مجله علوم پزشکی رازی دوره ۳۲، شماره پیوسته ۵۹، ۲۱ خرداد ۱۴۰۴ https://doi.org/10.47176/rjms.32.59

مروری

فناوری چاپ سه بعدی و ساخت افزایشی: مروری بر کاربردهای زیست پزشکی

شیدا اسمعیل زاده: دانشیار، گروه شیمی، واحد داراب، دانشگاه آزاد اسلامی، داراب، ایران؛ و آزمایشگاه ساخت افزایشی صدرا، مرکز تحقیقات مهندسی شیمی، نفت و پلیمر، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران (* نویسنده مسئول) esmaielzadehsheida@yahoo.com

مهسا واقفی: استادیار مهندسی پزشکی، گروه مهندسی برق، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران؛ و آزمایشگاه ساخت افزایشی صدرا، مرکز تحقیقات مهندسی شیمی، نفت و پلیمر، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

بنفشه اسمعیل زاده: دانشیار، گروه علوم تشریحی و پاتولوژی، دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی بوشهر، بوشهر، ایران

محمد صادق تواللی: استادیار، گروه مهندسی شیمی، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران؛ و آزمایشگاه ساخت افزایشی صدرا، مرکز تحقیقات مهندسی شیمی، نفت و پلیمر، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

چکیده

زمینه و هدف: تفاوت شرایط بالینی و آناتومی هر بیمار از یک سو و دسترسی به داده های دیجیتال پزشکی از سوی دیگر باعث می‌شود تا کاربردهای فناوری ساخت افزایشی (چاپ سه بعدی) روز به روز در دنیای پزشکی گسترش و شکوفایی بیشتری پیدا کند. امکان ساخت قطعات متناسب با بیمار در هر سطح از پیچیدگی هندسی با مواد مختلف (از طیف وسیعی از مواد سخت و نرم) با هزینه متعارف، از مزایای این روش است که باعث شده تا متخصصان مختلف پزشکی از فناوری ساخت افزایشی در سطوح مختلف تشخیصی و درمانی بهره ببرند. توسعه سریع این کاربردها به حدی است که ایجاد یک واحد ساخت افزایشی مستقل با همکاری پزشکان با تخصص‌های مختلف در بیمارستان‌ها دور از ذهن نیست (و در برخی از مراکز درمانی این امر قبلاً آغاز شده است). لذا، با توجه به گسترش قابل توجه حوزه ساخت افزایشی در پزشکی، در این مقاله به بررسی مزایا و معایب آن پرداخته شده، و کاربرد و توسعه فناوری چاپ سه بعدی در سفارشی‌سازی تجهیزات پزشکی و توانبخشی، ایمپلنت‌ها و پروتزها بررسی شده است.

روش کار: روش جستجوی استاندارد مقالات نمایه شده در پایگاه داده‌های لاتین و فارسی Science direct, Scopus, PubMed, Google Scholar و ISC استفاده گردید. معیار ارزیابی و انتخاب، مقالاتی بود که در حوزه کاربرد زیست پزشکی با فناوری ساخت افزایشی بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۳ قرار داده شد و در نهایت ۴۰ مقاله مورد مطالعه و مرور قرار گرفت.

یافته‌ها: نتیجه مطالعات انجام شده نشان داد که فرآیند ساخت افزایشی در ساخت انواع ایمپلنت‌های توسعه یافته مانند مفصل زانو، جوش دهنده های مهره‌های کمری، جناغ سینه، ستون فقرات، مفصل ران، براکت مفصل زانو و نیز در تولید پروتزهایی مانند گوش، بینی، دندان‌ها، استخوان دست و پا که دارای خواص مکانیکی و فیزیکی مطلوب بوده و با بدن بیمار سازگاری کامل دارند، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از فناوری چاپ سه بعدی در ساخت تجهیزات توانبخشی و انواع ارتز نیز استفاده می‌شود. نباید نقش بسیار پررنگ این فناوری در آموزش پزشکی و توجیه بیماران و خانواده‌های آن‌ها را فراموش کرد.

نتیجه‌گیری: فناوری ساخت افزایشی می‌تواند تولید قطعات پیچیده با تنوع ساختار را آسان‌تر و سریع‌تر با هزینه کمتر در مقایسه با روش‌های سنتی فراهم کند. استفاده از این فناوری معجزه‌آسا در بخش آموزش پزشکی، داروسازی و داروسانی، مهندسی بافت و ساخت اندام، ساخت ابزارها و تجهیزات پزشکی انقلاب بزرگی در زمینه پزشکی و زیست پزشکی به همراه خواهد داشت که می‌تواند جان بسیاری از بیماران را نجات دهد. بسیاری از متخصصان پزشکی از چاپ سه بعدی در کارهای تشخیصی و درمانی خود استفاده می‌کنند.

تعارض منافع: گزارش نشده است.

منبع حمایت‌کننده: حامی مالی ندارد.

کلیدواژه‌ها

ساخت افزایشی،

چاپ سه بعدی،

تجهیزات پزشکی،

کاربردهای زیست پزشکی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۱

تاریخ چاپ: ۱۴۰۴/۰۳/۲۱

شیوه استناد به این مقاله:

Esmaielzadeh S, Vaghefi M, Esmaeilzadeh B, Tavallali MS. 3D Printing Technology and Additive Manufacturing: a Review of Biomedical Application. Razi J Med Sci. 2025(11 Jun);32.59.

Copyright: ©2024 The Author(s); Published by Iran University of Medical Sciences. This is an open-access article distributed under the terms of the CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.en).

*انتشار این مقاله به‌صورت دسترسی آزاد مطابق با CC BY-NC-SA 4.0 صورت گرفته است.

[Downloaded from rjms.iums.ac.ir on 2026-06-24]

[DOI: 10.47176/rjms.32.59]

Razi Journal of Medical Sciences. 2025(11 Jun);32.59. https://doi.org/10.47176/rjms.32.59

Review

3D Printing Technology and Additive Manufacturing: a Review of Biomedical Application

Sheida Esmaielzadeh: Associate Professor, Department of Chemistry, Darab branch, Islamic Azad University, Darab, Iran; Sadra Additive Manufacturing Laboratory, Chemical, Petroleum & Polymer Engineering Research Center, Shiraz branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran (*Corresponding author) esmaielzadehsheida@yahoo.com)
Mahsa Vaghefi: Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran; Sadra Additive Manufacturing Laboratory, Chemical, Petroleum & Polymer Engineering Research Center, Shiraz, Iran
Banafsheh Esmaeilzadeh: Associate Professor, Department of Anatomy, School of Medicine, Bushehr University of Medical Sciences, Bushehr, Iran
Mohammad Sadegh Tavallali: Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran; Sadra Additive Manufacturing Laboratory, Chemical, Petroleum & Polymer Engineering Research Center, Shiraz, Iran

Abstract

Background & Aims: Different from reduction manufacturing and equal manufacturing, 3D printing is an additive manufacturing method, which transforms 3D model into 2D cross-section data to form entity layer by layer. This makes its processing not limited by complexity of the design model and number of the manufacturing products. It is very suitable for the medical field with high customization requirements. The difference in the clinical conditions and anatomy of each patient, on the one hand, and the the availability of the medical-digital data, on the other hand, enforced the daily expansion and progressive flourishing of the Additive Manufacturing (AM) technology (3D printing) applications in the medical world. The possibility of manufacturing patient-specific pieces with any geometrical complexities out of different materials)from a wide range of hard and soft materials(with a conventional cost is one of the advantages of this method, which has led various medical specialists to benefit from AM technology at different diagnostic and therapeutic levels. AM technologies, namely fused deposition modelling (FDM), stereolithography (SLA), polyjet process, selective laser sintering (SLS), 3D inkjet printing and DLP, are increasingly applicable for various biomedical applications respect to various parameters including the fabricated prototype, required time to develop each prototype, ability to process different raw materials, repeatability, resolution and high accuracy. The rapid development of these applications is such that it is not far-fetched to estblish a separate AM unit in collaboration with physications of various specialties in hospitals (and in some medical centers this has already begun). This technology in the medical field, is increasingly used in a wide range of clinical applications, including guide templates, preoperative models, the implant, human tissue, organs, etc. Therefore, due to the significant expansion of the AM field in medicine, in this article, its advantages and disadvantages have been investigated, and the applications and development of AM technology in the customization of medical and rehabilitation equipments, implants and prostheses have been investigated.
Methods: Standard search method was used in Persian and English databases, namely Science direct, Scopus, PubMed, Google Scholar and ISC.The evaluation and selection criterion was the articles that were placed in the field of biomedical application with additive manufacturing technology between 2015 and 2023, and finally 40 articles were studied and reviewed.

Keywords
Additive manufacturing, 3D printing Technology, rehabilitation Equipment, Biomedical applications

Received: 01/03/2025
Published: 11/06/2025

[Downloaded from rjms.iums.ac.ir on 2026-06-24]

[DOI: 10.47176/rjms.32.59]

Results: The results of the conducted studies showed that AM technology is used in the manufacturing of all kinds of advanced implants such as knee joint, lumbar vertebrae welder, sternum, spine, hip joint, knee joint bracket. Thanks to this technology, it allows an accurate manufacturing specific to the patient with biocompatible. With successful surgical imaging, anatomical information of the patient is obtained, a digital model is created, and complications and errors that may occur in the placement of the implant are prevented. In addition, implants produced specifically for the patient's anatomy increase the chance of success. In addition, it can support tissue regeneration depending on the regeneration and growth factors of cells. Furthermore, implants produced with AM can have high fatigue strength and high corrosion resistance. The 3D printer enables the production of prostheses that have the desired mechanical and physical properties and are fully compatible with the patient in a short time. Realistic, suitable for the patient's anatomy, and close to the original mechanical properties, prostheses are produced for the ear, nose, teeth, bone, hand and foot. In addition, using the multi-material printing approach, it is possible to adjust the skin tone of the person who will use the prosthesis in accordance with the skin pigmentation. Furthermore, 3D printing technology is used in manufacturing rehabilitation equipments and various orthosis. Application of this technology of rehabilitation equipment is mainly taken in orthopedics, and hearing aids and so on. The prominent role of this technology in medical education and orientation of the patients and their families should not be forgotten.

