

## FDM ile Üretilen PET-G Malzemenin Üretim Sıcaklığı ve Hızının Boyutsal Doğruluğa Etkisi

Tuğçe Tezel\*

<sup>1</sup>Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, Türkiye

\*Sorumlu yazar: tugcetezel@akdeniz.edu.tr

**Özet** – Son yıllarda imalat teknolojileri arasında, talaşlı imalatla birlikte eklemeli imalat da yer edinmeye başladığı görülmektedir. Üç boyutlu yazıcı ile imalat olarak da adlandırılan eklemeli imalat, makine tasarımı ve imalatında kullanılmaktadır. Bu imalat tekniği ile nihai parça üretiminin yanı sıra prototip uygulamalarında da faydalanılmaktadır. Ergiyik biriktirme tekniği (FDM) ise popüler eklemeli imalat teknolojilerinden biridir. Bu yöntemle imalatta ABS (Akrilonitril Bütadin Stiren), PLA (Polilaktik Asit), PET-G (Polietilen Tereftalat-geliştirilmiş) gibi çeşitli polimerler kullanılmaktadır. İmalat parametreleri, üretilen parçanın mukavemetini ve yüzey özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Üç boyutlu yazıcı ile imalatta önemli üretim sınırlarından biri de boyutsal doğruluktur. Mümkün olan en iyi toleransta parça imalatı sağlayabilmek için, üretim parametrelerinin doğru olarak belirlenerek uygulanması gereklidir. Bu sebeple, yazdırma hızı, yazdırma sıcaklığı, yatak sıcaklığı gibi çeşitli yazdırma parametreleri incelenerek boyutsal doğruluğun artırılması sağlanmalıdır. Bu çalışmada, PET-G malzemenin 5, 10,15 mm çapında içi boş ve dolu numuneler, ergiyik biriktirme tekniği ile çeşitli yazdırma sıcaklıklarında (220 °C ve 240 °C) ve yazdırma hızlarında (30 mm/s ve 40 mm/s) üretilerek boyutsal doğruluğu deneysel olarak incelenmiştir. Özellikle yazdırma sıcaklığının boyutsal doğruluğu etkilediği sonuçlarla ortaya konmuştur.

**Anahtar kelimeler** – 3B yazıcı, boyutsal doğruluk, Eklemeli imalat, FDM, PET-G,

### I. GİRİŞ

Eklemeli imalat, katman bazında üretime dayalı birçok teknolojiyi bir araya getirir [1]. Eklemeli imalat teknolojilerinin gelişimi, aynı zamanda çok güçlü talep nedeniyle yeni çözümlere yol açmaktadır [2]. Teknolojinin türüne bağlı olarak, eklemeli imalat işlemleri için toz, sıvı veya katı bazlı malzemeler kullanılabilir. Tüm eklemeli imalat teknolojilerinin kullanımında beş ortak adım vardır. Bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımı kullanılarak dijital bir 3D model oluşturulur. Daha sonra, CAD modeli \*Stl formatına dönüştürülür. \*Stl dosyası parçanın dış hatlarını temsil eden x-y düzleminde ince enine kesit katmanları oluşturacak şekilde iki boyutlu olarak dilimlenir. z koordinatında bu dilimlerin katmanlı olarak inşasıyla üç boyutlu model oluşturulur [3]. Son olarak, imal edilen model makineden uzaklaştırılır, ihtiyaca bağlı olarak ilave işlemler uygulanabilir. Eklemeli imalat yöntemleri, lazer kullanan ve kullanmayan işlemler olarak genel bir şekilde sınıflandırılabilir. Lazer kullanılan işlemlerde makine maliyetleri yüksektir ve ilave bakım onarım ihtiyaçları oluşabilir. Ergiyik biriktirme tekniği (FDM) ise lazer kullanılmayan sistemlerden olup, ucuz ve kolay kullanımı sebebiyle en yaygın kullanıma sahip eklemeli imalat tekniğidir [4]. Genellikle Akrilonitril bütadien stiren (ABS), Polilaktik Asit (PLA) gibi plastik filamentler kullanılarak parça imalatı gerçekleştirilir. Bunun yanı sıra PA, PVA, PC, PET-G gibi çeşitli polimer malzemeler de kullanılabilir.

