

Çok malzemeli 3B baskı platformunun geliştirilmesi: II- robotik ve ekstrüzyon sistemi

Safar POURABBAS^{1,*}, Ramazan YAMAN², Gülşen YAMAN³

¹*İstanbul Gelişim Üniversitesi Müh.-Mim. Fak. Mekatronik Müh. Böl., İstanbul.*

Balıkesir Üniversitesi Müh. Fak. Endüstri Müh. Böl. Balıkesir.

³*Balıkesir Üniversitesi Müh. Fak. Makine Müh. Böl., Balıkesir.*

Geliş Tarihi (Received Date): 17.07.2025

Kabul Tarihi (Accepted Date): 02.11.2025

Öz

Bu çalışmada yeni bir üç boyutlu (3B) baskı yöntemi önerilmektedir. Önerilen yöntemle metal parçaların 3B baskı yoluyla üretilebileceği öngörülmektedir. Yöntemin temelinde, metal bilyelerin yan yana yerleştirilerek metal parçaların oluşturulması ve bu bilyelerin kil esaslı bir duvar ile çevrelenerek yerlerinde sabitlenmesi bulunmaktadır. Her 3B baskı platformu üç ana unsurdan oluşur: (i) 3B dilimleme yazılımı, (ii) yazıcı robotu ve (iii) mikrodenetleyici ürün yazılımı. Bu çalışmada ilk iki unsur başlangıçtan itibaren geliştirilmiş; mikrodenetleyici için ise G-code dosyalarını okumak, yorumlamak ve yürütmek amacıyla Marlin yazılımı kullanılmıştır. Önerilen 3B baskı platformu, kil ekstrüderi ve metal bilye ekicisi olmak üzere iki temel bileşenle donatılmıştır. Metal bilyelerin yerleştirilme prensibi incelenmiş; 3B baskı robotu, kil ekstrüderi ve metal bilye ekim mekanizmasının tasarım ve üretim süreçleri sunulmuştur. Ayrıca kilin hazırlanması ve ekstrüder odasına yüklenmesi açıklanmış, kil ile üretilen 3B baskı modellerine ait örnekler verilmiştir. Bunun yanı sıra metal bilye ekimi gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: 3B baskı platformu, metal 3B baskı, metal bilyelerle 3B baskı, kil 3B baskı

Developing a multi-material 3D printing platform: II- the robotics and extruding system

Abstract

In this study, a novel three-dimensional (3D) printing method is proposed. The proposed technique aims to enable the 3D printing of metal parts. The method is based on placing

*Safar POURABBAS, spourabbas@gelisim.edu.tr, <https://orcid.org/0009-0008-4983-9436>

Ramazan Yaman, ramazan.yaman@atlas.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-4115-1417>

Gülşen Yaman, gyaman@balikesir.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-9530-3677>

metal spheres side by side to form the desired structure, while a clay wall is built around them to keep the spheres in place. Every 3D printing platform consists of three main components: (i) slicing software, (ii) a printing robot, and (iii) microcontroller firmware. In this project, the first two components were developed from scratch, while Marlin was used as the firmware for the microcontroller, responsible for reading, interpreting, and executing G-code files. The proposed 3D printing platform is equipped with two basic components: a clay extruder and a metal sphere dispenser. The rationale behind the placement of metal spheres is examined. The design and manufacturing processes of the 3D printing robot, clay extruder, and metal sphere dispenser are presented. Additionally, the preparation of clay and its loading into the extruder chamber are explained, with examples of clay-printed models provided. Furthermore, metal sphere deposition has been carried out, and the obtained results are presented.

Keywords: 3D printing platform, metal 3D printing, 3D printing with metal spheres, clay 3D printing

1. Giriş

Üç boyutlu (3B) baskı, herhangi bir 3B modelden bilgisayar kontrolü altında katman katman malzeme eklenerek nesne oluşturma işlemidir. Bu yöntemin avantajları; malzemenin verimli kullanımı, tasarım esnekliğinin artması, parçaların hassas biçimde üretilmesi ve prototiplerin kısa sürede elde edilmesidir.

Katmanlı imalatın gelişimi, sıvı fotopolimer reçinelerin ultraviyole ışıkla katılaştırılması yoluyla üç boyutlu nesnelerin üretilmesine imkân tanıyan ve Charles W. Hull tarafından 1986 yılında alınan öncü stereolitografi (SLA) patentiyle başlamıştır [1]. Bunu, 1993 yılında Sachs ve arkadaşlarının geliştirdiği ve “üç boyutlu baskı” terimini açıkça kullandıkları, toz tabanlı bağlayıcı püskürtme yöntemi izlemiştir [2]. Bu yöntemde, yayılan toz tabakası üzerine seçilen alanlara sıvı bağlayıcı püskürtülmekte ve katı parçalar katman katman elde edilmektedir. Bu süreç, mürekkep püskürtmeli yazıcıların işlevine benzetilebilir.

3B baskı teknolojisi, günümüzde oyuncak, heykel, metal parça, biyomedikal implant gibi makro ölçekteki ürünlerin yanı sıra mikro ve nano ölçekli yapıların üretiminde de kullanılmaktadır [3–5]. Özellikle mikro ve nano yapılar gibi ince geometrilerin başka hiçbir imalat yöntemiyle elde edilememesi, bu teknolojiyi benzersiz kılmaktadır. Polimer, seramik, ahşap ve metal gibi çok çeşitli malzemeler 3B baskıya uyarlanabilmekte; filament, toz, reçine ve kil gibi farklı formlarda kullanılabilir. Metal parçalar için kullanılan 3B yazıcıların ekonomik değeri oldukça yüksek olup, bu cihazların perakende fiyatları 500.000 ABD dolarını aşmaktadır [6].

3B baskı ve hızlı prototipleme teknolojileri; mühendislik, tıp, savunma sanayi, inşaat, mimarlık, moda, eğitim ve bilişim gibi farklı alanlarda yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bugün otuzdan fazla katmanlı imalat teknolojisi bulunmakta olup, bunlar genel olarak yedi grupta sınıflandırılmaktadır: bağlayıcı püskürtme (binder jetting), yönlendirilmiş enerji biriktirme (directed energy deposition), malzeme ekstrüzyonu (material extrusion), malzeme püskürtme (material jetting), toz yatağı füzyonu (powder bed fusion) ve levha laminasyonu (sheet lamination) [7–9].

