



# ULUBORLU MESLEKİ BİLİMLER DERGİSİ (UMBD)

Uluborlu Journal of Vocational Sciences

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

## BAĞLAYICI PÜSKÜRTMELİ METAL EKLEMELİ İMALATTA KULLANILAN BAĞLAYICILAR

Osman Saltık<sup>1\*</sup>, Abdullah Özsoy<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye.  
<sup>2\*</sup>Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye.

\*Sorumlu Yazar: [osmansaltik42@gmail.com](mailto:osmansaltik42@gmail.com)

(Geliş/Received:25.11.2020; Düzeltme/Revised:09.12.2020; Kabul/Accepted:16.12.2020)

**ÖZET:** Günümüzde kullanılan malzemelerin neredeyse tamamı bir imalat sürecinden geçmektedir. İmalat süreçleri kullanılan malzemenin niteliği ve imalat yöntemine göre değişmektedir. İmalat yöntemlerinin birbirlerine göre bazı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Endüstri devrimleri ile bu avantaj ve dezavantajlar daha da belirgin ve etkili bir hale gelmiştir. Özellikle Endüstri 4.0 devrimi ile imalat alanında büyük gelişmeler olmuş ve bu gelişmeler sayesinde imalat yöntemlerinde büyük ölçekte ilerleme kaydedilmiştir. Geleneksel imalat yöntemlerinde imalatı çok uzun süren veya çok karmaşık yapıdaki parçaların imal edilememesi gibi dezavantajları ortadan kaldıracak eklemeli İmalat yöntemleri geliştirilmiştir.

Bu yöntemlerinden birisi de bağlayıcı püskürtmeli eklemeli imalat metodudur. Bu yöntemde metal toz hammadde üzerine, bağlayıcı püskürtülerek tozların birleşmesi sağlanır. Metal tozların birleştirilmesinde kullanılan bağlayıcılar reçine olarak adlandırılmaktadır. Bu yöntem henüz gelişme aşamasında olduğundan dolayı literatürde bu imalat yönteminin detayları, ürün özellikleri ve yöntemde kullanılan bağlayıcılara yönelik yeterli düzeyde ve kapsamlı bir çalışma bulunmamaktadır. Bu makalede çeşitli çalışmalarda kullanılan bağlayıcılar, kürlenme şartları, ham mukavemete etkileri, fırın ortamında piroliz (buharlaşıma) olma özellikleri ve kalıntı bırakma durumlarından bahsedilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Bağlayıcı, Eklemeli İmalat, Ham mukavemet, Piroliz, Reçine.

## BINDERS USED IN METAL BINDER JETTING ADDITIVE MANUFACTURING

**ABSTRACT:** Almost all of the materials used today go through a manufacturing process. This process varies based on the nature of the material and the manufacturing method. In addition, these methods have some advantages and disadvantages compared to each other. With industrial revolutions, these pros and cons have become even more distinctive. Especially with the Industry 4.0 revolution, there have been great developments in the field of manufacturing, and thanks to these developments, large-scale progress has been made in manufacturing methods. Additive manufacturing methods have been developed that can eliminate the drawbacks such as the inability to manufacture parts that take too long or have a complex structure in traditional manufacturing methods.

One of these methods is the binder jetting additive manufacturing method. In this method, a liquid binder known as resin selectively deposits onto a layer of metal powder to combine powders. This method is still in the development phase, there is no adequate and comprehensive study in the literature regarding the details of this manufacturing method, product properties, and binders used in the method. In this article, binders used in various studies, curing conditions, effects on raw strength, properties of being pyrolysis (evaporation) in the oven environment, and residue conditions are mentioned.

