

Review Article
Vol. 22, No. 4, Sep.-Oct. 2026, p. 405-430

A Review on Edible Raw Materials that Can Be Used in Food 3D Printers

H. Lashkari^{1*}, Sh. Esmailzadeh^{2,3}

1- Department of Food Science and Technology, Zard.C., Islamic Azad University, Zarindasht, Iran

(*- Corresponding Author Email: Hannan.lashkari@iau.ac.ir)

2- Department of Chemistry, Dar.C., Islamic Azad University, Darab, Iran

3- Sadra Additive Manufacturing Laboratory, Chemical, Petroleum & Polymer Engineering Research Center, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran

Received: 07.02.2026

Revised: 15.06.2026

Accepted: 27.06.2026

Available Online: 24.08.2026

How to cite this article:

Lashkari, H., & Esmailzadeh, Sh. (2026). A review on edible raw materials that can be used in food 3D printers. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 22(4), 405-430. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/ifstrj.2026.97516.1546>

Introduction

The Food and Agriculture Organization (FAO) estimates that by 2050, food production must increase by 70% to feed the world's projected 9.9 billion people. Consequently, the development of novel and innovative solutions to address existing challenges and improve food sustainability has become crucial. Three D food printing (3DFP) is an emerging technology in the food industry, categorized as an additive manufacturing method, which serves as an innovative alternative to conventional production technologies. This technology offers freedom in customized production and greater flexibility in product design based on consumer demand. 3D food printing holds the potential to produce highly customized foods in terms of shape, texture, flavor, structure, and nutritional value, while enabling the creation of unique formulations and edible alternatives. Given its advantages over traditional methods, 3DFP is increasingly attracting the attention of academia and industry; it is plausible that it may replace current food production methods in the near future. These printers operate via various mechanisms, most notably extrusion, powder bed fusion, binder jetting, and inkjet printing. This study discusses the raw materials suitable for food 3D printers.

Methods

A standard search methodology was employed across several databases, including ScienceDirect, Scopus, PubMed, Google Scholar, and ISC. The selection criteria focused on articles published between 2009 and 2025 concerning food applications of additive manufacturing technology. Ultimately, 64 articles were selected and reviewed.

Results and Discussion

The results indicate that raw materials for 3DFP are generally categorized into three groups: natively printable, non-printable, and alternative materials.

Natively printable materials can be further classified into three sub-groups: sugars and confectionery products, dough-based foods and pastes, and food gels. Hydrogels, oleogels, pastry cream, cheese, hummus, ice cream, chocolate, powdered sugars, and starch-based ingredients belong to this category. The composition of these materials—specifically the ratio of carbohydrates, lipids, proteins, and fibers—is critical in determining the printability and final quality of the edible structures, often requiring minimal pre-processing.

The second category includes materials that are not naturally printable and thus require specific pre-processing, such as the addition of food additives or blending with suitable printable materials, to achieve printability. Traditional foods, such as vegetables and fruits (rich in fiber), meat products (protein sources), and



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/ifstrj.2026.97516.1546>

items with high moisture content, can be challenging to print because they often contain lower amounts of structural components like carbohydrates, proteins, and fats. However, these foods are valuable sources of fiber, antioxidants, vitamins, and minerals essential for human health. By incorporating hydrocolloids into non-printable materials and adjusting their rheological properties—such as viscosity, concentration, and flowability—these materials can be rendered printable. Hydrocolloids are hydrophilic polymers containing hydroxyl groups that typically possess polysaccharide or protein structures and may originate from plants, seaweed, animals, or microorganisms. Furthermore, the use of additives such as egg yolk, egg white, starch, and rice, wheat, or millet flours can enhance the printability of non-printable materials.

The third category includes alternative materials such as insects, algae, mushrooms, and lupin seeds, which are rich in nutrients but are generally considered unconventional food sources. Additionally, waste streams and by-products from food processing lines—such as fruit and vegetable peels, meat scraps, and fish parts—can be effectively utilized as raw materials for 3D printing. Constructing 3D structures from these alternative sources can significantly reduce carbon dioxide emissions and serve as a promising solution to global hunger, particularly regarding malnutrition among infants and adolescents. Furthermore, food printing enables value creation from food waste, contributing to a greener circular economy.

In the long term, 3D printing is expected to transform food production by integrating multiple processing stages into a single unit and simplifying the supply chain. This study comprehensively addresses the printability and classification of food raw materials used in 3D printing.

Keywords: Alternative materials, Natively printable foods, Non-printable, Printability

مقاله مروری

جلد ۲۲، شماره ۴، مهر- آبان ۱۴۰۵، ص. ۴۳۰-۴۰۵

مروری بر مواد اولیه خوراکی قابل استفاده در دستگاه‌های چاپگر سه‌بعدی غذایی

حنان لشکری^{۱*} - شیدا اسمعیل‌زاده^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۶

چکیده

چاپ سه‌بعدی یک فناوری نوین در صنعت غذاست که در دسته روش‌های ساخت افزایشی قرار می‌گیرد. این فناوری با استفاده از طراحی دیجیتال و بهره‌گیری از مواد اولیه خوراکی (جوهرهای خوراکی)، ساختارهای پیچیده‌ای ایجاد می‌کند که تولید آن‌ها با قالب‌ها و روش‌های معمول ممکن نیست. چاپگرهای سه‌بعدی روش‌های عملیاتی متفاوتی دارند که از میان آن‌ها، چاپگرهای مبتنی بر اکستروژن، تفجوشی انتخابی با لیزر، تزریق چسب و جوهرافشان، کاربرد بیشتری در صنعت غذا دارند. ماهیت و ترکیبات تشکیل دهنده مواد اولیه، معیاری اساسی برای سنجش توانایی ذاتی «قابلیت چاپ» و تعیین کیفیت نهایی سازه‌های خوراکی محسوب می‌شود؛ در این میان، کربوهیدرات‌ها، لیپیدها، پروتئین‌ها و فیبرها نقش پررنگ‌تری بر قابلیت چاپ دارند. مواد اولیه برای چاپ به سه دسته تقسیم می‌شوند: مواد قابل چاپ، مواد غیرقابل چاپ و مواد جایگزین. مواد قابل چاپ، مانند: شکلات، پنیر، خامه قنادی و هیدروژل‌ها، به تنهایی قابلیت چاپ دارند و در هنگام فرآیند، به پیش‌پردازش کمتری نیاز دارند. دسته دوم موادی هستند که به خودی خود قابل چاپ نیستند و برای تبدیل شدن به فرم قابل چاپ، به پیش‌پردازش‌های خاصی (مانند اضافه کردن افزودنی‌های غذایی یا ترکیب با مواد قابل چاپ) نیاز دارند. دسته سوم، مواد جایگزین هستند که شامل منابع غذایی غیرمعمول مانند حشرات، جلبک‌ها، قارچ‌ها، دانه‌های لوبپین و ضایعات کارخانه‌های فرآوری مواد غذایی می‌شوند. این مطالعه مروری است بر قابلیت چاپ مواد اولیه، نقش ترکیبات در این فرآیند و طبقه‌بندی مواد اولیه مصرفی در چاپ سه‌بعدی.

واژه‌های کلیدی: قابلیت چاپ، غذاهای قابل چاپ، غذاهای غیرقابل چاپ، مواد جایگزین

مقدمه

الگوهای غذایی در حال تغییر هستند (Phan & Stodolska, 2019). تدوین یک رژیم غذایی مناسب، بدون به خطر انداختن نیازهای تغذیه‌ای فرد، از ضرورت‌های روزمره است. چاپ سه‌بعدی غذا، فناوری جدیدی در صنعت غذا است که در دسته روش‌های ساخت افزایشی^۵ قرار می‌گیرد و جایگزینی نوآورانه برای فناوری‌های مرسوم در تولید مواد غذایی محسوب می‌شود.

غذا جزء ضروری زندگی است که از درشت‌مغذی‌ها و ریزمغذی‌های مختلف تشکیل شده است. ترکیب یک رژیم غذایی، نقش مهمی در تأمین نیازهای بدن و انرژی مورد نیاز روزانه ایفا می‌کند. درشت‌مغذی‌ها شامل کربوهیدرات‌ها، پروتئین‌ها، چربی‌ها و فیبرهای غذایی هستند؛ از سوی دیگر، ویتامین‌ها و مواد معدنی نیز در دسته ریزمغذی‌ها قرار می‌گیرند. امروزه با توجه به سبک زندگی پرمشغله‌ای که داریم،

۱- گروه علوم و صنایع غذایی، واحد زرین‌دشت، دانشگاه آزاد اسلامی، زرین‌دشت، ایران
(*)- نویسنده مسئول: Email: Hannan.lashkari@iau.ac.ir

۲- گروه شیمی، واحد داراب، دانشگاه آزاد اسلامی، داراب، ایران

۳- آزمایشگاه ساخت افزایشی صدرا، مرکز تحقیقات مهندسی شیمی، نفت و پلیمر، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

محققان دستورالعمل‌های چاپ را به دو دسته طبقه‌بندی کرده‌اند: دسته اول بر اساس میزان هر یک از اجزای غذا و دسته دوم بر اساس دستورالعمل‌های سنتی موجود. دستورالعمل‌های مبتنی بر اجزاء، بر اساس مجموعه‌ای از مواد و فرمولاسیون‌های استاندارد از پیش تعیین‌شده هستند که فرآورده بر پایه آن‌ها تولید می‌شود. پژوهشگران مؤسسه فناوری ماساچوست (MIT)، آزمایش‌هایی را بر روی دستورالعمل‌های چاپ مبتنی بر اجزاء با استفاده از سه نوع چاپگر^۶ انجام داده‌اند. در دسته دوم، هدف از تولید غذای سفارشی، اصلاح دستورالعمل‌های چاپ موجود است؛ نمونه‌هایی از این دسته شامل ساخت شکلات‌های سفارشی و مجسمه‌های قندی است (Anandharamakrishnan, Moses, & Anukiruthika, 2022).

تمایل مصرف‌کننده به استفاده از دستورالعمل‌های جدید، تحت تأثیر پنج عامل کلیدی قرار دارد که عبارت‌اند از: قیمت تمام‌شده، راحتی و در دسترس بودن، طعم و مزه مطلوب، تجربه و سابقه مصرف‌کننده، و ارزش تغذیه‌ای. یک نظرسنجی آمریکایی در مورد عادات غذایی نشان داد که ۴۷ درصد از مصرف‌کنندگان به سالم بودن غذا حساس‌اند، ۳۵ درصد به مواد تشکیل‌دهنده غذا توجه دارند، و سایر افراد نسبت به این موضوعات بی‌تفاوت‌اند (Sun, Zhou, Huang, & Yan, 2018a). الگوهای غذایی نامناسب، محدودیت‌های مالی و زمانی و در دسترس بودن غذا موجب شده است که بسیاری از مصرف‌کنندگان جوان به گزینه‌های سریع و کم‌مغذی موجود در فروشگاه‌ها روی آورند. به‌منظور ارائه غذای سالم و مغذی، می‌توان از چاپ سه‌بعدی برای تهیه برنامه‌های غذایی فردی، متناسب با سن، شغل و انتخاب شخصی، استفاده کرد. از سوی دیگر، غذاهای آماده یا سفارشی در دسترس، مقادیر قابل‌توجهی از مواد مغذی مورد نیاز را تأمین نمی‌کنند. از این‌رو، نسل‌های کنونی و آینده به جایگزین‌های غذایی سالم نیاز دارند؛ زیرا به‌دلیل مصرف مواد آلرژی‌زا یا عادات غذایی غیرقابل پیش‌بینی، بسیاری از جوانان، به‌ویژه افراد ۱۸ تا ۳۰ ساله، به‌طور فزاینده‌ای از سوءتغذیه، چاقی و بیماری‌های مرتبط مانند دیابت رنج می‌برند. این فناوری از طریق فرمولاسیون شخصی می‌تواند برای تولید برنامه‌های غذایی و وعده‌های غذایی ویژه افراد با رژیم‌های خاص، با عنوان «غذاهای سالم آینده»، مورد استفاده قرار گیرد (Sundarsingh, Zhang, Mujumdar, & Li, 2024).

علاوه بر این، این فناوری قادر است ذائقه مصرف‌کننده را تغییر داده و با تولید غذاهایی با محتوای کمتر از چربی، قند و نمک، به کاهش

ساخت افزایشی را بر اساس اصول عملیاتی و نوع مواد مورد استفاده، به هفت روش تقسیم‌بندی می‌کنند که عبارتند از: فتوپلیمریزاسیون مخزنی (VPP)^۱، اکستروژن مواد (ME)^۲، تفجوشی بستر پودری (PBF)^۳، تزریق چسب (BJ)^۴، تزریق مواد یا چاپ جوهرافشان (IJP)^۵، رسوب مستقیم انرژی (DED)^۶ و ساخت ورقه‌ای (SL)^۷. هر یک از این روش‌ها دارای فناوری‌های گوناگون هستند که کاربران، براساس نیاز خود می‌توانند فناوری مناسب و برتر را انتخاب کنند (Esmailzadeh, 2023). رایج‌ترین روش‌ها در صنعت غذا شامل روش‌های مبتنی بر اکستروژن، روش تفجوشی بستر پودری، چاپ جوهرافشان و تزریق چسب می‌باشد که در میان آن‌ها، فرآیند چاپ مبتنی بر اکستروژن، کاربرد بیشتری دارد (Shah, Shah, Shrestha, & Mitra, 2024). فناوری اکستروژن یک فرآیند عملی پیچیده، کامل و بسیار انعطاف‌پذیر است و در این فرآیند یک ماده خام درون یک محفظه تحت یک یا چند نوع شرایط اختلاط؛ دما، فشار و برش قرار گرفته و در نهایت فرآورده از دستگاه خارج می‌شود (Lashkari, 2025a). چاپ مواد غذایی شامل سه مرحله است: ایجاد مدل سه‌بعدی، چاپ محصولات و انجام فرآیندهای پس از چاپ؛ مانند افزودن طعم و مزه، سرخ کردن، پختن و جوشاندن (Agunbiade et al., 2022).

چاپگرهای سه‌بعدی دارای انواع پیکربندی‌های دکارتی، دلتا، قطبی و اسکارا هستند که از این میان، پیکربندی‌های دکارتی، دلتا و تعداد محدودی از انواع قطبی در صنعت غذا کاربرد دارند (Lashkari & Esmailzadeh, 2025c). این فناوری مزایای متعددی را ارائه می‌دهد؛ از جمله انعطاف‌پذیری فوق‌العاده در ساخت، کاهش ریسک تولید محصولات نوآورانه، آزادی عمل بیشتر در استفاده از منابع غذایی جدید مانند: مواد جایگزین، کاهش هزینه تولید، تولید بر اساس تقاضا مشتری یا شخصی‌سازی محصولات، کاهش ضایعات و اثرات مخرب زیست‌محیطی. به دلایل ذکر شده، توجه بخش‌های دانشگاهی، تجاری و صنعتی را به خود جلب کرده است و امروزه کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلف از جمله خودروسازی، نساجی، الکترونیک، هوانوردی، ساختمان و معماری، پزشکی، داروسازی، دندانپزشکی و صنایع غذایی یافته است. دور از انتظار نیست که در آینده نزدیک، جایگزین روش‌های امروزی تولید مواد غذایی شود (Lashkari, & Esmailzadeh, 2025c و Esmailzadeh, Vaghefi, Esmailzadeh, & Tavallali, 2025).

