



Biyoyumlu Numunelerin Üretimi İçin 4D Eklemeli İmalat Cihazı Tasarımı ve Üretimi

Design and Manufacturing of 4D Additive Manufacturing Device For The Production of Biocompatible Materials

Yunus Kartal¹ , Deniz Doğan² , M. Taylan Daş¹ , Ayşegül Ülkü Metin² 

¹ Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 71450 Kırıkkale, TÜRKİYE

² Kırıkkale Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, 71450 Kırıkkale, TÜRKİYE

Başyuru/Received: 27/04/2023

Kabul / Accepted: 21/06/2023

Çevrimiçi Basım / Published Online: 13/07/2023

Son Versiyon/Final Version: 14/07/2023

Öz

Bu çalışmanın amacı biyoyumlu numunelerin üretimi için alışlagelmış kartezyen eksenlerinin haricinde tablada bulunan ve eksen etrafında dönen dördüncü eksene sahip dört boyutlu (4D) eklemeli imalat cihazı tasarımı ve üretimidir. Bu kapsamda 4D eklemeli imalat cihazının çalışma prensibi ve cihazı oluşturan bileşenlerden olan döner tabla, dış kabin, iklimlendirme şartları gibi bileşenlerin teorik detayları verilmektedir. Çalışma kapsamındaki 4D eklemeli imalat cihazı üretilen numunelerin özelliklerinin atmosfer koşullarından etkilenmesini engellemek amacıyla izole bir ortamda çalışmaktadır. Tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen cihazda ultraviyole (UV) ışın altında poli(2-hidroksietil metakrilat) üretilmiş ve mekanik özellikleri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Eklemeli imalat, döner eksen, biyoyumlu malzeme, kalıp içerisinde imalat, UV ışın ile polimerizasyon”

Abstract

The aim of this study is to design and manufacture a 4 Dimensional (4D) additive manufacturing device with a fourth axis rotating around its axis, in addition to conventional Cartesian axes, for the production of biocompatible materials. In this context, theoretical and technical details of various mechanical and electronic accessories or components are given. The four-dimensional printer within the scope of the study works in an isolated environment in order to prevent the properties of the produced materials from being affected by atmospheric conditions. In the device designed and manufactured, poly(2-hydroxyethyl methacrylate) was produced under ultraviolet light and its mechanical properties were investigated.

Key Words

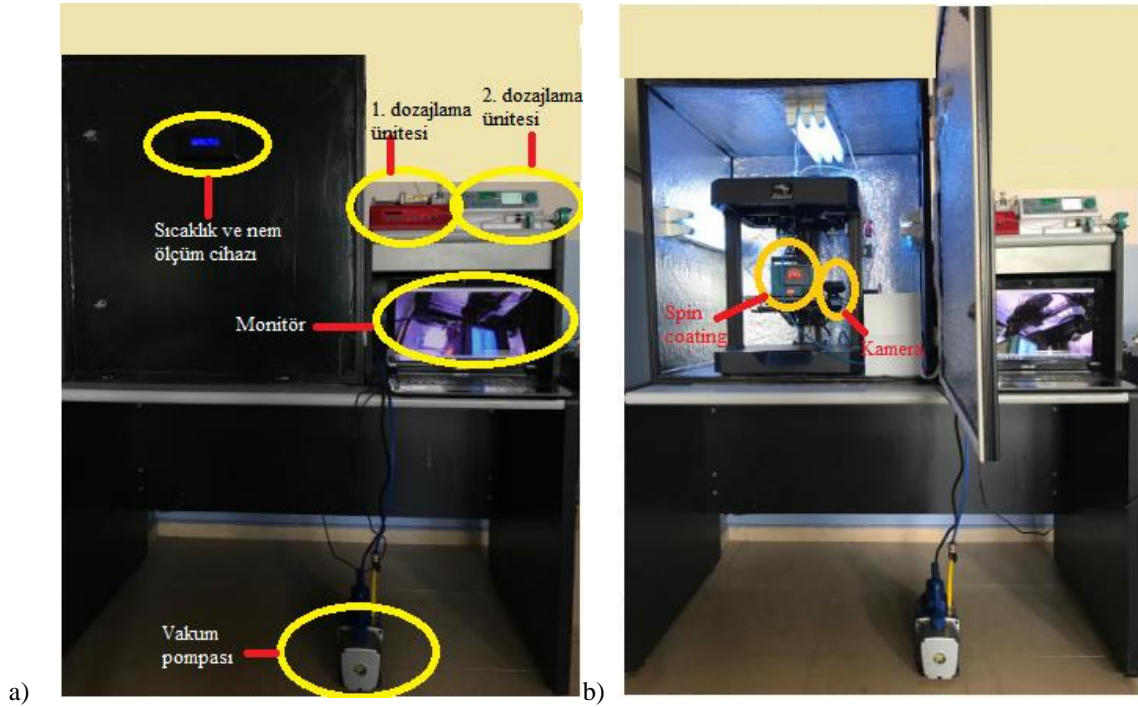
“Additive manufacturing, spin coating, biocompatible material, in-mold manufacturing, UV polymerization”

