



ULUBORLU MESLEKİ BİLİMLER DERGİSİ (UMBD)

Uluborlu Journal of Vocational Sciences

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

METAL BAĞLAYICI PÜSKÜRTMELİ EKLEMELİ İMALAT MAKİNE TASARIMI VE İMALATI

Yusuf Sacid BARDAKÇI^{1*}, Mehmet Cengiz KAYACAN¹, Mert GÜRGEN¹

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye.

*Sorumlu Yazar: yusufbardakci1@gmail.com

(Geliş/Received: 27.02.2022; Kabul/Accepted: 28.06.2022)

ÖZET: Teknolojinin ilerlemesi ile tüm dünyada başta imalat sektörü olmak üzere birçok alanda yeni gelişmeler yaşanmaktadır. Bu gelişmeler arasında son yıllarda üzerine birçok araştırmaların yapıldığı katman katman parça imalatı yapan Eklemeli İmalat (Eİ) yöntemi de yer almaktadır. Eİ bu çerçevede parça tasarımı ve imalatı için birçok çeşitli teknolojiler sunar. Bağlayıcı püskürtme yöntemi de bu teknolojilerden biridir. Bu alan üzerinde malzeme çalışmasından cihaz imalatına kadar birçok farklı çalışmalar söz konusudur. Bağlayıcı püskürtme yöntemi ile metal parça imalatı yapan bir cihaz ülkemizde neredeyse bulunmamaktadır ve yurtdışı maliyetleri ise oldukça yüksektir. Bu çalışma kapsamında bu sorunlar göz önüne alınarak bu yöntemle imalat yapan bir Eİ cihazının tasarımı ve imalatı yapıldı.

Yapılan bu çalışmada mürekkep püskürtmeli yazıcılardan ilham alınarak bağlayıcı püskürtme yöntemi ile çalışan bir Eİ cihazının tasarımı ve prototip imalatı yapılmıştır. Bu kapsamda ilk olarak mürekkep püskürtmeli yazıcıların sisteme nasıl entegre edilebileceği, sistemin tasarımı ve imalat aşamaları göz önünde bulundurularak tasarlandı. Daha sonrasında imalat tablası, imalat zarfı, toz serme sistemi ve cihazın ana tasarımı gerçekleştirildi ve Arduino programı üzerine yazılan kod ile bu sistemlerin hareketleri sağlandı. Son olarak tasarım kriterleri göz önünde bulundurularak bağlayıcı püskürtmeli metal Eİ cihazının imalatı yapıldı.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli İmalat, Bağlayıcı Püskürtme, Metal, Tasarım, İmalat.

METAL BINDER JETTING ADDITIVE MANUFACTURING MACHINE DESIGN AND PROTOTYPE MANUFACTURING

ABSTRACT: The global technological development has led to new innovations across many different industries, especially the manufacturing industry. One of these innovations is the Additive Manufacturing (AM) technique, which manufactures parts layer by layer and has been the subject of extensive research in recent years. A wide variety of technologies are available through AM for the design and production of components. The binder jetting method is one of these technologies. There are many different studies on this field, from material studies to device manufacturing. A device that uses the binder jetting method to manufacture metallic parts is almost non-existent in our country, and its costs abroad are quite high. Within the scope of this study, considering these problems, an AM device that manufactures with this method was designed and manufactured.

The design and prototype of an AM device using the binder jetting technique were manufactured in this study with inspiration from inkjet printers. In this context, firstly, how the inkjet printers can be integrated into the machine was designed, then the machine was designed by considering the manufacturing stages. After that, the basic design of the production table, production envelope, powder spreading system, and machine was completed, and the movements of these systems were programmed using Arduino. Finally, considering the design criteria, the metal binder jetting AM device was produced.

Keywords: Additive Manufacturing, Binder Jetting, Metal, Design, Production.

1. GİRİŞ

Eklemlerli İmalat (Eİ), geleneksel imalat yöntemlerinin aksine birbirini takip eden pek çok teknik kullanılmadan, nesnenin 3 boyutlu tasarım verilerinden dilimlenerek katmanlar halinde serbestçe imal edilebildiği bir imalat yöntemidir [1]. Eİ başlangıçta yalnızca hızlı prototipleme [2] için kullanılmasına rağmen, artık işlevsel parçaları üretebilme yeteneğine sahiptir [3, 4]. Geleneksel imalat süreçlerinin sınırlamalarını ortadan kaldırma yeteneğiyle birlikte ürün ağırlığını, malzeme kullanımını ve nakliye kayıplarını azaltan gelişen bir imalat teknolojisidir.

