BİDGE Yayınları

Malzeme ve Metalurji Mühendisliği Alanında Farklı Yaklaşımlar

Editör: Doç. Dr. Nürettin AKÇAKALE

ISBN: 978-625-6707-25-2

1. Baskı
Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL
Yayınlama Tarihi: 25.12.2023
BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374
Yayın hakları © BİDGE Yayınları
www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com
Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.
Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya / Ankara

ÖNSÖZ

İnsanoğlu; tarihi boyunca karşılaşılan her problemden çıkarımlar yaparak yaşam kalitesini sürekli iyileştirmeyi başararak günümüze kadar gelmiştir.

Hayatın her alanında yaşam standardımızı kaliteli hale getiren malzemelerin gelişimi ve değişimi metalürji ve malzeme mühendisliğindeki gelişmelerle paralellik arz etmektedir.

Metalürji ve malzeme mühendisliği; tüm malzemelerin üretim şartlarına bağlı olarak değişen özellikleri arasındaki ilişkiyi belirleyen disiplinler arası bir bilim dalı ve mühendislik uygulaması olup tüm mühendislik dallarını kapsamaktadır.

Metalürji ve malzeme mühendisliğinin kapsamı oldukça geniştir. Bilim insanları dünyanın dört bir tarafında farklı üretim yöntemleri ile; kompozit malzemeler, nano malzemeler, süper iletken malzemeler, organik malzemeler, elastomerler, biyo malzemeler, polimerik malzemeler ve endüstriyel seramik malzemeler vb. çeşitli alanlarda üstün özellikli malzemeler geliştirmek için araştırmalar yapmaktadırlar.

Günlük hayatta yaşamımızı kolaylaştırmak için kullandığımız hemen bütün teknolojik araçları oluşturan elemanların ana malzemeleri birbirinden farklı fiziksel, kimyasal, mekaniksel, termal, akustik vb özellikler taşır.

Her türlü araç, gereç ve cihaz parçalarına ait malzemelerin üretimi metalürji ve malzeme mühendisliğinin alanıdır.

Malzeme ve metalurji mühendisleri; gıda, sağlık, otomotiv, kimya, savunma, ağır sanayi, tekstil, biyoteknoloji, tarım, hayvancılık, inşaaat, enerji, haberleşme, havacılık ve uzay sanayi vb diğer sektörlerin ihtiyaç duyduğu üstün performanslı ürünlerin üretilmesi ve geliştirilmesi çalışmaları yaparlar.

Mühendislik biliminin farklı alanlarından bölümlerin yer aldığı kitabımızda, birbirinden değerli hocaların güncel mühendislik araştırmaları yer almaktadır.

Malzeme ve Metalurji Mühendisliği Alanında Farklı Yaklaşımlar Kitabının ortaya çıkmasına, değerli çalışmalarıyla katkı sağlayan kıymetli yazarlarımıza teşekkür ederiz.

Çalışmaların, gelecekteki çalışmalara ışık tutması ve mühendislik biliminin gelişimine katkı sağlaması en içten temennimizdir.

Editor

Doç. Dr. Nürettin AKÇAKALE

BÖLÜM I

CoCr Alaşımının Slm ile Üretim Parametrelerinin Mikroyapı Üzerine Etkisi

Mertcan KIRAÇ
İdris GÖKALP
Yasemin Yıldıran AVCU
Rıdvan YAMANOĞLU

Giriş

Son yıllarda karmaşık şekilli parça üretimine imkân tanıyan eklemeli imalat (Eİ) yöntemleri dikkat çeker hale gelmiştir (Başçı & Yamanoğlu, 2019). Hızlı prototipleme olarak da bilinen eklemeli imalat yöntemlerinin uzay, havacılık, otomotiv gibi endüstriyel ve özellikle biyomedikal uygulamalardaki kullanımı giderek artmıştır (Gu ve ark., 2012). Döküm ve dövme gibi geleneksel üretim yöntemleri ile karşılaştırıldığında üretim sonrası talaş kaldırma, kaynak veya perçinleme gibi ikincil işlemlere ihtiyaç duyulmaması eklemeli imalat yöntemlerine olan ilginin artmasına neden olmuştur (Başçı & Yamanoğlu, 2022, Özer, 2020). Diğer yandan spesifik parça üretimi, tasarım serbestliği, kalıba ihtiyaç duyulmaması ve

stok ihtiyacının olmaması gibi avantajlar günümüzde Eİ teknolojilerini geleneksel üretim yöntemlerine üstün kılar hale getirmiştir. (Despeisse & Ford, 2015, Mellor, Hao & Zhang, 2014).

