

*Araştırma Makalesi - Research Article*

# Küresel Grafitli Dökme Demir Kalıp Malzemesi Üzerine Farklı Toz Malzemeleri Kullanılarak Lazer Dolgu Kaynağı Uygulaması

## Laser Cladding Application Using Different Powder Materials on Spheroidal Graphite Cast Iron Mold Material

Adem Karşı<sup>1</sup>, Meryem Altay<sup>2\*</sup>, Hakan Aydın<sup>3</sup>, Ali Bayram<sup>4</sup>

*Geliş / Received: 13/02/2022*

*Revize / Revised: 20/04/2022*

*Kabul / Accepted: 05/06/2022*

### ÖZ

Lazer dolgu kaynağı, toz malzemenin püskürtülerek bir lazer ışını yardımı ile temel malzemenin ergitilmesi prensibine dayanır; yüzey modifikasyonu yaratarak yeni bir yaklaşım sağlaması ile ön plana çıkmaktadır. UTP PLASweld Ferro55 ve UTP PLASweld 73G3 toz malzemeleri kullanılarak GGG-70L küresel grafitli dökme demir kalıp malzemesi üzerine lazer dolgu kaynağı uygulanmıştır; farklı iki toz dolgu malzemesinin kaplama kalitesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır, elde edilen çıktılar otomotiv sac metal şekillendirme kalıplarının tamiratında kullanılması hedeflenmiştir. Lazer gücü, ilerleme hızı, toz debisi parametreleri değişimlerinin kaynak geometrisi, mikro sertlik, çatlak ve gözenek oluşumuna etkisi incelenmiştir, Taguchi L9 ortogonal dizisi kullanılarak optimum proses parametreleri belirlenmiştir. Ferro55 malzemesi için yüksek seviye lazer gücü (1,7 kW), UTP 73G3 toz malzemesi için düşük seviye ilerleme hızı (9 mm/s) parametrelerinin kullanılması kaynak geometrisi açısından optimum sonuçlar vermektedir. Gözenek oluşumu açısından Ferro 55 malzemesi daha iyi konumda iken; UTP 73G3 malzemesinin çatlak oluşumu riski daha düşüktür. Elde edilen maksimum mikro sertlik değerleri birbirine yakındır (777,3 HV<sub>0,1</sub>).

**Anahtar Kelimeler- Küresel Grafitli Dökme Demir, Lazer Dolgu Kaynağı, Proses Parametreleri, Optimizasyon, Kaynak Geometrisi**

### ABSTRACT

Laser cladding is based on the principle of melting the base material via a laser beam by spraying the powder material; it comes to stand out by providing a new approach by creating surface modification. Using UTP PLASweld Ferro55 and UTP PLASweld 73G3 powder materials, laser cladding was implemented on GGG-70L ductile cast iron die material; the effects of two different powder filling materials on the cladding quality were investigated. The obtained results were aimed to be used in automotive sheet metal forming die repairs. The effects of laser power, scanning speed, powder flow rate parameters on weld geometry, microhardness, crack, and pore formations were investigated, and optimum process parameters were determined by using Taguchi L9 orthogonal array. Using high-level laser power (1,7 kW) for Ferro55 material and low-level scanning speed (9 mm/s)

<sup>1</sup>İletişim: [akarsi@coskunoz.com.tr](mailto:akarsi@coskunoz.com.tr) (<https://orcid.org/0000-0001-5908-9626>)

Coşkunöz Kalıp Makine Ar-Ge Merkezi, Fethiye Organize Sanayi Bölgesi, 16140 Bursa Türkiye

<sup>2\*</sup>Sorumlu yazar iletişim: [meryemaltay@uludag.edu.tr](mailto:meryemaltay@uludag.edu.tr) (<https://orcid.org/0000-0001-6930-6292>)

Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bursa Uludağ Üniversitesi, 16059 Görükle Bursa Türkiye

<sup>3</sup>İletişim: [hakanay@uludag.edu.tr](mailto:hakanay@uludag.edu.tr) (<https://orcid.org/0000-0001-7364-6281>)

Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bursa Uludağ Üniversitesi, 16059 Görükle Bursa Türkiye

<sup>4</sup>İletişim: [bayram@uludag.edu.tr](mailto:bayram@uludag.edu.tr) (<https://orcid.org/0000-0001-7311-8358>)

Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bursa Uludağ Üniversitesi, 16059 Görükle Bursa Türkiye

parameters for UTP 73G3 powder material were achieved optimum results in terms of welding geometry. While Ferro 55 material was better in terms of pore formation; UTP 73G3 material had a lower risk of crack formation. The maximum microhardness values obtained were close to each other (777,3 HV<sub>0,1</sub>.)

**Keywords-Spheroidal Graphite Cast Iron, Laser Cladding, Process Parameters, Optimization, Cladding Geometry**

## I. GİRİŞ

Mühendislik malzemeleri üstün özellikleri sayesinde otomotiv, havacılık, elektronik gibi pek çok endüstride yapısal malzemeler olarak kullanılmaktadır; ancak düşük sertlik elde edilmesi, aşınma ve korozyon direncinin düşük olması gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Lazer dolgu kaynağı teknolojisi, yüzey modifikasyonu yaratarak yeni bir yaklaşım sağlaması ile ön plana çıkmaktadır: temel malzemenin üzerine daha üstün özelliklere sahip bir malzemenin kaplanması ile istenilen mekanik özellikler elde edilebilmektedir. Lazer dolgu kaynağı, lazer ışınının temel malzeme üzerindeki odak bölgesine aktarılması ve eş zamanlı olarak toz dolgu malzemesinin püskürtülmesi prensibine dayanmaktadır [1-4]; çok etkileşimli bir yöntem olduğundan malzeme ve proses parametrelerinin etkisi birlikte incelenmelidir.

Yüksek performanslı lazer kaplama malzemeleri üzerine yapılan araştırmalar son yıllarda artmaktadır [5-8]. Wang ve ark. Ti-6Al-4V'nin aşınma direncini artırmak için WC-40Co toz malzemesi ile lazer dolgu kaynağı uygulaması gerçekleştirmiş; mikro yapı, mikrosertlik, aşınma ve korozyon direncini incelemişlerdir [9]. Nie ve ark. 17-4PH paslanmaz çelik dolgu malzemesi kullanarak yaptıkları araştırmada, farklı lazer gücü parametrelerini inceleyerek mikro yapı, mikro sertlik arayüz bağlanma mukavemetini incelemişler; uygun lazer gücü parametresini belirlemişlerdir [10]. Ruiz ve ark. lazer dolgu kaynağı teknolojisinin kalıp onarımında kullanımına yönelik Helyum ve Argon koruyucu gazlarının etkisini incelemişlerdir. Kullanılan koruyucu gaze göre kaplama yüksekliğinde ve sıcaklık dağılımında farklılıklar gözlemlenmiştir [11]. Ayrıca toz dolgu malzeme özellikleri, ergiyik havuzu dinamiklerini etkileyerek gözenek oluşumu, çatlak başlangıcı ve ilerlemede etkilidir. Kullanım yerine ve işlevine göre kaplama malzemesinin ve proses parametrelerinin uygun seçilmesi önem arz etmektedir [12-15].

