



ULUBORLU MESLEKİ BİLİMLER DERGİSİ (UMBD)

Uluborlu Journal of Vocational Sciences

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

BAĞLAYICI PÜSKÜRTMELİ METAL EKLEMELİ İMALATTA KULLANILAN PARAMETRELER

Mert Gürgen^{1*}, Mehmet Cengiz Kayacan²

^{1*}Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye.

^{2*}Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye.

*Sorumlu Yazar: mertgurgen@sdu.edu.tr

(Geliş/Received:04.11.2020; Düzeltme/Revised:08.12.2020; Kabul/Accepted:15.12.2020)

ÖZET: Günümüzde teknolojinin de gelişmesiyle geleneksel yöntemlerle imal edilemeyen fonksiyonel parçalar için alternatif yollar aranmaya başlanmıştır. Bu geleneksel olmayan imalat yöntemlerinden biri de Eklemeli İmalat'tır. Eklemeli İmalat (Additive Manufacturing), geleneksel yöntemlerin tersine, imal edilecek parçanın daha kaba bir ham maddeden eksilterek ya da kütleli şekillendirmeyle çalışmaz. Uygun biçimde hazırlanmış bir tasarıma göre toz ya da ergiyik ham maddesinden kesit alanların katmanlar halinde imal eden bir sistemdir. Malzeme cinsine, katmanların birleştirilme biçimine ve birleştirici enerji kaynağına göre alt türlere ayrılarak, istenilen şekilde parçanın imal edildiği üretim yöntemi olarak tanımlanabilmektedir.

Eklemeli İmalat yöntemlerinden biri olan, Bağlayıcı Püskürtmeli Metal Eklemeli İmalat yakın zamanda ortaya çıkmış ve hala gelişmekte olan bir Eklemeli İmalat yöntemidir. Gelişme aşamasında olmasından dolayı net bir bağlayıcı türü, oranı, sinterleme süreci ve ortamı belirlenememiştir. Bu makalede çeşitli çalışmalarda kullanılan toz hammaddelerden (hammadde türü, toz boyutu), sinterleme süreçlerinden (sinterleme sıcaklığı, süresi, ortamı) ve kullanılan bağlayıcıların hammadde metal tozu ile oranlarından bahsedilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bağlayıcı püskürtmeli metal eklemeli imalat, Bağlayıcı, Eklemeli İmalat, Reçine, Sinterleme.

PARAMETERS USED IN METAL BINDER JETTING ADDITIVE MANUFACTURING

ABSTRACT: Nowadays, with the development of technology, alternative ways have been sought for functional parts that cannot be manufactured by traditional methods. One of these unconventional manufacturing methods is Additive Manufacturing. Additive Manufacturing does not work by removing the part to be manufactured from a raw material or by mass shaping, unlike traditional methods. It is a system that manufactures cross-sections of powder or melt raw material in layers according to a suitably prepared design. It can be divided into sub-types according to the type of material, the way the layers are combined and the unifying energy source, and it can be defined as the production method in which the part is manufactured as desired.

As one of the Additive Manufacturing methods, Metal Binder Jetting is a recently emerged and still developing Additive Manufacturing method. Due to the fact that it is under development, a clear binder type, ratio, sintering process and atmosphere could not be determined. In this article, powder raw materials (raw material type, powder size), sintering processes (sintering temperature, time, atmosphere) and the ratio of binders used with raw material metal powder in various studies are mentioned.

Keywords: Additive manufacturing, Binder, Metal binder jetting, Resin, Sintering.

