



Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

DP1200 Çeliği Lazer Kaynak İşleminde Proses Parametrelerinin Mekanik ve Geometrik Özelliklere Etkisinin Bulanık Mantık Yöntemi ile Tahmini ve Optimizasyonu

Meryem ALTAY*, Hakan AYDIN

Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 16059, Bursa, Türkiye
Meryem ALTAY, ORCID No: 0000-0001-6930-6292, Hakan AYDIN, ORCID No: 0000-0001-7364-6281

*Sorumlu yazar e-posta: meryemaltay@uludag.edu.tr

Makale Bilgileri

Geliş: 27.10.2022
Kabul: 26.12.2022
Online Nisan 2023

DOI:10.53433/yyufbed.1195234

Anahtar Kelimeler

Bulanık mantık,
DP1200 çeliği,
Kaynak parametreleri,
Lazer kaynak,
Mekanik özellikler

Öz: Bu çalışmada DP 1200 çelik malzemelerin bindirme konfigürasyonunda fiber lazer kaynak yöntemi ile birleştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı bağlantıların kaynak geometrisi ve mekanik özellikleri lazer gücü, ilerleme hızı ve lazer açısı proses parametrelerine göre değişkenlik göstermektedir. Parametrelerin etkilerini gözlemleyebilmek için Yanıt Yüzey Metodolojisine göre deney tasarımı oluşturularak deneyler gerçekleştirilmiştir. Çekme testi sonrasında kesme kuvveti değerleri elde edilmiştir; kaynak geometrisinde ise tam birleşme mesafesi ölçülmüştür. Deneysel çıktılar, kesme kuvveti ve birleşme mesafesini tahmin etmede Mamdani yöntemine göre geliştirilen Bulanık Mantık modelinde kullanılmıştır, 27 adet kural tanımlanmıştır. Tahmin sonuçları ve deneysel veriler kıyaslandığında birbiri ile benzerdir. Yüzey grafikleri yardımıyla optimum proses parametreleri lazer gücü 2800 W, ilerleme hızı 40 mm/s, lazer açısı 70° olarak belirlenmiştir.

Prediction and Optimization of the Effect of Process Parameters on Mechanical and Geometric Properties in Laser Welding Process of DP1200 Steel by Fuzzy Logic Method

Article Info

Received: 27.10.2022
Accepted: 26.12.2022
Online April 2023

DOI:10.53433/yyufbed.1195234

Keywords

DP1200 steel sheet,
Fuzzy logic,
Laser welding,
Mechanical properties,
Welding parameters

Abstract: In this study, DP 1200 steel materials were joined in overlap configuration by the fiber laser welding method. Welding geometry and mechanical properties of welded joints vary according to laser power, scanning speed, and laser incidence angle process parameters. In order to observe the effects of the parameters, experiments were carried out by creating an experimental design according to the Response Surface Methodology. Tensile shear load values were obtained after the tensile test; the bonding distance was measured in the weld geometry. Experimental outputs were used in the Fuzzy Logic model developed according to the Mamdani method in estimating maximum shear load and bonding distance, 27 rules were defined. Estimation results and experimental data are similar to each other when compared. The optimum process parameters were determined as 2800 W laser power, 40 mm/s scanning speed, and laser angle 70° with the help of surface graphics.

1. Giriş

Yeni nesil olarak geliştirilen yüksek mukavemete sahip çift fazlı Dual Phase (DP) çelik malzemeler iyi mekanik özellikleri ve korozyon direnci, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, yüksek sertlik özelliklerine sahip olmasıyla son yıllarda otomotiv sektöründe güvenlik açısından kritik parçalarda kullanılmaktadır (Altay, 2021). Yüksek mukavemet ve süneklik özelliklerine birlikte sahip olması dolayısıyla kolay şekillendirilebilen çift fazlı çeliklerin bu özellikleri sert martenzit fazı ve yumuşak ferrit fazını birlikte ihtiva etmesinden kaynaklanmaktadır. Otomotiv ana sanayiinde son yıllarda DP480, DP600, DP980 gibi daha düşük dayanım ve düşük mukavemet değerlerine sahip malzemeler yerine DP1200 gibi mukavemet özellikleri iyileştirilmiş çelik saclar tercih edilmektedir. Bu çeliklerin otomotiv parçalarında kullanılmaları birleştirme yöntemlerinin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır. Yüksek ergime sıcaklıkları nedeniyle bu malzemelerin birleştirilmesinde uygun bir kaynak yöntemi kullanılması gerekmektedir. Lazer kaynak yönteminde yüksek enerji yoğunluğuna sahip odaklanmış lazer ışınının kullanılması sayesinde dar bir alanda Isı Tesiri Altındaki Bölge oluşturulur ve malzeme mikro yapısı deforme olmaz. Lazer kaynak yönteminin bu avantajı ile DP1200 çeliklerinde yüksek sertlik yaratan martenzitin bozunması önlenerek mukavemet özelliklerinin korunması sağlamaktadır; DP1200 çelik sacların birleştirmeleri için uygun bir yöntemdir. Ancak DP1200 çeliklerin yüksek martenzit oranı sonucu elde edilen yüksek sertlik dolayısıyla kaynaklı bağlantılarda kırılma ve çatlak gibi problemler oluşabilmektedir. İstenilen kaynak kalitesinin elde edilebilmesi için lazer kaynak yöntemin detaylı incelenerek, parametrelerin mukavemet özelliklerine ve kaynak geometrisine etkilerinin anlaşılması gerekmektedir.

Janasekaran ve ark. (2017a) Ti6Al4V ve Inconel 600 malzemelerinin T konfigürasyonu fiber lazer kaynak ile birleştirilmesinde lazer gücü, kaynak hızı ve örtüşme faktörü parametrelerinin kaynak penetrasyonuna etkisini incelemişlerdir. Kaynaklı bağlantıların mukavemetleri çekme testi ile belirlenerek kopma mukavemetini tahmin etmek için MATLAB programı yardımıyla Mamdani tekniğine dayalı Bulanık Mantık yöntemini kullanmışlardır. Deneysel sonuçlar ve tahmin edilen sonuçlar arasındaki hesaplanan bağıl hata %6.95'tir. Ayrıca örtüşme faktörü parametresinin lazer kaynak işleminde en etkin faktör olduğu tespit edilmiştir (Janasekaran ve ark., 2017a). Lazer dolgu kaynağı sürecinin anlaşılması parametrelerin çok olması ve matematiksel modelin olmaması dolayısıyla zordur. Zeinali & Khajepour (2010) Bulanık Mantık temelli bir model geliştirerek lazer kaplama işleminde ilerleme hızının kaplama yüksekliğine etkisini ortaya koymuşlardır. Deneysel verilerle kıyaslandığında da Bulanık Mantık yönteminin doğru sonuçlar vereceği ortaya konulmuştur (Zeinali & Khajepour, 2010). Nair ve ark. (2020) Stellite 6 alaşımının EN8 çeliğinin yüzeyine lazer dolgu kaynağı işleminin korozyon üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Lazer tarama hızı, lazer odak yüksekliği, lazer gücü ve toz besleme parametrelerinin korozyon üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Lazer kaplanmış numuneler asidik ortamda korozyon testine tabi tutulmuş ve numunelerin elektron görüntüleri alınmıştır. Elektron mikroskobu görüntüleri Bulanık Mantık modeli için korozyon indeksi çıkarmada kullanılmıştır, ayrıca Taguchi yöntemi ile sonuçlar optimize edilmiştir (Nair ve ark., 2020). Barzani ve ark. (2015) yüzey pürüzlülüğünü iyileştirmek için Al-Si-Cu-Fe döküm alaşımının işleme performansını tahmin etmek amacıyla Bulanık Mantık yöntemi ile bir yapay zeka geliştirmişlerdir. Optimum parametre koşullarını elde etmek için Pareto-ANOVA optimizasyon yöntemlerini kullanmışlardır. Yüzey pürüzlülük değerlerine göre kesme hızı, ilerleme hızı ve talaş derinliği işleme parametreleri optimize edilmiştir. Optimum koşulların kesme hızı için 250 m/dk, ilerleme hızı için 0.05 mm/dev, kesme derinliği için 0.15 mm olduğu tespit edilmiştir (Barzani ve ark., 2015).

Otomotiv sanayinde yaygın şekilde kullanılmakta olan düşük dayanımlı DP çeliklerinin kaynaklı birleştirmeleri üzerine pek çok detaylı araştırma bulunmaktadır. Ancak, yeni nesil çelik grubunda yer alan DP1200 saclarının bindirme lazer kaynağı ile ilgili detaylı ve sistematik çalışmalar oldukça sınırlıdır, kaynak davranışlarının belirlenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Gözlemlenen eksiklik bu çalışmanın yapılmasına dayanak oluşturmuştur. Çalışma kapsamında DP1200 sac malzemelere bindirme lazer kaynağı uygulanmıştır. Lazer gücü, ilerleme hızı ve lazer açısı parametreleri kullanılarak deney tasarımı oluşturulmuş ve deneyler gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı numunelerin çekme deneyinde elde edilen kesme kuvveti ve kaynak geometrisinde ölçülen tam birleşme mesafesi için Bulanık Mantık yöntemi ile sonuçlar tahmin edilmiştir ve deneysel sonuçlar ile kıyaslanmıştır. Proses parametrelerinin kaynak bölgesi mukavemeti ve kaynak geometrisi üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde ortaya konularak optimum proses parametreleri belirlenmiştir. Bulanık Mantık yöntemi ile elde edilen kesme kuvveti ve

kaynak geometrisi tahmin bilgilerinin benimsenebileceği saptanmıştır. Elde edilen sonuçlar ile DP1200 saclarının otomotiv sektörüne entegrasyonu ve kullanımının yaygınlaşması için lazer kaynağı ile ilgili temel hususlar aydınlığa kavuşturulmuştur, elde edilen sonuçlar otomotiv sektörüne yönelik uygulamalarda yol gösterici niteliğe sahiptir.

