



YAPIŞKAN PÜSKÜRTME YÖNTEMİNDE ÜRETİM PARAMETRELERİNİN ÖNEMİ VE ÖRNEK BİR UYGULAMA

Hasan BAŞ^{1*}, Fatih YAPICI¹, İbrahim İNANÇ²

¹ Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye

² Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Üç Boyutlu Yazıcılar, Eklemeli İmalat, Yapışkan Püskürtme.</i>	Çalışmada eklemeli imalat yöntemleri, özellikle de yapışkan püskürtme teknolojilerinden detaylı bir şekilde bahsedilmiştir. Eklemeli imalat, geleneksel bilgisayar destekli üretimdeki talaş kaldırma prensibinin aksine malzemelerin katmanlar halinde birleştirilerek üst üste eklenmesi prensibine dayanan çok karmaşık geometriye sahip objelerin dahi kolaylıkla üretilmesine imkan sağlayan pratik metodudur. Yapışkan püskürtme, önemli bir eklemeli imalat yöntemidir. Bu yöntemde tanecik morfolojisi, boyutu, dağılımı, toz akışkanlığı, paketleme yoğunluğu, katman kalınlığı, baskı hızı, yapışkan doygunluğu gibi parametreler baskı kalitesini etkilemektedir. Ayrıca bu çalışmada yapışkan püskürtme yöntemi ile üç farklı katman kalınlığında deney örnekleri üretilerek yüzey kalitesi incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre artan katman kalınlığı ile yüzey kalitesinin bozulduğu tespit edilmiştir.

THE IMPORTANCE OF MANUFACTURING PARAMETERS IN BINDER JETTING METHOD AND AN EXAMPLE APPLICATION

Keywords	Abstract
<i>3D Printers, Additive Manufacturing, Binder Jetting.</i>	In the study, additive manufacturing methods and especially binder jetting technology are mentioned. Additive manufacturing is a practical method, allows easy production of objects has very complex geometries, that based on the principle of adding materials building up layer by layer, in contrast to the machining principle of the traditional computer-aided manufacturing. Binder jetting is an important additive manufacturing method. The print quality can be affected some parameters such as particle morphology, size, distribution, powder spreadability, packaging density, layer thickness, printing speed, binder saturation. In addition, test samples that have three different layer thicknesses was manufactured and the surface quality of them was investigated in this study too. According to the test results, it was determined that the surface quality deteriorated with increasing layer thickness.

Alıntı / Cite

Bas, H., Yapici, F., Inanc, I., (2022). Yapışkan Püskürtme Yöntemimde Üretim Parametrelerinin Önemi ve Örnek Uygulama, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(4), 1354-1361.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

H. Baş, 0000-0001-5214-3394

F. Yapıcı, 0000-0002-2493-6781

İ. İnanç, 0000-0003-1988-1197

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date 14.04.2022

Revizyon Tarihi / Revision Date 15.08.2022

Kabul Tarihi / Accepted Date 16.08.2022

Yayın Tarihi / Published Date 30.12.2022

1. Giriş (Introduction)

Eklemeli imalat, günümüzdeki en önemli mühendislik teknolojilerinden birisidir. Bu teknoloji için; hızlı prototipleme, katmanlı imalat, 3 boyutlu baskı gibi terimler de kullanılmaktadır. Bu teknoloji için geliştirilen

* İlgili yazar / Corresponding author: hasan.bas@omu.edu.tr, +90-362-312-1919

makinelere 3 boyutlu (3B) yazıcılar da denmektedir. Tasarımcılar tasarladıkları ürünün prototipini kusursuz ve hızlı bir şekilde 3B yazıcılar ile yapabilmektedir. 3B yazıcılar ilk başlarda hızlı prototip yapmada kullanıldığı için bu teknoloji ilk başlarda Hızlı Prototipleme (Rapid Prototyping-RP) olarak ifade edilmiştir. Ancak zaman içerisinde geliştirilen yeni teknikler ile imalatta direkt olarak kullanılacak parçaların yapımı içinde kullanılmaya başlanmıştır. Dolayısıyla, bu teknolojide nihai ürün üretme kapasitesine ulaşıldığı için hızlı prototipleme terimi yetersiz kalmıştır. Bu nedenle, Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu (ASTM International) Eklemeli İmalat (Additive Manufacturing - AM) terimini öne sürmüştür.

İlk eklemeli imalat yöntemi 1986 yılında Charles Hull tarafından patenti alınan stereolitografi'dir. Daha sonraki süreçte birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler, malzeme ekstrüzyon yöntemi (material extrusion), doğrudan enerji biriktirme (direct energy deposition), laminasyon yöntemi (sheet lamination), toz yatak füzyon yöntemi (powder bed fusion), malzeme püskürtme (material jetting), yapışkan püskürtme (binder jetting) ve vat fotopolimerizasyon (vat photopolymerization) yöntemi olmak üzere yedi ana başlık altında toplanabilir (ASTM, 2012). Her yöntemin kullanım alanına göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır.

Bu çalışmada 3D yazıcılar ve özellikle de eklemeli imalat yöntemleri hakkında bilgiler verilmiştir. Ayrıca daha önce proje kapsamında tasarlanan ve yapımı gerçekleştirilen 3D yazıcı kullanılarak 0.16mm, 0.20 mm ve 0.25 mm katman kalınlıklarında 3 adet deneme numunesi basılarak görsel olarak yüzey kalitesi incelenmiştir.