1. GİRİŞ

Eklemeli İmalat (Eİ) teknolojileri 20. yüzyılın son yarısından itibaren hızlı prototipleme sistemleri olarak öne çıkmaya başlamıştır. Günümüze kadar da büyük gelişme göstermiş ve halen gelişim göstermeye devam etmektedir. Eİ yöntemlerinde, elektronik ortamdaki bir tasarım dosyasından yola çıkılarak, tasarlanan modelin kesit alanları toz ya da ergiyik ham maddesinden katmanlar halinde birbiri üzerine eklenerek parça imal edilmektedir [1]. İmalata dair herhangi bir kısıtlamayı düşünmeksizin tasarım yapılabilmesi ve böylece karmaşık parçalar oluşturulabilmesi, en az atık malzeme, kesici takım ve kesme kuvvetlerinin olmaması en önemli avantajlarıdır. Eİ’de, tasarımı yapılmış 3B dijital katı model, direkt olarak Eİ cihazına gönderilmemektedir. Model öncelikle, Eİ standart arabirimi olan Standard Tessellation Language (STL) biçimli dosyaya dönüştürülmektedir. 3B katı model, STL formatına dönüştürüldükten sonra Eİ arayüzüne gönderilmeye hazır hale getirilmektedir [2].

Eİ yöntemlerinden biri olan Bağlayıcı Püskürtmeli Eklemeli İmalat’ın temelleri 1990’lı yıllarda Massachusetts Teknoloji Enstitüsü tarafından geliştirilmiştir. İlk zamanlarında 3D Printer (3B Yazıcı) olarak adlandırılan yöntem, 2010 yılında ticarileşirken literatüre Binder Jetting (Bağlayıcı Püskürtme) olarak geçmiştir [36]. Bu yöntemde imalat için temel olarak iki farklı malzeme kullanılmaktadır. Bunlardan ilki ana malzeme olan toz malzemedir. Bu toz malzemeler; seramik, polimer, kompozit ve metal tozları olabilmektedir. Bu yöntemde metal tozları kullanımıyla parça imalatı son yıllarda yeni yeni yaygınlaşmaya başlamıştır. İkincisi ise toz halindeki ana malzemeyi birbirine bağlayan genelde reçine olarak bilinen sıvı bağlayıcı maddedir [37]. Ürünü oluşturacak olan malzemenin tozu, toz serme sistemi ile serilir. Ardından püskürtmeli yazıcılara benzer şekilde bağlayıcı malzeme, damla damla bir katman üzerine püskürtülür. Püskürtme işlemi sonucunda, istenen geometri iki boyutlu olarak elde edilir. Arkasından bir sonraki katmana geçilerek aynı işlemler tekrarlanır ve parça üç boyutlu hale getirilir. İmalat işlemi bittikten sonra parça ham haldedir. Çoğu zaman mekanik özellikleri artırmak için son işlemler (kaplama, infiltrasyon vb.) yapılır. Kaplama malzemesi olarak yapıştırıcı (seramiklerde) ve infiltrasyon malzemesi olarak bronz (metallerde) kullanılan son işlem malzemelerine örnektir [38]. Metal toz hammadde kullanılan yöntem Bağlayıcı Püskürtmeli Metal Eklemeli İmalat (BPMEİ) olarak adlandırılır.

BPMEİ cihazlarında 316, 316L, 420, Inconel 625/718, kobalt/krom ve tungsten karbür gibi ileri teknoloji metalleri kullanılarak parça imal etmek mümkündür. Bu ve benzeri malzemelerle kompozit teknolojisi de emdirme (infiltrasyon) yöntemi ile kullanıma uygundur [3]. Adı geçen malzemeler genel olarak otomotiv, havacılık ve uzay, savunma sanayi gibi ileri mühendislik malzemeleri ihtiyacı olan alanlarda kullanılmaktadır. Ek olarak diğer sektörlerde de yüksek mekanik özellikler ve karmaşık geometri gereksinimi olan özel alanlarda tercih edilmektedir [4,39].

Diğer mevcut metal Eİ metotlarında olduğu gibi, BPMEİ cihazlarında da imal edilen parçalar doğrudan fonksiyonel hale gelmez. BPMEİ’de ilk adımda ham mukavemete sahip düşük yoğunluklu parçaların imalatı söz konusudur. Bu parçalara çeşitli son işlemler (kürleme, sinterleme, infiltrasyon vb.) uygulanarak parçanın mekanik özellikleri istenen düzeye getirilmektedir. Bu adımlardan biri olan infiltrasyon, sinterleme esnasında ana parça malzemesinden daha düşük sıcaklıkta ergiyen bir metalin parçaya emdirilme işlemidir. Bakır, bronz, alüminyum da emdirme malzemeleri olarak kullanılmaktadır [5-7].