3B baskı teknikleri hızla gelişmekte olup hem tasarımda hem küçük ölçekli üretimde hem de dağıtık üretim süreçlerinde avantajlar sağlamaktadır [6]. Economist dergisi bu ilerlemeleri “üçüncü sanayi devrimi” olarak nitelendirmiş ve kitlesel kişiselleştirme ile dijital üretim modellerinin geleneksel iş paradigmalarını dönüştürebileceğini öne sürmüştür [10].

Katmanlı imalatla yaygın bir yöntem olan ekstrüzyon tabanlı teknikler, polimerlerden seramiklere ve metallere kadar geniş bir malzeme yelpazesinin işlenmesine olanak tanımaktadır. Ligon ve arkadaşlarının [11] kapsamlı derlemesinde vurgulandığı üzere, bu yöntem; filament, vidalı ve piston tabanlı mekanizmalar üzerinden uygulanabilmektedir. Filament ve vidalı sistemler sürekli malzeme beslemesine uygunken, piston tabanlı ekstrüzyon yüksek viskoziteli macun, kil veya filament dışı deneysel malzemelerin işlenmesinde öne çıkmaktadır.

Dayam ve arkadaşları [12], piston tabanlı bir ekstrüzyon sistemi kullanarak alüminyum macunundan bileşen üretmeyi mümkün kılan bir katkılı imalat süreci geliştirmiştir. Bu çalışma, piston tipi ekstrüzyonun yüksek viskoziteli malzemeleri işleme kabiliyetini ve katmanlı imalatın geleneksel polimerlerin ötesine taşınabilme potansiyelini ortaya koymaktadır.

Çok malzemeli katmanlı imalat, ekstrüzyon tabanlı 3B baskı alanında giderek önem kazanan bir yönelimdir. Bu yaklaşım, bileşenlerin mekânsal olarak değişken özelliklere ve fonksiyonel gradasyona sahip olacak şekilde üretilmesine imkân tanır. Wang ve arkadaşları [13], çok malzemeli FDM baskı yaklaşımlarını sistematik olarak incelemiş ve malzeme besleme/yerleştirme mekanizmalarına odaklanmıştır. Prajapati ve arkadaşları [14], kapalı hücreli kafes yapılarının ikincil malzeme ile doldurulmasına dayalı yeni bir kavramı incelemiş; bu yöntemle enerji emici ve sönümleyici özellikler kazandırılmıştır. Ravor ve arkadaşları [15] ise hibrit çok kafalı bir 3B yazıcı geliştirerek farklı viskozite ve basınçlarda geniş bir malzeme yelpazesinin basımına olanak sağlamıştır.

Katmanlı imalat sırasında ayrı parçacıkların düzenlenmesi, yapısal özellikleri ve paketleme yoğunluğunu doğrudan etkilemektedir. Friedrich ve arkadaşları [16], parçacık geometrisinin boşluk oluşumu, stabilite ve parçacık etkileşimleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Ayrıca US Patent US9937522B2 [17], mikro boyuttaki parçacıkların kontrollü şekilde konumlandırılmasına dair önemli bir yöntem sunmaktadır.

Bu çalışma, daha önce bildirilen çok renkli nokta yazıcının devamı niteliğinde olup [18], önerilen yeni 3B baskı yöntemini detaylandırmaktadır. Çalışmada 3B yazıcı robotu ve ekstrüzyon sistemlerinin tasarımı sunulmakta; kil ile 3B baskı ve metal bilye yerleştirme uygulamalarına ilişkin sonuçlar paylaşılmaktadır.

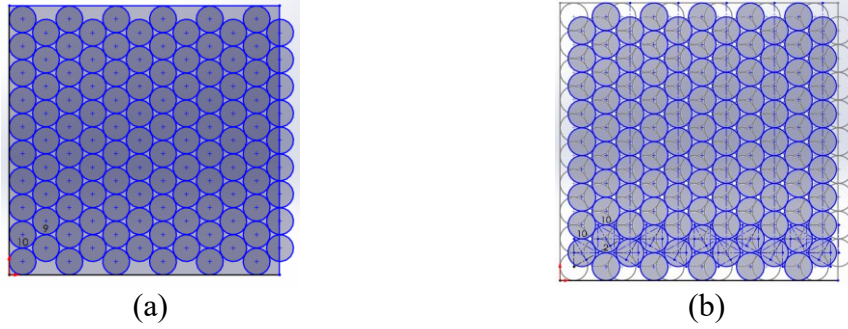
2. 3B baskı yöntemi

Bu çalışma, yeni bir 3B baskı yöntemini önermek üzere tasarlanmıştır. Bu projede uygulanan senaryo, metal parçaların 3B baskı ile üretilebilmesini sağlamayı hedeflemektedir. Yöntemin temelinde, metal bilyelerin yan yana yerleştirilmesi ve bu bilyelerin kil esaslı bir ekstrüzyon sistemi ile sabitlenmesi bulunmaktadır. Böylece iki farklı malzeme formu (metal bilyeler ve kil hamuru) bir arada kullanılmıştır.

Önerilen 3B baskı platformunun geliştirilmesi şu potansiyelleri barındırmaktadır:

- Katı ve macun gibi farklı formlardaki malzemeler basılabilmektedir.
- Katı bilyeler tek tek yerleştirildiği için farklı metal türlerinden bilyelerin kullanılması mümkün olup, çok malzemeli metalik prototipler üretilebilir.

Şekil 1’de, metal bilyelerin tek ve çift katmanlar halinde yerleştirilme düzenini göstermektedir. Tek katmanda bilyeler yan yana dizilir (Şekil 1a); çift katmanda ise üst katmandaki bilyelerin merkezleri, alt katmandaki bilyelere göre X ve Y yönlerinde kaydırılır (Şekil 1b). Bu sayede birim hacim başına maksimum paketleme faktörü elde edilir.



Şekil 1. Bilyelerin yerleştirme düzeni: a) tek katman, b) çift katman

Tek ve çift katmanlar için bilyelerin X ve Y koordinatları ayrı ayrı belirlenmektedir. Şekil 2’de tek katmanlı yerleşim örneği verilmiştir.