Lazer dolgu kaynağı mekanik ve fonksiyonel özellikleri sayesinde büyük bir potansiyele sahiptir; temel malzeme ile kaplama arasındaki kuvvetli metalurjik bağ sağlaması özelliği ile makine parçalarının onarımı için uygundur. Bu çalışmada UTP PLASweld Ferro 55 ve UTP PLASweld 73G3 toz malzemelerinin küresel grafitli dökme demirler üzerindeki lazer dolgu kaynağı incelenmiştir, elde edilen çıktıların otomotiv gövde kalıp tamiratında kullanılması ve ileriki çalışmalar için yol göstermesi hedeflenmektedir. Optimum proses parametrelerinin belirlenmesinde Taguchi optimizasyon metodu kullanılmıştır: lazer gücü ilerleme hızı, toz malzeme debisi parametreleri seçilmiştir. Proses parametrelerinin etkisi kaynak geometrisi, mikroyapı üzerindeki gözenek ve çatlak oluşumu, mikro sertik açısından değerlendirilmiştir.

## II. MATERYAL VE YÖNTEM

### A. Materyal

Bu çalışmada, UTP PLASweld Ferro55 ve UTP PLASweld 73G3 toz malzemeleri kullanılarak GGG-70L küresel grafitli dökme demir temel malzemesi üzerine lazer dolgu kaynağı uygulanmıştır; farklı iki toz dolgu malzemesinin kaplama kalitesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

GGG-70L küresel grafitli dökme demir, genellikle sac metal şekillendirme kalıplarında kullanılmaktadır. UTP PLASweld Ferro 55 toz dolgu malzemesi aşınmaya maruz kalan, yüksek sıcaklıklarda orta derecede darbeye dayanıklı parçalarda kullanılmaktadır. UTP PLASweld 73G3 toz malzemesi ise küresel formulu toz partiküllerinden oluşmaktadır; Krom ve Molibden alaşım elementlerini içerdiğinden bası yükleri, abrazyon aşınma ve yüksek sıcaklıklarda çalışma koşullarına dayanıklıdır. UTP PLASweld Ferro 55 ve UTP PLASweld 73G3 malzemelerinin kimyasal kompozisyonları Tablo 1'de, GGG-70L malzemesinin kimyasal kompozisyonu Tablo 2'de gösterilmektedir.

**Tablo 1.** Toz metal dolgu malzemeleri kimyasal kompozisyonları (% ağırlık)

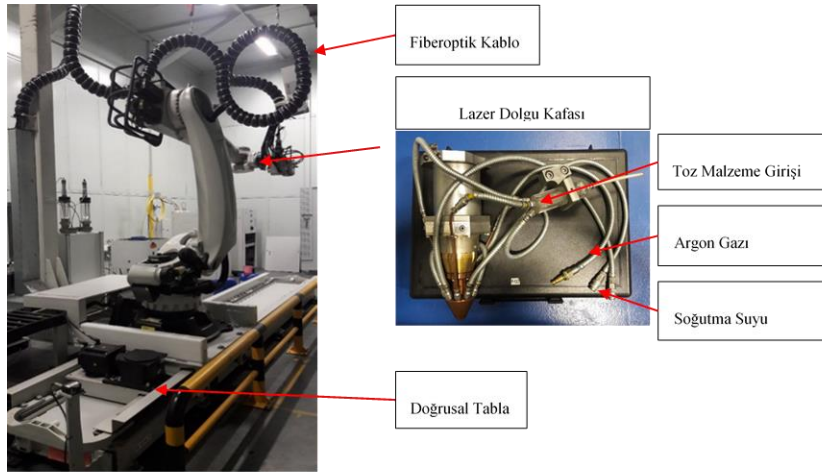
Malzeme	Tane Boyutu (µm)	Sertlik (HRC)	Fe	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
UTP PLASweld Ferro 55	125+45	55	Bal.	0,35	0,3	1,1	7	7	2,2
UTP PLASweld 73G3	150+50	45	Bal.	0,2	0,3	0,6	5,5	-	4

**Tablo 2.** Temel malzeme kimyasal kompozisyonu (% ağırlık)

Malzeme	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	V	Mg
GGG -70L	3,48	2,49	0,403	0,012	0,01	0,05	0,381	0,79	0,71	0,02	0,05

### B. Lazer Dolgu Kaynağı Prosesi ve Proses Parametreleri

Lazer dolgu kaynağı işlemleri LDF4000-100 diyot lazer ünitesinde gerçekleştirilmiştir: 6 eksene sahip "KUKA KR 90 R3100 Extra" robot sistemine ek olarak kartezyen koordinatlarda hareketi sağlayan "KUKA KL 1500-3T" doğrusal tabla kullanılmaktadır. Lazer dolgu kafası, malzemenin taşınmasını sağlayan hortum sistemi, fiberoptik kablolar ve soğutma suyu tesisatı robot üzerinden kontrol edilmektedir (Şekil 1). Toz dolgu malzemesinin kaynak alanına ulaştırılması 5 lt/dk debide Argon koruyucu gazı eşliğinde sağlanmaktadır; kullanılan soğutma suyu 15 - 35 °C sıcaklık, 0,22 – 0,3 MPa basınç ve 1,8 lt/dk akış debisine sahiptir. Lazer dolgu kaynağı ünitesi diğer teknik özellikleri Tablo 3’de belirtilmiştir.



**Şekil 1.** Erlas Gmbh Lazer Dolgu Kaynağı Ünitesi Robot ve Doğrusal Hareket Tablası

**Tablo 3.** Lazer Dolgu Kaynağı Ünitesi Teknik Özellikler

Lazer Gücü	4000 W
Minimum Işın Kalitesi	30 mm/rad
Optik Fiber	600 µm
Minimum Odaklanma ( 150 mm mesafe )	450 µm
Fiber Kablo Uzunluğu	30 m
Lazer Dalga Boyu Aralığı	900 – 1070 nm
Lazer Işın Çapı	3 mm
Toz Besleme	Oerlikon Twin-120A
Lazer Kafa	Erlas Gmbh
Sıcaklık Ölçer	IMPAC – IGAR 12-LO
Lazer Kafa Soğutma Cihazı	Deltatherm LTK 1-4
Yazılım	Toplas 3D V3

Lazer gücü (1,3 kW-1,5 kW-1,7 kW), ilerleme hızı (9 mm/s-10 mm/s-11 mm/s) ve toz malzeme debisi (12 g/dk-13,5 g/dk-15 g/dk) parametreleri için L9 ortogonal dizisi kullanılarak Taguchi deney tasarımı oluşturulmuştur (Tablo 4). Seçilen parametre değerleri endüstriyel uygulamalardaki tecrübelerimizden yararlanarak belirlenmiştir. Ayrıca lazer gücü, ilerleme hızı ve lazer ışını çapına bağlı olan ısı girdisi hesaplanmıştır (Denklem 1).

$$Isı\ Girdisi = \frac{Lazer\ Gücü}{İlerleme\ Hızı * Lazer\ Işın\ Çapı} \quad (1)$$

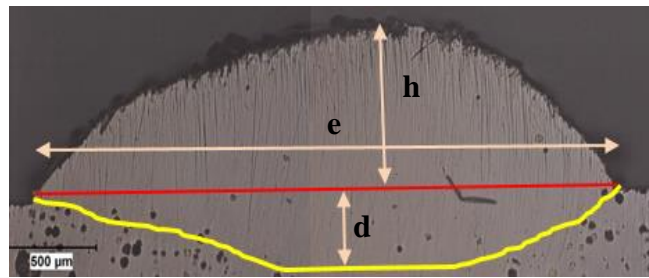
**Tablo 4.** Lazer Dolgu Kaynağı Taguchi Deney Tasarımı Parametreleri

Deney No	Lazer Gücü (kW)	İlerleme Hızı (mm/sn)	Toz Debisi (gr/dk)	Isı Girdisi (J/mm <sup>2</sup> )
1	1,3	9	12	48,15
2	1,3	10	13,5	43,33
3	1,3	11	15	39,39
4	1,5	9	13,5	55,56
5	1,5	10	15	50,00
6	1,5	11	12	45,45
7	1,7	9	15	62,96
8	1,7	10	12	56,67
9	1,7	11	13,5	51,52

