



# ULUBORLU MESLEKİ BİLİMLER DERGİSİ (UMBD)

Uluborlu Journal of Vocational Sciences

<http://dergipark.gov.tr/umbd>

## BAĞLAYICI PÜSKÜRTMELİ EKLEMELİ İMALAT İLE İMAL EDİLEN PARÇALARIN BRONZ EMDİRİLEREK İÇYAPI ÖZELLİĞİNİN İNCELENMESİ

Özden Kor<sup>1</sup>, Mehmet Cengiz Kayacan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye.

\*Sorumlu Yazar: ozdenkor80@gmail.com

(Geliş/Received: 21.01.2022; Kabul/Accepted: 20.12.2022)

**ÖZET:** Bu çalışma, eklemeli imalat yöntemlerinden bağlayıcı püskürtmeli metal eklemeli imalat ile 316L toz malzemesinin iki farklı bağlayıcıya sahip deney numunelerinin mekanik dayanımı ve mikro içyapı incelemesini kapsamaktadır. Bağlayıcı püskürtmeli eklemeli imalat yöntemiyle farklı katman kalınları dikkate alınarak iki farklı bağlayıcının değişen bağlayıcı yüzdeleri ile metal tozlarının serilmesiyle silindirik numuneler imal edilmiştir. Çalışmada kullanılan iki farklı bağlayıcı şu şekildedir. İlk bağlayıcı, Stereolithography (SLA) reçine ve İzo Propil Alkol (IPA) metal tozlar üzerine püskürtülmesi ve Ultraviyole (UV) ışıkla kürlenmesidir. İkinci bağlayıcı ise, Para Toluene Sülfonik Asit (PTSA) metal tozlarıyla karıştırılmış ve üzerine Furfuril Alkol (FA) püskürtülmesiyle metal tozlarının bağlanması sağlanmıştır. Numunelerin ısıtma işlem öncesi ve sonrası özkütle ölçümleri yapılmıştır. Mekanik özellikleri belirlenmesi için mikro sertlik ölçümü ve basma testi uygulanmıştır. Elektron mikroskop (SEM) ve optik mikroskop ile numunelerin mikro içyapısı incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Eklemeli imalat, bağlayıcı püskürtme, bronz emdirme

## AN INTERNAL STRUCTURE PROPERTY INVESTIGATION OF BINDER JETTING ADDITIVE MANUFACTURING PRODUCTS BY BRONZE INFILTRATION

**ABSTRACT:** This study covers mechanical strength and microstructure of test specimens with two different binders of 316L powder material by binder jetting metal additive manufacturing that one of the additive manufacturing methods. Cylindrical specimens were produced by varying binder percentages of two different binders and spreading of metal powders by taking into account the different layer thicknesses by the binder additive manufacturing method. The two different binders used in the study are as follows. First binder, Stereolithography (SLA) resin and Iso Propyl Alcohol (IPA) are sprayed onto metal powders and cured by Ultraviolet (UV) light. Second binder, Para Toluene Sulfonic Acid (PTSA) was mixed with metal powders and the metal powders were bonded by spraying on Furfuryl Alcohol (FA). Before and after heat treatment of the samples, the density measurements were made. Micro hardness measurement and compression test were applied to determine the mechanical properties. Electron microscope (SEM) and optical microscope were used to examine the microstructure of the samples.

**Keywords:** Additive manufacturing, binder jetting, bronze infiltration

## 1. GİRİŞ

Geleneksel yöntemler, kesici aletlerle veya başka şekilde katı cisimden talaş ve malzeme kaldırma esasına dayanırken; Eklemeli İmalat, imal edilecek malzemenin katmanlar halinde birleştirilmesi esasına dayanır. Her bir katmanının düşey izdüşümünün sınırları içinde çeşitli yöntemlerle (yapıştırılarak, ergitilerek vb.) birleştirilmesini temel almaktadır [1,2].