2. Materyal ve Yöntem

Bu bölümde kullanılan malzeme, lazer kaynak yöntemi, deney tasarımı, Bulanık Mantık yöntemi, metalografik incelemeler, çekme testleri hakkında bilgiler verilmiştir.

2.1. Materyal

Çalışmada kullanılan DP1200 çelik malzemenin kimyasal kompozisyonu Çizelge 1'de gösterilmiştir, akma mukavemeti 900-1100 MPa, çekme mukavemeti 1180-1350 MPa, uzama oranı %6'dır.

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan Dual Phase (DP) 1200 çelik malzeme kimyasal kompozisyonu (% ağırlık)

Malzeme	C	Si	Mn	Al	P	S	Cr+Mo	Nb+Ti
DP1200	0.23	1	2.9	0.15-1	0.05	0.01	1	0.15

2.2. Lazer kaynak yöntemi

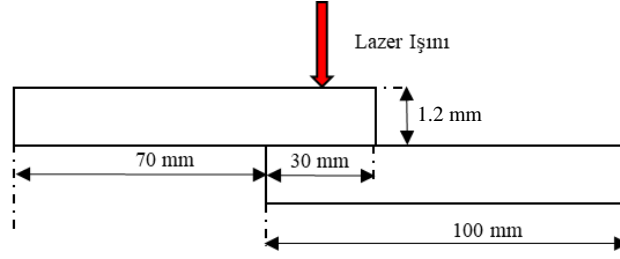
Uygulamada 1070 nm dalga boyu, 100 µm lazer ışın çapına sahip, maksimum gücü 6 kW olan lazer kullanılmıştır, proses fiberi 0.2 mm'dir. Lazer ışını, kaynak yapılacak yüzeye 190 mm mesafeden odaklanmıştır, spot çapı 0.4 mm'dir. Lazer kafası içerisinde 100 mm kolimatör lensi 100 mm, 200 mm odak lensi bulunmaktadır. 0.2 mm fiber optik kablolar sayesinde lazer ışınına hareket yeteneği kazandırılmaktadır. 6 eksenli hareket edebilen KUKA marka robot ve entegre lazer sistemi ile yüksek enerji yoğunluğuna sahip lazer ışını birleştirilmek istenen yüzeye aktarılmaktadır (Şekil 1). Koruyucu gaz 12 lt/dk akış hızında Argon gazı kaynak işlemi sırasında lazer ışını eşliğinde koruyucu gaz olarak yüzeye gönderilmektedir.



Şekil 1. Fiber lazer kaynak işlemlerinde kullanılan robot.

2.3. Deney tasarımı ve lazer kaynak uygulaması

Fiber lazer kaynak işleminde kullanılan plaka boyutları 300 mm x 100 mm x 1.2 mm'dir, bindirme formunda üst üste konumlandırılmış ve tam ortaya lazer ışını gelecek şekilde birleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Çalışmada kullanılan bindirme kaynağı şematik gösterimi.

Lazer gücü, ilerleme hızı ve lazer açısı proses parametreleri seçilerek çıktılar üzerindeki etkileri incelenmiştir, odak mesafesi, koruyucu gaz parametreleri sabit tutulmuştur. Yanıt Yüzey Metodolojisine göre, seçilen üç parametre için beş seviye belirlenmiştir (Çizelge 2). Belirlenmiş olan parametre seviyeleri otomotiv sektöründe reelde kullanılmakta olan değerlerdir. Merkezi Kompozit Deneysel Tasarımına göre 15 adet deney için parametre grupları oluşturulmuştur (Çizelge 3).

Çizelge 2. Lazer kaynak proses parametreleri ve incelenen seviye değerleri

Parametre	Seviye				
	1	2	3	4	5
Lazer Gücü (W)	2200	2350	2500	2650	2800
İlerleme Hızı (mm/s)	40	47.5	55	62.5	70
Lazer açısı (°)	70	75	80	85	90

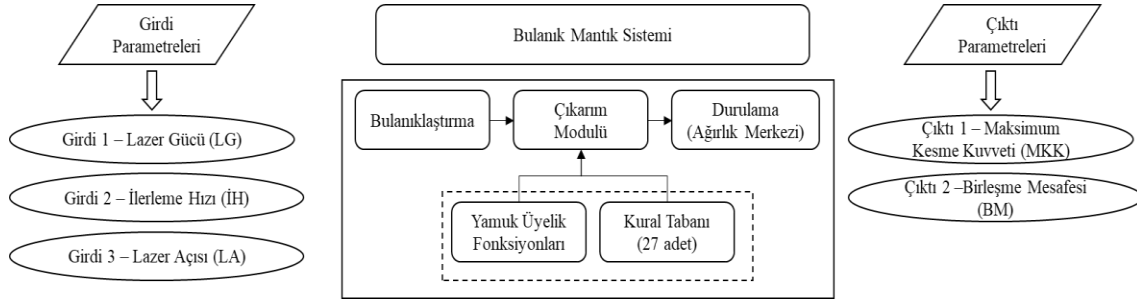
Çizelge 3. Yanıt Yüzey Metodolojisi yöntemine göre deney tasarımı (Bandyopadhyay et al., 2016)

Deneysel No	Lazer Gücü (W)	İlerleme Hızı (mm/s)	Lazer Açısı (°)
1	2350	47.5	75
2	2650	47.5	75
3	2350	62.5	75
4	2650	62.5	75
5	2350	47.5	85
6	2650	47.5	85
7	2350	62.5	85
8	2650	62.5	85
9	2200	55	80
10	2800	55	80
11	2500	40	80
12	2500	70	80
13	2500	55	70
14	2500	55	90
15	2500	55	80

2.4. Bulanık mantık yöntemi

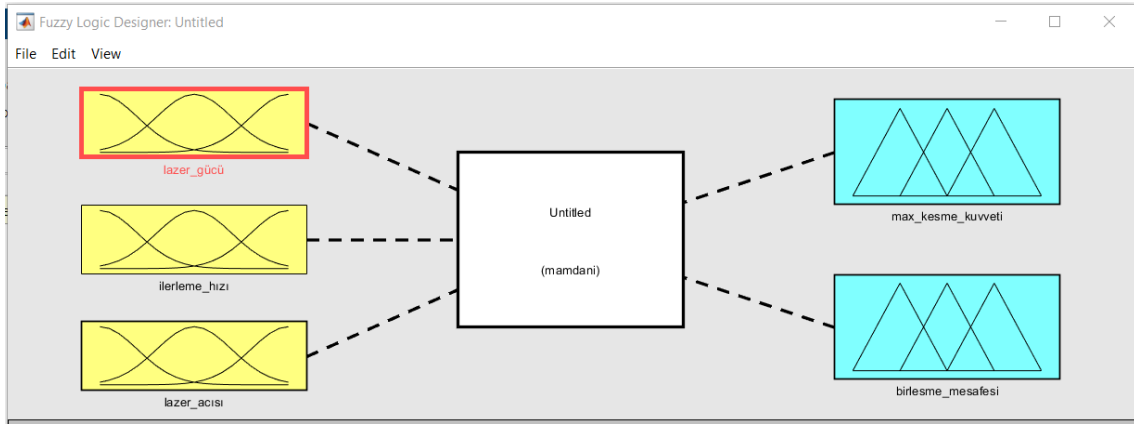
Bulanık Mantık yöntemi, bulanık bir değişkenin hangi bulanık kümeye ait olduğunun tespit edilmesine dayanan matematiksel bir süreçtir (Janasekaran ve ark., 2017b; Shanavas & Dhas, 2018; Rout ve ark., 2022). Bulanık mantığın spesifik özelliği, kümelerin sınırlarının keskin olmayışından kaynaklanır. Süreç, bulanıklaştırma, kural işleme ve karar mekanizması, durulaştırma aşamalarından oluşur (Medhi et al., 2020; Palani et al., 2020; Devendran & Ashoka Varthanan, 2021). Bulanık kümeyi ifade etmede üyelik fonksiyonları kullanılmaktadır. Üyelik fonksiyonları üçgen, yamuk, Gauss şeklinde olabilir. Kontrol algoritmaları kural tabanlı sistem yardımıyla oluşturulmaktadır. Durulaştırma yöntemleri ise ağırlık merkezi yöntemi, ağırlıklı ortalama yöntemi, maksimum durulaştırıcı şeklinde olabilir (Kim, 2017; Heidarzadeh ve ark., 2020; Velázquez ve ark., 2021). Lazer kaynak prosesi için

bulanık mantık sistem modeli Şekil 3’de gösterilmiştir. Lazer gücü, ilerleme hızı ve lazer açısı parametreleri girdi parametreleri; kesme kuvveti ve birleşme mesafesi çıktı parametreleri olarak belirlenmiştir. Bulanık mantık sisteminde yer alan bulanıklaştırma, çıkarım (üyelik fonksiyonları ve kural tabanı), durulama aşamaları şematik olarak gösterilmiştir.

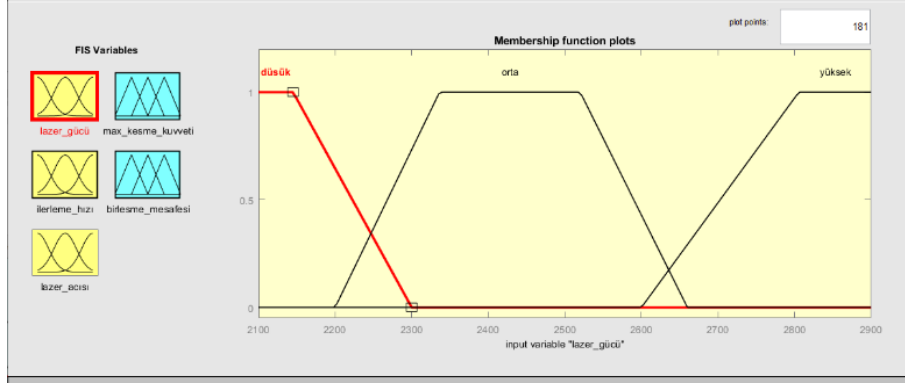


Şekil 3. Lazer kaynak prosesi için bulanık mantık modeli.