1. Giriş

Nesnelerin katman katman üretilmesi prensibine dayanan üç boyutlu baskı yönteminin yaygın kullanan bir diğer adı ise eklemeli imalat teknolojisidir. Üç boyutlu baskı yöntemi medikal (Vu vd. 2021), havacılık ve uzay (Rouf vd. 2022) ve otomotiv (Garmabi vd. 2022) sektöründe vb. pek çok sektörde kullanılmaktadır. Eklemeli imalat teknolojisinde yaygın olarak kullanılan malzeme grupları ise; metaller, termoplastikler, kompozitler ve seramiklerdir (Hachimi vd. 2021). Karmaşık geometriye sahip nesnelerin üretilebildiği eklemeli imalat yönteminde pahalı takımlar kullanılmamaktadır (Attaran, 2017).

Fotopolimerizasyon, malzeme ekstrüzyonu, toz yataklı eritme yöntemi eklemeli imalat yöntemlerine örnek olarak verilebilir (Sürmen, 2019). Hedeflenen polimerik numunelerin ışın enerjisi ile monomerden yola çıkarak ışın enerjisi ile üretilmesi prensibini temel alan fotopolimerizasyon yöntemi birçok çalışmayı kapsamaktadır (Izadifar vd. 2018, Invernizzi vd. 2016, Mantelli vd. 2021, Barkane vd. 2020, Kim vd. 2017). Fotopolimerizasyon yönteminde kullanılan ışın, lazer veya ultraviyole (UV) olabilir. Fotopolimerizasyon yöntemiyle gerçekleştirilen çalışmalar mürekkep adı verilen malzemelerin işlem parametrelerinin üretilen numune üzerine etkisi (Hong vd. 2018) ve üretilen numunelerin özellikleri (Lee vd. 2021) veya üretimde kullanılan malzeme gruplarına alternatif malzeme gruplarının belirlenmesi (Li vd. 2019) gibi çeşitli alanlarda gerçekleştirilmiştir. Malzemelerin fotopolimerizasyon prensibine dayanarak eklemeli imalat yöntemiyle üretilmesinde önemli etkenlerden birisi de üretim sırasında kullanılan cihazın özellikleridir. Bu anlamda eklemeli imalat alanında gerçekleştirilen incelemelerin bir diğer odak noktası işlem sırasında kullanılan cihazların tasarımı (Zi vd. 2019, Eichholz vd. 2022, Guoqing vd. 2019, Ozkan vd. 2022) ve optimizasyonudur (Priavolou vd. 2022, Vavoulas vd. 2016, Le Duigou vd. 2023, Minetola vd. 2018). Üç boyutlu yazıcıyı atmosfer koşullarından izole eden Birkelid vd. yüksek performanslı polimer numune üretmeyi amaçlamışlardır (Birkelid vd. 2022). Üç boyutlu nesnelerin malzeme ekstrüzyonu prensibiyle üretilmesine dayanarak üretim yapan cihazda, Hachimi vd. yeni bir ekstrüder tasarlamış ve üretmiştir.

Çalışmada, sahip olduğu 105watt UV ışın gücü ile biyoyumlu nesnelere küreleyen, çalışma kapsamında tasarlanan ve üretilen döner eksen ile üretim sırasında polivinil alkol (PVA) kalıbı ve içerisindeki numuneyi UV ışın etrafında döndürme kabiliyetine imkan veren ve numunelerin mekanik özelliğinin literatüre uygun üretildiği eklemeli imalat cihazının ve kabininin tasarımı amaçlanmıştır. Çalışma sonunda polihema (pHEMA) içerikli numuneler başarıyla üretilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen cihazın performansını ölçmek amacıyla UV ışın ile kürelenen poli(2-hidroksietilmetakrilat), pHEMA, bazlı mürekkep kullanılmış ve üretilen numunenin çekme deneyi uygulanarak mekanik özellikleri elde edilmiş ve cihazın performansı test edilmiştir. Biyoyumlu nesnelerin eklemeli imalat yöntemiyle üretilmesinde kullanılması için tasarlanan cihazın görüntüsü Şekil 1.de gösterilmektedir.