Eİ teknolojilerinde hammadde olarak genellikle malzemelerin toz formu kullanılmaktadır. Eİ teknolojisi toz halindeki malzemenin tabla üzerine serilmesi ve yüksek enerjili bir ısı kaynağı ile katman katman parçanın inşa edilmesine dayanan modern bir üretim sürecidir. (Praveena ve ark., 2022). Eİ seçici lazer sinterleme (SLS), elektron ışın ergitme (EBM) ve seçici lazer ergitme (SLM) gibi üretim yöntemlerini kapsamaktadır (Başçı & Yamanoğlu, 2022, Razavykia ve ark., 2020, Akyıldız ve ark., 2023). Spesifik ve karmaşık iç yapılara sahip parça üretimlerinde yaygın olarak SLM yöntemi kullanılmaktadır (Özer, 2020, Korkmaz ve ark., 2022). Üretimin hızlı ve boyutsal hassasiyetin daha yüksek olması SLM metodunu diğer Eİ yöntemlerinden ayırmıştır. SLM metodu ile en yaygın üretilen malzemelerden bazıları; Inconel, titanyum, paslanmaz çelik ve kobalt-krom alaşımlarıdır. (Poyraz & Kuşhan, 2017, Yamanoğlu, Bahador & Kondoh, 2021, Yap ve ark., 2015, Gökalp ve ark., 2023). Eİ yöntemleri ile malzeme üretimi için üretim parametrelerinin optimzasyonu kritik bir öneme sahip olmuştur (Poyraz & Kuşhan, 2017). SLM ile eklemeli imalata yönelik parça üretiminde proses optimizasyonu için daha çok LED (Lazer Enerji Yoğunluğu, P/v.h.d) değerinin belirlenmesi ile gerçekleştirilmektedir. Lazer gücü P [W], tarama hızı v [mm s^{-1}], lazer taraması arasındaki mesafe h [mm] ve katman kalınlığı d [mm] gibi dört ana parametre hacim enerjisi olarak da adlandırılan [$J.mm^{-3}$] değerinin elde edilmesinde kullanılmaktadır. LED değerinin yoğunlaştırma süreciyle doğrudan ilişkili olduğu, yoğunluk ve gözeneklilik oranı gibi değerlerin belirlenmesinde kritik bir öneme sahip olduğu bilinmektedir (Kusuma ve ark., 2017, Aboulkhair ve ark., 2014).

Bu çalışmada eklemeli imalat yöntemlerinden SLM metodu ile üretilen CoCr alaşımlarında farklı üretim parametrelerinin yoğunluk ve mikroyapı üzerine etkisi incelenmiştir. Üretilen CoCr

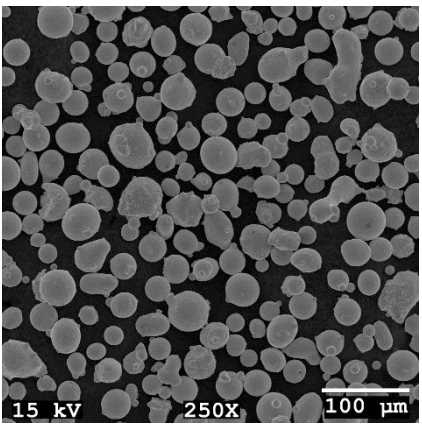
alaşımlarının mikroyapısal karakterizasyonu yapılarak LED değerinin etkisi detaylı bir şekilde irdelenmiştir.

