

INCONEL 718 LAZER DOLGU KAYNAĞINDA ÜRETİM PARAMETRELERİNİN GEOMETRİK ÖZELİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Ali ARI* 

Alınma: 29.10.2024 ; düzeltme: 23.01.2025 ; kabul: 03.03.2025

Öz: Lazer dolgu kaynağı sürecinde, kaplamanın geometrik özelliklerinin değerlendirilmesi öncelikli hedef olarak belirlenmiştir. Bu çalışma, tarama hızı, lazer gücü ve toz besleme hızı gibi üç temel proses parametresinin, AISI 1050 çelik alt tabaka üzerindeki Inconel 718 kaplamaların geometrik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemeyi amaçlamaktadır. Bu amaçla, üç farklı lazer gücü, dört farklı tarama hızı ve dört farklı toz besleme hızında bir deney seti oluşturulmuş ve toplam 18 farklı deney numunesi üretilmiştir. Üretilen bu kaplamaların penetrasyon derinliği, kaplama yüksekliği, kaplama genişliği ve seyreltme oranı gibi çeşitli geometrik özellikleri analiz edilmiştir. Kaplama geometrisi üzerindeki proses parametrelerinin etkilerini kapsamlı bir şekilde değerlendirmek için varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Analiz sonuçları, tarama hızının kaplama genişliği (%44) ve yüksekliği (%79) üzerinde en etkili faktör olduğunu ortaya koymaktadır. Lazer gücünün, alt tabakanın erime derinliği üzerinde %54 oranında etkili olduğu, toz akış hızının ise %35'lik bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Matematiksel regresyon modeli sonuçları deneysel ölçümlerle karşılaştırıldığında, tüm geometrik özellikler için hata oranlarının %12'nin altında kaldığı görülmüş ve modelin deneysel tasarımı etkili bir hesaplama aracı olduğu doğrulanmıştır. Deneysel veriler, lazerle kaplanmış Inconel 718'in alt tabaka üzerindeki seyreltme oranının %9 ile %13 arasında değiştiğini göstermektedir. Bu bulgular, kaplamanın performans açısından tatmin edici bir sonuç verdiğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Inconel 718, AISI 1050, Lazer kaplama, Doğrusal regresyon analizi, Lazer kaplama geometrisi

Analysis of the Effect of Production Parameters on the Geometric Properties of Inconel 718 Laser Cladding

Abstract: In the laser cladding process, evaluating the geometric properties of the cladding has been identified as the primary objective. This study aims to investigate the effects of three fundamental process parameters—scanning speed, laser power, and powder feed rate—on the geometric properties of Inconel 718 coatings on an AISI 1050 steel substrate. For this purpose, an experimental set was created with three different laser powers, four different scanning speeds, and four different powder feed rates, resulting in a total of 18 different experimental samples. To comprehensively evaluate the effects of the process parameters on the coating geometry, analysis of variance (ANOVA) was conducted. The results of the analysis show that the scanning speed is the most influential factor on coating width (44%) and height (79%). It was found that the laser power has a 54% effect on the substrate melting depth, while the powder flow rate has a 35% effect. When comparing the results of the mathematical regression model with experimental measurements, the error rates for all geometric properties were found to be below 12%, confirming that the model is an effective computational tool in the experimental design. The experimental

*OSTİM Teknik Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Silah Sanayi Teknikerliği Bölümü, 06374, Ankara
İletişim Yazarı: Ali Ari (ali.ari@ostimteknik.edu.tr)

data show that the dilution rate of the laser-clad Inconel 718 on the substrate varies between 9% and 13%. These findings indicate that the coating provides a satisfactory result in terms of performance.

Keywords: Inconel 718, AISI 1050, Laser cladding, Linear regression analysis, Laser cladding geometry

1. GİRİŞ

Lazer kaplama teknolojisi, yüzey özelliklerini iyileştirmek veya hasarlı bileşenleri onarmak amacıyla, alt tabaka üzerinde belirli bir kaplama malzemesini eriterek metalürjik bir bağ oluşturan ve ardından katman katman biriktirme ve şekillendirme yapabilen etkili bir yüzey modifikasyon tekniğidir (Muvvala ve diğ., 2020). Bu teknik sayesinde, yüksek enerjili lazer ışınlarının ısı kaynağı olarak kullanılması ve hammadde olarak metal tozlarının karıştırılmasıyla hızlı şekillendirme elde edilir (Ning ve diğ., 2021). Üretim yöntemi, toz malzemenin eritme yoluyla temel malzemeye doğrudan nüfuz etmesine dayanır. Metalik toz, malzeme besleme sistemi tarafından bir nozülünden temel malzemeye aktarılır. Eklemeli üretim türlerinden biri olan bu işlemi diğer yöntemlerden ayıran temel fark, malzeme eritmede lazer ışınlarının kullanılmasıdır (Zhong ve diğ., 2020).

Lazer kaplama işleminde, kaynak kalitesini etkileyen birçok parametre bulunmaktadır (Herzog ve diğ., 2016). Bu parametreler; kaplama yapılacak alt tabaka malzemesinin bileşimi ve mekanik özellikleri, dolgu maddesi olarak kullanılan tozun bileşimi ve tane büyüklüğü ile lazer gücü, toz akış hızı, kaynak kalınlığı, toz besleme mesafesi, argon gazı akış hızı gibi dolgu kaynak parametrelerini kapsamaktadır. Ayrıca, kaynak bölgesine giren ısı miktarı, soğuma hızı, kaynaklar arasındaki mesafe, işlem yönü ve katman sayısı da kaynak kalitesini doğrudan etkileyen unsurlar arasındadır (Saboori ve diğ., 2019).

Geleneksel kaplama yöntemlerine kıyasla, lazer kaplama işleminin kaplama sırasında azaltılmış ısı girişi, küçük ısıdan etkilenen bölge ve güçlü metalürjik bağlantı gibi birçok avantajı vardır. Lazer kaplama, yüksek doğruluk ve hız, daha az bozulma, daha yüksek yüzey kalitesi ve hızlı katılma oranı gibi ek avantajları nedeniyle yüksek sıcaklık gerektiren kaplamalarda tercih sebebidir (Yılbas ve diğ., 2010). Lazer kaplamada, lazeri ısı kaynağı olarak kullanarak eş eksenli beslenen tozu eriterek alt tabaka üzerinde ince bir kaplama tabakası oluşturulur (Zhai ve diğ., 2019). Lazer eklemeli üretim teknolojileri üzerinde birçok çalışma yapılmıştır. Lazer kaplama işlemi sayesinde karmaşık geometrilerde işleme, taban malzemesinde düşük ısıtma, az miktarda deformasyon, farklı malzemelerin kullanımı, 3 boyutlu yüzeylerde hassas dolgu kontrolü ve bilgisayar kontrolü ile yüksek tekrarlanabilirlik elde edilebilir (Wang ve diğ., 2022).

Lazer kaplamada, lazer gücü, tarama hızı ve toz besleme hızı olmak üzere üç parametre, kaplama kalitesi üzerinde en büyük etkiye sahiptir ve temel işlem parametreleridir (de Oliveira ve diğ., 2005). Ancak, lazer ışını enerji dağılımı, koruyucu gaz ve toz taşıyıcı gazın miktarı ve türü, toz boyutu ve toz enjeksiyon açısı gibi diğer işlem parametreleri birikintilerin kalitesi üzerinde etkilidir. Ayrıca, temel işlem parametreleri arasındaki bağlantıyı elde etmek ve bağlantıları birikintilerin geometrik şekliyle ilişkilendirmek, böylece işlemi optimize etmek önemlidir. Boyut ve geometri (yükseklik, genişlik ve derinlik), biriken yolun kalitesini belirlemede kritik öneme sahiptir. İstenen geometriyi elde etmek için işlem parametrelerini optimize etmek gerekir. Tek izli kaplama için işlem parametrelerini optimize etmek için genellikle deneme yanılma deneyleri kullanılır. Deneysel bir araştırma pahalı ve zaman alıcı bir işlemdir. Tek izli kaplama geometrisini hassas bir şekilde tahmin etmek için bir yöntem geliştirmek gerekir. Kaplama geometrilerini tahmin etmek için sayısal modeller, regresyon modelleri ve analitik modeller kullanılır.

Kaplama ve alt tabaka arasında güçlü bir metalürjik bağ, düşük seyreltme (%10-20) ve küçük bir ısıdan etkilenen bölge ancak proses optimizasyonu yoluyla elde edilebilir (Bloemer ve diğ., 2022). Kaplama kalitesini ölçmek için seyreltme gibi çeşitli geometrik özellikler incelenir (Seede ve diğ., 2018). Lazer kaplama sürecinde, seyreltmenin değerlendirilmesi, mekanik stresin önemli bir unsur olduğu alt tabaka ve kaplama arasındaki metalürjik bağlantıyı doğrulamaya çalışır. Öte

yandan, lazer gücünü artırmak, penetrasyon derinliğinde önemli bir artışa neden olur. Lazer gücü, penetrasyon derinliğindeki en etkili faktördür. Tarama hızını artırmak, seyreltme yüzdesini artırır. Tarama hızı, iz yüksekliği üzerinde penetrasyon derinliğinden daha önemli bir olumsuz etkiye sahiptir. Lazer gücünü artırmak, seyreltme yüzdesini doğrudan artırırken, toz besleme hızını artırmak, tam tersi bir sonuca sahiptir (İlanlou ve diğ., 2022).

Alizadeh-Sh ve çalışma arkadaşları (2020), Inconel 718 tozunun A-286 Fe bazlı süper alaşım yüzeyine lazerle kaplanması sırasında oluşabilecek katılma çatlaklarını öngörmek amacıyla deneysel ve istatistiksel bir yaklaşım geliştirmiştir. Bu yöntem, lazer gücü (P), toz besleme hızı (F) ve tarama hızı (V) gibi temel işleme parametreleri ile tek bir lazer kaplama izinin geometrik özellikleri arasındaki deneysel-istatistiksel korelasyonların lineer regresyon analizine dayanmaktadır. Yapılan analizler, tek lazer kaplama izinin yüksekliği ve açısının sırasıyla $P^2(F/V)^2$ ve $P^{0.5}(F/V)^1$ parametreleri ile doğrudan bağlantılı olduğunu göstermiştir. Ayrıca, %25'in altında bir substrat seyreltme oranının katılma çatlamlarını önleyebilmek için kritik bir geometrik özellik olduğunu ortaya koymuştur (Alizadeh-Sh ve diğ., 2020).

