil 2.6. Deneysel kaynak kurgusu

Köşe mesafesi 4 ve 5 mm olan alaşımın lazer kaynak çalışması yapılmıştır. Gerekli karılaştırmalar kaynak hızı artırılarak incelenmiştir. Kaynak hızı 6 m/min den 30m/min ye arttırıldığında merkez çatlaklarının oluşumu için gerekli kritik kenar mesafesi 3-6 mm'den 2-3 mm'ye düşmüştür. Kaynak hızı 50 m/min çıkarıldığında ise (kısmi penetrasyon) kritik kenar mesafesi daha da azalarak 2 mm'ye kadar düşmüştür (Şekil 2.7). Merkez hattı kaynaklarının oluşumundaki bu azalma yüksek ilerleme hızları nedeniyle termomekanik yüklerdeki düşüş ile ilişkilendirilmiştir.



Şekil 2.7. Kaynak hızlarının çatlak oluşumuna etkisi

Farklı kaynak hızları sonrası çatlak oluşum risk bölgeleri (kırmızı çizgi) ve dikiş görüntüleri a. 50 m/min b. 30 m/min c. 6 m/min. Merkez çatlak oluşumu 6 m/min kaynak hızında gözlemlenmektedir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada 3 mm ve 5 mm kalınlıklarına sahip EN AW 6063 alüminyum alaşımları kullanılmıştır. Toplamda 18 adet deneme çalışması yapılmış olup bunların 9 tanesi 3 mm kalınlığa ait iken, geri kalan 9 adedi 5 mm kalınlıktaki numunelere uygulanmıştır.

Alaşımın kimyasal özellikleri Çizelge 3.1'de ve mekanik özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

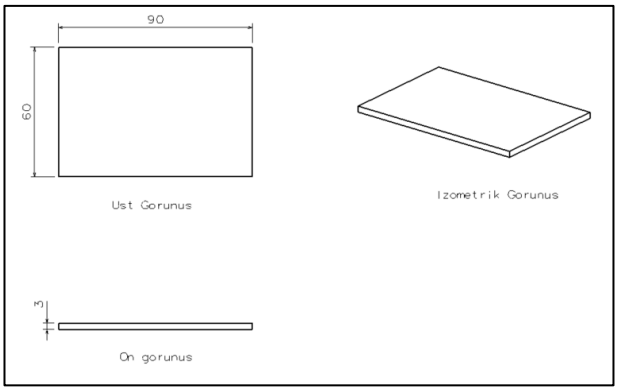
Çizelge 3.1. EN AW 6063 alaşımının kimyasal özellikleri

Element	**Si**	**Mg**	**Fe**	**Cr**	**Cu**	**Zn**	**Mn**	**Ti**	**Diğer**
Kimyasal Bileşim (%)	0,2-0,6	0,45-0,9	0,35	0,1	0,1	0,1	0,1	0,15	0,15

Çizelge 3.2. EN AW 6063 alaşımının mekanik özellikleri

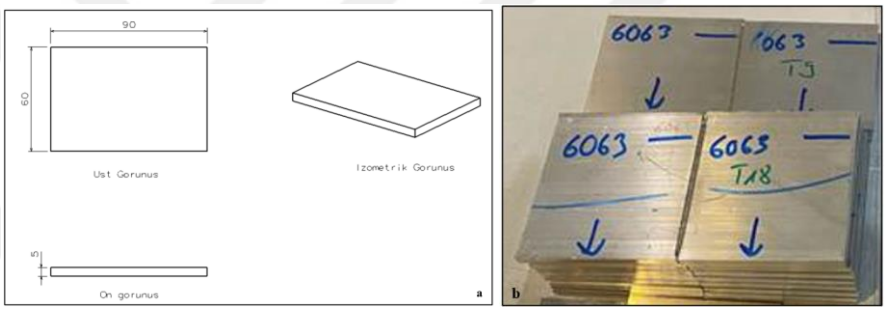
Akma Mukavemeti (MPa) min-max	**Çekme Mukavemeti (MPa) min-max**	**Uzama (%)**	**Sertlik (Brinell)**
170-210	205-245	12	75

Bu çalışmada iki farklı kalınlıkta 90 mm x 60 mm boyutlarında numune kullanılmıştır. 3 mm kalınlığına ait deneme numunelerinin 2 boyutlu çizimi Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Deney numunesinin boyutları (3mm)

5 mm kalınlığına ait deneme numunelerinin 2 boyutlu çizimi Şekil 3.2 (a)'da ve her iki kalınlığa ait numunelerin lazer kaynak işleminden önceki boyutları Şekil 3.2 (b)'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. (a) Deney numunesinin boyutları (5mm) (b) 3 mm ve 5 mm numunelere ait fotoğraf

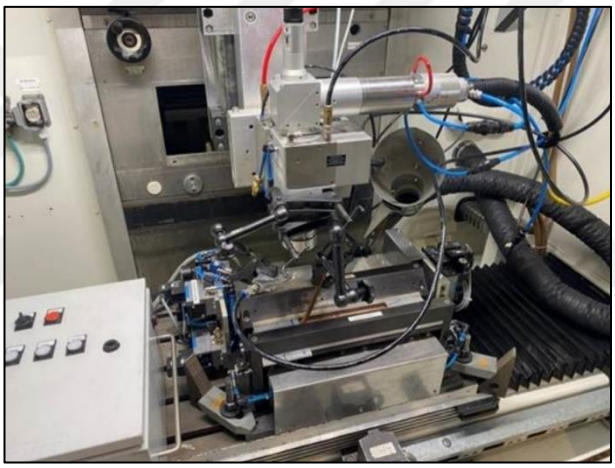
3.1Lazer Kaynağı Parametre Özellikleri

Her iki kalınlıklı numunelere uygulanan lazer kaynağının teknik özellikleri Çizelge 3.3'te belirtilmiştir. Tüm kaynak denemeleri "Single Mode Fiber Laser" tipi lazer kaynağı kapsamında gerçekleştirilmiştir. 4 farklı Oskilasyon çeşidinden en optimum sonuç Dairesel Oskilasyon'dan alındığı için çalışmalara bu şekilde devam edilmiştir.

Lazer kaynak operasyonundaki 4 ana parametrelerinin değişim aralıkları Çizelge 3.3'te belirtilmiştir. Bu çalışmada koruyucu gaz kullanılmamaktadır. Denemeler, Şekil 3.3'te gösterilen lazer kaynak makinesinde Fraunhofer Almanya'da gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.3. Lazer kaynak parametreleri

Parametre Özellikleri	
Lazer tipi	Single Mode Laser
Oskilasyon tipi	Dairesel
Oskilasyon büyüklüğü (mm)	0,1…0,2
Oskilasyon frekansı (Hz)	1000…4000
Lazerin gezme hızı	1…1,5 m/min
Gazın akış hızı	Argon gibi koruyucu gazlar kullanılmamıştır



Şekil 3.3. IPG 2 or 5 kW Single Mode fiber lazer cihazı

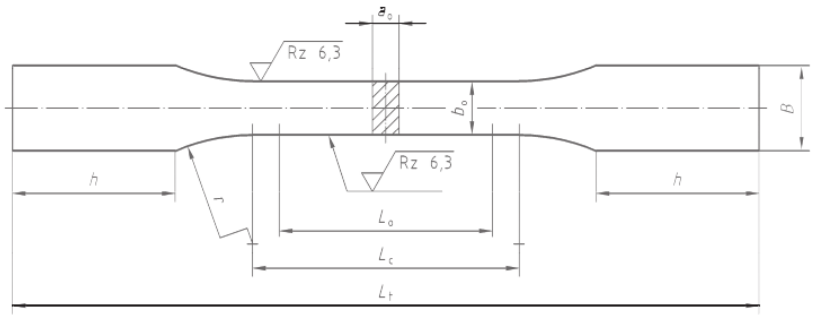
3.2 Mekanik Testlerin Yapılışı

3.2.1. Çekme testinin yapılışı

Ana metal ve 18 adet farklı konfigürasyonlar uygulanmış olan lazer kaynaklı numunelerin çekme dayanımı, akma dayanımı ve uzama değerlerini tespit edebilmek için çekme testi uygulanmıştır. Deneyleri gerçekleştirmek için 250 kN yük kapasiteli 'AUTOGRAPH' markalı Çekme-Basma Test Cihazı (Şekil 3.4) kullanılmıştır.



Şekil 3.4. Instron 34TM-50 çekme cihazı görüntüsü



Şekil 3.5. DIN 50125 Standardına ait çekme çubuğu görseli

Çizelge 3.4. DIN 50125 Standardına ait çekme çubuğu ölçüleri

Kalınlık (mm)	**a_0**	**B**	**b_0**	**L_0 (mm)**	**Lc (min)**	**Alan (So=a0xb0)**	**R**	**H (min)**
<5	3	15	10	30	40	30	15	30
≥5	5	15	10	40	50	50	20	30

Çekme çubukları (Şekil 3.5), ana metal de dahil olmak üzere DIN 50125 standardına uygun bir şekilde hesaplanarak (Şekil 3.6) elde edilmiş ve deneyleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.6. Çekme deneyi sonrası numunelerin görüntüleri (Her iki kalınlık değeri için de)

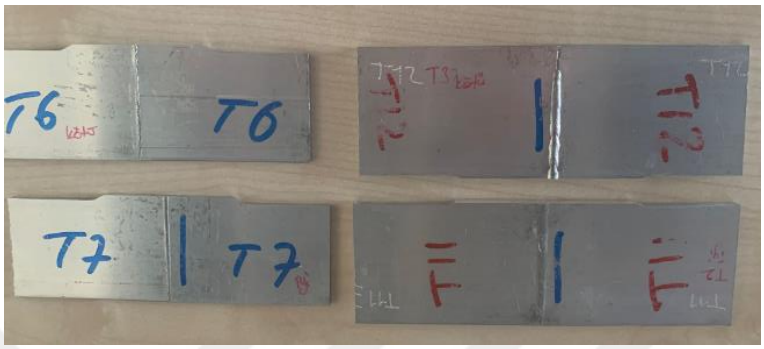
3.2.2. Mikro sertlik testinin yapılışı

Sertlik testi malzemelerin plastik deformasyona karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır. Bu çalışmada da incelenen numunelerin akma mukavemet değerlerini öğrenebilmek için mikro sertlik testleri gerçekleştirilmiş. Numuneler mikro sertlik testi öncesi bakalite alınmıştır. Akabinde parlatma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Lazer kaynak sonrası çekme testine tabii tutulan malzemelerin arasında en iyi ve en kötü çekme dayanımını gösteren numuneler üzerinden inceleme yapılmıştır. 3 mm ve 5 mm için de en iyi ve en kötü sonuçlar ayrı ayrı incelenmiştir.