Bulanık mantık uygulaması MATLAB Fuzzy Toolbox yardımıyla yapılmıştır, arayüzü Şekil 4’te gösterilmektedir. Giriş ve çıkış parametrelerini tanımlamak için yamuk üyelik fonksiyonları kullanılmıştır. Lazer gücü, ilerleme hızı ve lazer açısı parametreleri için düşük, orta ve yüksek olacak şekilde üyelik fonksiyonları oluşturulmuştur (Şekil 5, Şekil 6, Şekil 7). Ayrıca üyelik fonksiyonları matematiksel olarak ifade edilmiştir: lazer gücü üyelik fonksiyonları Eş. 1-3, ilerleme hızı üyelik fonksiyonları Eş. 4-6, lazer açısı üyelik fonksiyonları Eş. 7-9, maksimum kesme kuvveti üyelik fonksiyonları Eş. 10-12, birleşme mesafesi üyelik fonksiyonları Eş. 13-15 ile gösterilmiştir. Mamdani Yöntemi kullanılarak çıktı parametrelerinin tahmini yapılmaktadır. Çıktı parametreleri olarak maksimum kesme kuvveti ve tam birleşme mesafesi değerleri incelenmiştir, oluşturulan bulanık çıkışlar Şekil 8 ve Şekil 9’da gösterilmektedir. Kural tabanının oluşturulmasında “Eğer” ve “O Halde” döngülerinden yararlanılmıştır. Girdi parametreleri için belirlenen düşük, orta, yüksek seviye üyelik fonksiyonları için 27 adet kural tanımlanmıştır, kural tabanı ekran görüntüsü Şekil 10’da yer almaktadır. Durulama Yöntemi olarak ağırlık merkezi yöntemi (Centroid) kullanılmıştır.



Şekil 4. Bulanık Mantık Uygulaması MATLAB arayüzü.

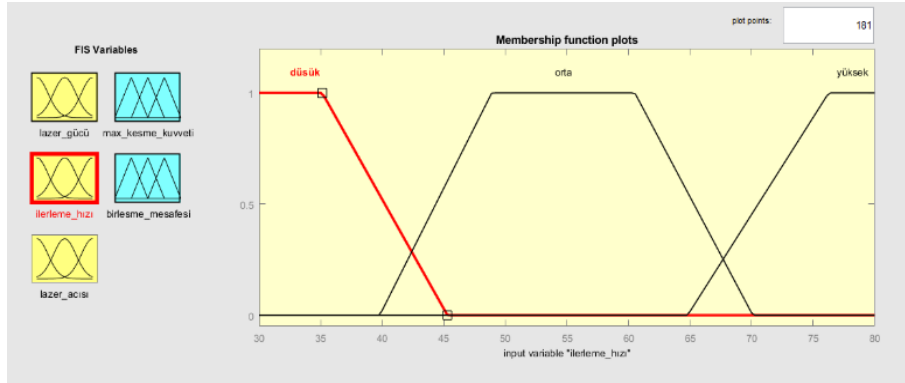


Şekil 5. Lazer gücü parametresi için Bulanık Mantık üyelik fonksiyonları.

$$\mu_{düşük}(x) = \begin{cases} 1, & \text{eğer } x < 2150 \\ \frac{2300 - x}{150}, & \text{eğer } 2150 \leq x \leq 2300 \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu_{orta}(x) = \begin{cases} 0, & \text{eğer } x < 2200 \\ \frac{x - 2200}{150}, & \text{eğer } 2200 \leq x \leq 2350 \\ 1, & \text{eğer } 2350 \leq x \leq 2550 \\ \frac{2650 - x}{100}, & \text{eğer } 2550 < x \leq 2650 \\ 0, & \text{eğer } x > 2650 \end{cases} \quad (2)$$

$$\mu_{yüksek}(x) = \begin{cases} \frac{x - 2600}{200}, & \text{eğer } 2600 \leq x < 2800 \\ 1, & \text{eğer } x \geq 2800 \end{cases} \quad (3)$$

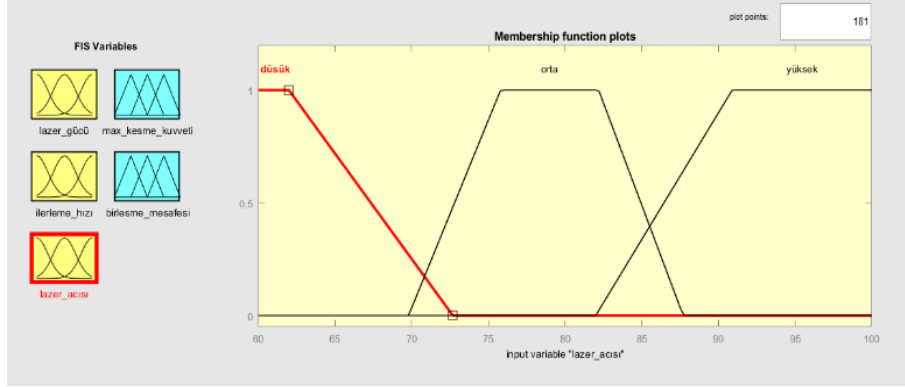


Şekil 6. İlerleme hızı parametresi için Bulanık Mantık üyelik fonksiyonları.

$$\mu_{düşük}(x) = \begin{cases} 1, & \text{eğer } x < 37 \\ \frac{45 - x}{8}, & \text{eğer } 37 \leq x \leq 45 \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu_{orta}(x) = \begin{cases} 0, & \text{eğer } x < 40 \\ \frac{x - 40}{8}, & \text{eğer } 40 \leq x \leq 48 \\ 1, & \text{eğer } 48 \leq x \leq 62 \\ \frac{70 - x}{8}, & \text{eğer } 62 < x \leq 70 \\ 0, & \text{eğer } x > 70 \end{cases} \quad (5)$$

$$\mu_{yüksek}(x) = \begin{cases} \frac{x-70}{5}, & \text{eğer } 70 \leq x < 75 \\ 1, & \text{eğer } x \geq 75 \end{cases} \quad (6)$$

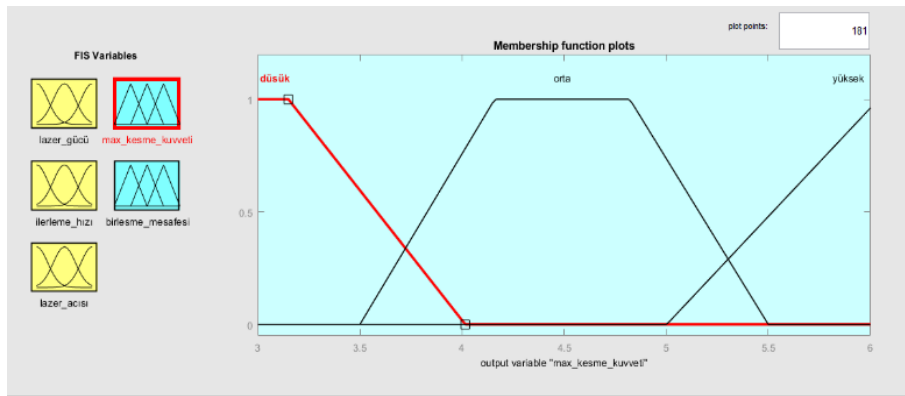


Şekil 7. Lazer açısı parametresi için Bulanık Mantık üyelik fonksiyonları.

$$\mu_{düşük}(x) = \begin{cases} 1, & \text{eğer } x < 62 \\ \frac{73-x}{11}, & \text{eğer } 62 \leq x \leq 73 \end{cases} \quad (7)$$

$$\mu_{orta}(x) = \begin{cases} 0, & \text{eğer } x < 70 \\ \frac{x-70}{5}, & \text{eğer } 70 \leq x \leq 75 \\ 1, & \text{eğer } 75 \leq x \leq 83 \\ \frac{83-x}{4}, & \text{eğer } 83 < x \leq 87 \\ 0, & \text{eğer } x > 87 \end{cases} \quad (8)$$

$$\mu_{yüksek}(x) = \begin{cases} \frac{x-82}{8}, & \text{eğer } 82 \leq x < 90 \\ 1, & \text{eğer } x \geq 90 \end{cases} \quad (9)$$

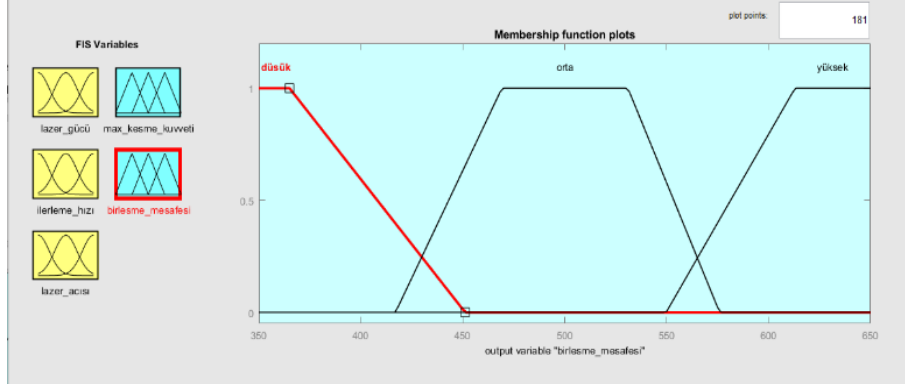


Şekil 8. Maksimum kesme kuvveti çıktısı için Bulanık Mantık üyelik fonksiyonu.