Conclusion: AM technology can provide the production of complex pieces with a variety of structures simpler and faster at a lower expenses compared to traditional methods. It is especially used in the biomedical field thanks to its advantages, and it is preferred for different applications in this field every day. Some of these applications are included as surgical applications using biomodels or templates, modelling and imaging for a better understanding of diseases, manufacturing medical devices and equipment, patient-specific implant and prosthesis applications, vet medicine applications, tissue engineering applications, pharmaceutical industry applications, organ bioprinting which is currently in the testing stage. 3D printing technology will bring an excessive revolution in the field of medicine and biomedicine, which can save the lives of many patients. Many medical professionals use 3D printing in their diagnostic and therapeutic work. Thanks to the use of AM technology especially in the modelling and diagnosis of diseases, it is possible to model, diagnose and monitor the course of cancer which is one of the health problems of our age.

Conflicts of interest: None
Funding: None

Cite this article as:
Esmaielzadeh S, Vaghefi M, Esmaeilzadeh B, Tavallali MS. 3D Printing Technology and Additive Manufacturing: a Review of Biomedical Application. Razi J Med Sci. 2025(11 Jun);32.59.

Copyright: ©2024 The Author(s); Published by Iran University of Medical Sciences. This is an open-access article distributed under the terms of the CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.en).

*This work is published under CC BY-NC-SA 4.0 licence.

[Downloaded from rjms.iums.ac.ir on 2026-06-24]

[DOI: 10.47176/rjms.32.59]

مقدمه

چاپ سه بعدی یک روش ساخت لایه لایه از طرح‌های دیجیتال است که برای ساخت مدل سه بعدی طیف گسترده‌ای از ساختارها با اشکال پیچیده استفاده می‌شود. این فناوری با تعاریفی مانند چاپ سه بعدی (3D printing)، ساخت افزایشی (Additive Manufacturing)، تولید لایه ای (Layered Manufacturing)، نمونه‌سازی سریع (Rapid Prototyping) و فناوری ساخت جامد بی‌شکل (Solid Free Form Fabrication) بیان می‌شود (۱۲).

چاپ سه بعدی در بسیاری از زمینه ها مانند مهندسی هوافضا، مکانیک، خودروسازی، زیست پزشکی، هنر و معماری و غیره نوآوری‌هایی اساسی به دنبال داشته است و به عنوان یکی از فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم، بر همه علوم تأثیر گذاشته است. به ویژه در سال‌های اخیر کاربردهای مطلوب این فناوری در حوزه پزشکی با نام چاپ سه بعدی زیستی (3D Bioprinting) توجه زیادی را به خود جلب کرده است. پزشکی رشته‌ای است که به سرعت در حال تکامل است و در هر لحظه سرعت پیشرفت آن افزایش می‌یابد. این تکامل مدیون استفاده از ابزارها، روش‌ها و فناوری‌های جدید می‌باشد. متخصصانی که در رشته‌های خاص کار می‌کنند، از فناوری چاپ سه بعدی به عنوان فناوری جدید در دستیابی به بینش بهتر در مورد آناتومی خاص بیمار، مراقبت‌های پزشکی (۳)، برنامه‌ریزی پیش از جراحی مبتنی بر شبیه‌سازی آموزشی (۵و۴)، توسعه داروسازی (۶)، توسعه تصویربرداری پزشکی و دندانپزشکی (۷)، مدل‌سازی رگ‌های خونی (۸)، توسعه ایمپلنت‌ها و پروتزهای سفارشی (۹)، چاپ اندام‌های بدن (۱۰)، کاربردهای مهندسی بافت (۱۱) و حسگرهای زیست فعال (۱۲) بهره می‌برند. این فناوری می‌تواند جایگزینی برای تحقیقات پزشکی بالینی بر روی انسان‌ها و حیوانات در آزمایشات مشناسی و توسعه محصولات دارویی، آرایشی و بهداشتی باشد (۲).

به لطف این فناوری، مدت زمان ساخت یک نمونه که ممکن است چندین ماه با استفاده از روش‌های سنتی، به طول انجامد به چند روز یا چند ساعت، کاهش می‌یابد. سرعت، دقت، امکان بکارگیری دامنه وسیعی از مواد گوناگون و ماشین آلات چاپ با قابلیت‌های متفاوت، تنوع در طراحی نمونه‌های ساده تا قطعاتی با هندسه و پیچیدگی ساختاری، شبیه سازی از نمونه های موجود در طبیعت و همچنین صرفه اقتصادی ناشی از حذف الزامات روش‌های سنتی باعث شده است. این فناوری با سرعت رشد چشمگیری در زمینه‌های مختلف صنعتی، تحقیقاتی و آموزشی مورد استفاده قرار گیرد. به تمام این ویژگی‌ها قابلیت سفارشی‌سازی فرایند ساخت افزایشی برای ساخت ساختارهای یکپارچه با هندسه پیچیده را نیز می‌توان افزود که آن را به صنعت چند میلیارد دلاری تبدیل کرده است (۱و۲). در این مقاله به اختصار به روش‌های مختلف چاپ سه بعدی و مزایا و معایب هر روش پرداخته شده است. سپس کاربردهای فناوری چاپ سه بعدی از جنبه‌های مختلف مدل پزشکی بررسی شده است.

فناوری ساخت افزایشی

روش های ساخت افزایشی، مزایا و معایب

تکنیک‌های چاپ سه بعدی در دهه‌های گذشته از سال ۱۹۸۶ که اولین سیستم‌های لیتوگرافی سه‌بعدی (Stereolithography) در عمل معرفی شد، رشد کرده است. انجمن آزمایش و مواد آمریکا (American Society for Testing and Materials) روش‌های مختلفی برای چاپ سه بعدی بر اساس نوع مواد و اصول عملیاتی ارائه داده است. در جدول ۱ روش‌های چاپ سه بعدی، همراه با توضیح فرآیند هر روش و کاربرد آن در پزشکی آورده شده است. مقایسه بین تمام تکنیک‌های هفت گانه در همان جدول ارائه شده است که مزایا و معایب مربوط به همه فرآیندها را نشان می‌دهد. این اطلاعات عمومی به کاربران کمک می‌کند تا بسته به کاربرد مورد نیاز، فناوری مناسب را بهتر انتخاب کنند. گردآوری این اطلاعات محققین را قادر می‌سازد تا با برطرف کردن معایب این روش‌ها در جهت بهبود فناوری چاپ سه بعدی گام بردارند و یافته‌های جدید را به این فناوری بیفزایند. هر چند برخی از برنامه‌های کاربردی‌تر، مانند چاپ زیستی/ارگان، به زمان بیشتری برای تکامل نیاز دارند.

[Downloaded from rjms.iums.ac.ir on 2026-06-24]

[DOI: 10.47176/rjms.32.59]

جدول ۱- خلاصه‌ای از روش‌ها، کاربردهای پزشکی و مقایسه بین فناوری‌های چاپ سه بعدی (۱۴،۱۳،۲)

روش‌ها	فناوری‌ها	شرح فرآیند ساخت	کاربرد پزشکی	مزایا	معایب
فتوپلیمریزاسیون مخزنی (Vat Photo Polymerization)	- استریولیتوگرافی (SLA) (Stereolithography) - پردازش نور دیجیتال (DLP) (Digital Light Processing) - پردازش پیوسته نور دیجیتال (CDLP) (Continuous Digital Light Processing)	سکوی ساخت در مخزنی از فوتو پلیمر مایع قرار دارد. با حرکت سکوی ساخت به بالا و تابش لیزر، پلیمریزاسیون مدل لایه به لایه از رزین ساخته می‌شود.	- استخوان - پروتز ثابت و متحرک دندانی - ایمپلنت دندان - روکش موقت دندان - سمعک - چاپ زیستی داربست برای کشت سلولی - ساخت بافت نرم و سخت - ساخت اندام پیشرفته	- قابلیت ساخت قطعات بزرگ و پیچیده با SLA - کیفیت و وضوح بالا - پرداخت سطح مناسب - تنظیم چاپ انعطاف پذیر - مقیاس‌پذیری آسان - قابلیت استفاده مجدد از مواد فتوپلیمری خشک نشده از روش خود	- محدودیت استفاده از مواد - عدم استحکام و دوام (در تماس با گرما، نور و مواد شیمیایی) - پر هزینه - ساختار شکننده - زمان‌بر بودن زمان ساخت - ایجاد حساسیت و التهاب ناشی از تماس رزین با پوست و چشم - متاثر از پرتو فرابنفش پس از چاپ
اکستروژن مواد (Material Extrusion)	- مدل‌سازی رسوب ذوبی (FDM) (Fused Deposition Modeling) - ساخت فیلامنت ذوبی (FFF) (Fused Filament Fabrication)	در این روش از یک فیلامنت حاوی پلیمر ترموپلاستیک برای پرینت سه بعدی استفاده می‌شود. فیلامنت از طریق یک نازل کشیده می‌شود، در آنجا گرم می‌شود و به حالت نیمه مایع درآمده سپس لایه به لایه رسوب می‌کند.	- ابزار و وسایل پزشکی - نمونه‌سازی اسکلت بیرونی - چاپ زیستی داربست برای کشت سلولی - ساخت بافت نرم - ساخت اندام - ساخت مدل‌های آناتومی سخت و نرم برای برنامه‌های جراحی	- هزینه پایین - سرعت بالا - استفاده از طیف وسیع از مواد - آسان بودن فرآیند ساخت - خواص ساختاری و کیفیت خوب - دسترسی آسان - دوام نمونه در طول زمان	- وابستگی کیفیت ساخت به شعاع نازل - کیفیت سطحی پایین - ظاهر لایه لایه - خواص مکانیکی ضعیف - دارا بودن ساختار متخلل - نیاز به ساپورت در بعضی موارد - تنوع کم در پلیمر ترموپلاستیک

مواد مورد نیاز در روش‌های مختلف ساخت افزایشی

در فناوری‌های چاپ سه بعدی برای کاربردهای غیرزیستی از انواع فلزها، سرامیک، پلیمرها و کامپوزیت‌ها همراه با حلال‌های آلی در دماهای بالا یا عوامل مختلف استفاده می‌شود که بسیاری از آن ها با سلول‌های زنده و مواد زیستی سازگار نیستند. بنابراین، یکی از چالش‌های اصلی در زمینه چاپ سه بعدی زیستی که نیاز به تحقیقات بیشتر دارد انتخاب یک روش فرآیندی مناسب ساخت افزایشی با توجه به انتخاب موادی است که با خواص زیستی و فرایند چاپ سازگار باشد و توانایی فراهم کردن خواص مکانیکی و عملکردی مورد نیاز برای ساخت نمونه زیستی را همزمان با بهبود مدت زمان ساخت و پردازش پس از آن را داشته باشد.