Eklemlerli imalat ASTM'ye göre yedi ana başlık altında sınıflandırılmıştır [5]. Bu yedi kategorideki yöntemlerden biri de bağlayıcı püskürtme yöntemidir. İlk olarak "3D Baskı" olarak adlandırılan bağlayıcı püskürtme yöntemi, metal, seramik, polimer veya kompozit gibi birçok farklı malzemenin kullanılmasına imkân sağlamaktadır [6]. İmalat tablası üzerine serilebilecek her türlü toz olduğu sürece neredeyse tüm parçalar üretilebilir ve her malzemeye kolayca uyum sağlar [7]. Böylece diğer Eİ yöntemlerine göre bir hayli geniş bir malzeme yelpazesi sunmaktadır. Bu yöntemle parça imalatı aşağıdaki işlem basamaklarını takip etmektedir [8, 9];

- Toz malzeme, genellikle silindir şeklinde olan bir serici ile imalat tablasına serilir.
- Bağlayıcı püskürtme kafası parça geometrisine göre bağlayıcıyı püskürtür.
- İmalat tablası katman kalınlığı kadar alçalır.
- Bir önceki katman üzerine yeni bir toz katmanı serilir.
- Tüm parçanın imalatı yapıldıkça kadar bu işlem basamakları tekrarlanır ve parça imalatı tamamlanır.

Bu işlemlerin ardından ham mukavemete sahip parça elde edilir. Elde edilen bu parçanın nihai bir ürün olarak kullanılabilmesi veya daha mukavemetli bir yapı elde etmesi için kütleme, sinterleme ve infiltrasyon gibi son işlemler gerektirmektedir [6].

Bağlayıcı püskürtmeli metal eklemeli imalat yönteminde parçanın yeterli mukavemete ulaşması için imalat işleminden sonra sinterleme işlemi gereklidir. Bu imalat sonucunda literatürde "green density" olarak adlandırılan yaklaşık %44-60 ham yoğunluğa sahip metal parçalar elde edilmektedir [10, 11]. Daha sonrasında bu parçalar sinterlenerek son ürün haline dönüştürülmeleri sağlanır. Sinterleme işlemi uygulandıktan sonra parça yoğunluğu %55-98 arasında değişmektedir [12, 13]. Sinterleme işleminin bitmesiyle birlikte elde edilen parçaların yoğunluğu malzeme cinsine, sinterleme süresine, sinterleme sıcaklığına, parça büzülmesine, sinterleme ve toz tanecik boyutuna bağlı olarak değişmektedir.

Metal eklemeli imalat cihazlarında oldukça pahalı ve yüksek üretim maliyetleri söz konusudur. Bağlayıcı püskürtme yöntemini kullanan Eİ cihazları incelediğinde diğer Eİ yöntemlerinde olduğu gibi yüksek maliyetli lazer, ışın vb. enerji cihazlarına ihtiyaç duyulmamaktadır. Ayrıca bağlayıcı püskürtme yöntemi çalışma prensibi olarak geleneksel mürekkep püskürtmeli yazıcı yöntemine benzemektedir. Aradaki fark ise birinde sadece kâğıt üzerine iki boyutlu yazdırma işlemi yapılırken diğer işlemde her çeşit toz üzerine bağlayıcı püskürtülerek 3 boyutlu parça imalatı yapılmaktadır. Buradan da yola çıkılarak diğer metal Eİ cihazlarına kıyasla çok daha uygun maliyetli bir bağlayıcı püskürtmeli metal eklemeli imalat cihazının tasarımı ve imalatı yapılmıştır.

Bağlayıcı püskürtmeli metal eklemeli imalat yöntemi destek yapısına ihtiyaç duymadığı için bu yöntemle parçaların seri üretimine de olanak sağlamaktadır [16]. Örneğin 40*40 cm²'lik bir

imalat platformuna 10 cm yüksekliğinde 10 adet parça yerleştirilerek ve bu cihazın üretim yüksekliğinin 45 cm olduğu varsayılarak tek seferde toplamda 40 adet parça üretmek mümkündür. Bağlayıcı püskürtme yönteminin diğer avantajlarından biri ise diğer metal eklemeli imalat cihazlarında olduğu gibi koruyucu atmosfer ortamı, yüksek maliyetli enerji cihazları (lazer) gerektirmemesi ve diğer Eİ yöntemlerine göre nispeten daha ucuz olmasıdır.

Başlıca metal eklemeli imalat cihazları incelendiğinde en bilinen yöntemler sırasıyla şu şekildedir; toz yatağında birleştirme (SLM, EBM), doğrudan enerji depolama (LENS) ve bağlayıcı püskürtme (BP) yöntemleridir [14]. BP yöntemi dışındaki metal Eİ yöntemlerinde parçanın imalatı sırasında bir enerji kullanımı (lazer veya elektron ışını kaynaklı) söz konusudur. Bu enerji girdisi metal tozları üzerinde ısınma ve soğumaya neden olarak parça içerisinde kalıntı gerilmeler oluşturmaktadır [14, 15]. BP ile parça imalatında sisteme bir enerji girdisi söz konusu olmadığı için kalıntı gerilme gibi bir dezavantaj söz konusu değildir. Dolayısıyla bu yöntem diğer imalat yöntemlerine göre büyük bir avantaj sağlamaktadır. Metal eklemeli imalat yöntemleriyle (EOS, Arcam ve Exone) parça üreten firmaların ürettikleri mevcut cihazların karşılaştırması Tablo 2'de verilmiştir. Anlaşılacağı üzere BJ yöntemi diğer metal Eİ yöntemlerine göre daha büyük imalat hacmi ve daha hızlı imalat sunmaktadır [16].