Deneysel Çalışma

Bu çalışmada Tablo 1'de verilen CoCr alaşımı kullanılmıştır. CoCr alaşımı toz formunda temin edilmiş ve ilk olarak taramalı elektron mikroskobu (SEM, Jeol 6060) ile incelenmiştir. Şekil 1'de yer alan SEM görüntüsü hem şekil hem de boyut olarak SLM yöntemine uygun gözükmektedir.

Tablo 1. CoCr alaşımının kimyasal kompozisyonu

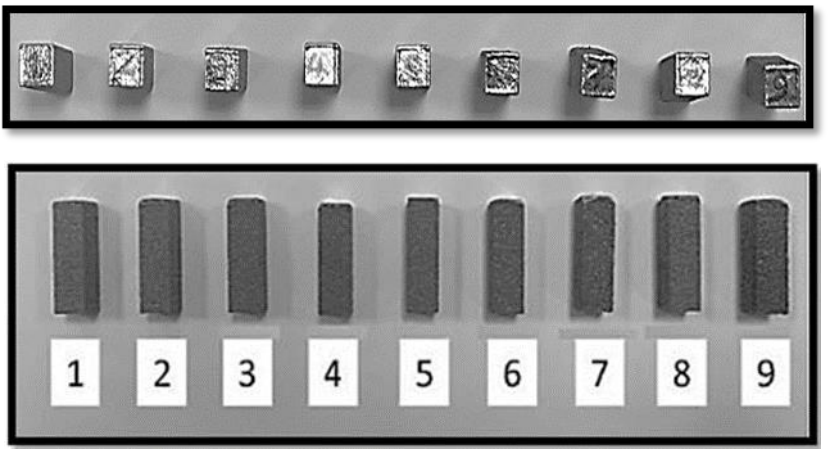
Element	Co	Cr	Mo	C	Ni	Fe	Mn	Si
%	Kalan	27,0-30	5-7	<0,35	<0,50	<0,75	<1	<1



Şekil 1. CoCr tozunun SEM görüntüsü

Şekil 1'de yer alan CoCr alaşım tozlarından numuneler Enavision marka ERMAKSAN firması tarafından geliştirilen SLM cihazında üretilmiştir. Üretim için numune ölçüleri 10x10x30mm olarak belirlenmiştir (Şekil 2). Üretim sonrasında ilk olarak numunelerin

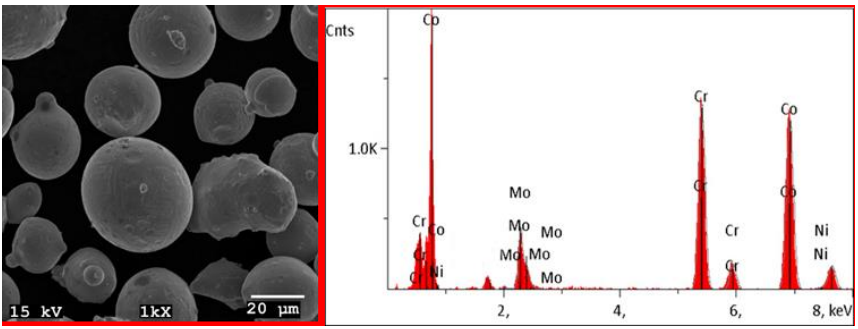
yoğunlukları ölçülmüştür. Ardından numuneler metalografik olarak hazırlanmıştır. 320, 600, 1000 ve 2500 grid SiC zımparalama işlemlerinden sonra numuneler dağlama işlemi sırasıyla 9µ ve 3µ elmas solüsyonları ile parlatılmıştır. Numuneler 60 ml H_2SO_4 ve 10 ml HCl çözeltisinde 8V ve 45 s süre elektrolitik olarak dağlanmıştır. Mikroyapıların görüntülenmesi için Olympus BX41M-LED marka optik mikroskop kullanılmıştır.