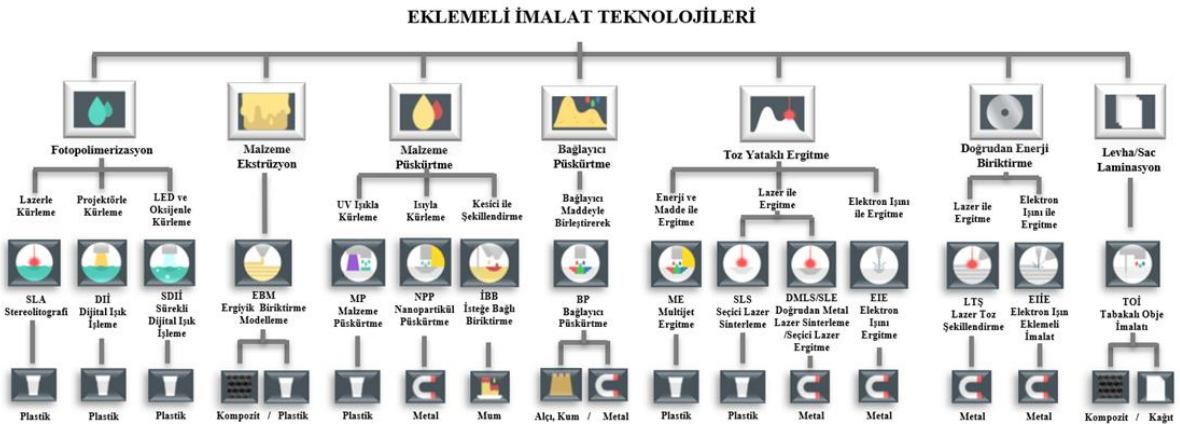
**Keywords:** Additive Manufacturing, Binder, Green Strength, Pyrolysis, Resin.

## 1. GİRİŞ

### 1.1. Eklemeli İmalat

Eklemeli imalat 1980'li yılların başında ürün ya da malzemelerin prototip imalatının yapılmasını sağlamak için geliştirilen bir imalat metodu olarak ortaya çıkmıştır. Zaman içinde metodun fonksiyonelliği geliştirilerek imalat sanayinde önemli bir yere sahip olmaya başlamıştır. Eklemeli imalat metodu, karmaşık yapıdaki parçaların kolaylıkla imal edilebilmesi, minimum atık malzeme oluşturması vb. gibi avantajlı yönleriyle geleneksel imalat yöntemlerinden ayrılmaktadır [1].

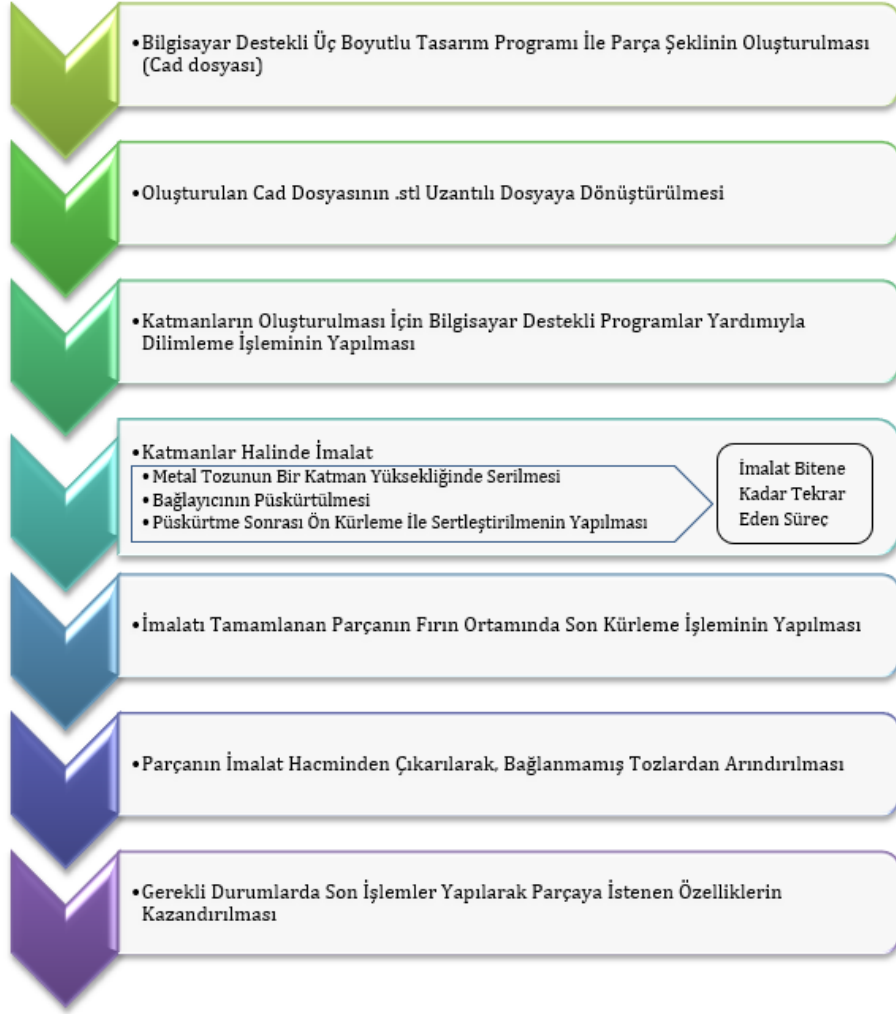
Eklemeli imalat metodu, malzeme cinsine ve eklemeye metoduna göre değişik sınıflandırmalar içermektedir. Şekil 1'de eklemeli imalat teknolojilerinin sınıflandırılması verilmiştir.