Yüksek sıcaklıklarda yapısal bütünlüğü koruma kapasiteleri nedeniyle, demir, kobalt, nikel ve titanyum alaşım kaplamalar lazer kaplamada yaygın olarak kullanılır. Kaplamadan sonraki yüzey özellikleri nedeniyle, Co ve Ni bazlı alaşımlar bunların arasında en fazla ilgiyi toplamıştır ve çeşitli uygulamalarda ayrı ayrı veya kombinasyon halinde kullanılabilirler (Tabernero ve diğ., 2011). Maliyetleri düşürmek ve bakım işçilerinin güvenliğini artırmak için, Shi vd. (S Shi ve diğ., 2012) ve Bhaduri vd. (Bhaduri ve diğ., 2004) nükleer güç reaktörlerinin kaplanmasında Co bazlı alaşımlar yerine Ni bazlı alaşımların kullanılmasını önermiştir.

AISI 1050 çeliği üzerine Inconel 718 tozlarının lazerle kaplanmasına yönelik önceki çalışmalarımızda, belirlenen parametrelerle 18 farklı numune üretilmiş; bu numunelerin mikro yapısal karakterizasyonları, sertlik ölçümleri ve elementel analizleri gerçekleştirilmiştir (Ari, 2024). Elde edilen veriler doğrultusunda en uygun sonuçları veren parametreler belirlenmiş ve bu parametrelerle çekme ve darbe testleri için numuneler hazırlanmıştır. Yapılan testler sonucunda, numunelerin üst, orta ve alt tabakalarındaki mekanik ve mikro yapısal özellikler detaylı olarak incelenmiştir (Ari et al., 2023a).

Bu çalışmada ise lazer gücü, lazer tarama hızı ve toz akış hızı gibi kritik faktörlerin lazer kaplama geometrisi üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla sayısal ve ampirik (istatistiksel) modelleme yöntemleri kullanılmıştır. Kaplama geometrisi, matematiksel modeller ile tahmin edilmiş; süreç parametreleri dikkate alınarak yapılan analitik modelleme ile lazer kaplamanın şekli ve geometrik özelliklerinin simülasyonu sağlanmıştır. Farklı fiziksel ve istatistiksel modeller kullanılarak elde edilen geometrik sonuçlar ile deneysel gözlemler karşılaştırılmış ve hata oranları hesaplanmıştır. Ayrıca, en önemli proses değişkenleri ile bu değişkenlerin her bir geometrik özellik üzerindeki katkıları, varyans analizi (ANOVA) ile belirlenmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Materyal

Mevcut çalışmada IN718 (Ni bazlı) Malzemelerin AISI 1050 alt tabaka üzerinde çok katmanlı lazer kaplaması gerçekleştirilmiştir (Tablo 1). Çelik plakanın boyutu 300 mm x 150 mm x 20 mm idi. Kaplama malzemesi (nikel alaşım tozu) 45-90 µm parçacık boyutuna sahiptir. Kullanılan tozun kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. IN718 tozunun kimyasal bileşimi (% ağırlık)

Elementler	Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	Ti	Al
Ağırlık oranı %	54,19	20,58	15,14	5,13	3,04	0,95	0,67

2.2. Metot

Bu çalışma kapsamında, etkili parametrelerin kaynak kalitesi ve toz dolgu malzemesinin verimliliği üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Tek sıra IN718 toz kaplama, AISI 1050 imalat çeliğine sırasıyla 1500, 1800 ve 2100 W lazer güçlerinde (LP), 8, 10 ve 12 mm/s lazer tarama hızında (SS) ve 3,8, 4,3, 4,7 ve 5,2 dev/dak toz akış hızında (PF) uygulanmıştır. Ayrıca, Argon akış hızı 8 L/dak'da sabit tutulmuş ve aralık 1 mm olarak belirlenmiştir. Her bir kaplama için toplam katman sayısı 10'dur ve dikey adım 1 mm'nin üzerindedir. Lazer kaplama parametrelerinin dolgu kalitesi ve toz malzeme verimini nasıl etkilediğini belirlemek için aşağıdaki deneysel tasarım uygulanmıştır. Kaplama yüksekliği, genişliği ve penetrasyon parametreleri Euromex ImageFocus ALPHA yazılımı kullanılarak ölçülmüştür. Kaplama işlemi üzerindeki etkilerini araştırmak için, iki birleşik parametre olan özgül enerji yoğunluğu (SED) (J/mm²) ve toz besleme yoğunluğu (PFD) (g/mm²) hesaplandı. Denklemler (1) ve (2), bu birleşik parametreler için tanımlar sağlar (Lee ve diğ., 2017).

$$SED = (LP)/(SS) \times (d) \quad (1)$$

$$PFD = (PF)/(SS) \times (d) \quad (2)$$

Kaplama numunelerin seyreltme oranı (D) denklem 3'e göre, en-boy oranı (η) denklem 3'e göre hesaplanır.

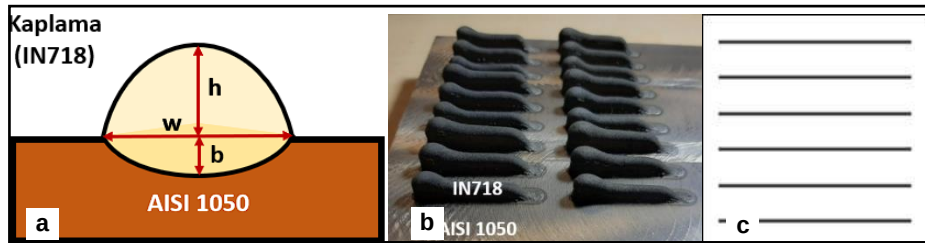
$$D (\%) = \left[\frac{b}{(h + b)} \right] \times (100) \quad (3)$$

$$\eta = w/h \quad (4)$$

Burada, w kaplama tabakasının genişliğini (mm), h yüksekliğini (mm) ve b yüzeye göre penetrasyon derinliğini (mm) göstermektedir (Şekil 1a).

2.3. Test Örnekleri ve Ölçümler

Kaplamalar, uzunlamasına ve sürekli aynı yönde uygulanmıştır. Örtülü kafa, başlangıç noktasından bitiş noktasına kadar ilerlemiş ve ardından yeni bir uygulamaya başlamak üzere başlangıç noktasına geri dönmüştür. Kaplama işlemi sırasında, 5 kattan sonra 3 dakika, 10 kattan sonra 4 dakika ve 15 kattan sonra 6 dakika olacak şekilde gecikmeler planlanmıştır (Şekil 1b). Bu süreçte raster tarama stratejisi tercih edilmiştir (Şekil 1c).



Şekil 1:

a. Kaplamadaki geometrik özellikler, **b.** Kaplama numuneleri, **c.** Raster tarama stratejisi (Ari, 2024)

Kaplanmış numuneler tel elektro erozyon makinesi ile kesildi, ardından taşlandı ve parlatılmıştır. Ek olarak, kaplamanın inceliğine bakmak için mikro yapının kantitatif bir değerlendirmesi yapılmıştır. Kaplamanın yüksekliği, genişliği ve seyreltme özellikleri ImageJ yazılımı kullanılarak ölçülmüştür. Kaplamanın çeşitli yerlerdeki elementel yapısını belirlemek için Enerji Dağıtıcı Spektroskopisi (EDS) kullanılmıştır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak kaplama geometrisi incelenmiştir.

2.4. Deneyel Tasarım ve ANOVA Analizi

Araştırmacılar, deneysel çalışmaları en aza indirerek kritik teknik verileri toplamak için istatistiksel yöntemler, özellikle deney tasarımı (DOE) kullanırlar. Pratikliği nedeniyle Taguchi yöntemi, mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bir DOE metodolojisidir. DOE'de incelenen herhangi bir değişken bir faktör olarak adlandırılırken, seviyeler bu faktörlerin farklı uygulama düzeylerini ifade eder. DOE'nin yanıtı ise geliştirilmek istenen ölçülebilir bir sonuçtur (Chen ve diğ., 2020).

Bu çalışmada deneysel çalışmaları azaltmak için Taguchi'nin ortogonal L18 dizisi kullanılmış ve üç değişken üzerinde çalışılmıştır: lazer gücü, lazer tarama hızı ve toz besleme hızı. Bu değişkenler için belirlenen aralıklar Tablo 3'te gösterilmektedir.

Gruplar arasındaki ortalamaları karşılaştırmak için hipotez testinde kullanılan başlıca istatistiksel yöntemler Student t testi, varyans analizi (ANOVA) ve kovaryans analizi (ANCOVA)'dır. Student t testi, iki grup arasındaki ortalamaları karşılaştırmak için kullanılırken, ANOVA üç veya daha fazla grup arasındaki ortalamaları karşılaştırmak için kullanılır. ANOVA sonucunda elde edilen anlamlı bir P değeri, gruplar arasında istatistiksel olarak farklı olan en az bir çiftin bulunduğunu gösterir ve bu farkı belirlemek için çoklu karşılaştırmalar kullanılır. Bu çalışmada üç değişken (Tablo 2) bulunduğu için, ANOVA yöntemi tercih edilmiştir (Ermergen ve Taylan, 2024).

ANOVA, çeşitli faktörlerin yanıt üzerindeki nispi etkilerini belirlemek ve en etkili faktörleri ortaya çıkarmak için yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Bu çalışmada, deneysel faktörler ve seviyeleri belirlenmiş ve bunların yanıt üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Bunun için Tablo 2'de belirtilen değişiklikler yapılmış ve deneysel matris olarak Tablo 3 kullanılmıştır.