Şekil 2. SLM ile üretilen numunelerin makro görüntüleri

Sonuçlar ve Tartışma

Çalışmada kullanılan alaşımın kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir. Tozların SEM ile incelenmesi sırasında EDX analizi yapılarak sonuçlar teyit edilmiştir (Şekil 3). SEM görüntülerinden tozların yüzey karakteristikleri ve mikroyapıları da net bir şekilde anlaşılabilmektedir. Tozların üretim sürecinde oksitlenmediği görülmüştür. Yüzeylerin pürüzsüz ve mikroyapısı izlenebilen tozlar yüksek saflıkta olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 3. CoCr tozunun SEM görüntüsü ve EDX analizi

CoCr alaşım tozları Tablo 2'de verilen parametrelere göre SLM yöntemi ile üretilmiştir. Lazer gücü sabit tutulurken (350 W) lazer tarama hızı değiştirilmiş (450-125 mm/s) ve değişen LED değerleri belirlenmiştir.

Tablo 2. CoCr alaşımının SLM ile üretiminde kullanılan parametreleri

Numune No	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Lazer Gücü (W)	350	350	350	350	350	350	350	350	350
Lazer Tarama Hızı (mm/s)	450	400	350	300	250	200	175	150	125
LED Değeri (J/mm)	0,78	0,88	1,00	1,17	1,40	1,75	2,00	2,33	2,80

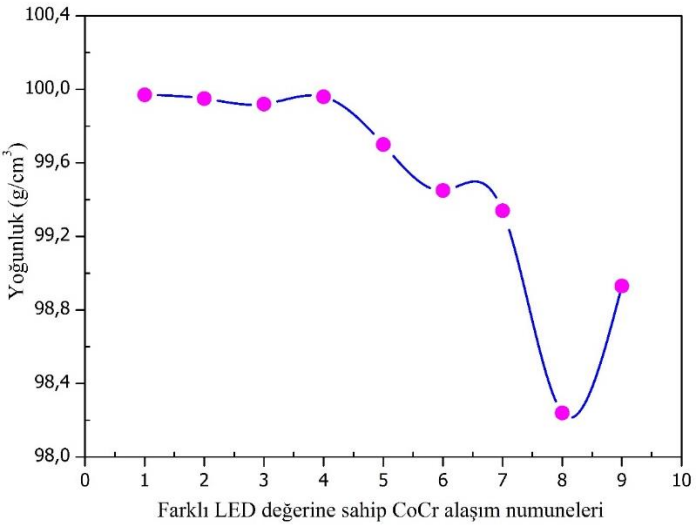
Tablo 2'de verilen üretim parametrelerine göre doğal olarak en düşük LED değeri (0,78 j/mm) 1 numaralı numuneye ait iken en

yüksek LED değeri (2,80 J/mm) 9 numaralı numuneye ait olmuştur. Tozların katman kalınlığı ise 30 µm olarak seçilmiştir. LED değerleri numunelerin yoğunlukları üzerinde etkin rol oynamaktadır. Tablo 3'de numunelerin farklı LED değerine göre elde edilen yoğunlukları verilmiştir. Diğer yandan yoğunlukların net bir şekilde anlaşılabilmesi için yoğunluk değerleri Şekil 4'te gösterildiği gibi grafik haline getirilmiştir.

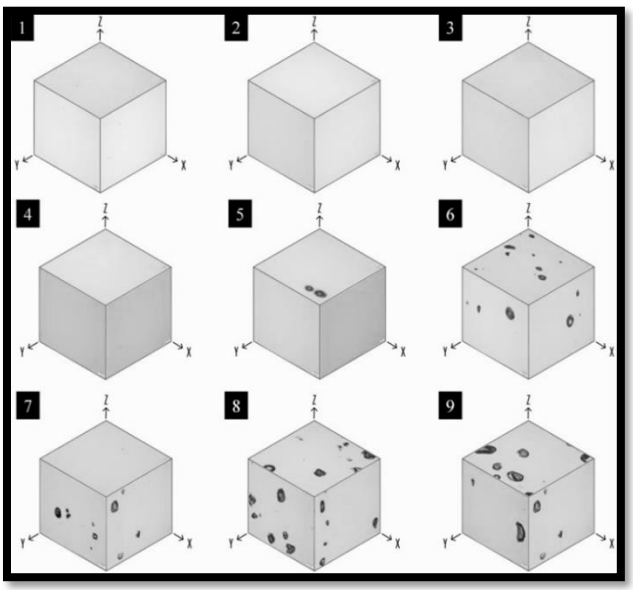
Tablo 3. SLM metodu ile üretilen numunelerin yoğunluk değerleri