$$\mu_{düşük}(x) = \begin{cases} 1, & \text{eğer } x < 3.2 \\ \frac{4-x}{0.8}, & \text{eğer } 3.2 \leq x \leq 4 \end{cases} \quad (10)$$

$$\mu_{orta}(x) = \begin{cases} 0, & \text{eğer } x < 3.5 \\ \frac{x - 3.5}{0.6}, & \text{eğer } 3.5 \leq x \leq 4.1 \\ 1, & \text{eğer } 4.1 \leq x \leq 4.8 \\ \frac{5.5 - x}{0.7}, & \text{eğer } 4.8 < x \leq 5.5 \\ 0, & \text{eğer } x > 5.5 \end{cases} \quad (11)$$

$$\mu_{yüksek}(x) = \begin{cases} \frac{x-5}{1}, & \text{eğer } 5 \leq x < 6 \\ 1, & \text{eğer } x \geq 6 \end{cases} \quad (12)$$



Şekil 9. Tam birleşme mesafesi değerleri çıktısı için Bulanık Mantık üyelik fonksiyonu.

$$\mu_{düşük}(x) = \begin{cases} 1, & \text{eğer } x < 360 \\ \frac{450 - x}{90}, & \text{eğer } 360 \leq x \leq 450 \end{cases} \quad (13)$$

$$\mu_{orta}(x) = \begin{cases} 0, & \text{eğer } x < 420 \\ \frac{x - 420}{40}, & \text{eğer } 420 \leq x \leq 460 \\ 1, & \text{eğer } 460 \leq x \leq 540 \\ \frac{575 - x}{35}, & \text{eğer } 540 < x \leq 575 \\ 0, & \text{eğer } x > 575 \end{cases} \quad (14)$$

$$\mu_{yüksek}(x) = \begin{cases} \frac{x - 550}{60}, & \text{eğer } 550 \leq x < 610 \\ 1, & \text{eğer } x \geq 610 \end{cases} \quad (15)$$

1. If (lazer_gücü is düşük) and (ilerleme_hızı is düşük) and (lazer_acısı is düşük) then (max_kesme_kuvveti is orta)(birlesme_mesafesi is orta) (1)
 2. If (lazer_gücü is düşük) and (ilerleme_hızı is orta) and (lazer_acısı is düşük) then (max_kesme_kuvveti is orta)(birlesme_mesafesi is orta) (1)
 3. If (lazer_gücü is düşük) and (ilerleme_hızı is yüksek) and (lazer_acısı is düşük) then (max_kesme_kuvveti is orta)(birlesme_mesafesi is orta) (1)
 4. If (lazer_gücü is düşük) and (ilerleme_hızı is düşük) and (lazer_acısı is orta) then (max_kesme_kuvveti is yüksek)(birlesme_mesafesi is yüksek) (1)
 5. If (lazer_gücü is düşük) and (ilerleme_hızı is düşük) and (lazer_acısı is yüksek) then (max_kesme_kuvveti is yüksek)(birlesme_mesafesi is yüksek) (1)
 6. If (lazer_gücü is düşük) and (ilerleme_hızı is orta) and (lazer_acısı is orta) then (max_kesme_kuvveti is orta)(birlesme_mesafesi is orta) (1)
 7. If (lazer_gücü is düşük) and (ilerleme_hızı is orta) and (lazer_acısı is yüksek) then (max_kesme_kuvveti is yüksek)(birlesme_mesafesi is yüksek) (1)
 8. If (lazer_gücü is düşük) and (ilerleme_hızı is yüksek) and (lazer_acısı is orta) then (max_kesme_kuvveti is orta)(birlesme_mesafesi is orta) (1)
 9. If (lazer_gücü is düşük) and (ilerleme_hızı is yüksek) and (lazer_acısı is yüksek) then (max_kesme_kuvveti is orta)(birlesme_mesafesi is orta) (1)
 10. If (lazer_gücü is orta) and (ilerleme_hızı is düşük) and (lazer_acısı is düşük) then (max_kesme_kuvveti is yüksek)(birlesme_mesafesi is yüksek) (1)
 11. If (lazer_gücü is orta) and (ilerleme_hızı is orta) and (lazer_acısı is düşük) then (max_kesme_kuvveti is yüksek)(birlesme_mesafesi is yüksek) (1)
 12. If (lazer_gücü is orta) and (ilerleme_hızı is yüksek) and (lazer_acısı is düşük) then (max_kesme_kuvveti is yüksek)(birlesme_mesafesi is yüksek) (1)
 13. If (lazer_gücü is orta) and (ilerleme_hızı is düşük) and (lazer_acısı is orta) then (max_kesme_kuvveti is yüksek)(birlesme_mesafesi is yüksek) (1)
 14. If (lazer_gücü is orta) and (ilerleme_hızı is düşük) and (lazer_acısı is yüksek) then (max_kesme_kuvveti is yüksek)(birlesme_mesafesi is yüksek) (1)
 15. If (lazer_gücü is orta) and (ilerleme_hızı is orta) and (lazer_acısı is orta) then (max_kesme_kuvveti is orta)(birlesme_mesafesi is orta) (1)
 16. If (lazer_gücü is orta) and (ilerleme_hızı is orta) and (lazer_acısı is yüksek) then (max_kesme_kuvveti is yüksek)(birlesme_mesafesi is yüksek) (1)
 17. If (lazer_gücü is orta) and (ilerleme_hızı is yüksek) and (lazer_acısı is orta) then (max_kesme_kuvveti is düşük)(birlesme_mesafesi is düşük) (1)
 18. If (lazer_gücü is orta) and (ilerleme_hızı is yüksek) and (lazer_acısı is yüksek) then (max_kesme_kuvveti is düşük)(birlesme_mesafesi is düşük) (1)
 19. If (lazer_gücü is yüksek) and (ilerleme_hızı is düşük) and (lazer_acısı is düşük) then (max_kesme_kuvveti is yüksek)(birlesme_mesafesi is yüksek) (1)
 20. If (lazer_gücü is yüksek) and (ilerleme_hızı is orta) and (lazer_acısı is düşük) then (max_kesme_kuvveti is yüksek)(birlesme_mesafesi is yüksek) (1)

If and and Then and

lazer_gücü is ilerleme_hızı is lazer_acısı is max_kesme_kuvveti is birlesme_mesafesi is

düşük düşük düşük düşük düşük
 orta orta orta orta orta
 yüksek yüksek yüksek yüksek yüksek
 none none none none none

not not not not not

Connection Weight:

or and

1 Delete rule Add rule Change rule << >>

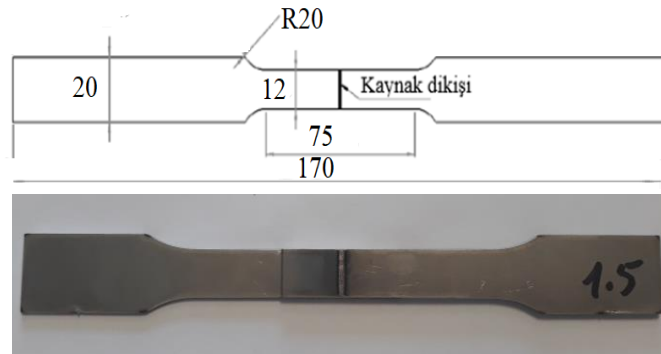
Şekil 10. Bulanık Mantık yöntemi uygulamasında oluşturulan kural tabanı.

2.5. Metalografik inceleme

Lazer kaynak uygulamasından sonra lazer kesim işlemiyle elde edilmiş numuneler hem metalografik incelemelerde hem de çekme deneylerinde kullanılmıştır. Kaynak enine kesit yönünde STRUERS marka metalografik kesme cihazı ile kesilmiş ve bakalit hazırlanmıştır. Zımparalama ve parlatma işlemleri tamamlandıktan sonra iç yapının ortaya çıkarılması için %3 Nital solüsyonu ile dağlama yapılmıştır. Mikroyapının incelenmesinde Nikon Eclipse optik mikroskop ile birlikte Clemex yazılımı kullanılmıştır.

2.6. Çekme testi

Lazer kaynak işlemi gerçekleştirildikten sonra lazer kesim yöntemi ile çekme deneyinde kullanılmak üzere numuneler elde edilmiştir, boyutları Şekil 11’de gösterilmiştir. Çekme deneyleri UTEST-7014 cihazı yardımıyla çekme deneyi yapılmıştır. Parametre grupları özelinde üçer adet numune için deneyler tekrarlanmış ve elde edilen maksimum kesme kuvveti ortalamaları hesaplanarak incelemeler yapılmıştır.

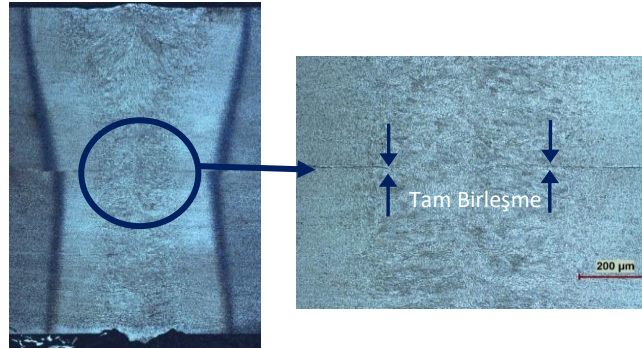


Şekil 11. Çekme deneyinde kullanılan numune ve boyutları.