Çizelge 1. Metal eklemeli imalat yöntemlerinin karşılaştırılması [16].

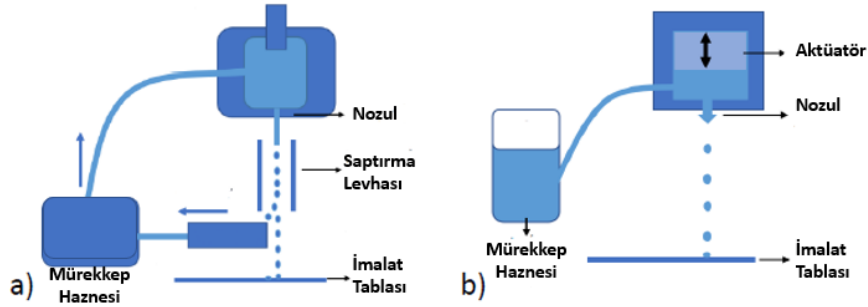
Yöntem	Son İşlem	Kalıntı Gerilme	İmalat hızı (cm ³ /h)	Destek Gereksinimi	İmalat Hacmi (cm)
SLM	+	+	88-171	+	40*40*40
EBM	+	+	55-80	+	25*25*38
BJ	+	-	125-8200	-	80*50*40

2. MATERYAL VE METOT

Yapılan bu çalışmada mürekkep püskürtmeli yazıcılardan ilham alınarak bağlayıcı püskürtme yöntemi ile çalışan bir Eİ cihazının prototip imalatı yapılmıştır. Bağlayıcı püskürtme yönteminde gerek yüksek maliyetli enerji kaynağına ihtiyaç duyulmaması gerekse de kapalı inert gaz ortamı gibi kompleks yapılar gerektirmemesi göz önüne alınarak Eİ cihazının öncelikle tasarım parametreleri belirlenmiş ve daha sonrasında tasarımı yapılarak imalatı gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında ilk etapta farklı çalışmalarda kullanılmış mürekkep püskürtmeli yazıcıların mürekkep püskürtme kafaları tercih edilmiş ve bu yazıcıların modifikasyona uygun olduğu gözlemlenmiştir [17, 18]. Böylece farklı yazıcı markalarının bağlayıcı püskürtme kafaları incelendikten sonra bağlayıcı püskürtmeli Eİ cihazı için Epson L310 marka yazıcının bağlayıcı püskürtme kafası tercih edilmiştir. Tasarımı düşünülen cihaz üzerinde bağlayıcı püskürtme sisteminin, imalat tablasının ve toz serme sisteminin hareketleri için ise step motorlar kullanıldı. Püskürtme kafasına bilgisayar üzerinden yazdırma talimatı gönderilerek katman katman püskürtme işlemi yapıldı.

BP ile imalat sürecindeki en önemli parçalardan biri "inkjet yazıcı kafaları" olarak bilinen bağlayıcı püskürtme kafalarıdır. Baskı kafası teknolojileri, sürekli ve isteğe bağlı olarak püskürtme olmak üzere ikiye ayrılır. Şekil 1'de görüldüğü üzere bunlardan ilki olan sürekli püskürtme teknolojisi, baskı işlemi bitene kadar nozulu sürekli olarak besler ve fazla mürekkebi elektrik akımı ile yön değiştirir ve tekrar besleyerek kullanır. [19]. İkinci sistem, isteğe bağlı bırakma, termal ve piezoelektrik baskı kafaları olarak 2 ye ayrılmaktadır. [20]. Bu sistemler, piyasadaki ticari yazıcılara bakıldığında en yaygın baskı kafaları olan ve Eİ uygulamalarına en uygun olan piezoelektrik yazıcı kafalarıdır [19, 20]. Metal Eİ cihazının imalatı üzerine yapılan