Numune	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Relatif Yoğunluk (%)	99,97	99,95	99,95	99,96	99,70	99,45	99,34	98,24	98,93

Şekil 4'te %99,97 ile en yüksek yoğunluk değerinin 1 nolu numuneye ait olduğu görülmektedir. Buna rağmen 6 nolu numunenin LED değerinden sonra yoğunlukta hafif azalma görülmektedir. Artan LED değeri ile malzeme derinliklerine doğru etkileşim artmakta, tekrar ergime ve katılaşma süreçleri nedeniyle mikroyapıda gözenekler oluşmaya başlamaktadır. SLM yönteminin doğası gereği hızlı ergime ve katılaşma mikroyapıdaki çözünmüş gaz oranını doğrudan etkilemektedir. Yüksek tarama hızlarında hızlı ergime ve katılaşma meydana geldiğinden dolayı yapı içerisinde çözünmüş gaz oranı düşük seviyede kalmaktadır. Ancak diğer yandan düşük tarama hızlarında ise katılaşmanın gecikmesi ile yapı içerisinde çözünmüş gaz birikmektedir (Snell ve ark., 2020). Biriken çözünmüş gaz poroziteye neden olmaktadır. Bundan dolayı diğer numunelerde de görüldüğü gibi yoğunluk değerlerinde azalma meydana gelmiştir.

