

HIGHLIGHTS OF THE APPLICATION OF THREE-DIMENSIONAL PRINTING TO DENTAL MEDICINE

Mariana Yordanova Dimova-Gabrovska

Medical University of Sofia. Faculty of Dental Medicine. Department of Prosthetic Dentistry, Bulgaria,
marianadimova@abv.bg

Yoana Rumenova Brusarska

Medical University of Sofia. Faculty of Dental Medicine. Department of Prosthetic Dentistry, Bulgaria,
y.brusarska@fdm.mu-sofia.bg

Abstract: The application of three-dimensional printing in the field of medicine dates back to the year 2000. Scientific developments related to 3D printing in the field of dental medicine demonstrate and affirm its wide-ranging applications in oral and maxillofacial surgery, prosthetic dental medicine, implantology, endodontics, orthodontics, and periodontology.

For over three decades, 3D printing has been extensively used to create anatomical models that aid in diagnosis, planning, and educational purposes. The aim of this study is to conduct a critical analysis of the highlights of the application of 3D printing in dental medicine.

Keywords: 3D printing; additive manufacturing materials; prosthetic dental medicine

АКЦЕНТИ НА ПРИЛОЖЕНИЕТО НА ТРИИЗМЕРНИЯ ПЕЧАТ НА ДЕНТАЛНАТА МЕДИЦИНА

Мариана Йорданова Димова-Габровска

Медицински университет-София. Факултет по дентална медици. Катедра по протетична дентална медицина, България, marianadimova@abv.bg

Йоана Руменова Брусарска

Медицински университет-София. Факултет по дентална медици. Катедра по протетична дентална медицина, България, y.brusarska@fdm.mu-sofia.bg

Резюме: Приложението на триизмерния печат в областта на медицината датира от 2000 г. Научните разработки, свързани с триизмерното принтиране в областта на денталната медицина доказват и потвърждават широкото му приложение в областите на оралната и лицево-челюстната хирургия, протетичната дентална медицина, имплантологията, ендодонтията, ортодонтията и пародонтологията.

Повече от три десетилетия триизмерния печат се използва усилено за изработване на анатомични модели, спомагащи диагностиката и планирането и за образователни цели.

Целта на настоящото проучване е да се направи критичен анализ на акцентите на приложението на триизмерния печат в денталната медицина.

Ключови думи: триизмерен печат; материали за адитивно производство; протетична дентална медицина

1. ВЪВЕДЕНИЕ

През 70-те години на миналия век е създадена първата система за *компютърно проектиране (CAD)* и *дигитален дизайн (CAM)* [30, 18, 2]. Принципът на функциониране на системата е, както следва: след интраорално дигитално сканиране се изгражда триизмерен виртуален модел CAD, който позволява произвеждане на реални протезни конструкции [16, 26, 2]. Развитието на CAD/CAM технологията и навлизането ѝ в денталната медицина променя глобално лечебния подход и манипулациите в протетичната дентална медицина [26, 2]. Десет години по-късно, базиран на CAD/CAM системата, възниква и триизмерния печат [30]. Той се определя като технология със съществени предимства по отношение на проектирането и изработването на конструкции [30].

Според редица автори [49, 24, 30, 8, 11, 10, 46] идеята за триизмерния печат е разработена от Charles W. Hull в началото на 80-те години на миналия век, когато той започва работа по производство на пластмасови устройства от фотополимери.

През 1986 г. Hull [29] получава авторски патент за *стереолитографията (SLA)* като система за триизмерен (3D) печат.

По-късно, през 1990 г. Scott Crump [16] получава патент за друг вид технология – *моделиране чрез отлагане (FDM)* [49, 24, 8, 11, 10].

Три години по-късно, през 1993 г. Michael Cima и Emanuel Sachs [25] патентоват първия принтер за триизмерен печат наречен „3D printer“, който принтира пластмасови, метални и керамични части [24, 25], а през 1995 г. Sachs въвежда нова терминология за обозначаване на процеса като „3D *принтиране*“. Димова-Габровска [2] отбелязва, че този подход обобщава много технологии и материали, като принципът на работа е един и същ, а именно дигитален модел се превръща в материален триизмерен физически обект чрез послойно добавяне на материал.