Şekil 3.7. Metkon markasına ait Vickers sertlik ölçüm cihazı

Vickers sertlik cihazını (Şekil 3.7) kullanarak bakalite alınmış toplam 4 adet numunenin (Şekil 3.8) incelemesi gerçekleştirilmiştir. En başta kaynak bölgelerinden 1 mm uzaklaşarak ölçüm alınmıştır sonrasında kaynak bölgesi ile ölçüm mesafesi lineer bir şekilde arttırılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.8. Sertlik ölçümü yapılan numuneler (3mm ve 5 mm için)

3.2.3. Makro yapı analizlerinin yapılışı

Lazer kaynak yapılan birleştirme bölgelerinin makro yapı analizleri 'STRUERS' markalı cihaz ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.9). Makro yapı incelemesi, lazer kaynak bölgelerindeki nüfuziyet miktarını tespit edebilmek için uygulanmıştır. Bu çalışma 18 adet deneme çalışmasının tümü için yapılmıştır.

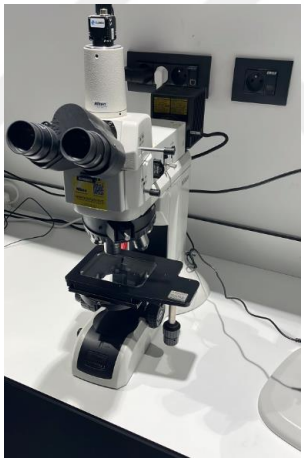


Şekil 3.9. STRUERS markalı penetrasyon ölçüm cihazı

3.2.4. Mikroyapı (tane yapısı) analizlerinin yapılışı

Kaynak yapılan yüzeylerdeki mikroyapı incelemeleri 'NIKON' markalı optik mikroskop ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.10).

Mikroyapı incelemesinden önce numuneler birtakım işlemlerden geçirilir. Numuneleri uygun ebatlarda kesim işlemine tabi tuttuktan sonra soğuk bakalite alınır. Bakalit işlemlerinde kabın içerisine akrilik reçine ve sertleştirici konur ve 25-30 dk bekletilir. Sonrasında kalıplardan çıkartılır sırasıyla 240-400-800-1200 ve 2500 grit zımpara kağıtları ile zımparalama işlemi tamamlanır. Ardından parlatma sıvısı ile patlatma işlemi de uygulanır. Son olarak tane yapısını görebilmek için elektrolitik dağlama yapılarak numuneler mikroyapı incelemesine hazır hale getirilmiş olur.



Şekil 3.10. NIKON marka mikroyapı inceleme cihazı

3.3. Kaynak Parametreleri ile Taguchi Optimizasyonunun Tasarlanması

3.3.1. Taguchi yöntemi

Bu deneysel çalışmada, kaynak yapılan alüminyum alaşımı için en uygun kaynak parametrelerinin bulunması amacıyla optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Kullanılan

optimizasyon yöntemi sayesinde en az sayıda deney yapılarak en uygun sonuçların bulunması sağlanmıştır. İmalat endüstrilerinde, gelişen teknoloji ile birçok optimizasyon yöntemi kullanılmaktadır. Kullanılan bu optimizasyon yöntemleri sayesinde en uygun imalat parametreleri elde edilmektedir. Optimizasyon yöntemleri arasında en çok kullanılan yöntemlerden biri ise Taguchi yöntemidir. Taguchi yöntemi, basitlik, uygulanabilirlik ve maliyet-etkin çözümler sunması gibi birçok avantajı ile diğer optimizasyon yöntemleri arasında dikkat çekmektedir. Taguchi metodu, optimum sonucun en az sayıda deneyle elde edilmesinin yanı sıra, aynı zamanda yüksek kalitede ürün geliştirilmesine yardımcı olur.

Bu çalışmada kaynak parametreleri 4 ana başlıkta incelenmiştir. Bunlar: Güç Aralığı (Power Range), Oskilasyon Büyüklüğü (Oscilastion Amplitude), Oskilasyon Frekansı (Oscilation Frequency), Lazer Gezme Hızı (Travel Speed) dır. Çizelge 3.3'te belirtilen parametre değerlerinin her bir adımını numune adedi ile ilişkilendirildiğinde optimum sonuca varmak için yüzlerce deneme yapılması gerektiği sonucuna varılmaktadır. Fakat Taguchi yöntemi ile bu sayı 18 adede düşürülmekle beraber aynı zamanda parametre değerleri de optimum sonucu elde etmek için birbiri ile ilişkilendirilmiştir.

Çizelge 3.5. Taguchi yönteminde uygulanan farklı parametre değerleri (3 mm)

	Birim	**1. Değer**	**2. Değer**	**3. Değer**
Power Range	**W**	1600	1500	1700
Oscilastion Amplitude	**Mm**	0,125	0,1	0,15
Oscilation Frequency	**Hz**	4000	2000	3000
Travel Speed	**m/min**	1,5	1,4	1,6

Çizelge 3.5'te belirtilen parametre değerleri ile Taguchi kapsamında çeşitli kombinasyonlar yapılmıştır. Bu parametre yaklaşımları 3 mm ve 5 mm kalınlıklı iki numune için de geçerlidir.

3 mm kalınlığa sahip numuneler için denemelerin hangi parametre değerine göre gerçekleştirileceği Çizelge 3.6'da belirtilmiştir.

Çizelge 3.6. 3 mm kalınlık için 9 adet denemenin eşleştirilmesi

Denemeler	TAGUCHI (3 mm x 3 mm Alın Kaynak)			
	Power Range	**Oscillation Amplitude**	**Oscillation Frequency**	**Travel Speed**
Deneme 1	1	1	1	1
Deneme 2	1	2	2	2
Deneme 3	1	3	3	3
Deneme 4	2	1	2	3
Deneme 5	2	2	3	1
Deneme 6	2	3	1	2
Deneme 7	3	1	3	2
Deneme 8	3	2	1	3
Deneme 9	3	3	2	1

Çizelge 3.7'de belirtilen değerler Çizelge 3.5'ten alınmıştır.

Çizelge 3.7. 3 mm kalınlık için 9 adet denemenin parametre değerleri ile gösterimi

Denemeler	TAGUCHI (3 mm x 3 mm Alın Kaynak)			
	Power Range	**Oscillation Amplitude**	**Oscillation Frequency**	**Travel Speed**
Deneme 1	1600	0,125	4000	1,5
Deneme 2	1600	0,1	2000	1,4
Deneme 3	1600	0,15	3000	1,6
Deneme 4	1500	0,125	2000	1,6
Deneme 5	1500	0,1	3000	1,5
Deneme 6	1500	0,15	4000	1,4
Deneme 7	1700	0,125	3000	1,4
Deneme 8	1700	0,1	4000	1,6
Deneme 9	1700	0,15	2000	1,5

Yalnızca “Power Range” parametre değerleri 5 mm’lik kupon çalışma için değiştirilmiştir. Geri kalan parametre değerleri aynı tutulmuştur. Bu fark Çizelge 3.8’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.8. Taguchi yönteminde uygulanan farklı parametre değerleri (5 mm)

	Birim	**1. Değer**	**2. Değer**	**3. Değer**
Power Range	**W**	2750	2850	2950
Oscilastion Amplitude	**Mm**	0,125	0,1	0,15
Oscilation Frequency	**Hz**	4000	2000	3000
Travel Speed	**m/min**	1,5	1,4	1,6

Parametre değerleri ile Taguchi kapsamında gerçekleştirilen kombinasyonlar 5 mm kalınlıklı iki numune için benzerdir.

Çizelge 3.9. 5mm kalınlık için 9 adet denemenin eşleştirilmesi

Denemeler	**TAGUCHI (5 mm x 5 mm Alın Kaynak)**			
	Power Range	**Oscillation Amplitude**	**Oscillation Frequency**	**Travel Speed**
Deneme 1	1	1	1	1
Deneme 2	1	2	2	2
Deneme 3	1	3	3	3
Deneme 4	2	1	2	3
Deneme 5	2	2	3	1
Deneme 6	2	3	1	2
Deneme 7	3	1	3	2
Deneme 8	3	2	1	3
Deneme 9	3	3	2	1

Çizelge 3.10’daki parametre değerleri Çizelge 3.9’daki kombinasyona göre aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. Bu çıktılara paralel lazer kaynak çalışması 5 mm kalınlıktaki 9 deneme için uygulanmıştır.