- Tek katmanda hem tek hem çift sütunlardaki X koordinatı:

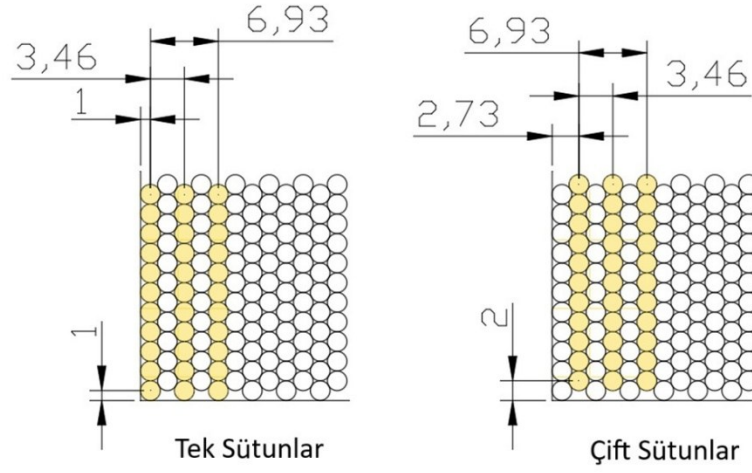
$$X(i) = 0,5 \cdot D + (i - 1) \cdot D \cdot \cos 30^\circ$$

Burada D bilye çapıdır ve $i = 1, 2, 3 \dots$ sütun indeksidir.

- Tek sütundaki bir bilyenin Y koordinatı:

$$Y(j) = 0,5 \cdot D + (j - 1) \cdot D$$

Burada $j = 1, 2, 3 \dots$ satır indeksidir. Şekil 2’deki boyutlar $D = 2$ mm metal bilye için hazırlanmıştır.



Şekil 2. Tek katmanlara bilye yerleştirme deseni

Şekil 3'te çift katmanlı yerleşim görülmektedir.

- Çift katmanda X koordinatı:

$$X(i) = i \cdot D \cdot \cos 30^\circ$$

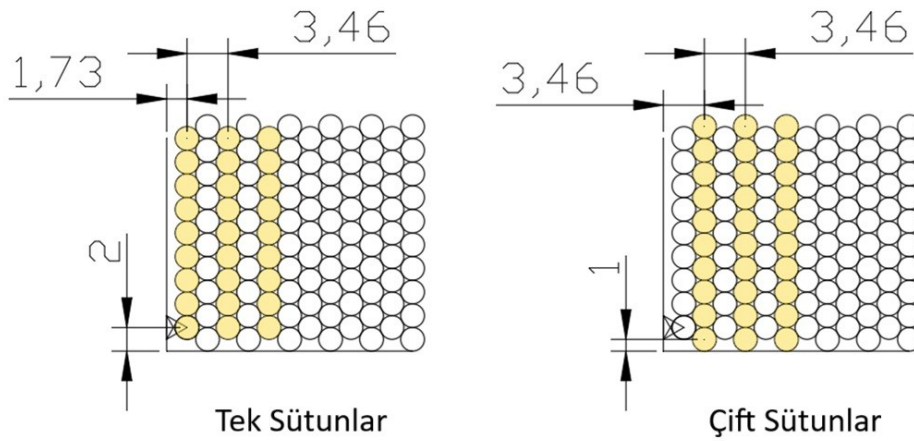
Tek sütundaki Y koordinatı:

$$Y(j) = D \cdot j$$

- Çift sütundaki Y koordinatı:

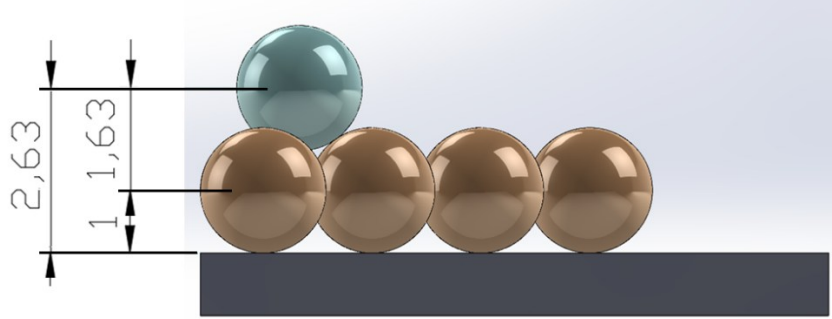
$$Y(j) = 0,5 \cdot D + (j - 1) \cdot D$$

Burada $i = 1, 2, 3 \dots$ sütun indeksi, $j = 1, 2, 3 \dots$ satır indeksidir. Şekil 3'teki boyutlar yine $D = 2$ mm metal bilye için hazırlanmıştır.



Şekil 3. Çift katmanlara bilye yerleştirme deseni

Metal bilyeler katman oluşturacak şekilde yan yana yerleştirildiğinden, STL dosyası dilimlenirken katman kalınlığı bilye çapının fonksiyonu olmaktadır. Şekil 2'ye göre: Birinci katman yüksekliği $h_1 = 0,5 \cdot D$ olarak hesaplanmaktadır. İkinci ve üst katmanların yüksekliği ise $h = \sqrt{(2/3)} \cdot D \approx 0,816 \cdot D$ şeklindedir. Örneğin $D = 2$ mm için ilk katman yüksekliği 1,0 mm, üst katmanların yüksekliği ise 1,63 mm'dir (bkz. Şekil 4).



Şekil 4. Bilye çapı $D = 2$ mm için katman kalınlığı gösterimi

Bu çalışmada benimsenen bilye yerleşimi, malzeme biliminde bilinen yüz-merkezli kübik (FCC) paketleme düzenine benzemektedir. Atomik paketleme faktörü (APF), birim hücre hacmi başına atomların hacmi olarak tanımlanır. FCC düzeni için $APF = \pi / (3\sqrt{2}) \approx 0,74$ bulunur. Bu da 3B baskılı modelin hacminin yaklaşık %74'ünün metal bilyelerle dolu olacağı, %26'sının ise boş kalacağı anlamına gelir. Doluluk oranının %100'e çıkarılması teorik olarak küresel bilyeler yerine kübik bilyeler kullanılarak mümkün olabilir; ancak bu durum bu çalışmanın kapsamı dışındadır.