Şekil 1. Eklemeli İmalat Teknolojilerinin Sınıflandırılması [2].

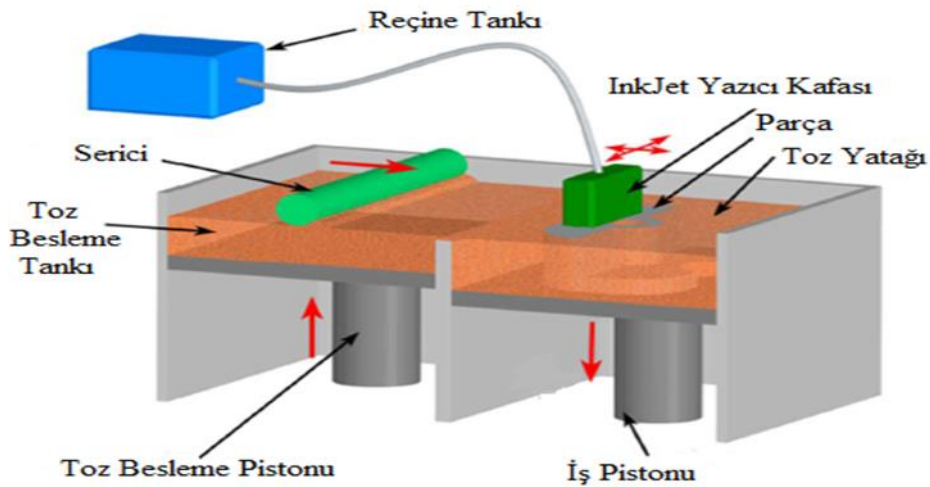
### 1.2. Bağlayıcı Püskürtmeli Metal Eklemeli İmalat

Bu yöntemin temel çalışma prensibi; toz besleme ünitesinde bulunan metal tozların imalat hacmi içerisine (toz yatağına) bir katman kalınlığı kadar serilmesi ve metal tozların üzerine bağlayıcı reçinenin püskürtülmesi şeklindedir. Püskürtme işlemi sonucunda, istenen geometri iki boyutlu olarak elde edilir ve bir katmanda imalat işlemi tamamlanmış olur. Nihai parçanın elde edilmesi için işlem basamakları son katmana kadar tekrarlanır. İmalat süreci şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Bağlayıcı Püskürtmeli Metal Eklemeli İmalat Süreci [1].

Malzemenin toz formunda bulunması sayesinde, herhangi bir destek kullanımına gerek yoktur. Tozu elde edilebilen her türlü malzeme, istenilen geometride bu yöntem sayesinde ürüne dönüştürülebilir. Şekil 3’de bağlayıcı püskürtmeli eklemeli imalat tezgâhının şematik görünümü verilmiştir.



Şekil 3. Bağlayıcı Püskürtmeli Eklemeli İmalat Tezgâhının Şematik Gösterimi [3].

Bağlayıcı püskürtmeli metal eklemeli imalat yönteminin diğer yöntemlere göre bazı avantajları bulunmaktadır. Bunlar;

- Diğer Eklemeli imalat yöntemlerinde görülen sıcaklığa bağlı kalıntı gerilmeler, çarpılma, çatlak oluşumu gibi olumsuz durumlar bağlayıcı püskürtmeli metal eklemeli imalat yönteminde bulunmamaktadır [4],
- Toz yataklı ergitmedeki imalat hızının yetersizliğine karşılık oldukça ciddi rakamlara (yaklaşık 40 kata) ulaşmış imalat hızına sahiptir [5,6,7],
- İmalat hacmi olarak da diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında çok daha büyük parçaların üretilmesine imkân sağlayabilmektedir [8,9],
- İmalat esnasında destek yapıya ihtiyaç olmadığından, imalat hacminin tamamı kullanılarak kitlesel imalat yapılabilmektedir [10].