Çizelge 3.10. 5mm kalınlık için 9 adet denemenin parametre değerleri ile gösterimi

Denemeler	TAGUCHI (5 mm x 5 mm Alın Kaynak)			
	Power Range	**Oscillation Amplitude**	**Oscillation Frequency**	**Travel Speed**
Deneme 1	2750	0,125	4000	1,5
Deneme 2	2750	0,1	2000	1,4
Deneme 3	2750	0,15	3000	1,6
Deneme 4	2850	0,125	2000	1,6
Deneme 5	2850	0,1	3000	1,5
Deneme 6	2850	0,15	4000	1,4
Deneme 7	2950	0,125	3000	1,4
Deneme 8	2950	0,1	4000	1,6
Deneme 9	2950	0,15	2000	1,5

Çizelge 3.10'da belirtilen değerler Çizelge 3.8'den alınmıştır.

4. BULGULAR

4.1. 3mm Ana Metal ve Lazer Kaynaklı Numunelerin Çekme Testi Sonuçları

Ana metal de dahil olmak üzere her bir denemeden 2 adet çekme numunesi çıkartılarak sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Çekme ve Akma dayanımı hesaplanırken alan değeri bütün numuneler için sabit tutulmuştur. T7 numunesi en yüksek çekme dayanım değerlerine ulaşırken, T6 numunesi ise yapılan çalışmada en düşük çekme dayanım verisi sağlamıştır. Bu iki numune daha sonra mikrosertlik ve makro yapı verileri de incelenerek yorumlanmıştır.

Çizelge 4.1. 3 mm ana metal ve lazer kaynaklı numunelerin çekme testi sonuç tablosu

No	Kalınlık	Genişlik	Maksimum Kuvvet	Akma Dayanımı	Çekme Dayanımı	Uzama	Akma Dayanımı	Çekme Dayanımı	Uzama
	mm	mm	kN	N/mm²	MPa	%	N/mm²	MPa	%
AM	3	10	7,2	240	252	13,4	234	254	14,4
AM	3	10	7,35	228	256	15,4			
T1.1	3	10	3,73	85	130	3,4	85	128	2,9
T1.2	3	10	3,6	85	126	2,4			
T2.1	3	10	4,17	86	145	6,3	88	147	5,9
T2.2	3	10	4,28	89	149	5,5			
T3.1	3	10	3,74	91	130	3,1	90	130	3,0
T3.2	3	10	3,7	88	129	2,8			
T4.1	3	10	4,27	96	149	4,7	97	149	4,8
T4.2	3	10	4,27	97	149	4,8			
T5.1	3	10	4,2	96	147	4,8	97	148	4,6
T5.2	3	10	4,29	98	149	4,3			
T6.1	3	10	3,5	86	122	3,3	86	123,5	3,3
T6.2	3	10	3,5	85	125	3,2			
T7.1	3	10	4,3	93	150	12,9	93	150	9,5
T7.2	3	10	4,3	93	150	6,19			
T8.1	3	10	3,6	87	126	2,41	87	130	2,96
T8.2	3	10	3,8	87	133	3,5			
T9.1	3	10	4	86	140	4,8	86	140	4,7
T9.2	3	10	4	86	140	4,5			

4.2. 5mm Ana Metal ve Lazer Kaynaklı Numunelerin Çekme Testi Sonuçlar

Ana metal de dahil olmak üzere her bir denemeden 2 adet çekme numunesi çıkartılarak sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Çekme ve Akma dayanımı hesaplanırken alan değeri bütün numuneler için sabit tutulmuştur. T12 numunesi en yüksek çekme dayanım değerlerine ulaşırken, T13 numunesi ise yapılan çalışmada en düşük çekme dayanım verisi sağlamıştır. Bu iki numune daha sonra mikrosertlik ve makro yapı verileri de incelenerek yorumlanmıştır.

Çizelge 4.2. 5 mm ana metal ve lazer kaynaklı numunelerin çekme testi sonuç tablosu

No	Kalınlık	Genişlik	Maksimum Kopma Kuvveti	Akma Dayanımı	Çekme Dayanımı	Uzama	Akma Dayanımı	Çekme Dayanımı	Uzama
	mm	mm	kN	N/mm²	MPa	%	N/mm²	MPa	%
AM	5	10	12,9	227	254	13,7	228	253,5	13,2
AM	5	10	12,9	228	253	12,7			
T11	5	10	6,8	98	136	3,7	94	128,5	12,75
T11	5	10	6,1	90	121	21,8			
T12	5	10	7,3	92	144	3,6	94	144,5	4,45
T12	5	10	7,3	95	145	5,29			
T13	5	10	5,9	87	116	2,6	88	121,0	2,46
T13	5	10	6,3	88	126	2,32			
T14	5	10	6,9	92	138	3,05	92	138,5	3,03
T14	5	10	7	91	139	3			
T15	5	10	6,8	91	136	2,8	92	139,5	3,75
T15	5	10	7,2	93	143	4,7			
T16	5	10	6,5	88	129	2,64	88	125,0	2,87
T16	5	10	6,1	88	121	3,1			
T17	5	10	6,6	87	132	7,7	88	135,0	5,60
T17	5	10	6,9	89	138	3,5			
T18	5	10	6,8	92	135	4,2	89	132,0	3,60
T18	5	10	6,5	86	129	3			
T19	5	10	7	90	139	3,1	90	137,0	3,60
T19	5	10	6,7	89	135	4,1			

4.3. 3 mm Lazer Kaynak Makro Yapı Sonuçları

Lazer kaynak denemeleri sonrası olası kaynak kusurlarını tespit etmek amacıyla Struers Weld Expert cihazı kullanılarak kaynak dikişinin makro görüntüleri incelenmiş ve aşağıda yorumlanmıştır.

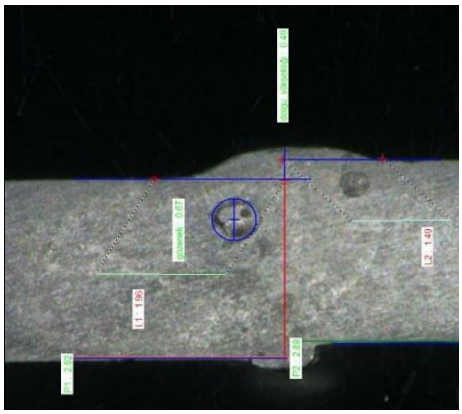
Çizelge 4.3. 3 mm lazer kaynak makro yapı ölçümleri

3mm + 3 mm	Gözenek (mm)	Kök Penetrasyonu	Dikiş Genişliği (L1)	Dikiş Genişliği (L2)
T1	0,067	Tam	1,96	1,49
T2	0	Tam	1,54	1,2
T3	0,7	Tam	1,5	1,31
T4	0	Tam	1,35	1,19
T5	0,51	Tam	1,31	1,4
T6	0,66	Tam	1,02	1,85
T7	0,47	Tam	1,05	1,08
T8	0,41	Tam	1,17	1,54
T9	0,68	Tam	1,36	1,61

Yapılan lazer kaynak denemelerinin penetrasyon ölçüleri Çizelge 4.3'te gösterilmiştir. Tüm denemelerde tam penetrasyon alınmıştır. Gözenek durumunun en az olması beklenir fakat bu çalışmada kabul edilebilir seviyededir. Dikiş genişlikleri her denemede farklılık göstermektedir.

4.3.1. T1 numaralı metalin penetrasyon analizi

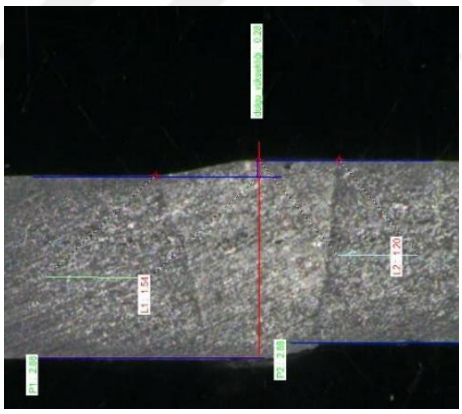
T1 numunesinin makro görüntüleri incelendiğinde birleştirilen parçaların doğrusallığının uygun olmadığı tespit edilmiştir. Bu durum sabitlemenin doğru yapılmamasından kaynaklanmıştır. Tam penetrasyon elde edilmiş olup, belli oranda dikiş ve kök taşkanlığı tespit edilmiştir. Gözenek oluşumu mevcuttur fakat 1 mm'nin altında bir değerdedir. En yüksek sağ ve sol dikiş genişliği bu numunede gözlemlenmiştir.



Şekil 4.1. T1 numaralı metalin lazer kaynak penetrasyon görüntüsü

4.3.2. T2 numaralı metalin penetrasyon analizi

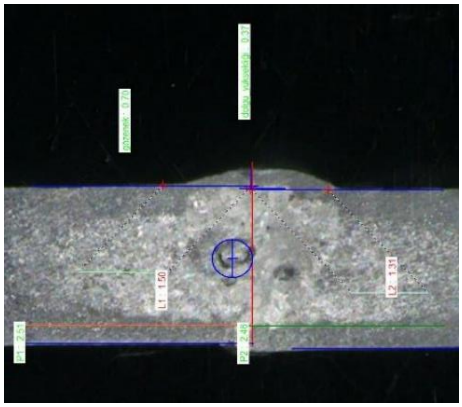
T2 numunesinin makro görüntüleri incelendiğinde birleştirilen parçaların doğrusallığında T1 numunesine benzer şekilde bir sapma olduğu tespit edilmiştir. Tam penetrasyon elde edilmiş olup, T1 numunesi kadar olmasa da belli oranda dikiş ve kök taşkanlığı tespit edilmiştir. Gözenek oluşumu mevcut değildir.