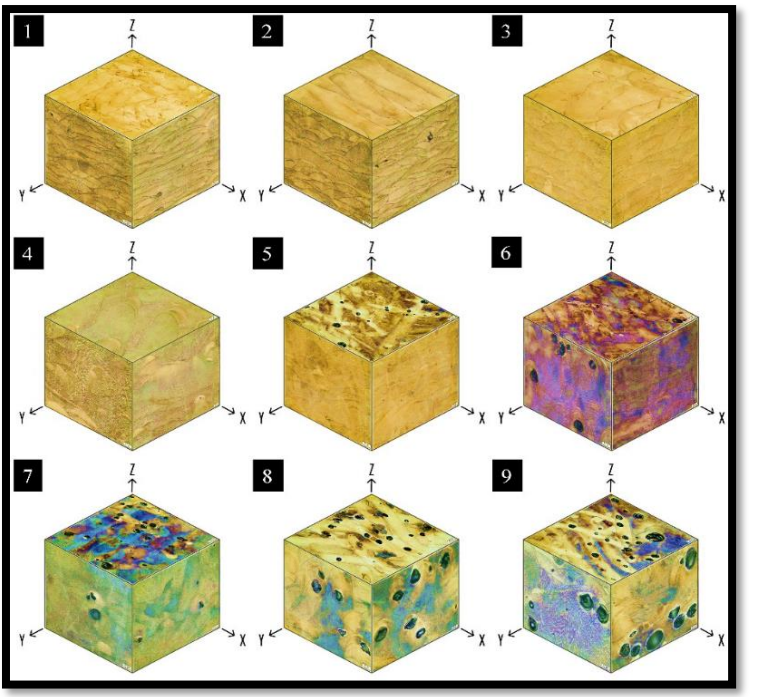


Şekil 4. SLM metodu ile üretilen numunelerin yoğunluk değerleri



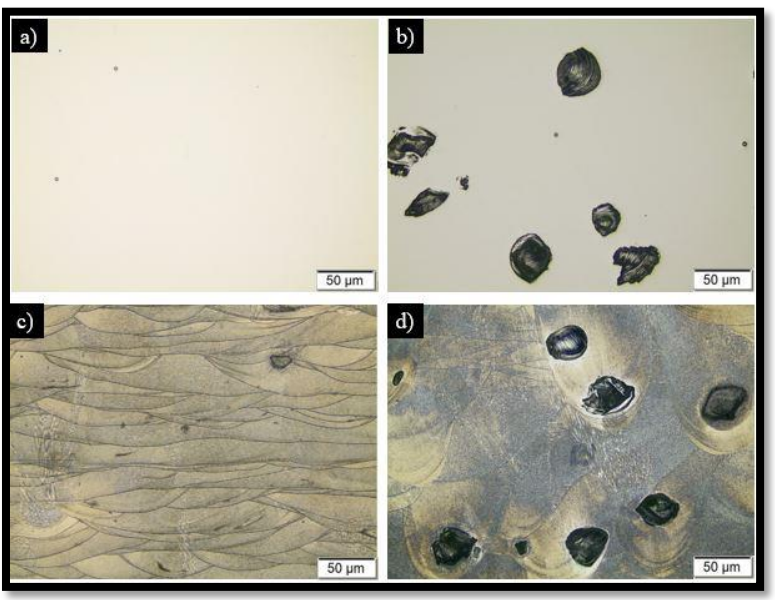
Şekil 5. SLM metodu ile üretilen numunelerin parlatılmış konumdaki optik mikroskop görüntüleri

Üretim parametrelerinin yoğunluk ve mikroyapıya etkisi sırasıyla Şekil 5 ve Şekil 6'da parlatılmış ve dağlanmış konumdaki optik mikroskop görüntülerinde ortaya konmuştur. 0,78 LED değeri ile en yüksek yoğunluğa sahip 1 nolu numunenin olduğu görülmektedir. Diğer yandan 2, 3 ve 4 nolu numunelerinde yüksek yoğunlukta olduğu tespit edilmiştir. 1,40 ve üzerindeki LED değeri ve 250 mm/s ve altındaki tarama hızlarında üretilen numunelerde makro boyutta porozitelerin oluştuğu görülmektedir. Bu porozitelerin oluşması doğrudan yapı içerisindeki çözünmüş gazlardan kaynaklanmaktadır. Eklemeli imalat yöntemleri geleneksel üretim yöntemlerine göre her ne kadar üstün bir performans sergilemiş olsa da özelikle SLM metodunda karşılaşılan en büyük kusurlardan biri de gözenekliliktir (Liu ve ark., 2022).



Şekil 6. SLM metodu ile üretilen numunelerin dağlanmış konumdaki optik mikroskop görüntüleri

SLM metodu ile üretilen numunelerde LED değerinden dolayı füzyon eksikliği (lack of fusion) ve anahtar deliği (keyhole) gözenekliliği gibi üretim kusurları ile karşılaşılmaktadır. Füzyon eksikliği düşük veya yetersiz LED değerinden kaynaklanırken anahtar deliği gözenekliliği ise yüksek LED değerinden kaynaklanmaktadır (Shi ve ark., 2020). Bu çalışmamızda en belirgin kusurun anahtar deliği gözenekliliği olduğu tespit edilmiştir. Yani 1,40 ve üzerindeki lazer gücü yüksek enerji yoğunluğuna neden olmuştur. Dolayısıyla hızlı ergime ve katılaşma sonrasında oluşan gaz kabarcıkları yüzeyin hemen altında sıkışmıştır ve gözenekli bir yapının oluşmasına neden olmuştur. Kavitasyon olarak da adlandırılan bu kusur malzemelerin mekanik özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Üretim kusurlarının bir diğer kaynağı olan tarama hızında ise genellikle buharlaşma ve sıçrama nedeniyle kusurlar meydana gelmektedir.