2. Eklemeli İmalat ve Yapışkan Püskürtme Yöntemi (Additive Manufacturing and Binder Jetting Method)

İlk eklemeli imalat yöntemi stereolitografi olup birçok makalede ilk olarak 1986 yılında Hull (1986) tarafından icat edildiği belirtilmektedir. Oysa bu tarihten önce (Swainson, 1977) ve (Kodama, 1981) tarafından bu konuda yapılmış çalışmaları mevcuttur. Sonrasında birçok eklemeli imalat yöntemi geliştirilmiştir. Literatürde farklı şekillerde sınıflandırma yaklaşımları mevcuttur (Pham ve Gault, 1998). ASTM' ye göre sınıflandırılan Eklemeli imalat yöntemleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Eklemeli imalat yöntemleri (Additive manufacturing methods)

Ana Yöntemler	Alt Yöntemler
Vat Fotopolimerizasyon	-Stereolitografi (SLA) -Projeksiyon Yöntemi (Digital Light Processing) -LED ve Oksijenli Yöntem (Continuous Digital Light Processing) -Maske SLA
Toz Yatak Füzyon	-Çoklu Püskürtme ve Füzyon (Multi Jet Fusion) -Lazer Sinterleme (Selective Laser Sintering) -Lazer Ergitme (Selective Laser Melting) -Elektron Işını ile Ergitme
Laminasyon Yöntemi	-Kağıt ile renkli veya renksiz 3B baskı alan sistemler -Kompozit malzeme kullanılan sistemler
Doğrudan Enerji Biriktirme	-Lazerli Yöntem (Laser Engineering Net Shape) -Elektron Işınli Yöntem (Elektron Beam Additive Manufacturing)
Malzeme Ekstrüzyon	-Filament Ergitme Yöntemi (Fused Filament Fabrication) -Pistonlu Ekstrüzyon (Plunger Based Extrusion) -Vidalı Ekstrüzyon (Screw Based Extrusion)
Malzeme Püskürtme	-Malzeme Püskürtme -Nano Partikül Püskürtme (Nano Particle Jetting) -Drop on Demand
Yapışkan Püskürtme	-Renkli Baskı (Plastik malzeme) -Metal veya seramik malzeme kullanılan sistemler -Kum kalıp yapan sistemler

Eklemeli imalat yöntemlerinin her birinin farklı kullanım alanı ve kendine özgü avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Vat fotopolimerizasyon yöntemleri en iyi yüzey kalitesi veren metottur (Mitchell vd. (2018); Bhushan ve Caspers (2017)). Genellikle sıvı fotopolimer malzemeler kullanılsa da metal ve seramik tozlar içeren farklı ticari fotopolimer reçinelerde bulunmaktadır (Tethon3D, 2020). Metal veya seramik toz içeren fotopolimer reçinelerle ilgili farklı akademik çalışmalar mevcuttur (Deng vd. (2020); Bartolo ve Gaspar (2008); Hafkamp vd. (2018); Bae ve Halloran (2018)). Malzeme ekstrüzyon yöntemi, en çok kullanılan yöntemlerden birisidir. Özellikle malzeme ekstrüzyon yöntemlerinden eriyik filament fabrikasyonu (Fused Filament Fabrication – FFF ya da Fused Deposition Modeling - FDM) en yaygın ve en ucuz olan eklemeli imalat yöntemidir (Di Angelo vd., 2017). Malzeme ekstrüzyon yöntemlerinden biyoekstrüzyon yöntemi medikal uygulamalarda kullanılmaktadır (Morouço vd., 2016). Doğrudan enerji biriktirme yöntemleri metal parçaların yapımında kullanılmakta olup üretilen parçaların kopma dayanımı diğer eklemeli imalat yöntemlerine göre daha üstündür. Bununla birlikte toz yatak füzyon yöntemleri ile elde edilen parçaların kopma dayanımları doğrudan enerji biriktirme yöntemlerine yakındır (Zhang

vd., 2018). Ancak kompleks geometrilerin basılmasında toz yatak füzyon yöntemleri daha üstündür. Toz yatak füzyon yöntemlerinde metal malzemenin dışında seramik ve plastik malzemelerde kullanılmaktadır. Fakat toz yatak füzyon yöntemlerinde termal streten kaynaklı problemler yaşanabilmektedir. Laminasyon yöntemi genellikle prototip amaçlı kullanılmakta olup nihai ürün için kullanımı sınırlıdır. Malzeme püskürtme yönteminde ise yüksek çözünürlükte ve renkli prototiplerde elde etmek mümkündür.