پلیمرها اولین گروه مواد مورد استفاده در این فناوری بوده و امروزه نیز بخش بزرگی از مواد اولیه چاپگرهای سه بعدی را تشکیل می‌دهند. پلیمرها در روش‌های مختلف چاپ سه بعدی به شکل فیلامنت، پودر، مونومر و رزین استفاده می‌شوند. به منظور افزایش استحکام و تقویت پلیمرها، موادی مانند نانومواد فلزی و غیرفلزی، فیبر و حتی پلیمرهای هم‌خانواده دیگر به زمینه پلیمر اضافه می‌کنند تا کامپوزیت‌های تقویت شده تولید شوند. در کاربردهای پزشکی، از پلیمرهای پلی لاکتیک اسید، پلی اتیلن گلیکول دی اکریلات، پلی لاکتیک گلیکولیک اسید، پلی وینیل الکل، پلی اتر اتر کتون، پلی کاپرولاکتون، پلی کربنات، کیتوسان، پلی استایرن، نایلون و کامپوزیت‌های حاوی الیاف شیشه، نانوذرات کربن، گرافیت، سرامیک، نانواکسیدهای فلزی مانند تیتانیم دی اکسید، فلزات و نانوذرات فلزی مانند آهن،

[Downloaded from rjms.iums.ac.ir on 2026-06-24]

[DOI: 10.47176/rjms.32.59]

جدول ۱- خلاصه‌ای از روش‌ها، کاربردهای پزشکی و مقایسه بین فناوری‌های چاپ سه بعدی (۱۴،۱۳،۲)

روش‌ها	فناوری‌ها	شرح فرآیند ساخت	کاربرد پزشکی	مزایا	معایب
همجوشی بستر پودری (PBF) (Powder Bed Fusion)	- تفجوشی انتخابی با لیزر (SLS) (Selective Laser Sintering) - تفجوشی مستقیم فلزات با لیزر (DMLS) (Direct Metal Laser Sintering) - ذوب انتخابی با لیزر (SLM) (Selective Laser Melting) - ذوب پرتو الکترونی (EBM) (Electron Beam Melting) - تفجوشی انتخابی گرمایی (SHS) (Selective Heat Sintering)	در این روش یک لایه نازک از پودر، روی یک صفحه پخش و فشرده می‌شود. پودر در هر لایه توسط لیزر، اتصال دهنده یا گرما به هم متصل می‌شوند. این صفحات لایه لایه روی هم قرار می‌گیرند تا محصول سه بعدی نهایی ساخته شود.	- ایمپلنت فلزی - تثبیت کننده - چاپ زیستی داربست برای کشت سلولی - ساخت بافت و اندام های نرم پیشرفته - ساخت مدل های دندان - اسکلت صورت	- تنوع در مواد اولیه پودری - سهولت حذف مواد اضافی - استحکام بالا - وضوح زیاد - ساخت دستگاه‌های اداری کوچک - عدم نیاز به ساپورت - قابلیت ساخت ساختارهای پیچیده	- آهسته و زمان‌بر بودن فرآیند ساخت - هزینه بالا - تخلخل زیاد هنگام استفاده از اتصال دهنده - نیاز به پردازش به دلیل زبری دانه‌ها - وابستگی به اندازه ذرات پودر - محدودیت در اندازه نمونه ساخت - محدود به مواد پودری فلزی بودن در برخی روش‌ها
تزریق چسب (Binder Jetting)	- بستر پودری و سر جوهر افشان چاپ سه بعدی (PDIH) (Powder Bed and Inkjet Head 3D Printing) - چاپ سه بعدی مبتنی بر پلاستر (PP) (Plaster-Based 3D Printing)	فرآیند، از دو ماده پودر و یک اتصال دهنده مایع (چسب) استفاده می‌کند. بایندر معمولاً به صورت مایع و ماده ساخت به صورت پودر است. یک هد چاپ به صورت افقی در امتداد محورهای x و y ماشین حرکت می‌کند و لایه‌های متناوب مواد ساخت و چسب را رسوب می‌دهد.	- مدل‌های رنگی به ویژه مشخص کردن مولاژ آناتومی - ایمپلنت‌های فلزی - ساخت بافت‌های سخت	- تنوع در مواد اولیه - گستردگی استفاده از رنگ - سهولت حذف مواد اضافی - تنوع در ترکیب پودر و چسب در تامین خواص مکانیکی - سطح صاف - قابلیت کنترل دقت در ساخت	- آهسته و زمان‌بر بودن فرآیند ساخت - هزینه بالا - تخلخل بیشتر از روش PBF - نامناسب برای قطعات ساختاری - آسیب‌پذیر در برابر رطوبت و گرما - کاهش دوام با گذشت زمان
تزریق مواد یا پرینت جوهرافشان (Material Jetting or Inkjet Printing)	مدل‌سازی چند تزریقی (MJM) (Multi Jet Modelling)	یک سیستم تزریق فتوپلیمر است که کل نمونه سه بعدی را لایه لایه از طریق چند نازل می‌سازد. مبنای شیمیایی مانند روش فتوپلیمریزاسیون مخزنی است.	- مدل های پزشکی - قالبگیری دندان - راهنمای ایمپلنت‌های دندانی	- دقت بسیار زیاد - اتلاف کم مواد - پرداخت سطح خیلی بالا - ساخت الگوهای ریختگی - استفاده همزمان از چند ماده و رنگ در یک فرآیند ساخت	- آهسته و زمان‌بر بودن فرآیند ساخت - بخش‌های شکننده - خواص مکانیکی ضعیف - نیاز به ساپورت در فرآیند ساخت - محدودیت استفاده از مواد (پلیمر و موم) - سطح دانه‌دار و غیر صاف - نیاز به پردازش برای حذف رطوبت

مس، آلومینیم و تنگستن با استفاده از روش‌های فرآیندی مدل‌سازی رسوب ذوبی، استریولیتوگرافی و تفجوشی انتخابی با لیزر در ساخت ایمپلنت‌های گوش و بینی، کاسه مفصل ران (۱۶-۱۴)، پروتزها (۱۷) استفاده شده است. از هیدروژل‌های پلیمری نظیر پلی دی متیل سیلوکسان و سیلیکون در فرآیندهای جوهر

[Downloaded from rjms.iums.ac.ir on 2026-06-24]

[DOI: 10.47176/rjms.32.59]

جدول ۱- خلاصه‌ای از روش‌ها، کاربردهای پزشکی و مقایسه بین فناوری‌های چاپ سه بعدی (۱۴،۱۳،۲)

روش‌ها	فناوری‌ها	شرح فرآیند ساخت	کاربرد پزشکی	مزایا	معایب
توزیع مستقیم انرژی (DED) (Direct Energy Deposition)	توزیع فلز با لیزر (LMD) (Laser Metal Deposition)	برای ساخت آلیاژ ها استفاده می‌شوند. مواد اولیه ذوب شده و سپس رسوب کرده و به هم متصل می‌شوند. در این روش از پودر استفاده نمی‌شود و برای ذوب مواد اولیه به انرژی بالایی نیاز است.	در پزشکی محدود است. معمولا برای تعمیر و ساخت قطعات بسیار بزرگ استفاده می‌شود.	- هزینه پایین - دقت بالا - کیفیت بالا - کنترل زیاد بر دانه‌بندی ساختار - ساخت سریع - تراکم زیاد در ساختار - فرآیند مناسب در تعمیر قطعات	- محدودیت در مواد اولیه - کیفیت سطح پایین - انرژی زیاد برای ذوب مواد اولیه
ساخت ورقه‌ای (Sheet Lamination)	- ساخت چند لایه‌ای (LOM) (Laminated Object Manufacturing) - ادغام فراصوت (UC) (Ultrasonic Consolidation)	در این روش، مواد به صورت ورقه یا نوارهایی هستند که توسط لیزر، روش‌های مکانیکی و امواج فراصوت به هم متصل می‌گردند.	- سطوح استخوانی در مدل‌سازی ارتوپدی - مولاژ آناتومی بزرگ	- هزینه پایین - سرعت بالا - سهولت جابه جایی مواد	- وابسته بودن به نوع ورقه - نیاز به پردازش نهایی - کیفیت سطح پایین - دقت کمتر نسبت به روش‌های پودری - محدودیت در مواد اولیه

افشان و اکسترودژن برای ساخت بافت‌های زیستی، عروق بزرگ و مجاری تنفسی دو شاخه‌ای استفاده شده است (۱۹و۱۸).

پرمصرف‌ترین مواد فلزی فولاد ضد زنگ، تیتانیم (Ti) و آلیاژهای آن، منیزیم (Mg)، آلومینیم (Al) و آلیاژهای آن، استنلس استیل (SS)، آلیاژهای کروم-کبالت (Cr-Co) و آلیاژهای بر پایه نیکل (Ni) می‌باشد. استفاده از فلزات و آلیاژهای فلزی یاد شده با کاربردهای مختلف رو به افزایش است. مواد فلزی، به ویژه تیتانیم و آلیاژهای کروم- کبالت در پزشکی پرکاربردتر هستند و این به دلیل خواص مکانیکی آن ها، زیست سازگاری، هدایت حرارتی، مغناطیسی، الکتریکی و نیز مقاومت در برابر دمای بالای این ترکیبات است. با توجه به اینکه فلزات در مقایسه با پلیمرها و سایر مواد، قدرت جذب لیزر و پایداری در دماهای بالاتر دارند می‌توان گفت که این فناوری برای فلزات جدید است، از تکنیک‌های ذوب انتخابی با لیزر، توزیع مستقیم انرژی و همجوشی بستر پودری برای چاپ ایمپلنت‌های فلزی، پیچ، پلاک و صفحات شکسته‌بندی استفاده می‌شود (۲۱،۲۰،۲).