6- Direct Energy Deposition

7- Sheet Lamination

8 - Virtuoso Mixer™, Robotic™ Chef, Digital Fabricator™

1- Vat Photo Polymerization

2- Material Extrusion

3- Powder Bed Fusion

4- Binder Jetting

5- Material Jetting or Inkjet Printing

مواد قوی تر است (ماده الاستیک تر)، بوده و هرچه مقدار آن کوچک تر باشد، قابلیت جریان ماده بیشتر (ماده ویسکوزتر) خواهد بود. بنابراین، ویژگی های رئولوژیکی نقش تعیین کننده ای در قابلیت اکستروژن و چاپ ایفا می کنند و ایجاد تعادل رئولوژیکی می تواند تضمین کند که جسم چاپ شده در عین حفظ شکل، تا حد ممکن مستحکم باشد تا اشکال پیچیده غذایی به درستی شکل بگیرند (Li et al., 2022). مواد غذایی باید در طول فرآیند اکستروژن قابلیت جریان داشته باشند و پس از چاپ نیز قادر به حمایت از ساختار خود برای تولید محصولات با ساختارهای پایدار باشند. پروتئین ها، چربی ها، نشاسته ها و هیدروژل ها دارای ماهیت چاپ پذیری هستند و بر اساس نحوه تغییر حالت خود در هنگام چاپ، به سه دسته تقسیم می شوند: مواد ژلی با تغییر فاز، مواد خمیری بدون تغییر فاز و مواد ذوب شونده با تغییر فاز (Daffner et al., 2020; Wilms, Daffner, Kern, Gras, & Kohlus, 2021). مواد ژلی به موادی اطلاق می شود که عمدتاً با تشکیل ژل، استحکام و ویسکوزیته را برای تکمیل فرآیند چاپ افزایش می دهند مانند پروتئین ها و هیدروژل ها (Warner, Norton, & Mills, 2019); مواد خمیری بدون تغییر فاز شامل موادی هستند که بدون تغییر فاز در طول فرآیند چاپ، قابل اکستروژن باشند مانند نشاسته (Lille, Nurmela, Nordlund, Metsa-Kortelainen, & Sozer, 2018); در نهایت، مواد ذوب شونده با تغییر فاز به موادی اشاره دارند که پس از گرم شدن از حالت جامد به مایع تبدیل شده و بلافاصله پس از اکستروژن، به سرعت جامد می شوند مانند کره کاکائو (Hao et al., 2010; Lille et al., 2018). علاوه بر این، این ترکیبات می توانند ویسکوزیته و رئولوژی مواد قابل چاپ را تغییر داده و حتی قابلیت چاپ موادی که به راحتی قابل چاپ نیستند (مانند فیبرها) را بهبود بخشند (Li et al., 2022).

ترکیبات مؤثر در قابلیت چاپ مواد غذایی

کربوهیدرات ها

کربوهیدرات ها ترکیبات آلی هستند که از قندهای ساده، الیگوساکاریدها و پلی ساکاریدها (نشاسته ای و غیر نشاسته ای) تشکیل شده اند. پلی ساکاریدها نسبت به سایر ترکیبات، به زمان بیشتری برای

کالری دریافتی کمک کند (Prakash, Bhandari, Godoi, & Zhang, 2019). طراحی های مختلف ریزساختاری در مواد غذایی می تواند تراکم پرشدگی متفاوتی در فرآورده ایجاد کند که منجر به ایجاد حس دهانی^۱ متمایزی می شود. این فرآیند در مقیاس میکرو، امکان افزودن ترکیبات زیست فعال به فرآورده های چاپ سه بعدی را نیز فراهم می آورد. افزون بر این، تولید غذاهای با بافت اصلاح شده برای افراد مبتلا به اختلالات بلع نیز از طریق این فناوری امکان پذیر شده است. تمامی این مزایای بالقوه در چاپ مواد غذایی، به توسعه فرآورده های غذایی مناسب با ارزش اقتصادی بالا منجر می گردد. انتخاب مواد اولیه در فرمولاسیون فرآورده، یکی از جنبه های حیاتی است که قابلیت چاپ را تعیین می کند. مواد اولیه برای چاپ غذای سه بعدی به سه دسته «قابل چاپ»^۲، «غیرقابل چاپ»^۳ و «مواد جایگزین»^۴ تقسیم می شوند. تاکنون در کشور بررسی های مشخصی در زمینه معرفی مواد اولیه قابل استفاده در چاپگرهای سه بعدی صورت نگرفته است؛ از این رو، ما در این مطالعه تلاش می کنیم تا به بحثی عمیق درباره قابلیت چاپ مواد اولیه غذایی و طبقه بندی مواد مصرفی در چاپگرهای سه بعدی بپردازیم.

قابلیت چاپ

قابلیت چاپ به توانایی ذاتی ماده برای مقاومت در برابر وزن خود هنگام رسوب بر روی بستر چاپ اشاره دارد (Kim, Bae, & Park, 2018). ماده ای که چاپ مناسبی دارد، باید از ثبات ابعادی و مکانیکی کافی برخوردار باشد تا پس از فرآیند چاپ، شکل خود را حفظ کند. ماهیت و خواص مواد اولیه، یک معیار اساسی در تعیین کیفیت نهایی سازه های خوراکی چاپ شده است. در این میان، ویژگی های رئولوژیکی مواد غذایی برای ارزیابی و بهبود قابلیت چاپ و توانایی خودپشتیبانی^۵ در چاپ سه بعدی، به ویژه در روش های مبتنی بر اکستروژن، حیاتی هستند. از ویژگی های رئولوژیکی شامل تنش تسلیم (τ_0)^۶، مدول الاستیک (یانگ) (G')^۷ و ویسکوزیته (μ)^۸ برای توصیف رفتار ماده استفاده می شود. مقدار بیشتر τ_0 نشان دهنده نیاز به نیروی اکستروژن بیشتر برای ایجاد جریان در ماده و همچنین بیانگر استحکام مکانیکی بالاتر مواد است. مقدار بیشتر G' نیز نشان دهنده قدرت مکانیکی بیشتر مواد و توانایی خودپشتیبانی بهتر مواد است. μ نشان دهنده توانایی اتصال مواد است؛ به طوری که هرچه مقدار μ بزرگتر باشد، توانایی اتصال

(مقدار نیروی اولیه مورد نیاز جهت به حرکت درآوردن سیال)

7- Elastic Modulus

(نسبت تنش به کرنش در ناحیه الاستیک جسم است و نشان دهنده بودن ویژگی جامد بودن ماده است).

8- Viscosity

(مقاومت درونی سیال در مقابل جریان یافتن)

1- Mouthfeel

2- Printable

3- Non printable

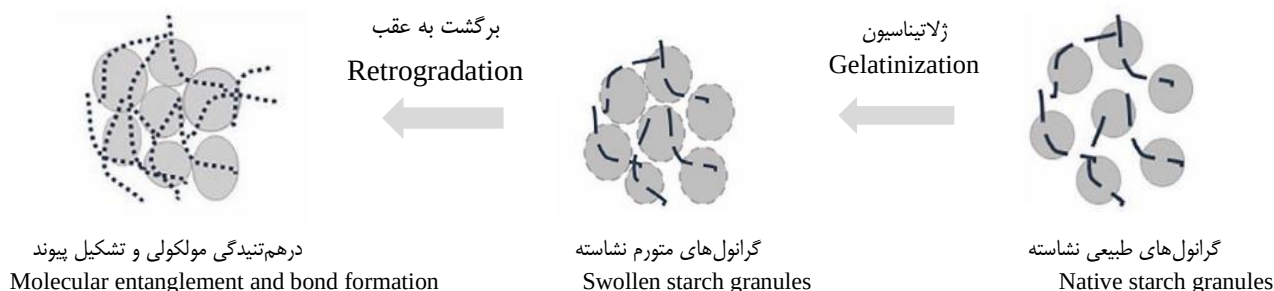
4- Alternative materials

5- Self-Supporting

6- Yield Stress

مواد غذایی مناسب‌تر می‌کند. در مقایسه با سایر ترکیبات غذایی، کربوهیدرات‌ها، به‌ویژه نشاسته، تمایل بیشتری به ژلاسیون دارند (شکل ۱) و از این طریق، قوام و جریان‌پذیری ماده را متعادل کرده و رسوب لایه‌ای سازه‌های سه‌بعدی را تنظیم می‌کنند (Anandharamakrishnan *et al.*, 2022).

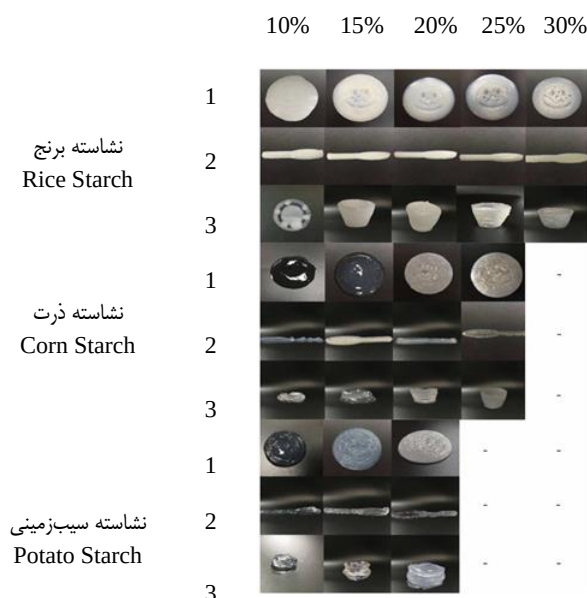
هضم نیاز دارند و پاسخ گلیسمی^۱ پایین‌تری ایجاد می‌کنند. نشاسته از آمیلوز خطی و آمیلوپکتین شاخه‌دار با پیوندهای گلوکوزیدی، و از واحدهای گلوکز ساخته شده است. پلی‌ساکاریدهای غیرنشاسته‌ای نیز به دو دسته سلولزی و غیرسلولزی (پکتین و همی‌سلولز) تقسیم می‌شوند که بخش عمده‌ای از دیواره سلولی گیاهان را تشکیل می‌دهند. شبکه پلیمری و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی پلی‌ساکاریدها، آن‌ها را برای چاپ



شکل ۱- مکانیسم ژلاتینه‌شدن گرانول‌های نشاسته (Anandharamakrishnan *et al.*, 2022)
Fig. 1. Gelation mechanism of starch granules (Anandharamakrishnan *et al.*, 2022)

چگالی همپوشانی زنجیره‌های مولکولی و تقویت برهمکنش میان زنجیره‌ها و پیوندهای هیدروژنی می‌شود. این امر می‌تواند باعث کاهش اندازه ساختار شبکه‌ای تشکیل‌شده و متراکم‌تر شدن شبکه کل سیستم گردد.

مطالعاتی درباره مقایسه سیستم‌های مختلف نشاسته، از جمله نشاسته برنج، ذرت و سیب‌زمینی، گزارش شده است (شکل ۲). نتایج نشان داد که قابلیت چاپ به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر ویژگی‌های ترمورئولوژیکی سیستم‌های نشاسته‌ای قرار دارد که این ویژگی‌ها بسته به منبع نشاسته متفاوت‌اند. افزایش غلظت نشاسته موجب افزایش



شکل ۲- غلظت‌های مختلف نمونه‌های نشاسته‌ای چاپ شده به روش سه‌بعدی با استفاده از فرآیند اکستروژن ذوب داغ (Chen *et al.*, 2019a)
Fig. 2. Different concentrations of 3D printed starch samples using hot-melt extrusion (Chen *et al.*, 2019a)

(میزان افزایش قند خون بعد از مصرف یک ماده غذایی حاوی ۵۰ گرم گلوکز)

1- Glycemic index (GI)

آن ها شامل تنظیم فعالیت های فیزیولوژیکی، حفظ pH طبیعی، عمل به عنوان پیام رسان شیمیایی و ذخیره سازی است. بقولات و حبوبات منبع خوبی از پروتئین های گیاهی هستند. پروتئین های حاصل از منابع حیوانی نیز شامل تخم مرغ، گوشت قرمز، میگو، ماهی و فرآورده های لبنی مانند پنیر و پودر آب پنیر می باشند. بر اساس پروفایل اسید آمینه، پروتئین های حیوانی به عنوان پروتئین های کامل و پروتئین های گیاهی به دلیل کمبود یک یا چند اسید آمینه ضروری، ناقص در نظر گرفته می شوند. عوامل مختلفی بر عملکرد و دسترس پذیری پروتئین ها تأثیر می گذارند، از جمله گرما، pH (اسید/باز) و هیدرولیز آنزیمی که منجر به دناتوره شدن، تجمع و اتصال متقابل آن ها می شوند. این عوامل به نوبه خود بر قابلیت چاپ آن ها تأثیر می گذارند (Anandharamakrishnan et al., 2022).

برای افزایش قابلیت چاپ پروتئین ها، سه روش اصلی عبارتند از: پیوند عرضی شیمیایی، پیوند عرضی یونی و تشکیل ژل. این روش ها می توانند پروتئین ها را به تشکیل ساختار ژل مانند ترغیب کرده و استحکام مکانیکی و توانایی خودپشتیبانی آن ها را افزایش دهند. علاوه بر این، رسوب در نقطه ایزوالکتریک نیز می تواند برای تشکیل مواد چاپ سه بعدی مورد استفاده قرار گیرد. پروتئین ها در نقطه ایزوالکتریک تجمع می یابند که این ویژگی، برای مواد چاپ سه بعدی مبتنی بر مایع^۲، عملکردی کلیدی است. تجمع ناشی از برهمکنش بین رشته ها و پروتئین های اصلاح شده آنزیمی نیز می تواند ساختارهای خودپشتیبان تشکیل دهد (Li et al., 2022).

فرمولاسیون غنی از ایزوله پروتئین سویا با بهره گیری از خواص عملکردی ترکیب همزمان ژلاتین با آلژینات سدیم برای چاپگر سه بعدی ساخته شد که ساختاری پایدار به سازه های سه بعدی بخشید. برهمکنش های فیزیکی پیوندهای پپتیدی ژلاتین به همراه نمک های آلژینات سدیم در دمای ذوب آن می تواند شبکه ی مشبک را تشکیل دهد و استحکام مخلوط چاپ را فراهم آورد. افزایش غلظت ژلاتین تأثیر قابل توجهی بر جریان پذیری ماده داشت که به نوبه خود منجر به بهبود سختی و قابلیت جویدن ژل های ایزوله پروتئین سویا شد. بنابراین، ایزوله پروتئین سویا همراه با ژلاتین، با وضوح بهتر قابل چاپ بود (Chen et al., 2019b). پروتئین ها را می توان لایه به لایه با مواد پلی ساکارییدی مانند آلژینات روی هم چید. ترانس گلوتامیناز می تواند تشکیل پیوند کووالانسی بین لیزین و گلوتامین را در حضور کلسیم کاتالیز کند و استحکام ژل و خواص بافتی آن را افزایش دهد و قابلیت چاپ آن را بهبود بخشد. به عنوان مثال، پروتئین های موجود در گوشت چرخ کرده می توانند با ایجاد پیوند عرضی آنزیمی، هیدروژل های

با این حال، هنگامی که غلظت نشاسته از ۳۰ درصد فراتر رود، فشردگی سازی مواد دشوارتر می شود و این مسئله می تواند بر کیفیت چاپ تأثیر منفی بگذارد. از آنجا که نشاسته ژلاتینه نشده در اثر گرم شدن طی پردازش پس از چاپ متورم، دناتوره و ژلاتینه می شود، و همچنین تورم اکستروژنی اغلب هنگام عبور مواد ویسکوالاستیک از نازل با قطر کم رخ می دهد، که هر دو می توانند به تخریب محصول نهایی منجر شوند، بنابراین بهتر است مواد نشاسته ای پس از ژلاتینه شدن چاپ شوند. در عین حال، قطر نازل باید بیش از ۰/۸ میلی متر باشد تا اثر چاپ بهتری حاصل شود. محققان دریافتند که استفاده از ۲۵ درصد نشاسته ذرت، ۱۵ درصد نشاسته سیب زمینی یا ۲۰ درصد نشاسته برنج در چاپ سه بعدی می تواند محصولی خوش فرم با ساختار یکنواخت و متراکم، استحکام ژل بالاتر و تعداد لایه های چاپ بیشتر ایجاد کند (Chen, Xie, Chen, & Zheng, 2019a). این نتایج نشان می دهد که نشاسته ویژگی های یک جوهر مناسب برای چاپ سه بعدی، همراه با انعطاف پذیری بالا، را دارد.