2.1. Yapışkan Püskürtme Tekniği (Binder Jetting Method)

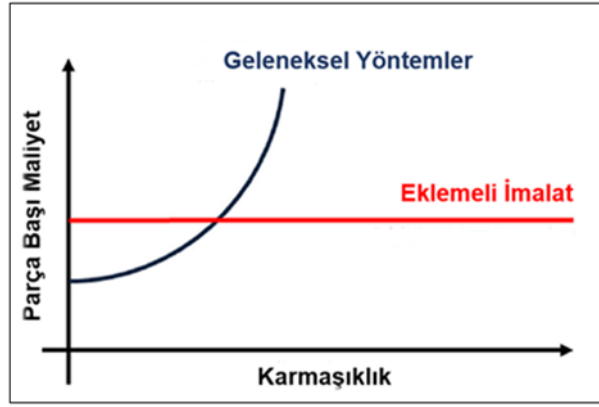
Yapışkan püskürtme yöntemi, Sachs vd. (1993) tarafından Massachusetts Institute of Technology (MIT)'de geliştirilmiş bir yöntemi olup bu yöntem 3 boyutlu yazıcı tekniği adını vermişler ve literatürde ilk başlarda bu yöntemin adı 3D yazıcı (3D Printing) olarak geçmiştir. Ancak sonradan yapışkan püskürtme olarak anılmaya başlanmıştır. Yapışkan püskürtme yönteminde toz halindeki malzeme belirli bir katman kalınlığında bir platform üzerine dönen bir silindir ya da başka mekanik elemanlar vasıtasıyla serildikten sonra bir ink-jet yazıcı kafasıyla gerekli olan bölgelere yapışkan püskürtülerek tozların birleştirilmesi sağlanır. Bu yöntemde her çeşit malzeme ile parça üretmek mümkündür. Ancak metal malzemeden üretilen parçaların mekanik özellikleri toz yatak füzyonu ve doğrudan enerji biriktirme yöntemine göre daha düşüktür (Zhang vd., 2018). Bu yöntem seramik parçaların üretiminde de avantajlı bir şekilde kullanılabilir. Metal ve seramik parçaların üretimi iki aşamalı olup ilk aşamada yazıcıdan literatürde yeşil parça (green part) denilen parça elde edilir (Ziaee ve Crane, 2019). Yeşil parçada metal ya da seramik toz kullanılan yapıştırıcı ile bağlanmış halde bulunur. Ancak; nihai ürünün elde edilmesi için yapıştırıcının arındırılması ve ürün yoğunluğunun artırılması gerekmektedir. Bunun için direkt sinterleme ya da önce yapışkan arındırma (debinding) ve sonrasında sinterleme yapılmaktadır (Lv vd., 2019). Yapışkan püskürtme yöntemi, malzeme ekstrüzyon yöntemleri gibi ekonomik bir yöntem olup büyük boyutlu hacimli makinelerin yapılması kolaydır. Voxeljet firmasının VX4000 modelinin baskı alanı 4000 x 2000 x 1000 mm'dir (Voxeljet, 2020). Yapışkan püskürtme yönteminde ürünün kalitesi; toz malzeme ve yapışkan türü, serilme yöntemi, tozun boyutu, tozun kuruluğu, baskı stratejisi ve baskı sonrası işlemler gibi faktörlere bağlıdır.

2.1.1. Yapışkan Püskürtmede Kullanılan Toz Malzemeler (Powder Materials Used In Additive Manufacturing)

Yapışkan püskürtme yönteminde metal, seramik ve polimerler gibi malzemeler kullanılmaktadır. Özellikle bu yöntemle seramik malzemelerin kullanıldığı birçok çalışma mevcuttur (Lv vd., 2019). Seramik malzemelerin üretiminde baskı sonrası başka işlemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Nihai ürünü elde etmek için baskı sonrası ya direkt sinterleme ya da yapışkan arındırma ve sinterleme işlemlerinin yapılması gerekmektedir.

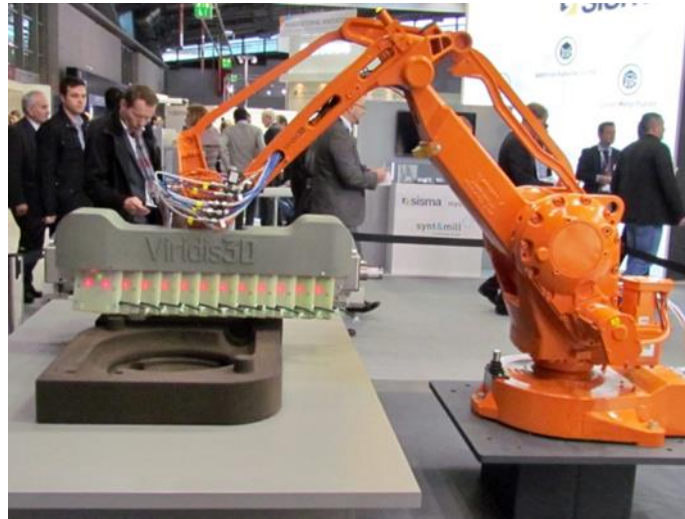
Nihai ürün özelliklerine etki eden en önemli faktörlerden biri yoğunluktur. Artan yoğunluk ile ürünün mekanik sonuçları da iyileşmektedir. Sun vd. (2002) çalışmalarında Ti3SiC2 malzeme kullanmış, baskı sonrasında malzemeyi soğuk izostatik presleme sonrasında da sinterleme işlemine tabi tutup %99'luk bir yoğunluk değeri elde edildiği rapor edilmiştir. Yapışkan püskürtme yönteminde metal malzemeler de kullanılmaktadır. Literatürde metal malzemelerde bronz infiltre etme, direkt sinterleme ya da arındırma sonrası sinterleme gibi metodların kullanıldığı birçok çalışma mevcuttur. Kumar vd. (2017) yaptıkları çalışmada bakır toz malzeme kullanmışlardır. Baskı alındıktan sonra sıcak izostatik presleme yöntemi ile %92 yoğunluk elde etmişlerdir. Sonrasında sinterleme işlemi yaparak %99.7'lik yoğunluğa ulaştığını belirtmişlerdir. Elliott vd. (2016) çalışmalarında 316L paslanmaz çeliğe 316L nanopartikül infiltre etmişlerdir. Mirzababaei and Pasebani (2019) yapışkan püskürtme yönteminde 316L paslanmaz çelik malzeme kullanımı ile ilgili detaylı bir derleme çalışması yapmışlardır.