Şekil 4.2. T2 numaralı metalin lazer kaynak penetrasyon görüntüsü

4.3.3. T3 numaralı metalin penetrasyon analizi

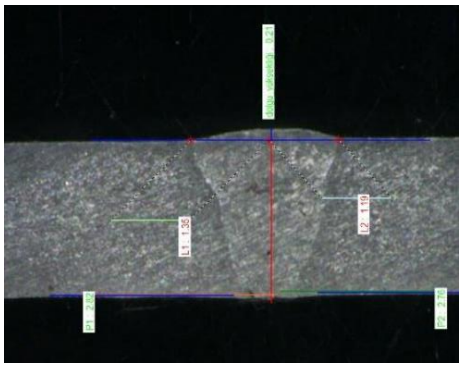
T3 numunesinin makro görüntüleri incelendiğinde birleştirilen parçaların doğrusallığı uygundur. Tam penetrasyon elde edilmiş olup, belli oranda dikiş taşkanlığı tespit edilmiştir. Gözenek oluşumu mevcuttur fakat 1 mm'nin altındadır.



Şekil 4.3. T3 numaralı metalin lazer kaynak penetrasyon görüntü

4.3.4. T4 numaralı metalin penetrasyon analizi

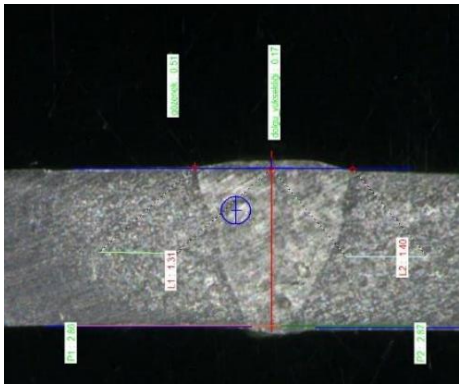
T4 numunesinin makro görüntüleri incelendiğinde birleştirilen parçaların doğrusallığında bir sıkıntı olmadığı tespit edilmiştir. Tam penetrasyon elde edilmiş olup, belli oranda dikiş taşkanlığı tespit edilmiştir. Gözenek oluşumu gözlemlenmemiştir.



Şekil 4.4. T4 numaralı metalin lazer kaynak penetrasyon görüntüsü

4.3.5. T5 numaralı metalin penetrasyon analizi

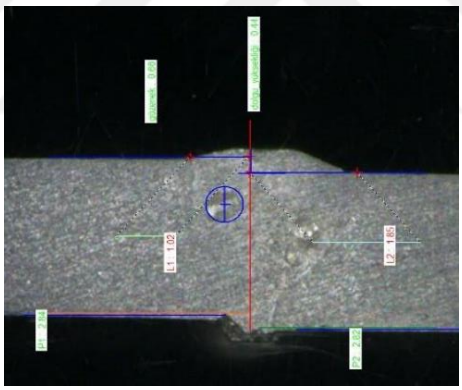
T5 numunesinin makro görüntüleri incelendiğinde birleştirilen parçaların doğrusallığında bir sıkıntı mevcut değildir. Tam penetrasyon elde edilmiş olup, az miktarda dikiş ve kök taşkanlığı tespit edilmiştir. Gözenek oluşumu 0,51 mm büyüklüğündedir.



Şekil 4.5. T5 numaralı metalin lazer kaynak penetrasyon görüntüsü

4.3.6. T6 numaralı metalin penetrasyon analizi

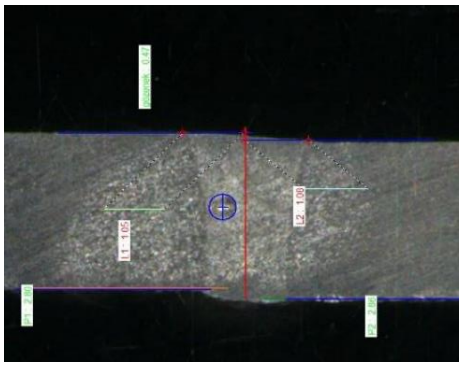
T6 numunesinin makro görüntüleri incelendiğinde birleştirilen parçaların doğrusallığında bir sapma mevcuttur. Tam penetrasyon elde edilmiş olup, belli oranda dikiş ve kök taşkanlığı tespit edilmiştir. Gözenek oluşumu 0,66 mm olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.6. T6 numaralı metalin lazer kaynak penetrasyon görüntüsü

4.3.7. T7 numaralı metalin penetrasyon analizi

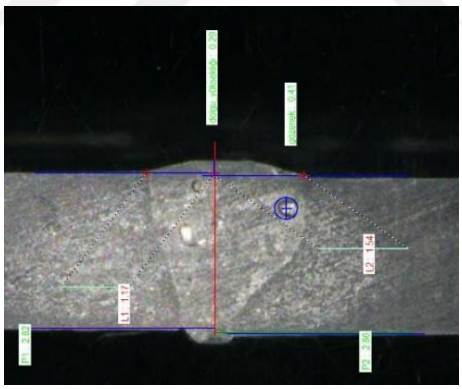
T7 numunesinin makro görüntüleri incelendiğinde birleştirilen parçaların doğrusallığında ciddi bir sapma yoktur. Tam penetrasyon elde edilmiş olup, belli oranda kök taşkanlığı tespit edilmiştir. Gözenek oluşumu mevcuttur, büyüklüğü ise 0,47 mm'dir. En düşük sağ ve sol dikiş genişliği tespit edilmiştir.



Şekil 4.7. T7 numaralı metalin lazer kaynak penetrasyon görüntüsü

4.3.8. T8 numaralı metalin penetrasyon analizi

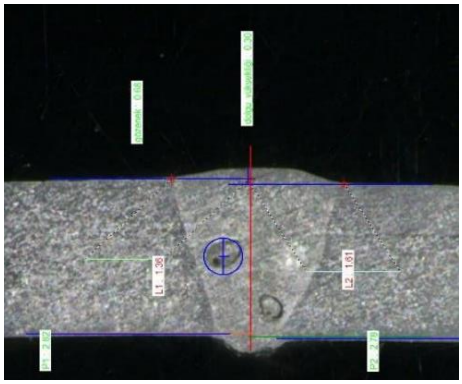
T8 numunesi uygun doğrusallığa sahiptir. Tam penetrasyon elde edilmiş olup, belli oranda dikiş ve kök taşkanlığı tespit edilmiştir. Gözenek büyüklüğü 0,41 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.8. T8 numaralı metalin lazer kaynak penetrasyon görüntüsü

4.3.9. T9 numaralı metalin penetrasyon analizi

T9 numunesinin makro görüntüleri incelendiğinde birleştirilen parçaların doğrusallığında ciddi bir sıkıntı gözlemlenmemiştir. Tam penetrasyon elde edilmiş olup, belli oranda dikiş ve kök taşkanlığı tespit edilmiştir. Gözenek oluşumu 0,68 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.9. T9 numaralı metalin lazer kaynak penetrasyon görüntüsü

Çizelge 4.4. 3 mm kalınlıklı denemelerde gözlemlenen en uç farklar

3mm + 3 mm	Gözenek (mm)	Kök Penetrasyonu	Dikiş Genişliği (L1)	Dikiş Genişliği (L2)	Çekme Dayanımı (MPa)
T6	0,066	Tam	1,02	1,85	123
T7	0,47	Tam	1,05	1,08	150

Çekme dayanım sonuçlarında en büyük kontrastı ortaya koyan iki numunenin makro görüntü verileri incelendiğinde kaynak dikiş geometrilerinde farklılıklar olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 4.4). T7 numunesinin kaynak doğrusallığı T6 numunesine göre çok daha iyi derecededir. Dikiş ve Kök taşkanlığı olarak T7 numunesi T6 numunesinden daha düşük derecededir. Kaynak kalitesindeki bu sapmalar çekme test verilerine yansıdığı yorumlanmıştır.

4.4. 5 mm Lazer Kaynak Makro Yapı Sonuçları

Makro yapı görüntüleri Struers Weld Expert cihazında zımparalama ve dağlama sonrası 5 mm'lik parçaların kaynak bölgeleri içinde incelenmiş olup aşağıda yorumlanmıştır.

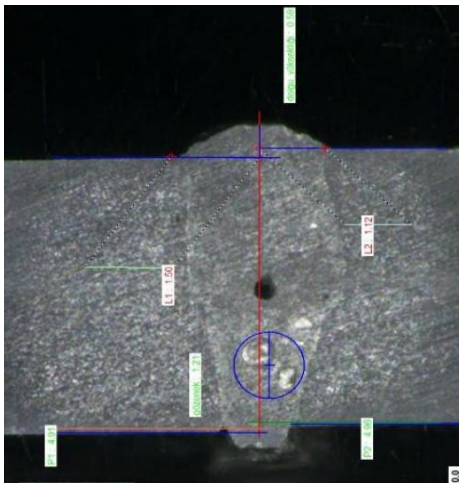
Çizelge 4.5. 5 mm lazer kaynak makro yapı ölçümleri

5mm + 5 mm	Gözenek (mm)	Kök Penetrasyonu	Dikiş Genişliği (L1)	Dikiş Genişliği (L2)
T11	1,21	Tam	1,5	1,12
T12	0,38	Tam	1,82	1,82
T13	0	Tam	1,6	1,87
T14	0,45	Tam	1,85	1,7
T15	0,33	Tam	1,96	1,74
T16	0,43	Tam	1,23	1,06
T17	0,59	Tam	1,91	2,25
T18	1,75	Tam	2,07	2,91
T19	1,85	Tam	2	1,75

Yapılan lazer kaynak denemelerinin penetrasyon detayları Çizelge 4.5'te gösterilmiştir. Tüm denemelerde tam penetrasyon alınmıştır. Genelde gözenek durumunun en az olması beklenir fakat bu çalışmada kabul edilebilir seviyededir. Dikiş genişlikleri her denemede farklılık göstermektedir.