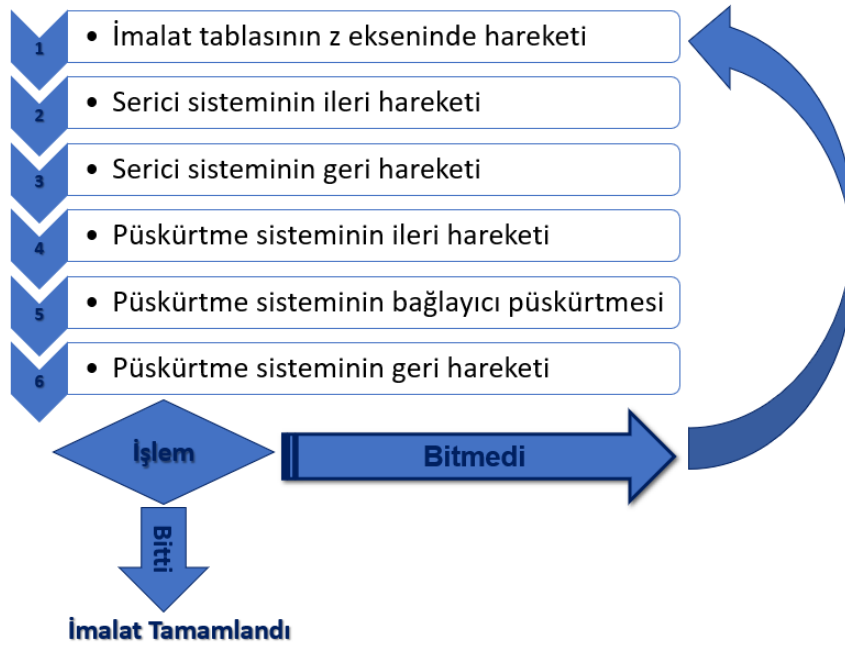
bir çalışmada geleneksel yazıcıların mürekkep püskürtme kafasını kullandıkları ve başarılı bir şekilde uyarıldığı gözlemlenmektedir [17].



Şekil 1. Baskı kafası teknolojileri a) Sürekli Püskürtme b) Talep Üzerine Bırakma [19].

Tüm parametreler belirlendikten sonra cihazın bilgisayar ortamında tasarımı yapıldı ve Çizelge 2’de görüldüğü gibi sistem hareketlerini sağlayan imalat algoritması yazıldı. Bu algoritmayla birlikte cihaz üzerinde bulunan step motorların hareketleri Arduino programı ile sistemin hareketini sağlayacak kod yazılarak cihazın imalat aşamasına geçildi.

Çizelge 2: Cihaz üzerindeki sistemlerin hareketlerinin imalat algoritması.



Bu yöntemle parça imalatında genellikle krom, kobalt, paslanmaz çelik tozları tercih edilmektedir [21]. Yapılan bu cihazın tüm işlemleri tamamlandıktan sonra numune imalatı için 316L paslanmaz çelik tozu kullanılmıştır. Kullanılan toz tanecik boyut aralığı 20 ila 53 mikrondur. Buradan da yola çıkılarak imalat için 20 mikron hassasiyete sahip step motor ile imalat katman kalınlığının en az 53 mikron olması gerekmekte ve imalatlar da ona göre yapılmıştır. Ayrıca Para-Toluen Sulfonik Asit (PTSA) tozunun furfural alkol ile tepkime vererek bağlayıcı özellik gösterdiği ve tozu bir arada tuttuğu gözlenmiştir [22]. Böylece PTSA ile 316L tozu ağırlıkça karıştırılarak imalat için uygun toz hazır hale getirildi ve bağlayıcı olarak da furfural alkol püskürtülerek 10 mm çapında 100 mm boyunda silindirik numuneler İmal edildi. Tasarımı yapılan numuneler program yardımıyla dilimlendi ve daha sonrasında

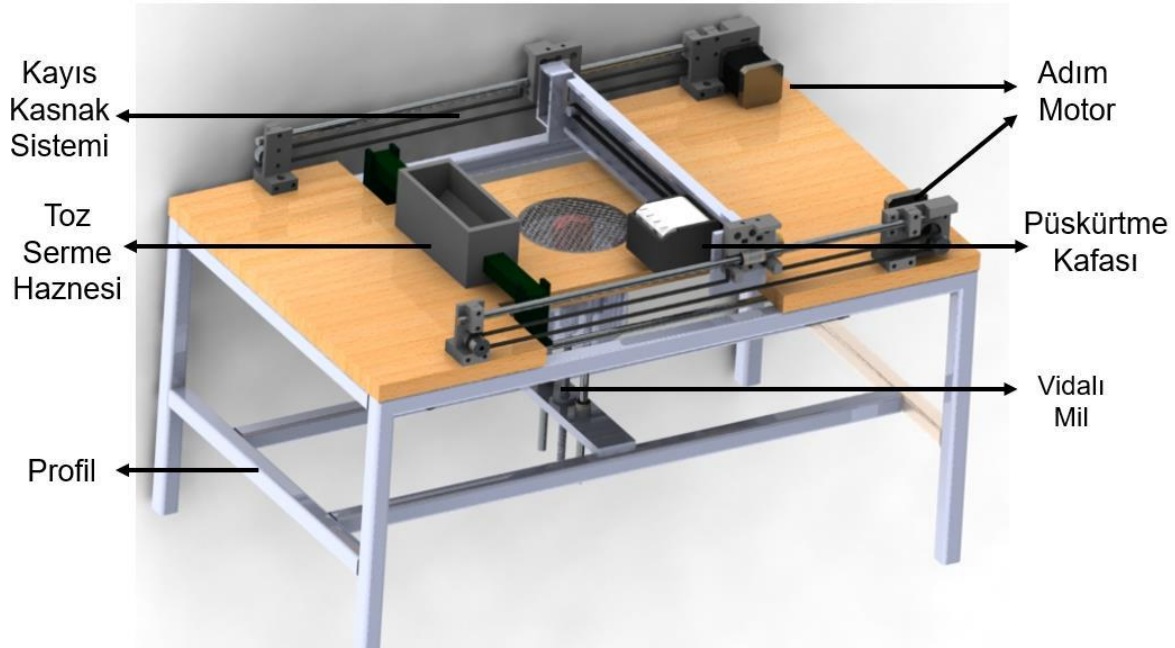
mürekkep püskürtmeli yazıcıdan söktüğümüz yazıcı kafasının algılayabileceği sayfa düzeninde her katman bir sayfaya denk gelecek şekilde imalat için hazır hale getirildi.