Yapışkan püskürtme yönteminin en çok kullanıldığı alanlardan birisi de döküm sektörüdür. Kum kalıpların model kullanılmadan direkt olarak yapılmasını sağlayan kum yazıcılar geliştirilmiştir. Kum yazıcılarda kum malzemenin üzerine, kum kalıbı yapımında kullanılan fenolik reçineler püskürtülmektedir. Kum yazıcılarla karmaşık parçaların yapımı çok kolay hale gelmiştir. Parçanın karmaşıklık düzeyi arttıkça kum yazıcılar geleneksel yöntemlerden daha ekonomik iken, parça çok basit ve fazla sayıda üretilecek ise geleneksel yöntemler ile üretim daha hızlı ve ekonomik olmaktadır (Şekil 1). Geleneksel yöntemlerde model yapımı çok maliyetli bir işlem olsa da parça sayısı arttıkça modelin maliyeti düşmektedir. Geleneksel yöntemde model elde edildikten sonra hız açısından bir avantaj sağlarken kum yazıcılarda da şekilsel özgürlük bir avantajı sunmaktadır. Geleneksel yöntemlerde talaşlı imalatın sınırları çerçevesinde model yapılmakta iken kum yazıcılarda ise eklemeli imalatın sunduğu şekilsel özgürlüklerden, döküm tekniğinin izin verdiği sınırlar içerisinde faydalanılabilir. Literatürde kum yazıcılar kullanılarak malzeme israfının azaltıldığı, daha hafif parçaların elde edildiği ve değişik kum kalıp tasarımlarının yapıldığı farklı çalışmalar bulunmaktadır (Wang vd. (2019); Sama vd. (2019); Snelling vd. (2015); Sivarupan vd. (2019)). Birçok avantaja sahip olan kum yazıcılar döküm sektöründe büyük bir ses getirmiş olsa da özellikle hızların artırılması yönünde çalışmalar henüz yeterli düzeyde değildir. Bu yöntemde imal etme hızlarının artırılması geleneksel yöntemler yerine kum yazıcıların tercih edilmesini sağlayabilecektir.



Şekil 1. Karmaşıklık maliyeti (Almaghariz vd., 2016) (Cost of complexity)

Kum yazıcıların veya diğer yapışkan püskürtme makinelerinin üretim hızlarının artırılması için X-ekseni boyunca yazıcı başlıkları koyularak X eksenini hareketinin iptal edilmesi bir çözümdür (Şekil 2). Üretimin kesintisiz bir şekilde devam etmesi için Voxeljet firmasının geliştirdiği bant sistemi mevcuttur (Ederer ve Hartmann, 2013). Bunun dışında ExOne, Zcorp, HP ve Desktop Metal gibi yapışkan püskürtme teknolojisini ticarileştiren firmalar bulunmaktadır. Yapışkan püskürtme yönteminde biomalzemeler de kullanılmaktadır. Kalsiyum fosfat, kalsiyum silikat ve hidroksiapatit gibi biyo uyumlu malzemelerin kullanıldığı çalışmalar mevcuttur (Ziaee ve Crane, 2019). Ayrıca, yine farklı birçok polimer malzemeler de kullanılmaktadır (Wu vd. (1996); Suwanprateeb and Chumnanklang (2006); Polzin vd. (2013)).



Şekil 2. Viridis 3D kum yazıcı (EnvisionTEC, 2020) (Viridis 3D sand printer)

2.1.2. Yapışkan Püskürtmede Ürün Kalitesine Etki Eden Faktörler (Factors Affecting Product Quality in Binder Jetting)

Yapışkan püskürtmede ürün kalitesini etkileyen faktörler; kullanılan toz malzeme özellikleri, baskı parametreleri, yapıştırıcı türü ve miktarı, sinterleme gibi baskı sonrası pek çok işlem elde edilen ürünün mikro yapısı, yüzey pürüzlülüğü ve mekanik özelliklerini etkilemektedir.

2.1.2.1. Toz Özellikleri (Powder Properties)

Kullanılacak tozun niteliği üretilen baskıların kalitesini etkileyen en önemli faktör olarak ifade edilebilir. En önemli toz karakteristikleri ise toz morfolojisi, partikül boyutu ve dağılımı, serilebilirlik, yoğunluğu ve segregasyondur (Mostafaei vd., 2021). Küresel şekilli tozlar; daha kolay serilebilmesi, daha homojen baskı vermesi ve baskı yoğunluğunu artırmasından dolayı tercih nedeni olabilirler. Küresel şekil elde etmek için gaz veya plazma atomizasyon tekniklerinin kullanılmaktadır. Bu tekniklerin dışında su atomizasyon ve bilya ile öğütme yöntemleri de kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemlerde taneciklerin şekilleri düzensiz olmaktadır (Mostafaei vd., 2021).

Partikül ortalama boyutu ve boyut dağılımı paketleme yoğunluğunu, serilebilirliği ve nihai baskıyı etkilemektedir. Partikül boyutu büyüdükçe tozun akışkanlığı artmaktadır. Ancak büyük tane boyutu yoğunluğu olumsuz etkileyebilmektedir. Çok küçük tane boyutunda ise topaklanma sorunlarına neden olmaktadır. Monomodal

tozların paketleme yoğunlukları düşük olmaktadır. Bimodal tozlar daha yüksek paketleme yoğunluğuna sahiptir (Miyanaşi, Zhang, vd., 2018). Partikül ortalama boyutu 35 mikron, boyut dağılımı 16-63 mikron arasındaki küresel tozların yeşil parça (green part) yoğunluğu %50 civarındadır (Mostafaei vd., 2021).

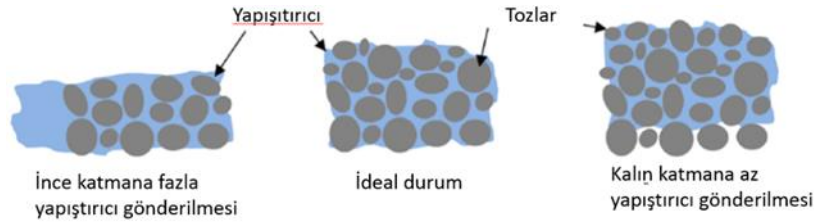
Paketleme yoğunluğu, yeşil ve nihai parçanın yoğunluğunu ve mekanik özelliklerini büyük oranda etkilemektedir. Paketleme yoğunluğunun yüksek olması gerekmektedir. Geniş partikül boyut dağılımlı tozlar dar partikül boyut dağılımlı tozlara göre daha yüksek paketleme yoğunluğuna sahiptirler (Mostafaei vd., 2021). Özellikle 7:1 ve 10:1 oranlarındaki bimodal tozlarda çok yüksek paketleme yoğunluğu sağlanmaktadır (German (1992); Egger vd. (1999)).