4.4.1. T11 numaralı metalin penetrasyon analizi

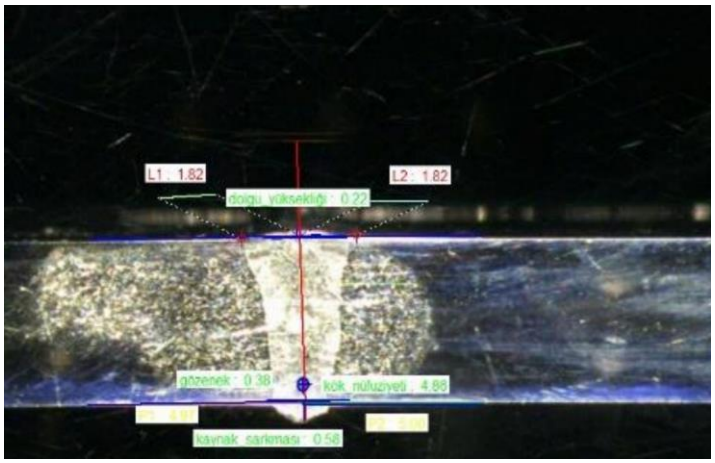
T11 numunesinin makro görüntüleri incelendiğinde birleştirilen parçaların doğrusallığında kısmi sapma tespit edilmiştir. Tam penetrasyon elde edilmiş olup, belli oranda dikiş ve kök taşkanlığı tespit edilmiştir. Gözenek oluşumu mevcut olup 1,21 mm olarak ölçülmüştür. Sağ ve sol dikiş genişliği T15 numunesi ile en düşük değerlere sahiptir.



Şekil 4.10. T11 numaralı metalin lazer kaynak penetrasyon görüntüsü

4.4.2. T12 numaralı metalin penetrasyon analizi

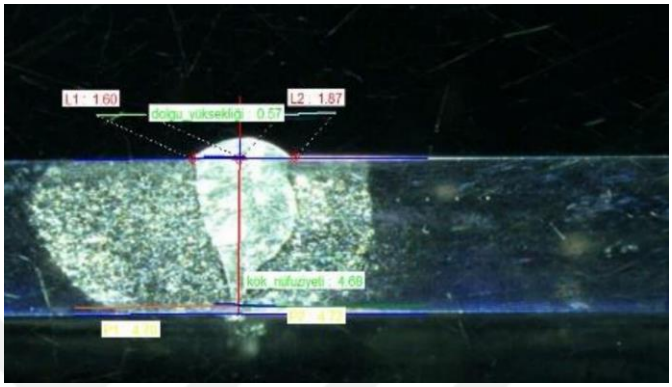
T12 numunesinin makro görüntüleri incelendiğinde birleştirilen parçaların doğrusallığında sapma mevcut değildir. Tam penetrasyon elde edilmiş olup, çok düşük miktarda dikiş ve belli oranda da kök taşkanlığı tespit edilmiştir. Gözenek oluşumu mevcut olup 0,38 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.11. T12 numaralı metalin lazer kaynak penetrasyon görüntüsü

4.4.3. T13 numaralı metalin penetrasyon analizi

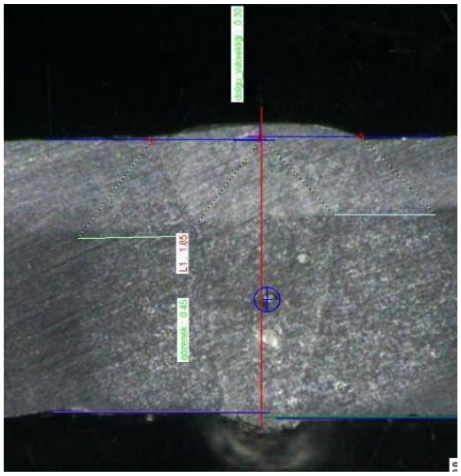
T13 numunesinin makro görüntüleri incelendiğinde birleştirilen parçaların doğrusallığında sapma tespit edilmemiştir. Tam penetrasyon elde edilememiş olup, belli oranda dikiş taşkanlığı tespit edilmiştir. Gözenek oluşumu mevcut değildir.



Şekil 4.12. T13 numaralı metalin lazer kaynak penetrasyon görüntüsü

4.4.4. T14 numaralı metalin penetrasyon analizi

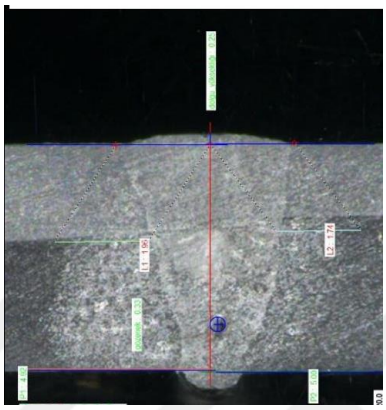
T14 numunesinin makro görüntüleri incelendiğinde birleştirilen parçaların doğrusallığında ciddi bir sapma yoktur. Tam penetrasyon elde edilmiş olup, belli oranda dikiş ve kök taşkanlığı tespit edilmiştir. Gözenek oluşumu mevcut olup 0,45 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.13. T14 numaralı metalin lazer kaynak penetrasyon görüntüsü

4.4.5. T15 numaralı metalin penetrasyon analizi

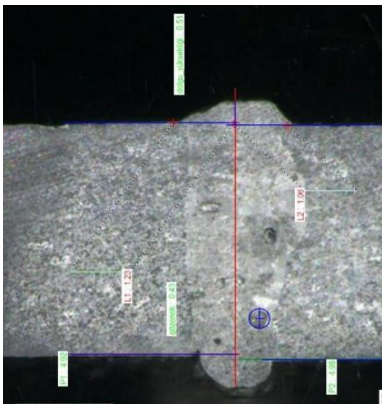
T15 numunesinin makro görüntüleri incelendiğinde birleştirilen parçaların doğrusallığında sapma tespit edilmemiştir. Tam penetrasyon elde edilmiş olup, belli oranda dikiş ve kök taşkanlığı tespit edilmiştir. Gözenek oluşumu mevcut olup 0,33 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.14. T15 numaralı metalin lazer kaynak penetrasyon görüntüsü

4.4.6. T16 numaralı metalin penetrasyon analizi

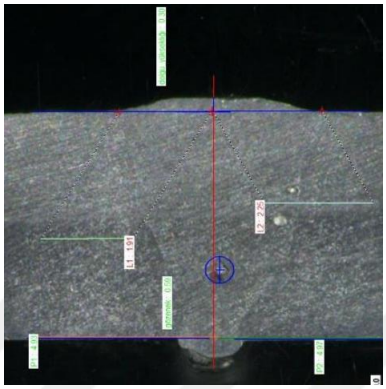
T16 numunesinin makro görüntüleri incelendiğinde birleştirilen parçaların doğrusallığında sapma tespit edilmemiştir. Tam penetrasyon elde edilmiş olup, belli oranda dikiş ve kök taşkanlığı tespit edilmiştir. Gözenek oluşumu mevcut olup 0,43 mm olarak ölçülmüştür. T11 numunesi ile en düşük sağ ve sol dikiş genişliğine sahiptir.



Şekil 4.15. T16 numaralı metalin lazer kaynak penetrasyon görüntüsü

4.4.7. T17 numaralı metalin penetrasyon analizi

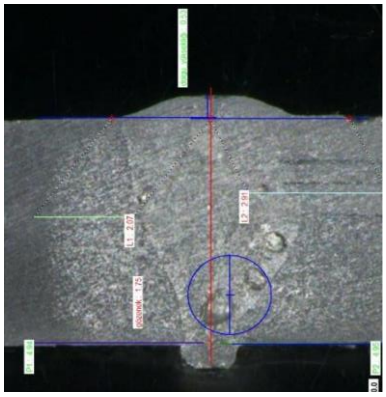
T17 numunesinin makro görüntüleri incelendiğinde birleştirilen parçaların doğrusallığında sapma tespit edilmemiştir. Tam penetrasyon elde edilmiş olup, belli oranda dikiş ve kök taşkanlığı tespit edilmiştir. Gözenek oluşumu mevcut olup 0,59 mm olarak ölçülmüştür. T18 numunesi ile en büyük sağ ve sol dikiş genişliğine sahiptir.



Şekil 4.16. T17 numaralı metalin lazer kaynak penetrasyon görüntüsü

4.4.8. T18 numaralı metalin penetrasyon analizi

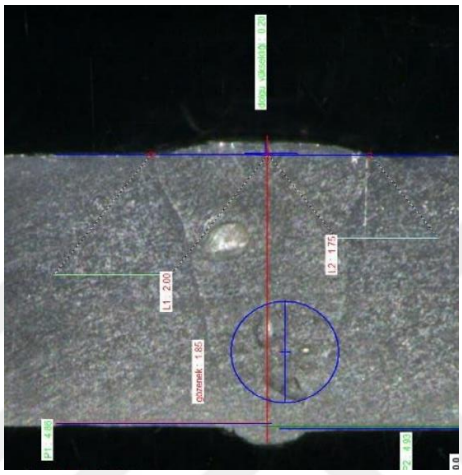
T18 numunesinin makro görüntüleri incelendiğinde birleştirilen parçaların doğrusallığında sapma tespit edilmemiştir. Tam penetrasyon elde edilmiş olup, belli oranda dikiş ve kök taşkanlığı tespit edilmiştir. En büyük gözenek oluşumu T19 numunesi ile bu numunede tespit edilmiştir. Gözenek büyüklüğü 1,75 mm olarak ölçülmüştür. T17 numunesi ile en büyük sağ ve sol dikiş genişliğine sahiptir.