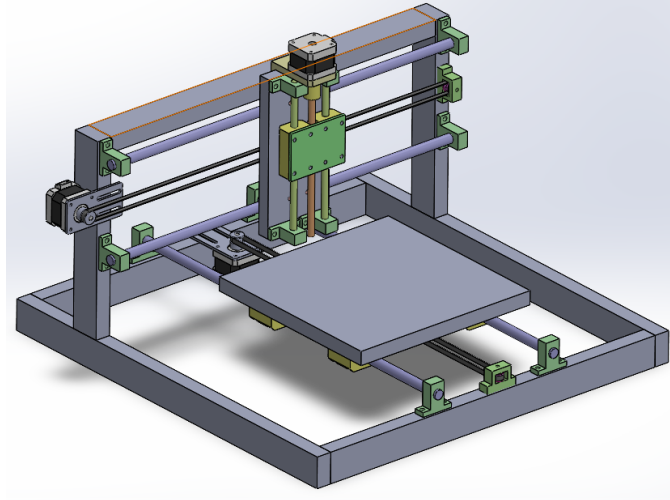
Metal parçaların katmanlar halinde bilyelerle oluşturulabilmesi için, bilyeleri sabitleyen bir kil ekstrüzyon sistemi öngörülmüştür. Kil ekstrüzyonu bilyelerin çevresinde bir kabuk oluşturur; ayrıca bilyelerin altına ve üstüne de kil tabakası eklenir. Böylece elde edilen model tamamen kil ile çevrelenmiş olur. Sonrasında, metal bilyelerin birbirine bağlanarak sağlam bir yapı oluşturabilmesi için modelin uygun şartlar altında sinterlenmesi gerekmektedir.

Bu çalışma kapsamında, 3B baskı sistemlerinin geliştirilmesi dört temel adımdan oluşmaktadır:

1. 3B yazıcı robotik sistemin tasarımı ve imalatı,
2. 3B yazıcı nozulu ve ekstrüzyon sistemlerinin tasarımı ve imalatı,
3. Dilimleme ve kullanıcı arayüzü yazılımının oluşturulması,
4. Mikrodenetleyici kartı için ürün yazılımının geliştirilmesi.

Bu adımların belirli bir sırayla yapılması zorunlu değildir, ancak bunlar birbirini tamamlayan bileşenlerdir.

3B yazıcı robotik sisteminin tasarımı nispeten rutindir ve bu nedenle çalışmanın odak noktası olmamıştır. Robot, kartezyen üç eksenli bir yapıya sahiptir (Şekil 5). X ve Y eksenlerindeki hareket kasnak-kayış sistemiyle, Z eksenindeki hareket ise vidalı mil ve somun sistemiyle sağlanmaktadır. Tüm eksenlerde step motorlar kullanılmakta; tabla plakası Y yönünde hareket ettirilmekte; Z eksenine ise X eksenine tarafından taşınmaktadır. Ekstrüderler Z eksenine plakasına monte edilmiş ve yukarı-aşağı hareket edebilmektedir. Robot yapısı 20×40 mm profillerden oluşturulmuştur.



Şekil 5. Tasarlanan kartezyen robotun 3 boyutlu görünümü

2.1. Kil için 3B baskı sisteminin geliştirilmesi

Bu projede kil ile 3B baskı için iki farklı ekstrüzyon sistemi tasarlanmış, üretilmiş ve test edilmiştir.

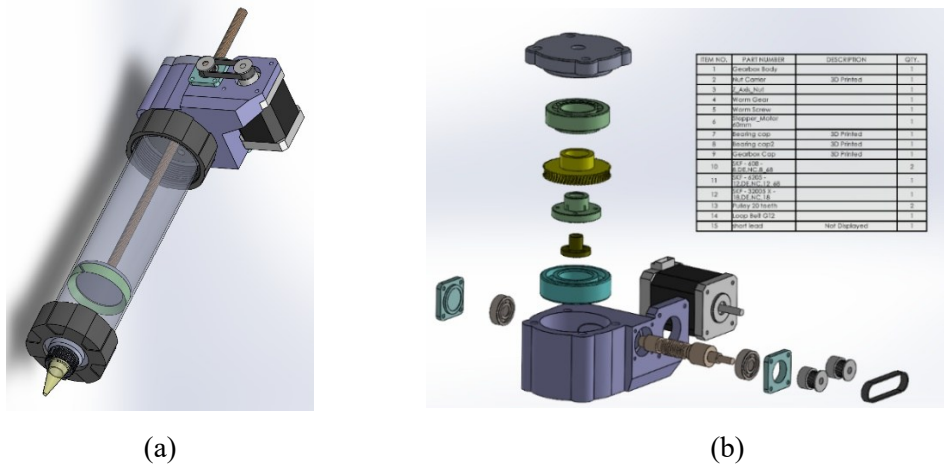
2.1.1. İlk sistem (uzun mesafeli ekstrüzyon)

Kil, silindirik bir hazneye yüklenmiş ve basınçlı hava ile itilmektedir. Hava basıncı uygulandığında, kil hortum vasıtasıyla ekstrüdere iletilir. Ekstrüderde step motor, helezon dişli yardımıyla kili nozula zorlar ve yazıcının eksen hareketiyle baskı yapılır. Bu yöntemin avantajı, haznenin baskı sırasında sabit kalmasıdır; böylece robotun yükü azalır ve uç efektör daha küçük motorlarla çalıştırılabilir. Ancak farklı su içeriklerine sahip killerde, kalın kilin dar hortumlardan geçemediği gözlenmiştir. Bu durumda kilin sulandırılması gerekir, fakat bu da baskının formunu bozup çökmelere neden olabilir. Ayrıca sistemin karmaşıklığı önemli bir dezavantajdır.

2.1.2. Alternatif çözüm (doğrudan ekstrüzyon)

Daha basit ve güvenilir olduğu için tercih edilmiştir. Şekil 6a, Solidworks tasarımını; Şekil 6b, dişli kutusu tasarımını göstermektedir. Bu sistemde, haznedeki kil vidalı mil aracılığıyla dışarı çıkarılır. Vidalı mil, sonsuz dişli kutusu tarafından tahrik edilmektedir. Step motor, kayış-kasnak sistemiyle sonsuz vidayı döndürür; sonsuz vida dişliyi çevirir; dişlinin merkezine entegre edilen trapez somun-vidalı mil mekanizması sayesinde kil nozula itilmiş olur.