3. DENEYSEL BULGULAR

Bu çalışma kapsamında bağlayıcı püskürtme yöntemini kullanan metal Eİ cihazının tasarımı ve imalatı yapıldı. Yapılan bu cihaz bir prototip teşkil etmesi dolayısıyla ticari olarak bu yöntemi kullanan cihazlara kıyasla daha düşük imalat hacmine sahiptir. Bu kapsamda imalatı yapılan bu Eİ cihazı üzerinde bulunan bağlayıcı püskürtme sisteminin, imalat tablasının, toz serme sisteminin birbirleriyle ilişkisi ve kontrolleri sağlanarak cihaz çalıştırıldı.

3.1 Bağlayıcı Püskürtmeli Makine Tasarımı

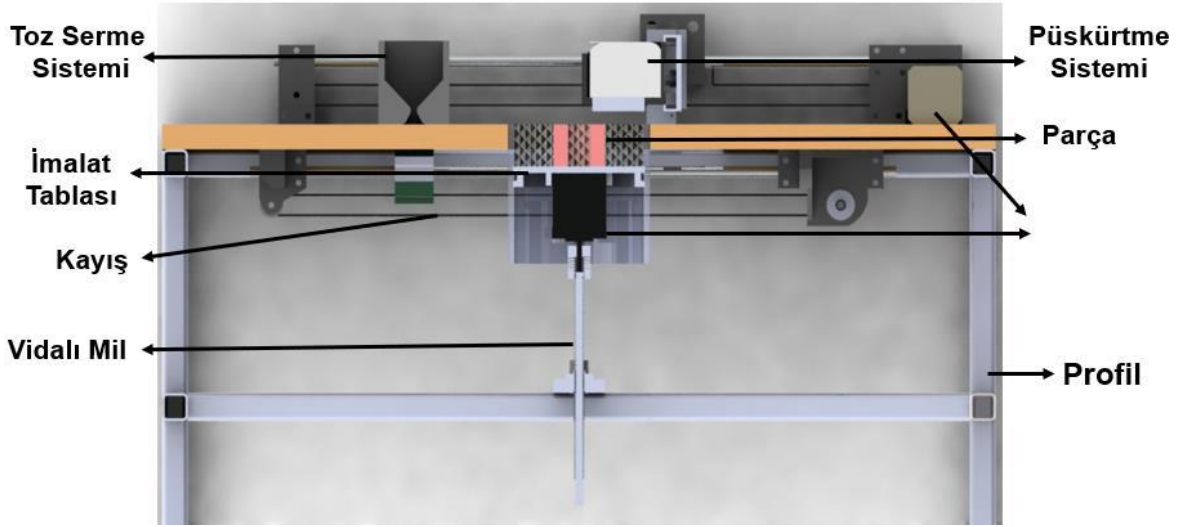
Yapılan çalışma sonucunda bilgisayar destekli tasarım ile Şekil 2’de görüldüğü gibi üzerinde imalat zarfını, bağlayıcı püskürtme sistemini, step motorları, toz serme sistemini barındıracak şekilde tasarlandı. Böylece dış boyutları 42*40*64 cm olan metal hammadde kullanarak eklemeli imalat yapabilecek bir makine tasarımı yapıldı.



Şekil 2. Tasarımı yapılan BPMEİ cihazı.