Şekil 7. SLM metodu ile üretilen en yoğun(1 nolu, a,c) ve en düşük yoğunluktaki (8 nolu, b,d) numunelerin parlatılmış ve dağlanmış konumdaki optik mikroskop görüntüleri

SLM CoCr alaşımlarında üretim parametrelerinin mikroyapıya etkisinin net bir şekilde ortaya konması için Şekil 7'de sırasıyla en yüksek ve en düşük yoğunluktaki 1 ve 8 nolu numuneler karşılaştırılmıştır. Tablo 2'de 1 ve 8 nolu numunelerin sırasıyla 0,78 ve 2,33 LED değerinde üretildiği gösterilmiştir. Görüldüğü gibi Şekil 7 a ve c en yüksek yoğunluktaki 1 nolu numuneyi ifade ederken Şekil 7 b ve d en düşük yoğunluktaki 8 nolu numuneyi temsil etmektedir. 1 nolu numune 450 mm/s ile en yüksek tarama hızı ile üretilirken 8 nolu numune ise 150 mm/s tarama hızı ile üretilmiştir. SLM metodu katman katman hızlı ergime ve katılaşma prensibine dayandığı için yüksek tarama hızında üretilen 1 nolu numunede az oranda gözeneklilik meydana gelmiştir. Yüksek tarama hızı yapı içerisinde çözünmüş gaz birikimini engelleyerek yüksek yoğunlukta numune üretimine doğrudan etki etmiştir. Shrestha ve ark. SLM metodu ile numune üretiminde üretim parametrelerinin mikroyapı üzerine etkisini araştırmışlardır. Sırasıyla 175, 200, 250 ve 300 mm/s tarama hızlarında numune üretimleri gerçekleştirilmiştir. Mikroyapısal karakterizasyonu sonucunda en düşük porozite oranının 300 mm/s hızında üretilen numunede olduğu görülmüştür (Shrestha & Chou, 2020). 8 nolu numunede ise 150 mm/s gibi düşük tarama hızı yavaş katılaşmaya ve dolayısıyla yapı içerisinde çözünmüş gazın birikmesine neden olmuştur. Anahtar deliği olarak da adlandırılan keyhole gözenekliliği yapı içerisinde bir kusur olarak karşımıza çıkmıştır.

SONUÇ

CoCr tozundan SLM metodu ile farklı üretim parametrelerinde numune üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretim parametrelerinin mikroyapı ve yoğunluğa etkisi tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilmektedir;

- 9 adet olarak gerçekleştirilen numunelerden 1 nolu numunenin 350 W lazer gücü, 450 mm/s tarama hızı ve 0,78 LED değeri ile en yoğun numune olduğu görülmüştür. Diğer yandan 1,40

ve üzerindeki LED değerlerinde mikroyapıda çözünmüş gazın birikmesinden dolayı yoğunluk azalmıştır.

- SLM metodunda yaygın olarak füzyon eksikliği ve çözünmüş gazın birikmesinden dolayı keyhole olarak adlandırılan anahtar deliği gözenekliliği gibi kusurlar tespit edilmiştir.
- Füzyon eksikliği kusuru düşük LED değerinde meydana gelirken, anahtar deliği kusuru ise daha çok yüksek LED değerinde üretilen numunelerde görülmüştür.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir (Proje No: SAYEM 121D015).

KAYNAKÇA

Aboulkhair, N. T., Everitt, N. M., Ashcroft, I., & Tuck, C. (2014). Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting. *Additive manufacturing*, *1*, 77-86.

Akyıldız, Y., S, Serdar., Kaya, O. F., & Yamanoğlu, R. (2023). Ultrasonik Atomizasyon: Toz Üretiminde Alternatif Bir Yol. İ*malat Teknolojileri Ve Uygulamaları, 4*(2), 81-91.

Başcı, U. G., & Yamanoğlu, R. (2019). Eklemeli metal imalat teknolojileri için metal tozu üretim yöntemleri. *Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi*, Kocaeli: Imascon.

Başcı, Ü. G., & Yamanoğlu, R. (2021). Yeni Nesil Üretim Teknolojisi: Fdm İle Eklemeli İmalat. *International Journal Of 3d Printing Technologies And Digital Industry*, 5*(*2), 339-352.

Başcı, Ü. G., & Yamanoğlu, R. (2022). Havuz Fotopolimerizasyonu (Hfp) İle Eklemeli İmalat. *Düzce Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi, 10*(2), 914-928.