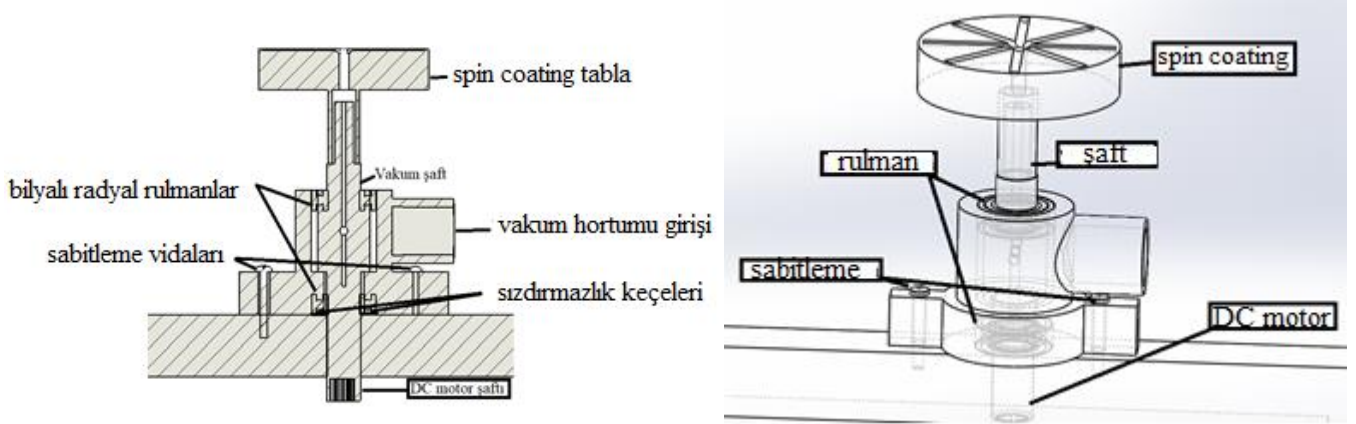
Şekil 1. 4D eklemeli imalat cihazının a. dış, b. iç görüntüsü.

Yukarıda açıklanan cihazın çalışma prensibine dayanarak, bu çalışmada tasarımı gerçekleştirilen cihazın dördüncü eksen tasarımı, cihazı çevre şartlarından ayıran kabinin tasarımı, biyoyumlu nesnelerin eklemeli imalat yöntemiyle üretilebilmesini sağlayan dozajlama ünitesinin tasarımı ayrıntılı olarak materyal ve yöntem bölümünde açıklanmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Döner Eksen Cihazı (Spin Coating) Tasarımı

Bu çalışmada iki mafsal ve iki sızdırmaz rulman kullanılarak döner eksen aparatı tasarlanmıştır. Tasarlanan döner eksen aparatı Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Döner eksen (spin coating) cihazı teknik görünüşleri

Tasarımı gerçekleştirilen döner eksen cihazı 0-2750 rpm çalışma aralığına sahiptir ve çalışma için gerekli kodlamalar Arduino kodlama sistemiyle gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında tasarlanan ve üretilen döner eksen cihazının görüntüsü Şekil 3.'te verilmiştir.



Şekil 3. Çalışma kapsamında tasarlanan ve üretilen döner eksen cihazı

Döner eksen cihazının alt kısmındaki butonun eksen etrafında döndürülmesiyle çalışma kapsamında tasarlanan aparatın devir sayısı kontrolü yapılabilmektedir. Cihaz en yüksek devir sayısında (2750 rpm) dönerken 300 mA nominal akım değerine sahiptir. Çizelge 1'de DC motor voltaj ve hız ayar değer skalası verilmiştir.

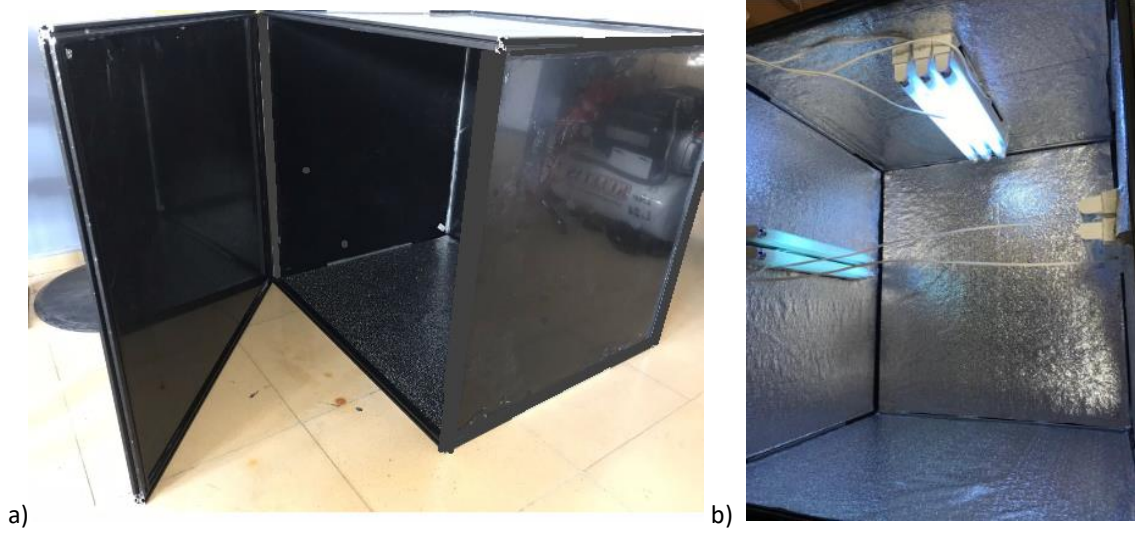
Çizelge 1. DC motor voltaj ve hız ayar değer skalası