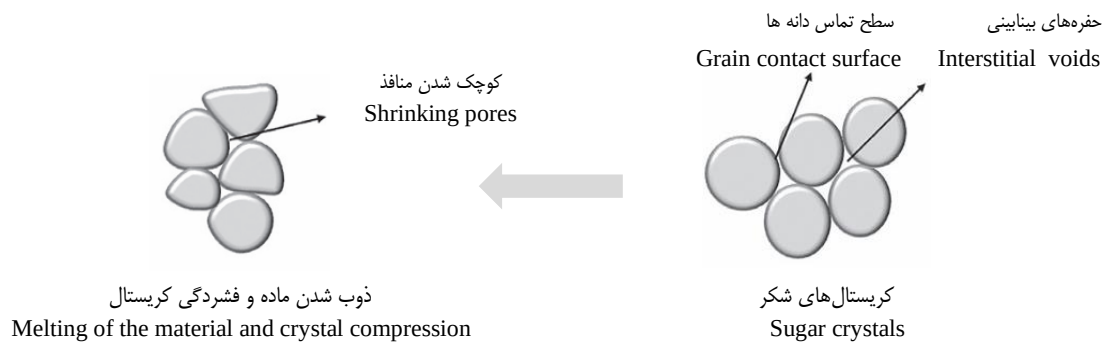
در فرآیند چاپ سه بعدی شکر، از روش تفجوشی استفاده می شود که شامل حرارت دهی ذرات جامد تا نقطه ذوب آن ها است و در نتیجه، اتصالاتی میان فضاهای خالی بین دانه ها ایجاد می شود (شکل ۳) (Southerland, Walters, & Huson, 2011). این روش، روشی اقتصادی و انعطاف پذیر برای درون پوشانی ترکیبات فعال در مواد غذایی پودری مانند شکر به شمار می رود. در این فرآیند، ساختار کریستالی ساکارز از حالت کریستال کامل به کریستال های متراکم یا تجمع یافته نامنظم تغییر می کند؛ در نتیجه، شبکه ای متخلخل ایجاد می شود که می توان ماده فعال دیگری را در آن جای داد و یک فرآورده عملکردی تولید کرد (Lashkari, 2025b). در این حالت، حفره های مولکولی باز می شوند و با اعمال حرارت و فشار جزئی، ذرات به یکدیگر جوش می خورند. چاپ سه بعدی قندها تا حد زیادی به ویژگی هایی مانند تبلور، نقطه ذوب، منبع و میزان گرمایش، دمای انتقال شیشه ای (T_g)^۱، تراکم پذیری، حلالیت و چگالی ماده بستگی دارد. این پارامترها تأثیر زیادی بر تخلخل سازه های ساخته شده دارند و از این رو می توان بافت آب نبات های چاپ شده را کنترل کرد (Sun, Zhou, Huang, Fuh, & Hong, 2015).

پروتئین ها

پروتئین ها گروه پیچیده ای از بیوپلیمرها هستند که از اسیدهای آمینه خطی و منشعب تشکیل شده اند و از طریق پیوندهای پپتیدی به یکدیگر متصل می شوند. پروتئین ها نقش حیاتی در یکپارچگی ساختاری دیواره های سلولی و سفتی بافت ها دارند. سایر نقش های عملکردی

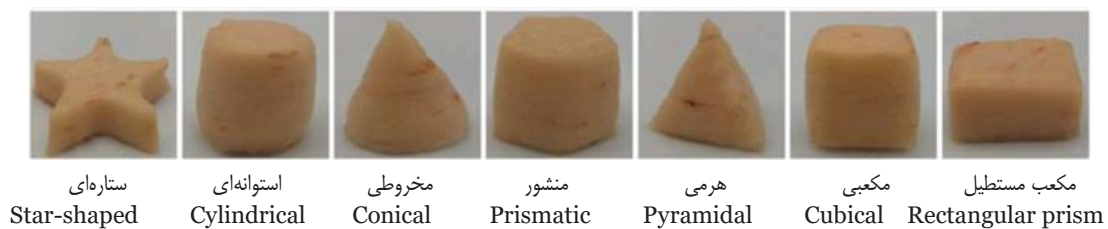
سه‌بعدی دارند. در مطالعه‌ای دیگر، قابلیت چاپ سوریمی میگو مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۴). پارامترهای مناسب چاپ و روش پردازش حرارتی مطلوب تعیین شدند و محققان توانستند محصولات چاپ سه‌بعدی در اشکال مختلف با ارزش افزوده بالا از سوریمی میگو تولید کنند (Pan et al., 2024).

خودپشتیبان تولید کنند که سختی، الاستیسیته و دقت چاپ را افزایش داده و اثر چاپ را بهبود می‌بخشد. محصول حاصل، ساختار شبکه‌ای سه‌بعدی متراکم‌تر و فشرده‌تری خواهد داشت، احتباس آب بهتری نشان می‌دهد و اثر چاپ را تقویت می‌کند (Zhao et al., 2020). این موارد نشان می‌دهد که پروتئین‌ها پتانسیل بالایی به‌عنوان ماده‌ی چاپ



شکل ۳- فرآیند تفجوشی (Southerland et al., 2011)

Fig. 3. Sintering process (Southerland et al., 2011)



شکل ۴- چاپ سه‌بعدی سوریمی میگو در شکل‌های متفاوت (Pan et al., 2024)

Fig. 4. 3D printing of surimi shrimp in different shapes (Pan et al., 2024)

خواص فیزیکی مطلوب‌تری دارند؛ به‌گونه‌ای که می‌توانند در دمای ۳۰ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد ذوب شوند و با سرد شدن، برای نگهداری بهتر به حالت جامد درآیند. برای مثال، کره کاکائو می‌تواند در مدت‌زمان کوتاهی پس از سرد شدن جامد شود و یک لایه خودپشتیبان تشکیل دهد (Rando, & Ramaioli, 2020).

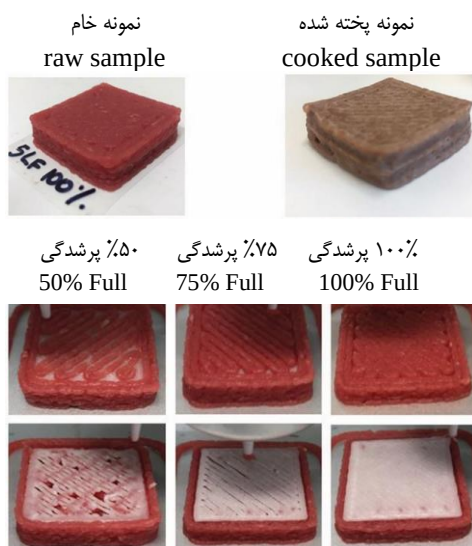
در راستای تحلیل اثر چربی‌های حاصل از منابع مختلف حیوانی بر قابلیت چاپ، مطالعه‌ای انجام شده است. در این مطالعه، چربی اشباع نامطلوب موجود در گوشت گاو حذف شد و چربی غیراشباع خوک (۳۹ درصد چربی غیراشباع) به‌صورت یک لایه جداگانه و با استفاده از چاپ سه‌بعدی در ساختار گوشت گاو گنجانده شد. این پژوهش اثر و میزان چربی گوشت خوک را به‌عنوان لایه‌های میانی بر قابلیت چاپ گوشت گاو ارزیابی می‌کند (شکل ۵). لیپیدها مسئول جریان یکنواخت خمیر گوشت رشته‌ای از طریق نازل چاپ هستند. همچنین، لایه‌های چربی قرارگرفته بین لایه‌های گوشت، به دلیل ناپایداری گلوله‌های چربی در حین عملیات حرارتی، با یکدیگر ادغام می‌شوند و به‌طور متناسب سختی

لیپیدها

یکی دیگر از اجزای اصلی مواد غذایی که به قابلیت چاپ کمک می‌کند، لیپیدها هستند. لیپیدها عمدتاً به‌صورت چربی یا روغن وجود دارند و برای ذخیره انرژی در بدن انسان ضروری‌اند. این مواد از اسیدهای چرب، تری‌گلیسریدها و فسفولیپیدها تشکیل شده‌اند. بر اساس وجود پیوندهای دوگانه در زنجیره کربنی، اسیدهای چرب به اشباع و غیراشباع طبقه‌بندی می‌شوند. منابع گیاهی چربی شامل دانه‌های روغنی، آجیل و میوه‌ها مانند زیتون، نخل و آووکادو هستند، در حالی که منابع حیوانی مانند گوشت، ماهی (از جمله ماهی سالمون و ماکرل)، تخم‌مرغ و فرآورده‌های لبنی مانند کره و مارگارین دارای مقادیر قابل توجهی چربی‌اند. عوامل مختلفی که بر عملکرد چربی تأثیر می‌گذارند عبارت‌اند از انجماد/ذوب‌پذیری، ساختار کریستالی/چندریختی، اندازه گلوله، استریفیکاسیون، درجه هیدروژناسیون، ترکیب اسیدهای چرب و نحوه توزیع آن‌ها در تری‌گلیسریدها (Devi, & Khatkar, 2016). چربی‌های اشباع‌شده

لیپیدها بافتی خامه ای به مخلوط چاپ می بخشند و تشکیل خمیر را افزایش می دهند. این اثر به دلیل وجود کریستال های β اسیدهای چرب است که از اشکال α و β پایداری دارند.

و جویدنی بودن نمونه های پخته شده را کاهش می دهند (Dick, Bhandari, & Prakash, 2019). چربی ها و روغن ها به عنوان برجسته ترین مواد در تنظیم ویژگی های فیزیکوشیمیایی مواد اولیه برای چاپ سه بعدی در نظر گرفته می شوند. همراه با سایر ترکیبات غذایی،



شکل ۵- گوشت چاپ شده سه بعدی: (۱) نمونه های خام و پخته شده، (۲) خمیر گوشت چاپ شده و لایه های میانی چربی خوک (Dick et al., 2019).
Fig. 5. Multi-material 3D printed meat (1) Raw and cooked samples, (2) 3D printed meat paste and lard interlayers (Dick et al., 2019)

مطالعات اندکی در زمینه بررسی چالش های پیچیده در چاپ سه بعدی فیبرها گزارش شده است. لیل و همکاران پژوهشی را برای توسعه ساختارهای سه بعدی جدید با فرمولاسیون های غنی از فیبر و پروتئین، همراه با کاهش محتوای چربی و قند، انجام دادند. ترکیبات مخلوط چاپ شامل نشاسته، فیبر نانوسلولزی و پودر شیر بود که به صورت تکی و ترکیبی برای دستیابی به ساختارهای سه بعدی پایدار پس از چاپ مورد آزمایش قرار گرفتند. در راستای بهبود قابلیت چاپ، ماتریس ژلی با استفاده از نانوفیبرهای سلولزی تقویت شد. نتایج نشان داد که در سیستم های حاوی فیبر، جریان مواد در سیستم ژلی به صورت ناپیوسته است؛ به نظر می رسد ذرات درشت تر فیبر باعث مسدود شدن نازل چاپ، جدایش فاز و لخته شدن مواد می شوند. این مطالعه ارزیابی مقایسه ای از مواد تشکیل دهنده ارائه داده و نشان می دهد که چاپ سه بعدی فیبر در مقایسه با سیستم های غذایی مبتنی بر نشاسته و پروتئین، با دشواری های به مراتب بیشتری همراه است (Lille et al., 2018). در پژوهشی دیگر، استفاده از مواد غذایی مبتنی بر سلول^۱ همچون اسفناج خشک شده به روش انجمادی، به عنوان «جوهر

فیبر غذایی

امروزه رفاه و غذای سالم موجب جذابیت و تمایل به رژیم غذایی غنی از فیبر شده است. فیبرهای غذایی گروهی از قسمت علفی غیرقابل هضم یک وعده غذایی هستند که از اجزای کربوهیدرات تشکیل شده اند که توسط آنزیم های روده هیدرولیز نمی شوند و دارای عملکرد حیاتی در تنظیم فیزیولوژی طبیعی بدن انسان هستند (Zinina, Merenkova, Tazeddinova, & Rebezov, 2019). بخش قابل توجهی از فیبرهای غذایی در یک رژیم غذایی منظم به حفظ سلامت روده با کاهش بروز بیماری های مرتبط با سبک کاری کم تحرکی مانند: بیماری های قلبی عروقی، دیابت و چاقی کمک می کند. بر اساس حالیت، این بخش از پلیمرهای کربوهیدراتی غیرقابل هضم به عنوان محلول و نامحلول طبقه بندی می شوند. دسته اول فیبر غذایی محلول، شامل: پکتین، صمغ ها و موسیلاژهای دانه ها است در حالی که گروه دوم فیبر غذایی نامحلول، شامل: سلولز، همی سلولز و لیگنین است (Dai & Chau, 2017).

(غذاهای کشت یافته یا آزمایشگاهی حاصل از رشد سلول های حیوانی، گیاهی یا میکروبی در شرایط کنترل شده)

بر این اساس، مواد غنی از فیبر به دلیل ماهیت ذاتی خود، «غیرقابل چاپ» محسوب شده و برای دستیابی به عملکرد مطلوب، نیازمند کاهش اندازه ذرات، هیدراسیون بهینه و ترکیب با هیدروکلوئیدها هستند.

غذایی» در چاپ سه بعدی مورد بررسی قرار گرفت و تأثیر اندازه ذرات بر عملکرد چاپ ارزیابی شد. نتایج نشان داد که افزودن ۱۰ درصد (وزنی/وزنی) صمغ زانتان، ظرفیت نگهداری آب در اسفناج را بهبود می بخشد. همچنین، ذرات با ابعاد بزرگ تر، پایداری مکانیکی سازه های چاپی را افزایش دادند (شکل ۶) (Lee, Won, Kim, Park, 2019).



شکل ۶- اثر اندازه ذرات بر چاپ سه بعدی پودر اسفناج فیبری: (۱) ۳۰۷ μm ، (۲) ۲۵۹ μm ، (۳) ۱۷۲ μm و (۴) ۵۰ μm (Lee et al., 2019)

Fig. 6. Effect of particle size on 3D printing of fibrous spinach powder:
(1)307 μm , (2)259 μm , (3)172 μm , (4)50 μm (Lee et al., 2019)

به افزودن عوامل اتصال دهنده^۱، برای فرآیند چاپ آماده می سازد. این دسته شامل هیدروژل ها، خامه قنادی، پنیر، خمص، بستنی، پودر شکر و مواد اولیه بر پایه ی نشاسته است (Sun, Zhou, Yan, Huang, & Lin, 2018b). قابلیت چاپ مطلوب در این مواد، تا حد زیادی به پارامترهایی نظیر مقدار ماده جامد کل، درصد پرشدگی، ویژگی های رئولوژیکی، استحکام مکانیکی، تنش تسلیم مناسب، مدول الاستیک (G') بالا، ویسکوزیته ی بالا و تانژانت اتلاف پایین بستگی دارد؛ عواملی که همگی برای حفظ پایداری ساختار محصول نهایی ضروری هستند (Hussain, Malakar, & Arora, 2022). اگرچه این مواد قابلیت چاپ بالایی دارند، اما لزوماً به عنوان یک وعده ی غذایی کامل مطرح نیستند؛ از این رو، برای دستیابی به فرآورده هایی با ارزش تغذیه ای مطلوب، بهینه سازی فرمولاسیون ضروری است. با توجه به ماهیت متنوع مواد غذایی، ارائه ی یک سیستم طبقه بندی واحد برای تمامی مواد قابل چاپ دشوار است. از این رو، تقسیم بندی جامعی از این مواد بر اساس منبع و نوع ترکیب پایه ی سیستم غذایی در جدول ۱ ارائه شده است (Anandharamakrishnan et al., 2022).