مواد سرامیکی ترکیبی از نمک‌های معدنی کلسیم و فسفات هستند که به دلیل رسانایی استخوانی برای کاربردهای استخوانی و دندانی، ساخت کاسه مفصل ران و پوشش دهنده‌ها استفاده می‌شوند. سرامیک‌ها به خودی خود بسیار شکننده هستند که عملکرد و کاشت آن ها را دشوار می‌کند. بنابراین، در ساخت زیستی، سرامیک‌ها با پلیمرها در فرآیندهای چاپ سه بعدی به صورت ترکیبی ساخته می‌شوند. سرامیک‌های چاپی متداول عبارتند از تری کلسیم فسفات، هیدروکسی آپاتیت، فسفات کلسیم دو فازی، پلی متیل متاکریلات و شیشه‌های زیستی سیلیکات و آلومینا (۲۳ و۲۲).

چاپ سه بعدی در برخی کاربردهای زیستی

با کاربرد چاپ سه بعدی در زمینه‌های مختلف زیست پزشکی تحولی شگرف رخ داده است. ساخت افزایشی در زیست پزشکی را می‌توان در چند دسته گسترده مهندسی بافت، تجهیزات پزشکی، داروسازی و دارورسانی، آرایشی- بهداشتی، تجهیزات حفاظت شخصی و دامپزشکی دسته‌بندی کرد. فناوری چاپگرهای سه بعدی با تولید بسیاری از دستگاه‌ها و

[Downloaded from rjms.iums.ac.ir on 2026-06-24]

[DOI: 10.47176/rjms.32.59]

تجهیزات مورد استفاده در پزشکی که ساخت آن ها با استفاده از روش‌های مرسوم بسیار سخت هستند تحولی بزرگ ایجاد کرده است. تعریف اصطلاح تجهیزات پزشکی گسترده است؛ از جراحی زیبایی صورت و جمجمه انسان گرفته تا پروتزها، ایمپلنت‌ها و اعضای بدن انسان و غیره را تجهیزات پزشکی گویند (۲۴). این فناوری برای بسیاری از تجهیزات پزشکی دیگر نظیر سمعک، لنزهای چشمی، گوشی پزشکی و عینک مخصوص طراحی شده برای افراد کم‌بینا، نیز کاربرد دارد (۲۵). در همه‌گیری اخیر کرونا (کووید-۱۹) فناوری چاپ سه بعدی به منظور غلبه بر مشکلات در زنجیره تامین جهانی امکانات مصرفی تنفسی، تجهیزات حفاظت فردی و سواب‌های نازوفارنکس کمک شایانی به بازار تجاری ارائه کردند که در مجموع ۲۲۱۳۵ نمونه توسط ۵۹ شرکت در ۱۸ بخش توسط ساخت افزایشی تولید شد (۲۶). ساخت بسیاری از تجهیزات پزشکی با چاپگر سه بعدی از بسیاری جهات مانند هزینه، ایمنی بیمار و کارایی دستگاه، بسیار ارزشمند است. تجهیزات پزشکی نقش مهمی در وضعیت و سرعت حرکت انسان به سمت نوآوری دارند. این فناوری، مسیر بزرگی را در تولید تجهیزات سفارشی و شخصی‌سازی شده در زمینه علوم پزشکی هموار کرده است و این امکان فراهم شده که ابزارهای درمانی که استفاده از آن ها دشوار است، توسعه یابند.

ایمپلنت‌ها

بدون شک، ساخت ایمپلنت‌های شبیه‌سازی شده زیستی با چاپگرهای سه بعدی بهترین جایگزین برای ایمپلنت‌های مرسوم در گذشته هستند که می‌توانند با دارا بودن ضریب کشسان، تراکم‌پذیری، آرایش شبکه و اندازه منافذ همسان با استخوان طبیعی به دلیل ماهیت قابل تنظیم و ساخت با ویژگی بیمار و برتری فنی تکنیک پردازش در نمونه تولید شده به صورت گسترده در درمان‌های بالینی استفاده شوند. استفاده از فناوری چاپ سه بعدی می‌تواند به طور مستقیم یا غیرمستقیم برای ساخت ایمپلنت مورد استفاده قرار گیرد. در روش غیرمستقیم، ابتدا قالب ریخته‌گری توسط چاپ سه بعدی ساخته می‌شود و سپس ایمپلنت‌ها با فرآیند ریخته‌گری سنتی تولید می‌شوند. این حالت بیشتر برای تولید انبوه محصولات استفاده می‌شود. در روش مستقیم ایمپلنت به صورت سفارشی متناسب با آناتومی خواسته شده تهیه می‌گردد. به لطف این فناوری، امکان ساخت دقیق یک قسمت از بدن بیمار به صورت زیست‌سازگار فراهم شده است. با تصویربرداری دقیق قبل از جراحی، اطلاعات آناتومی بیمار به دست آمده و یک مدل دیجیتال ایجاد می‌شود که می‌تواند از عوارض و اشتباهاتی که ممکن است در قرار دادن ایمپلنت رخ دهد جلوگیری کند. علاوه بر این، ایمپلنت‌های تولید شده به طور خاص بر اساس آناتومی یک بیمار شانس موفقیت را افزایش می‌دهد. همچنین بسته به فاکتورهای بازسازی و رشد سلول‌ها می‌تواند از بافت حمایت کند. ایمپلنت‌های تولید شده با ساخت افزایشی دارای استحکام و مقاومت زیاد در برابر خوردگی هستند (۲۸و۲۷).

در درمان بالینی، ایمپلنت یکی از روش‌های درمان سیستم عضلانی اسکلتی است که می‌تواند جایگزین مفصل، استخوان، غضروف یا سیستم اسکلتی- عضلانی به طور کامل یا جزئی شود. ایمپلنت‌های سنتی در حال جایگزین شدن با ایمپلنت‌های چاپ شده هستند. در حال حاضر، برخی از ایمپلنت‌های چاپ سه بعدی به صورت تجاری به بازار عرضه شده‌اند که عبارتند از: مفصل زانو، جوش خوردگی نخاع کمری، پیچ و کیج‌هایی (Cages) برای ثابت نگه داشتن ستون فقرات، بافت منیسک (بافت درون مفصل زانو)، ستون فقرات، مفصل ران، براکت مفصل زانو و غیره (۱۲).

در ادامه به برخی از ایمپلنت‌های ساخته شده با ساخت افزایشی پرداخته شده است.

تثبیت کننده‌های استخوانی: متداول‌ترین وسایل مورد استفاده برای بی‌حرکت کردن بخش استخوانی که دچار شکستگی شده است صفحات استخوانی، پیچ، میخ، میله و سیم هستند. استفاده بالینی از صفحه استخوانی چاپ شده به روش ذوب انتخابی با لیزر از جنس آلیاژ Ti-6Al-4V برای اصلاح ناهنجاری‌های هالوکس والگوس (Hallux valgus) در سال ۲۰۱۶

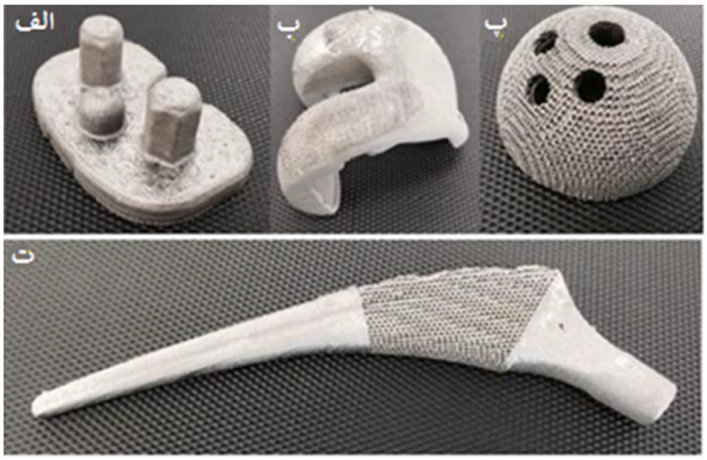
[Downloaded from rjms.iums.ac.ir on 2026-06-24]

[DOI: 10.47176/rjms.32.59]

انجام شده است که به نوع جراحی مورد استفاده مانند استئوتومی بستگی دارد (۲۹). پیچ‌های قابل جذب زیستی استخوانی که یکی از وسایل نگهدارنده مهم ارتوپدی می‌باشند مستعد شکستگی هستند. از این رو با استفاده از ساخت افزایشی، پیچ‌های استخوانی فلزی به روش ذوب انتخابی با لیزر از جنس Ti-6Al-4V تولید و برای امکان سنجی بالینی در خرگوش کاشته شده است. برای اصلاح خواص زیستی پیچ‌ها از کلسیم فسفات استفاده گردید (۳۰). یک ساخت سفارشی دیگر برای استخوان ترابکولار (Trabecular) از جنس Ti-6Al-4V و میله‌های اتصال با استفاده از روش ذوب پرتو الکترونی چاپ شده و برای درمان مراحل اولیه مرگ استخوان (Osteonecrosis) سر استخوان ران (Femoral Head) مورد استفاده قرار گرفته است (۳۱). ساخت سفارشی در آسیب‌های استخوانی بسیار نادر و تنها به کمک ساخت افزایشی امکان‌پذیر است.

ایمپلنت لگن و زانو: تحمل وزن بدن انسان بر مفاصل لگن، زانو و مچ پا است. یکی از دلایل اصلی جراحی تعویض مفصل زانو یا مفصل ران این است که تحرک بیمار بهبود یابد؛ با این حال، همیشه این جراحی‌ها کیفیت زندگی را بهبود نمی‌بخشند و نیاز به جراحی‌های بیشتر به ویژه در بیماران جوان محتمل است. مطالعات زیادی نشان داده است که ایمپلنت‌های سفارشی در بیمار می‌توانند بر بسیاری از چالش‌ها در ایمپلنت‌های سنتی لگن و زانو غلبه کنند. به عنوان مثال، در یک مطالعه در سال ۲۰۱۲، ایمپلنت‌های لگنی متخلخل، یکپارچه و سفارشی با قابلیت رشد استخوانی از آلیاژهای Ti-6Al-4V و Co-29Cr-6Mo با استفاده از ذوب پرتو الکترونی چاپ شده است (۳۲). در مطالعه دیگری در سال ۲۰۱۹، تنه استخوان ران تیتانیم با چاپ سه بعدی با استفاده از روش ذوب انتخابی با لیزر تولید گردیده که با توزیع چگالی نسبی مناسب منجر به بهینه شدن خواص مکانیکی استخوان چاپ شده (استحکام کششی متناسب با استخوان) و پدیده سپر تنشی (Stress Shielding) را کاهش داده است (۳۳). تعدادی از ایمپلنت‌های لگن و ران ساخته شده توسط چاپ سه بعدی در شکل ۱ نشان داده شده است. امروزه چاپ و تولید ایمپلنت‌های لگن و ران سفارشی با خواص مکانیکی بهینه شده و ساخت یک پارچه این قطعات، نیاز بیمار به تکرار جراحی را کاهش داده و تحرک بیشتر بیمار را در مقایسه با عمل سنتی بهبود بخشیده است. مورفولوژی سلول‌های استخوانی نشان داد که ایمپلنت‌های چاپ سه بعدی به خوبی با بافت رابط انسان رشد کرده و در تقویت استخوان مفید هستند (۳۴).