Bu çalışmada, PET-G malzemenin numuneler, ergiyik biriktirme tekniği ile çeşitli yazdırma sıcaklıklarında (220 °C ve 240 °C) ve yazdırma hızlarında (30mm/s ve 40 mm/s ) Ø5, Ø10 ve Ø15 olarak üretilmiş olup boyutsal doğruluğu deneysel olarak incelenmiştir.

PET-G, Polietilen Tereftalat'ın kısaltması olup, G glikolün modifiye edildiğini ifade eder. Bu modifikasyon, ergime noktasını ve kristalleşme kabiliyetini artırır, yüksek tokluğa sahip amorf bir malzeme eldesi sağlar. Su şişeleri, gıda paketleme gibi işlemler için kullanılır [5]. PET-G filament, ABS filamente nazaran daha rijit ve iyi mekanik özelliklere sahip olup, PLA gibi üretimi kolaydır. Bu nedenle, bu iki filament türünün iyi özelliklerinin birleşimi olarak düşünülebilir.

FDM ile imalat verimli, güvenli ve temiz bir teknoloji olmasına rağmen, üretilen FDM parçalarının işlevselliği ve kalitesi, plastik şekillendirme ve enjeksiyonla kalıplama gibi geleneksel üretim işlemleriyle karşılaştırıldığında hala sınırlıdır. Üretim sürecinde kullanılan işlem parametreleri, imal edilen herhangi bir parçanın işlevselliğini ve kalitesini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, literatürdeki çalışmalar çeşitli polimer malzemelerde boyutsal doğruluk incelemek üzere üretim parametrelerinin etkisi üzerine yoğunlaşmaktadır [6-7-8-9-10-11-12]. Bu çalışmalar, ergiyik biriktirme tekniği ile üretilen malzeme özelliklerini ve mukavemetini geliştirmek için farklı yöntemler sunmaktadır. Bazı araştırmacılar boyut toleransı ve yüzey kalitesini yazdırma hızı ve ekstrüzyon sıcaklığıyla ilişkilendirirken [13], diğerleri ise malzeme meydana gelen gerilme ve büzülmelerin [14], katmanlar arasındaki yüzey kalitelerinin [15-16-17-18], üretilen parça boyutunun [19], ekstrüde edilen parçanın çapı ve malzemenin [20] etkilerini araştırmıştır. Bu çalışmada, literatürde henüz incelenmemiş olan, içi boş ve dolu olarak üretilen dairesel numuneler PET-G malzemenin ergiyik biriktirme tekniği ile imal edilerek, yazdırma hızı ve sıcaklığının boyutsal doğruluğa etkisi deneysel olarak incelenmiştir.

## II. MATERYAL VE METHOD

PET-G, yüksek parlaklıkta saydam, kolayca renklendirilebilen, hafif, aynı zamanda yüksek bir darbe dayanıma sahip bir malzemedir. Isıl olarak kolayca şekillendirilebilen bu malzeme steril olduğundan gıda ve kimya endüstrisinde bir kaplama veya ambalaj olarak kullanılır. Aynı zamanda tamamen geri dönüştürülebilir PET-G çevre dostu olarak bilinen bir polimerdir.

Çalışmada boyutsal doğruluk için kullanılan dairesel numunelerin üretiminde, 1,75mm çapında PET-G filament kullanılmıştır.

Numuneler, Zmorph marka üç boyutlu yazıcı kullanılarak imal edilmiştir. Bu yazıcı 250x235x165mm boyutlarında bir modeli X ve Y eksenleri için 14µm, Z eksenini için 0,625µm konumlama hassasiyeti ile imal edilmektedir. Deney numunelerinin yazdırılmasında, tüm numuneyi tek bir yazdırma açısında imal edebilmek için özel hazırlanan 3B yazdırma kodları kullanılmıştır. Tüm numuneler için, numune çevresine 3 kabuk kullanılmış ve numunenin iç kısmı, belirlenen yazdırma açılarında %40 dolgu kullanılarak yazdırılmıştır. PET-G malzeme, 100°C ısıtılmış yazdırma yatağına 0,2mm katman kalınlığında ekstrude edilmiştir. Üretilen numuneler Şekil 1’de yer almaktadır. Şekil 1’de çeşitli çaplardaki dairesel numuneler 220°C ve 240°C ekstrüzyon sıcaklıklarında, 30mm/s ve 40 mm/s yazdırma hızlarında üretilerek yazdırma hızı ve sıcaklığının içi dolu ve boş dairesel numunelerde boyutsal doğruluğa etkisi incelenmiştir.