3.1.1. Ana Gövde Tasarımı

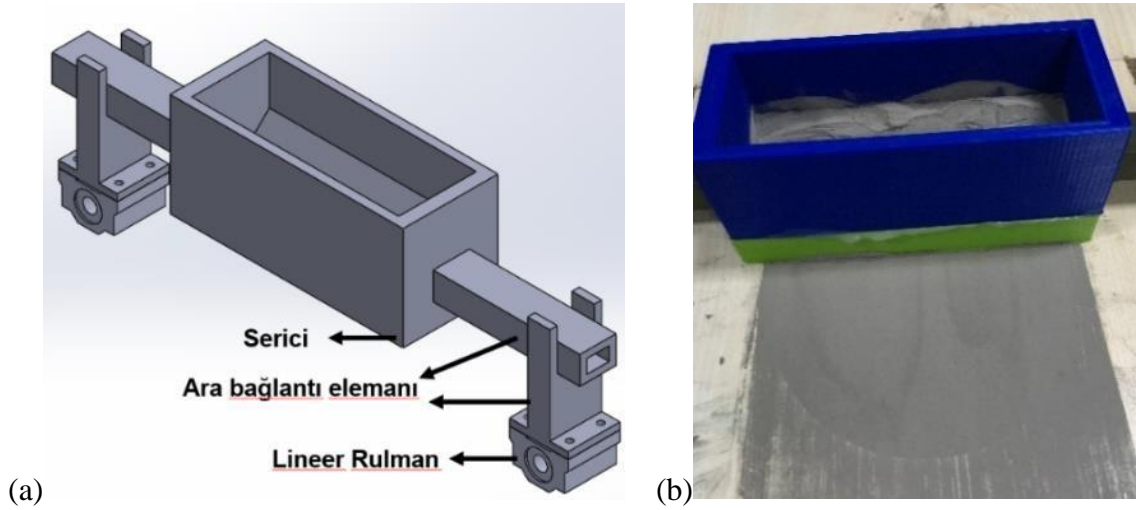
Cihazın ana gövde tasarımı yapılırken FDM tabanlı bir masaüstü Eİ cihazı boyutlarına yakın olacak şekilde tasarımı düşünüldü. Böylece hem cihazın taşınması hem de yer kaplamayacak, gerektiğinde küçük ofis ortamında bile imalat sağlayabilecek. Ayrıca eklemeli imalatın en büyük avantajlarından biri olan malzeme tasarrufu sağlanarak kompakt bir şekilde cihaz Şekil 3’de görüldüğü gibi tasarlanmıştır.



Şekil 3. Tasarımı yapılan cihazın kesit görüntüsü.

3.1.2. Toz Serme Sistemi Tasarımı ve İmalatı

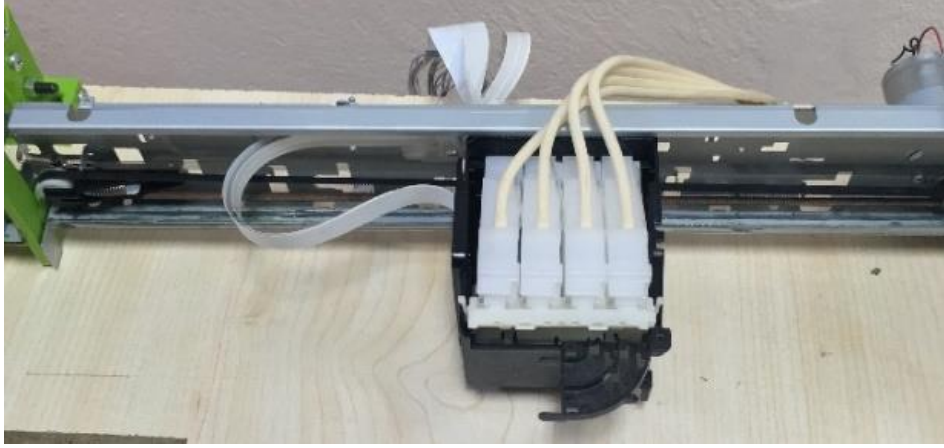
Tasarımı yapılan cihaz üzerinde literatürde silindir, bıçak ve besleme kanallı tipleri mevcut olan toz serme sistemlerinden besleme kanallı tip olarak bilinen toz serme sisteminin tasarımı ve imalatı Şekil 4'te görüldüğü gibi FDM tabanlı bir Eİ cihazı ile imal edildi [23]. Toz serme sistemi her iki tarafta bulunan lineer rulmanlar üzerinde hareketini kayış kasnak mekanizması ile çift shaftlı step motordan alacak şekilde tasarlandı. Böylece tek seferde 1740 gram 316L paslanmaz çelik tozu depolayarak ayrı bir toz besleme sistemine ihtiyaç duymadan imalat işlemi boyunca aralıksız toz serme işlemi yapabilecektir.



Şekil 4. Toz serme sistemi a) Toz Serme sistemi b) İmalat tablasına toz serme işlemi