BPMEİ yönteminin çalışma adımları;

- Toz ve bağlayıcı ham maddenin ilgili hazneleri doldurulması,
- Tozun, besleme ünitesinden alınarak serici mekanizmayla imalat tablasına pürüzsüz bir şekilde serilmesi,
- Tablaya serilen tozların gerekli kısımlarına (katı model geometrisine göre) bağlayıcının püskürtülmesi,
- Püskürtülen bağlayıcının özelliğine göre (hava ortamında, CO₂'li ortamda, ışıkla (UV), sıcaklıkla vb. sertleşen bağlayıcılar) sertleştirme (kürleme) işleminin yapılması,
- İmalat bitene kadar her bir katmanda serme, bağlayıcı püskürtme ve kürleme işlemlerinin tekrarlanması,
- İmalat işlemi tamamlandıktan sonra toz yatağı içinde bulunan imalat parçalarının, bağlanmayan tozlardan temizlenmesi,
- İmalat parçasının fırınlama işlemine alınarak; bağlayıcının uçurulması (piroliz) ve bağlayıcı sayesinde bir arada duran tozların metalik bağ ile kaynaşmasının sağlanması (sinterleme),
- Parçadan uçurulan bağlayıcıdan arta kalan boşluklara sıvı metal emdirilmesi (infiltrasyon),
- İhtiyaca göre basınçlı sinterleme vb. [genellikle Hot Isostatic Pressing (HIP)/Sıcak İzostatik Presleme (SİP)] gibi işlemler sonucunda fonksiyonel parçanın imalatı şeklindedir.

BPMEİ genel olarak; pompalar, türbinler, ısı eşanjörleri, filtreleme sistemleri, güç aktarım organları, bazı protezler vb. parçalarda kullanılır. Bu alanlarda BPMEİ yöntemi genellikle, parçalara korozyon direnci, yüksek aşınma direnci ve mukavemet sağladığı için tercih edilmektedir. Diğer metal Eİ metotlarına göre çok daha hızlı ve düşük maliyetli imalat metodudur. Tablo 1'de metal Eİ yöntemlerinin, marka model, imalat hacmi, imalat hızı, imalat ortamı ve ısıl kalıntı gerilme oluşturma durumlarını gösteren bir karşılaştırması verilmiştir.

Tablo 1. Metal Eklemeli İmalat Yöntemlerinin Özellikleri [3, 8-12]

Yöntem	Marka/Model	İmalat Hacmi (mmXmmXmm)	İmalat Hızı (cm ³ /sa)	Katman Kalınlığı(mm)	İmalat Ortamı	Isıl Kalıntı Gerilme
BPMEİ	Digital Metal DM P2500	203x180x69	100	0,035	Açık Hava	Yok
BPMEİ	Desktop Metal Production System	330x330x330	8200	-	Açık Hava	Yok
BPMEİ	Exone Innovent	160x65x65	125	0,100	Açık Hava	Yok
BPMEİ	Exone M-Flex	400x250x250	1800	0,100	Açık Hava	Yok
BPMEİ	Exone M-Print	800x500x400	-	0,100	Açık Hava	Yok
Seçici Lazer Ergitme	SLM Solutions SLM280	280x280x365	88	0,020	Ar-N	Var
Seçici Lazer Ergitme	SLM Solutions SLM500	500x280x365	171	0,020	Ar-N	Var
Seçici Lazer Ergitme	EOS M280	250x250x325	-	0,020	Ar-N	Var
Seçici Lazer Ergitme	EOS M400-4	400x400x400	100	-	Ar-N	Var
Elektron Işın Ergirme	ARCAM Q20plus	Ø350x380	-	0,140	Vakum	Var

Elektron Işın Ergirme	ARCAM A2X	200x200x380	55-80	-	Vakum	Var
Nanopartikül Püskürtme	XJet Carmel1400	500x280x200	210	0,003	Basınçlı Hava	Yok
Nanopartikül Püskürtme	XJet Carmel700	500x140x200	105	0,010	Basınçlı Hava	Yok