ایمپلنت استخوان جناغ: ترمیم جناغ (Sternum) اغلب پس از جراحی قلب باز انجام می‌شود و البته جایگزینی کل جناغ یک جراحی غیرمعمول است و از



شکل ۱- (الف) تری تیبیا (Tibial Tray) (ب) استخوان فمورال ران (Femoral Component) (پ) کاپ استابولار (Acetabular Cup) (ت) تنه ران (Hip Stem) ساخته شده به روش SLM(۳۴)

[Downloaded from rjms.iums.ac.ir on 2026-06-24]

[DOI: 10.47176/rjms.32.59]

نظر بالینی پروتکل ساده‌ای ندارد (۳۵). یکی از اولین مطالعات موردی گزارش شده در مورد جراحی تعویض جناغ با استفاده از ساخت افزایشی در سال ۲۰۱۳ در یک بیمار زن مبتلا به سرطان سینه با متاستاز گسترش یافته بود که جناغ سینه تیتانیومی چاپ شده به روش تفجوشی انتخابی با لیزر دریافت کرد. در سال ۲۰۱۶ در مطالعه مشابهی، یک نیمه از جناغ سینه با سه دنده متصل به مفاصل کوستواسترنال توسط فناوری ساخت افزایشی چاپ شده و در بیمار کاشته شد؛ حرکات این قطعه چاپ شده بسیار طبیعی بود (۳۶). در سال ۲۰۱۸ نیز جناغ تیتانیومی با چاپ سه بعدی در یک بیمار زن ۷۰ ساله دارای تومور استرنوم کاشته شد. یکی از خطرات مربوط به جراحی در این ناحیه دررفتگی یا جابه جایی است. در این جراحی با راهنمای چاپ سه بعدی در برنامه ریزی پیش از عمل تعداد دنده‌ها و مکان دقیق کاشت مشخص شد. این مطالعه چشم انداز جدیدی در بازسازی دیواره قفسه سینه ناشی از آسیب‌های ضربه‌ای (Traumatic) نشان داد (۳۷).

ایمپلنت ستون فقرات: کاشت ستون فقرات یک بازار میلیارد دلاری به خود اختصاص داده است که شرکت‌های بزرگی مانند Renishaw انگلستان و Medtronic آمریکا در آن نقش دارند. ساخت افزایشی به دلیل کاهش هزینه و اختصاصی بودن قطعه برای بیمار، مهم ترین روش تولید است. ناهنجاری‌های مادرزادی و ضربه‌ای نظیر بیماری آرتروز دیسک، فتق دیسک، اسپوندیلولیستزیس (Spondylolisthesis)، تنگی مجرا ستون فقرات و پوکی استخوان می‌تواند منجر به کاشت ستون فقرات برای اصلاح بین مهره‌های بیمار شود (۹). در این زمینه‌ها می‌توان از چاپ سه بعدی برای برنامه‌ریزی پیش از جراحی، راهنماهای پیچ‌گذاری، راهنماهای استئوتومی، ترمیم تومور، ساخت بافت زیستی استفاده کرد. یکی از کاربردهای گزارش شده چاپ سه بعدی در کاشت ستون فقرات در دختری ۱۴ ساله مبتلا به همانژیوم کبدی (Hemangioendothelioma) بود. بیمار یک مهره T9 سفارشی از Ti-۶Al-۴V دریافت کرد. بیمار هیچ عارضه‌ای نداشته و در پیگیری شش ماهه، یکپارچگی استخوان نشان داده شده است (۳۸). در مطالعه‌ای در سال ۲۰۱۶ یک پسر بچه ۱۲ ساله با سارکوم یووینگ C2 (Ewing Sarcoma)، یک مهره مصنوعی تثبیت کننده C2 با بال‌های شخصی‌سازی شده از جنس آلیاژ تیتانیم چاپ شده به روش ذوب پرتو الکترونی دریافت کرد. در پیگیری‌های بعد از جراحی، بهبود عملکرد عصبی بیمار همراه با بهبود استئواینتگراسیون (Osteointegration) (فرآیند زیست‌سازگاری ایمپلنت با بافت استخوان) گزارش شده است (۳۹). مطالعه بالینی دیگری از ایمپلنت ستون فقرات با چاپ سه بعدی در سال ۲۰۱۹، در یک بیمار مرد ۳۴ ساله با اسپوندیلوز ناشی از ناهنجاری مادرزادی در L5/S1 با جوش خوردگی تنه‌ای قدامی مهره کمری (Anterior lumbar interbody fusion (ALIF) یک ایمپلنت چاپ شده از Ti-۶Al-۴V را دریافت کرده است. طراحی این ایمپلنت باعث شد که کاشت آن آسان باشد و بنا به گزارش، بیمار در هنگام و پس از عمل جراحی از درد شکایت نداشته و کاهش درد رادیکولوپاتی (درد ناشی از ریشه عصب) و استئواینتگراسیون اولیه را به همراه داشته است (۴۰).

ایمپلنت فک پایین: ایمپلنت فک پایین به طور گسترده برای بازسازی فک ناشی از بیماری‌هایی مانند مرگ استخوان، التهاب، سرطان و تصادف کاربرد دارد. علاوه بر این، بزرگ کردن فک پایین یک جراحی زیبایی پر مشتری است که تقاضا برای کاشت فک پایین را افزایش می‌دهد. فک پایین دارای عملکردهای فیزیولوژیکی در رشد جمجمه و صورت، جویدن، تنفس و رفع اشتها است. در عمل بالینی سنتی، بازسازی با استفاده از پیوندهای استخوانی به دست آمده از استخوان درشت‌نی، دنده و تاج ایلیاک انجام می‌شود که تناسب زیبایی کاملی را به همراه نداشته است (۹). فناوری چاپ سه بعدی یک راه حل عالی برای ساخت یک ایمپلنت باربر با تناسب زیبایی خوب است که رضایت بیمار پس از کاشت فک پایین چاپ شده سه بعدی به طور قابل توجهی بالاتر از ایمپلنت‌های کاشته شده در مقایسه با روش‌های معمولی مانند صفحات

[Downloaded from rjms.iums.ac.ir on 2026-06-24]

[DOI: 10.47176/rjms.32.59]

بازسازی تیتانیمی و پیوند اتولوگ (Autologous) است. علاوه بر این، توسط ایمپلنت‌های فک پایین ساخت افزایشی، تقارن صورت ترمیم می‌شود و حداکثر باز شدن دهان و فرآیند اکلوزال در مقایسه با روش‌های معمولی بهبود یافته است. در مطالعه‌ای که بر روی چهار بیمار مبتلا به آملوبلاستوما (Ameloblastoma) انجام شده، ایمپلنت فک پایین تیتانیمی چاپ شده به روش ذوب پرتو الکترونی در این بیماران استفاده شده است. میانگین مدت زمان عمل ۱۳۰ دقیقه و حداکثر باز شدن دهان از ۲۵ تا ۴۰ میلی‌متر گزارش شده است. با در نظر گرفتن معیارهایی مانند گفتار، درد جویدن، مشکل در خوردن، فرآیند اکلوزال، بلع و توانبخشی دندان پس از جراحی، همه بیماران اعلام رضایت داشته‌اند (۴۱). در مطالعه موردی دیگری، یک مرد بیمار ۵۳ ساله مبتلا به استئورادیونکروز (Osteoradionecrosis) یک ایمپلنت فک پایین تیتانیمی چاپ شده به روش ذوب انتخابی با لیزر دریافت کرده است (۴۲).

ایمپلنت جمجمه: یکی از انواع ایمپلنت‌هایی که با ساخت افزایشی می‌توان با موفقیت تولید کرد، ایمپلنت جمجمه است. بیماران در نتیجه تصادف یا جراحت به دلیل آسیب به جمجمه خود به ایمپلنت جمجمه نیاز دارند. دلیل استفاده این ایمپلنت‌ها محافظت از مغز در برابر آسیب‌های احتمالی، بهبود ظاهر جمجمه و حمایت روانی از بیمار است. ایمپلنت‌های جمجمه با آناتومی خاص جمجمه هر بیمار و با استفاده از مواد زیست‌سازگار توسط چاپگر سه بعدی ساخته می‌شوند. این فناوری معجزه‌آسا در تولید ایمپلنت‌هایی با دارا بودن خواص مکانیکی خوب برای هر فرد بیمار مورد توجه قرار گرفته است (۴۳). نمونه‌های موفق‌آمیز بسیاری از ایمپلنت جمجمه با چاپگرهای سه بعدی در دنیا تولید شده است. یکی از این نمونه‌ها تولید ایمپلنت برای فردی به نام یاشار آقایف (Yasar Agayev) از ارتش آذربایجان است که در آوریل ۲۰۱۶ از ناحیه سر مورد اصابت گلوله قرار گرفته است. این فرد که نیمی از جمجمه خود را از دست داده بود نمی‌توانست صحبت کند و نمی‌توانست سمت چپ خود را حرکت دهد. مرکز طراحی و تولید پزشکی METÛM، پس از مطالعاتی، ایمپلنت جمجمه‌ای که توسط چاپگر سه بعدی ساخته شد را برای وی جایگزین کرد. به لطف این ایمپلنت ساخته شده توسط فناوری چاپ سه بعدی، آسیب به جمجمه بیمار تا حد زیادی حذف شد. METÛM و سایر سازمان‌ها در کشورهای مختلف به لطف این فناوری به خلق معجزه ادامه می‌دهند (۴۴).