Şekil 4.17. T18 numaralı metalin lazer kaynak penetrasyon görüntüsü

4.4.9. T19 numaralı metalin penetrasyon analizi

T19 numunesinin makro görüntüleri incelendiğinde birleştirilen parçaların doğrusallığında sapma tespit edilmemiştir. Tam penetrasyon elde edilmiş olup, belli oranda dikiş ve kök taşkanlığı tespit edilmiştir. En büyük gözenek oluşumu T18 numunesi ile bu numunede tespit edilmiştir. Gözenek büyüklüğü 1,85 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.18. T19 numaralı metalin lazer kaynak penetrasyon görüntüsü

Çizelge 4.6. 5 mm kalınlıklı denemelerde gözlemlenen en uç farklar

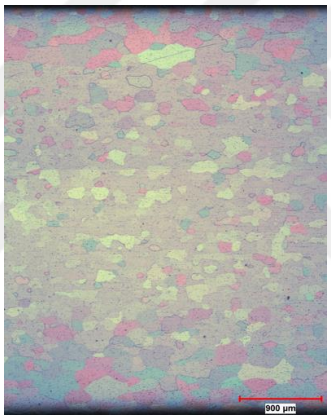
5 mm + 5 mm	Gözenek (mm)	Kök Penetrasyonu	Dikiş Genişliği (L1)	Dikiş Genişliği (L2)	Çekme Dayanımı (MPa)
T12	0,38	Tam	1,82	1,82	144
T13	0	4,68	1,6	1,87	121

Çekme dayanım sonuçlarında en büyük kontrastı ortaya koyan iki numunenin makro görüntü verileri incelendiğinde kaynak dikiş geometrilerinde farklılıklar olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 4.6). T12 ve T13 numuneleri doğrusallık anlamında benzerlik göstermelerine rağmen, T13 numunesinde tam penetrasyon elde edilememiştir. İlave olarak dikiş taşkanlık derecesi T13 numunesinde daha üst seviyededir.

4.5. Lazer Kaynaklı Numunelerin Mikroyapı Analizi

Kaynaklı numunelerin tane yapısındaki farklılıklar numune kalınlığından bağımsız olduğu için bu çalışma 3 mm ve 5 mm için ortaklaştırılmıştır. İncelemeler laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir.

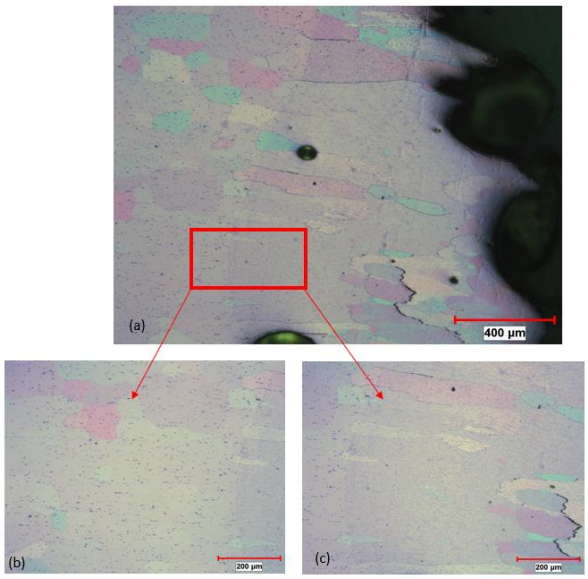
Bu çalışmada kullanılan EN AW 6063 metalinin kaynaktan önce ve kaynaktan sonra olmak üzere mikroskobik incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Kaynaktan önce ana metalin tane yapısı Şekil 4.19'da gösterilmiştir. Lazer Kaynağından önce taneler eş eksenli bir dağılım göstermektedir (Şekil 4.19).



Şekil 4.19. EN AW 6063 ana metalin tane yapısı

Ana metal eş eksenli tane yapısına sahiptir (Şekil 4.19). Fakat lazer kaynak sonrası kaynak dikişinde eşeksenli yapı merkezinde gözlemlenirken, merkez ile ısıdan etkilenmiş bölge arasında ise kolumnar tane yapısına sahip bir geçiş bölgesi bulunmaktadır (Şekil 4.20).

Daha önce yapılan (Wang et al., 2016) isimli çalışmada tane yapıları şematik olarak açıklanmıştır. Yapılan bu çalışmada varılan sonuçlar aynı zamanda literatüre uygunluğunun da bir kanıtı niteliğindedir.



Şekil 4.20. Lazer kaynağın tane yapısına etkisi a) Geçiş bölgesi b) Isıdan etkilenmiş bölge c) Kaynak dikişi

4.6. 3 mm Mikro Sertlik Sonuçları

Çizelge 4.1'de çekme dayanımının en yüksek ve en düşük çıktığı test numuneleri üzerinde mikro sertlik çalışmaları yapılmıştır. İlaveten ana metal üzerinde de sertlik ölçümü yapılarak sonuçların doğruluğu kontrol edilmiştir.



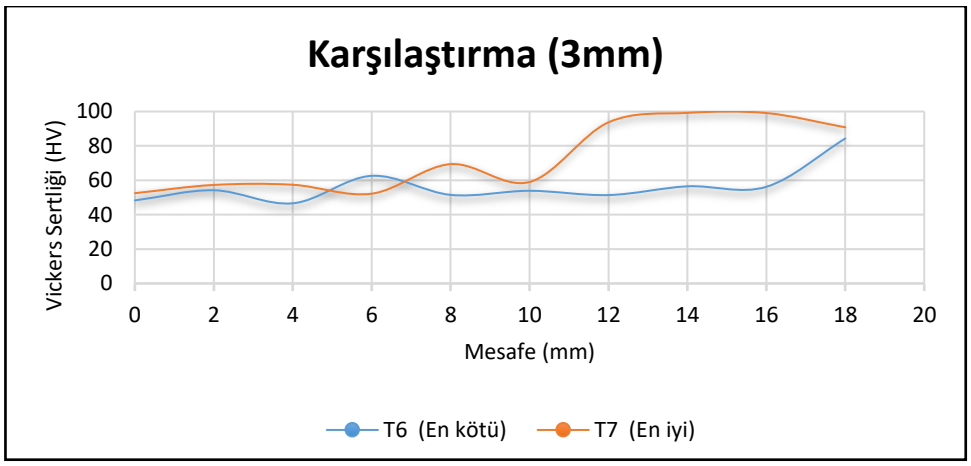
Şekil 4.21. 3 mm sertlik ölçümü yapılan numuneler

3 mm ve 5 mm kalınlığa sahip ana metalin yüzeyinden rastgele ölçümler alınmıştır. Bu ölçümler Çizelge 4.7'de sırasıyla belirtilmiştir.

Çizelge 4.7. 3 mm ve 5 mm ana metalin üzerinden alınan sertlik sonuçları

3 mm Ana Metal	
No	**Sertlik Değeri (HV)**
1	92,4
2	92,9
3	103,2

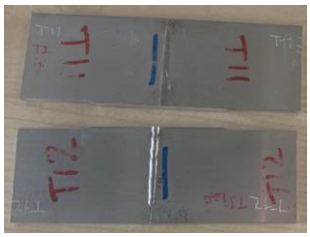
T6 numunesinin mikro sertlik sonuçları incelendiğinde minimum değer 48,3 HV iken maksimum değer ise 84.4 HV olduğu görülmüştür. T7 numunesinin mikro sertlik sonuçları incelendiğinde minimum değer 52,5 HV iken maksimum değer ise 90,8 HV olduğu görülmüştür. Mikro sertlik ölçümleri kaynak dikişinden 2'şer mm uzaktaki mesafelerden alınmıştır. Sertlik grafiği incelendiğinde ve ana metal sertlik ölçümü de göz önüne alındığında kaynak dikişinin merkezinden (Mesafe = 0) ana metalde doğru ilerledikçe sertlikte bir yükselme olduğu tespit edilmiştir. Sertlik sonuçları iki numune içinde benzerdir.



Şekil 4.22. T6 (en kötü) ve T7 (en iyi) numunelerinin sertlik grafikleri

4.7. 5 mm Mikro Sertlik Sonuçları

Çizelge 4.2'de çekme dayanımının en yüksek ve en düşük çıktığı test numuneleri üzerinde mikro sertlik çalışmaları yapılmıştır. İlaveten ana metal üzerinde de sertlik ölçümü yapılarak sonuçların doğruluğu kontrol edilmiştir.