### C. Lazer Dolgu Kaynağı Karakterizasyonu

Lazer dolgu kaynağı işlemi tek katman olarak gerçekleştirilmiştir. 30 mm x 20 mm boyutlarındaki numuneler tel erozyon ile kesilerek sırasıyla zımparalama ve parlatma işlemlerine tabi tutulmuştur: 180, 400, 600, 800, 1000, 1200 SiC zımpara ile zımparalanmış, 1 µ ve 0,3 µ alümina parlatma sıvısı ile parlatma uygulanmıştır. Nikon DIC optik mikroskop ile Clemex programı yardımıyla x50 ve x100 büyütme altında mikroyapılar incelenmiştir: kaynak geometrisi, çatlak ve gözenek oluşumları açısından değerlendirilmiştir. Seçilen 5 numune için mikro sertlik değerleri DUROLINE-M Vickers sertlik ölçüm cihazı ile 10 s boyunca 50 g yük uygulanarak 100 µ aralıklarla ölçülmüştür, mikrosertlik ölçümleri dikey kesitten alınmıştır.

Lazer dolgu kaynağı kalitesini tespit edebilmek için kaynak geometrisi uzunlukları ölçülmüştür: kaynak eni (e), kaynak yüksekliği (h) ve temel malzemede oluşan ergiyik derinliği (d) belirlenmiştir (Şekil 2). Ayrıca numunelerde çatlak ve gözenek oluşumları incelenmiştir.



Şekil 2. Lazer Dolgu Kaynağı Enine Kesit Görüntüsü

## III. BULGULAR VE TARTIŞMA

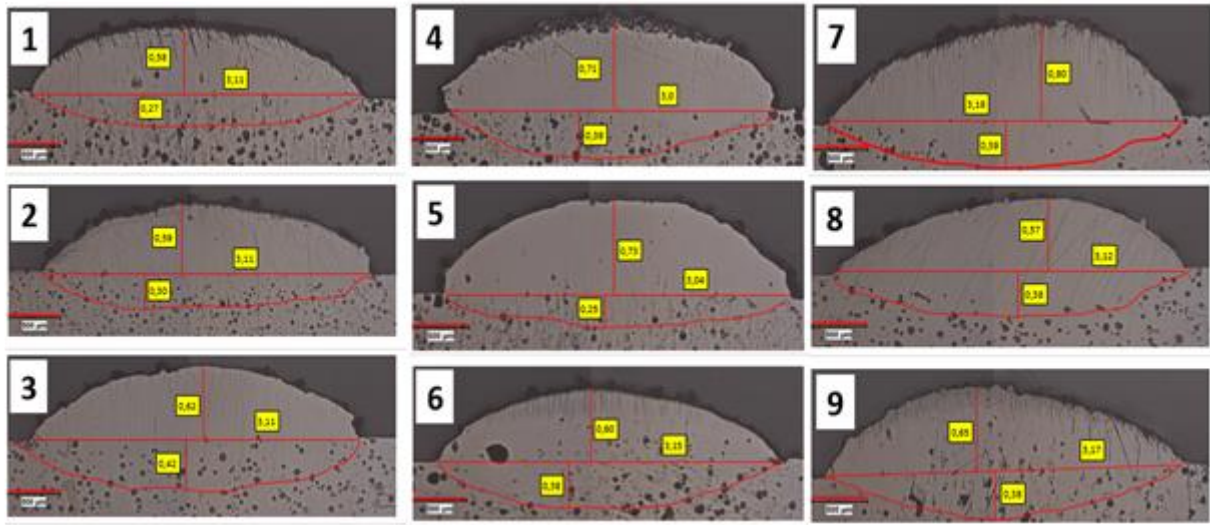
### A. Lazer Dolgu Kaynağı Geometrisi

Ferro55 ve UTP 73G3 toz malzemeleri için kaynak eni (e), kaynak yüksekliği (h) ve kaynak derinliği (d) geometrik uzunlukları belirlenmiştir: kaynak geometrisi karakteristikleri mikroyapı görüntüleri Şekil 3 ve Şekil 4'de, ölçülen değerler ise Tablo 5 ve Tablo 6'da bulunmaktadır.

Ferro 55 malzemesi için en yüksek kaynak eni 3,19 mm, UPT 73G3 için 3,29 mm'dir. İki malzeme için de en yüksek değerin elde edildiği "7" numaralı numuneler, en yüksek ısı girdisine sahiptir (62,96 J/mm<sup>2</sup>): lazer gücü 1,7 kW, ilerleme hızı 9 mm/s, toz debisi 15 g/dk parametreleri ile üretilmiştir. Kaynak eni genişliğinin artırılması için yüksek seviye lazer gücü, düşük seviye ilerleme hızı ve yüksek seviye toz besleme hızı kullanılmalıdır.

Maksimum kaynak yüksekliği, Ferro 55 ve UTP 73G3 malzemeleri için 0,8 mm ve 0,66 mm olarak ölçülmüştür: üretim parametreleri ise lazer gücü 1,7 kW, ilerleme hızı 9 mm/s, toz debisi 15 g/dk, ısı girdisi 62,96 J/mm<sup>2</sup>, iki malzeme için de ortaktır.

Kaynak derinliği için Ferro 55 malzemede elde edilen en yüksek değer 0,42 mm, UPT 73G3 için 0,43 mm'dir. Ferro 55 malzemede en yüksek kaynak derinliğinin elde edilmesinde düşük düzey lazer gücü (1,3 kW) yeterli olurken; UTP 73G3 malzemede orta seviye lazer gücü (1,5 kW) ile en yüksek kaynak derinliği elde edilebilmiştir.

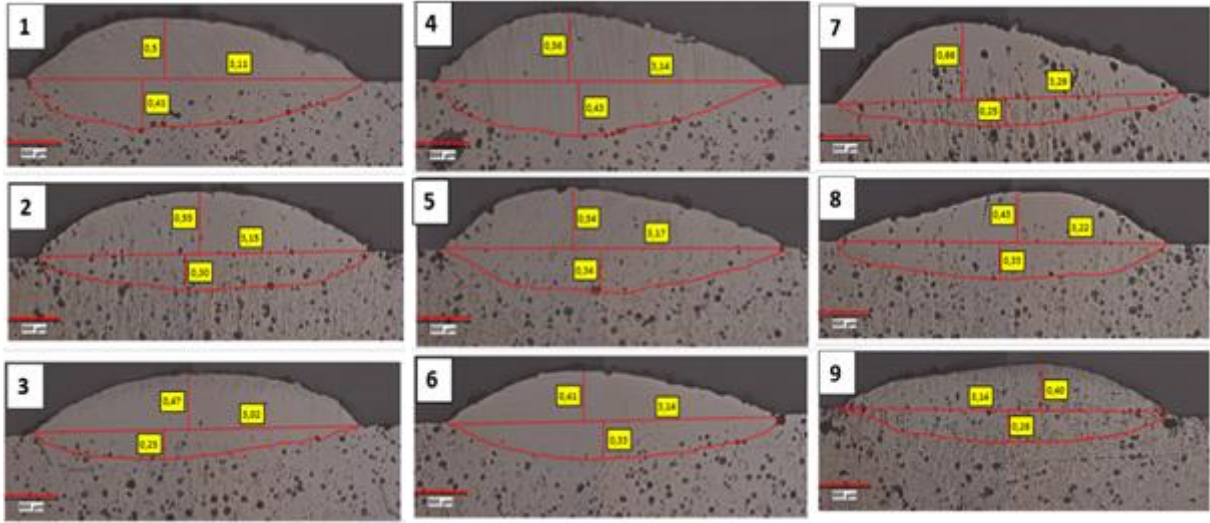


Şekil 3. Ferro 55 toz malzemesi lazer dolgu kaynak geometri ve karakteristikleri mikroskop görüntüleri