Voltaj yüzdesi	Devir sayısı (rpm)	Voltaj yüzdesi	Devir sayısı (rpm)
% 5	137,5	% 55	1512,5
% 10	275	% 60	1650
% 15	412,5	% 65	1787,5
% 20	550	% 70	1925
% 25	687,5	% 75	2062,5
% 30	825	% 80	2200
% 35	962,5	% 85	2337,5
% 40	1100	% 90	2475
% 45	1237,5	% 95	2612,5
% 50	1375	% 100	2750

2.2. Kapalı Ortam Koşullarının Oluşturulması

Üretimin çevre koşullarından izole olarak gerçekleşebilmesi için, 700x750x800mm boyutunda kabin tasarlanmıştır. Tasarımda 4 mm kalınlığında siyah pleksi levhalar 20x20mm altı kanallı sigma profillere silikon yapıştırıcı ile birleştirilmiştir. Montaj işlemi tamamlandığında toplam 710x760x810mm boyutundaki kabin Şekil 4a.'da gösterilmiştir. Kabinin iç ortamının yansıtıcılığını artırmak

amacıyla kabinin iç yüzeylerine 0,3 mm kalınlığında yapışkan alüminyum folyo kullanılmıştır. Kürlleme işleminin gerçekleştirilmesi amacıyla 15watt gücünde 7 adet Osram marka L-BL-T8 model UV ışın kaynağı kullanılmıştır. Işın kaynakları pleksi levhaya kullanılan ışık kaynaklarının tüm alanı eşit şekilde görebilmesi için kabinin iç tarafının yanal yüzeylerine 2 adet ve tavan kısmında 3 adet olacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 4b).



Şekil 4.a. Montajı tamamlanan cihazın dış görüntüsü b. Montajı tamamlanan cihazın iç görüntüsü

Çalışma kapsamında üretimi gerçekleştirilen 4D eklemeli imalat cihazının atmosfer koşullarını kontrol edebilmek amacıyla vakum pompası (CL marka 215 model) ve kompresör (Kuletaş marka ZB2024 model) kullanılarak atmosfer koşullarından izole edilmiştir. Kullanılan cihazların kabine montajlanabilmesi için kabine 5mm çapında 4 adet delik açılmıştır. Bu açılan deliklerin birisi vakum hortumu, ikincisi spin coating vakum hortumu, üçüncüsü cihaz ışıklarının kablolarına güç kaynağının sağlanması ve dördüncüsü dozajlama ünitesinden çıkan hat için açılmıştır.

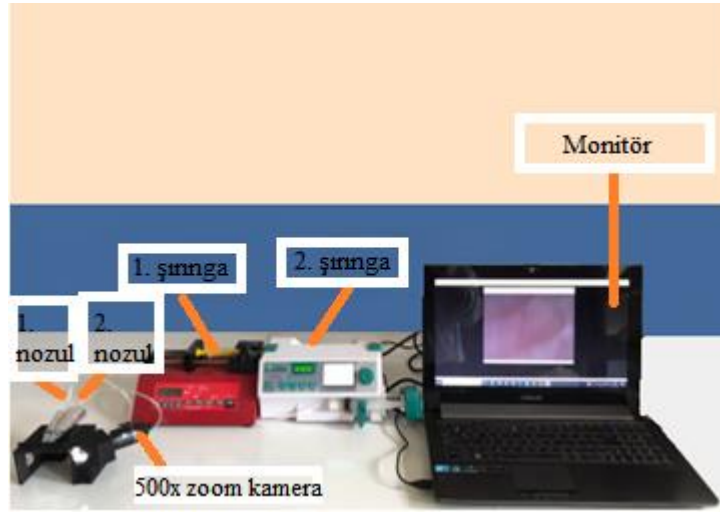
2.3. Dozajlama Ünitesi Tasarımı

Biyouyumlu nesnelere eklemeli imalat ile üretimini sağlamak amacıyla dozajlama ünitesi tasarımı gerçekleştirilmiştir. Dozajlama ünitesinin başlık kısmında montajlanmış halde bulunan ve dozajlama ünitesinin çalışması sırasında üretimi kontrol edebilmek amacıyla görüntüleri .jpeg ve .mp4 formatında kaydedebilen dijital kamera bulunmaktadır. Tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen dozajlama ünitesinde 3 adet 0,4 mm çapında uçlar birer nozul olarak kullanılmaktadır. Dozajlama ünitesi başlığı sahip olduğu çoklu nozul yapısı sayesinde hem aynı yapıdaki polimer numuneleri hem de farklı yapıdaki polimerleri herhangi bir nozul değişimi olmaksızın üretebilmektedir. Dozajlama ünitesinin başlığının her iki yanında 30x25x5mm ve ön kısmında 50x20x5mm havalandırma boşlukları bulunmaktadır. Tasarlanan dozajlama ünitesinin başlığının üretimi eklemeli imalat yöntemiyle polilaktik asit (PLA) malzeme kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 5a'da dozajlama ünitesinin başlığının teknik detayları, Şekil 5b'de dozajlama ünitesinin başlığının mürekkep numune serimi anındaki serim görüntüsü, Şekil 5c' de üretim sırasında dijital kameradan alınmış görüntü verilmiştir.