Eklemeli imalat ile çok geniş bir malzeme yelpazesi içinde imalat yapılabilmektedir. İlk başta plastik tabanlı malzemeler olmak üzere metaller ve alaşımları (paslanmaz çelik, kobalt krom, titanyum vb.) seramikler gibi birçok hammadde kullanılmaktadır. Son zamanlarda ise istenilen özelliklerine göre hammaddelerin çeşitli oranlarda kombine edilmesiyle oluşturulan kompozit malzemeler kullanılmaya başlanmıştır [3,4]. Bağlayıcı püskürtmeli eklemeli imalat, diğer eklemeli imalat yöntemleri gibi destek yapıya ihtiyaç duymamaktadır. Bu sayede imalat sonrası parçanın temizleme işlemleri kolay olmakta ve geometrik açıdan karmaşık ürünler imal edilebilmektedir. Bağlayıcı püskürtmeli eklemeli imalat, lazer gibi tek noktadan çıkan güç kaynağı ve koruyucu gaz ortamı gerektirmediğinden; imalat alanı açısından sınırlanmamaktadır [5].

Bağlayıcı püskürtmeli eklemeli imalat kullanarak metal parçaların imalatındaki en büyük sorunun, sinterleme işleminden sonra tam yoğun bir ürün elde edememek olduğunu bulmuştur. Metal tozlarının küresel geometrik şekilleri ve metal tozlarının arasının bağlayıcı ile doldurulması sebebiyle bağlayıcı püskürtmeli eklemeli imalat ile imal edilen sinterlenme sonucunda metallerde gözeneklilik bulunmuştur [6].

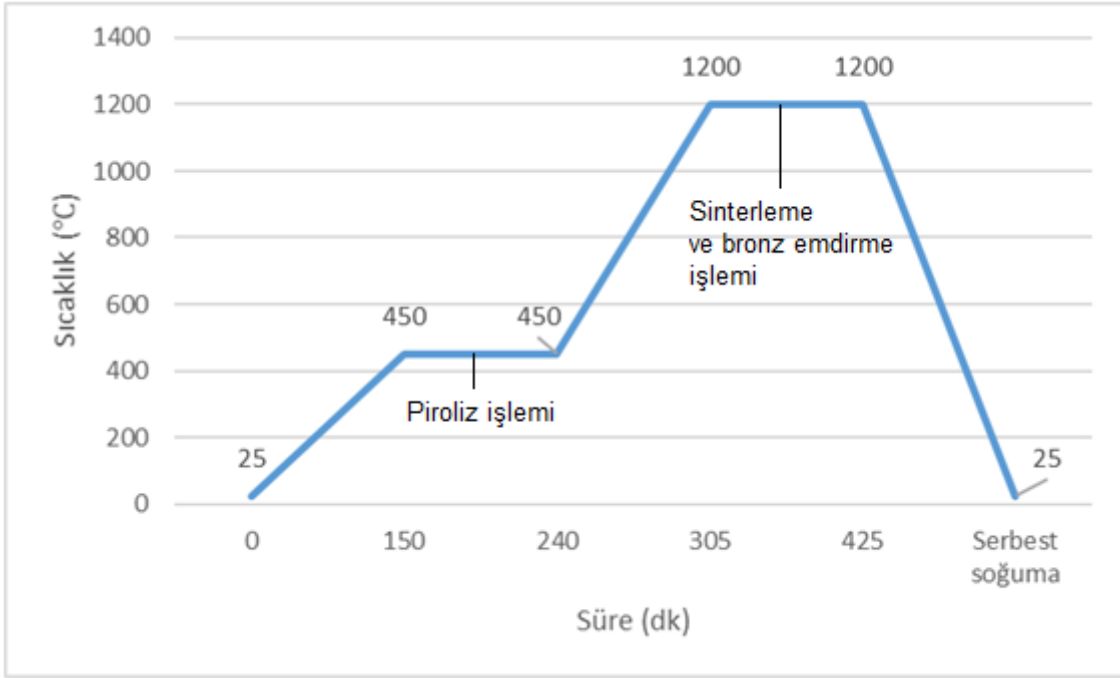
Malzeme emdirme işlemi için ana malzeme ve ana malzemedan daha düşük bir ergime sıcaklığına sahip emdirme malzemesinin beraber yerleştirildiğinde meydana geldiğini söylenmiştir. Bu işlem daha yoğun bir parça oluşturmak için ergiyen malzemenin kılcal hareketi ile malzeme emdirmeyi sağlar. Paslanmaz çelik malzeme, bronz emdirme ile % 95'lik bir nihai yoğunluk sağlayabilir [7]. Malzeme emdirme ile parçanın sertliğinin, yoğunluğunun, eğilme dayanımının artırıldığı ve gözenekliliğin yaklaşık % 8'e düşürüldüğü sonucu elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü 7,4  $\mu\text{m}$ 'dan 6,8  $\mu\text{m}$ 'a düşmekte olup, bu emdirme malzemesinin sinterlenmiş numunelerin gözeneklerini doldurduğunu belirlenmiştir. Gözeneklerin doldurulması ile parçanın mekanik özellikleri artırılmıştır [8]. Malzeme emdirme yapılmış malzemenin sinterlenen malzemedan dört kat daha yüksek mukavemete sahip olduğunu bulmuştur [9].