Tablo 5. Ferro 55 toz malzemesi lazer dolgu kaynak geometri ve karakteristikleri (mm)

Deney No	Kaynak Eni (e)	Kaynak Yüksekliği (h)	Kaynak Derinliği (d)
1	3,11	0,58	0,27
2	3,11	0,59	0,30
3	3,11	0,62	0,42
4	3,0	0,71	0,39
5	3,04	0,73	0,25
6	3,15	0,6	0,38
7	3,19	0,8	0,39
8	3,12	0,57	0,38
9	3,17	0,65	0,38





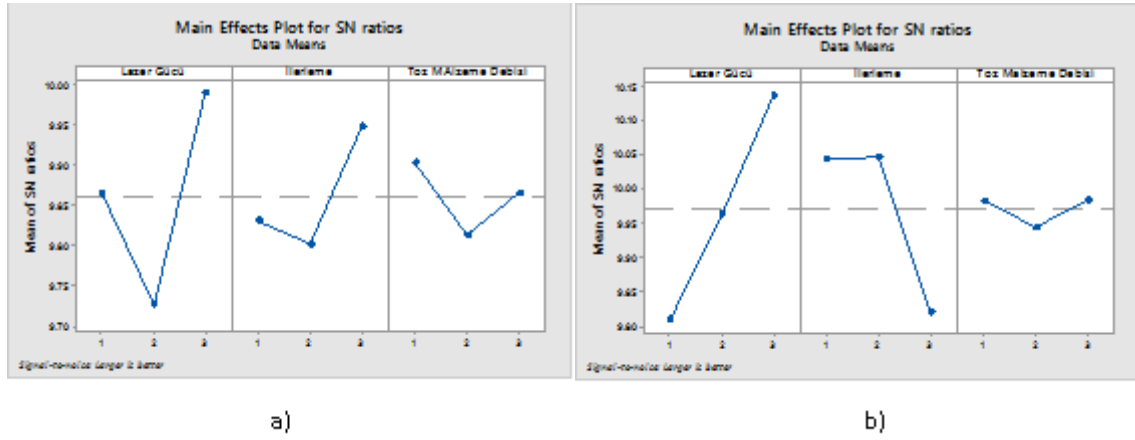
Şekil 4. UTP 73G3 toz malzemesi lazer dolgu kaynak geometri ve karakteristikleri mikroskop görüntüleri

Tablo 6. UTP 73G3 toz malzemesi lazer dolgu kaynak geometri ve karakteristikleri (mm)

Deney No	Kaynak Eni (e)	Kaynak Yüksekliği (h)	Kaynak Derinliği (d)
1	3,11	0,50	0,41
2	3,15	0,55	0,30
3	3,02	0,47	0,25
4	3,14	0,56	0,43
5	3,17	0,54	0,34
6	3,14	0,41	0,33
7	3,29	0,66	0,25
8	3,22	0,43	0,33
9	3,14	0,40	0,28

1) *Kaynak Eni*: Ferro 55 malzemesi için gerçekleştirilen Taguchi optimizasyonuna göre yüksek lazer gücü (1.7 kW), yüksek ilerleme hızı (11 mm/s) ve düşük toz debisi (12 g/dk) parametrelerinin kaynak enini artırıcı etkisi tespit edilmiştir (Şekil 5.a). ANOVA analizi ile parametrelerin kaynak enine etki oranları belirlenmiştir (Tablo7): lazer gücü en etkin parametre (% 48,86); sonraki etkin parametre ilerleme hızıdır (% 17.09), toz debisi ise en düşük etki oranına (% 5,54) sahip parametredir.

UTP 73G3 malzemesinde yüksek lazer gücü (1,7 kW), düşük ve orta düzey ilerleme hızı (9 mm/s ve 10 mm/s) ile kaynak eni artmaktadır (Şekil 5.b). Yüksek lazer gücü ile elde edilen yüksek ısı girdisi sayesinde daha fazla ergime gerçekleşmekte, kaynak eni artmaktadır. İlerleme hızının yüksek seviye kullanılması ise kaynak havuzunda ergiyen toz miktarını azaltmakta dolayısıyla kaynak eni azalmaktadır; ilerleme hızının düşük ve orta düzeylerde kullanılmasıyla kaynak eni geometrik uzunluğu artış eğilimindedir. Toz debisinin etkisi ise çok sınırlı kalmıştır. Parametrelerin kaynak enine etki oranları sırası ile lazer gücü (%50,59), ilerleme hızı (%31,74), toz debisidir (%1,14); ANOVA analizi çıktıları Tablo 8'de gösterilmiştir.



Şekil 5. a) UTP PLASweld Ferro 55 tozuyla kaynak edilen numunelerin kaynak eni S/N oranları b) UTP PLASweld 73G3 tozuyla kaynak edilen numunelerin kaynak eni S/N oranları

Tablo 7. Ferro 55 lazer dolgu kaynağı numunelerinin kaynak eni için ANOVA analizi

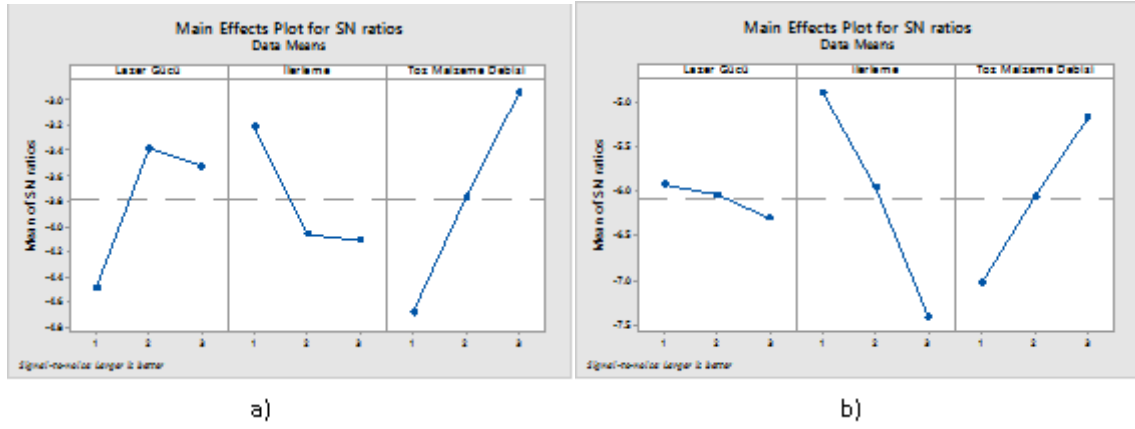
Parametre	Kareler Toplamı	Katkı Oranı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri
Lazer Gücü	0,01317	48,86%	0,00658	1,71	0,369
İlerleme Hızı	0,00461	17,09%	0,00230	0,60	0,625
Toz Debisi	0,00149	5,54%	0,00074	0,19	0,837
Erro	0,00768	28,51%	0,00384		
Total	0,026956	100,00%			

Tablo 8. UTP PLASweld 73G3 lazer dolgu kaynağı numunelerinin kaynak eni için ANOVA analizi

Parametre	Kareler Toplamı	Katkı Oranı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri
Lazer Gücü	0,02126	50,59%	0,01063	3,06	0,246
İlerleme Hızı	0,01334	31,74%	0,00667	1,92	0,343
Toz Debisi	0,00047	1,14%	0,00023	0,07	0,936
Error	0,006950	16,54%	0,00347		
Total	0,042033	100,00%			

2) *Kaynak Yüksekliği*: Taguchi analizine göre Ferro 55 malzemesi için orta seviye lazer gücü (1,7 kW), düşük ilerleme hızı (9 mm/s) ve yüksek toz debisi parametreleri (15 g/dk) ile üretim gerçekleştirildiğinde optimum kaynak yüksekliği geometrisi elde edilmektedir. İlerleme hızının düşük olmasıyla yüksek ısı girdisi sağlanmakta, kaynak havuzunda ergiyen toz miktarı artmaktadır; yüksek toz debisi ile birleşince kaynak yüksekliğini artırmaktadır (Şekil 6.a). Kaynak yüksekliği üzerinde en etkin parametreler sırasıyla toz debisi (%52,49), lazer gücü (%25,33) ve ilerleme hızıdır (%19,42). İlgili parametrelerin kaynak yüksekliği üzerindeki etkilerinin hata oranı toplamda düşüktür (%2,76) (Tablo 9).

