

BÖLÜM 6

4 BOYUTLU BASKI TEKNOLOJİSİ VE GELECEĞE YÖNELİK YANSIMALARI

Enes KORKMAZ ¹

Ahmed Mohammed Rashed ELSAYED ABDALLA ²

Ayşegül KÖROĞLU ³

GİRİŞ

Üç boyutlu (3D) baskı, elli senelik geçmişe sahip hızlı gelişim gösteren bir teknoloji olup klasik eksiltmeli üretim ilkelerinden farklı olarak bir bilgisayar kontrolünde malzemenin katman katman işlenerek şekil ve boyut kazandırılmasını sağlayan eklemeli bir üretim tekniğidir. Günümüzde havacılık ve uzay endüstrilerinden, tıp ve diş hekimliğine kadar uzanan çok sayıda kullanım alanına sahiptir (1,2). 3D baskı tekniğinin en önemli sınırlaması, üretilen materyalin zamana bağlı olarak bulunduğu ortamdaki değişikliklere uyum sağlayamaması ve ilk halini korumasıdır. Zaman içindeki değişim sürecinin, 3D baskı tekniğiyle taklit edilmesine ilişkin eksiklikler ve 3D yazıcılarla üretilen akıllı materyallerdeki son gelişmeler, 4 boyutlu (4D) baskı yöntemini ortaya çıkarmıştır (3).

4D baskı yöntemi ilk kez Tibbits ve ark.'nın (4) 2014 yılında 4D baskıyla üretilen bir nesnenin zaman içindeki değişimini gösterdiği çalışmayla gündeme gelmiştir. Yine Qi Ge ve ark.'nın (5) 2013 yılında aktif kompozit (PAC) ve şekil hafızalı materyal (SMM) kullanarak 4D baskı tekniği üzerine yayınladıkları ilk çalışmaları da bilim dünyasında önemli bir ilgi yaratmıştır (3).

3D baskıya eklenen zaman bileşeni ile elde edilen 4D baskı yönteminde zaman kavramı sürekliliği değil, uyarana bağlı olarak şekil değiştirmeyi temsil etmekte-

¹ Arş. Gör., Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Protetik Diş Tedavisi AD., korkmazenes569@gmail.com, ORCID iD: 0009-0004-6897-1302

² Doktora Öğrencisi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Protetik Diş Tedavisi AD., a7mdra4d97@gmail.com, ORCID iD: 0009-0007-1573-6271

³ Prof. Dr., Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Protetik Diş Tedavisi AD., aysegulozturk151@yahoo.com, ORCID iD: 0000-0002-0288-6357

tepkisinin kontrol edilebilirliğinin zorlukları, tasarım sınırlamaları arasında yer alırken, 4D baskı için mevcut 3D teknolojilerinin ve biyouyumlu akıllı materyallerin sayılarının sınırlı olması ise üretim tabanlı sınırlamalar arasında yer almaktadır. Diğer sorunlar içerisinde dönüşümlerin aktivasyonu/ deaktivasyonu veya ortadan kaldırılması, basılan yapıların bozulması, biyouyumluluk ve uyarıcıların süresi bulunmaktadır. Biyomedikal endüstrisi, yeni bir teknoloji olarak kabul görmesine rağmen 4D baskının etkisini çok hızlı benimsemiştir. Bu zorlukların ele alınması, biyomedikal alanda 4D teknolojisinin daha da gelişmesine öncülük edecektir (41).

SONUÇ

4D teknolojisindeki gelişmelerin, biyomedikal, doku mühendisliği, biyorobotik ve biyosensör alanlarında yeni bir döneme başlanmasını sağlayacağı ve karmaşık yapılara sahip farklı tipte protezler, implantlar ve materyaller üretme potansiyeliyle de diş hekimliği alanında olumlu gelişmeler sunacağı düşünülmektedir. 4D baskı teknolojisindeki ilerleme, birçok keşfedilmemiş çalışma alanı yaratılması, bilim ve teknolojiyle ilişkili birçok alanı kapsayan çok boyutlu baskıların geliştirilmesi bağlamında çığır açacaktır.