В наши дни за означаване на триизмерния печат често се използва и терминът „*адитивно производство*“. Целта на настоящото проучване е да се направи критичен анализ на акцентите на приложението на триизмерния печат в денталната медицина.

2. МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

За осъществяване на литературния обзор в периода от юни до октомври 2023 г. е проведено търсене в следните бази данни: PubMed, EBSCOhost, MDPI, Wiley online library и др. Търсенето е осъществено по ключови думи: триизмерен печат; 3D *принтиране*; адитивни технологии; материали; дентална медицина. Селекцията на научните източници според целта на проучването доведе до свеждането им в 54 публикации, от които 5 на кирилица и 49 на латиница.

Обследвани са съществуващите до момента научни данни за техническите характеристики на съвременните материали за триизмерен печат в протетичната дентална медицина.

3. РЕЗУЛТАТИ

През 2021 г. Yueyi Tian et al. [49] описват принципа на работа на 3D принтерите и ги разделят в три категории: прахово сливане (Powder Bed Fusion – PBF), светлинно втвърдяване (Light curing) и моделиране на разтопено отлагане (Fused Deposition Modeling – FDM).

Прахово сливане (PBF) – Използват се прахообразни материали, които могат да бъдат синтеровани или стопени чрез лазерно лъчение и последващо втвърдени чрез охлаждане [49, 48, 36]. Според източника на енергия и материала праховото сливане е разделено на следните технологии: селективно лазерно топене (selective laser melting – SLM), селективно лазерно синтероване (selective laser sintering – SLS), топене с електронен лъч (electron beam melting – EBM) и директно лазерно синтероване на метал (direct metal laser sintering – DMLS) [49, 21, 2]. В денталната медицина тази технология намира приложение при изработването на всички видове метални изделия [49, 48].

Светлинното втвърдяване [49, 8, 11] е технология на триизмерно *принтиране* с помощта на фоточувствителни смоли, втвърдяващи се чрез светлинно облъчване. В денталната медицина съществуват две основни технологии на стереолитография (stereolithography – SLA) и цифрова светлина обработка (digital light processing – DLP) [49, 8, 2]. *Стереолитография (SLA)* е една от първите технологии на триизмерния печат [49, 24, 8, 29] и се състои от резервоар за материал (фоточувствителна смола), платформа за изграждане на модел, която се движи колкото е необходимо за дебелината на слоевете и ултравиолетов лазер за полимеризация на смолата [49, 10, 29]. Технологията на *цифровата светлинна обработка (DLP)* [49, 8] се състои от правоъгълно подредени огледала – цифров микрорефлектор. Всяко огледало представлява един пиксел и разделителната способност на проектираното изображение зависи техния брой. Излъчената от източник светлина се пречупва от микроогледалото и след това се проектира върху повърхността, която трябва да бъде отпечатана като един пиксел.

Моделиране на разтопено отлагане (FDM) – посредством тази технология 3D модела се изработва чрез екструдиране на термопластични материали и отлагането на полуразтопен материал, слой по слой [24, 16, 2]. Термопластичният материал се придвижва от две ролки към дюза на печатащата глава, където чрез нагряване материалът преминава в полуразтопено състояние, а печатащата глава следва дизайна на всеки един напречен слой. Екструдираният от дюзата материал се втвърдява върху платформата [49, 24, 38, 50].

Приложение на адитивното производство в денталната медицина

Според публикация от 2014 г. на Bethany C. et al. [24] приложението на триизмерния печат в областта на медицината датира от 2000 г. Gunpreet Oberoi [38] отбелязва, че научните разработки, свързани с *триизмерното принтиране* в областта на денталната медицина доказват и потвърждават широкото му приложение в областите на оралната и лицево-челюстната хирургия, протетичната дентална медицина, имплантологията, ендодонтията, ортодонтията и пародонтологията. В потвърждение на тези разсъждения Yueyi Tian et al. [49] отбелязват, че развитието и напредването на технологиите създава благоприятни условия за изработването на сложни конструкции във всички сфери на денталната медицина и в резултат на

специфичните характеристики на технологията, крайният продукт е изработен с висока прецизност, точност и индивидуална съобразеност.