Tablo 2. Deney faktörleri ve seviyeleri

Faktörler	1. Seviye	2. Seviye	3. Seviye	4. Seviye
A-LP (W)	1500	1800	2100	-
B-SS (mm/sn)	8	10	12	15
C-PF (dev/dak)	3,8	4,3	4,7	5,2

Tablo 3. L18 ortogonal dizi tabanlı deneysel matris

Deney No	A-LP (W)	B-SS (mm/sn)	C-PF (dev/dak)
1	1	1	1
2	1	2	1
3	1	3	1
4	1	1	2
5	1	2	2
6	1	3	2
7	2	1	2
8	2	2	2
9	2	3	2
10	2	1	3
11	2	2	3
12	2	3	3
13	3	2	3
14	3	3	3
15	3	4	3
16	3	2	4
17	3	3	4
18	3	4	4

2.5. Ampirik-İstatistiksel Analiz

İşlem parametrelerinin geometrik özellikler üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla, bileşik bir parametre ve karma seviyeli bir deney tasarımı tanımlanmıştır. Karma seviyeli tasarım, kaplamanın geometrik özelliklerinin ampirik-istatistiksel modellemesinde yaygın olarak kullanılan bir yaklaşımdır. Geometrik özelliklerdeki varyasyonları daha iyi açıklamak için deneyler iki değişkenli tasarım parametresi içermektedir. Tüm işlem parametrelerinin geometrik özellikler üzerindeki eş zamanlı etkisinin önemi göz önüne alındığında, bu parametrelerin bileşik veya karma bir yaklaşımla incelenmesi daha uygun bulunmuştur.

Ampirik-istatistiksel analiz, lazer kaplamanın geometrik özellikleri ile işlemde bağımsız faktörler arasındaki korelasyonu belirlemek için doğrusal regresyon yöntemini kullanmıştır. SED ve PFD, işlemde bağımsız faktörler olarak tanımlanmıştır. Geometrik özelliklerin tüm işlem parametrelerine göre incelenmesi için doğrusal regresyon tekniği kullanılmıştır. Bu analizde, bir açıklayıcı değişken ile bu değişkenin etkilediği kaplamaların geometrik özelliklerini ifade eden bağımlı bir yanıt değişkeni arasındaki ilişkiyi belirlemek için verilere doğrusal bir denklem uygulanmıştır.

Önceki çalışmaların üzerine inşa edilerek, bileşik parametrenin gerekli geometrik nitelikleri tahmin etme yeteneğine sahip olduğu varsayılmıştır. Doğrusal regresyon analizleri MATLAB yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Belirlenen katsayıların doğruluğu ve geçerliliği R^2 (R kare) istatistiği kullanılarak değerlendirilmiştir. Doğrusal regresyon doğrusunun matematiksel formülü $y = ax + b$ olarak ifade edilir, burada x açıklayıcı değişkeni, y ise yanıt değişkenini temsil eder. Veriler ile seçilen regresyon modeli arasındaki uyumu değerlendirmek için R^2 istatistiği bir kriter olarak kullanılmıştır. R^2 , açıklayıcı değişken (x) tarafından açıklanabilen yanıt değişkenindeki (y) varyasyon yüzdesini gösteren istatistiksel bir ölçüttür. Yüksek bir R^2 değeri, modelin verilere iyi uyduğunu ve değişkenler arasındaki ilişkinin güçlü olduğunu gösterir.

Amaç, doğrusal regresyon hatasını $(1-R^2)$ en aza indirmektir ve tasarım değişkenleri katsayılar a_0 , a_1 ve a_2 olarak tanımlanmıştır. Katsayıların ve minimum $(1-R^2)$ değerinin en iyi tahmini elde edilene kadar optimizasyon süreci devam etmiştir. R^2 değerlerinin 1'e yakın çıkması, doğrusal regresyonun yüksek doğrulukta sağlandığını göstermiştir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, AISI 1050 alt tabaka üzerine farklı işlem parametreleriyle üretilen çeşitli Inconel 718 kaplama numuneleri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Araştırma, kaplama yüksekliği, penetrasyon derinliği ve seyreltme gibi kaplama geometrisi özelliklerine, mikro yapının evrimine ve sonraki bölümlerde mekanik özelliklerle ilgili tartışmalara odaklanmıştır. %5 kabul edilebilir bir önem seviyesi (alfa değeri) ile %95 güven aralığına karşılık gelen varyans analiz etmek için ANOVA yaklaşımı kullanılmıştır. Kaplama geometrisi verilerinin ANOVA analizini sunmak için düzenlenmiş toplam kareler yöntemi kullanılmıştır.

Tablo 5, Tablo 6, Tablo 7 ve Tablo 8, sırasıyla üç yanıt değişkeni için ANOVA sonuçlarını göstermektedir. Seçilen regresyon modelleri için p değerlerinin tümünün %0,05'ten küçük olduğu görülmüştür; bu durum, seçilen modellerin deneysel verileri %95'in üzerinde bir doğrulukla yorumladığını göstermektedir. Tablolarda sunulan düşük PRESS (tahmin edilen artık hata kareler toplamı) değerleri, yeni deneysel sonuçları tahmin etme konusunda modellerin iyi bir yeteneğe sahip olduğunu ifade etmektedir.

Her bir deneysel faktörün test sonuçları üzerindeki etkisini değerlendirmek için hesaplanan F değerleri incelenmiş ve A faktörü için iki, B ve C faktörleri için üç, hata terimi için ise dokuz serbestlik derecesi bulunmuştur. Serbestlik dereceleri, $F_{0.05; 2; 9}$ (LP için 4,26) ve $F_{0.05; 3; 9}$ (3,96) kullanılarak kritik F tablosundan türetilmiştir. Hesaplanan F değerlerinin kritik F değerlerinden büyük olduğu tespit edilmiş ve hedeflenen %95 güven düzeyine ulaşıldığı doğrulanmıştır.

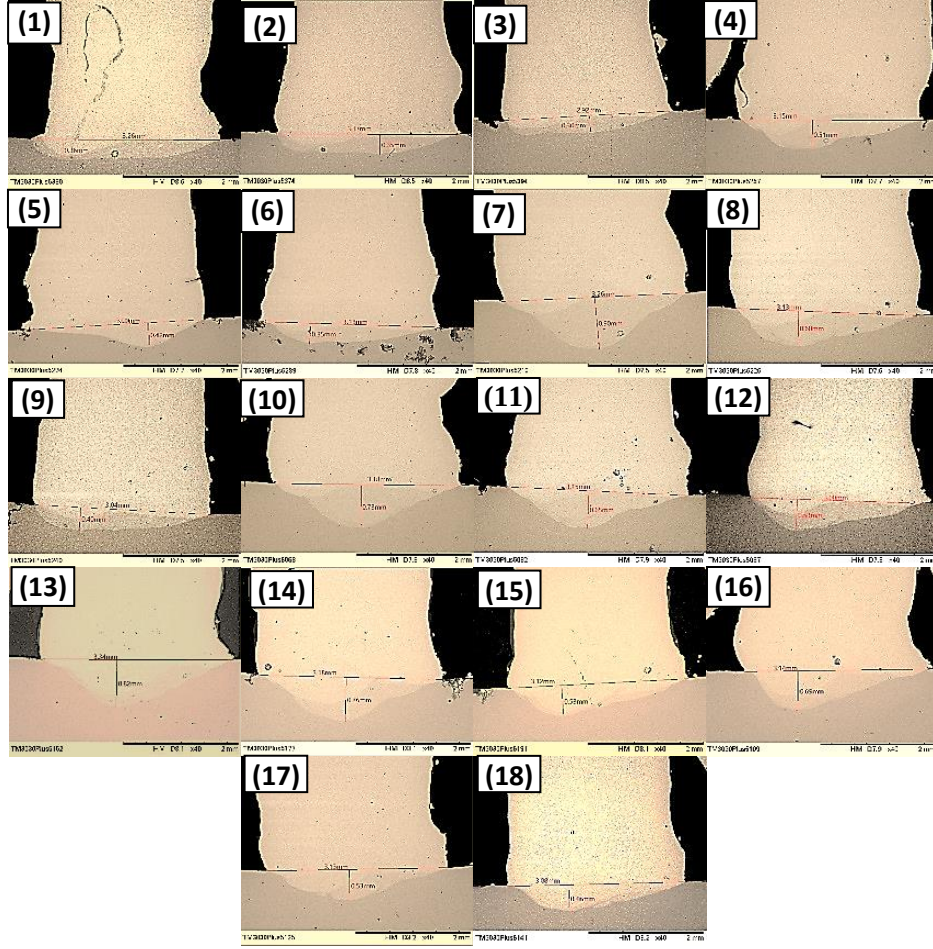
3.1. Kaplama Geometrisi

Kaplamaların penetrasyon kesitleri Şekil 2'de gösterilmiştir. IN718 alaşım tozları kullanılarak gerçekleştirilen çok katmanlı kaplama işlemi başarıyla uygulanmış ve elde edilen tüm numuneler yoğun ve homojen kaplama yapısı sergilemiştir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntülerinde de gösterildiği gibi, kaplamalarda veya alt tabaka metalinde çatlak bulunmamaktadır. Ancak, Şekil 2'de 1 numaralı numunenin kaplamasında küçük bir çatlak gözlemlenmiştir. Bu durum, düşük lazer gücü (LP) ve düşük toz akış hızı arasında potansiyel bir korelasyona işaret etmektedir. Ayrıca, lazer gücünün artmasının, Şekil 2'de gösterildiği gibi daha kusursuz bir kaplama ile sonuçlandığı görülmüştür. Bu durum, yüksek tarama hızında (SS) IN718'in erimesi için yetersiz güce (1500 W) ve alaşımın yüksek termal direnç özelliğine bağlanabilir. Biriktirilen toz miktarına bağlı olarak, seçilen lazer gücü, hammaddenin tam olarak erimesini sağlamayabilir. Erimiş toz parçacıklarının sayısı, artan lazer gücü ile birlikte artar; bu nedenle, lazer ışını gücü, kaplamalı katmanların üretiminde kritik bir faktördür (Huebner ve diğ., 2017).

Ayrıca, seyreltme oranının yaklaşık %10-20 aralığında olmasının, iyi bir kaplama geometrisine işaret ettiği ve lazer kaplamalı kaplamalar için kabul edilebilir seyreltme oranlarının bir göstergesi olduğu söylenebilir (Barekat ve diğ., 2016). Bu çalışmada, lazer gücü arttıkça seyreltme oranının da arttığı gözlemlenmiştir. En yüksek seyreltme oranı ortalama 1500 W lazer gücünde %7 iken (Şekil 2.1-2.6), bu değer 2100 W'da yaklaşık %13'e ulaşmıştır (Şekil 3.14), bu da ideal bir seyreltme oranı sunmaktadır. Düşük difüzyon oranı ise zayıf bağlanmayı ifade etmektedir (Şekil 2.1) (Wolff ve diğ., 2019).