UTP PLASweld 73G3 malzemesinde ise düşük seviye lazer gücü (1,3 kW), düşük ilerleme hızı (9 mm/s), yüksek toz debisi (15 g/dk) parametrelerinde kaynak yüksekliğinin arttığı tespit edilmiştir (Şekil 6.b). Etkin parametreler sırası ile ilerleme hızı (%56,61), toz malzeme debisi (%31,77) ve lazer gücüdür (%0,27) (Tablo 10). Lazer gücü parametresinin etki oranının az olması, 1,3 kW lazer gücü ile 1,5 kW lazer gücü arasında nispeten fazla bir fark bulunmadığını göstermektedir: bu çıkarım, Ferro 55 malzemesi optimum lazer gücünün 1,5 kW elde edilmesi ile örtüşmektedir.



Şekil 6. a) UTP PLASweld Ferro 55 tozuyla kaynak edilen numunelerin kaynak yüksekliği S/N oranları, b) UTP PLASweld 73G3 tozuyla kaynak edilen numunelerin kaynak yüksekliği S/N oranları

Tablo 9. UTP PLASweld Ferro 55 tozuyla kaynak edilen numunelerin kaynak yüksekliği için ANOVA analizi

Parametre	Kareler Toplamı	Katkı Oranı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri
Lazer Gücü	0,01286	25,33%	0,00643	9,19	0,098
İlerleme Hızı	0,00986	19,42%	0,00493	7,05	0,124
Toz Debisi	0,02666	52,49%	0,01333	19,05	0,050
Error	0,00140	2,76%	0,00070		
Total	0,050800	100,00%			

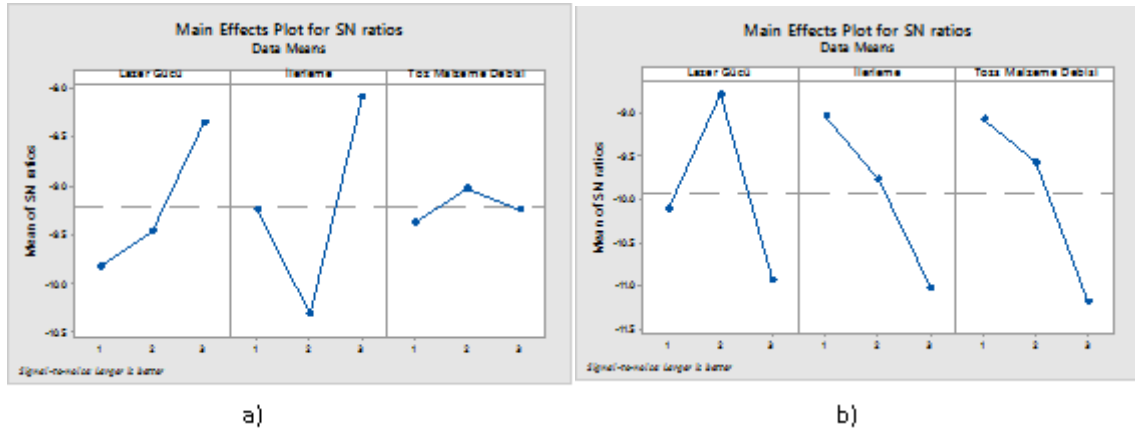
Tablo 10. UTP PLASweld 73G3 tozuyla kaynak edilen numunelerin dolgu kaynak yüksekliği için ANOVA analizi

Parametre	Kareler Toplamı	Katkı Oranı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri
Lazer Gücü	0,00015	0,27%	0,00007	0,02	0,977
İlerleme Hızı	0,03235	56,61%	0,01617	4,99	0,167
Toz Debisi	0,01815	31,77%	0,00907	2,80	0,263
Error	0,00648	11,35%	0,00324		
Total	0,057156	100,00%			

3) *Kaynak Derinliği*: Kaynak derinliği Ferro 55 malzemesi Taguchi analiz sonuçlarına göre lazer gücü parametresinin yüksek seviye (1,7 kW) kullanımı ile ısı girdisinin arttığından dolgu kaynak derinliği artmaktadır. Yüksek seviye ilerleme hızında (11 mm/s) ve orta seviye toz debisi (13,5 g/dk) parametrelerinde kaynak derinliği artmaktadır (Şekil 7.a). ANOVA analizinde belirlenen parametrelerin etki oranları ilerleme hızı için %37,03, lazer gücü için %15,91, toz debisi için %0,82'dir (Tablo 11). Analizin hata oranı ise %46,24 elde edilmiştir ve doğruluk oranı diğer analizlere göre oldukça düşüktür. Bu durum sadece Ferro 55 malzemesi özelinde olup, bunun bu grup numunelerdeki kaynak sınır derinliği tespitindeki ölçüm hassasiyetinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

UTP 73G3 malzemesi için elde edilen optimum parametreler 1,5 kW lazer gücü, 9 mm/s ilerleme hızı, 12 g/dk toz debisidir. Lazer gücünün orta seviye, ilerleme hızı ve toz debisinin düşük seviye olması yüksek kaynak derinliği elde etmede yeterli olmuştur (Şekil 7.b). Çalışmada incelenen parametrelerin etki oranları ise birbirlerine oldukça yakındır: lazer gücü için %29,89, ilerleme hızı için %29,24, toz debisi için %27,96 elde edilmiştir (Tablo 12).





Şekil 7. a) UTP PLASweld Ferro 55 tozuyla kaynak edilen numunelerin dolgu kaynak derinliği için S/N oranları, b) UTP PLASweld 73G3 tozuyla kaynak edilen numunelerin dolgu kaynak derinliği için S/N oranları

Tablo 11. UTP PLASweld Ferro 55 tozuyla kaynak edilen numunelerin dolgu kaynak derinliği için ANOVA analizi

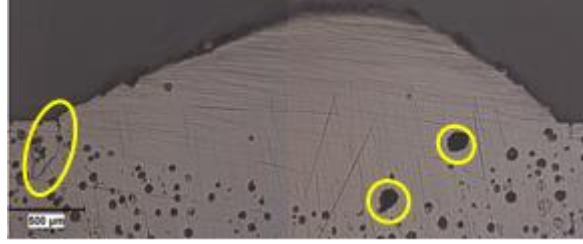
Parametre	Kareler Toplamı	Katkı Oranı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri
Lazer Gücü	0,00463	15,91%	0,00231	0,34	0,744
İlerleme Hızı	0,01078	37,03%	0,00539	0,80	0,555
Toz Debisi	0,00023	0,82%	0,00011	0,02	0,983
Error	0,013467	46,24%	0,00673		
Total	0,029124	100,00%			