Şekil 5. a. Dozajlama ünitesi başlığının teknik detayları, b. Dozajlama ünitesi başlığının mürekkep numune serimi anındaki görüntüsü, c. Üretim sırasında dijital kameradan alınmış görüntü.

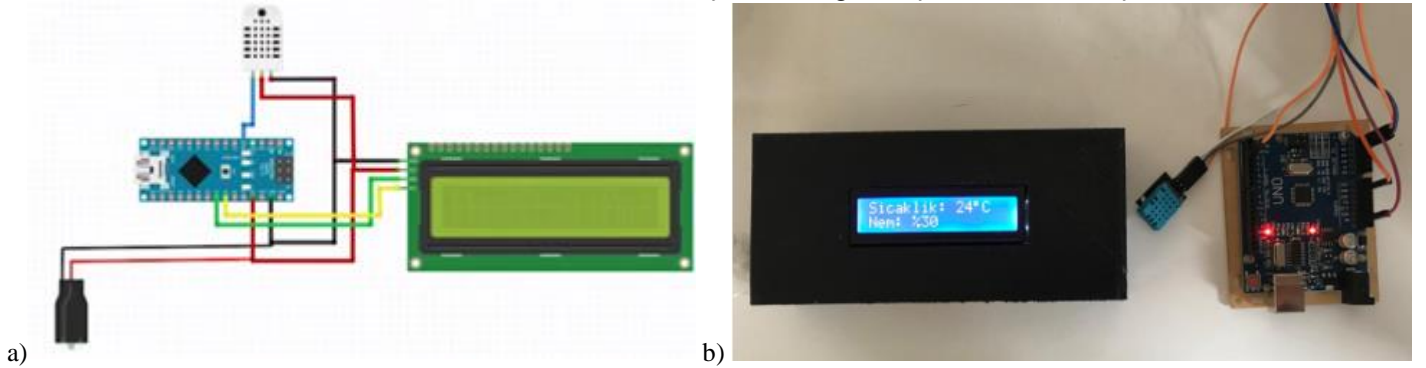
Çalışmada biyoyumlu polimer numunelerin nozul içerisindeki hareketini kontrol edebilmek amacıyla Byond marka BYZ-810 model ve New-Era marka NE-300 model olmak üzere iki dozajlama ünitesi kullanılmıştır. Kullanılan dozajlama üniteleri aynı anda farklı polimer numunelerin üretimini sağlayacaktır. Polimer numunelerin dozajlama ünitesinden nozula aktarılması 4mm çapındaki esnek hortum ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.'da dozajlama sisteminin görüntüsü verilmiştir.



Şekil 6. Dozajlama sisteminin görüntüsü

2.4. Kapalı Ortam Koşullarının Kontrolü

Biyoyumlu nesnelerin üretimi sırasında kabin atmosfer koşullarının kontrolünü sağlamak için sıcaklık ve nem ölçer üretilmiştir. Sıcaklık ve nem ölçer üretimini gerçekleştirmek amacıyla kontrolör olarak Arduino Uno kartı kullanılmıştır. Kabin içi nem değerini %65 olarak sabitlemiştir. Kabine bağlı vakum pompası ile kabin içindeki hava boşaltılabilmektedir. Kabin iç sıcaklık ve nem değerlerini ölçmek amacıyla DHT11 model sıcaklık ve nem ölçüm sensörü kullanılmıştır. Kullanılan sıcaklık ve nem ölçüm sensörü 0-50°C aralığında 2°C lik hata payı ve %20-90 nem aralığında %5 lik hata payı ile ölçüm yapabilmektedir. Bu tolerans değerleri çalışma şartları için uygun olduğundan DHT11 model sıcaklık ve nem ölçüm sensörü kullanılmıştır. Sensörde okunan değerleri Arduino ile yorumladıktan sonra ince tabakalı transistör (TFT) ekranına yansıtarak kabin koşulları görselleştirilmiştir. Kabin çalışma atmosferini görselleştirmek amacıyla 16x2 IIC/I2C/TWI model seri mavi LCD ekran kullanılmıştır. Sıcaklık ve nem ölçer cihaz yapısının sadeleştirilmesi amacıyla çalışmada kullanılan LCD ekran I2C bağlantısını desteklemektedir. Çalışmada kullanılan modüller arasında bağlantı kurabilmek için atlama kabloları ve sıcaklık ve nem ölçüm cihazını besleyebilmek için 5 volt 1 amper çalışma değerine sahip güç kaynağı (adaptör) kullanılmıştır. Güç kaynağından gelen enerjiyi devreye verebilmek amacıyla klemens çıkışlı DC diş adaptör prizi kullanılmıştır. Kabin atmosfer koşullarını kontrol etmek amacıyla tasarlanan ve üretilen sistemin şeması Şekil 7a'da, bu şemaya uygun olarak üretimin gerçekleştirilmesi sonucunda oluşan cihazın görseli Şekil 7b'de verilmiştir.