3.1. 3D принтиране в оралната и лицево-челюстната хирургия

Повече от три десетилетия триизмерният печат се използва усилено за целите на оралната и лицево-челюстната хирургия [7]. Чрез *адитивното производство* се изработват анатомични модели, спомагащи диагностиката, планирането и обучението. Производственият процес позволява създаване на персонализирани имплантати и хирургични водачи [7, 17, 20, 1, 46, 2].

3.2. 3D принтиране в ортодонтията

Триизмерният печат се използва активно за целите на ортодонтията. Произвеждат се анатомични спомагателни модели за образователни цели. *Адитивното производство* се използва и за отпечатване на диагностични модели, изработването на ортодонтски алайнери и оклузални шини [38, 33, 46].

3.3. 3D принтиране в пародонтологията

Адитивното производство за целите на пародонтологията се използва при изработването на водачи, спомагащи коригирането на гингивалния ръб [38, 27, 46].

3.4. 3D принтиране в протетичната дентална медицина

Според множество научни изследвания *адитивното производство* позволява добри резултати в областта на протетичната дентална медицина, чрез изработването на сменяеми и несменяеми протезни конструкции [38, 35, 14, 46, 2].

У нас Танева и Узунов [5] описват успех в употребата на технологията при производството на оклузални шини за бруксизъм.

Dikova et al. [18] представят предимствата на *адитивното производство* за целите на протетичната дентална медицина. Авторите обобщават възможностите за използването на редица материали като: полимери, композити, восъци, метални сплави, дори и керамика.

У нас Katreva et al. [30] описват като най-често използвани технологии за *адитивно производство* в протетичната дентална медицина: стереолитографията (SLA), мастилено-струйна система (3DP), селективно лазерно синтероване (SLS) и моделиране на разтопено отлагане (FDM).

Научни сведения [38, 28, 37] показват успех в протезирането на пациенти с ограничено отваряне на устата, цикатрикси и други увреждания благодарение на възможностите на интраоралното дигитално сканиране на протезното поле и последващото изработване на сменяеми протезни конструкции.

Според публикация на Sang-Mo Park et al. [41] с постиженията в областта на интраоралното сканиране и 3D принтирането е възможна директната изработка на временни корони непосредствено след препарирането на зъба [3].

In vitro [38, 19] проучванията показват, че керамика, произведена чрез литография дава сходни механични свойства с фрезованата керамика, според което технологията на *триизмерния печат* има сериозен потенциал в изработването на конструкции от материали с включена керамика в своя състав.

В публикация на Kröger et al. [34] авторите отбелязват напредък и в обучението на студенти по дентална медицина в Германия благодарение на 3D принтирани спомагателни пособия като отпечатани модели на реални пациенти за изработване на фасети и препариране на зъби за обвивни корони.

Фактори оказващи влияние върху 3d принтирани конструкции

В публикацията си от 2021 г. Tian et al. [49] отбеляза, че съществуват фактори на принтирането, като параметри на печатния процес, композицията на материалите и последващата обработка, които имат отражение върху качеството на крайния продукт по отношение на точността и механичните качества. Според публикация на Quintana et al. от 2009 г. [44] оста и позицията на конструиране не дава отражение на механичните качества, като якост на опън и модул на еластичност, но настройките за оформлението имат отражение върху механичните качества на използвания материал.

В друго проучване на Chockalingam et al. [15], публикувано през 2008 г., авторите доказват, че посоката на отложения слой материал оказва влияние на механичните качества на конструкции, а именно по-добри механични качества има тогава, когато слой материал е перпендикулярен на посоката на натоварване, отколкото когато са успоредни.

Според Alharbi et al. [6] ъгълът на изграждане и конфигурацията на опорната структура оказват влияние на триизмерно отпечатаните конструкции.

Според Osman et al. [40] при работа с цифрова светлина обработка (DLP) най-висока точност се постига с ъгъл на работа от 135°.