BPMEİ yöntemi henüz yeni ve gelişmekte olan bir eklemeli imalat yöntemidir. Piyasada ticari marka olarak yalnızca 3 firma bulunmaktadır. Bu firmaların yanı sıra HP şirketi de, Metal Jet adını verdiği BPMEİ yöntemiyle çalışan cihazı ile piyasa çıkmayı planlamaktadır. HP, Volkswagen ve GKN Powder Metallurgy şirketleri arasında yapılan işbirliği sonucunda Volkswagen'in araçlarında HP'nin BPMEİ tezgâhlarında imal edilmiş parçaların kullanılacağı açıklanmıştır. Aynı zamanda diğer Eİ yöntemlerine kıyasla BPMEİ ile otomotiv sektörü için seri imalat imkânı olduğu belirtilmiştir. [35-37].

2. BAĞLAYICI PÜSKÜRTMELİ METAL EKLEMELİ İMALATTA KULLANILAN PARAMETRELER

BPMEİ yöntemi yeni bir teknoloji olması ve gelişmeye devam etmesinden dolayı netleşmiş parametrelere sahip değildir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde toz hammadde cinsi, boyutu; sinterleme sıcaklığı, süresi, ortamı; bağlayıcı/toz hammadde oranı parametrelerinin farklılıklar gösterdiği görülmektedir. Tablo 2'de toz hammadde, sinterleme ve bağlayıcı oranı üzerine çalışma yapan literatür çalışmaları ve hangi parametrelerden bahsettikleri verilmiştir.

Tablo 2. BPMEİ Parametrelerinin Yer Aldığı Literatür Çalışmaları

Çalışma Adı		Toz Hammadde	Sinterleme	Bağlayıcı Oranı
Lorenz vd. (2004)	[15]	+		
Miyanaşi ve Yang (2016)	[16]	+		+
Enneti vd. (2018)	[17]	+	+	+
Do vd. (2017)	[18]	+	+	+
Vangapally vd. (2017)	[19]	+	+	
Tang vd. (2016)	[20]	+	+	
Frykholm vd. (2016)	[21]	+	+	
Johnston vd. (2004)	[22]	+	+	
Utela vd. (2008)	[23]	+		+
Mostafaei vd. (2017)	[24]	+	+	
Bai ve Williams (2015)	[25]	+		+
Cordero vd. (2017)	[26]	+	+	
Doyle vd. (2015)	[27]	+	+	
Turker vd. (2008)	[28]	+	+	
Gülsoy (2008)	[29]	+	+	
Do vd. (2018)	[30]	+	+	+

2.1. Toz Hammadde

BPMEİ'de toz seçiminde toz malzemenin türü, alaşım elementleri, tanecik boyutlandırması ve toz geometrisi gibi parametreler, daha yoğun ve mukavemetli numunelerin imalatı açısından önem arz etmektedir [31,32].

BPMEİ için kullanılan ham madde tozlarının 20 µm'den büyük olması durumunda;

- Tozun serilmesinin kolay,
- Toz yüzey alanının az,
- Büyük gözeneklerin kalmasının bağlayıcının emilimi açısından kolay olduğunu söylenmiştir [23].

Aynı çalışmada 5 µm daha küçük tozlar ile imalat yapıldığında;

- Sinterlenme yeteneğinin iyi olduğu,
- Yüzey pürüzlülüğünün azaldığını,
- Daha ince bir katman ile çalışabilme imkânı olduğu,
- Zor serilebilen bir yapıya sahip,
- Bağlayıcının tozları ıslatma sorununun yaşandığı,
- Bulamaç halinde çökme durumlarının yaşanabildiğini bahsedilmiştir [23].

Topaklanma etkisini azalttığı için 20 µm ve üzerindeki tozların tercih edilmesi uygundur. Toz boyutunun fazla büyümesi, yüzey pürüzlülüğünü ve katman kalınlığını artırdığı ifade edilmiştir [33]. Tozların daha küçük taneli olması kılcallıktan oluşacak basıncı artırarak; infiltrant maddenin nüfuziyetini artırdığını tespit edilmiştir [15].