Bu çalışma kapsamında, eklemeli imalat teknolojilerinden bağlayıcı püskürtmeli eklemeli imalat yöntemiyle iki farklı bağlayıcı, farklı yüzdelerde ve farklı katman kalınlıklarında imal edilen numunelere bronz emdirilmesi işlemine ait parametrelerin etkisi araştırılmıştır. 316L metal tozuyla iyi bağ kurması beklenen iki farklı bağlayıcı seçilmiştir. Bunlar, PTSA ile FA ve SLA reçine ile IPA bağlayıcılarıdır. Çalışmada, malzeme emdirme işlemine uygun olabilecek malzemeler içinde ergiyen bronz tozunun difüzyon özelliğinin iyi olması nedeniyle numunelere bronz emdirme işlemi tercih edilmiştir [10].

## 2. MATERYAL ve METOT

316L metal toz malzemesinin birbirine bağlanmasını sağlamak amacıyla iki tür bağlayıcı kullanılmıştır. Bağlayıcıların ilki SLA-IPA karışımıdır. Bu karışım % 30 SLA-% 70 IPA, % 40 SLA-% 60 IPA, % 50 SLA-% 50 IPA olarak kullanılmıştır. Bu oranlarda karıştırılan bağlayıcı, metal tozları üzerine püskürtülmüştür. Bağlayıcıların ikincisi olarak PTSA-FA reçine

kullanılmıştır. Bu kimyasallardan PTSA, 316L metal tozun ağırlığına göre % 2, % 3, % 4, % 5 oranlarında karıştırılmıştır. Bu karışım katmanlar halinde serildiğinde, her katmana FA reçine püskürtülmüştür. Ayrıca yukarıda bahsedilen her parametre için 200, 300, 400, 500 mikron katman kalınlığında numuneler imal edilmiştir. İmal edilen numunelerin yeterli mukavemette bağlanabilmesi için ısıtılma işlemi fırınına konulmuştur. Kürleme işlemi yaklaşık 3 saat süre ile 175 °C sıcaklıkta bekletilerek gerçekleştirilmiştir. Kürlenen numuneler sonraki aşamada atmosfer kontrollü fırında ısıtılma işlemi tabii tutulmuştur. Numuneler fırına koyulurken refrakter fırın tuğlası içine dizilmiştir ve üzeri refrakter kum ile kapatılmıştır. Fırın, Şekil 1'deki süre ve sıcaklık değerlerinde ısıtılarak 450 °C'de 90 dakika bekletilerek piroliz işlemine ve 1200 °C'de 120 dakika bekletilerek sinterleme ve bronz emdirme işlemine tabii tutulmuştur. 1200 °C'de bronz emdirme işlemi bittikten sonra fırın içinde serbest soğumaya bırakılmıştır.



