



RESEARCH ARTICLE

Investigation of Mechanical Properties of Aluminum Alloys Welded by Laser Welding and Optimization of Welding Parameters Using Taguchi and ANOVA Methods

1,* Mehmet Şükrü Adin

¹ University of Batman, Department of Mechanical Engineering, Batman, Türkiye
 mehmentsukru.adin@batman.edu.tr, Orcid.0000-0002-2307-9669

HIGHLIGHTS

- The mechanical properties of AA2024 aluminum alloys welded by laser welding were investigated.
- Optimization of laser welding parameters was performed using ANOVA and Taguchi methods.

Keywords:

- AA2024
- Aluminum alloy
- ANOVA
- Laser welding
- Taguchi method
- Tensile strength
- Optimization

GRAPHICAL ABSTRACT

In this study, the effects of different welding parameters applied during laser welding of AA2024 aluminum alloy materials on the tensile strength were investigated and their optimizations were made using Taguchi and ANOVA methods to obtain the most suitable welding parameters. The variable welding parameters such as laser power, pulse duration, beam power density and pulse energy were used in the study. As a result, it was concluded that the lowest tensile strength was obtained when 1800 W laser power, 5 ms pulse duration, 6000 W/mm² beam power density and 9.5 Joule pulse energy were used, while the highest tensile strength was obtained using 2600 W laser power, 6 ms pulse duration, 6500 W/mm² beam power density and 9.5 Joule pulse energy. When the results of the highest tensile strength (174 MPa) and the lowest tensile strength (113 MPa) were compared, it was found that the highest tensile strength was 53.98%, which was higher than the lowest tensile strength. In Figure A, the graphical abstract related to the article is seen.

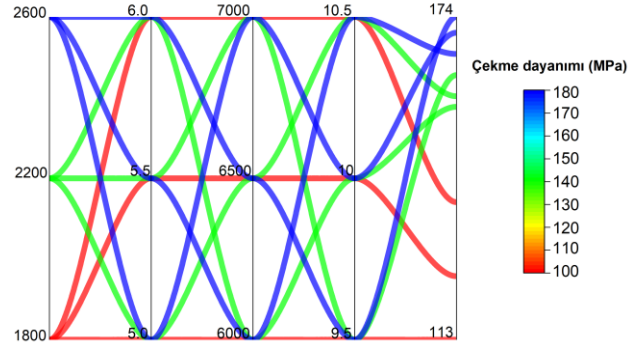


Figure A. Graphical abstract of the article

Article Info:

Received : 13 Sept 2022

Accepted : 29 Sept 2022

DOI:

10.53525/jster.1174394

*Correspondence:

Mehmet Şükrü Adin
 mehmentsukru.adin@batman.edu.tr

Aim of Article: To investigate the effects of welding parameters on the tensile strength of AA2024 aluminum alloy materials joined by laser welding and to optimize laser welding parameters.

Material and Method: Tensile tests of AA2024 aluminum alloy joints welded by laser welding were carried out, and welding parameters were optimized.

Findings and Results: According to the S/N ratios, it was found that 2600 W laser power, 6 ms pulse duration, 7000 W/mm² beam power density and 10.5 Joule pulse energy were the most optimum welding parameters for laser welding of AA2024 aluminum alloy.

Conclusion: The results showed that the lowest tensile strength (113 MPa) was obtained using 1800 W laser power, 5 ms pulse duration, 6000 W/mm² beam power density and 9.5 Joule pulse energy, while the highest tensile strength (174 MPa) was obtained using 2600 W laser power, 6 ms pulse duration, 6500 W/mm² beam power density and 9.5 Joule pulse energy.



ARAŞTIRMA MAKALESİ

Lazer Kaynağı ile Kaynak Yapılan Alüminyum Alaşımlarının Mekanik Özelliklerinin Araştırılması ve Kaynak Parametrelerinin Taguchi ve ANOVA Yöntemleri Kullanılarak Optimizasyonu

^{1,*} Mehmet Şükrü Adin

¹ Batman Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Batman, Türkiye.
mehmetsukru.adin@batman.edu.tr, Orcid.0000-0002-2307-9669

Alıntı / Citation :

Adin, M.Ş., (2022). Lazer Kaynağı ile Kaynak Yapılan Alüminyum Alaşımlarının Mekanik Özelliklerinin Araştırılması ve Kaynak Parametrelerinin Taguchi ve ANOVA Yöntemleri Kullanılarak Optimizasyonu, *Journal of Science, Technology and Engineering Research*, 3(2): 50-59. DOI: 10.53525/jster.1174394

ÖNE ÇIKANLAR / HIGHLIGHTS

- Lazer kaynağı ile kaynak edilen AA2024 alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerinin araştırılması
- Lazer kaynak parametrelerinin ANOVA ve Taguchi yöntemleri kullanılarak optimizasyonunun yapılması

Makale Bilgileri / Article Info

Geliş Tarihi : 13 Eylül 2022

Kabul Tarihi: 29 Eylül 2022

DOI:

10.53525/jster.1174394

***Sorumlu Yazar /**

Corresponding Author

Mehmet Şükrü Adin,
mehmetsukru.adin@batman.edu.tr

Tel: +90 488 217 3929

ÖZET / ABSTRACT

Bu çalışmada, AA2024 alüminyum alaşımı malzemelerin lazer kaynağı sırasında uygulanan farklı kaynak parametrelerinin çekme mukavemeti üzerindeki etkileri araştırılmış ve en uygun kaynak parametrelerini elde etmek için Taguchi ve ANOVA yöntemleri kullanılarak optimizasyonları yapılmıştır. Değişken kaynak parametreleri olarak lazer gücü, darbe süresi, ışın güç yoğunluğu ve darbe enerjisi kullanılmıştır. Sonuçlar, en düşük çekme dayanımının, 1800 W lazer gücünde, 5 ms darbe süresinde, 6000 W/mm² ışın güç yoğunluğunda ve 9,5 Joule darbe enerjisi kullanılarak elde edildiğini, en yüksek çekme dayanımının ise 2600 W lazer gücünde, 6 ms darbe süresinde, 6500 W/mm² ışın güç yoğunluğunda ve 9,5 Joule darbe enerjisi kullanılarak elde edildiğini göstermiştir. En yüksek çekme dayanımı (174 MPa) ile en düşük çekme dayanımı (113 MPa) sonuçları karşılaştırıldığında, en yüksek çekme dayanımının en düşük çekme dayanımından %53,98 daha yüksek olduğu bulunmuştur. S/N oranlarına göre, 2600 W lazer gücü, 6 ms darbe süresi, 7000 W/mm² ışın güç yoğunluğu ve 10,5 Joule darbe enerjisinin AA2024 alüminyum alaşımının lazer kaynağı ile kaynak edilmesi için en optimum kaynak parametreleri olduğu anlaşılmıştır. ANOVA analizine göre ortalama çekme dayanımı üzerinde en etkili parametrenin lazer gücü (%82,45) olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler AA2024, Alüminyum alaşımı, Çekme dayanımı, Lazer kaynak, Optimizasyon, Taguchi yöntemi, Varyans analizi (ANOVA)

I. GİRİŞ [INTRODUCTION]

Alüminyum alaşımı AA2024, yüksek mukavemet, işlenebilirlik ve iyi korozyon dayanımı gibi özellikleri sebebiyle havacılık ve uzay endüstrilerinde en fazla tercih edilen malzemelerdendirler [1]. Ancak, bu malzemelerin geleneksel ergitme kaynakları ve görece daha yeni bir

yöntem olarak görülen sürünme karıştırma benzeri kaynaklar ile birleştirilmeleri sırasında meydana gelen çatlama, gözeneklilik, düşük işleme hızı, yüksek toleranslı karmaşık yapıların üretilmesindeki sınırlamalar ve kötü kaynak görünümü gibi birçok olumsuz yönleri nedeniyle en çok kullanıldıkları yerler olan havacılık ve uzay endüstrilerini farklı çözüm yolları aramaya sevk etmiştir [2-4]. Hızla geliştirilen yeni kaynak teknolojileri



sayesinde ise yukarıda bahsedilen sorunlara çözüm yöntemleri sunulmuştur. Bu çözüm yöntemlerinden biri de lazer kaynağıdır. Lazer kaynağı, üretim hızı, uygun maliyeti, malzeme biçimlerinin yenilikçi kullanımına imkân vermesi gibi birçok avantajı ile dikkat çekmiştir [4-6]. Görece yeni bir yöntem olarak görülen ve potansiyeli oldukça yüksek olan lazer kaynağından etkin bir şekilde faydalanılması için ise lazer gücü, ışın gücü yoğunluğu, odaklanma uzaklığı, darbe enerjisi gibi birçok kaynak parametresinin ve etkilerinin iyi anlaşılması gerekmektedir [6-9].

Gao ve ark. [10] tarafından yapılan bir araştırmada, alüminyum alaşımlarını kaynak işlemi sırasında uygulanan lazer gücünün çok yüksek olması durumunda ters foton ışınlanması absorpsiyonu nedeniyle güçlü bir plazma koruyucu etkisinin meydana geldiğini bu yüzden bu parametreye özellikle dikkat edilmesi gerektiğini ifade etmişlerdir. Katayama ve ark. [11] tarafından alüminyum alaşımları üzerinde yürütülen bir araştırmada, güç ve güç yoğunluğunun kaynak penetrasyonuna önemli etkileri olması nedeniyle belirlenen değerlerin dikkatli seçilmesi gerektiğini bildirmiştir. Seto ve ark. [12], alüminyum alaşımları üzerinde lazer kaynağı yaparak yaptıkları araştırmada, yüksek hızda kaynak işlemi sırasında istenmeyen gözeneklerin oluşabilmesi ve kaynak kalitesini olumsuz etkilemesi nedeniyle kaynak hızına oldukça dikkat edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Katayama [13] tarafından alüminyum alaşımlarının lazer ile kaynak edilmesi ile ilgili yapılan bir araştırmada, lazer kaynağının odaklanma uzaklığının ana metalin eritilmesini sağlamada belirleyici bir rolü olduğunu ve uygun seçilmemesi durumunda kaynak işleminin başarısızlıkla sonuçlanabileceğini rapor etmiştir. Matsunawa ve ark. [14], alüminyum alaşımları üzerinde uyguladıkları lazer kaynak parametrelerinin etkilerini inceledikleri bir araştırmada, lazer gücü, kaynak hızı ve odak uzaklığı parametrelerinin etkilerini incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda, kaynak hızının artışına bağlı olarak penetrasyon etkisinin azaldığını, odak uzaklığının uygun olmaması durumunda kaynak kalitesinin olumsuz etkilendiğini ve lazer gücünün artışına bağlı olarak penetrasyon etkisinin olumlu etkilendiğini ifade etmişlerdir. Wallerstein ve ark. [15] ile Stavridis ve ark. [16] tarafından lazer kaynağının alüminyum alaşımlara uygulanabilirliği ile ilgili olarak yapılan inceleme çalışmalarında, lazer gücü, kaynak ilerleme hızı, odaklanma uzaklığı, darbe süresi, ışın gücü yoğunluğu ve darbe enerjisi gibi kaynak parametrelerinin en optimum şekilde belirlenmesi gerektiği ifade edilmiştir. Ayrıca, literatürde bulunan çalışmalara bakıldığında, alüminyum alaşımlarının lazer kaynağı ile kaynak edilmesi ile ilgili

olarak yapılan kaynak parametreleri optimizasyonun oldukça sınırlı olduğu ve yeni çalışmalara ihtiyaç duyulduğu görülmektedir [16, 17].