Gerçekleştirilen doğrudan ekstrüder Şekil 7’de gösterilmiştir. Hazne alüminyum borudan yapılmış, nozul ve dişli kutusundan kolayca ayrılabilir. İç çapı 51 mm olan boru, temizlik ve bakım kolaylığı sağlamaktadır. Nozul da dişli bağlantısı sayesinde çıkarılıp temizlenebilir.



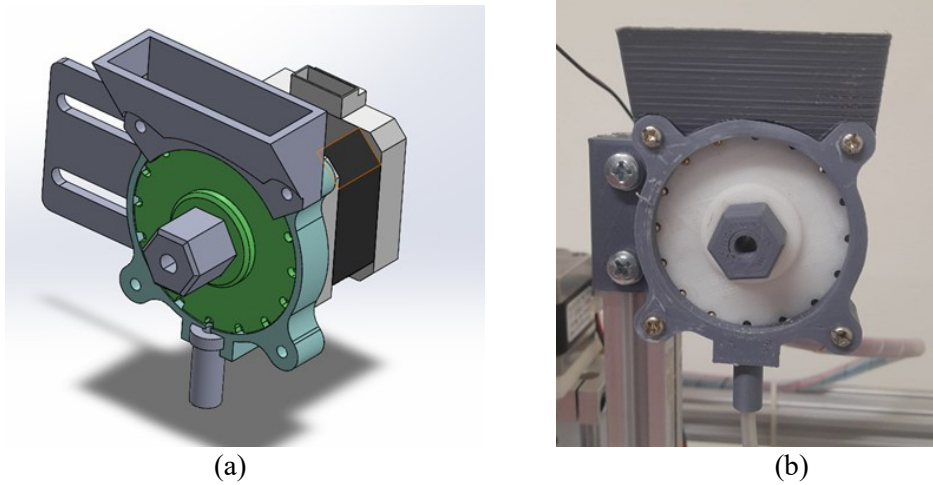
Şekil 6. a) Doğrudan kil ekstrüzyon sisteminin tasarımı; b) Kil ekstrüderin dışlı kutusunun patlatılmış görünümü



Şekil 7. Gerçekleştirilen doğrudan kil ekstrüzyon sistemi

2.2. Bilye ekim sisteminin geliştirilmesi

İkinci malzeme türü metal bilyelerdir. Bilyeler öncelikle bir haznede depolanır, daha sonra hortum içinde sıralanıp ekim makinesine yönlendirilir. Tasarım sürecinde birçok farklı prototip üretilmiş, test edilmiş ve iyileştirilmiştir. Sonuçta rapor edilen sistem, bilye ayırma ve yerleştirmeyi etkili biçimde gerçekleştirmektedir.

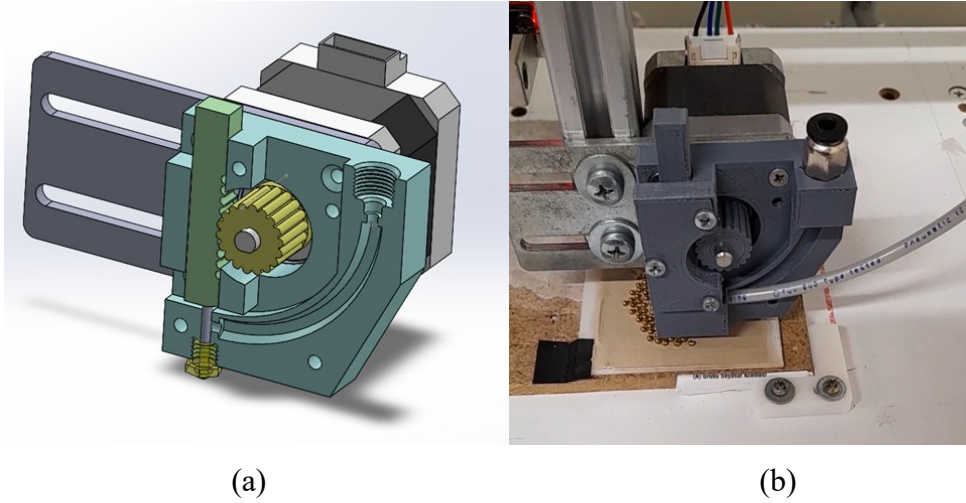


Şekil 8. Bilye ayırıcının tasarımı; a) Solidworks modeli, b) Üretilen prototip

Şekil 8, bilye ayırıcının tasarımını göstermektedir. Ayırıcı, bilye haznesi ve bilyeleri uygun yuvalara ayıran döner bir çarktan oluşur. Çark döndükçe bilyeler yuvalara düşer ve alttaki hortuma aktarılır. Motor (DC veya step motor) çarkı döndürmektedir. Çark dikey düzlemde döndüğünde başarılı sonuçlar alınmıştır. Yatay düzlem için de bir tasarım yapılmış ancak bu çalışma kapsamına alınmamıştır.

İlk başta bilyelerin ağırlığından yararlanarak yerleştirme denenmiş; ancak bilyelerin nozuldan düşmemesi gibi sorunlar nedeniyle güvenilir bulunmamıştır. Bu nedenle aktif ekim tekniği geliştirilmiştir.

Şekil 9(a), Solidworks tasarımını; Şekil 9(b), imal edilmiş prototipi göstermektedir. Bilyeler hortumdan makineye girer ve tek tek bekletilir. İlk bilye, motor (Nema17) ile çalışan kremayer-pinyon mekanizmasına bağlı bir iğne tarafından durdurulur. İğne yukarı hareket ettiğinde bilye yerleştirilir, aşağı indiğinde nozul deliğini kapatarak aynı anda sadece bir bilyenin geçmesini garanti eder.