Şekil 4’de Bağlayıcı püskürtmeli metal eklemeli imalat cihazı ve şekil 5’de Bağlayıcı püskürtmeli metal eklemeli imalat yöntemiyle imal edilmiş bir parça görülmektedir.



Şekil 4. Bağlayıcı Püskürtmeli Metal Eklemeli İmalat Cihazı [11].



Şekil 5. Paslanmaz 420SS ile İmal Edilmiş Türbin Kanatçığı [12].

## 2. BAĞLAYICI PÜSKÜRTMELİ METAL EKLEMELİ İMALAT MALZEMELERİ

### 2.1. Metal Toz Hammadde

Bu yöntemde temel olarak kullanılan iki malzeme vardır. Bunlardan birincisi metal toz hammaddedir. Yöntemin üstün avantajlarından dolayı çok çeşitli alanda kullanılması, farklı nitelikteki metal tozlarının bu yöntemde kullanılmasının önünü açmıştır. Bu alanda yapılan çalışmalar ve endüstriyel ürünler incelendiğinde, genellikle paslanmaz çelik 300 ve 400 serisi tozlar, inconel 718, inconel 625, tungsten, kobalt krom tozları tercih edilmekte, bunlara ilaveten demir, bakır, bronz ve çeşitli seramik katkıların toz içerisine girdiği gözlenmiştir. Toz seçiminde toz malzemenin türü, alaşım elementleri, tanecik boyutlandırması ve toz geometrisi gibi parametreler önem arz eder [13,14].

### 2.2. Bağlayıcılar

Yöntemde kullanılan ikinci malzeme ise bağlayıcılardır. Metal tozların bağlanmasını sağlamaktadır. Bağlayıcılar organik ve inorganik olarak ikiye ayrılırlar. Organik bağlayıcılar çalışmalarda daha çok tercih edilmiştir. Çünkü organik bağlayıcıların piroliz olup ortamdaki çekilme özellikleri yüksek olup geride çok az kalıntı bırakmaktadırlar. Bu durum özellikle istenmektedir [15]. Bağlayıcıların viskozite, yüzey enerjisi, uçabilirlik, fiyat, ıslatabilirlik kabiliyeti gibi özellikleri ayrı ayrı ele alınmalıdır [15]. Genellikle su ve solvent bazlı reçineler tercih edilmektedir. Şekil 6'de bağlayıcı kimyasal ve metal toza dair örnek görseller verilmiştir [16,17].



Şekil 6. Bağlayıcı Kimyasal Örneği (solda), Metal Toz örneği (sağda) [16,17].

Bağlayıcı püskürtmeli eklemeli imalatla farklı tür toz hammaddelerin bağlanması için en uygun bağlayıcının seçilmesi imalat ve sonrasındaki işlemler açısından büyük önem taşımaktadır. Bazı metal toz hammaddeler ve kullanılan bağlayıcıları tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Toz malzemeler ve bağlayıcıları [18,19,20]

Metal toz malzeme	Bağlayıcı
Paslanmaz çelik 316, 316L	Etilen glikol monobutil eter, izopropil alkol, etilen glikol, etilen vinil asetat, polipropilen, stearik asit

Titanyum ve alaşımları	Polivinil alkol, polivinil piroidon, polietilen glikol, polimetilmetakrilat, stearik asit, dekstrin+gliserin
Inconel 625 ve 718	Dietil glikol bazlı sulu bağlayıcı, Etilen glikol monobutil eter, etilen glikol

Yapılan bir çalışmada bakır tozlarının bağlayıcı püskürtmeli eklemeli imalatı incelenmiştir. Hammade olarak 15-75 µm aralığındaki bakır tozu ve bağlayıcı olarak Exone firmasının PM-B-SR-1-04 isimli standart bağlayıcısı çalışmada kullanılmıştır. Bağlayıcının içeriği hakkında bilgi paylaşılmamıştır. Toz boyutu, sinterleme şartları ve fırın atmosferine bağlı olarak bakırdan imal edilmiş parçaların yoğunluk ve büzülme şartlarını incelemiştir. Toz boyutu küçüldükçe yoğunluğun arttığı gözlenmiştir. Çalışmada, yapılan ön deneyler sonucunda ideal bağlayıcı doygunluk oranı %70 olarak tespit edilmiştir [21].