Bu çalışmanın amacı, lazer kaynağı ile birleştirilen AA2024 alüminyum alaşımı malzemelerden bağlantıların çekme mukavemetine kaynak parametrelerinin etkilerini araştırmak ve kaliteli kaynak bağlantılarının elde edilmesi için Taguchi ve ANOVA yöntemlerini kullanarak AA2024 alüminyum alaşımı için lazer kaynak parametrelerini optimize etmektir.

II. MATERYAL VE METOD [MATERIAL AND METHOD]

Bu çalışma için kullanılan AA2024 alüminyum alaşımı malzemeler, yüksek mukavemet, işlenebilirlik ve iyi korozyon dayanımı gibi özellikleri sebebiyle havacılık ve uzay endüstrilerinde en fazla tercih edilen malzemelerdendirler [1]. Bu üstün özellikleri ve yaygın kullanımları nedeniyle deneysel çalışma için tercih edilmişlerdir. Çalışmada kullanılan AA2024 alüminyum alaşımı malzemenin kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. AA2024 malzemesinin kimyasal bileşimi

Kimyasal bileşim									
Element	Cr	Ti	Mg	Fe	Mn	Si	Zn	Cu	Al
% ağırlık	0.09	0.2	1.29	0.21	0.45	0.07	0.04	4.11	Kal.

Literatürdeki çalışmalar baz alınarak [18] CO₂ lazer kaynak makinesi ile birleştirilen AA2024 alüminyum alaşımı numuneler için belirlenen kaynak parametreleri Tablo 2'de verilmiştir. Deneysel çalışmada, kaynak ilerleme hızı (150 mm/dk) ve odaklanma uzaklığı (55 mm) sabit tutulmuştur.

Tablo 2. Kaynak parametreleri ve seviyeleri

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 gücü yoğunluğu (W/mm ²)	6000	6500	7000
Darbe enerjisi (Joule)	9,5	10	10,5

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 optimum parametrelerin bulunması sağlanmıştır.

İmalat endüstrilerinde, gelişen teknoloji ile birlikte birçok optimizasyon yöntemi kullanılmaktadır. Kullanılan bu optimizasyon yöntemleri sayesinde en uygun imalat parametreleri elde edilmektedir [19, 20]. 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 [21-23]. Çalışma kapsamında, ASTM standartlarına göre hazırlanan numunelerin çekme testlerinden en yüksek değerde çekme dayanımı değeri beklendiğinden En büyük değer en iyi (“Larger is better”) fonksiyonu kullanılmıştır. Bu fonksiyon, eşitlik bir (1) olarak aşağıda verilmiştir.

$$\text{The larger is better: } S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (1)$$

Burada,

n: Gözlem sayısı,

y_i: *i*-inci gözlem sayısı ve

S/N: Sinyal-gürültü oranıdır.

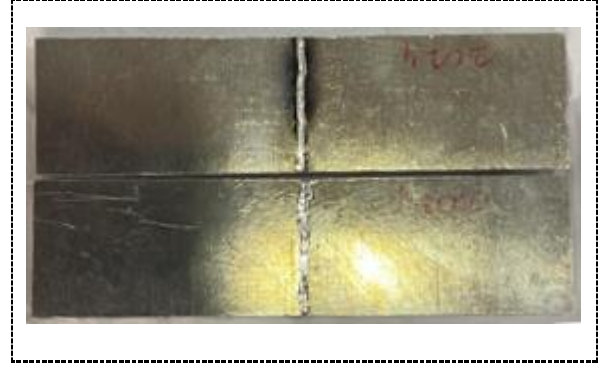
Deneyisel çalışma için Taguchi deney tasarımına (Orthogonal array design, L9) göre belirlenen kaynak parametreleri Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. Taguchi deney tasarımına göre kaynak parametreleri ve seviyeleri

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

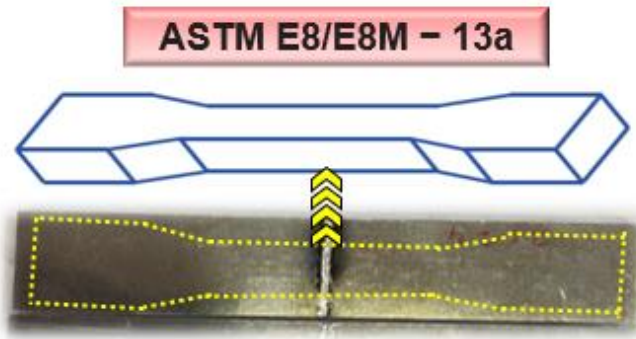
Deneyisel çalışmada kullanılan 18 adet 140 x 60 x 3,5 mm boyutlarındaki AA2024 alüminyum alaşımı numunelere Tablo 3’te verilen parametreler uygulanarak lazer kaynakları yapılmıştır. Deney numuneleri, 3000W/cm² gücünde olan CO₂ lazer kaynak makinesi ile birleştirilmiştir. Kaynak işlemleri öncesinde literatürde önerildiği gibi alüminyum alaşımları her türlü kir ve yağ

gibi olumsuzluklardan temizlenmiştir [24, 25]. Lazer kaynağı ile kaynak edilmiş numunelerin resmi Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Kaynak edilmiş numunelerin resmi

Lazer kaynak ile birleştirilen numuneler daha sonra ASTM standardındaki çekme boyutlarına getirilmesi amacıyla, Şekil 2’de gösterilen işleme bölgeleri CNC (Computer Numeric Control) dik işleme merkezinde işlenmişlerdir.