Şekil 1. Üretilen numuneler

Şekil 1’de üretilen içi dolu ve boş dairesel numunelerin boyutsal doğruluğu Akdeniz Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Prototipleme Laboratuvarında bulunan SOIF SZ780-B2/L Trinouler Stereo Zoom Mikroskop kullanılarak incelenmiştir. Kullanılan mikroskop Şekil 2’de yer almaktadır.

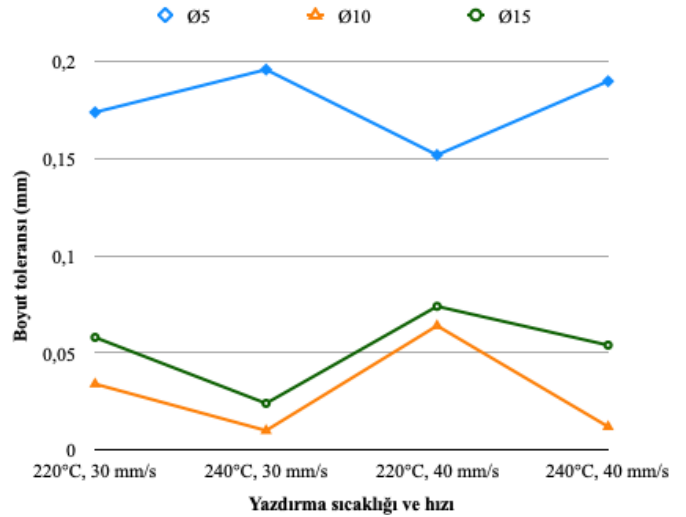


Şekil 2. Boyutsal doğruluk için kullanılan mikroskop

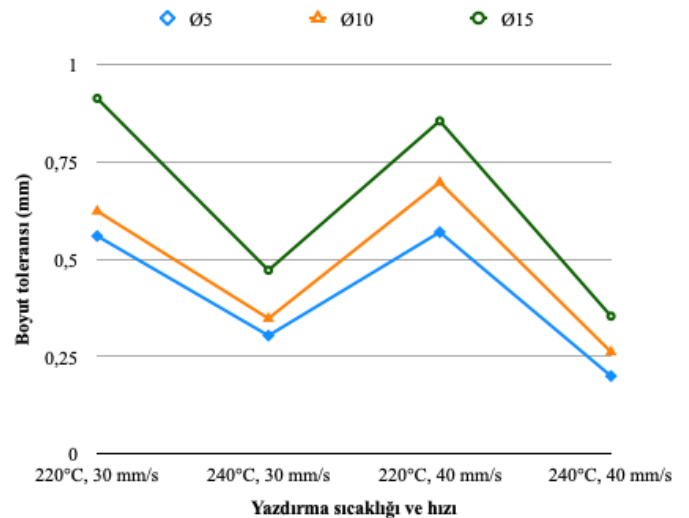
Bu mikroskop ile entegre olarak çalışan M-SHOT 5.0 MP CMOS mikroskop görüntüsü transfer kamerası ve yazılımı ile incelenen yüzeylerden görüntüler alınmıştır. Alınan görüntüler aracılığıyla dairesel numunelerin çapı, yarı çapı, çevresi ve merkez noktası gibi veriler toplanmıştır. Her numuneden üç kez üretilmek suretiyle mikroskop ölçümleri tekrarlanarak sonuçlara ulaşılmıştır.

## III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Şekil 1’de içi dolu olarak üretilen Ø5, Ø10 ve Ø15 boyutlara sahip numunelerin boyut toleransları yer almaktadır. İçi dolu numuneler boyutsal doğruluğa göre Ø10, Ø15 ve Ø5 şeklinde sıralanmaktadır. Ø10 ve Ø15 için yazdırma sıcaklığı arttıkça, boyut kalitesinin arttığı görülmektedir. Genel olarak yazdırma hızı arttıkça boyut kalitesi azalmaktadır. Ancak Ø5’te boyut kalitesi diğerlerine nazaran oldukça kötü olmakla birlikte, parametrelerden de tam ters yönde etkilenmiştir. Şekil 4’te ise içi boş olarak üretilen Ø5, Ø10 ve Ø15 boyutlara sahip numunelerin boyut toleransları yer almaktadır. Delik formunda üretilen numunelerde çap arttıkça boyut kalitesi azalmaktadır.