Şekil 1. Numunelerin ısıtılma işlemi fırın süreleri grafiği

Isıl işlem görmüş numuneler üzerinde mekanik, metalurjik ve fiziksel deneyler yapılmıştır. Bunlar sırasıyla, helyum piknometresi, mikro sertlik, basma testi, SEM ve optik mikroskop incelemeleridir.

### 3. BULGULAR

Her iki bağlayıcı için de bronz emdirme işlemi sonrası yapılan boyutsal ölçüm sonuçlarında, imalat sonrası değerlere göre boy ve çap değerlerinde % 5-10 arasında bir artış olduğu belirlenmiştir.

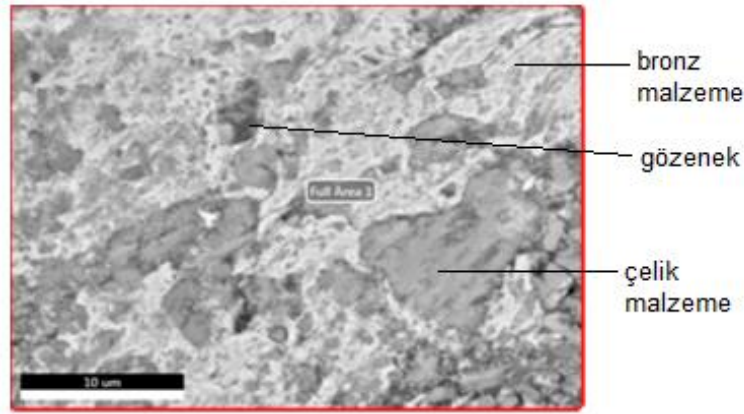
Numunelerin imalat sonrası ham yoğunluk değerleri 4 ile 5 g/cm<sup>3</sup> aralığında olduğu tespit edilmiştir. Numunelerin bronz emdirme işlemi sonrası içyapısındaki gözeneklerin bronz ile doldurulması nedeniyle yoğunluk değeri 316L paslanmaz çelik tozunun yoğunluk değeri olan 7,95 g/cm<sup>3</sup> değerine yaklaşmıştır. Ölçülen en yüksek yoğunluk değeri 7,21 g/cm<sup>3</sup> olarak elde edilmiş olup yoğunluk yüzdesi olarak % 90'a karşılık gelmektedir. Genel olarak tüm numuneler incelendiğinde, imalat sonrası ham yoğunluk değerleri yüzde olarak % 50-65 aralığında

değişmekte iken bronz emdirme işlemi sonrası bu değerler % 70-90 aralığında olduğu görülmüştür.

Mikro sertlik değerleri SLA reçineli numuneler için 118 HV ile 205 HV arasında çıkmıştır. FA reçineli numunelerde mikro sertlik değerleri 152 HV ile 293 HV arasındaki değerlerdedir. En yüksek değerler 200 mikron katman kalınlığında olup en düşük değerler ise 500 mikron katman kalınlığında olduğu belirlenmiştir.