Gökalp, İ., Kıraç, M., Avcu, E., & Yamanoğlu, R., (2023). Dental Uygulamalarda Kullanılan CoCr Alaşımının Tribolojik Özeliklerinin İncelenmesi. *Doğa ve Mühendislik Bilimlerinde Güncel Tartışmalar 12* (s.114-123). Ankara: Bidge 2023.

Korkmaz, M. E., Gupta, M. K., Robak, G., Moj, K., Krolczyk, G. M., & Kuntoğlu, M. (2022). Development of lattice structure with selective laser melting process: A state of the art on properties, future trends and challenges. *Journal of Manufacturing Processes*, *81*, 1040-1063.

Kusuma, C., Ahmed, S. H., Mian, A., & Srinivasan, R. (2017). Effect of laser power and scan speed on melt pool characteristics of commercially pure titanium (CP-Ti). *Journal of Materials Engineering and Performance*, *26*, 3560-3568.

Kruth J.P., Wang X., Laoui T., & Froyen L., (2003). Lasers and materials in selective laser sintering. *Assembly Automation, 23*(4), 357-371.

Liu, B., Fang, G., Lei, L., & Yan, X. (2022). Predicting the porosity defects in selective laser melting (SLM) by molten pool geometry. *International Journal of Mechanical Sciences*, *228*, 107478.

Mellor, S., Hao, L., & Zhang, D. (2014). Additive manufacturing: A framework for implementation. *International journal of production economics*, *149*, 194-201.

Özer, G. (2020). Eklemeli üretim teknolojileri üzerine bir derleme. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *9*(1), 606-621.

Poyraz, Ö., & Kuşhan, M. C. (2017). Metallerin lazer katmanlı imalatında farklı proses parametrelerin etkisinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, *33*(2), 729-742.

Praveena, B. A., Lokesh, N., Buradi, A., Santhosh, N., Praveena, B. L., & Vignesh, R. (2022). A comprehensive review of emerging additive manufacturing (3D printing technology): Methods, materials, applications, challenges, trends and future potential. *Materials Today: Proceedings*, *52*, 1309-1313.

Razavykia, A., Brusa, E., Delprete, C., & Yavari, R. (2020). An overview of additive manufacturing technologies—a review to technical synthesis in numerical study of selective laser melting. *Materials*, *13*(17), 3895.

Shi, J., Ma, S., Wei, S., Best, J. P., Stolpe, M., Beckmann, A., & Markert, B. (2020). 3D pore structure characterization and hardness in a powder bed fusion-processed fully amorphous Zr-based bulk metallic glass. *Materials Characterization*, *162*, 110178.

Shrestha, S., & Chou, K. (2021). An investigation into melting modes in selective laser melting of Inconel 625 powder: single track geometry and porosity. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *114*(11-12), 3255-3267.

Snell, R., Tammas-Williams, S., Chechik, L., Lyle, A., Hernández-Nava, E., Boig, C., & Todd, I. (2020). Methods for rapid pore classification in metal additive manufacturing. *Jom*, *72*, 101-109.

Tonelli, L., Fortunato, A., & Ceschini, L. (2020). CoCr alloy processed by Selective Laser Melting (SLM): Effect of Laser Energy Density on microstructure, surface morphology, and hardness. *Journal of Manufacturing Processes*, *52*, 106-119.

Yamanoğlu, R. (2011). Atomizasyon teknikleri ile toz üretimi, sinterlenmesi ve karakterizasyonu. *Koceli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.*

Yap, C. Y., Chua, C. K., Dong, Z. L., Liu, Z. H., Zhang, D. Q., Loh, L. E., & Sing, S. L. (2015). Review of selective laser melting: Materials and applications. *Applied physics reviews*, *2*(4).

Yilmaz O., & Ugla A2016A., (2016). Microstructure characterization of SS308LSi components manufactured by GTAW based additive manufacturing: shaped metal deposition using pulsed current arc, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 89* (1), 13-25.

.