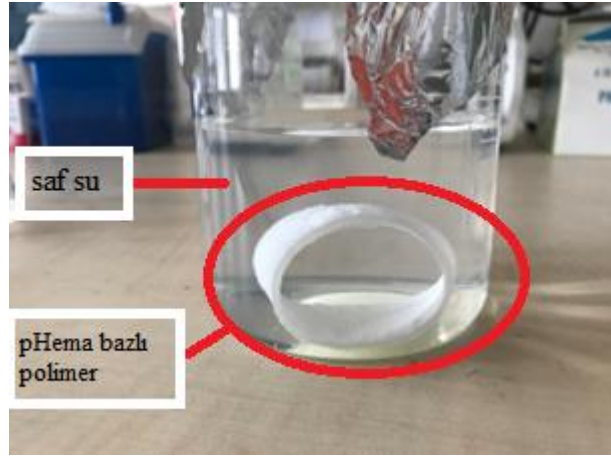


Şekil 7 a. Sıcaklık ve nem sensörünün şeması. b. Sıcaklık ve nem ölçer şemasına uygun olarak üretilen sıcaklık ve nem ölçüm cihazı.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Kalıpta Biyoyumlu Numune Üretim İşlemi

Çalışma kapsamında elde edilen pHEMA polimeri Ø30x30 ve Ø26x30 boyutlarındaki PVA malzemeden yapılmış kalıp içerisine, hidroksietilmetakrilat monomerinin 2,2'-azobis(2-metilpropilonitril fotobaşlatıcısı ile 30 dk. UV ışın ile polimerleştirilmesi sonucunda elde edilmiştir. Polimerleşmeden sonra PVA'dan üretilen kalıbın çözünmesi ve böylece pHEMA temelli biyopolimerin eldesi için PVA kalıp ile birlikte pHEMA da saf suyun içerisinde 8 saat boyunca bekletildi (Şekil 8).



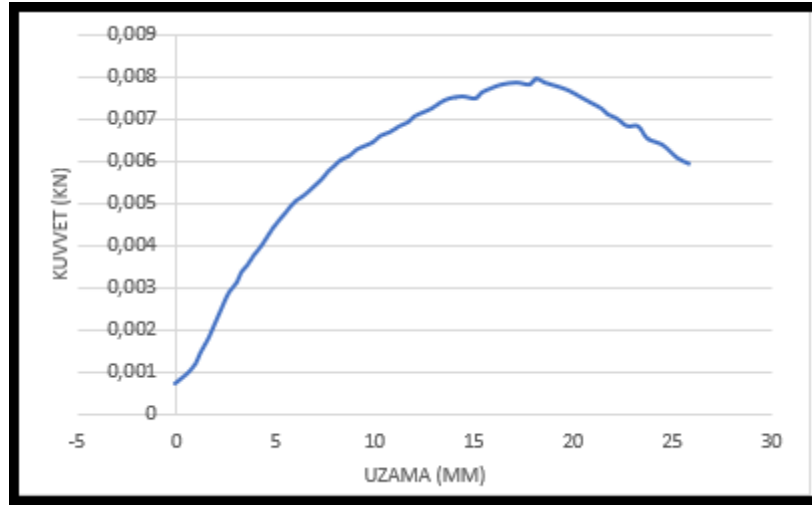
Şekil 8. Saf suyun içerisindeki pHEMA numunesi görüntüsü

3.2. Mekanik Deneylerin Sonuçları

4D eklemeli imalat cihazında üretilen ve saf sudan çıkarıldığı anda pHEMA polimerinin mekanik özellikleri, oda sıcaklığında uygulanan çekme deneyi ile belirlenmiştir. Biyouyumlu filmler ISO 527-3 test standardına uygun çekme testine maruz bırakılmıştır. Bu amaçla 20x5x4mm boyutlarında numuneler hazırlanmış ve deneyler en az 5 defa tekrarlanmıştır. Çekme testleri oda sıcaklığında 10 kN çekme yükünde ve 3 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda numunelerin elastiklik modülü (Young modülü) Eşitlik 2.1 de verilen bağıntı dikkate alınarak hesaplanmıştır (Alsayed, 2021).

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.1)$$

Gerçekleştirilen beş çekme deneyi sonucunda elde edilen verilerin ortalaması sonucunda elde edilen kuvvet-uzama grafiği Grafik 1’de verilmiştir. Denklemdaki ifadelerden; σ : normal gerilme, ε : boyca uzama ve E: elastisite modülüdür.