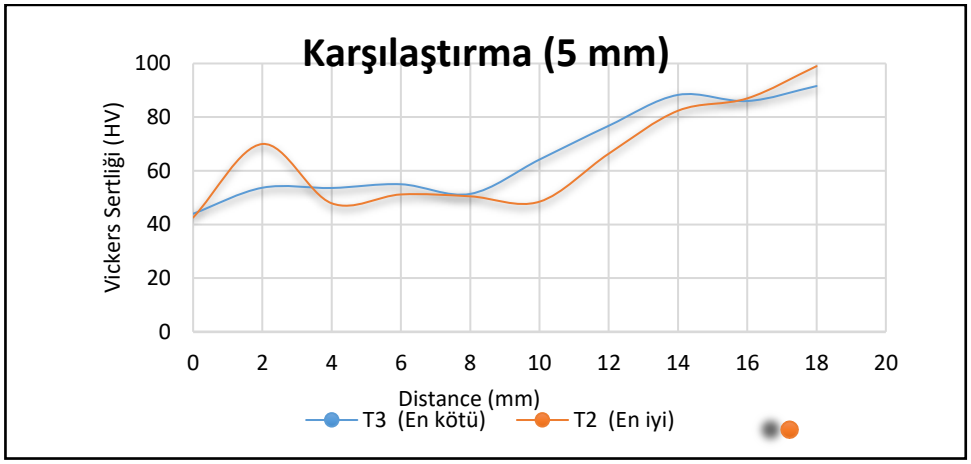
Şekil 4.23. 5 mm sertlik ölçümü yapılan numuneler

5 mm kalınlığa sahip ana metalin yüzeyinden rastgele ölçümler alınmıştır. Bu ölçümler Çizelge 4.8'de sırasıyla belirtilmiştir.

Çizelge 4.8. 5 mm ana metalin sertlik sonuçları

5 mm Ana Metal	
No	**Sertlik Değeri (HV)**
1	91,7
2	96,8
3	85,3

T12 numunesinin mikro sertlik sonuçları incelendiğinde minimum değer 44 HV iken maksimum değer ise 91,6 HV olduğu görülmüştür. T13 numunesinin Mikro sertlik sonuçları incelendiğinde minimum değer 42,6 HV iken maksimum değer ise 99 HV olduğu görülmüştür. Sertlik grafiği incelendiğinde ve ana metal sertlik ölçümü de göz önüne alındığında kaynak dikişinin merkezinden (Mesafe = 0) ana metalde doğru ilerledikçe sertlikte bir yükselme olduğu tespit edilmiştir. Sertlik sonuçları iki numune içinde benzerdir.



Şekil 4.24. T13 (en kötü) ve T12 (en iyi) numunelerinin sertlik grafikleri

4.8. 3 mm Taguchi Sonuçları

Deneysel tasarım aşamasında Taguchi yöntemi tercih edilmiştir. Bu kapsamda daha az sayıdaki deney ile faktörlerin doğru bir şekilde etkilerinin değerlendirilmesi mümkün olabilmektedir. Bu çalışma kapsamında dört farklı işlem parametresinin üç farklı seviyesi için L9 ortogonal dizini kullanılmıştır. Yani Taguchi deneysel tasarımı dört sütün ve dokuz satırdan oluşmuştur. Proses parametreleri olarak Lazer Gücü, Genlik, Frekans, Kaynak Hızı kullanılmıştır. Her bir parametre içinde üç seviye seçilmiştir. Seçilen proses parametreleri ve seviyeleri Çizelge 4.10'da paylaşılmıştır. Bu çalışma iki farklı kalınlık için tekrarlanmıştır.

Taguchi yönteminde 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 çekme dayanımı hedeflendiği için büyük olan değer iyi (larger the better) aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır:

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

Bu formülde “y” karakteristik değeri (çekme dayanımı), “n” ifadesi ise gerçekleştirilen deney sayısını belirtmektedir. Bütün bu hesaplamalar sonucunda her faktör için belirlenen en yüksek S/N oranı en yüksek çekme dayanımını işaret etmektedir. 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 (Kara, 2022).

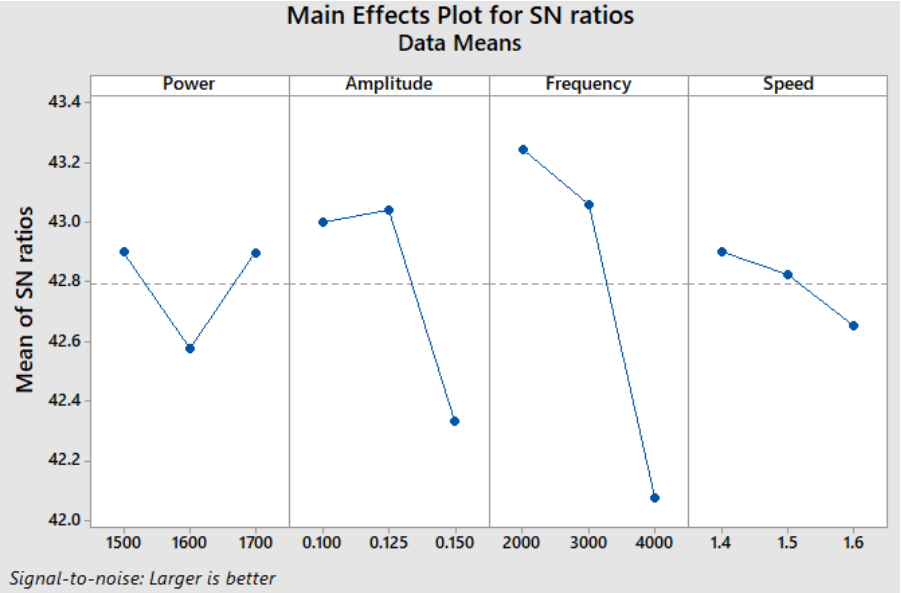
Çizelge 4.9. 3 mm için maksimum çekme dayanımı

Power (Güç)	**Amplitude (Büyüklük)**	**Frequency (Frekans)**	**Speed (Hız)**	**Tensile (Gerilme)**	**SNR A1**
1600	0.125	4000	1.5	128	42.14
1600	0.1	2000	1.4	147	43.35
1600	0.15	3000	1.6	130	42.25
1500	0.125	2000	1.6	149	43.46
1500	0.1	3000	1.5	148	43.41
1500	0.15	4000	1.4	124	41.83
1700	0.125	3000	1.4	150	43.52
1700	0.1	4000	1.6	130	42.25
1700	0.15	2000	1.5	140	42.92

Çizelge 4.10. Proses parametrelerinin S/N oranlarına etki seviyeleri (çekme)

Seviye	**Power (Güç)**	**Amplitude (Büyüklük)**	**Frequency (Frekans)**	**Speed (Hız)**
1	*42.90	43.00	*43.24	*42.90
2	42.58	*43.04	43.06	42.82
3	42.90	42.33	42.07	42.65
Delta	0.32	0.71	1.17	0.25
Rank	**3**	**2**	**1**	**4**

**Optimum seviyeler*



Şekil 4.25. S/N oranlarının parametreler üzerine etkisi

Yapılan Taguchi çalışmasında; Güç parametresinin optimumunda 2 adet değer bulunurken geri kalan 3 adet parametrede ise 1er adet optimum parametre olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.25, Çizelge 4.10'un görseli niteliğindedir.

Çizelge 4.11. ANOVA tablosu (çekme)

Parametre	**DF**	**Adj SS**	**Adj MS**	**%Katkı**
Power (Güç)	2	53.56	26.78	5.92
Amplitude (Büyüklük)	2	239.39	119.69	26.47
Frequency (Frekans)	2	584.39	292.19	64.64
Speed (Hız)	2	26.72	13.36	2.95
Toplam	**8**	**904.06**		**100**

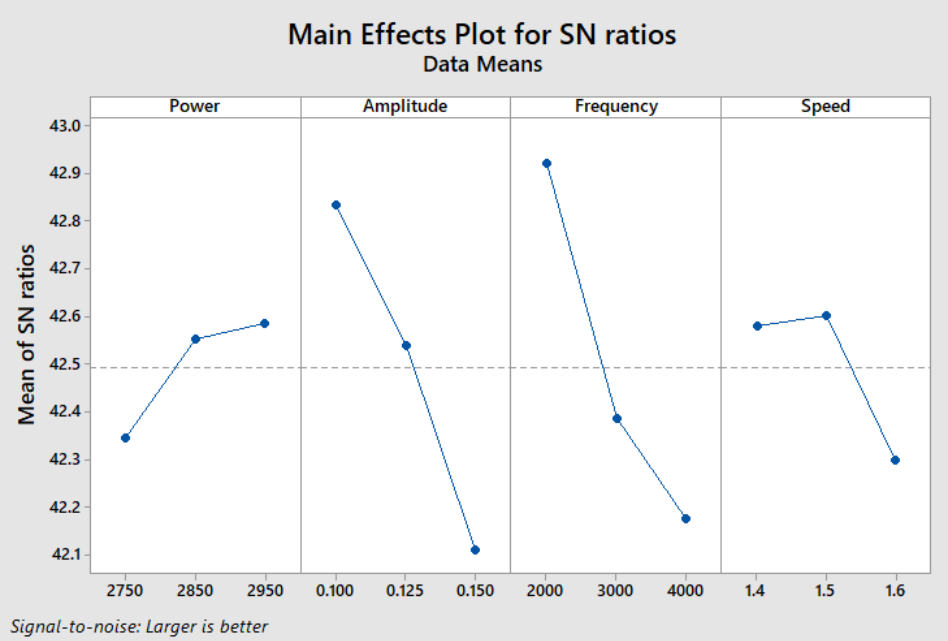
4.9. 5 mm Taguchi Sonuçları

Çizelge 4.12. 5 mm için maksimum çekme dayanımı

Power (Güç)	Amplitude (Büyüklük)	Frequency (Frekans)	Speed (Hız)	Tensile (Gerilme)	SNR A1
2750	0.125	4000	1.5	129	42.18
2750	0.1	2000	1.4	145	43.20
2750	0.15	3000	1.6	121	41.66
2850	0.125	2000	1.6	139	42.83
2850	0.1	3000	1.5	140	42.89
2850	0.15	4000	1.4	125	41.94
2950	0.125	3000	1.4	135	42.60
2950	0.1	4000	1.6	132	42.41
2950	0.15	2000	1.5	137	42.73

Çizelge 4.13. Proses parametrelerinin S/N oranlarına etki seviyeleri (çekme)

Seviye	Power (Güç)	Amplitude (Büyüklük)	Frequency (Frekans)	Speed (Hız)
1	42.34	42.83	42.92	42.58
2	42.55	42.54	42.38	42.60
3	42.58	42.11	42.18	42.30
Delta	0.24	0.72	0.74	0.30
Rank	**4**	**2**	**1**	**3**



ekil 4.26. S/N oranlarının parametreler üzerine etkisi

Yapılan Taguchi çalışmasında; tüm parametrelerin 1er adet optimum parametresinin olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.26, Çizelge 4.13'ün görseli niteliğindedir.