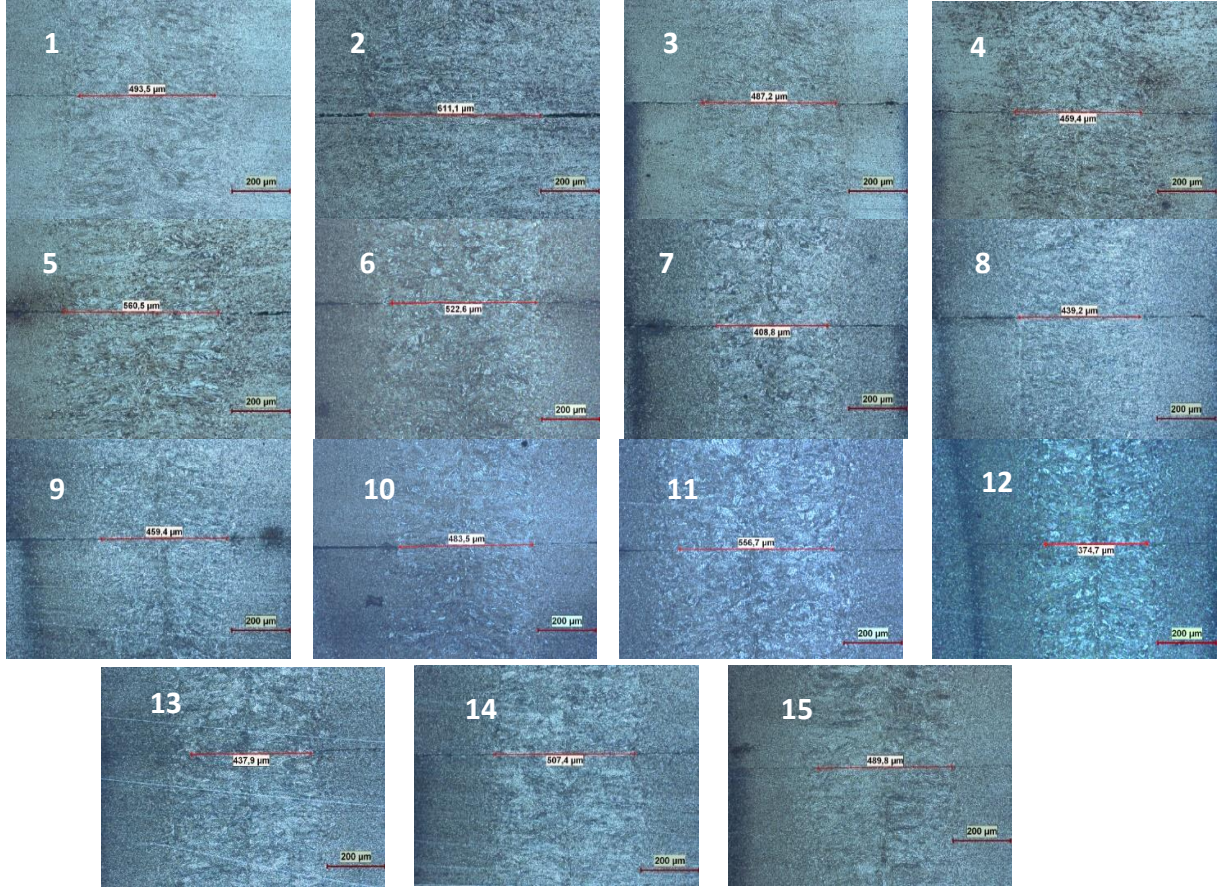
3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Kaynak geometrisi

Gerçekleştirilen deneylerde numunelerin tamamında tam penetrasyon gerçekleşmiştir (Şekil 12). Bindirme kaynak bağlantısı mikroyapısı detaylı incelendiğinde bağlantı ara yüzeylerinde erime bölgesi içerisinde birleşmenin tam olarak gerçekleşmediği bir bölgenin varlığı görülmektedir, eklem boyunca oluşan bu uzunluk İngilizce “fully bonding” olarak isimlendirilmektedir. Kaynak kalitesinin ve bağlantı mukavemetinin belirlenmesinde bir kriter olarak ele alınan tam birleşme mesafesinin çatlak oluşumunda da rolü bulunmaktadır (Lin ve ark., 2021). Bağlantının en zayıf kısmından çatlak başlayıp kolaylıkla yayılabilir, bu nedenle bağlantıların kesitleri detaylı olarak incelenmiştir. Optik mikroskopta alınan birleşme mesafesi görüntüleri Şekil 13’de gösterilmektedir, ölçülen kaynak geometrileri Çizelge 4’te verilmiştir. En yüksek elde edilen birleşme mesafesi “2” numaralı numunede 2650 W lazer gücü, 47.5 mm/s ilerleme hızı, 75° lazer açısı parametreleri ile 611.1 µm olarak elde edilmiştir. En düşük elde edilen birleşme mesafesi değeri ise 374.7 µm’dir, “12” numaralı numunede 2500 W lazer gücü, 70 mm/s ilerleme hızı, 80° lazer açısı parametreleri kullanılmıştır. En yüksek değerin elde edildiği “2” numaralı numunede lazer gücü 2650 W iken, en düşük birleşme mesafesinin elde edildiği “12” numaralı numunede 2500 W’dır. Kaynaklı bağlantılarda lazer gücü artışı ile yüksek enerji girdisi sayesinde plakaların bağlanma noktası birleşme mesafesi değeri yükseltilebilir. İlerleme açısı parametresi özelinde incelenecek olursa “2” numaralı numunede 47.5 mm/s, “12” numaralı numunede 70 mm/s değerleri kullanılmıştır. Yüksek ilerleme hızında lazer ışını daha hızlı hareket ettiğinden enerji girdisi azalması sonucunda erime ve katılma daha hızlı gerçekleşmekte, birleşme mesafesi değerleri düşük kalmaktadır. Bu durum penetrasyon oranının düştüğünü gösterir ki kaynak dayanımı için istenmeyen bir durumdur. Lazer açısı parametrelerinde ise 75°’nin kullanıldığı numunede yüksek, 85° lazer açısının kullanıldığı numunede en düşük değer elde edilmiştir. Düşük lazer açısı parametresi kullanımının enerji yoğunluğu yayılımını sağlayarak tam birleşme mesafesi cinsinden olumlu sonuçlar vereceği yorumu yapılabilir.



Şekil 12. Kaynaklı numunede mikro yapı ve tam birleşme bölgesi.



Şekil 13. Numunelerin erime bölgesi tam birleşme durumları.

3.2. Mekanik özellikler

Farklı parametre grupları için gerçekleştirilen deneyler sonucunda numunelere çekme deneyi uygulanmıştır, maksimum kesme kuvveti verileri elde edilmiştir (Çizelge 4). Sonuçlar incelendiğinde en yüksek 5.9555 kN ve en düşük 4.1391 kN değerlerinin sırasıyla “2” ve “12” numaralı deney numunelerinde elde edildiği görülmüştür. Kullanılan proses parametreleri değerlerine göre ortaya çıkan ısı girdisinin mekanik özelliklere etkisi bulunmaktadır. Yüksek mekanik özelliklerin elde edildiği “2” numaralı numunede nispeten yüksek seviye 2650 W lazer gücü, nispeten düşük seviye 47.5 mm/s ilerleme hızı ve 75° lazer açısı kullanılmıştır. Mekanik özelliklerin en düşük olduğu numunede ise daha düşük seviye lazer gücü (2500 W), daha yüksek seviye ilerleme hızı (70 mm/s) ve daha yüksek değerde lazer açısı (80°) parametreleri kullanılmıştır. Ayrıca kaynak geometrisi bölümünde incelenen tam birleşme mesafesi için de aynı deney gruplarında en yüksek ve en düşük değerlerin elde edilmesi maksimum kesme kuvveti ve tam birleşme mesafesi değerlerinin birbiri ile ilişkili olduğunu göstermektedir.

Diğer deney numuneleri de birbirine göre kıyaslanarak yorumlanacak olursa: “1” ve “2” numaralı deneylerde ilerleme hızı (47.5 mm/s) ve lazer açısı (75°) parametreleri eşittir, lazer gücü parametresi farklıdır. “2” numaralı numunede lazer gücü (2650 W), “1” numaralı numuneye (2350 W) göre daha yüksektir. “1” numaralı deneyde 5.6445 kN maksimum kesme kuvveti elde edilirken, “2” numaralı deneyde 5.9555 kN değeri elde edilmiştir. Lazer gücü parametresinin artışı ile kaynak yapılacak metal üzerine yüksek ısı girdisi verilmektedir; eriyik metalin hareket kabiliyeti artmakta ve kaynak havuzu genişleyerek metalurjik bağlanma kabiliyetini dolayısıyla maksimum kesme kuvvetini artırmaktadır. “3-4” numaralı deney grupları için de diğer parametreler sabit tutulup lazer gücü 2350 W ve 2650 W olarak belirlenmiştir, lazer gücü artışı ile maksimum kesme kuvveti 5.1203 değerinden 5.5688 kN değerine yükselmiştir. Aynı sonuçlar “5-6” numaralı deneyler için de elde edilmiştir. Yani yüksek lazer gücünün yüksek kesme kuvveti elde etmede etkili olduğu söylenebilir.

“1” ve “3” numaralı numuneler birlikte değerlendirildiğinde lazer gücü (2350 W) ve lazer açısı (75°) değerleri eşit, ilerleme hızı değerleri farklıdır; “1” numaralı deneyde 47.5 mm/s, “3” numaralı deneyde 62.5 mm/s parametreleri kullanılmıştır. İlerleme hızı artışı ile maksimum kesme kuvveti 5.6445 kN değerinden 5.1203 kN değerine düşmüştür. Yüksek ilerleme hızında lazer ışını daha hızlı hareket ederek ısı girdisi azalması nedeniyle kaynak havuzundaki eriyiğin hızlı soğuması ve katılaşması sonucu kaynak mukavemetinin azalmasına neden olmaktadır. Lazer ışınının temel malzemeye temas süresinin artmasıyla ergimiş metalin akışı için uygun süre sağlanmış olur, güçlü bir bağ oluşturulmasında rol oynar (Zhang et al., 2019). “11” ve “12” numaralı deneylerden elde edilen sonuçlar da bu yorumu kanıtlar niteliktedir, bu deney gruplarında da lazer gücü (2500 W) ve lazer açısı (80°) sabit olup, ilerleme hızı “11” numaralı deneyde 40 mm/s, “12” numaralı deneyde 70 mm/s’dir. İlerleme hızının 40 mm/s’den 70 mm/s’ye yükseltilmesi kesme kuvvetini düşürmüştür.