BPMEİ’de tozların fiziksel özellikleri üzerine yapılan çeşitli çalışmalar incelendiğinde;

- İmalat için %60 14 µm, %40 4 µm oranında [18],
- Inconel 625 malzeme için 65-110 µm arası [24],
- SS420 için 10-40 µm arası [16],
- WC + %12 Co karışımlarında 20-45 µm arası [17],
- SS420 için 45 µm [26],
- SS420 için 30 µm [27],
- Inconel 718 malzeme için 20-53 µm arası [28],
- SS316L için 4, 14, 30 ve 82 µm boyutlarındaki tozlardan farklı oranlarda karışım toz ham madde kullanıldığı görülmüştür [30].

Tozların büyük ve küçük olmasının avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Bu avantajlardan en üst seviyede yararlanmak ve dezavantajları en aza düşürmek için tozlar karışım halinde de kullanılmaktadır. Karıştırılmış tozlar ile imalatı yapılan numunelerin ham yoğunluk oranları %50 değerinden %65 değerine kadar artmıştır [30].

Katman kalınlığı 50-200 µm arasında değişirken, katman kalınlığının artması, özellikle düşük sinterleme sıcaklıklarında sinterlenmiş numunenin yoğunluk oranını azaltmaktadır [28]. Katman kalınlığının artması akma ve çekme dayanımlarını da düşürmektedir [27].

2.2. Sinterleme

BPMEİ’de tezgahta ham mukavemete sahip olarak imal edilen numunelerin, sinterleme işlemine tabi tutularak gerçek mukavemet değerlerini kazanmaları sağlanır.

316L paslanmaz çeliğin sinterleme sıcaklığı, sıcaklık artış hızı, sinterleme süresi ve sinterleme ortamı üzerine çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. 1100°C’de 2 saat ve 4 saat, 1200°C’de de aynı şekilde 2 saat ve 4 saat sinterleme yapıldığında; sinterleme sıcaklığı ve süresinin artması, basma dayanımını artırdığı sonucu çıkarılmıştır [19].

İncelenen çalışmalarda, fırın ortamındaki yüksek sıcaklıklarda numunelerin korozyona uğramaması için, fırın ortamı Ar ve H₂ gazlarından birini ya da birlikte ikisini kullanmıştır [18,22]. Bazı çalışmalarda fırın atmosferi, imalatın başında vakumlanırken [24], bazı çalışmalarda adı geçen gazlar ortama basıldıktan belli bir süre sonra vakumlama işlemi yapılmıştır [17,18].

Sinterleme sıcaklığı olarak 1150, 1250 ve 1350°C (316L metal tozunun ergime sıcaklığının yaklaşık %95'i sıcaklıkta) sıcaklıklarda, 4 saat sinterleme yapılmış, sinterleme sıcaklığına 5°C/dk ısıtma hızı ile çıkıp, aynı hızla soğutulmuştur [18]. Bir başka çalışmada ise, 316L parçalarını 28 L/saat debi ile argon ortamında sinterlemesi gerçekleştirilmiştir. Numuneler önce 465°C'ye 5°C/dakika hız ile çıkarılırken, 200 ve 465°C'de 30'ar dakika bekletilmiştir [22].

Numunelerin sinterleme sürecinde, fırın sıcaklıkları doğrudan sinterleme sıcaklıklarına yükseltilmemiş, belli sıcaklıklarda belli sürelerde bekletilerek yükseldiği görülmüştür [18,20]. Bunun temel amacı, numuneler içerisinde bulunan bağlayıcıların en fazla şekilde buharlaştırarak, geriye en az miktarda atık bırakmasını sağlamaktır. Sinterleme sıcaklığına yükselirken, sıcaklık artış hızı olarak 4, 7, 10 ve 20°C/dk, sinterleme sıcaklığı olarak 1010, 1100, 1180 ve 1263°C ve sinterleme süresi olarak 2 saat süre tercih edilmiştir [22]. Diğer bir çalışmada, 316L için 1250-1385°C sinterleme sıcaklığında; 1100°C'ye kadar 10°C/dakika, sonrasında sinterleme sıcaklığına kadar 5°C/dakika sıcaklık artış hızını kullanmıştır [29]. Sinterleme sıcaklığının artırılması ile yoğunluk doğru orantılı olarak artmaktadır [28]. Sinterleme sıcaklığının artışı aynı zamanda malzemelerin çekme dayanımlarını da yükseltmektedir [24].