2.1.2.2. Baskı Parametreler (Print Parameters)

Yapışkan püskürtme yönteminde katman kalınlığı, baskı hızı, toz serim yöntemi, yapışkan doygunluğu, kuruma zamanı ve ısıtıcı gücü gibi parametreler bulunmaktadır. Katman kalınlığı ürün özelliklerini en çok etkileyen parametrelerden biridir. Katman kalınlığı arttıkça yüzey kalitesi ve boyutsal tolerans olumsuz etkilenmektedir. Ayrıca çok kalın katman toz yoğunluğunu azaltmaktadır (Zhang vd., 2009). Yoğunluğun azalması ise mekanik özelliklerin düşmesine neden olmaktadır. Ancak kalın katman ile üretim hızı artmaktadır.

Baskı hızı ve toz serimi ile alakalı hızlar yapışkan püskürtme yönteminde önemli rol oynamaktadır. Toz serim işleminde genellikle doktor bıçağı (doctor blade), besleme hunisi (hopper), merdane (roller) ve besleme hunisi-merdane sistemleri kullanılmaktadır. Literatürde merdane ilerleme hızının 0,1 ile 16 mm/sn arasında değiştiği ifade edilmektedir. Merdane ilerleme hızının 4 mm/sn 'nin üzerine çıkması durumunda toz malzemenin homojen serilmesi zorlaşacaktır (Mostafaei vd., 2021). Baskı hızı arttıkça oryantasyon ne olursa olsun boyutsal doğruluk azalmaktadır. Ancak değişik oryantasyonlarda farklı boyutsal doğruluk rakamları elde edilmektedir (Miyanaşi, Momenzadeh, vd., 2018).

Yapışkan doygunluğu baskı kalitesi için önemli diğer bir parametredir. Yüksek doygunluk oranı, boyut doğruluğunu ve yüzey kalitesini düşürmektedir. Katman kalınlığı doygunluk ilişkisi önemlidir. Şekil 3'de doygunluk ve katman kalınlığı ilişkisi gösterilmektedir. Fazla yapışkan gönderilmesi durumunda yapışkan istenilmeyen bölgelere taşacaktır. Daha az yapışkan gönderilmesi durumunda ise alt katmanlar ile kuvvetli adhezyon bağ zayıflayacak hatta oluşmayacaktır.



Şekil 3. Katman kalınlığı doygunluk ilişkisi (Mostafaei vd., 2021) (Relation between layer thickness and saturation.)

2.1.2.3. Yapışkanlar (Binders)

Yapışkan püskürtme tekniğinde kullanılan yapışkanlar kullanım yerine göre değişiklik göstermektedir. Yapışkan püskürtmede toz içi (in-bed binders), faz değiştirme (phase-changing binders) ve sinterleme düzenleyici (sintering inhibition binders) olmak üzere üç farklı yapıştırma mekanizması vardır. Toz içi yapışkan sisteminde ana toz ile yapıştırıcı özelliği taşıyan tozlar karışmış haldedir. 3B yazıcı kartuşundan solvent püskürtülerek bu yapıştırıcı toz aktif edilmekte ve yapıştırma işlemi sağlanmaktadır. Toz içi sisteminde yapışkan toz olarak PVA (Polivinil alkol), maltodekstrin gibi tozlar kullanılmaktadır. Faz değiştirme sisteminde toz içerisinde herhangi bir yapıştırıcı madde bulunmamakta ve yapıştırıcı kartuşun içerisinde yer almaktadır. Yapıştırıcı tozun üzerine püskürtüldükten sonra faz değiştirip katılaşmaktadır (Mostafaei vd., 2021). Kum kalıp yapan yazıcılarda kullanılan yapışkanlar faz değiştiren tipte yapışkanlar olup bunlar genellikle furan ve fenolik tipte reçinelerdir. Bu reçinelerin ısı dayanımı ve gaz geçirgenliği gibi özellikleri bulunmaktadır.

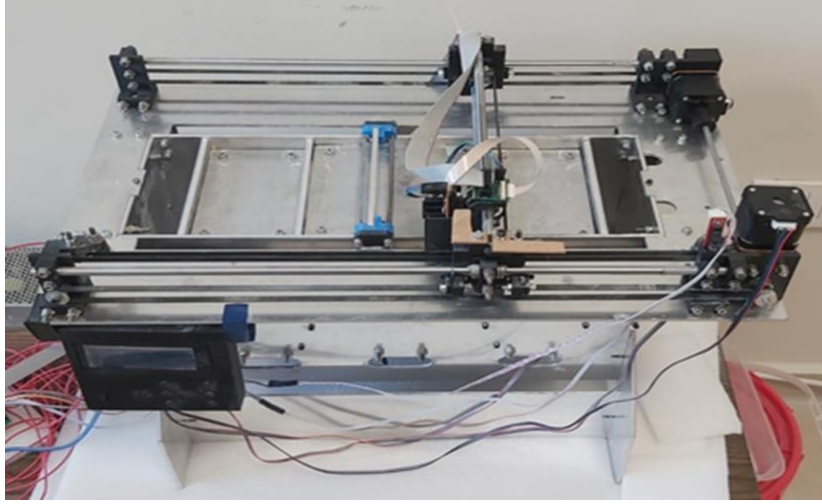
2.1.2.4. Baskı sonrası işlemler (Post Process)