Şekil 2. ASTM standardına göre işleme bölgesi

Çekme testi için hazırlanan ASTM standardındaki numunelerin testleri, yüzde 50 nemin olduğu oda sıcaklığındaki bir ortamda 1 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir [26]. Çekme testleri için 250 kN kapasiteli Shimadzu marka test makinesi kullanılmıştır. Çekme testleri için kullanılan cihaz Şekil 3’te gösterilmiştir.

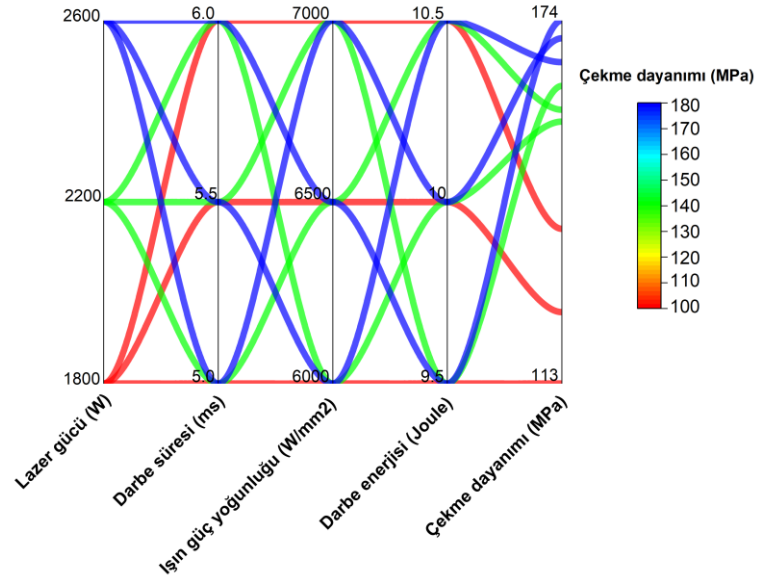


Şekil 3. Shimadzu marka çekme testi cihazı

III. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA [EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION]

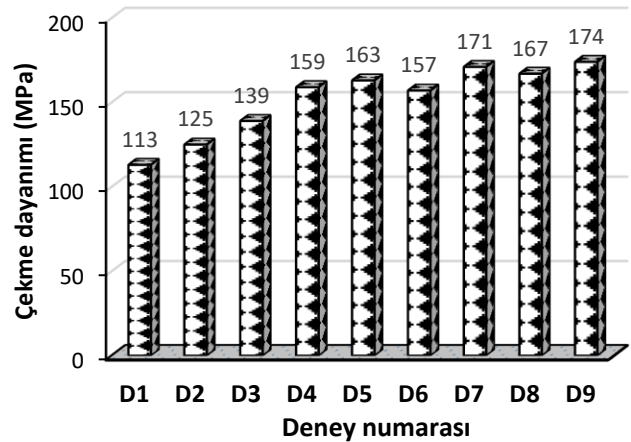
3.1. Çekme Testi Sonuçları

Taguchi deney düzeneğine göre lazer kaynağı ile birleştirilen AA2024 alüminyum alaşımı numunelerin parametre ve seviyelerin değişimine göre çekme testi sonuçları Şekil 4'te verilen grafikte görülebilmektedir. Şekil 4'te görülebildiği gibi, genel olarak, parametrelerin artışına bağlı olarak çekme dayanımının olumlu etkilendiği görülebilmektedir. Çekme dayanımlarının belirtildiği renk skalasında görüldüğü gibi, kırmızı renkteki çizgiler çekme dayanımının en düşük, mavi renkteki çizgiler ise çekme dayanımının en yüksek olduğu çizgiler ile ifade edilmektedir.



Şekil 4. Parametre ve seviyelere göre çekme dayanımı sonuçları

Taguchi L9 deney düzeneğine göre lazer kaynağı ile birleştirilen AA2024 alüminyum alaşımı numunelerin çekme dayanımı sonuçları Şekil 5'te verilmiştir. Şekil 5'te gösterilen deney sonuçları incelendiğinde, en düşük çekme dayanımının D1 kodlu deney numarası ile 113 MPa olarak elde edildiği görülebilmektedir. En yüksek çekme dayanımına bakıldığında ise D9 kodlu deney numarası ile 174 MPa olarak elde edildiği görülebilmektedir.



Şekil 5. Taguchi L9 deney düzeneğine göre çekme testi sonuçları

Elde edilen bu en yüksek çekme dayanımı ile en düşük çekme dayanımları sonuçları karşılaştırıldığında, en yüksek çekme dayanımının en düşük çekme dayanımından %53.98 daha yüksek olduğu görülebilmektedir. Ayrıca, ortalama çekme dayanımı değerinin 152 MPa olduğu anlaşılmaktadır. Lazer kaynağı ile kaynak edilen AA2024 alüminyum alaşımı numunelerin çekme testleri sonucunda numunelerin tamamının ana malzemeden kırılmaları ise yapılan kaynak işleminin kalitesini göstermesi açısından pozitif bir sonuç olmaktadır.