Şekil 3. İçi dolu olarak üretilen numunelerde yazdırma hızı ve sıcaklığının boyut toleransına etkisi

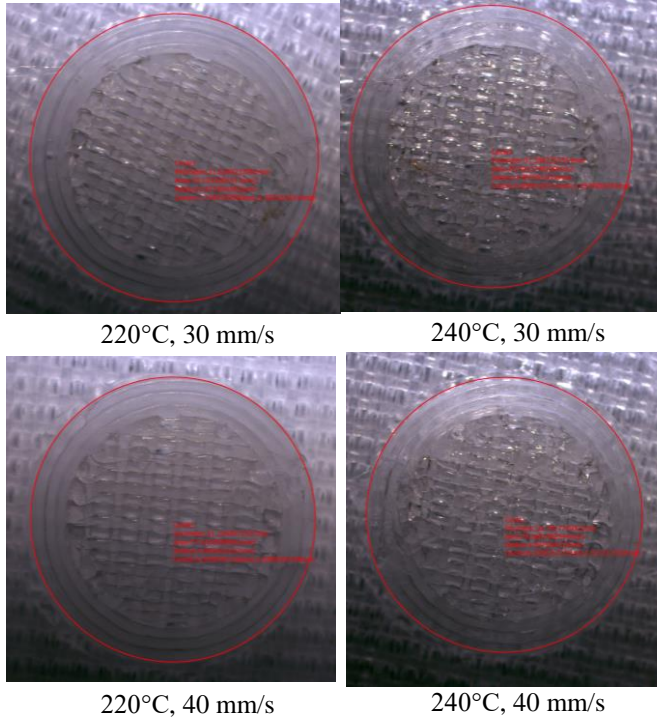


Şekil 4. İçi boş olarak üretilen numunelerde yazdırma hızı ve sıcaklığının boyut toleransına etkisi

Her bir üretim sıcaklığı için elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, üretim hızının artışı boyutsal doğruluğu az miktarda da olsa olumsuz yönde etkilemiştir. Yazdırma sıcaklığı arttıkça boyutsal doğruluğun tüm dairesel numunelerde arttığı açık bir şekilde görülmektedir.

Şekil 3 ve Şekil 4 karşılaştırıldığında üretim sıcaklığının, yazdırma hızından daha fazla boyutsal doğruluğu etkilediği; bu etkinin de içi boş formda üretilen dairesel numunelerde daha etkin olduğu görülmektedir.

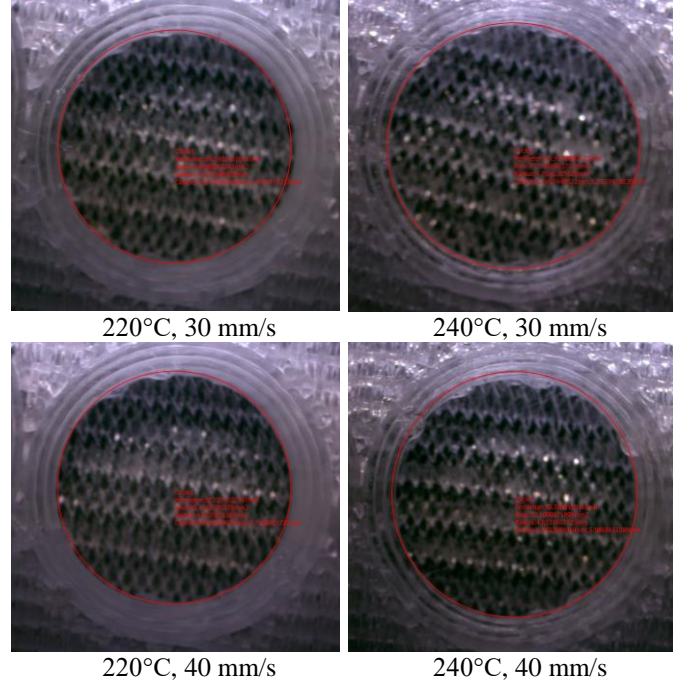
Üretim parametrelerinin etkisinin daha iyi ifade edilebilmesi için Ø10 olarak içi dolu şekilde üretilen numunelerin mikroskop görüntülerine Şekil 5'te yer verilmiştir. 220°C yazdırma sıcaklığında üretilen numunelerin dolguları incelendiğinde, yüksek sıcaklıkta üretilen numunelere nazaran daha düzgün bir yapı görülmektedir. Şekil 1'de elde edilen sonuçlara göre her ne kadar artan üretim sıcaklığıyla boyut sal doğruluğun arttığı bilinse de dolguda bozulma meydana geldiği açıkça görülmektedir. Yazdırma sıcaklığının artışıyla birlikte soğuma tam gerçekleşmeden diğer katmanların oluşması, yazdırma dolgusunun bozulmasına sebebiyet vermiş olabilir.