3.1.2. Bağlayıcı Püskürtme Sistemi Tasarımı

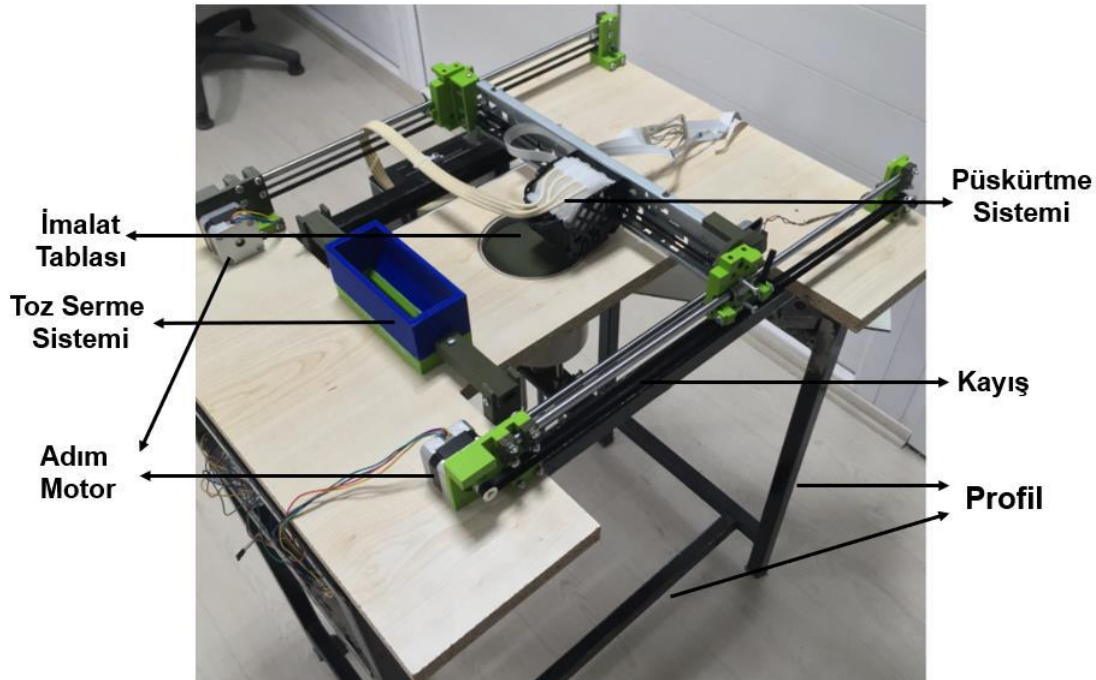
Bağlayıcı püskürtme sistemi için mürekkep püskürtmeli yazıcılarda bulunan mürekkep püskürtme kafasının sisteme entegrasyonu Şekil 5'te görüldüğü gibi gerçekleştirildi. Sistemin ileri geri hareketi step motorla sağlanırken yatay yöndeki hareketi ise püskürtme kafası düzeneği üzerinde bulunan motorla sağlandı. Püskürtme sisteminin imalat tablası üzerinde hareket ettirilerek sistemde sorunsuz şekilde çalıştırılması sağlandı.



Şekil 6. Epson yazıcıya ait bağlayıcı püskürtme kafasının montajlanmış hali.

4. SONUÇLAR

Tasarımı ve imalatı yapılan cihaz üzerindeki toz serme sistemi ve imalat tablası başta olmak üzere birçok parçanın imalatı FDM tabanlı Eİ cihazı ile PLA (PoliLaktik Asit) malzemesi kullanılarak imal edilmiştir. Böylece hem Eİ cihazlarının kendini imal edebildiği hem de daha hızlı parça temininin ve üretiminin yapılabildiği de gözlemlendi. Ayrıca hızlı bir şekilde parça temini sağlandığı için tasarım toleransları da hızlı bir şekilde düzenlenebilmektedir. Şekil 6'da imalatı gerçekleştirilen bütün parçaların montajlanarak bağlayıcı püskürtmeli metal eklemeli imalat makinesinin son hali görülmektedir.



Şekil 6. İmalatı yapılan Bağlayıcı Püskürtmeli Metal Eklemeli İmalat Makinesi.

Yapılan bu çalışmada bağlayıcı püskürtme yöntemini kullanan metal eklemeli imalat makinesinin tasarımı ve imalatı başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Cihaz üzerinde bulunan imalat tablasının, toz serme sisteminin ve bağlayıcı püskürtme sisteminin hareketleri step motorlar ile sorunsuz bir şekilde sağlandı. Seçilen step motorlar 20 mikron hassasiyete kadar hareketleri gerçekleştirilmiştir. Böylece istenilen katman kalınlığına ulaşılmış ve sorunsuz bir

şekilde katman kalınlığı kadar 316L paslanmaz çelik tozu Şekil 4b’de görüldüğü gibi serilerek imalata hazır bağlayıcı püskürtmeli metal eklemeli imalat makine tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir.

Cihazın imalat aşaması bittikten sonra cihazla imal edilen parçalarda ortalama olarak %55 seviyelerinde ham yoğunluğa sahip parçalar üretildi. Literatürde ise %40-60 arasında ham yoğunlukta parçaların imal edildiği gözlenmektedir. Literatüre bakıldığında sinterleme işlemi sonrasında %65-95 yoğunluk aralığında numune imalatı sağlanırken en fazla %62 mertebelerinde yoğunluğa sahip numuneler elde edilmiştir [11, 23]. Buradan da görüldüğü üzere sinterleme sonrası istenilen yoğunluk değerlerine ulaşılamamış fakat sinterleme işleminden önceki ham yoğunluk değerleri literatürdeki sonuçlara göre uyum sağlamaktadır. Sinterleme esnasında inert gaz ve vakum ortamının olmadığı için parçalarda istenilen yoğunluk değerlerine ulaşamadığı öngörülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FYL-2018-6720 proje numarası ile finansal olarak desteklenmiştir.