3.2. Sinyal-gürültü (Signal-to-noise, S/N) oranı analizi

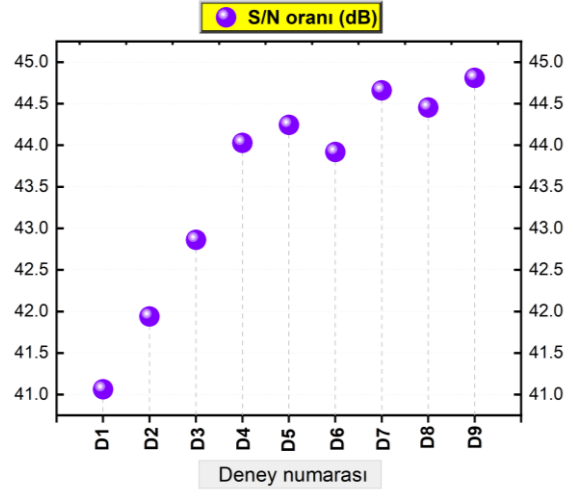
Lazer kaynağı ile kaynak edilen AA2024 alüminyum alaşımı numunelerin Taguchi deney düzeneğine göre yapılan çekme testleri sonuçları Minitab programında kullanılmıştır. Böylelikle, kontrol faktörlerinin optimize edilmesi için S/N oranları kullanılmıştır. Minitab programında yapılan analiz sonucunda elde edilen S/N oranları Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Çekme dayanımı için S/N oranları tablosu

Çekme dayanımı için S/N oranları (dB)				
Level	Lazer gücü	Darbe süresi	Işın güç yoğunluğu	Darbe enerjisi
1	41.95	43.25	43.14	43.37
2	44.06	43.55	43.59	43.51
3	44.64	43.86	43.92	43.78
Delta	2.69	0.61	0.78	0.41
Rank	1	3	2	4

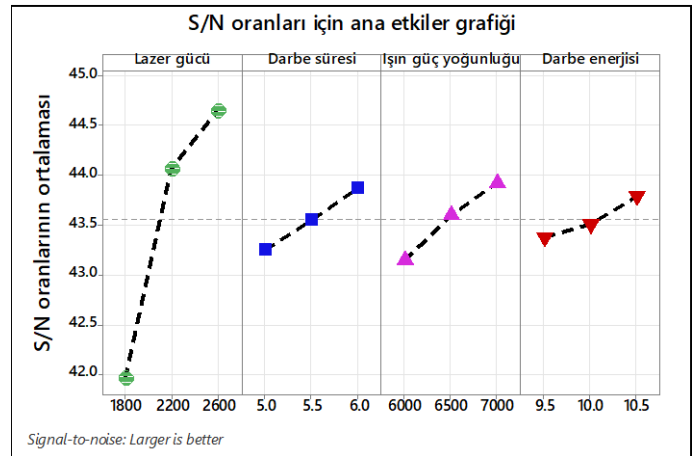
Larger is better

Tablo 4'te verilen analiz sonuçları incelendiğinde, S/N oranlarına göre 1.derece etkiye sahip parametrenin lazer gücü, 2.derece etkiye sahip parametrenin ışın güç yoğunluğu ve sırasıyla darbe süresi ve darbe enerjisinin olduğu görülebilmektedir. Seviyeler yönünden bakıldığında ise tüm parametrelere göre en etkili sevenin 3. seviye olduğu anlaşılmaktadır. Yapılan tüm deneylerin S/N oranlarına (Şekil 6) bakıldığında ise genel olarak parametre artışının çekme dayanımlarına olumlu etkileri olduğu görülebilmektedir. Tüm deneylerin S/N oranları Şekil 6'daki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 6. Tüm deneylerin S/N oranları grafiği

Lazer kaynağı ile kaynak edilen AA2024 alüminyum alaşımı numunelerin Taguchi deney düzeneğine göre yapılan çekme testleri sonuçlarının analizi için kullanılan Minitab programından elde edilen S/N oranları için ana etkiler grafiği Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. S/N oranları için ana etkiler grafiği

Şekil 7'de görülebildiği gibi, Taguchi yöntemi ile elde edilen çekme dayanımı değerleri üzerindeki kontrol faktörlerinin etkileri, deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçları doğrulamaktadır. S/N oranları için ana etki grafikleri incelendiğinde dikeye en yakın değerler önem kazanmaktadır. Çünkü bu değerler en etkili parametreleri temsil etmektedir [19, 21, 27, 28]. Lazer gücü, çekme mukavemeti için en etkili parametre olarak görülmüştür.