استنت عروقی: از ایمپلنت‌های چاپ سه بعدی در درمان بیماری‌های قلبی- عروقی استفاده شده است. استنت عروقی یک ساختار مکانیکی است که در داخل یک سرخرگ کرونر قرار می‌گیرد تا کانالی برای جریان بی‌وقفه خون ایجاد کند. از روش‌های استریولیتوگرافی، تفجوشی انتخابی با لیزر و مدل‌سازی رسوب ذوبی در ساخت افزایشی ایمپلنت‌های استنت کرونری استفاده شده است. برای ساخت استنت از آلیاژ Co-Cr، با خواص مکانیکی رضایت‌بخش و نیتینول (آلیاژی با ترکیب درصدهای وزنی مختلف تیتانیم و نیکل) با خاصیت شبه کشسانی بسیار مناسب، استفاده شده است. استنت چاپ شده سه بعدی نیتینول در دمای بدن انسان برای انبساط خود دچار تغییر فاز می‌شود؛ این ویژگی آن را تبدیل به یک ماده زیستی هوشمند کرده و در ساخت ایمپلنت‌ها بسیار مورد استفاده قرار گرفته است (۴۵،۹).

استفاده از چاپ سه بعدی برای ساخت ایمپلنت مزایایی مانند: چرخه کوتاه، هزینه کم، سفارشی‌سازی، ساخت دقیق ساختار متخلخل بیونیک، جذب سلول‌های استخوانی انسان، ارتقای یکپارچگی استخوان ایمپلنت‌ها و جلوگیری از خطر افتادگی پوشش سطحی را به همراه دارد (۱۲).

پروتزها

پروتز همان اعضای مصنوعی بدن یا اندام ساختگی می‌باشد که در واقع نوعی جراحی زیبایی کاربردی است که برای اندام از دست رفته مورد استفاده قرار می‌گیرد. هر فردی ممکن است به دلایلی مادرزادی یا در اثر اتفاقات گوناگون قطع عضو را تجربه کند و نیاز

[Downloaded from rjms.iums.ac.ir on 2026-06-24]

[DOI: 10.47176/rjms.32.59]

به جایگزینی اندام از دست رفته داشته باشد. یک پروتز خوب امکان عملکرد مشابه و طبیعی را به شکل قبل از قطع عضو می‌تواند فراهم کند. امروزه انواع متعددی از پروتزها مورد استفاده قرار می‌گیرند که از سه بخش اصلی رابط، اجزا و پوشش تشکیل می‌شوند. برای تهیه اندام مصنوعی هیچ روش استانداردی وجود ندارد و بدن هر کدام از بیماران در مقابل آن واکنش خاص و متفاوت را نشان می‌دهد، بنابراین ساخت پروتز برای هر بیمار اختلافات و تفاوت هایی را شامل می‌شود.

عموماً پروتزها به روش‌های سنتی مانند روش‌های ریخته‌گری تولید می‌شوند. امروزه از فناوری چاپ سه بعدی نیز برای ساخت پروتز استفاده می‌شود که نتایج موفقیت آمیزی کسب کرده است. در چاپ سه بعدی، فرصت برای نمونه‌سازی سریع تعدادی از طرح‌های مورد نظر در مدت زمان کوتاهی با حداقل هزینه فراهم می‌گردد. پروتزهایی که با چاپگر سه بعدی ساخته می‌شوند، دارای خواص مکانیکی و فیزیکی مطلوب هستند و در مدت زمان کوتاهی بیمار کاملاً با آن سازگار می‌شود. با توجه به آناتومی بیمار و خواص مکانیکی نزدیک به اصل اندام‌ها، پروتزهایی برای گوش، بینی، دندان، استخوان، دست و پا تولید شده است. علاوه بر این، با استفاده از چاپگرهای چند ماده‌ای، این امکان وجود دارد که بر اساس رنگدانه های پوست فرد بیمار، تنظیم رنگ در پروتز انجام شود تا بسیار طبیعی به نظر برسد و باعث ایجاد ظاهری متناسب گردد. برای تولید پروتزها به روش ساخت افزایشی می‌توان با توجه به نیاز بیمار، جنسیت، سن، شغل، فعالیت بیمار و علت قطع عضو خواص فیزیکی و مکانیکی، وزن و اندازه پروتز را تغییر داد. با پیشرفت فناوری پروتزهایی با کیفیت بالا و سفارشی ساخته می‌شوند که کارایی بسیار زیادی دارند. یکی از نکات قابل توجه در ساخت پروتز استفاده از مواد به کار برده شده سبک و مقاوم است تا فرد احساس وزن بیشتری را روی بدن خود نداشته باشد؛ و با سلول‌ها و بافت‌های بدن سازگار باشند تا حساسیت و عفونت ایجاد نکنند. پروتزها می‌توانند هزینه‌های کلی پزشکی را پایین بیاورند.

مطالعه‌ای با هدف ساخت پروتز استخوان ناوی مچ دست (Scaphoid) با استفاده از چاپگر سه بعدی انجام شده است. مدل با استفاده از روش ساخت فیلامنت ذوبی و ماده زیستی پلی اتر اتر کتون ساخته شده است. این روش خطر شل شدن پروتز ناشی از خوردگی ذرات را کاهش داده و در عین حال محدودیت استفاده از پروتزهای فلزی را از بین برده است. به عنوان یک محصول سفارشی‌ساز، این مدل توجهات زیادی را به خود جلب کرده است. مقایسه بین پلیمرهای زیستی و استانداردهای پزشکی و صنعتی نشان داده که این مدل پروتز دارای یکپارچگی بهینه شده است و تولید کارآمد ماده پلی اتر اتر کتون را نشان داده است (۴۶).

ساخت یک پروتز گوش بر اساس فناوری چاپ سه بعدی توسط آنکوسکی و همکاران گزارش شد (۴۷). مراحل ساخت پروتز به سه قسمت متفاوت تقسیم شده است. بیمار با استفاده از سیستم فتوگرامتری سه بعدی اسکن (شکل ۲-الف) شده و طراحی نرم افزاری انجام شده است. پروتز سیلیکونی گوش با توجه به اسکن انجام شده، چاپ و پردازش تطبیق رنگ و رنگ آمیزی خارجی مطابق با رنگ پوست بیمار برای طبیعی‌تر شدن پروتز انجام شده است(شکل ۲-ب) و

(الف) (ب) (پ)

شکل ۲- پروتز گوش از طریق چاپ افزایشی؛ (الف) گوش معیوب اسکن شده (ب) پروتز چاپ شده، (پ) استفاده از پروتز در بیمار (۴۷)

[Downloaded from rjms.iums.ac.ir on 2026-06-24]

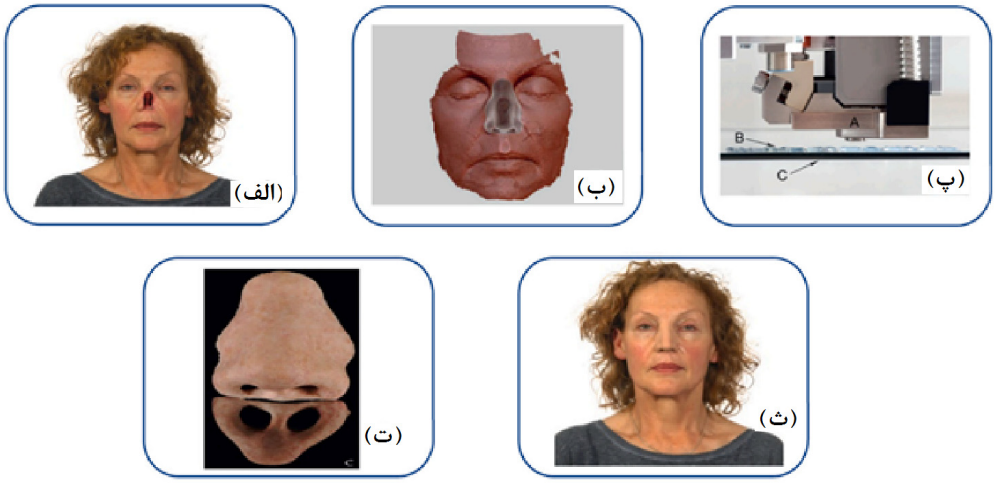
[DOI: 10.47176/rjms.32.59]

سپس پروتز به صورت بیمار متصل شده است (شکل ۲-پ). ساخت افزایشی این پروتز، منجر به کاهش و تسهیل مراحل ساخت، کاهش مدت زمان صرف شده برای ساخت و حذف مرحله قالب‌گیری بوده است (۴۷).

آنکوسکی و همکاران (۴۸)، موفقیت بازسازی نقص بینی را از طریق پروتز سیلیکونی چاپ شده سه بعدی گزارش کرده‌اند. در ابتدا، یک بیمار زن چهل ساله (شکل ۳-الف) با دو سیستم اسکن، اسکن شده و یک سیستم فتوگرامتری سه بعدی برای اندازه‌گیری نسبت بینی به کل صورت و یک اسکنر نوری اسپایدر (Artec Spider) سه بعدی برای به تصویر کشیدن ساختار آناتومیک بریدگی و نقص بینی استفاده شده است. سپس مدل نرم افزاری دیجیتال فایل با فرمت STL طراحی (شکل ۳-ب) و در یک چاپگر سه بعدی با اکستروژن مواد (شکل ۳-پ) چاپ شده است. در این چاپ از پلیمریزاسیون افزایشی کاتالیز شده با پلاتین جوهر سیلیکون G531 RTV مایع زیستی استفاده شد و رنگ مناسب برای ایجاد حس طبیعی‌تر پروتز استفاده شده است (شکل ۳-ت). در نهایت با استفاده از چسب پوستی به بیمار متصل گردیده است (شکل ۳-ث). از لحاظ بالینی این پروتز بسیار قابل قبول بوده و قابلیت اطمینان و دقت فرآیند دیجیتال را نشان داده است.