Tablo 12. UTP PLASweld 73G3 tozuyla kaynak edilen numunelerin dolgu Kaynak derinliği için ANOVA analizi

Parametre	Kareler Toplamı	Katkı Oranı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri
Lazer Gücü	0,00999	29,89%	0,00499	2,32	0,302
İlerleme Hızı	0,00977	29,24%	0,00488	2,27	0,306
Toz Debisi	0,00934	27,96%	0,00467	2,17	0,316
Error	0,00431	12,91%	0,00215		
Total	0,03343	100,00%			

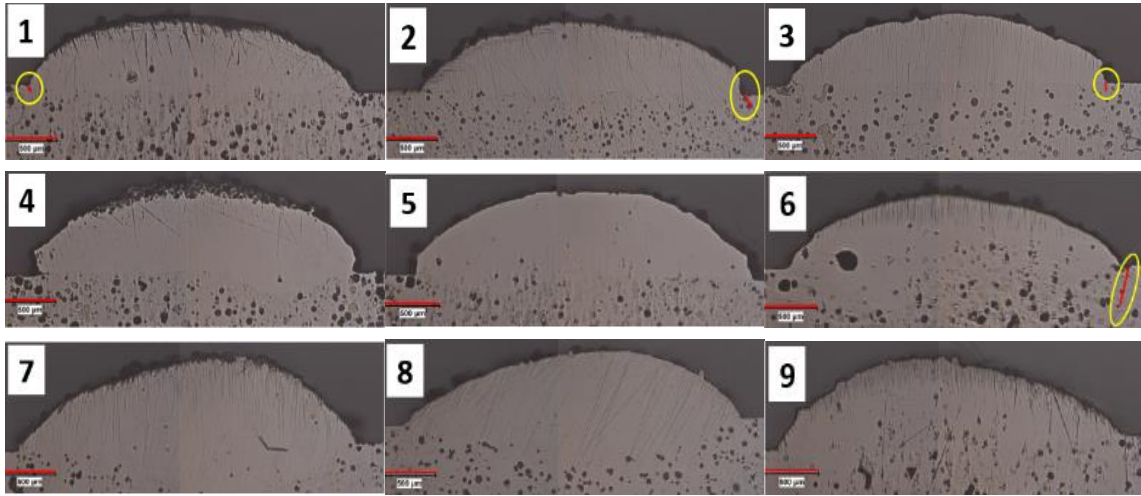
### B. Gözenek ve Çatlak Oluşumları

Lazer dolgu kaynağı işleminde, çatlak ve gözenekler istenmeyen oluşumlardır (Şekil 8). Kaynak havuzundaki yüksek sıcaklık ile birlikte hızlı soğumaya bağlı olarak kalıntı gerilme kaynaklı, temel malzeme ile sınır bölgesinde çatlak oluşumları gözlemlenmiştir. Enine kesit incelemelerinde tespit edilen çatlaklar kaynak havuzunun damla formuna yakın konumdadır.

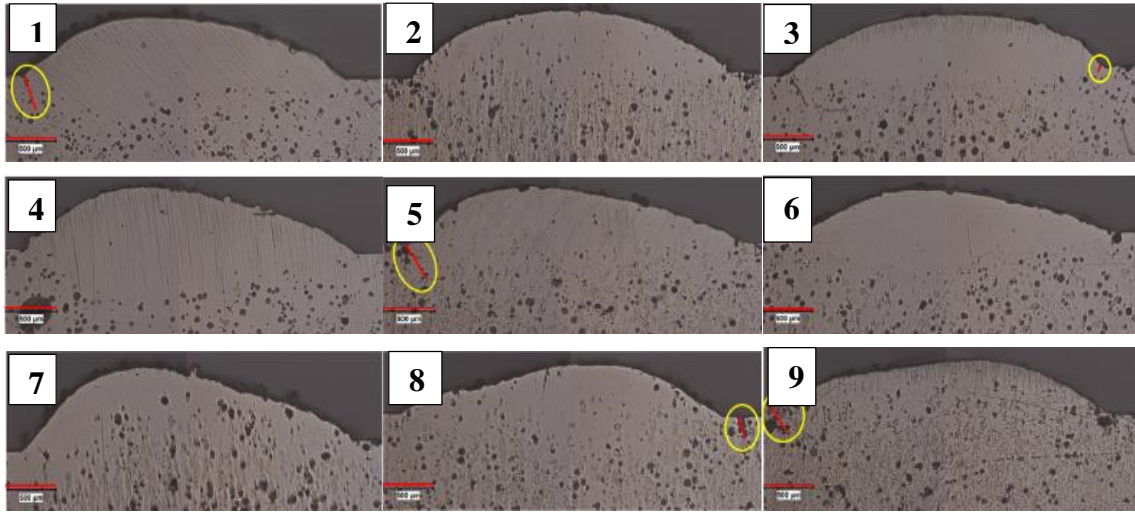


Şekil 8. Çatlak ve Gözenekler

Toz dolgu malzemesinin ergiyik havuza koruyucu gaz yardımıyla aktarılması sırasında gazlar hapsolarak gözenek oluşumuna neden olmaktadır. Yetersiz lazer gücü ve yüksek toz besleme hızı ergiyik havuz kesitinin küçülmesine, bazı toz partiküllerinin kısmen ergimesine ve koruyucu gazın hapsolmesine neden olmaktadır. Ayrıca büyük gözenekler çatlak oluşumu ve ilerlemesinde de etkilidir. Çatlak ve gözenek oluşumlarının azaltılması proses parametrelerinin kontrolü ile mümkündür. Ferro 55 ve UTP 73G3 toz malzemeleri için optik mikroskop görüntüleri sırasıyla Şekil 9 ve Şekil 10'da bulunmaktadır.



Şekil 9. Ferro 55 toz malzemesi gözenek ve çatlak incelemeleri optik mikroskop görüntüleri



Şekil 10. UTP 73G3 toz malzemesi gözenek ve çatlak incelemeleri optik mikroskop görüntüleri

Numunelerdeki iri gözeneklerin yüzeyden oldukça uzakta temel malzemeye yakın olduğu gözlemlenmektedir. Metal ergiyik içerisinde hapsolan gazların, yüzeyden ayrılabilmesi için yeterli süreleri olmamıştır. Yüksek ısı girdisi dolayısıyla yavaş soğuma hızında olmalarına rağmen iri gaz boşluklarının gözenek oluşturması temel malzeme yüzeyinin temiz olmaması (kir, nem, yağ) ile ilişkilendirilebilir.