3.3. Varyans analizi (Analysis of the variance, ANOVA)

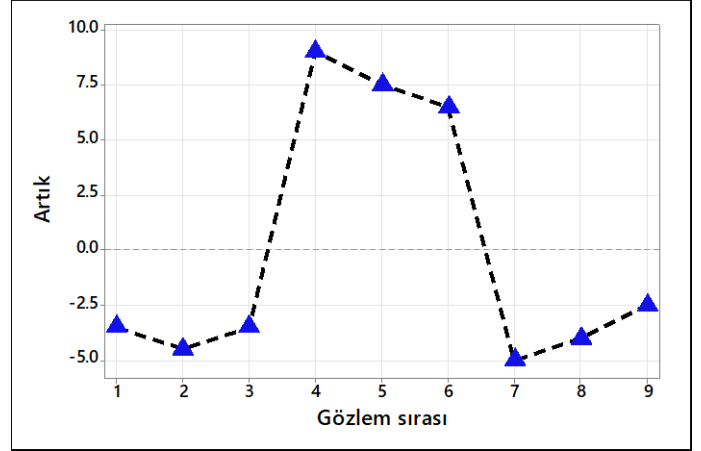
Bu çalışma kapsamında, lazer gücü, darbe süresi, ışın güç yoğunluğu ve darbe enerjisi gibi parametrelerin faktör ve çekme dayanımı üzerindeki etkilerinin analizinin yapılması amacıyla ANOVA yöntemi kullanılmıştır [19, 21, 27-30]. Yapılan ANOVA analizi %95 güven ve %5 önem düzeylerinde gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda, lazer gücü için 0.003, darbe süresi için 0.252, ışın güç yoğunluğu için 0.149 ve darbe enerjisi için 0.499 P-Value değerleri elde edilmiştir. ANOVA analizi kapsamında elde edilen yüzde katkı oranlarına bakıldığında ise lazer gücünün %82.45, ışın güç yoğunluğunun %5.86, darbe süresinin %3.3, darbe enerjisinin %1.02 ve erorr'un ise %7.37 olduğu görülmektedir (Şekil 8). Elde edilen sonuçlardan anlaşıldığı gibi en önemli faktörün lazer gücü olduğu görülebilmektedir. ANOVA analizi sonucunda elde edilen yüzde katkı oranlarını gösteren grafik Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. Yüzde katkı oranları grafiği

3.4. Regresyon analizi (Analysis of the regression)

Bu çalışma kapsamında ayrıca regresyon analizi yapılmıştır. Regresyon analizleri, bir veya daha fazla bağımsız değişken ile bir bağımlı değişken arasında ilişki bulunan farklı değişkenleri analiz etmek ve modellemek için yapılmaktadır [19, 21, 28]. Minitab programında yapılan analiz kapsamında her bir gözlem için elde edilen artıklar Şekil 9'da gösterilmiştir.



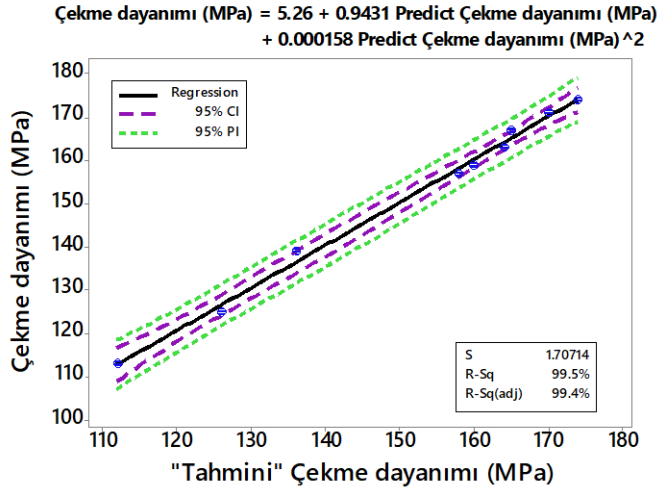
Şekil 9. Gözlem sırasına göre artık değerler

Yapılan bu çalışmada, regresyon analizi ile çekme mukavemeti için denklemler bulunmuştur. Regresyon analizi ile elde edilen denklem tahminleri lineer modeller olarak yapılmıştır. Çekme mukavemeti için tahmini lineer eşitlikler Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Çekme için Tahmini lineer denklem

Regresyon eşitliği	
Çekme dayanımı (MPa)	= 152.0 - 26.33 Lazer gücü_1800
	+ 7.667 Lazer gücü_2200
	+ 18.67 Lazer gücü_2600 - 4.333 Darbe süresi_5.0
	- 0.3333 Darbe süresi_5.5 + 4.667 Darbe süresi_6.0
	- 6.333 Işın güç yoğunluğu_6000
	+ 0.6667 Işın güç yoğunluğu_6500
	+ 5.667 Işın güç yoğunluğu_7000
	- 2.000 Darbe enerjisi_9.5
	- 1.000 Darbe enerjisi_10.0
	+ 3.000 Darbe enerjisi_10.5

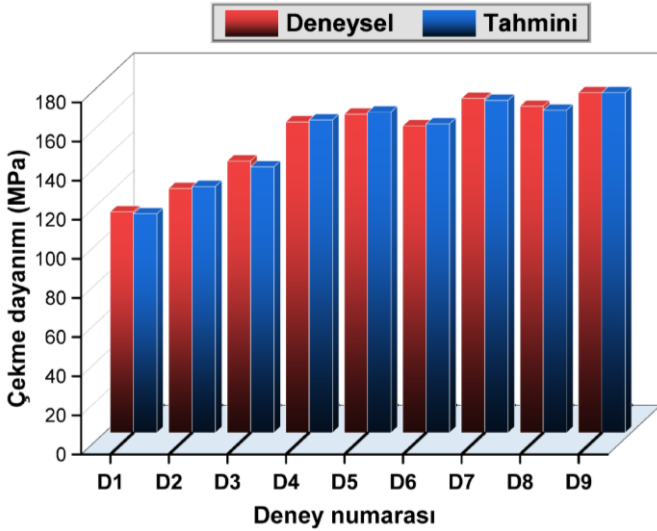
Yapılan regresyon analizi sonucunda çıkış parametreleri için tahmin edilen (predict) çekme dayanımı değerlerine karşı deneysel çekme dayanımı sonuçları Şekil 10'daki grafikte verilmiştir. Ayrıca grafik içerisinde deneysel sonuçlar ve tahmini değerler için elde edilen eşitlikte verilmiştir.