Şekil 5. İçi dolu olarak üretilen numunelerde yazdırma hızı ve sıcaklığının boyut toleransına etkisi

Ø10mm çapında içi boş olarak üretilen numunelerin mikroskop görüntülerine Şekil 6'da yer verilmiştir. Şekil 6'da yer alan mikroskop görüntüleri incelendiğinde yazdırma sıcaklığının dolgu tipine etkisi neredeyse olmamıştır. Ancak yazdırma hızı arttıkça dolguda meydana gelen bozulmalar açık bir şekilde görülmektedir.

Şekil 5 ve Şekil 6 karşılaştırıldığında, yazdırma dolgusundaki değişim yüksek ekstrüzyon sıcaklığındaki imalat esnasında oluşmuştur. Şekil 1'de Ø5'ten elde edilen sonuçlardaki farklılığın, alanın daha küçük olması sebebiyle, Şekil 5 ve Şekil 6'da yer alan mikroskop görüntülerine benzer şekilde meydana gelen dairesel yüzeyden ergimiş haldeki polimerin taşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 6. İçi boş olarak üretilen numunelerde yazdırma hızı ve sıcaklığının boyut toleransına etkisi

#### IV. SONUÇLAR

Geleneksel imalat yöntemlerinin yanı sıra geleneksel olmayan imalat yöntemleri de gelişen teknolojiyle birlikte farklı yönleriyle irdelenmektedir. Bu çalışmada geleneksel olmayan üretim yöntemlerinden üç boyutlu yazıcı ile PET-G malzemeden çeşitli çaplarda dairesel numuneler üretilerek, üretim parametrelerinin boyutsal doğruluğa etkisi incelenmiştir.

İçi dolu olarak üretilen dairesel numunelerde Ø10 ve Ø15 için; yazdırma hızı sabit tutulduğunda artan ekstrüzyon sıcaklığıyla boyutsal doğruluk artmaktadır. Ayrıca, boyutsal doğruluğun yüksek olduğu yüksek ekstrüzyon sıcaklığında yapılan imalatta, yazdırma parametrelerinden biri olan yazdırma hızı arttıkça boyutsal doğruluk az miktarda azalmaktadır. İçi dolu olarak üretilen dairesel numunelerden Ø5 için sonuçlar diğerlerinden oldukça farklıdır. Bunun sebebinin, yüksek ekstrüzyon sıcaklıklarında soğuma gerçekleşmeden yeni katmanların oluşması, özellikle çapın küçük olması sebebiyle de dolu alandan malzemenin taşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

İçi boş olarak üretilen dairesel numunelerde ise çap arttıkça boyut kalitesi azalmaktadır. Yazdırma hızı özellikle yüksek üretim sıcaklığında boyutsal doğruluğu etkilerken, yazdırma sıcaklığı arttıkça boyutsal doğruluğun açık bir şekilde arttığı görülmektedir.

Mikroskopla incelenen yüzeyler sonucunda ise, yazdırma sıcaklığı ve hızı sebebiyle soğuma tam gerçekleşmeden diğer katmanların üretimi, yazdırma dolgusunun bozulmasına neden olmuştur.

Araştırmacıların, bu çalışmayı çeşitli malzeme ve üretim parametreleri için genişletmesi faydalı olacaktır.

#### TEŞEKKÜR

Bu çalışma, 5-7 Temmuz 2019 tarihleri arasında Nevşehir, Türkiye'de düzenlenen "International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications, HORA2019" isimli kongrede sözlü olarak sunulmuştur.