7, 21 ve 70 µm boyutlarındaki inconel 718 tozu ile yapılan çalışmada, Exone ticari firmasının dietil glikol su esaslı bağlayıcısı kullanılmıştır. Bağlayıcının içeriği hakkında bilgi paylaşılmamış ancak bağlayıcının buharlaşma sıcaklığının tanımlanması için diferansiyel termal analiz (tga) testi yapılmıştır. Analiz sonucunda maksimum buharlaşma sıcaklığı yaklaşık 650 ° C olarak bulunmuştur. Yapılan imalatlar esnasında bağlayıcı doygunluk oranı 7, 21 ve 70 µm toz boyutları için sırasıyla %80, %80 ve %70 olarak uygulanmıştır. Parçaların ön kürlenmesi 200 ° C lik fırın sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Bağlayıcının buharlaşması ve parça içinden uzaklaştırılması için ise 20 ° C/dk ısıtma oranı ile 700 ° C ye kadar fırın ısıtılmış ve bu sıcaklıkta 30 dakika bekletilmiştir [22].

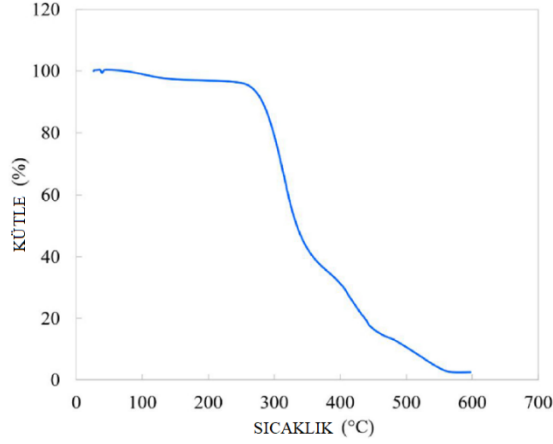
Bağlayıcı püskürtmeli metal eklemeli imalat yöntemi ile üretilen parçalar üzerinde, toz karakteristiklerinin etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, farklı boyutlardaki 316L paslanmaz çelik tozu kullanılmış. Yine bu çalışmada Exone ticari firmasının eter solvent bazlı bağlayıcısı kullanılmıştır. Bağlayıcının kimyasal bileşimi hakkında bilgi verilmemiştir. Bağlayıcı doygunluk oranı %100, bağlayıcı kuruma süresi 45 sn ve katman kalınlığı 0.15 mm olarak verilmiştir. Ön kürlenme işlemi, 200 ° C de 2 saat olarak gerçekleştirilmiştir. Bağlayıcının buharlaştırılması ve parçadan uzaklaştırılması için 20 ° C/dk ısıtma hızı ile 500 ° C ye kadar ısıtma yapılmış ve bu sıcaklıkta 1 saat bekletilmiştir [23].

Başka bir çalışmada 316 ve 420 paslanmaz çelik tozların bağlayıcı püskürtmeli imalatına yönelik olarak araştırma yapılmıştır. Çalışmaya göre çelik tozları içerisine bor, bor nitrür ve bor karbür ilaveler katılarak mekanik özelliklerdeki değişim gözlenmiştir. Aynı zamanda farklı fırın atmosferi şartlarının etkisi de incelenmiştir. Herhangi bir katkı ilave edilmeksizin %92 yoğunluk elde edilmiştir. Bu çalışmada izopropil alkol (IPA), etilen glikol (EG) ve etilen glikol monobutil eter (EGBE) malzemelerin bir karışımı bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Ancak detaylı bir veri bulunmamaktadır [24].