Sabit lazer gücü ile, tarama izinin genişliğinin ve derinliğinin tarama hızı (SS) arttıkça azaldığı bulunmuştur (Şekil 2.7-2.9). Daha yüksek tarama hızında, sık penetrasyon bölgesi yetersiz nüfuziyetine neden olmaktadır (Şekil 2.3), bu da önceki katmanlara yetersiz bağlanma sağlamakta ve çok katmanlı üretim sürecinde kusurların oluşmasına yol açabilmektedir. Daha düşük tarama hızında ise eriyik izinin kesit alanı daha geniştir. Tarama hızı arttığında kesit alanı da artmaktadır (Şekil 2.7-2.9). Düşük kaplama yüksekliği, eriyiğin yüksek güç çıkışı nedeniyle kısmen buharlaşması ve derinlemesine penetrasyon sonucunda ortaya çıkmaktadır (X Shi ve diğ., 2017).

Şekil 1, kaplama geometrisinin şematik bir gösterimini sunarken, Tablo 4 kaplama yüksekliği, penetrasyon derinliği ve seyreltme ölçümlerini özetlemektedir. IN718 kaplama işlemi sırasında, lazer kaynağının arkasında önemli bir kızıl-sıcak bölge olduğu ve bu bölgenin iz sayısı arttıkça genişlediği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, bu durum, ısı birikimine ve katılaşma oranında bir azalmaya yol açarak kaplama yüksekliğinde bir artışa neden olmaktadır (Corbin ve diğ., 2018).



Şekil 2:
Numunelerin biriktirilmiş kaplamalarının kesit morfolojileri (x40) (Ari, 2024)

Tablo 4. Lazer kaplama proses parametreleri ve geometrik ölçümler

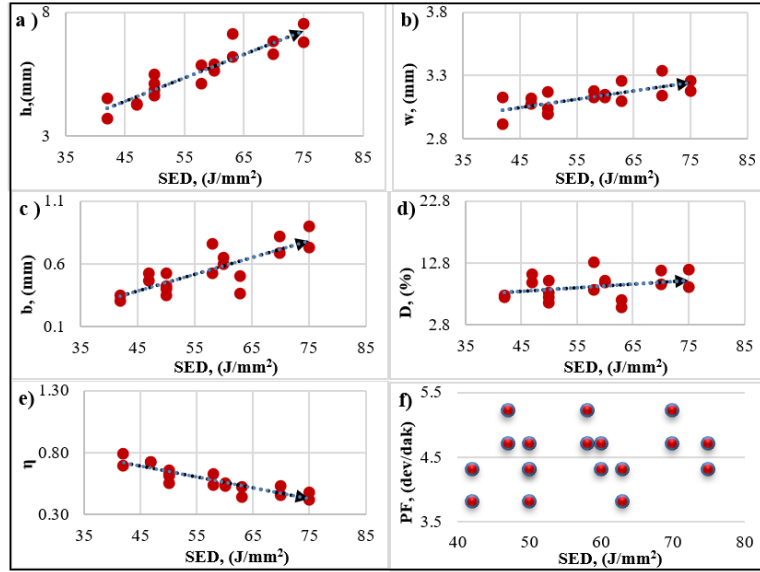
Numuneler	LP	SS	PF	PFD	SED	h	b	w	D	η
S1	1500	8	3,8	0,16	63,00	6,23	0,36	3,26	5,46	0,52
S2	1500	10	3,8	0,13	50,40	5,13	0,35	3,17	6,39	0,62
S3	1500	12	3,8	0,11	42,00	3,69	0,3	2,92	7,52	0,79
S4	1500	8	4,3	0,18	63,00	7,12	0,51	3,15	6,68	0,44
S5	1500	10	4,3	0,14	50,40	5,49	0,42	3	7,11	0,55
S6	1500	12	4,3	0,12	42,00	4,53	0,35	3,13	7,17	0,69
S7	1800	8	4,3	0,18	75,60	6,77	0,9	3,26	11,7	0,48
S8	1800	10	4,3	0,14	60,48	5,66	0,6	3,13	9,58	0,55
S9	1800	12	4,3	0,12	50,40	4,63	0,4	3,04	7,95	0,66
S10	1800	8	4,7	0,20	75,60	7,54	0,73	3,18	8,83	0,42
S11	1800	10	4,7	0,16	60,48	5,92	0,65	3,15	9,89	0,53
S12	1800	12	4,7	0,13	50,40	4,89	0,53	3	9,78	0,61
S13	2100	10	4,7	0,16	70,56	6,33	0,82	3,34	11,5	0,53
S14	2100	12	4,7	0,13	58,80	5,15	0,76	3,18	12,9	0,62
S15	2100	15	4,7	0,11	47,04	4,29	0,53	3,12	11	0,73
S16	2100	10	5,2	0,17	70,56	6,85	0,69	3,14	9,15	0,46
S17	2100	12	5,2	0,15	58,80	5,83	0,53	3,13	8,33	0,54
S18	2100	15	5,2	0,12	47,04	4,26	0,46	3,08	9,75	0,72

3.2. SED'in Etkileri

Şekil 3, SED'in kaplama geometrisi üzerindeki etkilerini göstermektedir. SED'in artması ile daha yüksek ısı girişi olur ve bunun sonucu olarak toz biriktirme verimliliği artar. Şekil 3a incelendiğinde SED'in artmasıyla toz biriktirme verimliliği artmış ve kaplama yükseklikleri artmıştır. Kaplama yüksekliğinin aralığı 3,69 ila 7,54 mm'dir. Erime havuzunun boyutu ve şekli, artan ısı girişinden etkilenerek kaplamayı genişletir. Şekil 3b'de görüldüğü gibi kaplama genişlik aralığı 2,92 ila 3,34 mm'dir.

Şekil 3c ve 3d, penetrasyon derinliği, seyreltme yüzdesi ve SED arasındaki ilişkiyi göstermektedir. SED arttıkça hem penetrasyon derinliği hem de seyreltme yüzdesi yukarı doğru bir eğilim gösterir. Bu, alt tabaka yüzeyinden iç bölüme artan ısı transferine bağlanabilir. Sabit bir toz akış hızı korunurken daha yüksek bir SED ile penetrasyon derinliğinin ve seyreltme yüzdesinin artma eğiliminde olduğu yaygın bir gözlemdir (Sciammarella ve Najafabadi, 2018).

Toz akışındaki artışla, toz bulutu ile havadaki lazer ışını arasındaki etkileşim yoğunlaşırken, alt tabaka üzerindeki SED olayı azalır. Penetrasyon derinliği 0,3 ile 0,90 mm arasında (Şekil 3c), seyreltme %'si %5,46 ile %11,70 arasında değişmiştir (Şekil 3d). Şekil 3e, SED arttıkça genişlik-yükseklik oranında bir azalma olduğunu göstermektedir. Bu, daha yüksek SED ile yükseklikteki artışın genişlikteki artıştan orantılı olarak daha fazla olmasına bağlanabilir. Genişlik-yükseklik oranı 0,42 ile 0,79 arasında değişir. Ayrıca, derinlik, seyreltme yüzdesi ve genişlik-yükseklik oranlarındaki değişim, Şekil 3f'de gösterildiği gibi değişken toz akış hızına bağlanabilir.



Şekil 3:

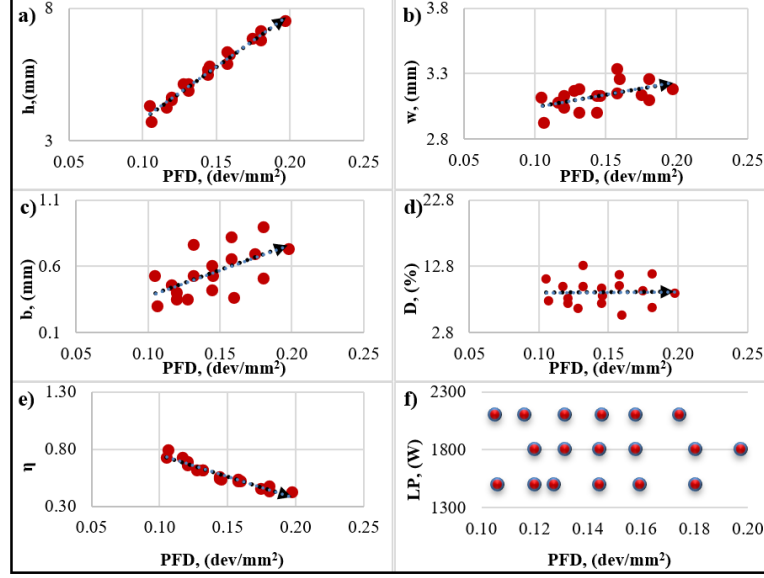
(a-e) SED'in kaplama geometrisi üzerindeki etkisi ve (f) SED ile ilgili toz akış hızının dalgalanması

3.3. PFD'nin etkileri

Şekil 4, PFD'nin kaplama geometrisi üzerindeki etkisini göstermektedir. PFD arttıkça, daha fazla miktarda toz eriyik havuzu alanına taşınır ve daha sonra erir. Bu olgu, kaplamanın yüksekliğinde bir artışa katkıda bulunur (Şekil 4a). Şekil 4b'ye göre, kaplama genişliği artan PFD ile mütevazı bir artış eğilimi gösterir. Eriyik havuzunun şekli ve boyutu, PFD'deki artıştan etkilenir ve kaplama genişliğini sınırlar (Thawari ve diğ., 2021).

PFD'de artış, daha fazla sayıda toz parçacığı havada lazer ışınıyla temas etmesine neden olur. Sonuç olarak, lazer ısısı ile alt tabaka arasında nispeten daha az etkileşim olur ve bu da kaplama

yüksekliğinde bir azalmaya yol açar. Bu, LP'deki artışa rağmen seyreltme yüzdesinin neden sabit kaldığını açıklar (Şekil 4d). Ayrıca, Şekil 4e, genişlik-yükseklik oranının PFD yükseldikçe azalma eğiliminde olduğunu gösterir. Bunun nedeni, artan bir PFD ile yükseklikteki artışın genişlikteki artıştan orantılı olarak daha fazla olması ve genişlik-yükseklik oranında aşağı yönlü bir eğilime neden olmasıdır. Seyreltme yüzdesindeki ve penetrasyon derinliğindeki değişiklikler, Şekil 4f'de görüldüğü gibi LP'deki değişikliklere atfedilebilir.