Şekil 10. Deneysel sonuçlar ve tahmin edilen değerlerin karşılaştırması

Şekil 10'de görüldüğü gibi, deneysel sonuçlar ile tahmin edilen değerler arasında çok iyi bir korelasyon bulunmuştur. Ortalama çekme dayanımı için elde edilen denklemin R2 değerine bakıldığında %99,5 gibi oldukça yüksek bir oran bulunmuştur.

Deneysel olarak elde edilen çekme dayanımları sonuçlarının tahmini çekme dayanımı değerleri ile olan uyumunun daha iyi görülebilmesi amacıyla Şekil 11'de bu karşılaştırmalar gösterilmiştir.



Şekil 11. Çekme dayanımı için deneysel sonuçlar ve tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması

Şekil 11'de daha net bir şekilde görülebildiği gibi, çekme dayanımı için deneysel sonuçlar ve tahmin edilen değerlerin neredeyse eşit olduğu görülebilmektedir.

IV. SONUÇ [CONCLUSION]

Bu çalışmada, AA2024 alüminyum alaşımı malzemelerin lazer kaynağı ile birleştirilmesi sırasında uygulanan farklı kaynak parametrelerinin çekme dayanımına etkileri incelenerek en uygun kaynak parametrelerinin elde edilmesi amacıyla Taguchi ve ANOVA yöntemleri kullanılarak optimizasyonu yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

- Çekme testleri sonucunda, en düşük çekme dayanımı 113 MPa, en yüksek çekme dayanımı ise 174 MPa olarak elde edilmiştir. En düşük çekme dayanımı, D1 kodlu deney numarası ile 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 D9 kodlu deney numarası ile 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.
- Çekme testleri sonucunda elde edilen en yüksek çekme dayanımı ile en düşük çekme dayanımları sonuçları karşılaştırıldığında, en yüksek çekme dayanımının en düşük çekme dayanımından %53,98 daha yüksek olduğu ve ortalama çekme dayanımı değerinin ise 152 MPa olduğu görülmüştür.
- Yapılan çekme testleri sonucunda, genel olarak, kaynak parametre ve seviyelerinin artışına bağlı olarak çekme dayanımının olumlu etkilendiği görülmüştür.
- Analiz sonuçları incelendiğinde, S/N oranlarına göre, 1.derece etkiye sahip parametrenin lazer gücü, 2.derece etkiye sahip parametrenin ışın güç yoğunluğu ve sırasıyla darbe süresi ve darbe enerjisinin olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca, her parametreye göre 3. seviyenin en optimum olduğu bulunmuştur.
- S/N oranları için ana etkilere bakıldığında, 2600 W lazer gücü, 6 ms darbe süresi, 7000 W/mm² ışın güç yoğunluğu ve 10,5 Joule darbe enerjisinin AA2024 alüminyum alaşımının lazer kaynağı ile kaynak edilmesi için en optimum kaynak parametreleri olduğu anlaşılmıştır.
- ANOVA analizine göre ortalama çekme dayanımı üzerinde en etkili parametrelerin sırasıyla lazer gücü (%82,45), ışın güç yoğunluğu (%5,85), darbe süresi (%3,3) ve darbe enerjisi (%1,02) olduğu belirlenmiştir.



ÇIKAR ÇATIŞMASI [CONFLICTS OF INTEREST]

Yazar ve ilgili kurumlar arasında herhangi çıkar çatışması olmadığını bildirmiştir.

ETİK KURALLARA UYGUNLUK [RESEARCH AND PUBLICATION ETHICS]

Yazar bu makalenin etik kurul onayı veya herhangi bir özel izin gerektirmediğini beyan eder.

KAYNAKLAR [REFERENCES]