Toz sıkıştırma, katman kalınlığı ve sıvı bağlayıcı seviyesinin ham parça yoğunluğu üzerindeki etkilerinin araştırıldığı bir çalışmada, su atomizasyon yöntemiyle üretilmiş, 45 µm'den daha küçük toz boyutuna sahip saf demir tozu ile bağlayıcı olarak 63 µm'den daha küçük boyutlardaki polivinil alkol kullanılmıştır. Ağırlıkça %99 Demir tozu, %1 polivinil alkol olacak şekilde bir karışım yapılmıştır. Polivinil alkolü çözmek için, su bazlı bir çözücü olan zcorp firmasının zb60 modeli kullanılmıştır. İçeriği tam bilinmemekle birlikte, su bazlı çözücünün yaklaşık %85-95'i sudan, geri kalanının ise bazı gliserol polimerlerden oluştuğu ifade edilmiştir. Çalışmada 5 mm çapında ve 8 mm yüksekliğinde numuneler imal edilmiştir. Bağlayıcı olarak kullanılacak Polivinil alkolün diferansiyel termal (tga) analizi yapılmış ve şekil 8'de verilen grafiğe göre 270 °C de bozulmanın başladığı ve 570 °C ye kadar devam ettiği



görülmektedir. En hızlı bozulmanın ise 270-360 ° C arasında meydana geldiği grafikten anlaşılmaktadır [25].



Şekil 8. Polivinil Alkolün Kütle Kayıp Profili [25].

Çalışmada bağlayıcı piroliz olma şartları (sıcaklık ve zaman) belirlenmiş ve şartların belirlenmesi sonucunda, piroliz işleminin proses parametrelerine bağlı olduğu bulunmuştur. Katman kalınlığının artırılması ile toplamda kullanılan bağlayıcı miktarı azaldığından piroliz süresi kısalmıştır [25].

### 3. TARTIŞMA

Literatür incelendiğinde kullanılan bağlayıcıların neredeyse tamamının imalatçı firmaların geliştirdiği bağlayıcılar olduğu gözlemlenmiştir. Farklı bağlayıcı tiplerine ait çalışmalar yok denecek kadar azdır. Farklı bağlayıcıların kullanılmasının imalat proseslerini etkilediği anlaşılmaktadır. Farklı bağlayıcı türleri kullanılmasının ve proses parametre değişkenliğinin parçanın imalat süreci ve sonrasında önemli bir rolü bulunmaktadır. Farklı bağlayıcıların imalat sürecini nasıl etkilediği konusunda literatürde eksiklik olduğu tespit edilmiştir.

### 4. SONUÇ

Her geçen gün yeni gelişmelerin yaşandığı eklemeli imalat alanı, artık geleneksel yöntemlerle yapılan imalat yöntemlerine alternatif bir alan olarak karşımıza çıkmaktadır. Bağlayıcı püskürtmeli metal eklemeli imalat yönteminin de yakın zamanda gelecek vadeden bir imalat yöntemi olacağı, bu alanda yapılan çalışmalardan anlaşılmaktadır. Yöntemde kullanılan proses parametrelerinin, bağlayıcının kurlenme şartları, parçanın ham mukavemeti, bağlayıcının piroliz olma şartları ve kalıntı bırakma gibi durumlarını büyük ölçüde etkilediği anlaşılmaktadır.

Aşağıda verilen çalışmaların literatüre katkı sağlayabileceği düşünülmektedir;

- Yöntemde kullanılacak farklı tür bağlayıcıların geliştirilmesi,
- Farklı türlerdeki bağlayıcıların proses parametrelerine etkisi,
- Farklı türlerdeki bağlayıcıların ham mukavemete etkisi.