Материали за адитивно производство

В публикацията си Barazanchi et al. [9] описват разнообразието в употребата и подбирането на материали за адитивно производство, което е в съответствие с различията в технологиите на адитивното производство.

Материалите могат да бъдат разделени в следните групи:

5.1. Полимери

В публикацията си от 2023 г. Cai et al. [13] отбелязва полимерите като най-разпространените материали употребявани за адитивно производство в денталната медицина. В протетичната дентална медицина полимерите намират приложение, както в изработването на работни модели така и на временни корони и мостови конструкции [42]. Полимерите биват:

Поликапролактон (PCL) – алифатен полиестер, който притежава висока биосъвместимост, регулируема разтворимост и ниска точка на топене, което го прави силно приложим. Използва се за изработването на скелет при регенерация на костна тъкан [51].

Полиметилметакрилат (PMMA) – материал, който често се използва в денталната медицина за изработването на протезни конструкции, временни корони и мостови протези поради множеството си предимства [13, 53, 3]. Според Cai et al. [13] PMMA е съвместим с технологията на моделиране на разтопено отлагане (FDM) за адитивно производство.

Полимлечна киселина (PLA) – представена от Cai et al. [13] като хидрофилен и алифатен полиестер, биоразградим и екологичен, използващ се с технологията на моделиране на разтопено отлагане (FDM). Авторите я определят като подходящ за костната и тъканната регенерация.

Поли (млечна-ко-гликолова киселина) – представлява съполимер на полимлечната киселина (PLA) и полиглицоловата киселина (PGA) и притежава много добра биосъвместимост и биоразградимост [13].

Редица автори [54, 31] описват и UV смоли. Това са полимери, които по мнение на Cai et al. [13] под UV лъчение с дължина на вълната 250-300 nm преминават от течно в твърдо състояние, чрез реакция на полимеризация дължаща се на омрежването на разпръснатите полимери. Според Zhang et al. [54] UV смолите са подходящи за технологията на цифрова светлинна обработка (DLP) и стереолитография (SLA).

5.2. Метали

Cai et al. [13] смята, че металите винаги са били подходящ материал за възстановяване на зъби благодарение на добрите им механични качества.

Според Cai et al. [13] Ti и неговите сплави са с добри механични качества и изключителна биосъвместимост. Те притежават ниска плътност, което ги прави идеални материали за 3D принтирането. Материалът се използва широко в денталната медицина в производството на зъбни имплантати и протезни конструкции, като корони, мостови протези и скелет за подвижни протезни конструкции [13].

Cai et al. [13] описва Co-Cr сплави като материали с добри механични качества, устойчиви на корозия, което ги прави подходящи за употреба в протетичната дентална медицина за изработването на сменяеми и на несменяеми протезни конструкции. Revilla-León et al. [47] описват Co-Cr сплави като подходящи за работа с технологията на PBF за адитивно производство.

5.3. Керамика

В публикациите си авторите Cai et al. и Oilo et al. [13, 39] описват керамиката като възстановителен материал, намерил своето място в денталната медицина благодарение на добрите си механични качества, биосъвместимост, износоустойчивост и естетичност. Според композицията на материала керамиките се разделят на: стъкло, цирконий и алуминий [45].

Стъклокерамиката има висока механична якост и ниска електропроводимост [13]. Авторите Baumgartner et al. [12] описват изработването на стъклокерамика посредством 3D принтиране по технологията на стереолитографията (SLA). Проучванията на Yang et al. [52] определят стъклокерамиката, изработена посредством SLA, като надвишаваща механичните качества на същата, произведена конвенционално.

Циркониевата керамика много често се използва в денталната медицина [22, 23]. Авторите Barazanchi et al. [9] и Cai et al. [13] описват циркония като биосъвместим и лесно приспособим материал към околните меки тъкани. Освен това те отбелязват, че циркония е с висока якост.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Необходимостта от прецизност, съвършенство и кратки срокове за изработване на възстановителни конструкции налага използването и развитието на дигиталните методи в денталната практика.

В **заключение** съвременното протетично лечение е изправено пред нови предизвикателства с широка мащабност и бърз темп на развитие, както по отношение на материалите за адитивно производство така и по отношение на новите технологии за триизмерен печат. Това поставя пред лекарите по дентална медицина нови възможности и изисква придобиване на допълнителни знания и компетентности.