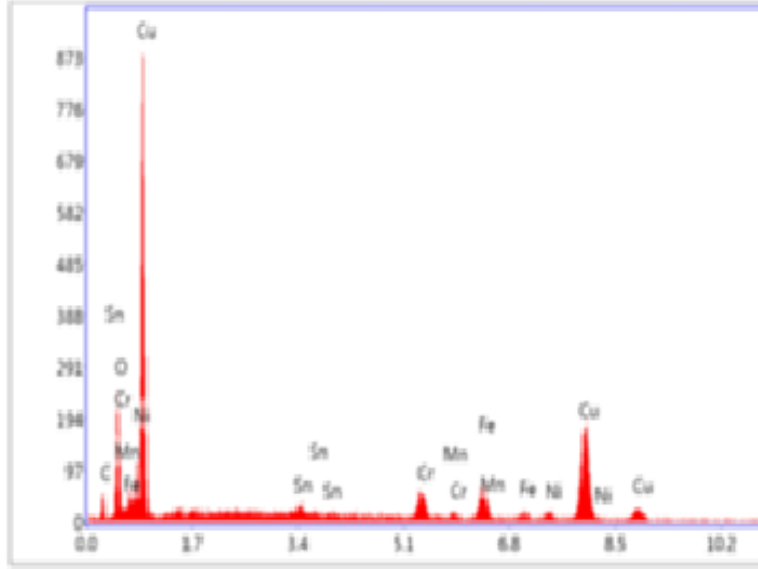
Basma testi sonuçları SLA reçineli numuneler için 21 MPa ile 102 MPa değerleri aralığında iken FA reçineli numuneler için 114 MPa ile 127 MPa aralığında çıkmıştır. En iyi sonuçlar 200 mikron katman kalınlığında elde edilmiş olup katman kalınlığı arttıkça basma dayanımı azalmıştır.

SEM incelemesi sonucunda bronz emdirme işlemi başarılı olan numunelerin görüntüsü Şekil 2 ile verilmiştir. Burada 316L paslanmaz çelik toz malzemelerinin arasındaki boşlukların bronz malzeme ile doldurulduğu görülmektedir. Ayrıca Şekil 3 ve Tablo 1 ile verilen EDS element analizi değerlerinde çıkan Cu değerleri de bronz emdirme işleminin başarılı olduğunu göstermektedir.



Şekil 2. Numunenin SEM görüntüsü

Optik mikroskop görüntüleri ile numunelerin gözeneklilik oranları incelenmiştir. Numunelerin optik mikroskopta 5x, 20x, 50x ve 100x görüntüleri alınmış olup ImageJ programı ile bu görüntüler işlenmiştir. Bu sonuçlar incelendiği zaman bronz emdirme başarısına göre % 7 ile % 30 aralığında gözeneklilik yüzdesi olduğu tespit edilmiştir.