Sinterlenmiş numune içerisinde bulunan C ve O₂ değerlerinin, sinterleme sıcaklığı arttıkça değiştiği belirtilmiştir. Ti malzeme ile yaptıkları çalışmada, sinterleme sıcaklığı 1250°C'den 1350°C'ye çıktığında, yapıdaki ağırlıkça C oranı %0,08'den %0,03'e düşerken, O₂ oranı %0,20'den %0,26 ya yükselmiştir [21]. Başka bir çalışmada sinterleme sıcaklığı ve süresi arttıkça, sinterlenen numunelerin sertlik değerinin artış gösterdiğini belirtmişlerdir [34].

2.3. Bağlayıcı Oranı

BPMEİ'de imal edilen numunenin hacimce %30-75 arası metal tozu, %10 bağlayıcı ve kalan kısmının da boşluktan oluştuğunu belirtmiş [23]. 316L ile yapılan başka çalışmada hacimce %70 toz, kalan kısmın bağlayıcı olması gerektiğini söylenmiştir [25]. 420 paslanmaz çelik tozu için ideal bağlayıcı oranının hacimce %29 olması gerektiğini aktarılmıştır [16]. WC-%12Co tozunda hacimce %45 bağlayıcı oranı (%3,5 ağırlıkça bağlayıcı) kullanmıştır [17].

420 paslanmaz çelik tozlarıyla yapılan bir çalışmada ExOne firmasının bağlayıcı reçinesi kullanılmıştır. Firmanın reçinesinin izopropil alkol, etilen glikol monobütül eter ve etilen glikol içerdiği bilgisi verilmektedir. Çalışmada ExOne şirketinden alınan bilgiyle bağlayıcı yoğunluğunun 1,06 g/cm³ olduğu söylenmiş ve yapılan hesaplamalarla bağlayıcı oranı hesaplanmıştır. İmal edilen numunenin hacimce %60'nın toz hammadde, %20'sinin bağlayıcı ve kalan %20'sinin ise boşluk olduğu ifade edilmiştir. Ağırlıkça bağlayıcı oranı ise %4,37 olarak bulunmuştur [18].

Titanyum tozlarının BPMEİ'sinin yapıldığı başka bir çalışmada, bağlayıcı olarak polivinil alkol kullanılmıştır. Ti tozunda hacimce %20 bağlayıcı oranı kullanılmıştır [35].

3. SONUÇ

BPMEİ'nin Tablo 1'deki diğer eklemeli imalat yöntemleri ile karşılaştırılmasına bakıldığında;

- İmalat hızının daha yüksek olduğu,
- İmalat alanının daha büyük olduğu,
- Toz yataklı ergitme yöntemlerindeki gibi termal kalıntı gerilme oluşmadığı,
- İmalat ortamının koruyucu gaza ya da vakuma ihtiyaç duymadığı

görülmektedir.

BPMEİ'de kullanılan hammadde toz boyutu 50-200 mikron arasında değişmektedir. Toz boyutu katman kalınlığı değerinin belirlenmesindeki esas parametredir. Katman kalınlığı, toz boyut aralığının en büyük değerinden daha büyük olması gerekir.

BPMEİ ile ilgili önemli bir nokta, sinterleme sırasında fırın sıcaklığının doğrudan sinterleme sıcaklığına çıkarılmamasıdır. Belirli sıcaklık artış hızları seçilmeli, kullanılan bağlayıcı reçine türüne uygun olarak bazı sıcaklık değerlerinde belli sürelerle beklenmelidir. Bu sayede parça içerisinde bulunan bağlayıcı miktarı sinterleme sonrasında en az seviyeye indirilebilir. Ayrıca, fırın ortamında inert gaz kullanımı veya ortamın vakumlanması ile parçaların oksitlenmesinin engellenmesi ve buharlaşan reçinenin ortam atılması açısından gerekli görülmektedir.