Yapışkan püskürtme tekniğinde elde edilen ilk baskıya yeşil parça denilmektedir. Yeşil parçanın baskı alanından çok dikkatli bir şekilde alınması gerekmektedir. Kullanılan malzeme ve baskı parametrelerine bağlı olarak özellikle bazı durumlarda ince cidarlı bölgeler hasar görebilir. Nihai parçanın elde edilmesi için bu yeşil parça üzerine ilave bazı işlemlerin yapılması gerekmektedir. Ancak bu durum kum yazıcılardan farklıdır. Kum yazıcılarda elde edilen ilk parça genellikle nihai parçadır. Diğer yazıcılarda yeşil parçanın sinterlenmesi ya da infiltrasyon işlemine tabi

tutulması gerekmektedir. Sinterleme işleminde yeşil parça direkt olarak sinterlenebilir ya da ön işlem olarak yapışkan arındırma işleminden sonra sinterleme yapılabilir. İnfiltrasyon işlemi de aynı şekilde direkt ya da yapışkan arındırma işlemi ile birlikte yapılabilir. Sinterleme ya da infiltrasyon işlemlerinden sonra ancak nihai parça elde edilir.

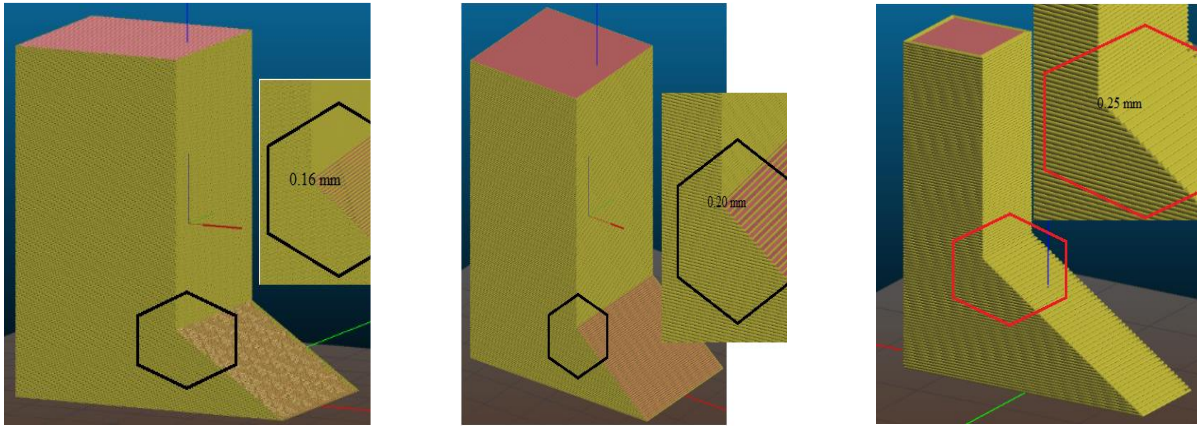
3. Materyal Metot (Material and Method)

Çalışmada daha önce tasarım ve üretimi yapılan 3D yazıcı (Şekil 4) kullanılarak üç farklı katman kalınlığında üç adet numune elde edilmiştir. Örnek hazırlamada tane boyutu 80 mikron toz alumina, maltodekstrin ve pudra şekeri kullanılmıştır. Literatür incelemesi dikkate alınarak kullanılacak karışım; %50 alumina, %25 maltodekstrin ve %25 pudra şekeri olacak şekilde yapılmıştır. Bağlayıcı olarak ise yapışkan püskürtme yöntemine uygun yapıştırıcı piyasadan temin edilerek temin edilerek kullanılmıştır.



Şekil 4. Çalışmada kullanılan 3D yazıcı (Ytec, 2022) (3D printer used in this study)

Numunelerin katman kalınlıkları sırası ile 0.16mm, 0.20mm ve 0.25 mm olmak üzere üç farklı şekilde hazırlanmıştır. Numune yüzeylerinde katman kalınlıklarındaki geçişlerin daha iyi izlenebilmesi için numuneler düz ve eğimli (30°) yüzeylere sahip olacak şekilde tasarlanmıştır (Şekil 5).

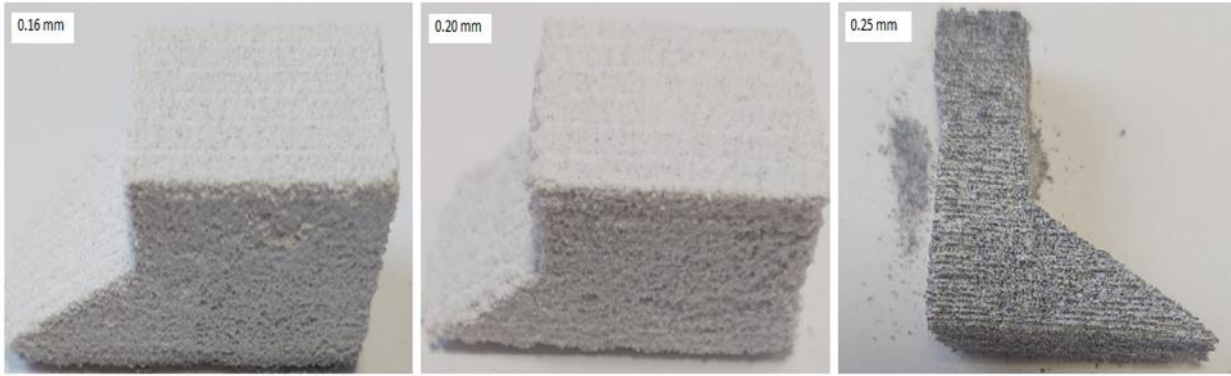


Şekil 5. Tasarlanan numuneler (Designed samples)

4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Çalışmada üç farklı katman kalınlığında (0.16mm, 0.20 mm ve 0.25 mm) üretilen deneme örnekleri Şekil 6'de verilmiştir.