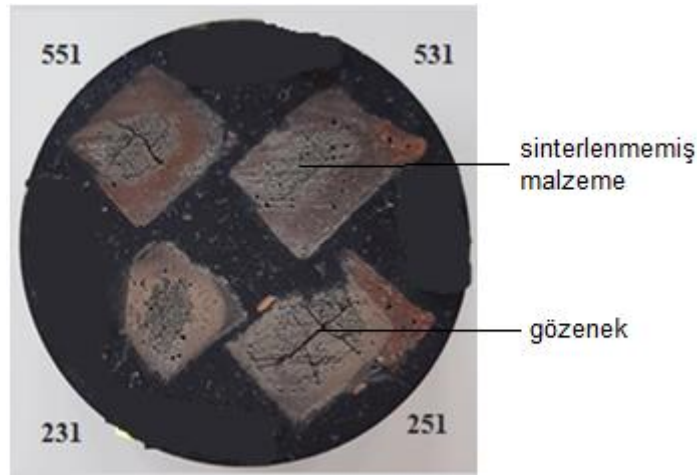


Şekil 3. Numunenin EDS analizi grafiği

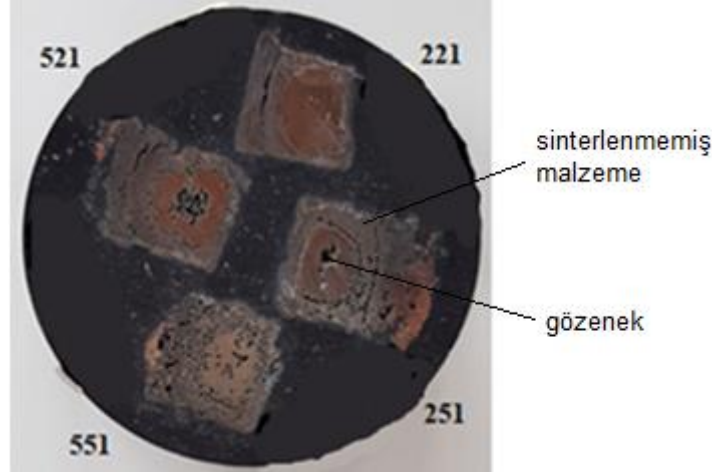
Element	Ağırlık (%)	Atomik (%)	Net	Hata	K oranı
C K	13,76	34,85	5,80	16,49	0,0379
O K	16,16	30,72	22,20	11,96	0,0615
SnL	1,12	0,29	1,86	62,44	0,0099
CrK	4,79	2,80	11,57	14,54	0,0523
MnK	0,15	0,08	0,31	83,30	0,0016
FeK	8,14	4,43	15,65	14,34	0,0940
NiK	2,06	1,07	2,69	45,89	0,0216
CuK	53,81	25,76	52,16	5,37	0,4963

Tablo 1. Numunenin EDS element analiz değerleri

SLA reçineli numunelerin bakalite alınmış görüntüleri Şekil 4 ile FA reçineli numunelerin bakalite alınmış görüntüleri Şekil 5 ile verilmiştir. SLA reçineli numunelerde çevreden merkeze doğru bir sinterlenme özelliği görülürken FA reçineli numunelerde merkezden çevreye doğru bir sinterlenme özelliği görülmektedir. Her iki bağlayıcı için de toz malzemenin iyi sıkışmamasına ve bağlayıcının uçurulmamasına bağlı olarak gözeneklilik oluştuğu görülmektedir.



Şekil 4. SLA reçineli numunelerin bakalite alınmış görüntüleri



Şekil 5. FA reçineli numunelerin bakalite alınmış görüntüleri

#### 4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Numunelerin iç kesitleri incelendiği zaman Şekil 4’de görüleceği üzere SLA reçinenin tam olarak piroliz olmaması ve merkezi bölgelerde atık olarak kalması sebebiyle imal edilmiş bazı numunelerin merkezinde sinterlenmemiş metal toz malzeme kaldığı ve buna bağlı olarak makro çatlaklar olduğu görülmektedir. Dış çeperde ise sinterlenme kalitesi nispeten daha iyi görülmektedir. Şekil 5’de FA reçine ile imal edilmiş numunelerde ise merkezi sinterlenme daha başarılı iken dış çeperlerde daha zayıf bir sinterlenme kalitesi vardır. Bu da sinterleme ve bronz emdirme süresinin bu bağlayıcı için biraz daha uzun tutulması ve daha yüksek sıcaklıklarda ısıl işlem uygulanması gerektiğini göstermektedir [11].

Literatürde karşılaşılan tek boyutta gerçekleşen artış, bu çalışmada aksenel ve radyal yönde olmak üzere iki boyutta gerçekleşmiştir [9]. Hem SLA reçineli numunelerde hem de FA reçineli numunelerde bağlayıcıların tamamen piroliz olmaması sebebiyle bu artış meydana gelmiştir. Bu sebeple fırınlama şartları ve süreleri tekrardan gözden geçirilmesi gerekmektedir. Isıl işlem süreleri artırılarak bağlayıcıların tamamen piroliz olması sağlanmalıdır. Bronz emdirme sürecinde ergiyen bronz malzemenin numune etrafına birikmesi sorununun, sıcaklık değerinin 1200°C’den yüksek sıcaklıklara çıkarılması ve süresinin uzatılması ile çözülmesi beklenmektedir [12].

Çalışma kapsamında yapılan testler sonucunda katman kalınlığının azalmasıyla basma dayanımının arttığı görülmektedir. Bunun nedeni olarak düşük katman kalınlığında toz serimi sırasında tozların daha iyi sıkıştırılabildiği öngörülmektedir. Ayrıca sinterleme ve infiltrasyon işlemleri sonucunda yoğunluk değerlerinin arttığı, bu sebeple kısmen de olsa sinterleme ve infiltrasyon süreçlerinin başarılı olduğu kanısına varılmıştır.