BPMEİ yönteminde kullanılan imalat parametreleri ve uygulanan çeşitli son işlemler yapılan çalışmalarda farklı farklı değerlerde denenmiştir. İmalat sonrası yapılan sinterleme işlemi sonucunda parçada meydana gelen boyutsal değişimler için henüz net bir çözüm bulunabilmiş değildir.

Bu çalışmada toz hammadde, sinterleme ve bağlayıcı oranı açısından literatür çalışmaları karşılaştırılmıştır. İleride yapılacak çalışmalarda; toz serme hızı, katman kalınlığı, bağlayıcı çeşitleri, bağlayıcı kalıntı miktarları, infiltrasyon, numune yoğunlukları, çekme ve basma dayanımları, sertlik değerleri ve yüzey pürüzlülüğü üzerine de literatür taraması yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] YALÇIN, B., & Ergene, B. (2017). ENDÜSTRİDE YENİ EĞİLİM OLAN 3-B EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ VE METALURJİSİ. *SDU International Journal of Technological Science*, 9(3).
- [2] Duman, B., & Kayacan, M. C. SEÇMELİ LAZER SİNERLEME TEZGÂHI İÇİN İMALAT YAZILIMI GELİŞTİRİLMESİ. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 8(3), 27-45.
- [3] Exone., 2019. Erişim Tarihi: 10.10.2019 <https://www.exone.com/>
- [4] Mouritz, A. P. (2012). *Introduction to aerospace materials*. Elsevier.
- [5] Yin, X., Travitzky, N., & Greil, P. (2007). Near-Net-Shape Fabrication of Ti₃AlC₂-Based Composites. *International journal of applied ceramic technology*, 4(2), 184-190.
- [6] Myers, K., Juhasz, M., Cortes, P., & Conner, B. (2015). Mechanical modeling based on numerical homogenization of an Al₂O₃/Al composite manufactured via binder jet printing. *Computational Materials Science*, 108, 128-135.
- [7] Tuffile, C. D., Lemke, H., & Mack, P. E. (2016). U.S. Patent Application No. 15/014,637.
- [8] Desktop Metal, 2019. Erişim Tarihi: 1.10.2019 <https://www.desktopmetal.com/>
- [9] EOS., 2019. Erişim Tarihi: 10.10.2019 <https://www.eos.info/en>
- [10] SLM Solutions, 2019. Erişim Tarihi: 10.10.2019 <https://slm-solutions.com/>
- [11] Digital Metal, 2019. Erişim Tarihi: 10.10.2019 <https://digitalmetal.tech/>
- [12] XJet, 2019. Erişim Tarihi: 10.10.2019 <https://xjet3d.com>
- [13] Arcam, 2019. Erişim Tarihi:10.10.2019. <http://www.arcam.com/>
- [14] Hrabe, N., Gnäupel-Herold, T., & Quinn, T. (2017). Fatigue properties of a titanium alloy (Ti-6Al-4V) fabricated via electron beam melting (EBM): Effects of internal defects and residual stress. *International Journal of Fatigue*, 94, 202-210.
- [15] Lorenz, A.M., Sachs, E.M., Allen, S.M., 2004. Techniques For Infiltration of a Powder Metal Skeleton by a Similar Alloy With Melting Point Depressed, United States Patent, No: US 6,719,948 B2 dated 13.04.2004.
- [16] Miyanaşi, H., Yang, L., 2016. Equilibrium Saturation in Binder Jetting 3D Printing Process: Theoretical Model vs. Experimental Observations.
- [17] Enneti, R.K., Prough, K.C., Wolfe, T.A., Klein, A., Studley, N., Trasorras, J.L., 2018. Sintering of WC-12%Co Processed by Binder Jet 3D Printing (BJ3DP) Technology, *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 71, 28-35.
- [18] 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.
- [19] Vangapally, S., Agarwal, K., Sheldon, A., & Cai, S. (2017). Effect of Lattice Design and Process Parameters on Dimensional and Mechanical Properties of Binder Jet Additively Manufactured Stainless Steel 316 for Bone Scaffolds. *Procedia Manufacturing*, 10, 750-759.
- [20] Tang, Y., Zhou, Y., Hoff, T., Garon, M., & Zhao, Y. F. (2016). Elastic modulus of 316 stainless steel lattice structure fabricated via binder jetting process. *Materials Science and Technology*, 32(7), 648-656.
- [21] FRYKHOLM, R., TAKEDA, Y., ANDERSSON, B. G., & CARLSTRÖM, R. (2016). Solid state sintered 3-D printing component by using inkjet (binder) method. *Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy*, 63(7), 421-426.