Grafik 1. Biyouyumlu numuneye ait kuvvet-uzama grafiği

Üretilen 4D eklemeli imalat cihazında üretilen pHEMA'nın çekme deneyine tabi tutulması sonucunda numuneni 28mm değerinde uzadığı ve en büyük dayanım kuvvetinin (çekme mukavemeti) 8 newton (N) olduğu, 6N değerinde ise koptuğu görüldü. Elde edilen veriler 2.1 bağıntısında uygulandığında numunenin çekme mukavemeti ortalaması 35,6 kilopascal (kPa) değeri ve 0,93274 standart sapma değeri elde edilmiştir. Pruksawan S. vd., pHEMA ve farklı çapraz bağlayıcılar kullanarak elde ettiği hidrojellerin çekme mukavemeti değerlerini 33,6-156,2 kPa aralığında elde etmiştir (Pruksawan vd. 2022). Çalışma kullanılan 4D eklemeli imalat cihazında üretilen pHEMA numunesinin mekanik özelliklerinin literatür verileri ile uyumlu olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

4. Sonuç

Bu çalışmada biyoyumlu numunelerin üretilmesi amacıyla üç boyutlu kartezyen sisteme ilave olarak z ekseninde döner tabla konulması 4D eklemeli imalat işlemini gerçekleştirebilen bir cihaz tasarlanmıştır. Cihazın sahip olduğu dördüncü eksen istendiği zaman dönerek kaplama işlemini de yapabilecek kapasiteye sahiptir. Bununla beraber tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen cihazın dış koşullardan etkilenmesini engellemek amacıyla sıcaklık, nem ve hava kontrolünün sağlanması ile beraber hermetik bir ortam oluşturulması amaçlanmıştır. Üretimi yapılan 4D eklemeli imalat cihazı üzerinde biyoyumlu numunelerin mekanik özelliklerini incelenebilmesi amacıyla UV ışın kaynağı sistemi, çalışmaya dahil edilmiştir. Biyoyumlu numunelerin literatürde kullanılanlarla karşılaştırılabilmesi için mekanik özellikleri incelenmiştir. Gelecek çalışmalarda UV polimerizasyon yöntemiyle numunelerin kürlenmesi ve kürlenmiş bu numunelerin işletme parametrelerinin etkisi incelenebilir.

Bilgilendirme

Bu çalışma Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje numarası 2022/36.

Bu çalışma TÜBİTAK Araştırma Destek Programları Başkanlığı (ARDEB) tarafından desteklenmiştir. Proje numarası 123M213.

Kaynaklar

Alsayed, A. A. (2021). Physics of Open Fractures: Reconsidering Tissue Viability, Contamination Risk and Importance of Wound Debridement. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 09(01), 176–182. <https://doi.org/10.4236/jamp.2021.91012>

Attaran, M. (2017). The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Business Horizons*, 60(5), 677–688. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.05.011>

Barkane, A., Platnieks, O., Jurinovs, M., & Gaidukovs, S. (2020). Thermal stability of UV-cured vegetable oil epoxidized acrylate-based polymer system for 3D printing application. *Polymer Degradation and Stability*, 181, 109347. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109347>

Birkelid, A. H., Eikevåg, S. W., Elverum, C. W., & Steinert, M. (2022). High-performance polymer 3D printing – Open-source liquid cooled scalable printer design. *HardwareX*, 11, e00265. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2022.e00265>

Eichholz, K. F., Gonçalves, I., Barceló, X., Federici, A. S., Hoey, D. A., & Kelly, D. J. (2022). How to design, develop and build a fully-integrated melt electrowriting 3D printer. *Additive Manufacturing*, 58(April). <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102998>

Garmabi, M. M., Shahi, P., Tjong, J., & Sain, M. (2022). 3D printing of polyphenylene sulfide for functional lightweight automotive component manufacturing through enhancing interlayer bonding. *Additive Manufacturing*, 56. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102780>

Gopinatha, S., & Nagarajanb, N. (2015). Journal of Applied Research and Technology. *Journal of Applied Research and Technology*, 13, 374–381.

Guoqing, Z., Junxin, L., Jin, L., Xiaoyu, Z., & Anmin, W. (2019). 3D metal printer dust filter structural optimal design and key performance research. *Materials and Design*, 183, 108114. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108114>

Hachimi, T., Naboulsi, N., Majid, F., Rhanim, R., Mrani, I., & Rhanim, H. (2021). Design and Manufacturing of a 3D printer filaments extruder. *Procedia Structural Integrity*, 33(C), 907–916. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.10.101>

Hong, S. Y., Kim, Y. C., Wang, M., Kim, H. I., Byun, D. Y., Nam, J. Do, Chou, T. W., Ajayan, P. M., Ci, L., & Suhr, J. (2018). Experimental investigation of mechanical properties of UV-Curable 3D printing materials. *Polymer*, 145, 88–94. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2018.04.067>