مطالعه بالینی ساخت پروتز بینی انعطاف‌پذیر به روش چاپ سه بعدی در ادغام با فرآیند دیجیتال برای یک بیمار ۲۷ ساله که از یک حادثه رانندگی رنج می‌برده توسط نصیر و همکاران (۴۹) انجام شده است. در این پژوهش گردش کار با روش سنتی موجود مقایسه گردیده و داده‌های سی‌تی‌اسکن برای انجام طراحی فایل نرم‌افزار ارائه شده است. سپس فایل به یک چاپگر سه بعدی با استفاده از سیلیکون مایع زیستی دارای رنگ مناسب، ارسال و چاپ گردیده است. در انتها برای اتصال به بیمار از چسب مناسب استفاده شده است. کل زمان صرف شده گردش کار چاپ پروتز بینی حدود ۳۱۰ دقیقه گزارش شده که ۳۸ درصد، زمان کمتری نسبت به گردش کار ساخت پروتز معمولی است. این تحقیق بالینی یک روش سه بعدی را برای طراحی و تولید یک بینی مصنوعی زیبا ارائه کرد. چنین روشی می‌تواند تکرارپذیری و مقبولیت به همراه داشته و در زیبایی چهره نیز بسیار موثر باشد.

برخی محدودیت‌ها در مورد ساخت پروتز با فناوری ساخت افزایشی وجود دارد. یکی از آن ها این است که پروتز بافت سخت‌تری نسبت به اندام اصلی دارد و قابل تنظیم نیز نیست. پروتزها همراه با بزرگ شدن یا رشد بیمار، رشد نمی‌کنند و پس از مدتی پروتز برای بیمار



شکل ۳- ترمیم نقص بینی با استفاده از پروتز سیلیکونی چاپ شده به روش ساخت افزایشی؛ (الف) بیمار (ب) مدل پروتز CAD (پ) پرینت سه بعدی مستقیم پروتز (ت) پروتز چاپ شده سه بعدی (ث) بیمار با پروتز (۴۸).

[Downloaded from rjms.iums.ac.ir on 2026-06-24]

[DOI: 10.47176/rjms.32.59]

مناسب نیست. مشکل دیگر وزن پروتزها است. به خصوص پروتزهای پیچیده، سنگین هستند. وزن ممکن است در کوتاه مدت چندان مهم به نظر نرسد، اما استفاده از پروتز در هنگام انجام فعالیت‌های روزانه دشوار است. انتظار می‌رود که در آینده‌ای نه چندان دور این محدودیت‌ها حذف شده و پتانسیل استفاده از این فناوری در ساخت پروتزها افزایش یابد (۲).

تجهیزات توانبخشی (ارتز)

در پزشکی، ارتز به وسیله‌ای اطلاق می‌شود که به عملکرد اندام یا عضو کمک می‌کند. در برخی موارد استفاده از ارتز سبب بهبود عملکرد یا کاهش درد شده از پیشرفت بدشکلی در اندام جلوگیری می‌کند. این وسیله با اعمال فشار یا برداشتن فشار به اهداف درمانی خود می‌رسد. ارتزها همچنین به عنوان یک کمک وسیله پزشکی خارجی با هدف اصلاح ویژگی‌های عملکردی و ساختاری سیستم عصبی-عضلانی و سیستم اسکلتی بر روی بدن یا اندام قرار می‌گیرند.

استفاده از ارتزها گسترده است و ذکر تمامی آن کاری سخت و طولانی است. ارتزها شامل انواع بریس، آتل‌های (Spilent) اندام فوقانی (ارتز دور کننده شانه، ارتز آرنج، ارتز انگشت، ارتز دست و مچ دست)، آتل‌های لندام های تحتانی (ارتز زانو، ارتز مچ پا، ارتز زانو)، کفی طبی، کفش طبی، ارتز تنه وگردنبندهای طبی می‌باشند. تعدادی از این ارتزها با فناوری چاپ سه بعدی ساخته شده‌اند. در این تولید ویژگی‌هایی مانند سبکی وزن و رضایتمندی سفارشی‌سازی مشتری اهمیت دارد. برای ساخت قطعات ارتز از مواد نایلونی استفاده گردیده است. همانطور که در شکل (۴-الف) نشان داده شده است، یک ارتز پا چاپ سه بعدی با فرآیند یکپارچه به روش تفجوشی انتخابی با لیزر ساخته شده است. این ارتز دارای یک ساختار یکپارچه شامل حفره‌های زیاد در بدنه اصلی است و ساختار هندسی خاصی دارد. بخش حلقوی تقریباً کل سطح پا را پوشش می‌دهد تا از تعریق زیاد جلوگیری کند. بخش‌های زیرین آن از مواد سفت و سخت با فرآیند پاشش چند ماده‌ای از طریق چاپ سه بعدی ساخته شده است. بنابراین، این ارتز دارای ویژگی وزن سبک و تهویه خوب است (۵۰). نمونه‌های دیگری از ارتزهای پرینت سه بعدی با مواد دیگری مانند پلی اتر اتر کتون و سایر پلاستیک‌های مهندسی از روش مدل‌سازی رسوب ذوبی ساخته شده‌اند که در شکل (۴-ب) نشان داده شده است (۵۱). این ارتزها پشتیبانی و ثبات بهتری در روند توانبخشی ایجاد کرده و اثرات جانبی بر زانو را با طراحی بیومکانیکی کاهش داده‌اند.

نتیجه‌گیری

فناوری چاپ سه بعدی می‌تواند تولید قطعات

شکل ٤- (الف) ساخت ارتز یکپارچه پا از مواد نایلونی (ب) ساخت ارتز پا از از ABS، PEEK از طریق فناوری چاپ سه بعدی (۵۰،۱۳)

[Downloaded from rjms.iums.ac.ir on 2026-06-24]

[DOI: 10.47176/rjms.32.59]

پیچیده ای را فراهم کند که تولید آن ها با روش‌های سنتی و معمول دشوار است. روش‌هایی که می‌توان با کمک آن ها نمونه‌ها را آسان‌تر و سریع‌تر با هزینه کمتر تولید کرد. آزادی عمل در طراحی، شخصی‌سازی نمونه، توانایی چاپ ساختارهای پیچیده، حداقل هدر رفت ماده، استفاده از مواد زیست‌سازگار از مزایای اصلی چاپ سه بعدی است. صرفنظر از لزوم اعمال و تنظیم قوانین و مقررات جدید در مورد استفاده از چاپ سه بعدی، به دلیل مزایا و کاربردهای گسترده این فناوری در همه علوم به ویژه در زمینه زیست‌پزشکی بسیار مورد توجه هستند.

امید می رود با تکنیک‌های مختلف ساخت افزایشی و ساخت نمونه‌های اولیه در کاربردهای جراحی با استفاده از مدل‌های زیستی یا نمونه‌ها، مدل‌سازی و تصویربرداری برای درک بهتر بیماری‌ها، دقت عمل جراحی افزایش یافته و مسیرهای بهتری برای اعمال این فرآیندها هموار گردد. به کمک این فناوری در دانشکده‌های پزشکی به آموزش پزشکان آینده پرداخته خواهد شد تا تصور بهتری از بدن انسان داشته باشند. این مدل‌های فیزیکی سه بعدی توسط پزشکان برای آموزش بیمار و خانواده‌های آن ها نیز استفاده خواهند شد تا دانش بیماران و خانواده‌ها پس از مشاهده مدل افزایش یابد. در حال حاضر از چاپ سه بعدی در زمینه‌های کلینیکی، بهبود دارو و مراقبت‌های بهداشتی مناسب، در دسترس و شخصی‌ساز استفاده می‌شود و در حالت توسعه یافته‌تر در آینده مورد استفاده قرار خواهد گرفت. ساخت دستگاه‌های پزشکی، کاربردهای ایمپلنت و پروتز خاص هر بیمار در اندازه‌ها و رنگ‌های دلخواه مدل‌سازی شده بر اساس آناتومی بیمار، کاربردهای صنعت داروسازی و چاپ زیستی اندام که اکنون برخی در مرحله آزمایشی هستند به لطف این فناوری به مرحله تکاملی و استفاده گسترده خواهند رسید. با چاپ سه بعدی امکان مدل‌سازی، تشخیص و نظارت بر سرطان که یکی از مشکلات سلامت عصر ما است وجود دارد و در حال پیشرفت است.

اگر چه استفاده و کاربرد این فناوری رو به رشد در علوم پزشکی و علوم وابسته به آن، هنوز نیاز به تحقیقات بیشتری دارد اما در آینده نزدیک، یک نوآوری انقلابی در حوزه پزشکی با ساخت افزایشی رخ خواهد داد. واضح است که این پیشرفت‌ها به همراه بهبود کیفیت زندگی برای جامعه بسیار مفید خواهد بود، جان بسیاری از بیماران مبتلا به نقایص مادرزادی تا مبتلا به سرطان نجات یافته و امید به زندگی افزایش خواهد یافت؛ بیماران با کیفیت زندگی بالا و عمر طولانی‌تر با اختراعات چاپ سه بعدی به حیات خود ادامه خواهند داد. در نهایت، بیماری‌ها کمتر و درمان و بازسازی سریع‌تر وجود خواهد داشت.

ملاحظات اخلاقی

این مقاله مروری بوده و محققان تنها به گردآوری، تدوین و تحلیل داده‌های منتشر شده در مقالات قبلی پرداخته‌اند. به همین دلیل نیازی به دریافت کد اخلاق وجود نداشته است.

مشارکت نویسندگان

تمام نویسندگان در مراحل مختلف تحقیق به طور فعال مشارکت داشته‌اند.

References

1. Norman J, Madurawe RD, Moore CMV, Khan MA, Khairuzzaman A. A new chapter in pharmaceutical manufacturing: 3d-printed drug products. Adv. Drug Deliv. Rev. 2017;108:39–50.
2. Bozkurt Y, Karayel E. 3D printing technology; methods, biomedical applications, future opportunities and trends. J Mat Res Tech. 2021;14:1430-1450.
3. Boshra M, Godbout J, Perry JJ, Pan, A. 3D printing in critical care: a narrative review. 3D Print. Med. 2020;6(28):1-11.
4. Francis V, Ukey P, Nayak A, Taufik, M, Jain, PK, Mankar SH, Srivastava, et al. Influence of 3D Printing Technology on Biomedical Applications: A Study on Surgical Planning, Procedures and Training. Adv Mate Proces. 2020;269–278.
5. Shamsabadi R, Zoljalali Moghaddam SH, Baghani HR, Mahdavi SR, A review of 3Dprinting technology and its applications in surgery. Razi J Med Sci. 2021;28(8):64-75. (Persian)
6. Xu X, Awad A, Robles-Martinez P, Gaisford S,

[Downloaded from rjms.iums.ac.ir on 2026-06-24]

[DOI: 10.47176/rjms.32.59]

Goyanes A, Basit A, et al. Photopolymerization 3D printing for advanced drug delivery and medical device applications. J Control Release. 2021;329:743-757.