Yöntemde kullanılabilecek farklı tür bağlayıcıların geliştirilmesi, bağlayıcıların proses parametrelerine ve ham mukavemete etkisinin anlaşılması için çok sayıda deney yapılması gerekmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] Demiray, M. A., Şekerci, B., Saltık, O., Kayacan, M.C., (2018). Eklemeli İmalat Yöntemlerinde Kullanılan Malzemeler", 4th International Congress on 3D Printing (Additive Manufacturing) Technologies and Digital Industry, Antalya, 274-284.
- [2] 3dhubs, 2019. Erişim Tarihi: 21.12.2019. <https://www.3dhubs.com/get/am-technologies>
- [3] CustomPartNet, (2019). Erişim Tarihi: 21.12.2019. <http://www.custompartnet.com/wu/3d-printing>
- [4] Makepartsfast,2020 Erişim Tarihi: 13.12.2020 <https://www.makepartsfast.com/what-are-the-benefits-of-binder-jetting-in-3d-printing/>.
- [5] Slm solution, (2017). Erişim Tarihi: 18.09.2017. <https://slm-solutions.com/products/machines/selective-laser-melting-machine-slmr500>.
- [6] Exone, (2017). Erişim Tarihi: 18.09.2017. [https://www.exone.com/Portals/0/Systems/M-Flex/X1\\_MFlex\\_US.pdf](https://www.exone.com/Portals/0/Systems/M-Flex/X1_MFlex_US.pdf).
- [7] Desktop metal, (2018). Erişim Tarihi: 05.07.2018. <https://www.desktopmetal.com/>
- [8] Eos, (2018). Erişim Tarihi: 22.09.2018. <https://www.eos.info/en>.
- [9] Exone, (2018). Erişim Tarihi: 05.07.2018. <https://www.exone.com/>
- [10] 3dhubs, (2018). Erişim Tarihi: 05.08.2018. <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-binder-jetting-3d-printing>.
- [11] Exone, (2019). Erişim Tarihi: 21.12.2019. <https://www.exone.com/en-US/3D-printing-systems/metal-3d-printers/M-Flex>
- [12] Electronic Specifier, (2019). Erişim Tarihi: 21.12.2019. <https://aerospacedefence.electronicspecifier.com/event-news/advanced-ceramic-applications-set-to-take-off-in-the-aerospace-industry>.
- [13] Sachs E.M., Cima, M.J., Brecht, J.F., Khanuja, S., (2000). Ceramic Mold Finishing, United States Patent, No: 6,109,332 dated 29.08.2000.
- [14] Cima, M., Sachs, E., Fan, T., Brecht, J.F., Michaels, S.P., Khanuja, S., Lauder, A., Lee, S.J.J., Brancazio, D., Curodeau, A., Tuerck, H., Three-Dimensional Printing Techniques, United States Patent, No: 5,387,380 dated 07.02.1995.
- [15] Utela, B., Storti, D., Anderson, R., Ganter, M., (2008). A Review of Process Development Steps for New Material Systems in Three Dimensional Printing (3DP). Journal of Manufacturing Processes, 10, 96-104.
- [16] 3dprint, (2017). Erişim Tarihi: 15.05.2017. [www.3dprint.com](http://www.3dprint.com).
- [17] Asahi-Yukizai, (2017). Erişim Tarihi: 15.05.2017. [www.asahi-yukizai.co.jp](http://www.asahi-yukizai.co.jp).
- [18] Salehi M, Gupta M, Maleksaeedi S, Sharon NML Inkjet based 3D additive manufacturing of metals. In, 2018. Materials Research Forum LLC,
- [19] Lores A, Azurmendi N, Agote I, Zuza E (2019) A review on recent developments in binder jetting metal additive manufacturing: materials and process characteristics. Powder Metallurgy 62 (5):267-296



- [20] García JH (2014) Development of binder systems based on CAB powder injection moulding (PIM) and micro powder injection moulding (?-PIM) of zircon and invar powders. Universidad Carlos III de Madrid,
- [21] Bai, Y., Williams, C.B., (2015). An Exploration of Binder Jetting of Copper. *Rapid Prototyping Journal*, 21(2), 177-185.
- [22] Nandwana, P., Elliott, A. M., Siddel, D., Merriman, A., Peter, W. H., & Babu, S. S., (2017). Powder Bed Binder Jet 3D Printing of Inconel 718: Densification, Microstructural Evolution and Challenges. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 21(4), 207-218.
- [23] Miyajima, H., Momenzadeh, N., & Yang, L., (2019). Effect of Powder Characteristics on Parts Fabricated via Binder Jetting Process. *Rapid Prototyping Journal*, 25(2), 332-342.
- [24] Do, T., Kwon, P., & Shin, C. S., (2017). Process Development Toward Full-Density Stainless Steel Parts With Binder Jetting Printing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 121, 50-60.
- [25] Rishmawi, I., Salarian, M., & Vlasea, M., (2018). Tailoring Green and Sintered Density of Pure Iron Parts Using Binder Jetting Additive Manufacturing. *Additive Manufacturing*, 24, 508-520.