KAYNAKLAR

1. Su A, Al'Aref SJ. History of 3D printing. In: *3D Printing Applications in Cardiovascular Medicine*. Academic Press; 2018. p.1-10.
2. Khorsandi D, Fahimipour A, Abasian P, et al. 3D and 4D printing in dentistry and maxillofacial surgery: Printing techniques, materials, and applications. *Acta Biomater*. 2021;122: 26-49.
3. Sajjad R, Chauhdary ST, Anwar MT, et al. A review of 4D printing – Technologies, shape shifting, smart polymer based materials, and biomedical applications. *Adv Ind Eng Polym Res*. 2024;7(1): 20-36.
4. Tibbits S, McKnelly C, Olguin C, et al. 4D printing and universal transformation. In: *Proceedings of the 34th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)*. 2014.
5. Ge Q, Qi HJ, Dunn ML. Active materials by four-dimension printing. *Appl Phys Lett*. 2013;103(13): 131901.
6. Tavukçuoğlu IC. Endüstri 4.0 kapsamında IoT (Nesnelerin İnterneti) uygulamalarının müşteri memnuniyetine etkisi ve bir araştırma [yüksek lisans tezi]. Ankara: Gazi Üniversitesi; 2019.
7. Tigmeanu CV, Ardelean LC, Rusu LC, et al. Additive manufactured polymers in dentistry, current state-of-the-art and future perspectives – A review. *Polymers (Basel)*. 2022;14(17): 3658.
8. Choong YYC, Maleksaeedi S, Eng H, et al. 4D printing of high performance shape memory polymer using stereolithography. *Mater Des*. 2017;126: 219-225.
9. Mathur V, Agarwal P, Srinivasan V, et al. Facet of 4D printing in biomedicine. *J Mater Res*. 2023;38: 2-18.
10. Ge Q, Sakhaei AH, Lee H, et al. Multimaterial 4D printing with tailorable shape memory polymers. *Sci Rep*. 2016;6(1): 31110.
11. Appuhamillage GA, Ambagasipitiya SS, Dassanayake RS, et al. 3D and 4D printing of biomedical materials: Current trends, challenges, and future outlook. *Explor Med*. 2024;5(1): 17-47.