Şekil 4:

(a-e) PFD'nin kaplama geometrisi üzerindeki etkisi ve **(f)** PFD ile ilgili LP dalgalanması

3.4. Kapsama tabakasının yüksekliği (h, mm)

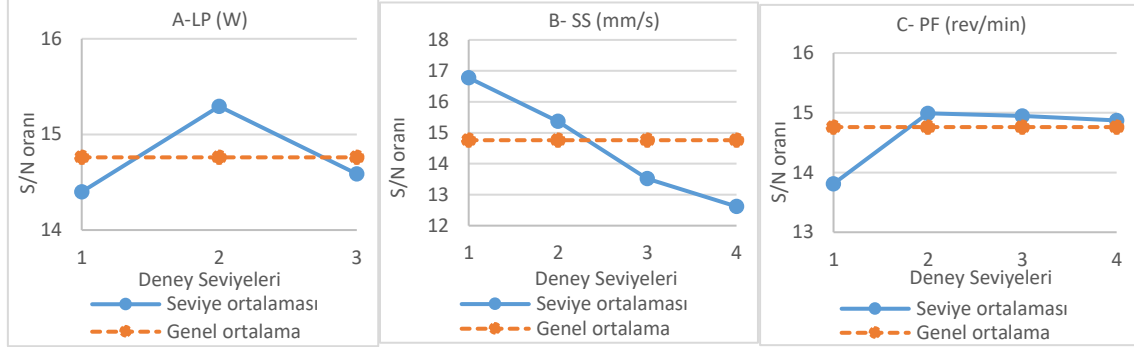
Şekil 5'te ANOVA analizi sonucunda LP (W), SS (mm/s), PF (rev/dk) parametrelerinin kaplama tabakasının yüksekliğinin etki yüzdeleri gösterilmektedir. Tablo 4'te kaplama parametrelerinin kaplama geometrisini nasıl etkilediği sayısal olarak verilmiştir. Tablo 4'te; PF ve LP sabit tutularak SS'nin artırılmasıyla kaplama yüksekliğinin önemli ölçüde azalacağı gösterilmektedir. Sabit 1500 W LP ve 3,8 dev/dak PF koşullarında, SS 8'den 12 çıkartıldığında kaplama yüksekliği %40 oranında azalmıştır. Aynı şekilde sabit 4,3 dev/dak PF ve 1500 W LP koşullarında, SS 8'den 12 çıkarılarak %36 oranında azaltılmıştır. Yaklaşık LP değeri 1500, 1800 ve 2100 W ve PF değeri 3,8, 4,3, 4,7 ve 5,2 dev/dak parametreleri sabit tutulduğunda, SS'nin artması kaplama tabakasının yüksekliği %35 oranında azalmıştır. Kapsama tabakası yüksekliğindeki azalma, SS arttıkça toz parçacıkları ile lazer ışını arasındaki etkileşim süresinin azalmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, yüksek tarama hızlarında, birim uzunluk başına daha az toz ile beslenmektedir. Bundan kaynaklı olarak daha az malzeme biriktirilmekte ve sonuç olarak kaplama yüksekliği düşmektedir. Tablo 5 ve Şekil 5 incelendiğinde, ANOVA analizi sonucunda kaplama yüksekliği üzerindeki en önemli etkinin %77,29'luk SS olduğu görülmektedir.

LP ve SS sabit kaldığında, PF'deki artış kaplama yüksekliğinde az miktarda artmıştır. Bu, artan PF sonucu eriyik havuzuna daha fazla malzeme enjeksiyonuna bağlanabilir. Sonuç olarak, giriş enerjisi daha fazla miktarda giriş tozunun erimesine neden olur ve bu da kaplama yüksekliğinde genel bir artışla sonuçlanır.

Şekil 5, LP'de bir artışla kaplama yüksekliğinde önemli bir artış olmadığını göstermektedir. Ancak, LP artırıldığında kaplama yüksekliğinde küçük bir artış gözlemlenmektedir. Bu yükseklik artışı, artan LP'nin neden olduğu sıcaklık artışına atfedilebilir. Yükselen sıcaklık, daha fazla

miktarda tozun erimesine yol açar ve sonuç olarak kaplama yüksekliğinin artmıştır (Jelvani ve diğ., 2020).

Bazı araştırmacılar, LP'nin kaplama yüksekliği üzerinde çok az etkisi olduğundan, yalnızca SS ve PF'yi etkili parametreler olarak değerlendirmişlerdir (Goodarzi ve diğ., 2017).



Şekil 5:

Kaplama tabakasının yüksekliği için S/N oranları

Tablo 5. Kaplama tabakasının yüksekliği için ANOVA sonuçları

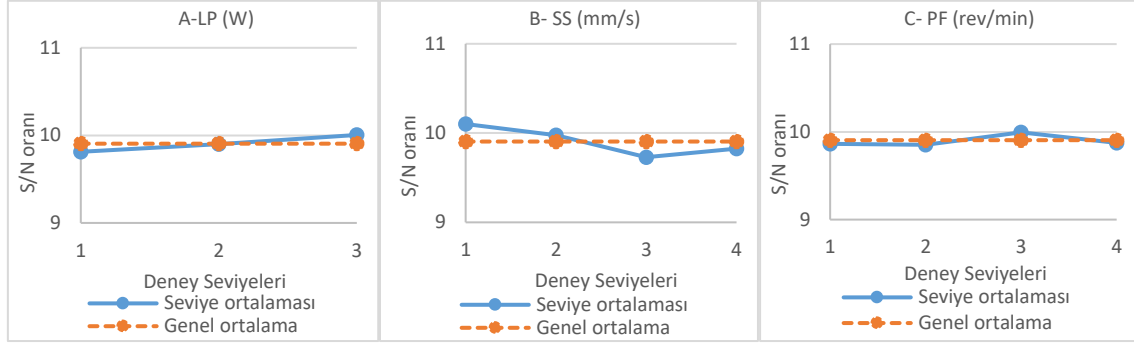
	Serbestlik dereceleri	Kareler toplamı	P değeri	F test değeri	Katkı oranı (%)
A-LP	2	2,66	0,050	4,36	5,51
B-SS	3	36,91	0,000	160,74	78,6
C-PF	3	3,27	0,002	11,20	6,95
Hata	9	8,34			7,48
Toplam	17	51,19			100,00

3.5. Kaplama Tabakasının Genişliği (w, mm)

Şekil 6 ve Tablo 6'da ANOVA analizi sonucunda LP, SS ve PF parametrelerinin kaplama tabakasının genişliğine olan etki yüzdeleri gösterilmektedir.

Şekil 7 incelendiğinde, daha yüksek LP seviyelerinin daha geniş bir kaplama ile sonuçlandığı açıkça görülmektedir. Bu, daha yüksek LP seviyelerinde alt tabakanın artan enerji emilimine bağlanabilir. Doğrudan lazer gücünden etkilenen eriyik havuzunun merkezi bölgesi, çevresinden daha sıcak olma eğilimindedir. Sonuç olarak, eriyik haldeki metal, eriyik havuzunun merkezine kıyasla yüksek yüzey gerilimine sahip soğuk bölgelere doğru hareket eder ve bu durum eriyik havuzunun genişlemesine neden olur. Bu olgu, daha soğuk bölgelere kıyasla merkezdeki ısıtılmış metalin daha düşük yüzey gerilimi nedeniyle meydana gelir (Sun ve Hao, 2012). Eriyik havuzu içindeki yüzey gerilim gradyanı, eriyik havuzunun merkezinden dışarıya doğru etki eden bir kesme kuvveti üretir (Jelvani ve diğ., 2020).

SS azaltıldığında, LP'nin malzeme ile temas süresi artacaktır. Yüzey gerilimi teorisine göre, bu giriş sıcaklığının artmasına neden olur ve eriyik havuzu genişler (Nabhani ve diğ., 2018). Dahası, SS 8'den 10, 12 ve 15 mm/s'ye çıktığında kaplama genişliği benzer şekilde azalır. Yukarıda belirtilen genişlik SS 8'den 10, 12 ve 15 mm/s'ye çıktığında ortadan kalkacaktır. En fazla LP ve SS'de, bu grafikteki veri noktaları örtüşmektedir ve bu da kaplama genişliğinin PF'den etkilenmediğini göstermektedir. Şekil 6, daha güçlü LP ve daha yavaş SS kullanıldığında daha büyük bir kaplama genişliğinin meydana geleceğini göstermektedir.



Şekil 6:
Genişlik derinliği için S/N oranları

Tablo 6. Kaplama tabakasının genişliği için ANOVA sonuçları

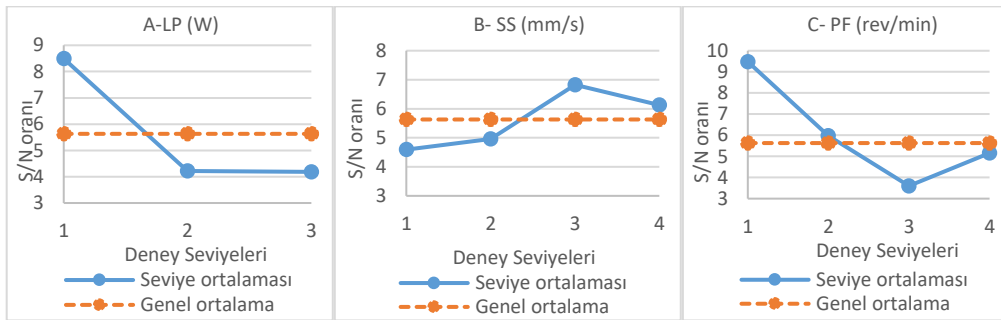
	Serbestlik dereceleri	Kareler toplamı	P değeri	F test değeri	Katkı oranı (%)
A-LP	2	0,11	0,011	4,87	18,94
B-SS	3	0,38	0,002	5,10	43,19
C-PF	3	0,07	0,048	3,91	8,19
Hata	9	0,78			29,68
Toplam	17	1,35			100,00

3.6. Penetrasyon Derinliği (b, mm)

Şekil 7 ve Tablo 7'de ANOVA analizi sonucunda LP, SS ve PF parametrelerinin penetrasyon derinliğinin etki yüzdeleri gösterilmektedir.

SED'deki azalmayla birlikte penetrasyon derinliğinin azaldığı gözlemlendi. Bunun nedeni, daha düşük güçlerde alt tabakaya daha az ısı aktarılmasıdır.