مواد اولیه بر پایه شکر (قندها و شیرینی جات)

مواد مبتنی بر شکر، به دلیل انعطاف پذیری بالا و آزادی عمل گسترده در فرآیند تولید، جایگاه ویژه ای در چاپ سه بعدی دارند. این دسته شامل انواع محصولات قنادی است که با سطوح بالای سفارشی سازی قابل چاپ هستند. برای نمونه، شکلات به عنوان یک ماده ویسکوالاستیک متشکل از پودر کاکائو، شیر خشک و چربی،

طبقه بندی مواد اولیه غذایی بر اساس قابلیت چاپ

بر اساس ماهیت و قابلیت چاپ مواد اولیه، اجزای مورد استفاده در چاپ سه بعدی را می توان به سه دسته ی مواد ذاتاً قابل چاپ، مواد غیرقابل چاپ، و مواد جایگزین طبقه بندی کرد (Sun et al., 2018a). دسته ی نخست شامل مواد ذاتاً قابل چاپ مانند شکلات، پنیر، خامه قنادی، هیدروژل ها و موارد مشابه است که به طور طبیعی و بدون نیاز به افزودنی های خاص، قابلیت چاپ دارند. این دسته از مواد معمولاً به فرآیند آماده سازی کمتری پیش از چاپ نیاز دارند. دسته ی دوم شامل مواد غذایی رایج مانند غلات اصلی، میوه ها و سبزیجات، تخم مرغ و فرآورده های گوشتی است. این مواد اگرچه در رژیم غذایی روزمره متداول اند، اما به تنهایی قابل چاپ نیستند و برای تبدیل شدن به فرم قابل چاپ، نیازمند پیش پردازش هایی مانند افزودن مواد کمکی یا ترکیب با درصد مناسبی از مواد ذاتاً قابل چاپ هستند. در این میان، استفاده از هیدروکلوئیدهای غذایی به عنوان افزودنی، رایج ترین راهبرد برای بهبود چاپ پذیری مواد غیرقابل چاپ به شمار می رود. دسته ی سوم نیز شامل مواد جایگزین مانند حشرات، جلبک ها، قارچ ها و دانه های لوپین است که با وجود برخورداری از ارزش تغذیه ای مناسب، در بسیاری از فرهنگ ها به عنوان غذاهای غیرمعارف شناخته می شوند (Sun et al., 2015).

مواد اولیه غذایی قابل چاپ

همان طور که پیش تر اشاره شد، مواد اولیه ی «ذاتاً قابل چاپ» از ویژگی های ویسکوالاستیک مطلوبی برخوردارند که آن ها را بدون نیاز

(Lanaro, Desselle, & Woodruff, 2019). نخستین گزارش از چاپ سه بعدی ساختارهای قندی با استفاده از فناوری تفجوشی توسط اسکای و ادمان، ارائه شد (Oskay, & Edman, 2009).

جدول ۱- طبقه‌بندی گسترده‌ای از مواد قابل چاپ
Table 1- Broad classification of printable materials

مواد چاپ پذیر Natively printable materials				
ژل های غذایی Food gels		غذاهای خمیری / خمیرها Food dough/Pastes		قندها و شیرینی جات Sugars and confectioneries
الئوژل ها Oleogels	هیدروژل ها Hydrogels	خمیری ترکیبی Composite dough	میتنی بر پروتئین Protein-based	میتنی بر غلات Cereal-based
	برپایه پروتئین Protein-based			
	برپایه نشاسته Starch-based			

بر سطح غذاها با استفاده از شکلات طراحی شده است. برخلاف روش‌های مبتنی بر پودر، چاپ جوهرافشان امکان تولید محصولاتی با طعم و بافت بسیار مشابه با غذاهای سنتی را فراهم می‌کند. در نهایت، پیاده‌سازی فناوری‌های نوین چاپ سه‌بعدی در حوزه فرآورده‌های قندی، فرصت‌های بی‌نظیری برای نوآوری در بافت، طعم و مزه ایجاد کرده است (Takagishi, Suzuki, & Umezu, 2018). **جدول ۲**

نمونه‌هایی از چاپ مواد مبتنی بر شکلات را گزارش کرده است.

مواد اولیه مبتنی بر غلات

مواد اولیه مبتنی بر غلات معمولاً به صورت نیمه جامد و خمیری هستند و برای دستیابی به جریان پذیری و قوام یکنواخت، به اختلاط و پیش فرآیند مناسب نیاز دارند. غلات بخش عمده‌ای از رژیم غذایی روزانه را تشکیل می‌دهند و در سال‌های اخیر، پژوهش‌ها بر بررسی قابلیت چاپ مواد غذایی مبتنی بر نشاسته، به عنوان فرمولاسیون‌های پایه برای تدوین دستورالعمل‌های چاپ دیجیتال با استفاده از فناوری چاپ سه بعدی، متمرکز شده‌اند. جزء اصلی غلات، نشاسته و به ویژه آمیلوز است (Huang, & Perdon, 2020) که نقش مهمی در شکل‌گیری ساختار و بهبود چاپ‌پذیری مواد مبتنی بر نشاسته دارد. با توجه به ماهیت این مواد اولیه، خمیر نیمه‌جامدی از اجزای خشک دانه‌های غلات، از طریق مخلوط کردن آرد آن‌ها با آب و انجام پیش‌فرآیند مناسب، تشکیل می‌شود. ویسکوزیته خمیر حاصل باید به گونه‌ای باشد که ماده بتواند از نازل با قطر کم عبور کند و در عین حال، وزن لایه‌های انباشته شده را بدون کج شدن یا فروریختن تحمل کند تا سازه سه بعدی با وضوح مناسب ایجاد شود؛ این امر ارتباط مستقیم چاپ‌پذیری با خواص رئولوژیکی را نشان می‌دهد (Chen et al.,

پژوهش‌های متعددی بر بررسی قابلیت چاپ آرد غلات مختلف، به‌صورت خالص و یا در ترکیب با افزودنی‌هایی نظیر صمغ زانتان، صمغ گوار و سایر هیدروکلوئیدها متمرکز شده‌اند که خلاصه‌ای از آن‌ها در **جدول ۳** ارائه شده است. این مطالعات بینش‌های ارزشمندی را در خصوص بهینه‌سازی فرمولاسیون مواد اولیه نشاسته‌ای جهت تولید محصولات غذایی فراسودمند (سالم) با استفاده از فناوری چاپ سه‌بعدی فراهم می‌آورند.

(2019a). بیشتر مواد اولیه مبتنی بر نشاسته برای چاپ به روش اکستروژن در دمای اتاق مناسب هستند (Theagarajan *et al.*, 2020). خمیر در طول فرآیند اکستروژن، رفتار رقیق‌شوندگی از خود نشان می‌دهد (Wang *et al.*, 2022). محققین تأثیر ترکیبات مواد اولیه بر چاپ‌پذیری خمیر نان را بررسی کردند. نتایج نشان داد که تغییر در نسبت اجزای خام خمیر نان، تأثیر قابل توجهی بر کیفیت چاپ سازه‌های سه‌بعدی دارد (Yang, Zhang, Prakash, & Liu, 2018).

جدول ۲- خلاصه‌ای از مکانیزم قابلیت چاپ مواد بر پایه شکر

Table 2- Summary of the mechanism of printability of sugar-based material

ماده چاپ‌پذیر Printable material	دمای اکستروژن Extrusion temperature	ترکیب مواد Material composition	نتایج Results
شکلات Chocolate	ذوب گرم (۳۲ °C) با بستر گرم (۱۵-۱۶ °C) Hot-melt (32 °C) with heated bed (15-16 °C)	شکلات تلخ شرکت های کادبری و کالیبات Cadbury and Callebaut dark chocolate	خصوصیات حسی و بافتی نمونه‌ها با تغییر درصد پر شدن تغییر یافته است. Sensory and textural properties of samples were altered by varying the infill percentage
شکلات Chocolate	اکستروژن ذوب گرم (۳۲-۴۰ °C) Hot-melt extrusion (32-40 °C)	شکلات، شیر شرکت کادبری Cadbury milk chocolate	موفقیت در رسوب شکلات به ویژگی‌های مواد و متغیرهای چاپ بستگی دارد. The successful deposition of chocolate depends upon the material characteristics and printing variables

جدول ۳- خلاصه‌ای از مکانیزم قابلیت چاپ مواد بر پایه غلات

Table 3- Summary of the mechanism of printability of cereal-based material

ماده قابل چاپ Printable material	دمای اکستروژن Extrusion temperature	ترکیب مواد Material composition	نتایج Results
جوهر مبتنی بر غلات Cereal-based ink	دمای اتاق (۲۱ °C) Room temperature (21 °C)	آرد گندم، نشاسته گندم و پروتئین سفیده تخم‌مرغ Wheat flour, wheat starch, and egg white protein	ویژگی‌های ابعادی و رفتارهای کیفی نمونه‌ها به صورت کمی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. Dimensional attributes and quality behaviours of samples are quantitatively studied
ژل‌های ساخته شده از غلات انتخابی Gels made out of selected cereal grains	دمای اتاق (۲۵ °C) Room temperature (25 °C)	برنج سیاه، برنج قهوه‌ای ، باکویت، ماش، بذر اشک روپاه Black rice, Brown rice, Buckwheat, Mung bean, Job's tear seeds	در میان مواد آزمایش شده، ماش قوی‌ترین ژل را تولید می‌کند در حالی که دانه‌های اشک روپاه دارای ساختار ضعیفی هستند. Among the tested materials, mung bean gel yields the strongest gel while job's tear seeds possessed weak structure
ژل نشاسته Starch gel	ذوب گرم (۴۵ °C) Hot-melt (45 °C)	نشاسته سیب‌زمینی، نشاسته گندم، نشاسته ذرت Potato starch, Wheat starch, Corn starch	نشاسته گندم دارای شبکه‌ای منظم از ریزساختار، ویسکوزیته پایین‌تر و قابلیت خروج بهرتر بود. Wheat starch possessed a regular network of microstructure, lower viscosity with better extrudability
آرد ترکیبی بومی Indigenous composite flour	دمای اتاق (۲۵ °C) Room temperature (25 °C)	ماش، ماش سرخ شده، ارزن و دانه‌های زنجان Gram, fried gram, barnyard millet, and ajwain seeds	آرد مرکب بومی غنی از فیبر و پروتئین بدون هیچ افزودنی چاپ شد. Fibre and protein rich indigenous composite flour was printed without any additives
خمیر برنج Rice dough	دمای اتاق (۲۵ °C) Room temperature (25 °C)	برنج جاپونیکا، برنج ایندیکا و برنج مومی Japonica rice, indica rice, and waxy rice	اثر ترکیب مواد بر کیفیت غذاهای مبتنی بر برنج چاپ شده بررسی شد. Effect of material formulation on the quality of the examined printed rice-based foods was
خمیر برنج قهوه‌ای Brown rice paste	دمای اتاق (۲۵ °C) Room temperature (25 °C)	پودر برنج قهوه‌ای، مخلوط صمغ‌های گوار و زانتان Brown rice powder, xanthan gum- guar gum mix	ویژگی‌های بافتی به شدت با متغیرهای چاپ مانند تراکم پر کردن و سایز نازل همبستگی دارد. Textural properties were strongly correlated with the printing variables such as infill density, perimeters, and nozzle size
نشاسته برنج Rice starch	دمای اتاق (۲۵ °C) Room temperature (25 °C)	نوع بومی برنج پوننی Indigenous rice variety ponni	این مطالعه یک پایه علمی برای چاپ سه بعدی مواد غذایی در آینده با استفاده از نشاسته برنج ارائه می‌دهد. This study provides a scientific base for future 3D printing of foods using rice starch.
سیب‌زمینی، برنج و نشاسته ذرت Potato, rice, and corn starches	ذوب گرم (۷۰-۸۵ °C) Hot-melt (70-85 °C)	-	سوسپانسیون نشاسته با غلظت ۱۵-۲۵ درصد (وزنی/وزنی) بیشترین قابلیت اکسترون شدن و استحکام مکانیکی را نشان داد. Starch suspensions of concentration 15-25% (w/w) possessed excellent extrudability and mechanical integrity

مواد مبتنی بر پروتئین

چاپ سه بعدی، گزارش کردند. در فرایند مرسوم و چندمرحله ای آماده سازی سوریمی، کیفیت ژل ممکن است کاهش یابد و این ژل، استحکام کافی برای حفظ سازه های سه بعدی نداشته باشد. از این رو، نشاسته سیب زمینی شیرین برای بهبود ویژگی های رئولوژیکی ژل سوریمی به کار رفت. نتایج نشان داد که ژل سوریمی حاوی نشاسته سیب زمینی شیرین، از استحکام ژلی مناسبی همراه با بافتی نرم تر برخوردار است. این ویژگی به دلیل پیوندهای متقابل میان پروتئین های میوفیبریلار ماهی و نشاسته سیب زمینی شیرین بود که ساختاری یکنواخت و توده مانند ایجاد می کند و آن را برای چاپ سه بعدی مناسب می سازد (Dong et al., 2019).

انواع مختلفی از پژوهش ها با تمرکز بر تأثیر خواص فیزیکی شیمیایی بر قابلیت چاپ مواد غذایی مبتنی بر پروتئین در حال انجام است (جدول ۴). تولید فرآورده هایی مانند پنیر، توفو (پنیر سویا)، گوشت چرخ کرده و سایر محصولات مشابه، مستلزم دنا توره شدن و انعقاد هم زمان مولکول های پروتئینی است که این فرآیند به بهبود خواص بافتی محصول نهایی کمک می کند. دونگ و همکاران (Dong et al., 2019)، مطالعه ای درباره قابلیت چاپ ژل سوریمی حاوی نشاسته سیب زمینی شیرین، به عنوان یک تقویت کننده ساختاری بالقوه برای

جدول ۴- خلاصه ای از مکانیزم قابلیت چاپ مواد بر پایه پروتئین

Table 4- Summary of the mechanism of printability of protein-based material

ماده چاپ پذیر Printable material	دمای اکستروژن Extrusion temperature	ترکیب مواد Material composition	نتایج Results
پنیر Cheese	ذوب گرم (۶۰ °C) Hot-melt (60 °C)	پنیر با میزان کلسیم متفاوت ۱۵/۸ الی ۳۱ میلی گرم کلسیم در هر گرم پروتئین Cheese with different calcium levels of 15.8 to 31 mg of Ca/g of protein	تبدیل سل-ژل در دامنه دمای ۶۰-۵۲ درجه سانتی گراد به طور ناگهانی با کاهش کلسیم، کاهش یافت. Among the tested samples, the gel-sol transition ranged from 52 to 60 °C that significantly decreased with decreasing calcium levels.
پنیر Cheese	ذوب گرم (۷۵ °C) Hot-melt (75 °C)	پنیرهای تیمار نشده؛ ذوب شده و چاپ شده سه بعدی در دماهای مختلف Untreated, melted, printed cheeses at different extrusion rates	ویژگی های بافتی مانند سختی می تواند در حین چاپ تعیین شود. This study showed that the textural properties like hardness could be tailored through 3D printing.

بهبود دسترسی زیستی. به دلیل همین کاربردهای متنوع، ژل های غذایی در سال های اخیر مورد توجه ویژه ای قرار گرفته اند. بر اساس فاز محبوس در شبکه ژلی (هوا، آب یا روغن)، این مواد به ترتیب با نام های آروژل ها^۱، هیدروژل ها^۲ و اولئوژل ها^۳ طبقه بندی می شوند (Rebaka, Rachamalla, Batra, & Subbiah, 2020). با ظهور فناوری چاپ سه بعدی غذا، ساخت و طراحی شبکه های ژلی نرم تسهیل شده است و امکان تولید سازه های پیچیده با خواص بیولوژیکی سفارشی فراهم آمده است.

هیدروژل ها به عنوان مواد ویسکوالاستیک، رفتاری حد واسط بین جامد و مایع دارند و خواص الاستیک و ویسکوز را هم زمان بروز می دهند. بر اساس ساختار فیزیکی شبکه بیوپلیمری، هیدروژل ها به سه دسته ژل های ضعیف، شبه قوی و قوی تقسیم می شوند (Nazir, Asghar, & Maan, 2017). نمای شماتیک روش های ساخت هیدروژل در شکل ۷ و مطالعات متعدد پیرامون کاربردهای بالقوه چاپ سه بعدی آن ها در سیستم های غذایی در جدول ۶ ارائه شده است.

خمیرهای ترکیبی

جدول ۵، نمونه هایی از پژوهش های انجام شده در زمینه چاپ سه بعدی پوره ها، خمیرهای غذایی و خمیرهای ترکیبی را ارائه می دهد. در این مطالعات، ترکیبات متنوعی شامل منابع پروتئینی، نشاسته ای، لیپیدی و هیدروکلوئیدها مورد بررسی قرار گرفته اند. جزئیات مربوط به مواد اولیه، شرایط عملیاتی فرآیند و نتایج حاصل از این تحقیقات در جدول مذکور درج شده است.