“3” ve “7” numaralı deneylerde ise lazer gücü (2350 W) ve ilerleme hızı (62.5 mm/s) sabit, lazer açısı parametreleri 75° ve 85°’dir. Lazer açısının yükseltilmesi ile maksimum kesme kuvveti 5.1203 kN değerinden 4.8500 kN değerine düşmüştür. Düşük lazer açısı kullanımının kesme kuvveti açısından daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Aynı sonuçlar lazer gücü (2650 W) ve ilerleme hızının sabit (62.5 mm/s), lazer açısı parametresinin farklı olduğu “4-8” numaralı deney gruplarında da elde edilmiştir. Lazer açısının 75° olduğu “4” numaralı deneyde 5.5688 kN, lazer açısı parametresinin 85° kullanıldığı “8” numaralı deneyde 4.6297 kN maksimum kesme kuvveti elde edilmiştir. “13-14-15” numaralı numunelerde ise lazer gücü (2500 W), ilerleme hızı parametreleri sabittir (55 mm/s), lazer açısı parametresinde 70°-90°-80° birbiri ile kıyaslanmıştır. En yüksek kesme kuvveti 70° lazer açısına sahip 5.8266 kN olarak elde edilmiştir. Düşük lazer açısı kullanımının kaynaklı bölgedeki ısı yayılımını genişlettiğinden kaynaklı bölgenin mekanik özellikleri açısından daha iyi sonuçlar vereceği tespit edilmiştir.

“9” ve “10” numaralı parametre gruplarında en düşük (2200 W) ve en yüksek (2800 W) seviye lazer gücü kullanılmasına rağmen tüm deney grupları içerisinde maksimum ve minimum kesme kuvveti değerleri elde edilmemiştir. Bunun sebebinin yüksek lazer güçlerinde odaklanmış ısı yoğunluğunun dar bir bölgede meydana gelmesiyle sıçratma oluşturması ile ilişkili olduğu sonucuna varılmıştır. Bu durum lazer gücü parametresinin etkinliğinin diğer parametrelere göre daha az olduğunu göstermektedir.

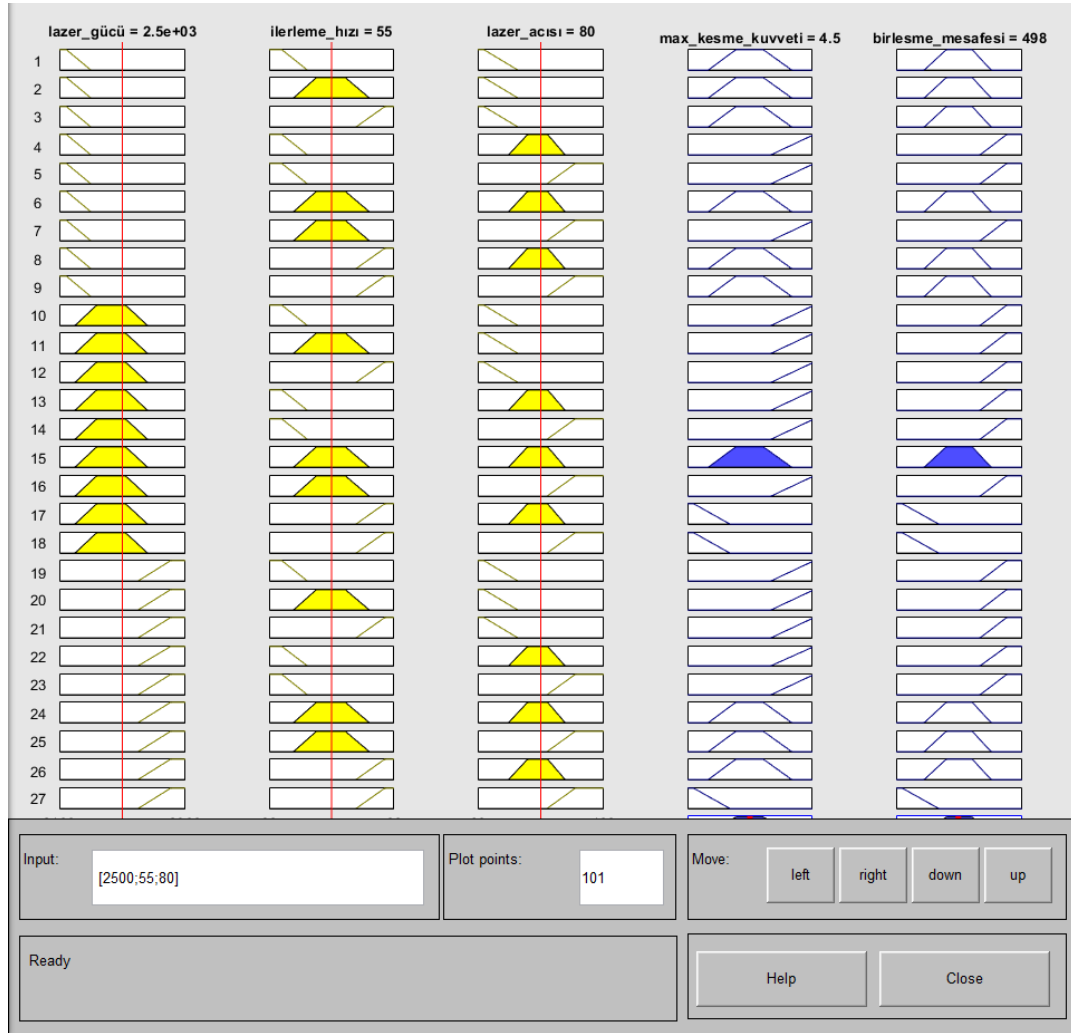
Bu bilgilerden hareketle nispeten yüksek seviye lazer gücü, düşük seviye ilerleme hızı ve düşük seviye lazer açısı parametrelerinin maksimum kesme kuvveti elde etmede etkili olduğu, mekanik özelliklere olumlu sonuçlar yaratacağı yorumu yapılabilir. Optimum proses parametreleri olarak 2800 W lazer gücü, 40 mm/s ilerleme hızı, 70° lazer açısı parametreleri belirlenebilir.

Çizelge 4. Çekme deneyinde elde edilen maksimum kesme kuvveti sonuçları

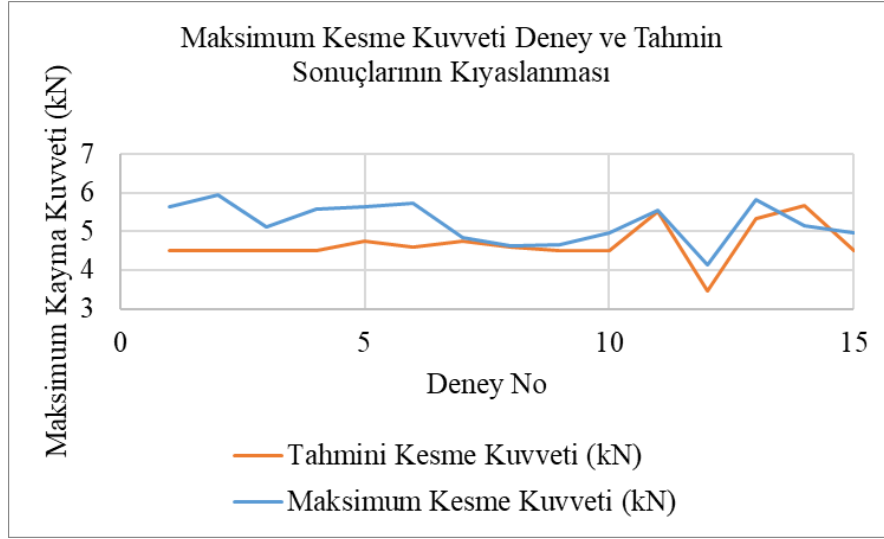
Deney No	Lazer Gücü (W)	İlerleme Hızı (mm/s)	Lazer Açısı (°)	Tam Birleşme Mesafesi (µm)	Maksimum Kesme Kuvveti (kN)
1	2350	47.5	75	493.5	5.6445
2	2650	47.5	75	611.1	5.9555
3	2350	62.5	75	487.2	5.1203
4	2650	62.5	75	459.4	5.5688
5	2350	47.5	85	560.5	5.6438
6	2650	47.5	85	522.6	5.7203
7	2350	62.5	85	408.8	4.8500
8	2650	62.5	85	439.2	4.6297
9	2200	55	80	459.4	4.6568
10	2800	55	80	483.5	4.9594
11	2500	40	80	556.7	5.5594
12	2500	70	80	374.7	4.1391
13	2500	55	70	437.9	5.8266
14	2500	55	90	507.4	5.1443
15	2500	55	80	489.8	4.9672