Deneme örneklerin elde edilmesinde kullanılan karışımın alumina tozu, maltodekstrin ve pudra şekeri karışımı kullanılmıştır. Elde edilen numunelerde katman kalınlığı arttıkça hem düz hem de eğimli yüzeylerde yüzey kalitesinin olumsuz yönde etkilendiği belirlenmiştir.



Şekil 6. Farklı katman kalınlıklarında üretilen örnek numuneler (Printed samples in different layer thickness)

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Yapışkan püskürtme yöntemi halen en önemli eklemeli imalat yöntemlerinden biridir. Bu yöntem ile her türlü malzeme (metal tozu vb.) kullanılarak üretim yapılabilir. Yapışkan püskürtme yöntemi, kum kalıp üretiminde çok önemli avantajlar sunmaktadır. Bu yöntem sayesinde çok karmaşık şekilli kalıplar kısa sürede ve daha az maliyetle üretilebilmektedir. SLS (Selective Laser Sintering) ve EBM (Elektron Demeti ile Ergitme) yöntemlerine göre yapışkan püskürtme yönteminde termal gerilmenin çok az olması bir avantaj olup, bu durum özellikle seramik parça üretiminde yapışkan püskürtme yöntemini ön plana çıkarmaktadır. Özellikle metal parça üretiminde yapışkan püskürtme yöntemi mekanik özellikler açısından SLS ve EBM gibi diğer eklemeli imalat yöntemlerine göre bazı dezavantajlar içerse de bu durum yüksek basınç ve yüksek sıcaklık presleri ile aşılabılır. Bir ön hazırlık mahiyetinde yapılan bu çalışmada kullanılan 3D yazıcı daha önce proje kapsamında tasarım ve imalatı yapılan bir yazıcıdır. Deney örnekleri mevcut bu yazıcıda 0.16 mm, 0.20 mm ve 0.25 mm katman kalınlığında olmak üzere üç farklı şekilde üretilmiştir. Örnek numunelerin üretilmesinde karışım olarak %50 alumina, %25 maltodekstrin ve %25 pudra şekeri olacak kullanılmıştır. Üretimi gerçekleştirilen örnek numuneler incelendiğinde en iyi yüzey kalitesini 0.16mm katman kalınlığına sahip örnekler verirken, katman kalınlığının artması ile yüzey kalitesinin düştüğü belirlenmiştir. Alumina tozun tanecik yapısı itibari ile küresel şekle yakın iken maltodekstrin ve pudra şekerinin tanecik yapısı daha heterojen olması serme işlemini zorlaştırmıştır. Ayrıca, bu durumun artan katman kalınlığı ile bozulan yüzey kalitesini de olumsuz yönde etkilediği tespit edilmiştir. Şekiller incelendiğinde örneklerde bölgesel olarak bozukluklar görülmektedir. Özellikle 0.25mm katman kalınlığına sahip numunede katman geçişleri çok net bir şekilde görülebilmektedir. Deney örneklerinde daha düzgün yüzeylerin elde edilmesi için farklı metal tozları, daha homojen katkı materyalleri, farklı tutkal türü ve miktarı ile denemelerin yapılması faydalı olacaktır. Henüz gelişim aşamasını devam ettiren yapışkan püskürtme yöntemi yeni teknolojilerin geliştirilmesi işletmelerin endüstri 4.0'a geçişini hızlandıracak; havacılık, otomotiv, biyomedikal ve döküm vb. sektörlerinde kritik bir öneme sahip olacağı aşikardır.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Ondokuz Mayıs Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 1904-21-006 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Almaghariz, E. S., Conner, B. P., Lenner, L., Gullapalli, R., Manogharan, G. P., Lamoncha, B., Fang, M., 2016. Quantifying the Role of Part Design Complexity in Using 3D Sand Printing for Molds and Cores. *International Journal of Metalcasting*, 10(3), 240-252.
- ASTM., (2012). Standard terminology for additive manufacturing technologies. In. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Bae, C.-J., Halloran, J. W., 2018. A segregation model study of suspension-based additive manufacturing. *Journal of the European Ceramic Society*, 38(15), 5160-5166.
- Bartolo, P. J., Gaspar, J., 2008. Metal filled resin for stereolithography metal part. *CIRP Annals*, 57(1), 235-238.
- Bhushan, B., Caspers, M., 2017. An overview of additive manufacturing (3D printing) for microfabrication. *Microsystem Technologies*, 23(4), 1117-1124.