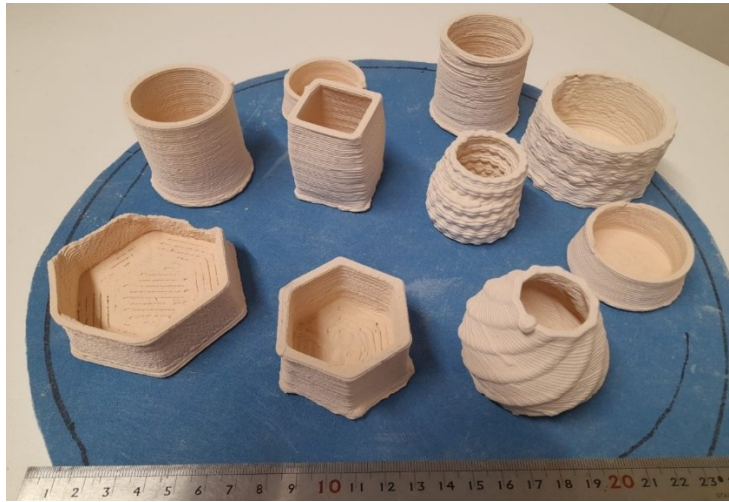


Şekil 9. Uygulanan bilye ekicinin tasarımı; a) Solidworks modeli, b) İmal edilmiş prototip

3. Bulgular

Kil ile baskıda, kilin su içeriği ekstrüzyon motorunun gücü ve nozul boyutu üzerinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu projede, ekstrüder sistemi için sonsuz dişli kutusu mekanizmasıyla donatılmış bir Nema 17 step motor kullanılmıştır. Bu nedenle, kullanılan 3 mm çaplı nozuldan hangi yoğunlukta kilin etkili bir şekilde çıkarılabileceği belirlenmelidir. Piyasada yaygın olarak bulunan porselen kilden numune alınmıştır. İlk denemelerde kilin, birkaç milimetrelik nozullardan geçemeyecek kadar yoğun olduğu, özellikle de 3 mm çapındaki nozuldan çıkmasının imkânsız olduğu gözlenmiştir. Alternatif bir yaklaşım olarak, kilin su içeriğini belirlemek için numune kurutulmuştur. Sonuç olarak, piyasadaki çömlek killerinin yaklaşık %75 toprak ve %25 su içerdiği belirlenmiştir. Bu nedenle, tasarlanan kil ekstrüderi ile hangi yoğunlukta kilin etkili bir şekilde ekstrüde edilebileceğini görmek amacıyla deneysel çalışmalar yapılmıştır. Sonuçlar, kilin en az %29 su içeriğine sahip olması gerektiğini, %30 su içeriğine sahip kilin ise 3 mm'lik nozuldan kolaylıkla ekstrüde edilebildiğini göstermiştir.

Kusursuz bir kil baskısı elde edebilmek için kil içerisinde hava kabarcığı bulunmaması kritik öneme sahiptir. Ancak kil odası manuel olarak doldurulduğunda, yükleme sırasında hava hapsolme olasılığı yüksektir. Bu sorunu önlemek için basit ama etkili bir prosedür uygulanmıştır. Kabarcıksız kil hazırlamak için şu adımlar izlenmiştir: Öncelikle kuru kil malzemeye gerekli miktarda su ilave edilmiş ve homojen bir karışım elde edilmiştir. Ardından, kil yüklemesi için iki adet plastik PVC boru kullanılmış, borulardan birinin iç yüzeyine ince bir polietilen plastik film yerleştirilmiştir. Kil, film bulunmayan boruya tahta bir çubuk yardımıyla yüklenmiş ve bu aşamada kilin içinde hava kabarcıkları hapsolmuştur. Daha sonra kil ile dolu boru, bir adaptör yardımıyla boş borunun üstüne yerleştirilmiş ve piston aracılığıyla üst borudan alt boruya itilmiştir. Bu sırada kilde sıkışan havanın büyük kısmı dışarı çıkmış, böylece neredeyse havasız bir karışım elde edilmiştir. Çıkarılan kil, ince plastik kılıf ile birlikte ekstrüder odasına beslenmiş ve son aşamada nozul başlığı ekstrüder çıkışına bağlanmıştır. Bu süreç sonunda, hem kabarcıksız bir kil hazırlanmış hem de ekstrüder odasının iç duvarı temiz kalmıştır. Bu yöntemle iki avantaj elde edilmiştir: (1) neredeyse kabarcıksız kil sağlanmıştır, (2) kil ekstrüder odasının iç duvarlarını kirletmemiştir. Böylece “kil sosisi” hazırlanmıştır.



Şekil 10. %30 su içerikli kil ile basılmış modeller

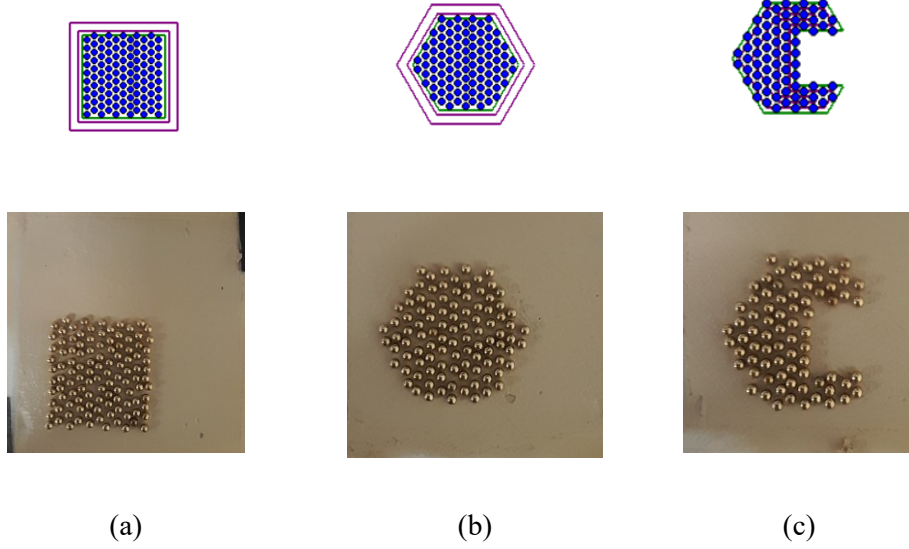
Kil ile 3B baskı, nesnenin STL modelinin GUI yazılımında açılmasıyla başlamıştır. Bu çalışmada, modelin çevresini saran tek bir kil duvarı dikkate alınmış ve buna uygun G-code dosyası üretilmiştir. Daha sonra bu dosya SD karta kopyalanmış ve 3B yazıcıda çalıştırılmıştır. Şekil 10, geliştirilen ekstrüder ile %30 su içeriğine sahip kil kullanılarak üretilen bazı örnek modelleri göstermektedir.