БИБЛИОГРАФИЯ

- Влахова А., (2021) Златев С.: CAD/CAM технологии в протетичната дентална медицина, стр. 41-74, Пловдив.
- Димова-Габровска М. (2023) Съвременни дигитални технологии в денталната медицина., Списание на българска академия на науките, стр. 16-22.
- Рангелов С. (2023) Армиране на материали за предварителни конструкции – лабораторно и клинично изследване. Дисертация, София.
- Танева И. (2022) Триизмерно принтирани шини за профилактика на усложненията при бруксизъм - експериментално и клинично изследване., Дисертационен труд, София.
- Танева И., Т. Узунов, Н. Миланов (2020) Напълно дигитален подход при справяне с бруксизма, PROBLEMS OF DENTAL MEDICINE, 46, 18-27.
- Alharbi N., R. B. Osman, and D. Wismeijer (2016) Factors influencing the dimensional accuracy of 3d-printed fullcoverage dental restorations using stereolithography technology, The International Journal of Prosthodontics, 29(5), 503–510.
- Alharbi N., S. Alharbi, V. Cuijpers, R. B. Osman, and D. Wismeijer (2018) Three-dimensional evaluation of marginal and internal fit of 3D-printed interim restorations fabricated on different finish line designs, Journal of Prosthodontic Research, 62(2), 218–226.
- Bagheri A. and Jianyong Jin (2019) Photopolymerization in 3D Printing School of Chemical Sciences, *ACS Applied Polymer Materials* (4), 593-611, The University of Auckland, New Zealand.
- Barazanchi A., K. C. Li, B. Al-Amleh, K. Lyons, and J. N. Waddell, (2017) Additive technology: update on current materials and applications in dentistry, *Journal of Prosthodontics*, 26(2), 156–163.
- Barazanchi A., K. Chun Li, B. Al-Amleh, K. Lyons, J. Neil Waddell (2017) Additive Technology: Update on Current Materials and Applications in Dentistry, *Journal of Prosthodontics*, 26, 156-163.
- Barazanchi A., Kai Chun Li, Basil Al-Amleh, Karl Lyons & J. Neil Waddell (2016) Additive Technology: Update on Current Materials and Applications in Dentistry, *Article of Journal of Prosthodontics*.
- Baumgartner, S., Gmeiner, R., Schonherr, J.A., Stampfl, J. (2020) Stereolithography-based additive manufacturing of lithium disilicate glass ceramic for dental applications., *Mater. Sci. Eng. C Mater. Biol. Appl.*, 116.
- Cai H., Xiaotong Xu, Xinyue Lu, Zhao M., Qi Jia, Heng-Bo Jian and Jae-Sung Kwon (2023) Dental Materials Applied to 3D and 4D Printing Technologies: A Review, 15(10).
- Chen, J., Ahmad, R., Suenaga, H., Li, W., Sasaki, K., Swain, M., et al. (2015) Shape optimization for additive manufacturing of removable partial dentures—a new paradigm for prosthetic.
- Chockalingam K., N. Jawahar, U. Chandrasekar, and K. N. Ramanathan (2008) Establishment of process model for part strength in stereolithography, *Journal of Materials Processing Technology*, 208(1–3), 348–365.
- Crump S., (1992) Apparatus and method for creating three-dimensional objects, U.S. patent, 5121329.
- Cutting, C., Bookstein, F. L., Grayson, B., Fellingham, L., and McCarthy, J. G. (1986) Three-dimensional computer-assisted design of craniofacial surgical procedures: optimization and interaction with cephalometric and CT-based models, *Plast. Reconstr. Surg.*, 77, 877–887.
- Dikova T, Dzhendov D, Simov M, Katreva-Bozukova, Angelova S, Pavlova D, Abadzhiev M, Tonchev T. (2015) Modern trends in the development of the technologies for production of dental constructions, *Journal of IMAB - Annual Proceeding (Scientific Papers)*, 21(4), 974-981
- Ebert, J. Ozkol, E., Zeichner, A., Uibel, K. Weiss, O., Koops, U., et al. (2009) Direct inkjet printing of dental prostheses made of zirconia, *J. Dent. Res.*, 88, 673–676.
- Erickson, D. M., Chance, D., Schmitt, S., and Mathis, J. (1999) An opinion survey of reported benefits from the use of stereolithographic models., *J. Oral Maxillofac. Surg.*, 57, 1040–1043
- Galante R., C. G. Figueiredo-Pina, and A. P. Serro (2019) Additive manufacturing of ceramics for dental applications: a review, *Dental Materials*, 35(6), 825–846
- Gerdzhikov I, Radeva E, Uzunov (2023) Comparative study of the bond strength of ZirCAD Multi and ZirCAD Prime ceramics with different types of cements, *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 37:1,
- Gerdzhikov I, Radeva E, Uzunov T. (2021) Possibilities of Improving the Shear Strength Between Different Type of Cements and Zirconia Ceramics: Literature Review. *J of IMAB.*, 27(1), 3557-3563
- Gross B. C., J. L. Erkal, S. Y. Lockwood, C. Chen, and M. D. Spence (2014) Evaluation of 3D printing and its potential impact on biotechnology and the chemical sciences, *Analytical Chemistry*, 86(7), 3240–3253
- Haggerty S., J. S.; Cima, M. J. Williams, P. A. (1993) Threedimensional printing techniques., U.S. Patent 5,204,055
- Hamzah N., Nasrul Anuar Abd Razak , Mohd Sayuti Ab Karim , Hossein Gholizadeh (2021) A review of history of CAD/CAM system application in the production of transtibial prosthetic socket in developing countries