KAYNAKÇA

- [1] Philbeck, T., and Davis, N. (2018). “The fourth industrial revolution”. *Journal of International Affairs*, 72(1), 17-22.
- [2] Lemu, H. G. (2016/11). Beyond Rapid Prototyping: Study of prospects and challenges of 3D printing in functional part fabrication, : 138-143.
- [3] Petrick, I. J. and Simpson, T. W. (2013). 3D Printing Disrupts Manufacturing: How Economies of One Create New Rules of Competition, *Research technology management* 56 : 12-16.
- [4] Thompson, M. K.; Moroni, G.; Vaneker, T.; Fadel, G.; Campbell, R. I.; Gibson, I.; Bernard, A.; Schulz, J.; Graf, P.; Ahuja, B. and Martina, F. (2016). Design for Additive
- [5] ASTM F2792-12a, 2012. Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, ASTM, Philadelphia.
- [6] Utela, B.R., Storti, D., Anderson, R.L., and Ganter, M., (2010). “Development process for custom three-dimensional printing (3dp) material systems”. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 132 / 011008-1
- [7] Michaels, S., Sachs, E. M., and Cima, M. J., (1992). “Metal parts generation by three-dimensional printing”. *Solid Freeform Fabrication Symposium*, 244-250.
- [8] González, F. S., 2017. Re-design, manufacturing and assembly of a ceramic delta 3D printer. Aalto University, Industrial Engineering, Master’s Thesis, 67, Finland.
- [9] Gürgen, M., Kayacan, C. Bağlayıcı Püskürtmeli Metal Eklemeli İmalatta Kullanılan Parametreler. *Uluborlu Mesleki Bilimler Dergisi*, 3(1), 19-27.
- [10] Lores, A., Azurmendi, N., Agote, I., and Zuza, E. (2019). “A review on recent developments in binder jetting metal additive manufacturing: materials and process characteristics”. *Powder Metallurgy*, 62(5), 267-296.
- [11] Stevens, E., Schloder, S., Bono, E., Schmidt, D., and Chmielus, M. (2018). “Density variation in binder jetting 3D-printed and sintered Ti-6Al-4V”. *Additive Manufacturing*, 22, 746-752.
- [12] Paranthaman, M. P., Shafer, C. S., Elliott, A. M., Siddel, D. H., McGuire, M. A., Springfield, R. M., and Ormerod, J. (2016). “Binder jetting: a novel NdFeB bonded magnet fabrication process”. *Jom*, 68(7), 1978-1982.

- [13] Mostafaei, A., Stevens, E. L., Hughes, E. T., Biery, S. D., Hilla, C., and Chmielus, M., (2016). "Powder bed binder jet printed alloy 625: Densification, microstructure and mechanical properties". *Materials & Design*, 108, 126-135.
- [14] Patterson, A. E., Messimer, S. L., & Farrington, P. A. (2017). Overhanging features and the SLM/DMLS residual stresses problem: Review and future research need. *Technologies*, 5(2), 15.
- [15] Mukherjee, T., Zhang, W., and DebRoy, T. (2017). "An improved prediction of residual stresses and distortion in additive manufacturing". *Computational Materials Science*, 126, 360-372.
- [16] Nastac, M., Klein, R. L. A., and ExOne, I. (2017). "Microstructure And Mechanical Properties Comparison Of 316l Parts Produced By Different Additive Manufacturing Processes". *Solid Freeform Fabrication Symposium*, 28, 332-341.
- [17] Torabi, P., Petros, M., Khoshnevis, B., 2014. Calibration of a Piezo-Electric Printhead in the Selective Inhibition Sintering (SIS) Process for Fabrication of High-Quality Metallic Parts. In
- [18] Schmitt, C.T., 2016. Low-Cost Inkjet Process for 3-D Printing, Undergraduate Honors Theses, 53, University of Arkansas.
- [19] Derby, B., (2010). "Inkjet printing of functional and structural materials: fluid property requirements, feature stability, and resolution". *Annual Review of Materials Research*, 40, 395-414.
- [20] Cheng, Y. L., Chang, C. H., & Kuo, C. (2020). Experimental study on leveling mechanism for material-jetting-type color 3D printing. *Rapid Prototyping Journal*.
- [21] Salehi, M., Gupta, M., Maleksaeedi, S., Sharon, N. M. L., 2018. Inkjet Based 3D Additive Manufacturing of Metals. *Materials Research Forum LLC*, 157, Singapore.
- [22] Nicollin, A., Li, X., Girods, P., Pizzi, A., Rogaume, Y., 2013. Fast pressing composite using tannin-furfuryl alcohol resin and vegetal fibers reinforcement, 1(4), 311-316.
- [23] Schueren B.V, Kruth J.P., 1995. Powder deposition in selective metal powder sintering. *Rapid Prototyping Journal*, 1, 23-31.
- [24] 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.