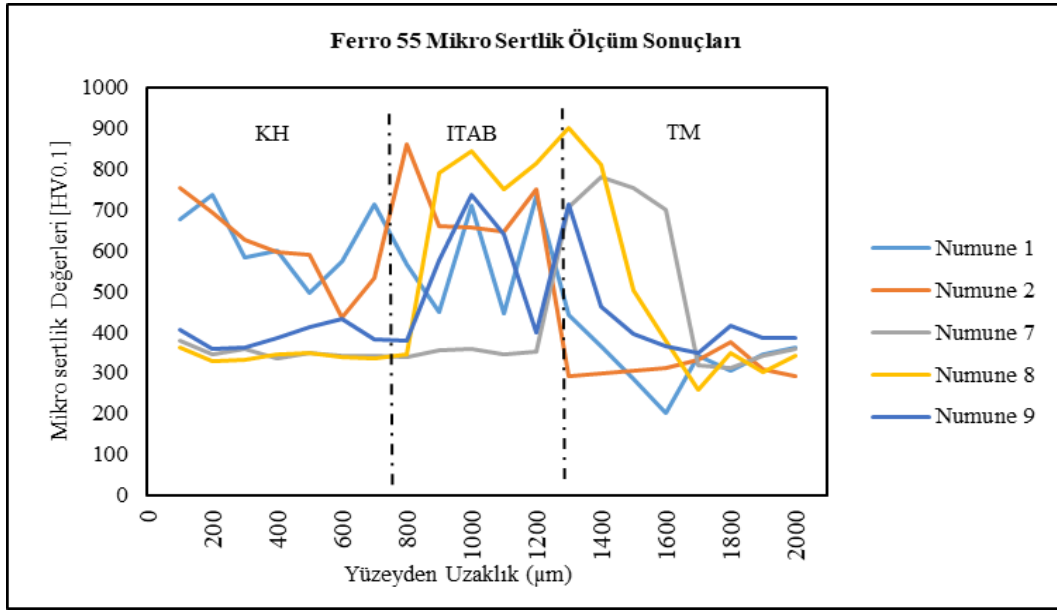
Ferro 55 için yüksek lazer gücü ve düşük ilerleme hızı (yüksek ısı girdisi) çatlak riskini azaltmaktadır; çatlak oluşumları toz debisi artışı ile azalmıştır, yüksek toz debisi dengeli soğuma koşulları yaratmıştır. Bu durum, çatlakların soğuk çatlak olma olasılığını artırmaktadır.

Lazer gücü ve ilerleme hızı artışı gözenek sayısını ve boyutlarını artırıcı rol oynamıştır. Toz debisi artışı ise gözenek oluşumu ve boyutlarını düşürmüştür. Ferro 55 malzemesinde gözenek oluşum riski UTP 73G3'e göre daha düşüktür. Yüksek lazer gücü, düşük ilerleme hızı, yüksek toz debisi genel dolgu kalitesini iyileştirmektedir.

UTP 73G3 için lazer gücü artışı ile çatlak oluşumları artmıştır. Isı girdisi artışı dolayısıyla çatlak oluşumu meydana geldiğinden sıcak çatlaklar olduğu yorumu yapılabilir, her iki toz malzemede çatlak oluşum mekanizmaları farklıdır. UTP 73G3 malzemesinde ilerleme hızının etkisi tespit edilememiştir. Toz debisi artışı ile çatlak oluşumları artmıştır. Çatlak oluşma riski Ferro 55'e göre daha düşüktür. Temel malzemenin ön ısıl işlemi ile çatlak oluşumunun azaltılması mümkündür [16]. Lazer gücü ve toz debisi artışı ile gözenek sayısı artmaktadır. Gözenek oluşumu Ferro 55 tozuna göre daha yüksektir. Lazer gücü ve ilerleme hızı artışı gözenek boyutunu artırmıştır, toz debisi artışı gözenek boyutlarını düşürmüştür. Yüksek ısı girdisi ile birlikte nispeten yavaş soğumaya istinaden gözenek sayısının artışı oldukça ilginç bir sonuçtur. UTP 73G3 malzemesinde yüksek lazer gücü, yüksek ilerleme hızı ve yüksek toz debisi genel dolgu kalitesini kötüleştirilmektedir. Sonuç olarak genel dolgu kalitesi değerlendirildiğinde Ferro55 malzemesi UTP 73G3 malzemesine göre daha iyi konumdadır.

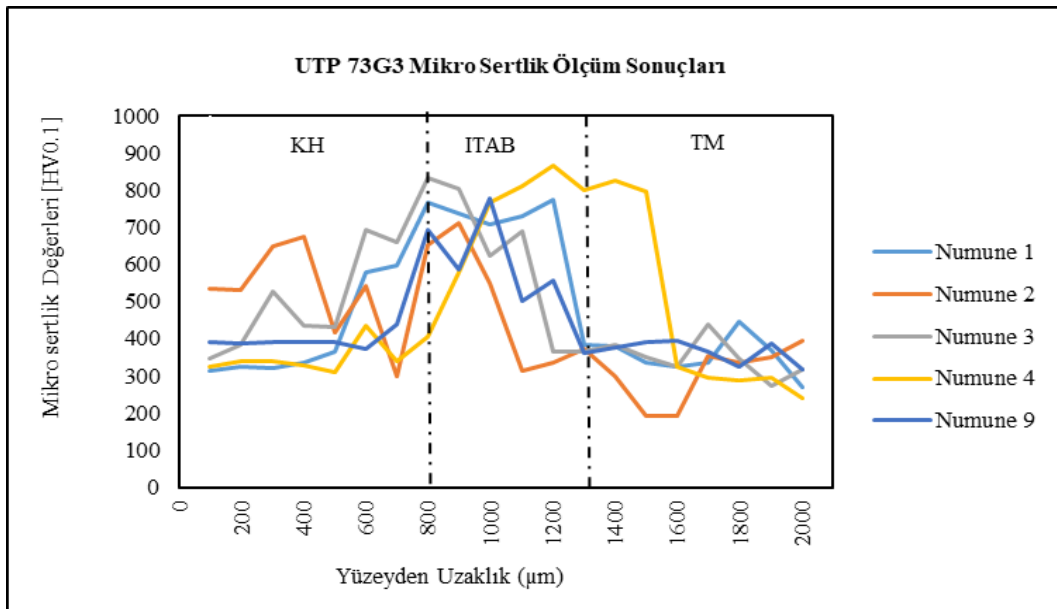
### C. Mikrosertlik

Ferro 55 toz malzemesine ait "1, 2, 7, 8, 9" numaralı numuneler için mikro sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 11). Kaynak havuzu ortalama sertlik değerleri sırasıyla 625,6 HV<sub>0,1</sub>, 604,4 HV<sub>0,1</sub>, 350,3 HV<sub>0,1</sub>, 342,4 HV<sub>0,1</sub> ve 389,4 HV<sub>0,1</sub>; ITAB ortalama sertlik değerleri 558,2 HV<sub>0,1</sub>, 714 HV<sub>0,1</sub>, 735 HV<sub>0,1</sub>, 773 HV<sub>0,1</sub> ve 588,2 HV<sub>0,1</sub>'dir. Kaynak parametrelerine bağlı olarak, mikro sertlik değerleri UTP 73G3 malzemesine kıyasla geniş bir aralıkta değişkenlik göstermiştir. Ayrıca, kaynak havuzunda elde edilen maksimum sertlik değeri (625,6 HV<sub>0,1</sub>) diğer malzemeye kıyasla daha yüksektir. Lazer gücü artışı kaynak havuzu sertlik değerlerini azaltmıştır. İlerleme hızı ve toz debisinin kaynak havuzu sertlik değerleri üzerindeki etkisi sınırlı kalmıştır.



Şekil 11. Ferro 55 malzemesi “1, 2, 7, 8, 9” numaralı numuneler için mikro sertlik ölçüm sonuçları (KH:Kaynak Havuzu, ITAB: Isı Tesiri Altındaki Bölge, TM: Temel Malzeme)

UTP 73G3 toz malzemesi için mikro sertlik ölçümleri “1, 2, 3, 4, 9” numuneleri için gerçekleştirilmiştir (Şekil 12). Kaynak havuzu ortalama sertlik değerleri sırasıyla 405,1 HV<sub>0,1</sub>, 521,3 HV<sub>0,1</sub>, 424,6 HV<sub>0,1</sub>, 352,8 HV<sub>0,1</sub> ve 394,6 HV<sub>0,1</sub>; ITAB ortalama sertlik değerleri sırasıyla 742,8 HV<sub>0,1</sub>, 637,3 HV<sub>0,1</sub>, 716,5 HV<sub>0,1</sub>, 777,3 HV<sub>0,1</sub> ve 621,8 HV<sub>0,1</sub>'dir. Kaynak havuzu sertliği lazer gücü artışı ve toz debisi artışı ile düşerken, ilerleme hızı artışı ile artmaktadır. Yüksek lazer gücü ITAB sertlik değerini düşürmektedir; ilerleme hızının ve toz debisinin ITAB sertliği üzerindeki etkisi mevcut parametreler ile net olarak ortaya konulamamıştır.