- Hoang, D., Perrault, D., Stevanovic, M., and Ghiassi (2016) A Surgical application of three-dimensional printing: a review of the current literature and how to get started, *Ann. Transl. Med.* 4(2), 456.
- Hu, F., Pei, Z., and Wen, Y. (2017) Using intraoral scanning technology for three-dimensional printing of Kennedy class I removable partial denture metal framework: a clinical report.
- Hull, C. W. (1986) Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography., March 11, 1986, U.S. Patent 4,575,330
- Katreva I., Tsanka Dikova, Metodi Abadzhiev, Tsvetan Tonchev, Dzhendo Dzhendov, Maksim Simov, Svetlana Angelova, Diana Pavlova, Maya Doychinova (2016) 3d printing in contemporary prosthodontic treatment, *Scripta Scientifica Medicinae Dentalis*, 2(1), 7-11 Medical University of Varna
- Kim, G.T.; Go, H.B.; Yu, J.H.; Yang, S.Y.; Kim, K.M.; Choi, S.H.; Kwon, J.S. (2022) Cytotoxicity, Colour Stability and Dimensional Accuracy of 3D Printing Resin with Three Different Photoinitiators., *Polymers*, 14, 979.
- Kim, J.H., Kim, M.Y., Knowles, J.C., Choi, S., Kang, H., Park, S.H., Park, S.M., Kim, H.W., Park, J.T., Lee, J.H., et al. (2020) Mechanophysical and biological properties of a 3D-printed titanium alloy for dental applications., *Dent. Mater.*, 36, 945–958.
- Krey, K. F., Darkazanly, N., Kühnert, R., and Ruge, S. (2016) 3D-printed orthodontic brackets - proof of concept. *Int. J. Comput. Dent.* 19, 351–362.
- Kröger, E., Dekiff, M., and Dirksen, D. (2017) 3D printed simulation models based on real patient situations for hands-on practice., *Eur. J. Dent. Educ.*, 21, 119-125.
- Liu X.Z., Lu P.J, Wang Y. (2008) Research progress of dental machinable materials, *Journal of Peking University (Health Sciences)*, 40(6), 654-7.
- Methani M., M. Revilla-Leon, and A. Zandinejad (2020) The potential of additive manufacturing technologies and their processing parameters for the fabrication of all-ceramic crowns: a review, *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, 32(2), 182–192
- Nogueira, S. S., Ogle, R. E., and Davis, E. L., (1999) Comparison of accuracy between compression- and injection-molded complete dentures., *J. Prosthet. Dent.*, 82, 291–300.
- Oberoi G., S. Nitsch, M. Edelmayr, K. Janjić, A. S. Müller, and H. Agis (2018) 3D printing-encompassing the facets of dentistry, *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 6, 172
- Oilo, M., Hardang, A.D., Ulsund, A.H., Gjerdet, N.R. (2014) Fractographic features of glass-ceramic and zirconia-based dental restorations fractured during clinical function., *Eur. J. Oral Sci.*, 122, 238–244.
- Osman R., N. Alharbi, and D. Wismeijer (2017) Build angle: does it influence the accuracy of 3d-printed dental restorations using digital light-processing technology?, *The International Journal of Prosthodontics*, 30(2), 182–188.