سیستم های غذایی مبتنی بر ژل

ژل های غذایی، شبکه های پلیمری سه بعدی هستند که عمدتاً از پلی ساکاریدها و پروتئین ها تشکیل شده اند. این ساختارها کارکردهای متعددی دارند، از جمله: تنظیم ویژگی های بافتی و حسی، تثبیت ساختارهای غذایی ناپایدار، افزایش ماندگاری، بهبود ویژگی های فیزیکی شیمیایی (مانند افزایش احساس سیری)، جایگزینی چربی و

جدول ۵- خلاصه‌ای از مکانیزم قابلیت چاپ پوره‌ها، خمیرهای غذایی و خمیرهای ترکیبی

Table 5- Summary of the mechanism of printability of puree, food paste and composite dough

ماده چاپ پذیر Printable material	دمای اکستروژن Extrusion temperature	ترکیب مواد Material composition	نتایج Results
پوره سیبزمینی Mashed potato	دمای اتاق (۲۵ °C) Room temperature (25 °C)	سیبزمینی (پخته بخارپز)، ۱۵٪ ترهالوز (وزنی/وزنی)، و نشاسته سیبزمینی (۲، ۱، ۰ و ۴٪) Potato (steam cooked), 15% trehalose (w/w), and starch (0, 1, 2, and 4%) potato	این مطالعه ارتباط معناداری بین خواص مواد و قابلیت چاپ با افزایش نسبت نشاسته سیبزمینی را برقرار می‌کند. This study establishes a significant correlation between the material properties and printability with increased proportion of potato starch
پوره سیبزمینی تجاری Commercial potato puree	گرم (۳۰ °C و ۲۰ °C) Hot (10, 20, and 30 °C)	پوره سیبزمینی و شیر کامل Potato puree and whole milk	نتایج نشان داد که قابلیت چاپ با شاخص همگنی افزایش و با شاخص رفتار کاهش می‌یابد. Results showed that printability increased with consistency index and decreased with the behaviour index.
پوره سیبزمینی Potato puree	دمای اتاق (۲۰ °C) Room temperature (20 °C)	سیبزمینی پخته، پوره هویج، روغن زیتون، کره، آلژینات و آگار Cooked potato, carrot puree, olive oil, butter, alginate, and agar	اثر روش‌های مختلف پخت (گرمایش مایکروویو و جوشاندن) بر تغییرات میکروساختاری نشاسته برای چاپ سه‌بعدی مورد مطالعه قرار گرفت. The effect of different cooking methods (microwave heating and boiling) on microstructural changes of starch for 3D printing was studied.
خمیر کوکی Cookie dough	دمای اتاق (۲۵ °C) Room temperature (25 °C)	آرد برنج، آرد گندم، آرد تاپوکا، کره و چربی، شکر، پودر شیر و آب Rice flour, wheat flour, tapioca flour, butter and shortening, sugar, milk powder, and water	کارایی مولکول‌های نشاسته به شدت بر خواص فیزیکوشیمیایی مخلوط چاپ تأثیر گذاشته است. Functionality of the starch molecules greatly affected physiochemical property of printing mixture
خمیر نانوبایی Baking dough	دمای اتاق (۲۵ °C) Room temperature (25 °C)	شکر قنادی، کره، تخم مرغ، آرد کم گلوتن و آب Icing sugar, butter, egg, low gluten flour, and water	سرکودن سریع پس از فرآیند ساخت ساختارهای چاپ شده (۶۵- درجه سانتی‌گراد برای حدود ۱۰ دقیقه) در ثبات ساختار و شکل در حین پخت مفید بود. Post-process fast cooling of the 3D printed structures (-65 °C for approximately 10 min) was beneficial in structure and shape stability during baking
خمیر مرکب Composite dough	دمای اتاق (۲۵ °C) Room temperature (25 °C)	آرد گندم، پودر انبه خشک شده به روش انجمادی، روغن زیتون و آب Wheat flour, freeze dried mango powder, olive oil, and water	تأثیر ترکیب ماده بر ویژگی‌های چاپ سه‌بعدی خمیر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. Effect of the material composition on the 3D printing characteristics of dough was analyzed
خمیر نانوبایی Baking dough	دمای اتاق (۲۵ °C) Room temperature (25 °C)	آرد کم گلوتن، شکر قنادی، کره، تخم مرغ و آب Low gluten flour, icing sugar, butter, egg, and water	یک ژل شبه‌پلاستیک با استحکام ژل بالاتر، قابلیت اکستروژن، الاستیسیته و چکش خواری پایین‌تر برای دستیابی به قابلیت بالاتر در چاپ مطلوب بود. A pseudoplastic gel with higher gel strength, extrudability, elasticity, and a lower ductility were desirable for achieving higher print fidelity
خمیر کوکی Cookie dough	دمای اتاق (۲۵ °C) Room temperature (25 °C)	نشاسته گندم، آرد کم گلوتن، شکر، کره و تخم‌مرغ Wheat starch, low gluten flour, sugar, butter, and egg	پیش‌تیمار با مایکروویو به‌طور قابل‌توجهی درجه ژلاتینه شدن را افزایش داده و ویسکوزیته، سختی و الاستیسیته خمیر را بهبود بخشید. Microwave pre treatment significantly increased the degree of gelatinization and improved viscosity, hardness, and elasticity of dough.
خمیر مبتنی بر پروتئین پلازما Plasma protein based dough	دمای اتاق (۲۰ °C) Room temperature (20 °C)	پروتئین پلازما از خوک، کنسانتره‌های پروتئین نخود و ایزوله پروتئین سویا Porcine plasma protein, pea protein concentrates, and soy protein isolate	خمیر با پروتئین پلازما از خوک بین ۴۲/۵ تا ۴۷/۵٪ (وزن/وزن) نشان‌دهنده عملکرد بالاتر در چاپ بود. همچنین، خمیر مخلوط با کنسانتره پروتئین نخود و ایزوله پروتئین سویا در مقادیر ۱۰ تا ۱۵٪ (وزن/وزن) قابلیت چاپ بهتری داشت. Dough with porcine plasma protein between 42.5 and 47.5% (w/w) showed higher printing performance. Also, mixed dough with pea protein concentrate and soy protein isolate of 10-15% (w/w) possessed better printability.

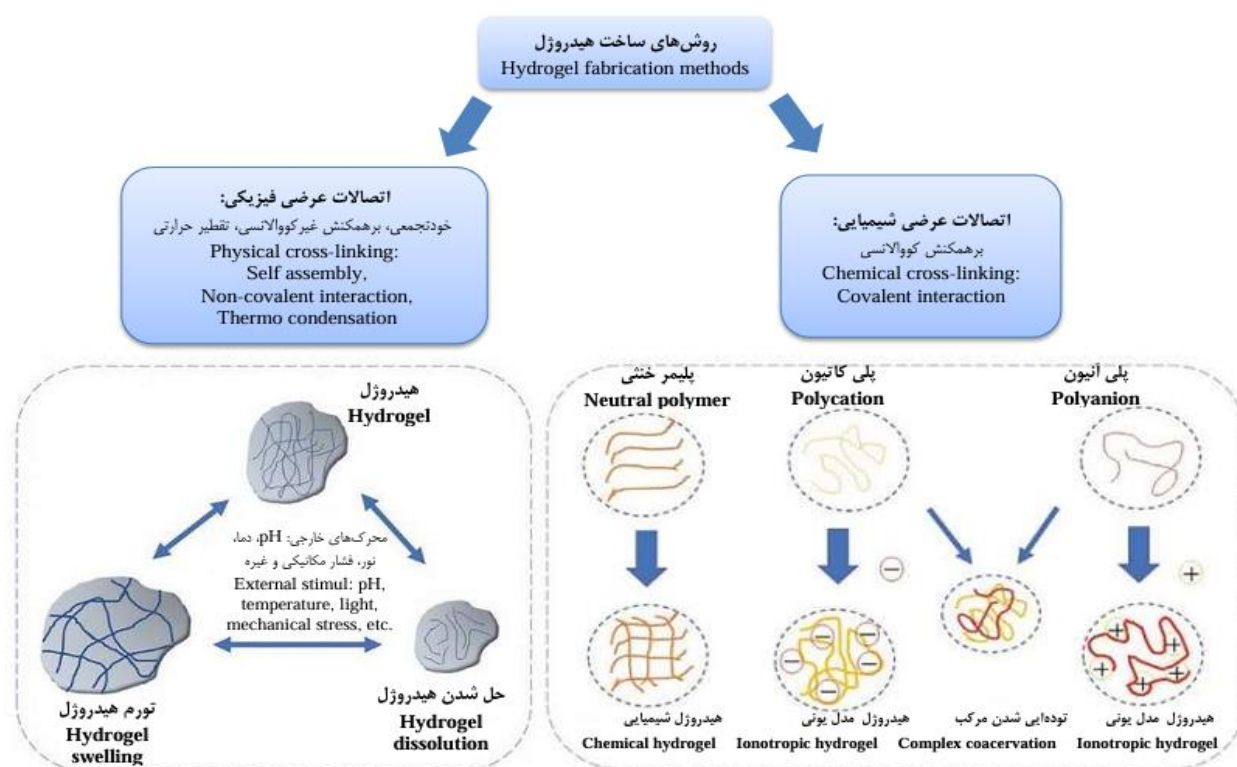
دارویی به‌عنوان سیستم‌های انتقال دارو کاربرد دارند. امروزه تحقیقات بر کاربرد فناوری چاپ سه‌بعدی برای انتقال اجزای زیست‌فعال از طریق اولئوژل‌های زیست‌سازگار مشتق شده از روغن‌های گیاهی متمرکز شده است. اولئوژل‌ها سیستم‌های نیمه‌جامدی هستند که در آن‌ها فاز مایع

دسته دیگری از ژل‌ها که اخیراً مورد توجه قرار گرفته‌اند، اولئوژل‌ها هستند. اولئوژل‌ها از جایگزینی فاز مایع هیدروژل‌ها با حلال‌های غیرقطبی (مانند روغن) حاصل می‌شوند (Co, & Marangoni, 2018). این مواد در صنایع غذایی به‌عنوان ژل‌های خوراکی و در صنایع

چربی را برای چاپ سه‌بعدی مبتنی بر اکستروژن بررسی کردند. در این مطالعه، قابلیت چاپ فرمولاسیون‌های حاصل از مخلوط مونوگلیسریدها و فیتواسترول‌ها ارزیابی شد. نتایج نشان داد که مخلوط‌های حاوی ۳۰ و ۴۰ درصد (وزن/وزن) فیتواسترول، که با ۱۰ و ۲۰ درصد (وزن/وزن) مونواسترها فرموله شده بودند، به دلیل پایین‌تر بودن دمای ژل‌زایی، قابلیت چاپ بهتری داشتند (Cotabarren et al., 2019). بنابراین، اولئوژل‌ها به‌عنوان ابزاری کارآمد برای ساختاردهی به روغن و انتقال دارو، جایگاه ویژه‌ای در صنایع غذایی و دارویی پیدا کرده‌اند (Anandharamakrishnan et al., 2022).

آلی در یک شبکه ویسکوالاستیک سه‌بعدی، حاصل از اتصالات عرضی پلیمری، محبوس شده است. این ساختارها بر اساس وزن مولکولی شبکه به دو دسته تولیدکنندگان اولئوژل با وزن مولکولی کم و نوع پلیمری با وزن مولکولی زیاد تقسیم می‌شوند (Rebaka et al., 2020). دسته اول شامل آلکان‌ها، موم‌ها، اسیدهای چرب، الکل‌های چرب، فیتواسترول‌ها، سرامیدها، استرها، لسیتین، سورفاکتانت‌ها، تریترپنوئیدها، مونوگلیسریدها و مشتقات تری‌گلیسرید است؛ در حالی که دسته دوم شامل پلیمرهای مشتق سلولزی، پلی‌ساکاریدهای محلول در آب و پروتئین‌ها می‌باشد.

به تازگی، کوتابارن و همکاران (Cotabarren, Cruces, & Palla, 2019) قابلیت‌های اولئوژل‌های حاوی مواد مؤثره محلول در



شکل ۷- روش‌های به کار رفته برای ساخت هیدروژل‌ها (Anandharamakrishnan et al., 2022)

Fig. 7. Methods used for hydrogel fabrication (Anandharamakrishnan et al., 2022)

پژوهش‌ها بر تولید غذاهای سنتی از طریق چاپ سه‌بعدی متمرکز شده‌اند. در این روش، مواد خام غیرقابل چاپ ابتدا با فرآیندهایی مانند آسیاب کردن، برش‌دادن و چرخ کردن، به ذرات ریز تبدیل می‌شوند؛ سپس با یکدیگر مخلوط و همگن می‌گردند. در نهایت، هیدروکلوئیدهای مناسب به آن‌ها افزوده می‌شود و فرآورده نهایی به‌صورت ژل، امولسیون یا کلوئید برای چاپ توسط چاپگر آماده می‌شود (Anandharamakrishnan et al., 2022).

مواد اولیه غذایی غیر قابل چاپ

مواد غذایی که به‌طور ذاتی غیرقابل چاپ هستند، نظیر غلات، حبوبات، سبزیجات، میوه‌ها، غذاهای دریایی و فرآورده‌های گوشتی، بخش عمده‌ای از رژیم غذایی مردم را در سراسر جهان تشکیل می‌دهند. با پیشرفت‌های حاصل در حوزه فناوری چاپ سه‌بعدی، امروزه می‌توان از این مواد برای تولید محصولات غذایی جدید با اشکال، ساختارها، طعم‌ها و بافت جذاب و متفاوت بهره برد (Sun et al., 2018a). امروزه،