3.3. Bulanık mantık yöntemi ile optimizasyon çalışması

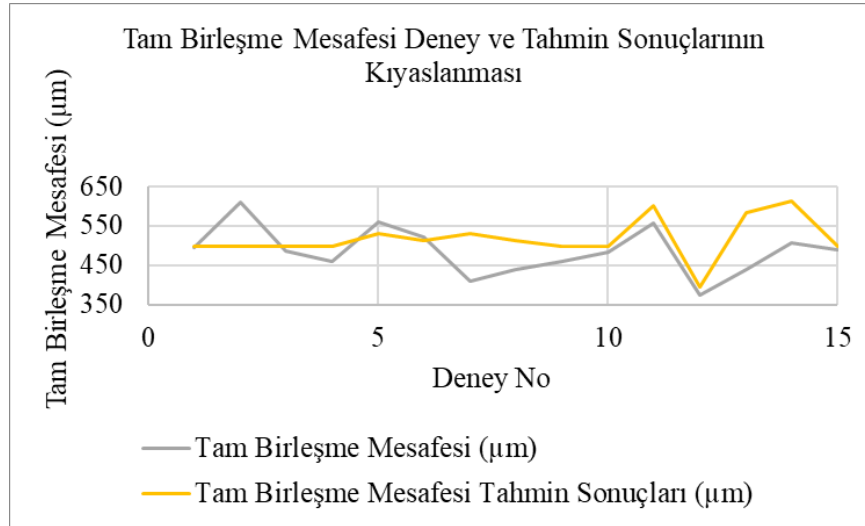
Lazer kaynak parametrelerinin kesme kuvvetine ve birleşme mesafesi değerlerine etkisini incelemek, optimum proses parametrelerini belirlemek için Bulanık Mantık yöntemi kullanılarak MATLAB Fuzzy Toolbox yardımıyla bir analiz yapılmıştır. Tahmine dayalı bulanık çıkarım sisteminin geliştirilmesi için 27 adet kural tanımlanarak kural tabanı oluşturulmuştur. Kural tabanı, deneysel koşula göre beklenen çıktığı tahmin etmek için kullanılır. Lazer gücü, ilerleme hızı ve lazer açısı parametreleri için girdi değerleri verildiğinde, çıktı değerleri tahmin edilmektedir, Şekil 14'de kullanılan arayüz gösterilmiştir. İlk üç sütun girdi parametreleri olan lazer gücü, ilerleme hızı, lazer açısını göstermektedir; dördüncü ve beşinci sütun ise yanıt değişkenleri maksimum kesme kuvveti ve tam birleşme mesafesini göstermektedir. Örneğin 2500 W lazer gücü, 55 mm/s ilerleme hızı, 80° lazer açısı girdi parametreleri için elde edilecek maksimum kesme kuvveti 4.5 kN ve elde edilecek bonding uzunluğu 498 μm tahmin edilmektedir. Çalışmada kullanılan tüm girdi parametreleri için maksimum kesme kuvveti ve tam birleşme mesafesi tahmin sonuçları MATLAB arayüzü yardımıyla elde edilmiştir. Örnek olarak Deney 10 için 2800 W lazer gücü, 55 mm/s ilerleme hızı, 80° lazer açısı girdi parametrelerinde maksimum kesme kuvveti 4.5 kN, tam birleşme mesafesi 498 μm olarak tahmin edilmiştir. Deney 11 için 2500 W lazer gücü, 40 mm/s ilerleme hızı, 80° lazer açısı girdi parametrelerinde maksimum kesme kuvveti 5.52 kN, tam birleşme mesafesi tahmin sonucu 601 μm 'dir. Elde edilen deneysel çıktılar ve tahmin sonuçları grafik çizdirilerek birbirine göre kıyaslanmıştır, maksimum kesme kuvveti için Şekil 15, tam birleşme mesafesi için Şekil 16'da yer almaktadır. Tahmin sonuçları ile deneysel sonuçlar nispeten birbiri ile tutarlıdır, otomotiv sektöründe kaynak işlemlerinde parametrelerin kullanıma açısından yol gösterici nitelik taşımaktadır.



Şekil 14. Kural tabanı oluşturulan Bulanık Mantık modelinin arayüzü.



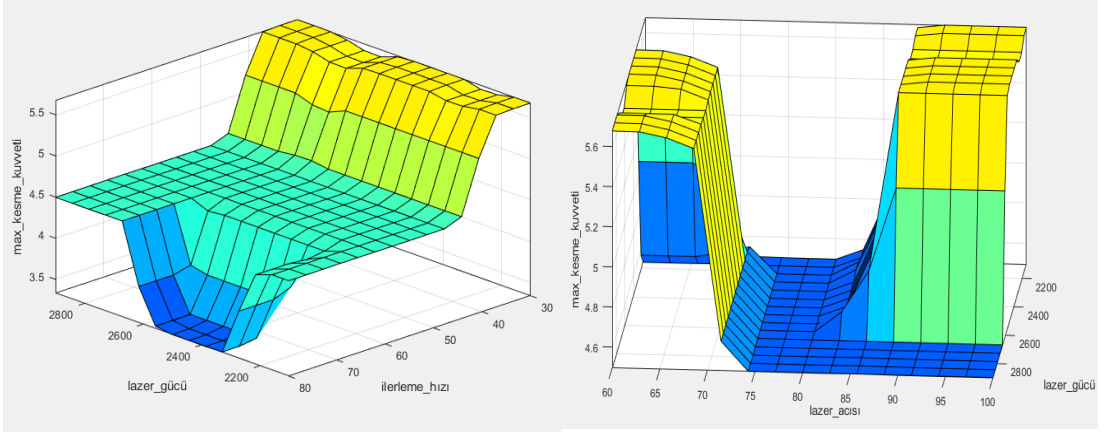
Şekil 15. Maksimum kesme kuvveti için Bulanık Mantık tahmin sonuçları ile deneysel verilerin kıyaslanması.



Şekil 16. Tam Birleşme Mesafesi için Bulanık Mantık tahmin sonuçları ile deneysel verilerin kıyaslanması.

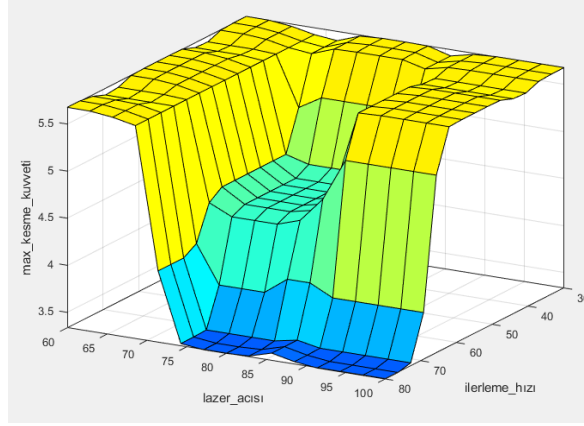
MATLAB yardımıyla maksimum kesme kuvveti ve birleşme mesafesi çıktıları için girdi parametrelerine göre yüzey grafikleri çizdirilmiştir, Şekil 17 ve Şekil 18'de grafikler gösterilmektedir. Lazer gücü ve ilerleme hızı için oluşturulan yüzey grafiği yorumlandığında düşük seviye ilerleme hızında (40 mm/s) maksimum kesme kuvvetinin elde edilebileceği gözlemlenmektedir (Şekil 17.a). Lazer açısı ve lazer gücü yüzey grafiklerinde düşük seviye lazer açısında (70°) maksimum kesme kuvveti değerleri elde edilebileceği tespit edilmiştir, ki bu sonuçlar diğer bölümlerde incelenen maksimum kesme kuvveti ve birleşme mesafesi ile tutarlıdır (Şekil 17.b). Lazer açısı ve ilerleme hızı grafiğinde ise aynı sonuçların elde edilebileceği söylenebilir (Şekil 17.c). Lazer gücü, parametrelere göre net bir değişim göstermemiştir, diğer parametrelere göre etkinliği daha azdır.

Tam birleşme mesafesi için elde edilen sonuçlar kesme kuvveti sonuçları ile örtüşmektedir, elde edilen grafikler oldukça benzerdir (Şekil 18). Çekme deneyinden elde edilen sonuçlar ile birlikte değerlendirildiğinde yüksek seviye lazer gücü (2800 W), ilerleme hızının düşük seviye (40 mm/s) ve lazer açısı parametresinin düşük (70°) olmasının mekanik ve geometrik özellikler açısından iyi sonuçlar vereceği söylenebilir.



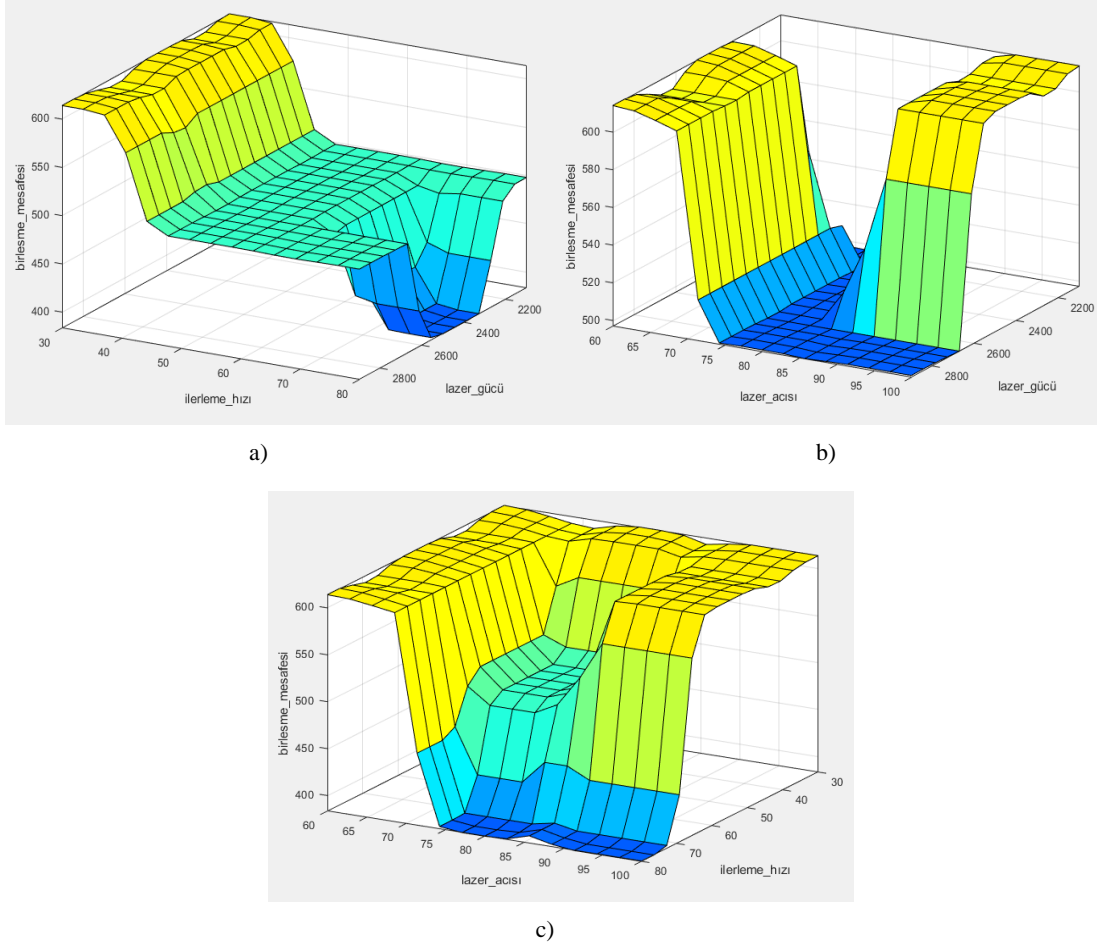
a)