12. Pokras D, Schneider Y, Zaidi S, et al. Shape Memory Polymers in 4D Printing: Investigating Multi-Material Lattice Structures. *J Manuf Mater Process.* 2024;8(4): 154.
13. Zhang K, Geissler A, Standhardt M, et al. Moisture-responsive films of cellulose stearyl esters showing reversible shape transitions. *Sci Rep.* 2015;5(1): 1-13.
14. Zamani Alavijeh R, Shokrollahi P, Barzin J. A thermally and water activated shape memory gelatin physical hydrogel, with a gel point above the physiological temperature, for biomedical applications. *J Mater Chem B.* 2017;5(12): 2302-2314.
15. Mao Y, Yu K, Isakov MS, et al. Sequential self-folding structures by 3D printed digital shape memory polymers. *Sci Rep.* 2015;5(1): 13616.
16. Lee YW, Ceylan H, Yasa IC, et al. 3D-printed multi-stimuli-responsive mobile micromachines. *ACS Appl Mater Interfaces.* 2020;13(11): 12759-12766.
17. Cui H, Miao S, Esworthy T, et al. A novel near-infrared light responsive 4D printed nanoarchitecture with dynamically and remotely controllable transformation. *Nano Res.* 2019;12: 1381-1388.
18. Zhao W, Zhang F, Leng J, et al. Personalized 4D printing of bioinspired tracheal scaffold concept based on magnetic stimulated shape memory composites. *Compos Sci Technol* 2019;184: 107866.
19. Wan X, He Y, Liu Y, et al. 4D printing of multiple shape memory polymer and nanocomposites with biocompatible, programmable and selectively actuated properties. *Addit Manuf* 2022;53: 102689.
20. Kuribayashi K, Tsuchiya K, You Z, et al. Self-deployable origami stent grafts as a biomedical application of Ni-rich TiNi shape memory alloy foil. *Mater Sci Eng A* 2006;419(1-2): 131-137.
21. Guo J, Zhang R, Zhang L, et al. 4D printing of robust hydrogels consisted of agarose nanofibers and polyacrylamide. *ACS Macro Lett* 2018;7(4): 442-446.
22. Bakarich, Shannon E, Gorkin R, et al. 4D printing with mechanically robust, thermally actuating hydrogels. *Macromol Rapid Commun* 2015;36(12): 1211-1217.
23. Li H, Go G, Ko SY, et al. Magnetic actuated pH-responsive hydrogel-based soft microrobot for targeted drug delivery. *Smart Mater Struct* 2016;25(2): 027001.
24. Manchun S, Dass CR, Sriamornsak P. Targeted therapy for cancer using pH-responsive nanocarrier systems. *Life Sci* 2012;90(11-12): 381-387.
25. Wu J, Zheng K, Huang X, et al. Thermally triggered injectable chitosan/silk fibroin/bioactive glass nanoparticle hydrogels for in-situ bone formation in rat calvarial bone defects. *Acta Biomater* 201;91: 60-71.
26. Sheikh A, Abourehab MAS, Kesharwani P. The clinical significance of 4D printing. *Drug Discov Today* 2023;28(1): 103391.
27. Neuss S, Blumenkamp I, Stainforth R, et al. The use of a shape-memory poly(epsilon-caprolactone) dimethacrylate network as a tissue engineering scaffold. *Biomaterials* 2009;30(9): 1697-1705.
28. Li Y, Zhang F, Liu Y, et al. 4D printed shape memory polymers and their structures for biomedical applications. *Sci China Technol Sci* 2020;63(4): 545-560.
29. Miao S, Zhu W, Castro NJ, et al. 4D printing smart biomedical scaffolds with novel soybean oil epoxidized acrylate. *Sci Rep* 2016;6(1): 27226.
30. Senatov FS, Niaza KV, Zadorozhnyy MY, et al. Mechanical properties and shape memory effect of 3D-printed PLA-based porous scaffolds. *J Mech Behav Biomed Mater* 2016;57: 139-148.
31. Wan Z, Zhang P, Liu Y, et al. Four-dimensional bioprinting: Current developments and applications in bone tissue engineering. *Acta Biomater* 2020;101: 26-42.
32. Maloo LM, Patel A, Toshniwal SH, et al. Smart materials leading to restorative dentistry: an overview. *Cureus.* 2022;14(10): e30183.
33. Hamza H. Dental 4D printing: An innovative approach. *Innovation* 2018;1(9): 17.
34. Elshazly TM, Keilig L, Alkabani Y, et al. Potential application of 4D technology in fabrication of orthodontic aligners. *Front Mater* 2022;8: 586.
35. Jung YC, Cho JW. Application of shape memory polyurethane in orthodontic. *J Mater Sci*

- 2010;21: 2881-2886.
36. Masuda T, Miyazawa K, Ueda N, et al. Development of an orthodontic elastic material using EMA-based resin combined with 1-butanol. *Dent Mater J* 2011;30(5): 664-671.
 37. Tsukada G, Tokuda M, Torii M. Temperature triggered shape memory effect of transpolyisoprene-based polymer. *J Endod* 2014; 40(10): 1658-1662.
 38. Sharma D, Mathur VP, Satapathy BK. Biodegradable and biocompatible 3D constructs for dental applications: Manufacturing options and perspectives. *Ann Biomed Eng* 2021;49(9): 2030-2056.
 39. Liu G, He Y, Liu P, et al. Development of bioimplants with 2D, 3D, and 4D additive manufacturing materials. *Engineering* 2020;6(11): 1232-1243.
 40. Pradhan SR, Husain M, Singh R, et al. A case study of 4D-imaging-assisted 4D printing for clinical dentistry for canines. In: 4D Imaging to 4D Printing. *CRC Press* 2022: 119-136.
 41. Su JW, Li D, Xie Y, et al. A machine learning workflow for 4D printing: Understand and predict morphing behaviors of printed active structures. *Smart Mater Struct* 2020;30(1): 015028.