جدول ۶- خلاصه‌ای از مکانیزم قابلیت چاپ سیستم‌های غذایی مبتنی بر ژل

Table 6- Summary of the mechanism of printability of Gel-based food systems

ماده چاپ پذیر Printable material	دمای اکستروژن Extrusion temperature	ترکیب مواد Material composition	نتایج Results
ژل ترکیبی پروتئین شیر Milk protein composite gel	دمای اتاق (۲۵ C°) Room temperature (25 °C)	کنسانتره پروتئین شیر و کازینات سدیم Milk protein concentrate and sodium caseinate	ژل پروتئین شیر حاوی ۴۰۰ تا ۴۵۰ گرم در هر کیلوگرم پروتئین کل بهترین مطابقت با مدل چاپ را داشت. Milk protein gel containing 400–450g of total protein possessed best print fidelity
شبیه سازی غذایی پروتئین شیر Milk protein food simulant	دمای اتاق (۲۵ C°) Room temperature (25 °C)	ایزوله پروتئین وی، کنسانتره پروتئین شیر، گلیسرول و صمغ زانتان Whey protein isolate, milk protein concentrate, glycerol, and xanthan gum	کنسانتره پروتئین شیر: ایزوله پروتئین آب پنیر با نسبت ۵ به ۲ عملکرد بهتری در چاپ نشان داد. Milk protein concentrate: whey protein isolate of 5 showed better printing performance : 2 proportion
ژل پروتئین نخود فرنگی Pea protein gel	دمای اتاق (۲۵ C°) Room temperature (25 °C)	پروتئین نخود فرنگی، زایلوز، پروتئاز، گلیسرول و نشاسته سیب‌زمینی Pea protein, xylose, protease, glycerol, and potato starch	محصولات واکنش میلارد زایلوز بالاترین درجه پیوند متقابل را داشتند که بهترین چسبندگی و همبستگی را نشان داد. Xylose Maillard reaction products had the highest degree of cross linking showed a strongest adhesion and cohesion
ژل پروتئین نخود فرنگی Pea protein gel	دمای اتاق (۲۵ C°) Room temperature (25 °C)	پروتئین نخود، پودر آلژینات و کلرید کلسیم Pea protein, alginate powder, and calcium chloride	نسبت آلژینات به پروتئین نخود ۸۰ به ۲۰ عملکرد چاپ بهتری نشان داد. Alginate to pea protein proportion of 80 : 20 showed better printing performance
هیدروژل Hydrogel	-	آگار و ژلاتین (که به طور جداگانه استفاده می‌شوند) Agar and gelatin (used individually)	فرمولاسیون آزمایش شده سیستم‌های ژل دارای سختی بین ۸ تا ۴۵ کیلوپاسکال بود که بافتی نرم و شبیه به ژله داشت. Tested formulation of gel systems had hardness ranged from 8 to 45kPa possessing a soft jelly-like texture
قالب‌های هویجی Carrot moulds	دمای اتاق (۲۵ C°) Room temperature (25 °C)	پوره هویج، صمغ گوار، صمغ زانتان و ژلاتین Carrot puree, Guar gum, xanthan gum, and gelatin	نمونه‌های دارای ژلاتین و گوار گام دارای سختی بیشتر و بافت متراکم‌تری بودند. The samples with gelatin and xanthan gum possessed higher hardness and densest texture
هیدروژل Hydrogel	دماهای (۲۵-۵۰ C°) temperatures (25-50 °C)	صمغ زانتان و کنجک Xanthan and Konjac gum	افزایش محتوای شربت منجر به ایجاد یک ژل ضعیف شد. ترکیب مواد تأثیر قابل توجهی بر خواص بافتی و رئولوژیکی داشت. Increasing syrup content resulted in a weakgel. Material composition had significant impact on textural and rheological properties.
ژل ایزوله پروتئین سویا Soy protein isolate gel	دمای اتاق (۲۵ C°) Room temperature (25 °C)	ایزوله پروتئین سویا، صمغ زانتان و کلرید سدیم Soy protein isolate, xanthan gum, and sodium chloride	ژل پروتئین ایزوله سویا با صمغ زانتان و محلول کلرید سدیم در غلظت ۱ گرم/۱۰۰ میلی‌لیتر نشان‌دهنده قابلیت چاپ بهتری بود. Soy protein isolate gel with xanthan gum and NaCl solution at 1 g/100 ml showed better printability.
هیدروژل Hydrogel	دمای اتاق (۲۵ C°) Room temperature (25 °C)	نشاسته کاساوا Cassava starch	نمونه‌های چاپ‌شده با حرارت خشک دارای قابلیت چاپ بهتری نسبت به نمونه‌های نشاسته‌ای بومی هستند. Dry heat treatment 3D printed samples exhibit better printability than native starch samples
هیدروژل Hydrogel	دمای اتاق (۲۵ C°) Room temperature (25 °C)	صمغ زانتان، لوبیای لوکاست، کاراگینان، پکتین، آگار، آلژینات سدیم، گوار، صمغ عربی، مالتودکسترین، کاراگینان ایوتا و ژلاتین Xanthan, locust bean, carrageenan, pectin, agar, sodium alginate, guar, gum Arabic, maltodextrin, iota carrageenan, and gelatin	زاویه فاز و شاخص آرامش می‌تواند برای درک رفتار ویسکوالاستیک مواد مورد استفاده قرار گیرد. The phase angle and relaxation exponent could be used for understanding of viscoelastic behaviour of the material supplies.
هیدروژل Hydrogel	دمای اتاق (۲۵ C°) Room temperature (25 °C)	نشاسته کاساوا Cassava starch	تأثیرات تیمار ازن در نشاسته اصلاح شده را نشان می‌دهد که می‌تواند برای تولید غذاهای مبتنی بر نشاسته چاپ شده مورد استفاده قرار گیرد. The effects of ozone treatment in starch modification that can be used for production of printed starch based food

چرا غذاهای سنتی غیر قابل چاپ هستند؟

غذاهای سنتی در رژیم غذایی روزمره ما، اغلب غنی از فیبر (میوه‌ها و سبزیجات)، پروتئین‌های رشته‌ای (فراورده‌های گوشتی) و رطوبت بالا

هستند؛ ویژگی‌هایی که به‌طور معمول مطلوبیت آن‌ها را برای چاپ سه‌بعدی کاهش می‌دهد و در نتیجه، آن‌ها را در دسته مواد غذایی غیرقابل چاپ قرار می‌دهد. علت اصلی این امر آن است که این مواد نسبت به مواد اولیه قابل چاپ، حاوی مقادیر کمتری از ترکیبات مؤثر

ساختارهای پلی ساکاریدی یا پروتئینی باشند که منشاء آن‌ها گیاهی، جلبکی، حیوانی یا میکروبی است (جدول ۷). نقش هیدروکلوئیدهای غذایی در جمع‌آوری و ساختاردهی غذاها بسیار چشمگیر است و کاربردهای وسیعی از جمله افزایش ظرفیت جذب آب، عمل به عنوان عامل ژل سازی و غلیظ کننده، تثبیت امولسیون‌ها، بهبود چسبندگی، فلوکولاسیون و تثبیت کف را شامل می‌شود. از این رو، هیدروکلوئیدهای غذایی به عنوان اسکلتی برای ساختارهای غذایی در نظر گرفته می‌شوند (Lu, Nishinari, Matsukawa, & Fang, 2020).

کیم و همکاران (Kim et al., 2018) مطالعه‌ای را به منظور ارزیابی مقایسه‌ای هیدروکلوئیدهای مختلف، از جمله صمغ گوار، صمغ ژلان، صمغ زانتان، صمغ لوبیای لوکاست، هیدروکسی پروپیل متیل سلولوز، متیل سلولوز و ژلاتین، برای کاربرد در چاپ مواد غذایی انجام دادند. هدف این مطالعه، چارچوب بندی یک سیستم طبقه بندی مبتنی بر ارزیابی قابلیت چاپ بود. در میان هیدروکلوئیدهای مورد بررسی، متیل سلولوز توانایی شبیه سازی رفتار تغییر شکل مواد غذایی را نشان داد و از پایداری مکانیکی خوبی برخوردار بود که با اکثر سیستم‌های غذایی با ویسکوزیته‌های متنوع سازگار است (Kim et al., 2018). در مطالعه‌ای دیگر، محققین یک سیال غذایی مبتنی بر پکتین را برای کاربردهای چاپ سه بعدی توسعه دادند. این پژوهش، تأثیر درجه متوکسیلاسیون پکتین را با غلظت یون‌های کلسیم به عنوان عامل اتصال عرضی، که به قابلیت چاپ کمک می‌کند، مرتبط دانست. نتایج نشان داد که فرمولاسیون جوهر مواد غذایی به شدت تحت تأثیر چگالی شبکه پلیمری و درجه اتصال عرضی آن با یون‌های کلسیم قرار دارد. افزودن قند به مواد غذایی نیز بر رفتار ویسکوالاستیک تأثیر گذاشته و بنابراین می‌تواند با قابلیت چاپ ارتباط مثبت داشته باشد. حضور قند، ماتریس پلیمری را کم‌آب کرده و از این طریق مکانیسم ژل سازی را با تشکیل پیوندهای هیدروژنی افزایش می‌دهد که منجر به مدول الاستیک بالاتر و در نتیجه ژل پکتین سفت تر می‌شود (Vancauwenberghe, Katalagarianakis, Wang, & Meerts, 2017).

با گنجاندن هیدروکلوئیدها در فرمولاسیون‌ها، امکان تولید سیستم‌های ژلی بر پایه گیاهان و جانوران که قابلیت چاپ دارند، فراهم می‌شود. علاوه بر این، مطالعات متعددی درباره چاپ سه بعدی ژل آب لیمو، ژل سیب زمینی له شده/آب توت فرنگی، سوریمی ماهی و فرآورده‌های گوشتی مانند گوشت گاو، خوک، مرغ، صدف و بوقلمون گزارش شده است. تمام این مطالعات، قابلیت چاپ سه بعدی غذاهای سنتی سالم را با ویژگی‌های بافتی، حسی و تغذیه‌ای بهبود یافته از طریق به کارگیری هیدروکلوئیدهای غذایی تأیید می‌کنند (Anandharamakrishnan et al., 2022).

(نظیر کربوهیدرات‌ها، پروتئین‌ها و چربی‌های خاص) هستند؛ ترکیباتی که مسئول مکانیسم‌های ژلاتیناسیون، هیدراتاسیون، روان سازی، توده سازی و سخت شدن (سفت شدن) هستند و در نهایت، قابلیت چاپ را به مواد اولیه می‌بخشند (Anukiruthika, Moses, & Anandharamakrishnan, 2020). پلاستیسیته ناکافی، ویسکوزیته پایین و مقاومت مکانیکی ضعیف، دلایل اصلی غیرقابل چاپ بودن این دسته از مواد غذایی هستند. پوره این مواد غالباً سیالیت بالایی از خود نشان می‌دهد و فاقد پلاستیسیته و شکل پذیری کافی برای حفظ ساختار پس از چاپ است. علاوه بر این، وجود ذرات درشت و مواد با محتوای سلولزی بالا، خطر انسداد نازل، در طول فرآیند چاپ را افزایش می‌دهد. در مورد مواد اولیه میوه و سبزیجات، چالش‌های دیگری نظیر تمایل به اکسیداسیون، قهوه‌ای شدن، رشد میکروبی و در نتیجه، از دست رفتن ارزش غذایی و کیفیت اولیه در طی فرآیند چاپ سه بعدی نیز وجود دارد (Li et al., 2022). با وجود چالش‌های ذکر شده، این مواد غذایی منبع غنی از آنتی اکسیدان‌ها، ویتامین‌ها و مواد معدنی ضروری برای بازسازی و احیای بدن محسوب می‌شوند. با این حال، استخراج و فرآوری مؤثر بخش‌های فیبری این مواد، یکی از چالش‌های شناخته شده در این زمینه است (Lille et al., 2018). فیبرها، تنها در ترکیب با سایر اجزای پلیمری مانند نشاسته و هیدروکلوئیدها، قابلیت چاپ پذیری پیدا می‌کنند. فیبرها دارای مزایای درمانی متعددی هستند، از جمله کمک به حفظ سلامت روده، کاهش کلسترول، کنترل سطح قند خون و کاهش خطر ابتلا به بیماری‌هایی نظیر چاقی، دیابت و بیماری‌های قلبی-عروقی (Yegin, Kopec, Kitts, & Zawistowski, 2020). در نتیجه، مطالعاتی در زمینه چاپ سه بعدی فیبرها با هدف ایجاد حس سیری، که می‌تواند به کاهش مصرف غذا و دریافت کالری کمک کند، انجام شده است. با توجه به ماهیت فیبری سبزیجات و فرآورده‌های گوشتی، بهبود چاپ پذیری آن‌ها مستلزم تنظیم دقیق خواص فیزیکوشیمیایی است. برای دستیابی به قوام و جریان مناسب در چاپگرهای اکستروژنی، کالیبراسیون میزان جامدات فرمولاسیون ضروری است. افزون بر این، مجموع جامدات موجود در مواد اولیه، معیاری کلیدی است که بر پایداری سازه‌های سه بعدی نهایی تأثیر می‌گذارد (Ricci, Derossi, & Severini, 2019).

نقش هیدروکلوئیدهای غذایی در بهبود قابلیت چاپ

مواد غیرقابل چاپ را می‌توان با تنظیم ویژگی‌های رئولوژیکی آن‌ها، مانند ویسکوزیته، غلظت و قابلیت جریان، از طریق افزودن هیدروکلوئیدها، به مواد قابل چاپ سه بعدی تبدیل کرد. هیدروکلوئیدها، همان طور که از نامشان پیداست، پلیمرهای آب دوستی هستند که حاوی گروه‌های هیدروکسیل می‌باشند. این گروه‌ها می‌توانند بخشی از

جدول ۷- خلاصه‌ای از نقش هیدروکلوئیدهای مهم تجاری در غذاها

Table 7- Summary of the role of commercially important hydrocolloids in foods

منبع Source	منشاء استخراجی Origin of extraction	هیدروکلوئید Hydrocolloid	دسته‌بندی غذا Food category	عملکرد Function
گیاهی Botanical	گیاهان Plants	نشاسته Starch	سس سالاد، سس‌ها، سوپ‌ها، مربا، ژله‌ها، بستنی‌ها، کیک‌ها، شیرینی‌ها، غذاهای پروتئینی و محصولات لبنی تخمیری	عامل غلیظ‌کننده و ژل‌ساز Thickening and gelling agent
			Salad dressing, sauces, soups, jam, jellies, ice cremes, cakes, candies, muscle foods, and cultured dairy products	
		پکتین Pectin	مواد پرکننده نانوائی، دسرهای یخی لبنی، مربا، ژله‌ها و مارمالادها	عامل پایدارکننده، غلیظ‌کننده و ژل‌ساز Stabilizer, thickening, and gelling agent
		سلولز Cellulose	محصولات نانوائی، پوشش‌های خامه‌ای، پوشش‌های خوراکی، شیرینی‌جات و محصولات غذایی بازسازی‌شده	عامل پایدارکننده، غلیظ‌کننده، ژل‌ساز و کمک به هم زدن Stabilizer, thickening, gelling, agent and whipping aid
	ترشحات صمغی درختان Tree gum exudates	صمغ عربی/آفاقیا Gum arabic/gum acacia	سس‌ها، دسرهای نوشیدنی‌ها، سس‌ها، کرم‌ها، شیرینی‌ها، پودینگ‌ها و پرکننده‌ها	عامل پایدارکننده، چسبنده، امولسیفایر، غلیظ‌کننده و ژل‌ساز
		صمغ کارایا Gum karaya	Soups, desserts, beverages, dressings, spreads, candies, puddings, and fillings	Stabilizer, binder, emulsifier, thickening and gelling agent
		صمغ تراگانگان tragacanth Gum	دسرهای سس‌ها، نوشیدنی‌های الکلی مبتنی بر تخم‌مرغ، پوشش‌های آجیل و تنقلات	عامل بافت‌دهنده، چسبنده، اتصال‌دهنده، تعلیق و غلیظ‌کننده
			Desserts, sauces, egg-based liqueurs, nut coatings, and snacks	Texturizer, adhesive, binding, suspension, and thickening agent
	گیاهی Botanical	صمغ قاطی Gum ghatti	بستنی‌ها، دسرهای یخ‌زده، آبنبات‌ها، فوندانت و کیک‌ها	عامل امولسیفایر و غلیظ‌کننده
			Ice-creams, frozen desserts, candies, fondant, and cakes	Emulsifying and thickening agent
		صمغ قاطی Gum ghatti	آبنبات‌ها، آدامس، پاستیل، محصولات نانوائی و شیرینی‌جات	امولسیفایر، تثبیت‌کننده، غلیظ‌کننده، پوشش‌دهنده و ژل‌ساز
			Candies, chewing gum, pastilles, bakery products, and confectioneries	Emulsifier, stabilizer, thickener, coating, and gelling agent
گیاهی Botanical	دانه‌ها Seeds	صمغ گوار Guar gum	محصولات نانوائی و پرکننده‌ها، محصولات لبنی تخمیری، دسرهای یخ‌زده لبنی و سس سالاد	عامل غلیظ‌کننده، امولسیون‌کننده، ژل‌ساز و ماده نگهدارنده
			Bakery products and fillings, cultured dairy products, frozen dairy desserts, and salad dressing	Thickener, emulsifier, gelling, and preserving agent
		صمغ دانه خرثوب Locust bean	محصولات لبنی تخمیری، سس سالاد، دسرهای یخ‌زده لبنی و مواد پرکننده نان	پایدارکننده، ژل‌ساز و غلیظ‌کننده عامل
			Cultured dairy products, salad dressing, frozen dairy desserts, and bakery fillings	Stabilizer, gelling, and thickening agent
	زایلوگلوکان Tamarind gum xyloglucan	تارا گام Tara gum	کالا‌های پخته‌شده، محصولات لبنی، دسرهای یخ‌زده، ژله‌ها، محصولات گوشت فرآوری‌شده، سس‌ها و چاشنی‌ها	عامل غلیظ‌کننده و پایدارکننده
			Baked goods, dairy products, frozen desserts, jellies, processed meat products, sauces, and dressings	Thickener and stabilizer agent
		زایلوگلوکان Tamarind gum xyloglucan	مربا، ژله، مارمالاد، آبنبات، آدامس، نوشیدنی‌ها و محصولات نانوائی	عامل غلیظ‌کننده، ژل‌ساز، تثبیت‌کننده، چسبنده و پیونددهنده
			Jam, jelly, marmalade, candy, chewing gum, beverages, and bakery products	Thickening, gelling, stabilizing, adhesive, and binding agent
گیاهی Botanical	پروتئین سویا Soy protein	پروتئین سویا Soy protein	فرمول‌های غذایی نوزاد، محصولات لبنی، نوشیدنی‌ها و مخلوط‌های سلامت	عامل بافت‌دهنده، امولسیفایر، همزدن، پیونددهنده، ژل‌ساز و غلیظ‌کننده
			Infant food formulas, dairy products, beverages, and health mix	Texturizer, emulsifier, whipping, binding, gelling, and thickening agent