3.1. Metal bilyeler ile 3B baskı

Metal bilyelerin 3B baskısı için aktif bilye yerleştirme yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemde, bir step motor ile ileri-geri hareket eden iğne, bilyeleri koordinatlarına tek tek yerleştirmektedir. Yerleştirme sırasında, bilyelerin yazıcı tablasındaki konumlarını korumaları ve titreşimlerden etkilenmemeleri gerekmektedir. Bu amaçla, baskıdan önce basit bir kil tabakalı tepsi hazırlanmıştır. Tepsi üzerine 0,5 mm kalınlığında kil tabakası serilmiş, bilyeler bu tabakaya batırılarak sabitlenmiştir. Böylece bilyeler, yazıcı tablasına sabitlenen tepsi üzerinde konumlarını koruyabilmiştir.

3.1.1. Birinci yaklaşım

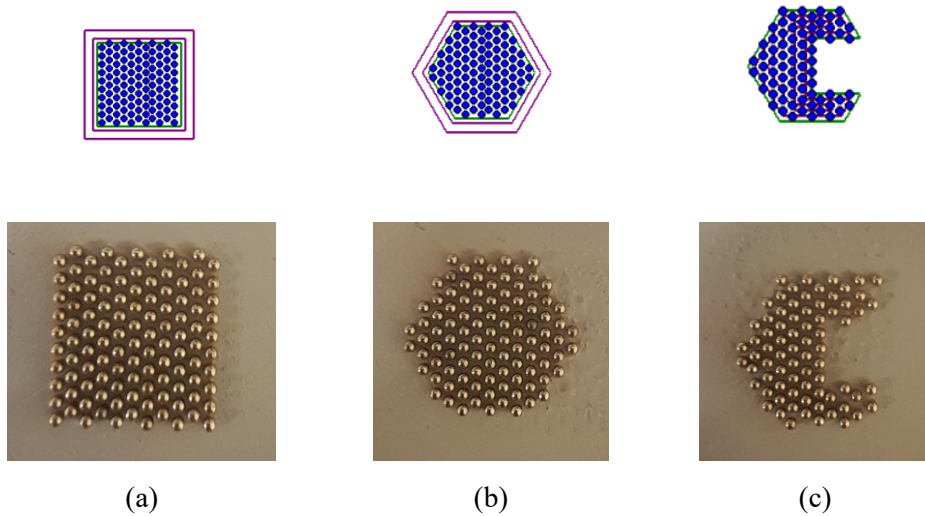
Bu yöntemde bilye ekstrüderi, yazıcı tablasından sabit bir mesafede hareket etmekte ve bilyeleri kil tabakası üzerine düşürmektedir. Bu yöntemde 2 mm çapındaki bilyeler için ekstrüder nozulunun tablaya olan uzaklığı 2,25 mm olarak ayarlanmıştır. Beklenen X–Y koordinatlarına göre bilyeler bırakılmış ve bilyeler arasındaki merkez mesafesi 2,5 mm olacak şekilde programlanmıştır. Sonuçlar, genel olarak beklenen desenin oluştuğunu göstermiştir. Ancak bazı durumlarda bilyelerin yerinden çıktığı da gözlenmiştir. Şekil 11, üç farklı modelin baskı sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 11. Birinci yaklaşımda metal bilye ile baskı örnekleri

3.1.2. İkinci yaklaşım

Birinci yaklaşımdaki yerinden çıkma problemini çözmek için geliştirilmiştir. Bu yöntemde: Nozul ucu baskı tablasına olabildiğince yaklaştırılır. Tek bir bilye bırakıldıktan sonra, nozul yukarı kaldırılır, bir sonraki X–Y koordinatına götürülür, tekrar aşağı indirilerek bilye bırakılır. Bu işlem her bilye için tekrarlanmıştır. Sonuçlar, bilyelerin beklenen koordinatlara başarıyla yerleştirildiğini göstermektedir (Şekil 12). Şekil 12c’de görülen küçük sapma, 3B yazıcının hatasından değil, o bölgedeki kil tabakasının görece kurumasından kaynaklanmıştır.



Şekil 12. İkinci yaklaşımda metal bilye ile baskı örnekleri

4. Sonuç, tartışma ve öneriler

Önerilen 3B baskı platformunda işlem, 2 mm çapındaki metal bilyelerin yerleştirilmesiyle başlamaktadır. Daha sonra, her katmandaki bilyelerin etrafına kil kabuğu 3B basılarak süreç devam etmektedir. Bu senaryonun uygulanabilmesi için özel bir dilimleme algoritması geliştirilmiş olup, bu algoritmanın detayları ayrı bir çalışmada raporlanacaktır.

Kontrol sistemi için Marlin (Bugfix-1.1.x) ürün yazılımı kullanılmış ve bu yazılım MKS Gen L V2.1 3B yazıcı anakartına yüklenmiştir. Kil ekstrüzyonunda herhangi bir ısıtma gerekmediğinden sıcaklık sensörü bulunmamaktadır. Bu nedenle Marlin'in *Configuration* dosyasında sensör, #define TEMP_SENSOR_0 998 olarak ayarlanmıştır. Böylece yazılım, sıcaklığı her zaman 25 °C olarak okumuştur. Ayrıca DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT parametresi kil ekstrüder için 691 olarak belirlenmiştir. Bu değer şu formülle hesaplanmıştır: Mikro adım sayısı × motorun tam dönüşündeki adım sayısı × sonsuz dişli diş sayısı × (kil nozul çapı / ekstrüder iç çapı). Bu çalışmada sırasıyla 16, 200, 60, 3 mm ve 50 mm değerleri kullanılmıştır.

Kil baskıda modelin çevresel geometrisi serbestçe tasarlanabilse de, dikey eksene göre yüksek açılar sorun yaratabilmektedir. Böyle durumlarda basılan duvarların deforme olduğu veya çöktüğü gözlenmiştir. Katman kalınlığı 1 mm seçilmiş olup, 2 mm bilye çapı dikkate alındığında uygun bulunmuştur.

Bu çalışmanın en özgün yönü, metal bilyelerle 3B baskının ilk kez uygulanmış olmasıdır. Literatürde daha önce metal bilyelerin bu şekilde kullanıldığına rastlanmamıştır. Projede bilyelerin ayıklanması ve yerleştirilmesi için farklı yöntemler araştırılmış, prototipler üretilmiş ve test edilmiştir. Geliştirilen sistemde:

- Bir ayırma çarkı, bilyeleri hazneden alarak plastik hortum içinde sıralamıştır.
- Aktif bilye ekim sistemi, bu bilyeleri baskı tablasına tek tek yerleştirmiştir.
- Bu yaklaşım, doğru ve güvenilir bir bilye yerleştirmeyi mümkün kılmıştır.