b)



c)

Şekil 17. Kesme kuvveti çıktısı için yüzey grafikleri a) Lazer gücü ve ilerleme hızı ilişkisi, b) lazer gücü ve lazer açısı ilişkisi, c) ilerleme hızı ve lazer açısı ilişkisi.



Şekil 18. Tam birleşme mesafesi için yüzey grafikleri a) Lazer gücü ve ilerleme hızı ilişkisi, b) lazer gücü ve lazer açısı ilişkisi, c) ilerleme hızı ve lazer açısı ilişkisi.

4. Sonuç

Çalışma kapsamında Dual Phase (DP) 1200 çeliklerin fiber lazer kaynak yöntemi ile bindirme formunda birleştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Lazer gücü, ilerleme hızı ve lazer açısı girdi parametrelerinin, kesme kuvveti ve birleşme mesafesi üzerindeki etkilerini tahmin etmek ve proses parametrelerini optimize etmek için Bulanık Mantık Mamdani yöntemi kullanılmıştır.

- Lazer gücü parametresinin artışı ile kaynak alanına daha yüksek ısı girdisi aktarılmakta kaynak havuzu genişleyerek metalurjik bağlanma kabiliyeti artmaktadır. Ancak, yüksek lazer güçlerinde sıçratmanın da mekanik özellikler üzerinde olumsuz etkisinin olabileceği unutulmamalıdır.
- İlerleme hızı parametresinin düşük olması ile lazer ışınının kaynak metaline temas süresi arttırılmakta ve erimenin gerçekleşmesi için zaman sağlanmaktadır. Yüksek seviye lazer gücü (2800 W), düşük seviye ilerleme hızı (40 mm/s) ve düşük seviye lazer açısı (70°) parametrelerinin kombinasyonunda yüksek birleşme mesafesi değerleri ve kesme kuvveti değerleri elde edilmiştir; metalurjik bağlanma ve mukavemet özelliklerinin iyi olduğunun kanıtıdır.
- Bulanık Mantık Mamdani yöntemi ile elde edilen kesme kuvveti ve kaynak geometrisi tahmin sonuçları deneysel çıktılar ile örtüşmektedir. Otomotiv sektörüne yönelik kaynak işlemlerinde ilgili parametrelerin kullanımı için yol gösterici nitelik taşımaktadır, yöntemin benimsenebileceği saptanmış ve literatüre kazandırılmıştır.

Teşekkür

Bu çalışma Bursa Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Proje Birimi tarafından desteklenen OUAP (MH)-2019-6 numaralı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Yazarlar, fiber lazer kaynak işlemlerinin gerçekleştirilmesinde sağladığı imkanlar dolayısıyla LASER ISSE firmasına teşekkür eder.

Bu çalışmada, yazarı Meryem ALTAY olan “708282” numaralı “Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Yüksek Mukavemetli DP1200 Çeliğinde Lazer Kaynak Parametrelerinin Optimizasyonu” başlıklı yüksek lisans tezinden elde edilen veriler kullanılmıştır.

Kaynakça

- Altay, M. (2021). *Otomotiv endüstrisinde kullanılan yüksek mukavemetli DP1200 çeliğinde lazer kaynak parametrelerinin optimizasyonu*. (Yüksek Lisans Tezi), Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Bursa, Türkiye.
- Bandyopadhyay, K., Panda, S. K., & Saha, P. (2016). Optimization of fiber laser welding of DP980 steels using RSM to improve weld properties for formability. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 25(6), 2462–2477. doi:10.1007/s11665-016-2071-y
- Barzani, M. M., Zalnezhad, E., Sarhan, A., Farahany, S., Ramesh, S. (2015) Fuzzy logic based model for predicting surface roughness of machined Al-Si-Cu-Fe die casting alloy using different additives-turning. *Measurement*, 61, 150-161. doi: 10.1016/j.measurement.2014.10.003
- Devendran, P., & Ashoka Varthanan, P. (2021). Prediction of weldment mechanical properties in GMAW with robot-assisted using fuzzy logic systems. *Materials Research Express*, 8(12), 126524. doi:10.1088/2053-1591/ac432a
- Heidarzadeh, A., Testik, Ö. M., Gülerüz, G., & Barenji, R. V. (2020). Development of a fuzzy logic based model to elucidate the effect of FSW parameters on the ultimate tensile strength and elongation of pure copper joints. *Journal of Manufacturing Processes*, 53, 250–259. doi:10.1016/j.jmapro.2020.02.020
- Janasekaran, S., Jamaludin, M. F., Yusof, F., Shukor, M. H. A., & Ariga, T. (2017a). Influence of BA4047 filler addition through Mamdani fuzzy logic optimization for double-sided T-joint welding of aluminum alloys using low-power fiber laser. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(5–8), 2133–2143. doi:10.1007/s00170-017-0695-1
- Janasekaran, S., Yusof, F., Zin, H. M., Jamaludin, M. F., & Shukor, M. H. A. (2017b). A fuzzy logic-based prediction model for fracture force using low-power fiber laser beam welding. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91, 3603–3610. doi:10.1007/s00170-017-0073-z
- Kim, P. (2017). *MATLAB Deep Learning: With Machine Learning, Neural Networks and Artificial Intelligence*. CA, USA: Apres. doi:10.1007/978-1-4842-2845-6
- Lin, J., Zhang, J., Min, J., Sun, C., & Yang, S. (2021). Laser-assisted conduction joining of carbon fiber reinforced sheet molding compound to dual-phase steel by a polycarbonate interlayer. *Optics and Laser Technology*, 133, 106561. doi:10.1016/j.optlastec.2020.106561
- Medhi, T., Hussain, S. A. I., Saha Roy, B., & Saha, S. C. (2020). Selection of best process parameters for friction stir welded dissimilar Al-Cu alloy: A novel MCDM amalgamated MORSM approach. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(10), 1–22. doi:10.1007/s40430-020-02631-9
- Nair, A., Ramji, V., Durai Raj, R., & Veeramani, R. (2020). Laser cladding of Stellite 6 on EN8 steel – A fuzzy modelling approach. *Materials Today: Proceedings*, 39, 348–353. doi:10.1016/j.matpr.2020.07.431
- Palani, K., Elanchezhian, C., Ramnath, B. V., & Ramadoss, R. (2020). Hybrid Fuzzy based response surface optimization of welding parameters on Vickers microhardness and impact strength of FSWed AA8011-H24 aluminium alloy joints. *Materials Today: Proceedings*, 23, 573–582. doi:10.1016/j.matpr.2019.05.412
- Rout, A., Deepak, B. B. V. L., Biswal, B. B., & Mahanta, G. B. (2022). Weld seam detection, finding, and setting of process parameters for varying weld gap by the utilization of laser and vision sensor in robotic arc welding. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 69(1), 622–632.

[doi:10.1109/TIE.2021.3050368](https://doi.org/10.1109/TIE.2021.3050368)

- Shanavas, S., & Dhas, J. E. R. (2018). Quality prediction of friction stir weld joints on a 5052 H32 aluminium alloy using fuzzy logic technique. *Materials Today: Proceedings*, 5(5), 12124 - 12132. [doi:10.1016/j.matpr.2018.02.190](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.190)
- Velázquez, D. R. T., Helleno, A. L., Fals, H. C., & dos Santos, R. G. (2021). Prediction of geometrical characteristics and process parameter optimization of laser deposition AISI 316 steel using fuzzy inference. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115(5–6), 1547–1564. [doi:10.1007/s00170-021-07269-y](https://doi.org/10.1007/s00170-021-07269-y)
- Zeinali, M., & Khajepour, A. (2010). Development of an adaptive fuzzy logic-based inverse dynamic model for laser cladding process. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 23(8), 1408-1419. [doi:10.1016/j.engappai.2009.11.006](https://doi.org/10.1016/j.engappai.2009.11.006)
- Zhang, L. L., Zhang, L. J., Long, J., Sun, X., Zhang, J. X., & Na, S. J. (2019). Enhanced mechanical performance of fusion zone in laser beam welding joint of molybdenum alloy due to solid carburizing. *Materials and Design*, 181, 107957. [doi:10.1016/j.matdes.2019.107957](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107957)