	غده‌ها Tubers	گلوکومانان کنجاک Konjac glucomannan	محصولات نانوائی و پرکننده‌ها Bakery products and fillings	عامل پوشش‌های محافظ خوراکی، تثبیت کننده، امولسیفایر و ژل ساز Protective and edible coatings, stabilizer, emulsifier, and gelling agent
	کلاژن Collagen	ژلاتین Gelatin	آبنبات‌ها، دسرها، محصولات گوشتی فرآوری شده، بستنی و محصولات لبنی Candies, desserts, processed meat products, ice cream, and dairy products	عامل شفاف کننده، پوشش محافظ، پایدار کننده و غلظت دهنده Clarifying agent, protective coating, stabilizer, and thickening agent
	کیتین Chitin	کیتوزان Chitosan	کیک‌ها و شیرینی‌ها، محصولات لبنی Cakes and pastries, dairy products	پوشش‌های حفاظتی، امولسیفایر، بافت دهنده، حفظ رطوبت، عامل فعال سطحی، تثبیت کننده، ژله ای کننده و غلیظ کننده‌ها Protective coatings, emulsifier, texturizer, humectant, surfactants, stabilizer, gelling, and thickening agents
حیوانی Animal	بافت‌های پیوندی Connective tissues	هیالورونان Hyaluronan	ژله، محصولات لبنی، نوشیدنی‌ها و نوشیدنی‌های سلامت Jelly, dairy products, beverages, and health drinks	غلظت کننده و پایدار کننده Thickener and stabilizer
	تخم مرغ Egg	پروتئین سفیده تخم مرغ Egg white protein	سس‌ها، کرم‌ها، کیک‌ها و شیرینی‌ها Sauces, custards, cakes, and confectioneries	عامل غلظت دهنده، ژل ساز و کف ساز، امولسیفایر، منعقد کننده، چسباننده و بهبود دهنده بافت Thickening, gelling and foaming, emulsifier, coagulant, binding agent, and texture enhancer
	شیر Milk	کازئینات Caseinat	محصولات لبنی، ژله‌ها، آبنبات‌ها و شیرینی جات Dairy products, jellies, candies, and confectioneries	عامل پایدار کننده، غلیظ کننده و ژل ساز Stabilizer, thickening, and gelling agents
جلبکی Algal		پروتئین سرم Whey protein	محصولات نانوائی، نوشیدنی‌ها و نوشابه‌ها Bakery products, beverages, and soft drinks	عامل تعدیل کننده بافت، غلیظ کننده، عامل کپسوله کننده، فعال کننده سطحی و ژل ساز Texture modifier, thickening, encapsulating agent, surface active agent, and gelling agent
	جلبک‌های دریایی قرمز Red seaweeds	آگار Agar (agarose)	مریبا، ژله، آبنبات نرم، آمیوه‌ها، بستنی‌ها، روکش کیک، پودینگ‌ها، کاسترد و محصولات لبنی Jam, jelly, soft candies, fruit juices, ice-creams, icings, puddings, custard, and dairy products	عامل لخته کننده، غلیظ کننده، امولسیفایر، پایدار کننده و ژل ساز Coagulator, thickening, emulsifier, stabilizer, and gelling agent
		کاراگینان Carrageenan	محصولات لبنی، نوشیدنی‌ها، سس‌ها، محصولات گوشتی و ماهی، نان و قنادی‌ها Milk products, beverages, dressings, meat and fish products, bakery, and confectioneries	عامل غلیظ کننده، ژل ساز، تثبیت کننده و معلق کننده Thickening, gelling, stabilizing, and suspending agent
	جلبک‌های دریایی قهوه‌ای Brown seaweeds	آلژینات Alginate	مواد غذایی بازسازی شده، محصولات گوشتی، شربت‌ها، سس سالاد، غذاهای عضلانی، پرکننده‌های نانوائی و دسرهای یخ زده لبنی Restructured foods, meat products, syrups, salad dressing, muscle foods, bakery fillings, and frozen dairy desserts	عامل پایدار کننده، امولسیون کننده، کلات کننده، پوشش دهنده، تعلیق کننده، غلیظ کننده و ژل ساز Stabilizer, emulsifier, chelating agent, encapsulation agent, suspension agent, thickening, and gelling agent
	زانتوموناس کمپستریس Xanthomonas campestris	صمغ زانتان Xanthan gum	سس سالاد، سالاد، سس‌ها، دسرها، محصولات نانوائی، دسرهای یخ زده لبنی و محصولات لبنی تخمیری Salad dressing, salad, gravies, desserts, bakery products, frozen dairy desserts, and cultured dairy products	عامل غلیظ کننده، تعلیق کننده، امولسیفایر، تثبیت کننده و چسباننده Thickener, suspension, emulsifier, stabilizer, and binding agent
میکروبی Microbial	آلکالیژنس فکالیس Alcaligenes faecalis	کردلان Curdlan	محصولات گوشتی، خمیر ماهی، سوسیس، همبرگر و رشته‌ها Meat products, fish paste, sausages, hamburgers, and noodles	عامل پایدار کننده، اصلاح کننده بافت، شبه چربی‌ها و ژل ساز Stabilizer, texture modifier, fat mimetics, and gelling agent
	اسفینگوموناس الودئا Sphingomonas elodea	صمغ ژلان Gellan gum	محصولات لبنی، پرکردنی‌های نانوائی، مریبا، ژله، نوشیدنی‌ها، محصولات لبنی، دسرها و سس‌ها Dairy products, bakery fillings, jam, jelly, beverages, dairy products, desserts, and sauces	عامل غلیظ کننده، پایدار کننده، عامل چسبنده و ژل ساز Thickener, stabilizer, binding agent, and gelling agent

عامل پایدارکننده، غلیظ‌کننده، ژل‌ساز و کمک به هم زدن	محصولات نانوائی، شیرینی‌جات، سس‌ها و روکش‌های خوراکی	سلولز	استوباکتر و آگروباکتریوم
Stabilizer, thickening, gelling, and whipping aid	Bakery products, confectioneries, dressings, and edible coatings	Cellulose	Acetobacter and Agrobacterium
عامل غلیظ‌کننده و پایدارکننده	ژله، محصولات لبنی، نوشیدنی‌ها و نوشیدنی‌های سلامت	هیالورونان	باسیلوس سوبتیلیس
Thickener and stabilizer	Jelly, dairy products, beverages, and health drinks	Hyaluronan	Bacillus subtilis
عامل غلیظ‌کننده، امولسیفایر، بافت‌دهنده و عامل ژل‌ساز	آدامس‌ها، مربا، ژله‌ها، آب‌نبات‌ها و بستنی	دکستران	لاکتوباسیلوس، لاکتوئستوک
Thickener, emulsifier, texturizer, and gelling agent	Gums, jam, jellies, candies, and ice-cream	Dextran	مزانتروئیدس، استرپتوکوک موتانس
			Lactobacillus, Leuconostoc mesenteroides, Streptococcus mutans

نقش افزودنی‌های دیگر در بهبود قابلیت چاپ

افزودنی‌های دیگر، که یا شامل اجزای خالص غذایی مانند نشاسته هستند یا بخشی از مواد خوراکی مانند آرد برنج، آرد گندم، آرد گندم تصفیه‌شده، آرد ارزن و سایر مواد مشابه مبتنی بر غلات را دربرمی‌گیرند، می‌توانند با ایجاد اثرات هم‌افزایی، قابلیت چاپ غذاهای غیرقابل چاپ را بهبود دهند (Nachal, Moses, Karthik, & Anandharamakrishnan, 2019). جالب آن‌که این گروه از مواد غذایی، اگرچه در ظاهر ممکن است به‌تنهایی قابل چاپ به نظر برسند، اما به‌شدت ناپایدار بوده و سازه‌های سه‌بعدی ضعیفی تولید می‌کنند (Theagarajan, Moses, & Anandharamakrishnan, 2020). هنگامی که این مواد به‌عنوان ماده اصلی چاپ در نظر گرفته می‌شوند، از هیدروکلوئیدهای غذایی برای بهبود یکپارچگی ساختاری و پایداری مکانیکی مخلوط‌های چاپی استفاده می‌شود (Liu, Tang, Duan, & Qin, 2020a). از سوی دیگر، زمانی که این گروه به‌عنوان ماده اصلی چاپ به کار نرود— برای مثال در چاپ غذاهای غیرقابل چاپ مانند میوه‌ها، سبزیجات و فرآورده‌های گوشتی — می‌توان آن‌ها را به مواد اولیه چاپ افزود تا خواص رئولوژیکی ترکیب بهبود یافته و قابلیت چاپ‌پذیری مواد غیرقابل چاپ افزایش یابد (Keerthana, Anukiruthika, Moses, & Anandharamakrishnan, 2020). برای نمونه، مطالعه‌ای درباره چاپ بخش‌های زرده و سفیده تخم‌مرغ با افزودن آرد برنج خام و بدون هیچ‌گونه پیش‌فرآیند، گزارش شده است. در این ترکیب، نشاسته برنج همراه با بخش‌های لیوپروتئینی زرده و سفیده تخم‌مرغ، در حضور آب خمیری تشکیل می‌دهد که رفتار شبه‌پلاستیک ماده اولیه را افزایش داده و امکان چاپ‌پذیری را فراهم می‌کند (Anukiruthika et al., 2020). در مطالعه‌ای دیگر، گوشت مرغ چرخ‌کرده همراه با آرد گندم تصفیه‌شده و مقدار کافی آب، یک پیش‌مخلوط و خمیر نیمه‌جامد تشکیل داد. امولسیون حاصل، جریان‌پذیری را بهبود بخشید و قابلیت چاپ گوشت مرغ را افزایش داد (Wilson, Anukiruthika, Moses, & Anandharamakrishnan, 2020). رویکرد مشابهی نیز برای غنی‌سازی فیبر در گوشت چاپ سه‌بعدی، از طریق افزودن آرد ترکیبی

مبتنی بر ارزن و حبوبات به مرغ چرخ‌کرده، به کار گرفته شد (Wilson, Anukiruthika, Moses, & Anandharamakrishnan, 2021). این رویکرد به‌طور قابل توجهی محتوای فیبر غذایی سازه مرغ سه‌بعدی را بهبود بخشید. در مطالعه‌ای دیگر نیز، پوست سیب‌زمینی غیرقابل چاپ با آرد گندم کامل چاپ شد (Madhumitha, Abinash, Rahul, & Gupta, 2021). این مبحث نشان می‌دهد که می‌توان از ضایعات حاصل از خطوط فرآوری مواد غذایی در چاپ سه‌بعدی با ارزش افزوده استفاده کرد.

مواد قابل جایگزین کاربردی در چاپ سه‌بعدی غذا

دهه حاضر با کاهش فزاینده منابع تجدیدپذیر روبرو است. این وضعیت، زنجیره تأمین غذا را با تهدیدی جدی مواجه کرده و پیامدهای قابل توجهی بر تولید غذا به دلیل شرایط آب و هوایی غیرقابل پیش‌بینی به همراه دارد (D'Amour et al., 2020). اخیراً، بخش امور اقتصادی و اجتماعی سازمان ملل متحد پیش‌بینی کرده است که جمعیت جهان تا سال ۲۰۵۰ به ۹/۸ میلیارد و تا سال ۲۱۰۰ به ۱۱/۲ میلیارد نفر خواهد رسید (United Nations, 2017). این روند افزایشی جمعیت، کمبود منابع غذایی را تشدید خواهد کرد و نیاز به توسعه فناوری‌های پایدار تولید غذا را ضروری می‌سازد.

با در نظر گرفتن این چالش‌ها، چاپ سه‌بعدی غذا به‌عنوان یک فناوری نوین، توجه پژوهشگران صنعت غذا را در سال‌های اخیر به خود جلب کرده است. این رویکرد پایدار، راه‌حلی امیدوارکننده برای نگرانی‌های متعدد از جمله تغییرات آب و هوایی، رشد جمعیت، افزایش تقاضای غذا، هدررفت مواد غذایی و کمبود منابع طبیعی ارائه می‌دهد (Jayaprakash, Ituarte, & Partanen, 2019). استفاده از منابع غذایی غیرمعمول، کمتر کاوش‌شده و کمتر استفاده‌شده به‌عنوان ماده پایه در چاپ سه‌بعدی، راه را برای تولید غذاهای پایدار جدید هموار می‌سازد (Nachal et al., 2019).

استفاده بیش از حد از زمین و کاهش مراتع برای پرورش دام، به استثمار محیط‌زیست منجر شده است. علاوه بر این، کمبود پروتئین در

مواد اولیه غذایی جایگزین، دامنه وسیعی برای تجاری سازی دارند و امکان تولید غذاهای سفارشی با شکل، طعم، بافت و رنگ دلخواه را فراهم می کنند، ضمن اینکه کنترل دقیقی بر ارزش تغذیه ای آن ها وجود دارد. از این رو، افزایش آگاهی نسبت به پایداری محیطی، صنعت غذا را به سمت جستجوی مواد اولیه نوآورانه سوق می دهد (Prakash et al., 2019). چاپ سه بعدی راهی امیدوارکننده برای غنی سازی منابع غذایی با استفاده از مواد ارزان قیمت مانند حشرات، جلبک ها و ضایعات غذایی است که می توانند به شیوه ای جذاب و جالب ارائه شوند. با این حال، مطالعات بیشتری در زمینه استفاده از مواد اولیه جایگزین لازم است تا درک مصرف کنندگان نسبت به این منابع افزایش یابد. این امر به پذیرش حسی آن ها در اشکال جدید و نامحسوس کمک کرده و استانداردسازی ایمنی این محصولات را تسهیل خواهد کرد.

رژیم های غذایی گیاهی و وگان^۱، همچنان یک نگرانی بهداشتی مهم محسوب می شود. بنابراین، بررسی منابع جایگزین پروتئین برای رفع این چالش ها ضروری است. منابع جایگزین پروتئین شامل حشرات (شکل ۸)، لوبین ها، جلبک های دریایی و قارچ ها هستند که به عنوان منابع غنی پروتئین و فیبر شناخته می شوند (Sun et al., 2018b). چاپ سه بعدی، با درجه آزادی بالایی که در طراحی و تولید ارائه می دهد، می تواند به طور مؤثری برای چاپ این منابع غذایی نوآورانه و کمتر رایج به کار گرفته شود تا غذاهای مغذی تری تولید گردد. همچنین، جریان های پساب و ضایعات حاصل از خطوط فرآوری غذا، مانند پوست میوه و سبزیجات، ضایعات گوشت و قطعات ماهی، می توانند به طور مؤثری به عنوان منبع مواد اولیه در چاپ سه بعدی استفاده شوند (Ricci et al., 2019). این مواد را می توان پس از خشک کردن به صورت پودر درآورد، فرآوری کرد و با استفاده از روش چاپ مبتنی بر اکستروژن در فرمولاسیون غذا گنجانند.