- [1] K. Gültekin, and Y. Korkmaz, "AA2024-T3 alüminyum alaşımlarına uygulanan farklı yüzey hazırlama ve pürüzlülük işlemlerinin yapııştırma bağlantılarına etkisi," Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, vol. 11, no. 4, pp. 1269-1281, 2021.
- [2] J. Ahn, L. Chen, E. He, C. Davies, and J. Dear, "Effect of filler metal feed rate and composition on microstructure and mechanical properties of fibre laser welded AA 2024-T3," Journal of Manufacturing Processes, vol. 25, pp. 26-36, 2017.
- [3] J. Ahn, E. He, L. Chen, J. Dear, and C. Davies, "The effect of Ar and He shielding gas on fibre laser weld shape and microstructure in AA 2024-T3," Journal of Manufacturing Processes, vol. 29, pp. 62-73, 2017.
- [4] J. Enz, M. Kumar, S. Riekehr, V. Ventzke, N. Huber, and N. Kashaev, "Mechanical properties of laser beam welded similar and dissimilar aluminium alloys," Journal of Manufacturing Processes, vol. 29, pp. 272-280, 2017.
- [5] J. Ahn, L. Chen, C. Davies, and J. Dear, "Digital image correlation for determination of local constitutive properties of fibre laser welding joints in AA2024-T3." pp. 1-2.
- [6] V. Alfieria, F. Caiazzo, and V. Sergi, "Autogenous laser welding of AA 2024 aluminium alloy: process issues and bead features," Procedia Cirp, vol. 33, pp. 406-411, 2015.
- [7] L. Chen, E. He, J. Ahn, and J. Dear, "Parametric optimization and joint heterogeneity characterization of fiber laser welding of AA2024-T3," Proceedings of the 67th Annual Assembly of the International Institute of Welding. International Institute of Welding, Seoul, KR, pp. 1-9, 2014.
- [8] F. Caiazzo, V. Alfieri, F. Cardaropoli, and V. Sergi, "Butt autogenous laser welding of AA 2024 aluminium alloy thin sheets with a Yb: YAG disk laser," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 67, no. 9, pp. 2157-2169, 2013.
- [9] J. Ahn, E. He, L. Chen, R. Wimpory, S. Kabra, J. Dear, and C. Davies, "FEM prediction of welding residual stresses in fibre laser-welded AA 2024-T3 and comparison with experimental measurement," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 95, no. 9, pp. 4243-4263, 2018.
- [10] M. Gao, C. Chen, M. Hu, L. Guo, Z. Wang, and X. Zeng, "Characteristics of plasma plume in fiber laser welding of aluminum alloy," Applied Surface Science, vol. 326, pp. 181-186, 2015.
- [11] S. Katayama, Y. Kawahito, and M. Mizutani, "Elucidation of laser welding phenomena and factors affecting weld penetration and welding defects," Physics procedia, vol. 5, pp. 9-17, 2010.
- [12] N. Seto, S. Katayama, and A. Matsunawa, "High-speed simultaneous observation of plasma and keyhole behavior during high power CO 2 laser welding: effect of shielding gas on porosity formation," Journal of laser applications, vol. 12, no. 6, pp. 245-250, 2000.
- [13] S. Katayama, "Laser welding of aluminium alloys and dissimilar metals," Welding international, vol. 18, no. 8, pp. 618-625, 2004.
- [14] A. Matsunawa, S. Katayama, and K. Kojima, "CO2 laser weldability of aluminium alloys (Report 1): Effect of welding conditions on melting characteristics," Welding international, vol. 12, no. 7, pp. 519-528, 1998.
- [15] D. Wallerstein, A. Salminen, F. Lusquinos, R. Comesaña, J. d. V. García, A. R. Rodríguez, A. Badaoui, and J. Pou, "Recent developments in laser welding of aluminum alloys to steel," Metals, vol. 11, no. 4, pp. 622, 2021.
- [16] J. Stavridis, A. Papacharalampopoulos, and P. Stavropoulos, "Quality assessment in laser welding: a critical review," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 94, no. 5, pp. 1825-1847, 2018.
- [17] H. Park, and S. Rhee, "Estimation of weld bead size in CO 2 laser welding by using multiple regression and neural network," Journal of Laser Applications, vol. 11, no. 3, pp. 143-150, 1999.
- [18] M. Özcan, and Ş. Karamanlı, "Sac malzemelerin lazer kaynak parametreleri," Selçuk-Teknik Dergisi, vol. 3, no. 1, pp. 14-25, 2004.
- [19] G. Taguchi, System of experimental design, quality resources, 1987.
- [20] A. İpekçi, M. Kam, and K. Argun, "Surface Roughness Performance of Cu Electrode on Hardened AISI 4140 Steels in EDM Process," Journal of Chinese Society of Mechanical Engineers, vol. 43, no. 4, pp. 355-362, 2022.
- [21] D. C. Montgomery, Design and analysis of experiments, Ninth ed.: John wiley & sons, 2017.
- [22] M. Kam, A. İpekçi, and K. Argun, "Experimental investigation and optimization of machining parameters of deep cryogenically treated and tempered steels in electrical discharge machining process," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, vol. 236, no. 5, pp. 1927-1935, 2022.
- [23] M. Ş. Adin, B. İşcan, and Ş. Baday, "Optimization of welding parameters of AISI 431 and AISI 1020 joints joined by friction welding using taguchi method," Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, vol. 9, no. 1, pp. 453-470, 2022.
- [24] H. Adin, A. Doğan, and M. Ş. Adin, "Şehir İçi Doğalgaz Borularındaki Kaynak Hatalarının Tahribatsız ve Tahribatlı Muayene Yöntemleri ile İncelenmesi," Journal



- of Scientific, Technology and Engineering Research, vol. 2, no. 1, pp. 46-57, 2021.
- [25] M. Ş. Adin, and B. İşcan, “Optimization of process parameters of medium carbon steel joints joined by MIG welding using Taguchi method,” *European Mechanical Science*, vol. 6, no. 1, pp. 17-26, 2022.
- [26] M. Ş. Adin, and M. Okumuş, “Investigation of Microstructural and Mechanical Properties of Dissimilar Metal Weld Between AISI 420 and AISI 1018 Steels,” *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 47, pp. 8341-8350, 2022.
- [27] R. Unal, and E. B. Dean, “Taguchi approach to design optimization for quality and cost: an overview,” *International Society of Parametric Analysts*, pp. 1-10, 1990.
- [28] K. Krishnaiah, and P. Shahabudeen, “Applied design of experiments and Taguchi methods,” PHI Learning Pvt. Ltd., pp. 1-371, 2012.
- [29] V. K. Tiwary, A. Padmakumar, and V. Malik, “Adhesive bonding of similar/dissimilar three-dimensional printed parts (ABS/PLA) considering joint design, surface treatments, and adhesive types,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 236, no. 16, pp. 8991-9002, 2022.
- [30] V. K. Tiwary, A. Padmakumar, and V. R. Malik, “Investigations on FSW of nylon micro-particle enhanced 3D printed parts applied to a Clark-Y UAV wing,” *Welding International*, vol. 36, no. 8, pp. 474-488, 2022.