Şekil 12. UTP 73G3 malzemesi “1, 2, 3, 4, 9” numaralı numuneler için mikro sertlik ölçüm sonuçları (KH:Kaynak Havuzu, ITAB: Isı Tesiri Altındaki Bölge, TM: Temel Malzeme)

#### IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada küresel grafitli dökme demir temel malzeme üzerine Ferro 55 ve UTP 73G3 toz malzemelerinin lazer dolgu kaynağı incelenmiştir. Taguchi yöntemi kullanılarak proses parametrelerinin optimizasyonu gerçekleştirilmiş; kaynak geometrisi, mikro sertlik, çatlak ve gözenek oluşumları açısından analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Ferro 55 malzemesi için yüksek lazer gücünde (1,7 kW) maksimum kaynak eni, kaynak yüksekliği ve kaynak derinliği değerleri elde edilmiştir. Yüksek seviye lazer gücü, ısı girdisinde artış sağladığından daha fazla ergime gerçekleşmekte ve kaynak geometrik uzunlukları artmaktadır. Optimum ilerleme hızı ve toz debisi değerleri ise kaynak geometrilerine göre değişkenlik göstermektedir.

UTP 73G3 toz malzemesi kaynak geometrisi açısından değerlendirildiğinde düşük ilerleme hızında (9 mm/s) optimum değerler elde edilmiştir. İlerleme hızının düşük seviye olması kaynak havuzunda ergiyen toz miktarını artırmakta, kaynak geometrileri genişlemektedir. Lazer gücü ve toz debisi optimum parametreleri kaynak eni, kaynak yüksekliği ve kaynak genişliği için değişkenlik göstermektedir.

Ferro 55 malzemesi için yüksek lazer gücü, düşük ilerleme hızı ve yüksek toz debisi çatlak riskini azaltmaktadır. UTP 73G3 için lazer gücü ve toz debisi artışı ile çatlak oluşumları artmıştır, ancak Ferro 55'e kıyasla daha düşüktür. Her iki malzemede çatlak oluşum mekanizmaları farklıdır: Ferro 55 malzemesinde soğuk çatlak oluşurken, UTP 73G'de ısı girdisi artışı ile birlikte gerçekleştiğinden sıcak çatlaktır.

Ferro 55 malzemesinde gözenek oluşum riski UTP 73G3'e göre daha düşüktür. Lazer gücü ve toz debisi artışı ile gözenek oluşumunu artırmakta, dolgu kaynağı kalitesini düşürmektedir. Numunelerdeki iri gözeneklerin yüzeyden oldukça uzakta temel malzemeye yakın olması yüzeyin temizliği ile ilişkilendirilebilir.

Ferro 55 toz malzemesinde elde edilen maksimum sertlik değeri 773 HV<sub>0,1</sub> UTP 73G3 toz malzemesi için mikro sertlik ölçümleri 777,3 HV<sub>0,1</sub> değerleri elde edilmiştir. Lazer gücü ve toz debisi artışı mikro sertlik değerlerini azaltırken, ilerleme hızı artışı mikro sertlik değerlerini artırmaktadır.

#### KAYNAKLAR

- [1] Dindar, Ç., Altay, M. & Aydın, H. (2021) Lazer Kaplama Prosesi ve Proses Parametreleri: Derleme Çalışması. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 26 (2), 723–36.
- [2] Zhu, L., Xue, P., Lan, Q., Meng, G., Ren, Y., Yang, Z., Xu, P. & Liu, Z. (2021) Recent research and development status of laser cladding: A review. *Optics and Laser Technology*, 138,106915.
- [3] Siddiqui, A. A. & Dubey, A. K. (2021) Recent trends in laser cladding and surface alloying. *Optics and Laser Technology*, 134, 106619.
- [4] Budde, L., Biester, K., Merkel, P., Lammers, M., Kriwall, M., Hermsdorf, J., Stonis, M., Behrens, B. & Overmeyer, L. (2022) Investigation of the material combination 20MnCr5 and X45CrSi9-3 in the Tailored Forming of shafts with bearing seats. *Production Engineering*, 16 (1).
- [5] Arif Z. U., Khalid M. Y., Rehman E., Ullah, S., Atif, M & Tariq A. (2021). A review on laser cladding of high-entropy alloys, their recent trends and potential applications. *Journal of Manufacturing Processes*; 68, 225–73.
- [6] Meng, L., Zeng, X., Hou, K., Hu, Q. & Wang, D. (2019) Effect of laser cladding and laser-induction hybrid cladding coatings on the bending properties and fracture behavior of rails. *Surface & Coatings Technology*, 374, 1038-1050.
- [7] Bergant, Z., Batic, B. S., Felde, I., Sturm, R. & Sadlacek, M. (2022) Tribological Properties of Solid Solution Strengthened Laser Cladded NiCr B Si/WC-12Co Metal Matrix Composite Coatings. *Materials*, 15, 342.
- [8] Trojan, K., Ocelik, V., Capek, J., Cech, J., Yubero, D., Ganev, N., Kolarik, K. & Hosson, J. (2022). Microstructure and Mechanical Properties of Laser Additive Manufactured H13 Tool Steel. *Metals*, 12, 243.
- [9] Wang, W., Zhang, S., Xiao, S., Sato, Y. S., Wang, D. & Liu, Y. (2022). Microstructure and properties of multilayer WC-40Co coating on Ti-6Al-4V by electron beam cladding. *Materials Characterization*, 183, 111585.
- [10] Nie, M. H., Zhang, S., Wang, Z. Y., Zhang, C. H., Chen, H. T. & Chen, J. (2022). Effect of laser power on



- microstructure and interfacial bonding strength of laser cladding 17-4PH stainless steel coatings. *Materials Chemistry and Physics*, 275, 125236.
- [11] Ruiz, J. E., Cortina, M., Arrizubieta, J. I. & Lamikiz, A. (2018) Study of the Influence of Shielding Gases on Laser Metal Deposition of Inconel 718 Superalloy. *Materials*, 11, 1388.
- [12] Liu, Y., Ding, Y., Yang, L., Sun, R., Zhang, T. & Yang, X. (2021). Research and progress of laser cladding on engineering alloys: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 66, 341–63.
- [13] Ocylok, S., Weisheit, A. & Kelbasha, I. (2010) Functionally graded multi-layers by laser cladding for increased wear and corrosion protection. *Physics Procedia*, 5, 359-367.
- [14] Sun, W., Zhang, D., Chen, X., Wang, K., Zhang, J. & Jia, Y.(2022) Effect of the scanning speed of laser cladding on microstructure and mechanical properties of WC/Ni composite coatings.*Journal of Mechanical Science and Technology*, 36 (2), 679–687.
- [15] Xu, M., Zhou, C., Huang, X., Zhang, Z. & Wang, T. (2020) Multiobjective Optimization of 316L Laser Cladding Powder Using Gray Relational Analysis. *Journal f Materials Engineering and Performance*, 29, 7793–7806.
- [16] Ya, W. (2015). Laser Materials Interactions During Cladding Analysis on Clad Formation, Thermal Cycles, Residual Stress and Defects. 1st Editio. University of Twente.