- Deng, F., Nguyen, Q.-K., Zhang, P., 2020. Multifunctional liquid metal lattice materials through hybrid design and manufacturing. *Additive Manufacturing*, 33, 101117.
- Di Angelo, L., Di Stefano, P., Marzola, A., 2017. Surface quality prediction in FDM additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(9), 3655-3662.
- Ederer, I., Hartmann, A. D., 2013. Method for producing three-dimensional models with special construction platforms and drive systems (German Patent No. DE 10 2012 010 272 A1). G. P. a. T. M. Office.
- Egger, G., Gygax, P. E., Glardon, R., ve Karapatis, N., 1999. Optimization of powder layer density in selective laser sintering.
- Elliott, A. M., AlSalihi, S., Merriman, A. L., ve Basti, M. M., 2016. Infiltration of Nanoparticles into Porous Binder Jet Printed Parts. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 9, 128-133.
- EnvisionTEC., 2020. The Viridis3D Story. Retrieved 23 April from <https://enviontec.com/3d-printers/robotic-additive-manufacturing/>
- German, R. M., 1992. Prediction of sintered density for bimodal powder mixtures. *Metallurgical Transactions A*, 23(5), 1455-1465.
- Hafkamp, T., van Baars, G., de Jager, B., Etman, P., 2018. A feasibility study on process monitoring and control in vat photopolymerization of ceramics. *Mechatronics*, 56, 220-241.
- Kodama, H., 1981. Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer. *Review of Scientific Instruments*, 52(11), 1770-1773.
- Kumar, A., Bai, Y., Eklund, A., Williams, C. B., 2017. Effects of Hot Isostatic Pressing on Copper Parts Fabricated via Binder Jetting. *Procedia Manufacturing*, 10, 935-944.
- Lv, X., Ye, F., Cheng, L., Fan, S., Liu, Y., 2019. Binder jetting of ceramics: Powders, binders, printing parameters, equipment, and post-treatment. *Ceramics International*, 45(10), 12609-12624.
- Mirzababaei, S., Pasebani, S., 2019. A Review on Binder Jet Additive Manufacturing of 316L Stainless Steel. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 3(3), 82.
- Mitchell, A., Lafont, U., Hołyńska, M., Semprimoschnig, C., 2018. Additive manufacturing — A review of 4D printing and future applications. *Additive Manufacturing*, 24, 606-626.
- Miyanaji, H., Momenzadeh, N., Yang, L., 2018. Effect of printing speed on quality of printed parts in Binder Jetting Process. *Additive Manufacturing*, 20, 1-10.
- Miyanaji, H., Zhang, S., Yang, L., 2018. A new physics-based model for equilibrium saturation determination in binder jetting additive manufacturing process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 124, 1-11.
- Morouço, P., Biscaia, S., Viana, T., Franco, M., Malça, C., Mateus, A., Moura, C., Ferreira, F. C., Mitchell, G., Alves, N. M., 2016. Fabrication of Poly(ϵ -caprolactone) Scaffolds Reinforced with Cellulose Nanofibers, with and without the Addition of Hydroxyapatite Nanoparticles. *BioMed Research International*, 2016, 1596157.
- Mostafaei, A., Elliott, A. M., Barnes, J. E., Li, F., Tan, W., Cramer, C. L., Nandwana, P., Chmielus, M., 2021. Binder jet 3D printing— Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges. *Progress in Materials Science*, 119, 100707.
- Pham, D. T., Gault, R. S., 1998. A comparison of rapid prototyping technologies. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 38(10), 1257-1287.
- Polzin, C., Spath, S., Seitz, H., 2013. Characterization and evaluation of a PMMA-based 3D printing process. *Rapid Prototyping Journal*, 19(1), 37-43.
- Sachs, E. M., Haggerty, J. S., Cima, M. J., Williams, P. A., 1993. Three-dimensional printing techniques (United States Patent No. 5,204,055). U. S. Patent.
- Sama, S. R., Badamo, T., Lynch, P., Manogharan, G., 2019. Novel sprue designs in metal casting via 3D sand-printing. *Additive Manufacturing*, 25, 563-578.
- Sivarupan, T., Upadhyay, M., Ali, Y., El Mansori, M., Dargusch, M. S., 2019. Reduced consumption of materials and hazardous chemicals for energy efficient production of metal parts through 3D printing of sand molds. *Journal of cleaner production*, 224, 411-420.
- Snelling, D., Li, Q., Meisel, N., Williams, C. B., Batra, R. C., Druschitz, A. P., 2015. Lightweight Metal Cellular Structures Fabricated via 3D Printing of Sand Cast Molds. *Advanced Engineering Materials*, 17(7), 923-932.
- Sun, W., Dcosta, D., Lin, F., El-Raghy, T., 2002. Freeform fabrication of Ti3SiC2 powder-based structures: Part i Integrated fabrication process. *Journal of Materials Processing Technology*, 127, 343-351.
- Suwanprateeb, J., Chumnanklang, R., 2006. Three-dimensional printing of porous polyethylene structure using water-based binders. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*, 78(1), 138-145.
- Swainson, W. K., 1977. Method, medium and apparatus for producing three-dimensional figure product (United States Patent No. 4,041,476). U. S. Patent.
- Tethon3D., 2020. Ferrolite Iron Resin – 500ml. Retrieved 20 April from <https://tethon3d.com/product/ferrolite-iron-resin-500ml/>
- Voxeljet., 2020. Largest industrial 3d sand printing system in the world: the vx4000. Retrieved 20 May from <https://www.voxeljet.com/3d-printing-systems/vx4000/>
- Wang, J., Sama, S. R., Manogharan, G., 2019. Re-Thinking Design Methodology for Castings: 3D Sand-Printing and Topology Optimization. *International Journal of Metalcasting*, 13(1), 2-17.
- Wu, B. M., Borland, S. W., Giordano, R. A., Cima, L. G., Sachs, E. M., Cima, M. J., 1996. Solid free-form fabrication of drug delivery devices. *Journal of Controlled Release*, 40(1), 77-87.
- Ytec., 2022. Plan B. Retrieved 28 January from <https://ytec3d.com/plan-b/>
- Zhang, W., Melcher, R., Travitzky, N., Bordia, R. K., Greil, P., 2009. Three-Dimensional Printing of Complex-Shaped Alumina/Glass Composites. *Advanced Engineering Materials*, 11(12), 1039-1043.
- Zhang, Y., Wu, L., Guo, X., Kane, S., Deng, Y., Jung, Y.-G., Lee, J.-H., Zhang, J., 2018. Additive Manufacturing of Metallic Materials: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27(1), 1-13.
- Ziaee, M., Crane, N. B., 2019. Binder jetting: A review of process, materials, and methods. *Additive Manufacturing*, 28, 781-801.