Invernizzi, M., Natale, G., Levi, M., Turri, S., & Griffini, G. (2016). UV-assisted 3D printing of glass and carbon fiber-reinforced dual-cure polymer composites. *Materials*, 9(7). <https://doi.org/10.3390/MA9070583>

Izadifar, M., Chapman, D., Babyn, P., Chen, X., & Kelly, M. E. (2018). UV-Assisted 3D Bioprinting of Nanoreinforced Hybrid Cardiac Patch for Myocardial Tissue Engineering. *Tissue Engineering - Part C: Methods*, 24(2), 74–88. <https://doi.org/10.1089/ten.tec.2017.0346>

Kim, Y. C., Hong, S., Sun, H., Kim, M. G., Choi, K., Cho, J., Choi, H. R., Koo, J. C., Moon, H., Byun, D., Kim, K. J., Suhr, J., Kim, S. H., & Nam, J. Do. (2017). UV-curing kinetics and performance development of in situ curable 3D printing materials. *European Polymer Journal*, 93(May), 140–147. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2017.05.041>

- Le Duigou, A., Grabow, M., Castro, M., Toumi, R., Ueda, M., Matsuzaki, R., Hirano, Y., Dirrenberger, J., Scarpa, F., D'Elia, R., Labstie, K., & Lafont, U. (2023). Thermomechanical performance of continuous carbon fibre composite materials produced by a modified 3D printer. *Heliyon*, 9(3), e13581. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13581>
- Lee, S., Kim, Y., Park, D., & Kim, J. (2021). The thermal properties of a UV curable acrylate composite prepared by digital light processing 3D printing. *Composites Communications*, 26(May), 100796. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2021.100796>
- Li, Y., Zhong, J., Wu, L., Weng, Z., Zheng, L., Peng, S., & Zhang, X. (2019). High performance POSS filled nanocomposites prepared via UV-curing based on 3D stereolithography printing. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 117(July 2018), 276–286. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.11.024>
- Mantelli, A., Romani, A., Suriano, R., Diani, M., Colledani, M., Sarlin, E., Turri, S., & Levi, M. (2021). Uv-assisted 3d printing of polymer composites from thermally and mechanically recycled carbon fibers. *Polymers*, 13(5), 1–15. <https://doi.org/10.3390/polym13050726>
- Minetola, P., Galati, M., Iuliano, L., Atzeni, E., & Salmi, A. (2018). The Use of Self-replicated Parts for Improving the Design and the Accuracy of a Low-cost 3D Printer. *Procedia CIRP*, 67, 203–208. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.200>
- Ozkan, B., Sameni, F., Bianchi, F., Zarezadeh, H., Karmel, S., Engström, D. S., & Sabet, E. (2022). 3D printing ceramic cores for investment casting of turbine blades, using LCD screen printers: The mixture design and characterisation. *Journal of the European Ceramic Society*, 42(2), 658–671. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.10.043>
- Priavoulou, C., Troullaki, K., Tsiouris, N., Giotitsas, C., & Kostakis, V. (2022). Tracing sustainable production from a degrowth and localisation perspective: A case of 3D printers. *Journal of Cleaner Production*, 376(August), 134291. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134291>
- Pruksawan, S., Chee, H. L., Wang, Z., Luo, P., Chong, Y. T., Thitsartarn, W., & Wang, F. K. (2022). Toughened Hydrogels for 3D Printing of Soft Auxetic Structures. *Chemistry - An Asian Journal*, 17(19). <https://doi.org/10.1002/asia.202200677>
- Rouf, S., Raina, A., Irfan Ul Haq, M., Naveed, N., Jeganmohan, S., & Farzana Kichloo, A. (2022). 3D printed parts and mechanical properties: Influencing parameters, sustainability aspects, global market scenario, challenges and applications. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 5(3), 143–158. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2022.02.001>
- SÜRMEŒ, H. K. (2019). Ekl emeli İmalat (3B Baski):Teknolojiler Ve Uygulamalar. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 24(2), 373–392. <https://doi.org/10.17482/uumfd.519147>
- Vavoulas, A., Vaiopoulos, N., Hedström, E., Xanthis, C. G., Sandalidis, H. G., & Aletras, A. H. (2016). Using a modified 3D-printer for mapping the magnetic field of RF coils designed for fetal and neonatal imaging. *Journal of Magnetic Resonance*, 269, 146–151. <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2016.06.005>
- Vu, A. A., Burke, D. A., Bandyopadhyay, A., & Bose, S. (2021). Effects of surface area and topography on 3D printed tricalcium phosphate scaffolds for bone grafting applications. *Additive Manufacturing*, 39. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101870>
- Zi, B., Wang, N., Qian, S., & Bao, K. (2019). Design, stiffness analysis and experimental study of a cable-driven parallel 3D printer. *Mechanism and Machine Theory*, 132, 207–222. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2018.11.003>