REFERANSLAR

- [1] J. Gardan, "Additive manufacturing technologies: state of the art and trends", *International Journal of Production Research*, vol. 54, no. 10, pp. 3118-3132, 2015.
- [2] T. Wohlers, T. Caffrey, "Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report 2014", Wohlers Association, 2013.
- [3] Z. A. Latiff, M.R.A Rahman, F. Saad, "Dimensional accuracy evaluation of rapid prototyping fused deposition modelling process of FDM200mc machine on basic engineering profile", *Applied Mechanics and Materials (AMM)*, vol. 465, pp. 96-100, 2013.
- [4] P. Jain, A. M. Kuthe, "Feasibility Study of Manufacturing Using Rapid Prototyping: FDM Approach", *Procedia Engineering*, vol. 63, pp. 4-11, 2013.
- [5] A.B. Martínez, N. León, D. Arencón, J. Rodríguez, A. Salazar, "On the effect of the different notching techniques on the fracture toughness of PETG", *Polymer Testing*, vol. 32, no. 7, pp.1244-1252, 2013.
- [6] A. Boschetto, L. Bottini, "Design for manufacturing of surfaces to improve accuracy in Fused Deposition Modeling", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol.37, pp.103-114, 2016.
- [7] A. Garg, A. Bhattacharya, and A. Batish, "On Surface Finish and Dimensional Accuracy of FDM Parts after Cold Vapor Treatment", *Materials and Manufacturing Processes*, vol.31, 4, 2015.
- [8] M. Kaveh, M. Badrossamay, E. Foroozmehr, A.H. Etefagh, "Optimization of the printing parameters affecting dimensional accuracy and internal cavity for HIPS material used in fused deposition modeling processes", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 226, pp. 280-286, 2015.
- [9] Z.A. Latiff, M. Rahman, and F. Saad, "Dimensional Accuracy Evaluation of Rapid Prototyping Fused Deposition Modeling Process of FDM200mc Machine on Basic Engineering Profiles", In *Applied Mechanics and Materials* Vol. 465, pp 96-100, 2014.
- [10] T. Nancharaiah, D.R. Raju, V.R. Raju, "An experimental investigation on surface quality and dimensional accuracy of FDM components" *International Journal on Emerging Technologies*, Vol. 1, pp 106-111, 2010.
- [11] R.K. Sahu, S. Mahapatra, and A.K. Sood, "A Study on Dimensional Accuracy of Fused Deposition Modeling (FDM) Processed Parts using Fuzzy Logic", *Journal for Manufacturing Science and Production*, Vol. 13, pp.183-197, 2013.
- [12] A.K. Sood, A. Equbal, V. Toppo, R. Ohdar, S. Mahapatra, "An investigation on sliding wear of FDM built parts", *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 5, pp. 48-54, 2012.
- [13] M. Kaveh, M. Badrossamay, E. Foroozmehr, A. H. Etefagh, "Optimization of the printing parameters affecting dimensional accuracy and internal cavity for HIPS material used in fused deposition modeling processes", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 226, pp. 280-286, 2015.
- [14] A. Nickel, D. Barnett, F. Prinz, "Thermal stresses and deposition patterns in layered manufacturing", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 317(1-2), pp. 59-64, 2001.
- [15] C. Bellehumeur, L. Li, Q. Sun, P. Gu, "Modeling of bond formation between polymer filaments in the fused deposition modeling process", *Journal of Manufacturing Processes*, Vol.6, No. 2, pp. 170-178, 2004.
- [16] H. Ramanath, C. Chua, K. Leong, K. Shah, "Melt flow behaviour of poly-ε-caprolactone in fused deposition modelling", *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, Vol. 19, No.7, pp. 2541-2550, 2008.
- [17] M. Nikzad, S Masood, I. Sbarski, "Thermo-mechanical properties of a highly filled polymeric composites for fused deposition modeling", *Materials & Design*, Vol. 32, No. 6, pp. 3448-3456, 2011.
- [18] M. D. Monzón, I Gibson, A.N. Benítez, L. Lorenzo, P.M. Hernandez, M. D. Marrero, "Process and material behavior modeling for a new design of micro-additive fused deposition", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 67, No. 9-12, pp. 2717-2726, 2013.
- [19] M. Alhubail, "Statistical-based optimization of process parameters of fused deposition modelling for improved quality", Ph.D. Thesis, University of Portsmouth, 2012.
- [20] R. Jerez-Mesa, G. Gomez-Gras, J. A. Travieso-Rodriguez, V. Garcia-Plana, "A comparative study of the thermal behavior of three different 3D printer liquefiers", *Mechatronics*, Vol. 56, pp. 297-305, 2018.