Çizelge 4.14. ANOVA tablosu (çekme)

Parametre	**DF**	**Adj SS**	**Adj MS**	**%Katkı**
Power (Güç)	2	20.22	10.11	4.47
Amplitude (Büyüklük)	2	182.89	91.44	40.44
Frequency (Frekans)	2	210.06	105.03	46.45
Speed (Hız)	2	39.06	19.53	8.63
Toplam	**8**	**452.22**		**100**

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Lazer kaynak sonrası makroyapı görüntüleri incelendiğinde T13 numunesi hariç bütün parçalarda tam penetrasyon elde edilmiştir. Kaynak dikiş bölgelerinde ufak boyutta porozite gözlemlenmiş olup 3 mm kalınlıktaki parçalarda maksimum porozite değeri 1 mm'nin altında kalmıştır. Fakat 5 mm'lik parçalarda ise bazı numunelerde 1 mm'nin üzerinde büyüklükte porozite oluşumu gözlemlenmiştir.

Kaynaklı numuneler üzerinde gerçekleştirilen çekme test sonuçlarına paralel kaynak sonrası mekanik özelliklerde düşüş gözlemlenmiştir. Lazer kaynaklı numuneler çekme testi öncesi herhangi bir talaşlı imalat işlemine maruz kalmamış olup, kaynak yapıldığı şekilde testlere tabi tutulmuştur. Çekme dayanımı ve akma dayanımı hesaplanırken her bir çalışma için parçaların alanı 3 mm ve 5 mm olacak şekilde sabit tutulmuştur. Bu duruma paralel kopma dayanım değeri ve çekme dayanım değerleri paralellik göstermektedir. Sonuçlar incelendiğinde çekme dayanımındaki minimum düşüş kaynak sonrası ana metale kıyasla %30-33 olarak hesaplanmıştır.

Mikro sertlik çalışmaları incelendiğinde kaynak dikiş bölgelerinin her iki kalınlıktaki parçalarda en zayıf bölge olduğu tespit edilmiştir. Sertlik eğrilerinde her iki kalınlıktaki numuneler için en iyi ve en kötü çekme dayanımı veren numuneler karşılaştırıldığında ciddi bir kontrast sertlik test sonuçlarında tespit edilememiştir. Bu duruma paralel çekme test değerlerindeki sapmanın kaynak sonrası kaynak dikiş geometrisindeki farklılıklardan olabileceği öngörülmüştür.

Tane yapısı incelemelerinde ana metal ve kaynak dikiş bölgesinin merkezinde eş eksenli tane yapısı gözlemlenirken merkez ile ana metal arasındaki bölgede ise kolumnar tane yapısı tespit edilmiştir. Çekme test numunelerinin tane yapısı incelendiğinde kopma gerçekleşen bölge kaynak dikişinde eş eksenli ve kolumnar tane geçiş bölgesinde olduğu yorumlanmıştır.

Taguchi deney çalışmasındaki ANOVA sonuçları yorumlandığında;

3 mm ana metal ile yapılan çalışmada kullanılan parametre aralıklarında maksimum çekme dayanımı üzerindeki en etkili parametrenin %64,64 etki oranı ile Frekans olduğu görülmüştür. Genlik değerinin etkisi %26,47, Lazer gücünün etkisi ise %5,92 olarak bulunmuştur. En düşük etkiye sahip parametrenin %5,92 etki oranı ile kaynak hızı olduğu görülmüştür (Çizelge 4.11).

5 mm ana metal kullanılan çalışmada kullanılan parametre aralıklarında maksimum çekme dayanımı üzerindeki en etkili parametrenin %46,45 etki oranı ile Frekans olduğu görülmüştür. Genlik değerinin etkisi %40,44, Kaynak Hızının etkisi ise %8,63 olarak bulunmuştur. En düşük etkiye sahip parametrenin %4,47 etki oranı ile lazer gücü olduğu görülmüştür (Çizelge 4.14).

KAYNAKLAR

Adin, M. Ş. (2022). Investigation of mechanical properties of composites obtained from textile wastes.

Ayan, M. (2022). Alüminyum ekstrüzyonunda nitrasyon ve yüzey tamamlama parametrelerinin kalıp performansına etkisinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Sakarya.

Başaran, D. (2010). Alüminyum ekstrüzyonunda fireyi azaltacak kalıp tasarımı. *Yüksek Lisans Tezi*, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gebze.

Başer, T. A. (2012). "Alüminyum Alaşımları ve Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı," Mühendis ve Makina, cilt 53, sayı 635, s. 51-58

Bunaziv, I., Akselsen, O. M., Ren, X., Nyhus, B., Eriksson, M., & Gulbrandsen-Dahl, S. (2021). A review on laser-assisted joining of aluminium alloys to other metals. *Metals*, *11*(11), 1680.

Demirel, O. 2012. Development of automobile chassis parts via aluminum extrusion and sand casting technology. *Yüksek Lisans Tezi*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara.

Dudas, J. H. (1966). Preventing weld cracks in high strength aluminum alloys. Welding journal, 45, 3.

Fetzer, F., Sommer, M., Weber, R., Weberpals, J. P., & Graf, T. (2018). Reduction of pores by means of laser beam oscillation during remote welding of AlMgSi. *Optics and Lasers in Engineering*, *108*, 68-77.

Georgantzia, E., Gkantou, M., & Kamaris, G. S. (2021). Aluminium alloys as structural material: A review of research. *Engineering Structures*, *227*, 111372. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111372

Hagenlocher, C., Fetzer, F., Weber, R., & Graf, T. (2018). Benefits of very high feed rates for laser beam welding of AlMgSi aluminum alloys. *Journal of Laser Applications*, *30*(1), 012015. https://doi.org/10.2351/1.5003795

Kara, B., Zeybek, A., Kurt, K., Yüce, C. (2022). Alüminyum Döküm ve Ekstrüzyon Darbeli MIG Kaynak Uygulamalarında Proses Parametrelerinin Optimizasyonu . *10. Uluslararası Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi*

Katayama, S., Nagayama, H., Mizutani, M., & Kawahito, Y. (2009). Fibre laser welding of aluminium alloy. *Welding International*, *23*(10), 744-752.

Katayama, S., Kawahito, Y., & Mizutani, M. (2010). Elucidation of laser welding phenomena and factors affecting weld penetration and welding defects. *Physics procedia*, *5*, 9-17.

Laserdyne, P. P. (2022). *Laser Welding 101 Overview of Laser Weldindgs of Metals.* Prima Power .

MADA. (2020). *Laser Welding Fundamentals.*

Oladimeji, O. O., & Taban, E. (2016). Trend and innovations in laser beam welding of wrought aluminum alloys. *Welding in the World*, *60*, 415-457. https://doi.org/10.1007/s40194-016-0317-9

Pakdil, M. 2005. Determination of the mechanical properties and fatigue crack propagation of the laser welded new generation aluminum alloys. *Doktora Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Makine Bilim Dalı, İzmir.

Stritt, P., Weber, R., Graf, T., Mueller, S., & Weberpals, J. P. (2012, September). New hot cracking criterion for laser welding in close-edge position. In *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics* (Vol. 2012, No. 1, pp. 357-366). Laser Institute of America. https://doi.org/10.2351/1.5062472

Sun, T., Franciosa, P., Sokolov, M., & Ceglarek, D. (2020). Challenges and opportunities in laser welding of 6xxx high strength aluminium extrusions in automotive battery tray construction. *Procedia CIRP*, *94*, 565-570.

Unt, A., Poutiainen, I., Grünenwald, S., Sokolov, M., & Salminen, A. (2017). High power fiber laser welding of single sided T-joint on shipbuilding steel with different processing setups. *Applied Sciences*, *7*(12), 1276.

Verhaeghe, G., & Hilton, P. (2004). Laser welding of low-porosity aerospace aluminum alloy. In *Proceedings of the 34th International MATADOR Conference: Formerly The International Machine Tool Design and Conferences* (pp. 241-246). Springer London.

Wang, L., Gao, M., Zhang, C., & Zeng, X. (2016). Effect of beam oscillating pattern on weld characterization of laser welding of AA6061-T6 aluminum alloy. *Materials & Design*, *108*, 707-717. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.07.053

Zhao, H., White, D. R., & DebRoy, T. (1999). Current issues and problems in laser welding of automotive aluminium alloys. *International materials reviews*, *44*(6), 238-266.

https://www.kloecknermetals.com/blog/what-are-the-major-properties-of-aluminum/.

(2021, 04 19). Kloeckner Metals: https://www.kloecknermetals.com/blog/what-are-the-major-properties-of-aluminum/ adresinden alındı