Numunelerin tam yoğunluğa sahip olacak şekilde imal edilmesi için numune imalatı sırasında toz malzemenin iyi sıkıştırılması, bağlayıcı oranının azaltılması ve ısıl işlemi süresinin ve sıcaklık değerinin artırılması ile tam yoğunluğa daha yakın sonuçlar elde edilebilecektir [13].

İki bağlayıcı için test sonuçları incelendiği zaman FA reçinenin daha başarılı sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

## TEŞEKKÜR

FYL-2018-6721 nolu proje ile tezimi maddi olarak destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na teşekkür ederim. Bu çalışma, Prof. Dr. Mehmet Cengiz KAYACAN danışmanlığında Özden KOR'un yüksek lisans tezinden hazırlanmıştır.

## KAYNAKLAR

- [1] Vaezi, M., Chua, C.K., 2011, Effects of layer thickness and binder saturation level parameters on 3D printing process, *Int J Adv Manuf Technol* 53, 275–284.
- [2] ÇEVİK, Z. A., ÖZSOY, K., & ERÇETİN, A. (2021). THE EFFECT OF MACHINING PROCESSES ON THE PHYSICAL AND SURFACE MORPHOLOGY OF Ti6Al4V SPECIMENS PRODUCED THROUGH POWDER BED FUSION ADDITIVE MANUFACTURING. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 5(2), 187-194.
- [3] Duman, B., & Ozsoy, K. (2022). A deep learning-based approach for defect detection in powder bed fusion additive manufacturing using transfer learning. *J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ*, 37, 361-375
- [4] Calignano, F., Manfredi, D., Ambrosio, E.P., Iuliano, L., Fino, P., 2013, Influence of Process Parameters On Surface Roughness Of Aluminum Parts Produced By DMLS. *Int. J Adv Manufacturing Technoloji*. 67, 2743-2751.
- [5] Bai, Y., Williams, C.B., 2015, An exploration of binder jetting of copper, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 21 No. 2, pp. 177–185.
- [6] Chou, D.T., Wells, D., Hong, D., Lee, B., Kuhn, H., Kumta, P.N., 2013, Novel processing of iron-manganese alloy-based biomaterials by inkjet 3-D printing, *Acta Biomaterialia*, *Acta Materialia Inc.*, Vol. 9 No. 10, pp. 8593–8603.
- [7] Sames, W. J., List, F. A., Pannala, S., Dehoff, R. R. , Babu, S. S., 2016, The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing, *International Materials Reviews*, 61:5, 315-360.
- [8] Kumar, S., Kruth, J.P., 2007, Effect of bronze infiltration into laser sintered metallic parts, *Materials and Design* 28, 400–407.
- [9] Cordero, Z., Elliott, A., 2016, Collaboration for the advancement of indirect 3d printing technology, *Advanced Manufacturing Office Energy and Transportation Science Division*.
- [10] Doyle, M., Agarwal, K., Sealy, W., Schull, K., 2015, Effect of layer thickness and orientation on mechanical behavior of binder jet stainless steel 420 + bronze parts, *Procedia Manufacturing Volume 1*, 2015, Pages 251–262.
- [11] Frykholm, R., Takeda, Y., Andersson, B.G., Carlstrom, R., 2016, Solid state sintered 3-D printing component by using inkjet (binder) method, *J. Jpn. Soc. Powder Powder Metal*. 63, 421-426.
- [12] Cordero, Z., Siddel, D.H., Peter, W.H., Elliott, A.M., 2017, Strengthening of ferrous binder jet 3D printed components through bronze infiltration, *Addit. Manuf.* 15, 87–92.
- [13] Verlee, B., Dormal, T., Lecomte-Beckers, J., 2012, Density and porosity control of sintered 316L stainless steel parts produced by additive manufacturing, *Powder Metallurgy*, vol. 55, pp. 260-267.