7. Squelch A, 3D printing and medical imaging. J Med Radiat Sci. 2018;65:171-172.

8. Esmaeili S, Shahali M, Kordjamshidi A, Torkpoor Z, Namdari F, Samandari SS, et al. An artificial blood vesselfabricated by 3D printing for pharmaceutical application. Nanomed J. 2019;6:183-194.

9. Raheem AA, Hameed P, Whenish R, Elsen RS, Amit Kumar Jaiswal AK, Prashanth KG, et al. Review on development of bio-inspired implants using 3D printing. Biomimetics 2021;6:65-101.

10. Aman M, Sporer ME, Gstoettner C, Prahm C, Hofer C, Mayr W, et al. Bionic Hand as Artificial Organ: Current Status and Future Perspectives. Artif Organs. 2019;43(2):109–118.

11. Kalyan BGP, Kumar L. 3D Printing: Applications in Tissue Engineering, Medical Devices, and DrugDelivery. AAPS Pharm Sci Tech. 2022;23:92-112.

12. Sun C, Shang G. Application and Development of 3D Printing in Medical Field, Modern Mechanic. Eng. 2020;10(3):25-33.

13. Aimar A, Palermo A, Innocenti B. The Role of 3D Printing in Medical Applications: A State of the Art. J Health Eng. 2019;2019:5340616,

14. Shayegh SS, Hakimaneh SMR, Derakhshi H. Three-dimensional printers and their application in dental prostheses. J Mash Dent Sch. 2022;46(2):112-34.

15. Geetha M, Singh AK, Asokamani R, Gogia AK, Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants – A review. Prog Mater Sci. 2009;54:397–425.

16. Winkler T, Sass FA, Duda GN, Schmidt-Bleek K, A review of biomaterials in bone defect healing, remaining shortcomings and future opportunities for bone tissue engineering. Bone Jt Res. 2018;7:232–243.

17. Zuniga JM, 3D Printed Antibacterial Prostheses. Appl Sci. 2018;8(9):1651.

18. Hinton TJ, Hudson A, Pusch K, Lee A, Feinberg AW. 3D Printing PDMS elastomer in a hydrophilic support bath via freeform reversible embedding. ACS Biomater. Sci Eng. 2016;2:1781–1786.

19. O'Bryan CS, Bhattacharjee T, Hart S, Kabb CP, Schulze KD, Chilakala I, et al. Self-assembled micro-organogels for 3D printing silicone structures. Sci Adv. 2017;3:e1602800.

20. Esmaielzadeh Sh. Metal additive manufacturing technology: A review of biomedical applications. Chem. Res. Nanomater. 2024; published online. (Persian)

21. Arabnejad S, Johnston B, Tanzer M, Pasini, D. Fully porous 3D printed titanium femoral stem to reduce stress-shielding following total hip arthroplasty. J Orthop Res. 2017;35:1774–1783.

22. Mandal S, Meininger S, Gbureck U, Basu B. 3D powder printed tetracalcium phosphate scaffold with phytic acid binder: Fabrication, microstructure and in situ X-Ray tomography analysis of compressive failure. J Mater Sci Mater Med. 2018;29:29.

23. Nyberg E, Rindone A, Dorafshar A, Grayson WL. Comparison of 3D-Printed Poly-varepsilon-Caprolactone Scaffolds Functionalized with Tricalcium Phosphate, Hydroxyapatite, Bio-Oss, or Decellularized Bone Matrix. Tissue Eng Part A 2017;23:503–514.

24. Jamroz W, Szafraniec J, Kurek M, Jachowicz R. 3D printing in pharmaceutical and medical applications e recent achievements and challenges. Pharm Res. 2018;35:176.

25. Mertz L. Dream it, design it, print it in 3d: what can 3d printing do for you? IEEE Pulse. 2013;4:15-21.

26. Fillat-Gomà F, Coderch-Navarro S, Martínez-Carreres L, Monill-Raya N, Nadal-Mir T, Lalmolda C, et al. Integrated 3D printing solution to mitigate shortages of airway consumables and personal protective equipment during the COVID-19 pandemic. BMC Health Serv Res. 2020;20(1):1035.

27. Zhou H, Bhaduri SB. 3D printing in the research and development of medical devices. Biomate Translat Med A Biomater Appro. 2019;269–289.

28. Nadagouda MN, Rastogi Y, Ginn M. Surgical management of proximal femoral metastasis: fixation or hip replacement? A 309 case series. Curr Opin Chem Eng. 2020;28:152-157.

29. Smith KE, Dupont KM, Safranski DL, Blair JW, Buratti DR, Zeetser V, et al. Use of 3D Printed Bone Plate in Novel Technique to Surgically Correct Hallux Valgus Deformities. Tech Orthop. 2016;31:181–189.

30. Huang YM, Huang CC, Tsai PI, Yang KY, Huang SI, Shen HH, et al. Three-Dimensional Printed Porous Titanium Screw with Bioactive Surface Modification for Bone–Tendon Healing: A Rabbit Animal Model. Int J Mol Sci. 2020;21:3628.

31. Zhang Y, Zhang L, Sun R, Jia Y, Chen X, Liu Y, et al. A new 3D printed titanium metal trabecular bone reconstruction system for early osteonecrosis of the femoral head. Medicine. 2018;97:e11088.

32. Murr LE, Gaytan SM, Martinez E, Medina F, Wicker RB. Next Generation Orthopaedic Implants by Additive Manufacturing Using Electron Beam Melting. Int J Biomater. 2012;2012:1–14.

33. Narra SP, Mittwede PN, DeVincent Wolf S, Urish KL. Additive Manufacturing in Total Joint Arthroplasty. Orthop Clin N Am. 2019;50:13–20.

34. Dawood A, Marti BM, Jackson VS, Darwood A. 3D printing in dentistry. Br Dent J. 2015;219:521-529.

35. Rupprecht L, Schmid C. Deep Sternal Wound

[Downloaded from rjms.iums.ac.ir on 2026-06-24]

[DOI: 10.47176/rjms.32.59]

Complications: An Overview of Old and new Therapeutic Options. Open J Cardiovasc Surg. 2013;6:9-19.

36. Aragón J, Méndez IP. Dynamic 3D printed titanium copy prosthesis: A novel design for large chest wall resection and reconstruction. J Thorac Dis. 2016;8:385–389.

37. Dzian A, Zivcak J, Penciak R, Hudak R. Implantation of a 3D-printed titanium sternum in a patient with a sternal tumor. World J Surg Oncol. 2018;16:7-17.

38. Burnard JL, Parr WCH, Choy WJ, Walsh WR, Mobbs RJ. 3D-printed spine surgery implants: A systematic review of the efficacy and clinical safety profile of patient-specific and off-the-shelf devices. Eur Spine J. 2019;29: 1248–1260.

39. Xu N, Wei F, Liu X, Jiang L, Cai H, Li Z, et al. Reconstruction of the Upper Cervical Spine Using a Personalized 3D-Printed Vertebral Body in an Adolescent With Ewing Sarcoma. Spine. 2016,41:50–54.

40. Mobbs RJ, Parr WC, Choy WJ, McEvoy A, Walsh WR, Phan K. Anterior Lumbar Interbody Fusion Using a Personalized Approach: Is Custom the Future of Implants for Anterior Lumbar Interbody Fusion Surgery? World Neurosurg. 2019;124: 452–458.

41. Xia Y, Feng ZC, Li C, Wu H, Tang C, Wang L, et al. Application of additive manufacturing in customized titanium mandibular implants for patients with oral tumors. Oncol Lett. 2020;20:54-60.

42. Park JH, Odkhuu M, Cho S, Li J, Park BY, Kim JW. 3D-printed titanium implant with pre-mounted dental implants for mandible reconstruction: A case report. Maxillofac. Plast Reconstr Surg. 2020;42 (28):1–4.

43. Shah FA, Snis A, Matic A, MaticD, Thomsen P, Palmquist A. 3D Printed Ti6Al4V Implant Surface Promotes Bone Maturation and Retains a Higher Density of Less Aged Osteocytes at the Bone-Implant Interface. Acta Biomate. 2016;30:357-367.

44. Vujaklija A, Farina D. Expet. Rev. Med. Dev. 2018, 15,1745e2422.

45. Demir AG, Previtali B. Additive manufacturing of cardiovascular CoCr stents by selective laser melting. Mater. Des. 2017;119 338–350.

46. Honigmann P, Sharma N, Schumacher R, Rueegg J, Haefeli M. Thieringer, F. In-hospital 3D printed scaphoid prosthesis using medical-grade polyetheretherketone (PEEK) Biomaterial. Biomed Res Int. 2021;2021:1–7.

47. Unkovskiy A, Wahl E, Huettig F, Keutel C, Spintzyk S. Multimaterial 3D printing of a defnitive silicone auricular prosthesis: an improved technique, J Prosthet Dent. 2021;125 (6):946–950

48. Unkovskiy A, Spintzyk S, Brom J, Huettig F, Keutel C. Direct 3D printing of silicone facial prostheses: a preliminary experience in digital workflow. J Prosthet Dent. 2018;120 (2):303–308.

49. Nuseir A, Hatamleh MM, Alnazzawi A, Al-Rabab'ah M, Kamel B, Jaradat E. Direct 3D printing of flexible nasal prosthesis: optimized digital workflow from scan to fit. J Prosthodont. 2019;28(1):10–14.

50. Banks, J., Adding Value in Additive Manufacturing Researchers in the United Kingdom and Europe Look to 3D Printing for Customization. IEEE Pulse. 2013;4:22-26.

51. Xiong BL, Zhou DW, Application Prospect of 3D Printing in Prosthetic Orthosis Technology. Rehabilitation in China. 2018;33:523-525.

[Downloaded from rjms.iums.ac.ir on 2026-06-24]

[DOI: 10.47176/rjms.32.59]