Bilye yerleştirmeye ilişkin G-code komutları Marlin'de Extruder1 için üretilmiştir. Böylece *Extruder1* metal bilye ekim motorunu, *Extruder0* ise kil ekstrüder motorunu kontrol etmiştir.

Metal bilye yerleştirme sürecinde bazı teknik zorluklar belirlenmiştir:

- İlk tabaka altında mutlaka kil tabakası bulunmalı, üst katmanlarda ise bilyeleri çevreleyen kil duvarı gereklidir.
- Bilyeler, baskı tabanına yüksekte bırakıldığında konum hataları ortaya çıkmaktadır. En iyi sonuç, nozulun tabana 1 mm kadar yaklaştırıldığı durumda elde edilmiştir.
- Bilye merkez mesafesi teorik olarak bilye çapına eşit (2 mm) olmalıdır. Ancak bu çalışmada güvenilir baskı için 2,5 mm merkez mesafesi uygulanabilmiştir. Daha küçük mesafelerde nozul, komşu bilyelere çarpmaktadır.

Gelecekte, bilyelerin çapına eşit merkez mesafeleri için daha hassas mekanizmaların araştırılması önerilmektedir. Örneğin, pnömatik vakumlu alma-bırakma sistemleri bu amaçla kullanılabilir. Böylece kil ekstrüzyonu ile bilye ekimi tek bir 3B yazıcıda entegre edilerek tam anlamıyla çok malzemeli 3B baskı yapılabilecektir.

Sonuç olarak, bu çalışmada yeni bir 3B baskı yöntemi önerilmiş ve prototip düzeyinde uygulanmıştır.

- 3B yazıcı robotunun tasarımı yapılmış,
- Kil ekstrüderi geliştirilmiş,
- Kil ile çeşitli modeller başarıyla basılmış,
- Metal bilye ile baskı için aktif yerleştirme yöntemi uygulanmıştır.

Elde edilen bulgular, yöntemin hem kil hem de metal bilye ile çok malzemeli 3B baskıda kullanılabilecek potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Bu yenilikçi yaklaşım, gelecekte farklı malzemelerden üretilmiş bilyaların kullanılmasıyla iki veya daha fazla malzemeye ihtiyaç duyulan karmaşık tasarımların gerçekleştirilmesine olanak tanır. Ekstrüder ayarlarının ve bilya çaplarının değiştirilmesiyle, malzeme yapısında gözeneklilik (porozite) oluşturmak veya özel üç boyutlu geometriler tasarlamak mümkün hale gelir. Böylece, bu yaklaşım katmanlı imalatın sunduğu birçok avantajdan faydalanarak üretimde yeni kapılar açar.

Teşekkürler

Bu proje İstanbul Gelişim Üniversitesi'nde yürütüldü ve üniversitenin BAP koordinatörlüğü tarafından finanse edilmiştir. İlgili tüm personele teşekkür ediyoruz.

Kaynaklar

- [1] Hull, C. W., Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography, US Patent 4575330, (1986).
- [2] Sachs, E. M., Haggerty, J. S., Cima, M. J. and Williams, P. A., Three-dimensional printing techniques, US Patent 5204055, (1993).
- [3] Ravi Kumar, Y. and Rao, C.S.P., Organ Printing with Life Cells: A Review, **Materials Today: Proceedings**, Vol. 4, Issue 2, Part A, 1074-1083, (2017).
- [4] Ho, C.M.B., Ng, S.H. and Yoon, Y.-J., A review on 3B printed bioimplants, **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, Vol. 16, Issue 5, 1035-1046, (2015).
- [5] Pourabbas, S., 3B Printing Techniques in Nanotechnology, **National Conference on Nanostructure-Nanoscience and Nanoengineering**, Iran, (2017).
- [6] Anzalone, G. C., Zhang, C., Winen, B., Sanders, P. G. and Pearce J. M., A Low-Cost Open-Source Metal 3-D Printer, **IEEE Access**, Vol. 1, 803-810, (2013).
- [7] Banerjee S., Development of a Novel Toner for Electrophotography Based Additive Manufacturing Process, **PhD thesis**, De Montfort University, (2009).
- [8] ASTM F2792-12a: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies.
- [9] Mahamood R. M. S., Akinlabi A., Shatalov M., Murashkin E. V. and Akinlabi E. T., Additive Manufacturing/ 3B Printing Technology: A Review, **Galati University Press**, (2019).
- [10] **The Economist**, A third industrial revolution: Special report: Manufacturing and innovation, (2012).
- [11] Altıparmak, S. C., Yardley, V. A., Shi, Z., Lin, J., Extrusion-based additive manufacturing technologies: State of the art and future perspectives, **Journal of Manufacturing Processes**, Vol. 83, 607–636, (2022).

- [12] Dayam, S., Tandon, P. and Priyadarshi, S., Development of paste extrusion-based metal additive manufacturing process, **Rapid Prototyping Journal**, (2022).
- [13] Wang, Z., Wang, L., Tang, F. and Chen, J., Multi-material additive manufacturing via fused deposition modeling 3D printing: A systematic review on the material feeding mechanism, **Journal of Process Mechanical Engineering**, (2024).
- [14] Prajapati, M.J., Kumar, A., Lin, S. C., Jeng, J. Y., Multi-material additive manufacturing with lightweight closed-cell foam-filled lattice structures for enhanced mechanical and functional properties, *Additive Manufacturing*, Vol. 54, (2022).
- [15] Ravoor, J., Elsen, S. R., Thangavel, M., Arumugam, D. and Karuppan, D., Development of hybrid multi-head, multi-material paste and ink extrusion type 3D printer for biomedical applications, **Journal of Asian Ceramic Societies**, Vol. 11, No. 4, (2023).
- [16] Friedrich, T., Tan, Y., Briesen, H. and Nasato, D. S., An experimental and numerical study of the influence of the additive manufacturing process in packing properties of particles: the printed shape matters, **Granular Matter**, 26:80, (2024).
- [17] Hart, A. J., Beroz, J. D. and Maghsoodi, H., Discrete deposition of particles, US Patent 9937522, (2018).
- [18] Pourabbas, S. and Moveh, S., Design and Fabrication of a Multi-Color Dot Printer, **ICIAS**, Konya, Turkey, 633-638, (2022).