- [22] Johnston, S., Frame, D., Anderson, R., & Storti, D. Strain Analysis of Initial Stage Sintering of 316L SS Three Dimensionally Printed (3DP™) Components.
- [23] 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.
- [24] Mostafaei, A., Toman, J., Stevens, E. L., Hughes, E. T., Krimer, Y. L., & Chmielus, M. (2017). Microstructural evolution and mechanical properties of differently heat-treated binder jet printed samples from gas-and water-atomized alloy 625 powders. *Acta Materialia*, 124, 280-289.
- [25] Bai, Y., Williams, C.B., 2015. An Exploration of Binder Jetting of Copper. *Rapid Prototyping Journal*, 21(2), 177-185.
- [26] Cordero, Z. C., Siddel, D. H., Peter, W. H., & Elliott, A. M. (2017). Strengthening of ferrous binder jet 3D printed components through bronze infiltration. *Additive Manufacturing*, 15, 87-92.
- [27] 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*, 1, 251-262.
- [28] Turker, M., Godlinski, D., & Petzoldt, F. (2008). Effect of production parameters on the properties of IN 718 superalloy by three-dimensional printing. *Materials characterization*, 59(12), 1728-1735.
- [29] Gülsoy, H. Ö. (2008). Production of injection moulded 316L stainless steels reinforced with TiC (N) particles. *Materials Science and Technology*, 24(12), 1484-1491.
- [30] Do, T., Bauder, T. J., Suen, H., Rego, K., Yeom, J., & Kwon, P. (2018, June). Additively Manufactured Full-Density Stainless Steel 316L with Binder Jet Printing. In *ASME 2018 13th International Manufacturing Science and Engineering Conference* (pp. V001T01A017-V001T01A017). American Society of Mechanical Engineers.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] Brecht, J.F., Clark, S., Gilchrist, G., 2006. Three Dimensional Printing Material System and Method, No: US 7,087,109 B2 dated 08.08.2006.
- [34] Ren, L., Zhou, X., Song, Z., Zhao, C., Liu, Q., Xue, J., & Li, X. (2017). Process parameter optimization of extrusion-based 3D metal printing utilizing PW-LDPE-SA binder system. *Materials*, 10(3), 305.
- [35] Salehi, M., Gupta, M., Maleksaeedi, S., & Sharon, N. M. L. (2018, January). Inkjet based 3D additive manufacturing of metals. *Materials Research Forum LLC*.
- [36] Meteyer, S., Xu, X., Perry, N., & Zhao, Y. F. (2014). Energy and material flow analysis of binder-jetting additive manufacturing processes. *Procedia Cirp*, 15, 19-25.
- [37] Bai, Y., Wagner, G., Williams, C. B., 2015. Effect of bimodal powder mixture on powder packing density and sintered density in binder jetting of metals. In *2015 Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 62, 758-771.
- [38] Redwood, B., 2019. Additive Manufacturing Technologies: An Overview. Erişim Tarihi: 10.10.2019. <https://www.3dhubs.com/knowledgebase/additive-manufacturing-technologies-overview>
- [39] Kayacan, M. C., DELİKANLI, Y. E., Duman, B., & Özsoy, K. (2018). Ti6Al4v toz alaşımı kullanılarak SLS ile üretilen geçişli (değişken) gözenekli numunelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(1).