Şekil 7, LP, SS ve PF'deki değişikliklerin penetrasyon derinliğini nasıl etkilediğine dair bir genel bakış sunmaktadır. Bulgular, PF'yi artırmanın penetrasyon derinliğinde bir azalmaya yol açtığını göstermektedir. Ek olarak, daha yüksek bir PF, SS'nin penetrasyon derinliği üzerindeki etkisini azaltır. Daha yüksek PF'de, SS'nin penetrasyon derinliği üzerindeki etkisi önemli ölçüde azalır, bu da maksimum PF'ye ulaşıldığında SS'yi ayarlamanın penetrasyon derinliği üzerinde fark edilir bir etkisi olmadığını göstermektedir. Öte yandan, penetrasyon derinliği LP'deki bir artışla açıkça artmaktadır. Tablo 7 analiz edildiğinde, SS'nin penetrasyon derinliği üzerindeki etkisinin yaklaşık %7 olduğu görülebilir. Ayrıca, diyagramdaki veri noktası dağılımı, LP'nin penetrasyon derinliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ve varyasyonun yaklaşık %54'ünü oluşturduğunu açıkça göstermektedir (Tablo 7).



Şekil 7:
Penetrasyon derinliğine göre S/N oranları

Tablo 7. Kaplama tabakasının penetrasyon derinliğine ilişkin ANOVA sonuçları

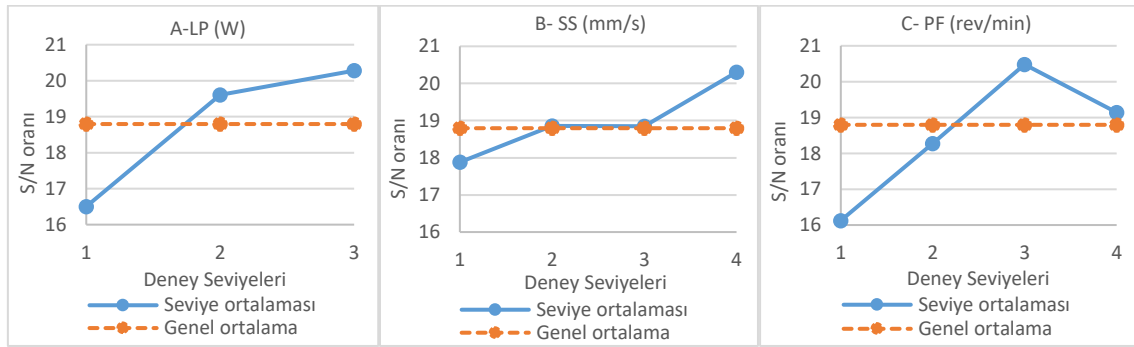
	Serbestlik dereceleri	Kareler toplamı	P değeri	F test değeri	Katkı oranı (%)
A-LP	2	73,68	0,001	11,01	53,83
B-SS	3	16,03	0,000	5,35	7,81
C-PF	3	70,57	0,046	7,06	34,38
Hata	9	24,53			3,98
Toplam	17	135,75			100,00

3.7. Seyreltme (D, %)

Şekil 8, kaplamanın seyrelmesinin artan SS ile nasıl büyüdüğünü göstermektedir. Seyreltmenin yüksekliğe ve penetrasyon derinliğine bağımlılığı Denklem 3'te görülmektedir. Daha önce bildirildiği gibi, kaplamanın yüksekliği ve penetrasyon derinliği SS tarafından azalan bir etkiye sahipti, ancak kaplamanın yüksekliği daha önemli şekilde etkilenmişti. Bu nedenle, SS'yi hızlandırmak daha önemli bir seyrelmeye neden olur.

PF arttıkça, SS'nin seyreltme üzerindeki etkisi en üst seviyeye ulaşır. Şekil 8'in daha detaylı incelenmesi, PF arttıkça seyreltmede önemli bir azalma olduğunu ortaya koymaktadır (4,7'den 5,2 dev/dak'ya). PF'nin kaplama yüksekliği ve penetrasyon derinliği üzerindeki etkisini analiz ederek, PF'nin seyreltmenin etkisini nasıl hafiflettiğini anlayabiliriz. Dahası, PF'deki bir artış, tozu eritmek için daha büyük bir enerji oranının kullanılmasıyla sonuçlanır. Sonuç olarak, bu penetrasyon derinliğinde bir azalmaya, kaplama yüksekliğinde bir artışa ve seyreltmede bir azalmaya yol açar. Sonuçlar, LP'yi artırmanın seyreltmede bir artışla ilişkili olduğunu ve seyreltme oranının yaklaşık %55'ini oluşturduğunu göstermektedir (Tablo 8).

SED, biriktirilmiş kaplamanın seyreltme oranı üzerindeki etkisi Tablo 8'de gösterilmiştir. Görülebileceği gibi seyreltme oranları SED'deki artışla birlikte artan bir eğilim göstermektedir. Ayrıca, %10 seyreltme oranı yüksek kaliteli bir kaplamayı değerlendirmek için önemli bir kriterdir. Düşük bir LP akımında ve düşük doğrusal enerji seviyesinde, ısı girdisi düşük olduğundan, seyreltme oranı da düşük olur. Buna karşılık, yüksek bir LP akımı ve daha büyük doğrusal enerji seviyesinde ısı girdisi artar, bu da daha yüksek en-boy oranı ve daha yüksek seyreltme oranı ile sonuçlanır.



Şekil 8:
Seyreltme için S/N oranları

Tablo 8. Seyreltme için ANOVA sonuçları

	Serbestlik dereceleri	Kareler toplamı	P değeri	F test değeri	Katkı oranı (%)
A-LP	2	48,65	0,002	13,74	55,94
B-SS	3	7,93	0,027	4,25	6,08
C-PF	3	40,41	0,002	8,80	30,97
Hata	9	27,40			7,00
Toplam	17	69,59			100,00

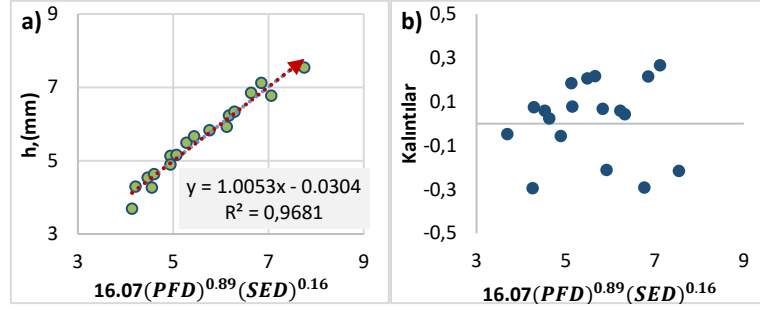
3.8. Doğrusal Regresyon Analizi

Bu çalışma, AISI 1050 çelik alt tabaka üzerinde Inconel 718'in lazer kaplama işlemi için yeni bir ampirik model önermektedir. Önerilen model, kaplama tabakasının geometrisi üzerindeki birleşik parametrelerin etkisini yansıtan yeni katsayılar içermektedir. Özellikle, model, kaplama tabakasının geometrik özellikleri üzerindeki etkileri açısından iki önemli parametre olan PFD ve SED'ye odaklanmaktadır. Denklem 5 ile tanımlanan üstel model, işleminden bağımsız değişkenler ile tek bir lazer kaplama yolunun geometrik özellikleri arasındaki ilişkiyi ifade etmek amacıyla kullanılmıştır (Onwubolu ve diğ., 2007):

$$y = a_0(PFD)^{a_1} \times (SED)^{a_2} \quad (5)$$

Bu bağlamda, bağımlı deneysel yanıt olarak ifade edilen y , daha önce belirtilen h , w , b ve $\%D$ gibi geometrik özelliklere karşılık gelmektedir. Model parametreleri, deneysel veriler kullanılarak belirlenen a_0 , a_1 ve a_2 ile gösterilmektedir. Denklem 5, bağımlı yanıt değişkeni y 'yi geometrik özelliklerle ilişkilendirdiği ve bir araya getirdiği için 'birleşik işlem parametresi' olarak adlandırılmaktadır.

Şekil 9a-12a, h , b , w ve D değişkenlerinin birleşik parametreye olan doğrusal bağımlılığını göstermektedir. Bu durum, kaplama tabakasının yüksekliği ile PFD ve SED'in birleşik parametreleri arasındaki doğrusal korelasyonu ortaya koymaktadır. Grafik, bu parametreler ile kaplama tabakasının elde edilen yüksekliği arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Tablolar 9–12, sırasıyla yanıtlar için ayrıntılı varyans analizi sonuçlarını sunmakta olup burada DF, SS, MS, F ve p değerleri; serbestlik derecesini, kareler toplamını, kareler ortalamasını, F istatistiğini (grup içi ve grup dışı varyasyon oranını) ve testin anlamlılığını belirten p değerini temsil etmektedir. Dört modelin F değerleri, modellerin anlamlı olduğunu göstermektedir. %0,01'den küçük p değerleri ise model terimlerinin anlamlılığını işaret etmektedir. Tüm birleşik parametreler ve regresyon katsayıları elde edilmiş olup, kaplama tabakalarının geometrik boyutları ile birleşik parametreler arasındaki doğrusal ilişkiye ilişkin katsayılar Tablo 13'te sunulmaktadır. Regresyon katsayısı (R) h için 0,98, b için 0,98, w için 0,96 ve D için 0,97 olarak bulunmuştur. Modelin h , w , b ve D % geometrik özellikleri için yüksek regresyon katsayısı değerleri ile doğrulanan güçlü bir uygulanabilirliği olduğu gösterilmiştir (Twomey ve Kroll, 2008). Yüksek doğrusal regresyon katsayısı ve artık diyagramındaki verileri takip edememe, modelin istenen sonucu ve geçerliliğini göstermektedir (Şekil 9b-12b). Geometrik özellikler üzerindeki proses parametrelerinin etkisini gösteren grafiksel gösterim, birleştirilmiş parametre denklemindeki bu proses parametreleriyle ilişkili üslerin büyüklük ve işaretleriyle uyumlu sonuçlar vermektedir. Hata oranı en fazla %5 olarak hesaplanmış olup, bu değerler birleştirilmiş parametrelerin birlikte kullanımı açısından kabul edilebilir düzeydedir (X Shi ve diğ., 2017; Erfanmanesh ve diğ., 2017). Literatürde bu değerleri kabul eden birçok çalışma bulunmaktadır (Erfanmanesh ve diğ., 2017). Örneğin Shayanfar vd. (2020) ASTM A592 Çelik üzerine Inconel 625 Lazer kaplama için Parametre Optimizasyonu çalışmasında regresyon modelinde %95 ile %78 arasında hata oranları bulmuştur. Birleştirilen parametreler kullanılarak diyagramdaki gibi en yüksek (R) değeri ve en uygun ilişki elde edilebilir. Buradan en yüksek ilişkinin $h - y = a_0(PFD)^{a_1} \times (SED)^{a_2}$ arasında olduğu görülmüştür.