- Park Sang-Mo, Ji-Man Park, Seong-Kyun Kim, Seong-Joo Heo, Jai-Young Koak (2020) Flexural Strength of 3D-Printing Resin Materials for Provisional Fixed Dental Prostheses.
- Pillai, S., Upadhyay, A., Khayambashi, P., Farooq, I., Sabri, H., Tarar, M., Lee, K.T., Harb, I., Zhou, S., Wang, Y. et al. (2021) Dental 3D-Printing: Transferring Art from the Laboratories to the Clinics. *Polymers*, 13(1), 157.
- Polzin, C., Spath, S., Seitz H., (2013) Characterization and evaluation of a PMMA-based 3D printing process, *Rapid Prototyp. J.*, 19, 37–43.
- Quintana R., J.-W. Choi, K. Puebla, and R. Wicker (2009) Effects of build orientation on tensile strength for stereolithographymanufactured ASTM D-638 type I specimens. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 46, 201–215.
- Raghavendra, S.S., Jadhav, G.R., Gathani, K.M., Kotadia, P. (2007) Bioceramics in endodontics—A review., *J. Istanb. Univ. Fac. Dent.*, 51, 128–137.
- Rangelov S. (2021) Additive digital technologies in contemporary dental medicine, *International Interdisciplinary Virtual Meeting “Alumni Club and Friends”*, 140-143
- Revilla L., Meyer M., Özcan, M. (2019) Metal additive manufacturing technologies: Literature review of current status and prosthodontic applications., *J. Comput. Dent.*, 22, 55–67.
- Revilla-Leon M., M. Sadeghpour, and M. Ozcan, (2020) A review of the applications of additive manufacturing technologies used to fabricate metals in implant dentistry, *Journal of Prosthodontics*, 29(7), 579–593
- Tian Y. 1, ChunXu Chen, Xiaotong Xu, Jiayin Wang, Xingyu Hou, Kelun Li, Xinyue Lu, HaoYu Shi, Eui-Seok Lee, Heng Bo Jiang (2021) A Review of 3D Printing in Dentistry: Technologies, Affecting Factors, and Applications, *Hindawi*, 2021,19
- Weeren V., R.; Agarwala, M.; Jamalabad, V.; Bandyopadhyay, A.; Vaidyanathan, R.; Langrana, N.; Safari, A.; Whalen, P.; Danforth, S.; Ballard, C. (1995) In *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*; ASME: New York, 314–321

- Woodruff M.A., Hutmacher D.W. (2010) The return of a forgotten polymer—Polycaprolactone in the 21st century, *Polym Science*, 35, 1217–1256.
- Yang, B.; Wang, S.; Wang, G.; Yang, X. (2021) Mechanical properties and wear behaviors analysis of fluorapatite glass-ceramics based on stereolithography 3D printing., *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*
- Zafar M.S. (2020) Prosthodontic Applications of Polymethyl Methacrylate (PMMA): An Update. *Polymers*, 12(10), 2299.
- Zhang, B., Li S., Hingorani, H., Serjouei. A., Larush. L., Pawar. A.A., Goh. W.H., Sakhaei. A.H., Hashimoto. M., Kowsari. K. et al. (2018) Highly stretchable hydrogels for UV curing based high-resolution multimaterial 3D printing., *J. Mater. Chem. B.*, 6, 3246–3253.