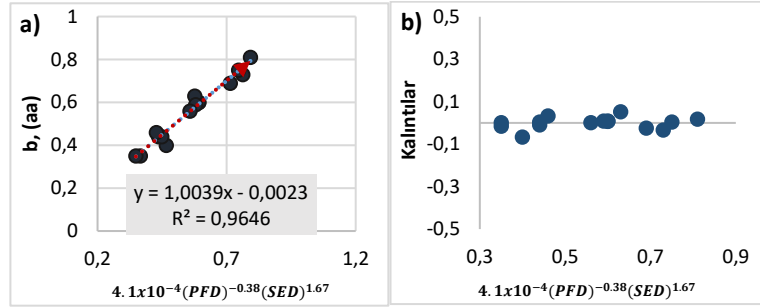


Şekil 9:

a) Kaplama tabakasının yüksekliği ile birleştirilmiş parametre arasındaki korelasyon, b) Artık diyagramı.

Tablo 9. Kaplama tabakasının yüksekliğine ilişkin varyans analizi

Varyans Kaynağı	DF	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Regresyon	1	19,5360	19,5360	428,24	0,000
Model	1	19,5360	19,5360	428,24	0,000
Hata	16	0,7299	0,0456		
Toplam	17	20,2660			
Terim	Katsayı	Katsayının Standart Hatası	T-Değeri	P-Değeri	Varyans Enflasyon Faktörü
Model	1,0053	0,0488	20,69	0,000	1,00

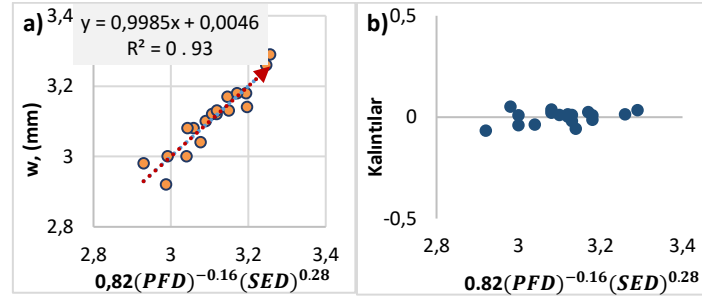


Şekil 10:

a) Nüfuz derinliği ile birleştirilmiş parametre arasındaki korelasyon, b) Artık diyagramı.

Tablo 10. Penetrasyon derinliği için varyans analizi

Varyans Kaynağı	DF	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Regresyon	1	0,29516	0,295162	354,05	0,000
Model	1	0,29516	0,295162	354,05	0,000
Hata	16	0,01084	0,000834		
Toplam	17	0,29516	0,295162	354,05	
Terim	Katsayı	Katsayının Standart Hatası	T-Değeri	P-Değeri	Varyans Enflasyon Faktörü
Model	1,0039	0,0534	18,82	0,000	1,00

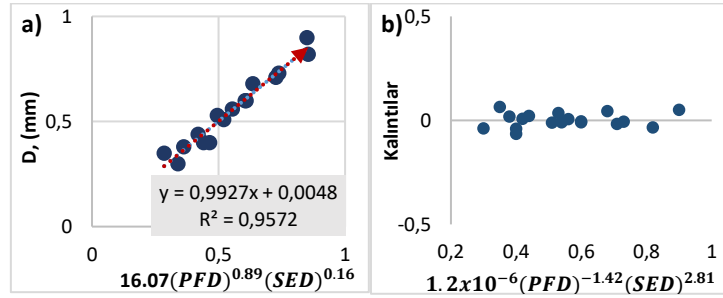


Şekil 11:

a) Kaplama tabakasının genişliği ile birleştirilmiş parametre arasındaki korelasyon, **b)** Artık diyagramı.

Tablo 11. Kaplama tabakasının genişliği için varyans analizi

Varyans Kaynağı	DF	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Regresyon	1	0,13569	0,135686	118,54	0,000
Model	1	0,13569	0,135686	118,54	0,000
Hata	16	0,01831	0,001145		
Toplam	17	0,15400			
Terim	Katsayı	Standart Hata	T-Değeri	P-Değeri	Varyans Faktörü
Model	0,9985	0,0917	10,89	0,000	1,00



Şekil 12:

a) Kaplama tabakasının seyreltmesi ile birleştirilmiş parametre arasındaki korelasyon, **b)** Artık diyagramı.

Tablo 12. Seyreltme için varyans analizi

Varyans Kaynağı	DF	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Regresyon	1	0,46281	0,462808	369,48	0,000
Model	1	0,46281	0,462808	369,48	0,000
Hata	16	0,02004	0,001253		
Toplam	17	0,48285			
Terim	Katsayı	Katsayının Standart Hatası	T-Değeri	P-Değeri	Varyans Enflasyon Faktörü
Model	0,9927	0,0516	19,22	0,000	1,00

Tüm birleştirilmiş parametreler ve regresyon katsayıları elde edilmiştir. Ayrıca, kaplama tabakalarının geometrik boyutları ile birleştirilmiş parametreler arasındaki doğrusal ilişkiye ait katsayılar Tablo 13'te sunulmaktadır.

Tüm geometrik kaplama özellikleri, birleştirilmiş parametrelerle yüksek korelasyon katsayısı (>0,95) değerleri göstermektedir.

Tablo 13. Tek kaplamaların ölçülen geometrik özellikleriyle en iyi korelasyonu temsil eden tahmini birleşik parametreler

Bağımlı deneysel yanıt (y)	Birleşik Parametre (x)	R	A	B
h	16,07(PFD) ^{0,89} (SED) ^{0,16}	0,98	1.0053	0,0304
b	4,1x10 ⁻⁴ (PFD) ^{-0,38} (SED) ^{1,67}	0,98	1.0039	0,0023
w	0,82(PFD) ^{-0,16} (SED) ^{0,28}	0,96	0,9985	0,0046
D	1,2x10 ⁻⁶ (PFD) ^{-1,42} (SED) ^{2,81}	0,97	0,9927	0,0048

R korelasyon katsayısıdır, a ve b doğrusal ilişkidenden elde edilen sabitlerdir: $y = ax + b$

4. SONUÇ

Bu çalışmada, AISI 1050 alt tabaka üzerindeki Inconel 718 kaplamaların geometrik özellikleri üzerinde SS, LP ve PF gibi işlem parametrelerinin etkisi analiz edilmiştir. Elde edilen geometrik özelliklerin analizinden sonra, bu özelliklerin işlem parametrelerindeki değişimlere göre davranışı, varyans analizi (ANOVA) kullanılarak etkili bir şekilde tahmin edilmiştir. İşlem parametrelerinin kaplamaların geometrik özellikleri üzerindeki etkisi kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Bu çalışmadan elde edilen en önemli bulgular aşağıdaki gibidir:

LP ve PF sabit kaldığında, SS'nin artırılması parça yüksekliğinde anlamlı bir azalmaya yol açmaktadır. Bunun yanı sıra, PF'nin artırılması, LP ve SS sabit tutulduğunda dahi parça yüksekliğinin artmasını sağlamaktadır. Parça yüksekliği üzerindeki etkileri açısından işlem değişkenlerinin sıralaması şu şekildedir: SS (%77), LP (%8) ve PF (%7). Test sonuçları, LP'nin artırılmasının parça genişliğinde bir artışa neden olduğunu göstermektedir. Ayrıca, SS'nin azaltılması, lazerin malzemeye temas süresini uzatarak parçanın genişlemesine yol açmaktadır. PF'deki değişikliklerin parça genişliği üzerinde kayda değer bir etkisi bulunmamaktadır. Parça genişliği üzerindeki etkinlik sıralaması ise SS (%40), LP (%18) ve PF (%8) olarak belirlenmiştir.

Penetrasyon derinliği, artan PF ve LP ile birlikte azalma göstermektedir. Öte yandan, artan SS ile penetrasyon derinliğinde önemli bir değişiklik gözlenmemiştir. Etkinlik sırasına göre, penetrasyon derinliğini belirleyen proses değişkenleri LP (%53), PF (%34) ve SS (%8) olarak sıralanmaktadır.

Seyreltme oranı, SS arttıkça artış göstermiştir. SS, iz yüksekliğini penetrasyon derinliğinden daha fazla etkilemektedir. Seyreltme yüzdesi, LP yükseltildiğinde doğrudan artış göstermiştir. LP'nin, SS ve PF'ye kıyasla (%6) daha yüksek bir seyreltme etkisine (%55) sahiptir.

ANOVA sonuçlarına göre, SS'nin kaplama yüksekliği (%77) ve genişliği (%40) üzerinde en kritik etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

Kaplama derinliği açısından, hem LP (%54) hem de PF (%34) kritik öneme sahiptir; çünkü bu parametreler alt tabaka üzerindeki özgül enerji yoğunluğunu doğrudan etkilemektedir.

PFD ve SED'nin kaplama geometrisi üzerindeki etkisi, doğrusal bir istatistiksel model kullanılarak analiz edilmiştir. Rastgele dağılım gösteren kalıntılar ve yüksek korelasyon katsayısı ($R^2 = 0,95$), lazer kaplama izlerinin fiziksel özellikleri ile birleşik işlem parametreleri arasında güçlü bir ilişki olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, doğrusal istatistiksel modellerin geçerliliğini desteklemektedir.

Sonuç olarak, tepki yüzeyi yaklaşımına dayanan önerilen model, lazer kaplama sürecinde yüksek güvenilirlik ve uygunluk sergilemektedir. Modelin bir CNC lazer kaplama makinesine entegre edilmesi, şekil faktörü ve kaplama geometrisinin tahmin edilmesinde ve seri üretimde süreç parametrelerinin kontrol edilmesinde önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu model, ürünün şekil ve seyreltme kontrolünün belirtilen gereksinimlere uyum göstermesini potansiyel olarak sağlayarak hem ham madde kullanımında hem de işlem süresinde azalma sağlayabilir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar

YAZAR KATKISI

Çalışmanın yazarlarından Ali ARI çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, veri analizi ve yorumlama ayrıca eleştirel inceleme ve makale yazımı aşamalarında, katkı sağlamıştır. Çalışmanın son onay ve tam sorumluluğunu tüm yazarlar üstlenmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Ostim Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu Tarafından Desteklenmiştir. Proje Numarası: BAP202316

KAYNAKLAR

1. Alizadeh-Sh, M., Marashi, S. P. H., Ranjbarnodeh, E., Shoja-Razavi, R. ve Oliveira, J. P. (2020). Prediction of solidification cracking by an empirical-statistical analysis for laser cladding of Inconel 718 powder on a non-weldable substrate. *Optics & Laser Technology*, 128, 106244. <https://doi.org/10.1016/J.OPTLASTEC.2020.106244>
2. Ari, A. (2024). Comprehensive analysis of morphology, microstructure, and mechanical characterization of parameters in the Inconel 718 laser cladding process on AISI 1050. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 238(22), 10772–10784. <https://doi.org/10.1177/09544062241277732>
3. Ari, A., Karagöz, T., Arslan, O. ve Bayram, A. (2023). AISI 1050 çeliği üzerine Inconel 718 lazer dolgu kaynağının morfolojisi, mikroyapısı ve mekanik karakterizasyonu. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 28(2), 613–630. <https://doi.org/10.17482/uumfd.1228584>
4. Barekat, M., Shoja Razavi, R. ve Ghasemi, A. (2016). Nd:YAG laser cladding of Co-Cr-Mo alloy on γ -TiAl substrate. *Optics and Laser Technology*, 80, 145–152. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.01.003>
5. Bhaduri, A. K., Indira, R., Albert, S. K., Rao, B. P. S., Jain, S. C. ve Asokkumar, S. (2004). Selection of hardfacing material for components of the Indian Prototype Fast Breeder Reactor. *Journal of Nuclear Materials*, 334(2–3), 109–114. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2004.05.005>
6. Bloemer, P. R. A., Pacheco, J. T., Cunha, A., Veiga, M. T., Filho, O. C. d. M., Meura, V. H. ve Teixeira, M. F. (2022). Laser cladding of Inconel 625 on AISI 316L: microstructural and mechanical evaluation of parameters estimated by empirical-statistical model. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31(1), 211–220. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06147-8>
7. Chen, C., Zeng, X., Wang, Q., Lian, G., Huang, X. ve Wang, Y. (2020). Statistical modelling and optimization of microhardness transition through depth of laser surface hardened AISI 1045 carbon steel. *Optics and Laser Technology*, 124, 105976. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.105976>
8. Corbin, D. J., Nassar, A. R., Reutzel, E. W., Beese, A. M. ve Michaleris, P. (2018). Effect of substrate thickness and preheating on the distortion of laser deposited Ti-6Al-4V. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 140(6), 1–9. <https://doi.org/10.1115/1.4038890>

9. de Oliveira, U., Ocelik, V. ve De Hosson, J. T. M. (2005). Analysis of coaxial laser cladding processing conditions. *Surface and Coatings Technology*, 197(2–3), 127–136. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.06.029>
10. Erfanmanesh, M., Abdollah-Pour, H., Mohammadian-Semnani, H. ve Shoja-Razavi, R. (2017). An empirical-statistical model for laser cladding of WC-12Co powder on AISI 321 stainless steel. *Optics and Laser Technology*, 97, 180–186. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.06.026>
11. Ermergen, T. ve Taylan, F. (2024). Investigation of DOE model analyses for open atmosphere laser polishing of additively manufactured Ti-6Al-4V samples by using ANOVA. *Optics & Laser Technology*, 168, 109832. <https://doi.org/10.1016/J.OPTLASTEC.2023.109832>
12. Goodarzi, D. M., Pekkarinen, J. ve Salminen, A. (2017). Analysis of laser cladding process parameter influence on the clad bead geometry. *Welding in the World*, 61(5), 883–891. <https://doi.org/10.1007/s40194-017-0495-0>
13. Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E. ve Emmelmann, C. (2016). Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, 117, 371–392. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>
14. Huebner, J., Rutkowski, P., Kata, D. ve Kusiński, J. (2017). Microstructural and mechanical study of Inconel 625-Tungsten Carbide composite coatings obtained by powder laser cladding. *Archives of Metallurgy and Materials*, 62(2), 531–538. <https://doi.org/10.1515/amm-2017-0078>
15. Ilanlou, M., Shoja Razavi, R., Nourollahi, A., Hosseini, S. ve Haghighat, S. (2022). Prediction of the geometric characteristics of the laser cladding of Inconel 718 on the Inconel 738 substrate via genetic algorithm and linear regression. *Optics & Laser Technology*, 156, 108507. <https://doi.org/10.1016/J.OPTLASTEC.2022.108507>
16. Jelvani, S., Shoja Razavi, R., Barekat, M. ve Dehnavi, M. (2020). Empirical-Statistical modeling and prediction of geometric characteristics for laser-aided direct metal deposition of Inconel 718 superalloy. *Metals and Materials International*, 26(5), 668–681. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00355-7>
17. Lee, E. M., Shin, G. Y., Yoon, H. S. ve Shim, D. S. (2017). Study of the effects of process parameters on deposited single track of M4 powder based direct energy deposition. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 31(7), 3411–3418. <https://doi.org/10.1007/s12206-017-0239-5>
18. Muvvala, G., Mullick, S. ve Nath, A. K. (2020). Development of process maps based on molten pool thermal history during laser cladding of Inconel 718/TiC metal matrix composite coatings. *Surface and Coatings Technology*, 399, 126100. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126100>
19. Nabhani, M., Razavi, R. S. ve Barekat, M. (2018). An empirical-statistical model for laser cladding of Ti-6Al-4V powder on Ti-6Al-4V substrate. *Optics and Laser Technology*, 100, 265–271. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.10.015>
20. Ning, J., Zhang, H. B., Chen, S. M., Zhang, L. J. ve Na, S. J. (2021). Intensive laser repair through additive manufacturing of high-strength martensitic stainless steel powders (I) – powder preparation, laser cladding and microstructures and properties of laser-cladded metals. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 5746–5761. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2021.10.109>
21. Onwubolu, G. C., Davim, J. P., Oliveira, C. ve Cardoso, A. (2007). Prediction of clad angle in laser cladding by powder using response surface methodology and scatter search. *Optics and Laser Technology*, 39(6), 1130–1134. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2006.09.008>

22. Saboori, A., Aversa, A., Marchese, G., Biamino, S., Lombardi, M. ve Fino, P. (2019). Application of directed energy deposition-based additive manufacturing in repair. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(16). <https://doi.org/10.3390/app9163316>
23. Sciammarella, F. M. ve Najafabadi, B. S. (2018). Processing parameter doe for 316l using directed energy deposition. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2(3). <https://doi.org/10.3390/jmmp2030061>
24. Seede, R., Mostafa, A., Brailovski, V., Jahazi, M. ve Medraj, M. (2018). Microstructural and microhardness evolution from homogenization and hot isostatic pressing on selective laser melted Inconel 718: structure, texture, and phases. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2(2). <https://doi.org/10.3390/jmmp2020030>
25. Shayanfar, P., Daneshmanesh, H. ve Janghorban, K. (2020). Parameters optimization for laser cladding of Inconel 625 on ASTM A592 steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(4), 8258–8265. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.05.094>
26. Shi, S., Xu, A., Fan, J. ve Wei, H. (2012). Study of cobalt-free, Fe-based alloy powder used for sealing surfaces of nuclear valves by laser cladding. *Nuclear Engineering and Design*, 245, 8–12. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2012.01.015>
27. Shi, X., Ma, S., Liu, C. ve Wu, Q. (2017). Parameter optimization for Ti-47Al-2Cr-2Nb in selective laser melting based on geometric characteristics of single scan tracks. *Optics and Laser Technology*, 90, 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.11.002>
28. Sun, Y. ve Hao, M. (2012). Statistical analysis and optimization of process parameters in Ti6Al4V laser cladding using Nd:YAG laser. *Optics and Lasers in Engineering*, 50(7), 985–995. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2012.01.018>
29. Tabernero, I., Lamikiz, A., Martínez, S., Ukar, E. ve Figueras, J. (2011). Evaluation of the mechanical properties of Inconel 718 components built by laser cladding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51(6), 465–470. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.02.003>
30. Thawari, N., Gullipalli, C., Katiyar, J. K. ve Gupta, T. V. K. (2021). Effect of multi-layer laser cladding of Stellite 6 and Inconel 718 materials on clad geometry, microstructure evolution and mechanical properties. *Materials Today Communications*, 28, 102604. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102604>
31. Twomey, P. J. ve Kroll, M. H. (2008). How to use linear regression and correlation in quantitative method comparison studies. *International Journal of Clinical Practice*, 62(4), 529–538. <https://doi.org/10.1111/j.1742-1241.2008.01709.x>
32. Wang, C., Zhou, J., Zhang, T., Meng, X., Li, P. ve Huang, S. (2022). Numerical simulation and solidification characteristics for laser cladding of Inconel 718. *Optics & Laser Technology*, 149, 107843. <https://doi.org/10.1016/J.OPTLASTEC.2021.107843>
33. Wolff, S. J., ve diğ. (2019). Experimentally validated predictions of thermal history and microhardness in laser-deposited Inconel 718 on carbon steel. *Additive Manufacturing*, 27, 540–551. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.03.019>
34. Yilbas, B. S., Akhtar, S. S. ve Karatas, C. (2010). Laser surface treatment of Inconel 718 alloy: thermal stress analysis. *Optics and Lasers in Engineering*, 48(7–8), 740–749. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2010.03.012>
35. Zhai, L. L., Ban, C. Y. ve Zhang, J. W. (2019). Investigation on laser cladding Ni-base coating assisted by electromagnetic field. *Optics & Laser Technology*, 114, 81–88. <https://doi.org/10.1016/J.OPTLASTEC.2019.01.017>
36. Zhong, C., Liu, J., Zhao, T., Schopphoven, T., Fu, J., Gasser, A. ve Schleifenbaum, J. H. (2020). Laser metal deposition of Ti6Al4V—a brief review. *Applied Sciences*, 10(3), 764. <https://doi.org/10.3390/APP10030764>