شکل ۸- نمونه های هندسی چاپ شده سه بعدی از آرد حشرات (Susana, 2025)

Fig. 8. 3D geometry samples of insect flour (Susana, 2025)

چاپ مجدد سرد و تثبیت می شوند. این فرآیند گرم و سرد شدن، امکان رشد میکروارگانیسم ها را افزایش داده و ماندگاری محصولات را کاهش می دهد. استانداردسازی و بهینه سازی ویژگی های فیزیکی شیمیایی و رئولوژیکی مستلزم بکارگیری پیش پردازش (مانند خرد کردن، حرارت دهی، تنش برشی و...) است که باعث تغییر در ساختار مولکولی (مانند پیوندهای عرضی، اندازه ذرات، بافت فیبری) می شود. این تغییرات می تواند مانع حفظ ساختار از پیش تعیین شده شود و بافت ناخوشایندی برای مصرف کننده ایجاد کند. همچنین، این تغییرات می توانند بر طعم و جذابیت محصول اثر منفی بگذارند. بنابراین، برای هر جوهر خوراکی، نیاز به استانداردسازی مواد تشکیل دهنده و بهینه سازی پارامترهای چاپگر مخصوص به خود دارد. در ضمن بعضی محصولات به فرآیندهای

چالش ها و چشم انداز آینده

فناوری چاپ سه بعدی غذا، یکی از حوزه های نوظهور و پیشرو در صنعت فرآوری مواد غذایی است، هرچند هنوز در مراحل ابتدایی توسعه قرار دارد. این فناوری امکان تولید محصولات با اشکال متنوع را با استفاده از فرمولاسیون های ویژه مواد فراهم می کند و مزایای متعددی دارد، اما با چالش های فنی نیز روبرو است. این چالش ها را می توان از جنبه های فنی، ایمنی و قانونی، مشتری پسندی و اقتصادی بحث و بررسی کرد.

چالش های فنی: این روش نیازمند زمان طولانی و تجهیزات تخصصی است. مواد پوره ای (جوهرهای خوراکی) مورد استفاده، ضمن پایداری مناسب، فسادپذیر بوده و دوره نگهداری کوتاهی دارند و پیش از عبور از نازل، برای افزایش شکل پذیری گرم شده و سپس در بستر

(افرادی که رژیم غذایی بر پایه گیاهان دارند و حتی فرآورده های حیوانی نظیر لبنیات را هم استفاده نمی کنند).

1- Vegan

هزینه‌ی بالای فرآیند می‌تواند مشکلات قابل‌توجهی ایجاد کند. این فرآیند در حال حاضر نسبتاً کند است و قیمت بالای چاپگرهای سه‌بعدی نیز کاربرد آن‌ها را عمدتاً به حوزه‌های پژوهشی محدود کرده است، نه تولید در مقیاس صنعتی. با این حال، با پیشرفت فناوری، انتظار می‌رود چاپگرهای سه‌بعدی تجاری به‌تدریج در بازار در دسترس‌تر شوند و علاوه بر محیط‌های صنعتی، در آشپزخانه‌های خانگی و سازمان‌های کوچک نیز مورد استفاده قرار گیرند (Anandharamakrishnan et al., 2022; Hussain et al., 2022; Sundarsingh et al., 2024).

نتیجه‌گیری

چاپ سه‌بعدی مواد غذایی، به‌عنوان یک فرآیند رباتیک دیجیتال با رویکردهای پایدار در تولید غذا، توانسته است زنجیره تأمین سنتی مواد غذایی را متحول کند. کیفیت نهایی سازه‌های خوراکی چاپ‌شده، عمدتاً به ماهیت مواد اولیه‌ی به‌کاررفته بستگی دارد. قابلیت چاپ به مقاومت ذاتی ماده‌ی چاپ‌شده در برابر وزن خود، هنگام رسوب بر روی بستر چاپ اشاره دارد. میزان کربوهیدرات، لیپید، پروتئین و فیبر در ماده‌ی اولیه، بیشترین تأثیر را بر قابلیت چاپ دارد. مواد اولیه برای چاپ معمولاً به سه دسته تقسیم می‌شوند: قابل چاپ، غیرقابل چاپ و مواد جایگزین. با استفاده از پیش‌پردازش‌ها، خواص فیزیکوشیمیایی مواد اولیه تنظیم شده و آن‌ها را برای ساخت لایه به لایه مناسب می‌کنند. مطالعات پیرامون مواد قابل چاپ می‌تواند به نتایج چشمگیری در تبدیل رژیم غذایی معمول ما به دستورالعمل‌های چاپ دیجیتال منجر شود. دستیابی به قابلیت چاپ در مواد غذایی که به‌طور سنتی غیرقابل چاپ هستند، از طریق پیش‌فرآوری مناسب مواد اولیه امکان‌پذیر است. از طریق توجیه علمی و مطالعه‌ی دقیق عوامل مؤثر بر چاپ‌پذیری مواد طبیعی، می‌توان بر پیچیدگی‌های مرتبط با چاپ‌پذیری مواد غیرقابل چاپ غلبه کرد.

چاپ سه‌بعدی، به‌عنوان یک فناوری مستقل در صنعت غذا، پتانسیل ایجاد تحول از طریق طراحی، تولید، نوآوری و سفارشی‌سازی غذاها با استفاده از مواد قابل چاپ را دارد. استفاده از غذاها غیرقابل چاپ در فرآیند چاپ سه‌بعدی، طعم و تنوع جدیدی به غذاها می‌بخشد. ساخت سازه‌های سه‌بعدی با استفاده از مواد اولیه جایگزین و منابع نوآورانه‌ی غذایی، به‌طور قابل‌توجهی انتشار دی‌اکسید کربن را کاهش می‌دهد و به‌عنوان راه‌حلی امیدوارکننده برای رفع گرسنگی جهانی، به‌ویژه سوءتغذیه و کمبودهای تغذیه‌ای در میان نوزادان و نوجوانان، مطرح است. علاوه بر این، چاپ مواد غذایی امکان ارزش‌آفرینی از ضایعات غذایی را فراهم کرده و تبدیل این ضایعات به ثروت، به ایجاد یک اقتصاد چرخشی سبزتر کمک می‌کند. در بلندمدت، پیش‌بینی می‌شود که چاپ سه‌بعدی با ادغام چندین مرحله در یک واحد

تکمیلی مانند پختن، جوشاندن، سرخ کردن، انجماد و بخارپز کردن، نیاز داشته که ممکن است کیفیت، محصولات نهایی را تخریب کنند. جنبه‌های ایمنی و قانونی: تضمین ایمنی محصولات غذایی چاپ سه‌بعدی از همان ابتدای فرآیند تولید آغاز می‌شود. تماس احتمالی اجزای چاپگر با مواد اولیه یا غذای در حال تولید، نگرانی‌هایی در مورد آلودگی میکروبی و مهاجرت ترکیبات شیمیایی ایجاد می‌کند. این خطرات با بازرسی‌های دقیق و اجرای برنامه‌های منظم نظافت برای تمام سطوح در تماس با غذا، قابل کاهش است. سطوح تماس غذایی در چاپگرهای سه‌بعدی باید با استانداردهای مقرراتی مطابقت داشته باشند؛ به این معنی که باید ایمن، بادوام، مقاوم در برابر خوردگی، غیرجاذب و قابل بازرسی باشند. طراحی این سطوح باید امکان تمیزکاری آسان را فراهم کند و عاری از هرگونه شکاف، ترک یا زائویه داخلی تیز باشد. بزرگترین مانع توسعه‌ی چاپ سه‌بعدی غذا، همچنان در چارچوب‌های حقوقی و قانونی نهفته است که شامل مقررات ایمنی، الزامات برچسب‌گذاری و پذیرش مصرف‌کننده می‌شود. در حال حاضر، محصولات غذایی چاپ سه‌بعدی در اتحادیه اروپا به‌عنوان «غذای نوظهور» طبقه‌بندی شده و مشمول مقررات مربوطه هستند. این مقررات شامل تضمین ایمنی مصرف‌کننده، برچسب‌گذاری شفاف و جلوگیری از کاهش ارزش تغذیه‌ای نسبت به محصولات جایگزین است. سازمان غذا و داروی ایالات متحده^۱ تاکنون مقررات مشخصی برای چاپ سه‌بعدی غذا وضع نکرده است. علاوه بر این، مسائل مربوط به حقوق ثبت اختراع، حق نشر و برچسب‌گذاری نیز از موانع قابل توجه در این حوزه به شمار می‌روند.

پذیرش مشتری: با اینکه بخشی از جامعه نسبت به پذیرش غذای چاپ‌شده‌ی سه‌بعدی دیدگاه مثبتی دارند، بخش عمده‌ای از مردم همچنان درباره‌ی نقش، اهمیت و مصرف آن در زندگی روزمره مردد و نگران هستند. برخی از مصرف‌کنندگان، به‌دلیل فرآوری بیشتر مواد اولیه غذایی و تغییر بافت غذا، بر اولویت‌دادن به مصرف «غذای واقعی» نسبت به «غذای چاپی» تأکید دارند؛ با این حال، برخی افراد نیز پذیرش غذای چاپی را مطرح کرده‌اند، به‌ویژه به‌دلیل ظرفیت آن در ارتقای ارزش تغذیه‌ای و سازگار شدن با رژیم‌های غذایی و سلیقه‌های شخصی. برای مثال، می‌توان به تولید یک رژیم غذایی متعادل برای افراد اوتیسمی، افراد دارای مشکل بلع، و گروه‌های سنی مختلف اشاره کرد. انتظار می‌رود با پیشرفت بیشتر فناوری چاپ سه‌بعدی غذا، میزان پذیرش مصرف‌کنندگان نیز به‌تدریج افزایش یابد.

چالش‌های اقتصادی: از دیگر چالش‌های این حوزه می‌توان به هزینه‌های مالی بالا و قیمت زیاد محصولات نهایی اشاره کرد. در صورت تولید انبوه غذای چاپ‌شده‌ی سه‌بعدی، سرعت پایین چاپ و

منابع تأمین مالی

این پژوهش فاقد هرگونه تأمین مالی خارجی بوده است.

مشارکت نویسندگان

ح. لشکری: ایده پردازی، نگارش، بازبینی و ویرایش متن، نظارت.
ش. اسمعیل زاده: گردآوری مطالب، بازبینی و ویرایش متن.

تولیدی، شیوه‌های تولید غذا را بازتعریف کرده و زنجیره تأمین غذا را ساده‌تر نماید. با این حال، تحقیقات بیشتری باید بر روی قابلیت چاپ مواد غذایی معمولی منطقه‌ای انجام شود تا بتوان از تمام مزایای چاپ سه بعدی در بخش غذا بهره‌مند شد. در نهایت، چاپ سه بعدی به عنوان یک فناوری «چاپ و خوردن»، سازمان‌دهی توزیع غذا و زنجیره تأمین را دگرگون ساخته و به اقتصادی پایدار و چرخشی منجر خواهد شد.

References

1. Agunbiade, A., Song, L., Agunbiade, O., Ofoedu, C., Chacha, J., Duguma, H., ... & Guiné, R. (2022). Potentials of 3D extrusion-based printing in resolving food processing challenges: A perspective review. *Journal of Food Process Engineering*. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13996>
2. Anandharamakrishnan, C., Moses, J.A., & Anukiruthika, T. (2022). *3D food printing*. Wiley. Hoboken. <https://lccn.loc.gov/2021040694>
3. Anukiruthika, T., Moses, J.A., & Anandharamakrishnan, C. (2020). 3D printing of egg yolk and white with rice flour blends *Journal of Food Engineering*, 265, 109691. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109691>
4. Chen, H., Xie, F., Chen, L., & Zheng, B. (2019a). Effect of rheological properties of potato, rice and corn starches on their hot-extrusion 3D printing behaviors[J]. *Journal of Food Engineering*, 244, 150-158. <https://doi.org/10.1016/j.j-foodeng.2018.09.011>
5. Chen, J., Mu, T., Goffin, D., Blecker, C., Richard, G., Richel, A., & Haubruge, E. (2019b). Application of soy protein isolate and hydrocolloids based mixtures as promising food material in 3D food printing. *Journal of Food Engineering*, 261, 76–86. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.03.016>
6. Co, E.D., & Marangoni, A.G. (2018). *Oleogels: an introduction*. In: *Edible Oleogels*. PP 1-29 in A.G. Marangoni & N. Garti eds. Elsevier, Canada. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814270-7.00001-0>
7. Cotabarren, I.M., Cruces, S., & Palla, C.A. (2019). Extrusion 3D printing of nutraceutical oral dosage forms formulated with monoglycerides oleogels and phytosterols mixtures. *Food Research International*, 126, 108676. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108676>
8. D'Amour, C.B., Pandey, B., Reba, M., Ahmad, S., Creutzig, F., & Seto, K.C. (2020). Urbanization, processed foods, and eating out in India. *Global Food Security*, 25, 100361. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100361>
9. Daffner, K., Vadodaria, S., Ong, L., Nöbel, S., Gras, S., Norton, I., & Mills, T. (2020). Design and characterization of casein whey protein suspensions via the pH-temperature-route for application in extrusion-based 3D-Printing. *Food Hydrocolloids*, 112, 105850. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105850>
10. Dai, F.-J., & Chau, C.-F. (2017). Classification and regulatory perspectives of dietary fiber. *Journal of Food and Drug Analysis*, 25(1), 37–42. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2016.09.006>
11. Devi, A., & Khatkar, B.S. (2016). Physicochemical, rheological and functional properties of fats and oils in relation to cookie quality: a review. *Journal of Food Science and Technology*, 53(10), 3633–3641. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2355-0>
12. Dick, A., Bhandari, B., & Prakash, S. (2019). Post-processing feasibility of composite-layer 3D printed beef. *Meat Science*, 153, 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.02.024>
13. Dong, X., Huang, Y., Pan, Y., Wang, K., Prakash, S., & Zhu, B. (2019). Investigation of sweet potato starch as structural enhancer for 3D printing of *Scomberomorus niphonius* surimi. *Journal of Texture Studies*, 50, 316–324. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12398>
14. Esmailzadeh, Sh. (2023). Metal additive manufacturing technology: A review of biomedical applications. *Chemistry & Nanochemistry*, 2(3), 25-41. <https://www.magiran.com/p2703519>
15. Esmailzadeh, Sh., Vaghefi, M., Esmailzadeh, B., & Tavallali, M.S. (2025). 3D printing technology and additive manufacturing: a review of biomedical application, *Razi Journal Medical Sciences*, 32(59), 1-17. <https://doi.org/10.47176/rjms.32.59>
16. Hao, L., Mellor, S., Seaman, O., Henderson, J., Sewell, N., & Sloan, M. (2010). Material characterisation and process development for chocolate additive layer manufacturing. *Virtual and Physical Proto Typing*, 5, 57–64. <https://doi.org/10.1080/17452751003753212>

17. Huang, V.T., & Perdon, A.A. (2020). *Major changes in cereal biopolymers during ready-to-eat cereal processing*. PP 109–140 in A.A. Perdon, S.L. Schonauer and K.S. Poutanen eds. *Breakfast Cereals and How They Are Made*, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812043-9.00006-0>
18. Hussain, S., Malakar, S., & Arora, V.K. (2022). Extrusion-based 3D food printing: Technological approaches, material characteristics, printing stability, and post-processing. *Food Engineering Reviews*, 14, 100–119. <https://doi.org/10.1007/s12393-021-09293-w>
19. Jayaprakash, S., Ituarte, I.F., & Partanen, J. (2019). *Prosumer-driven 3D food printing: role of digital platforms in future 3D food printing systems*. PP 331–354 in F.C. Godoi, B.R. Bhandari, S. Prakash and M. Zhang eds. *Fundamentals of 3D Food Printing and Applications*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814564-7.00011-0>
20. Karyappa, R., & Hashimoto, M. (2019). Chocolate-based ink three-dimensional Printing (Ci3DP). *Scientific Reports*, 9(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50583-5>
21. Keerthana, K., Anukiruthika, T., Moses, J.A., & Anandharamakrishnan, C. (2020). Development of fiber-enriched 3D printed snacks from alternative foods: a study on button mushroom. *Journal of Food Engineering*, 287, 110116. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110116>
22. Kim, H.W., Bae, H., & Park, H.J. (2018). Classification of the printability of selected food for 3D printing: development of an assessment method using hydrocolloids as reference material. *Journal of Food Engineering*, 215, 23–32. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.07.017>
23. Lanaro, M., Desselle, M.R., & Woodruff, M.A. (2019). *3D printing chocolate: properties of formulations for extrusion, sintering, binding and ink jetting*. PP 151–173 In F.C. Godoi, B.R. Bhandari, S. Prakash and M. Zhang eds. *Fundamentals of 3D Food Printing and Applications*, Academic Press, United Kingdom. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814564-7.00006-7>
24. Lashkari, H. (2025a). Recent advances in extrusion technology in the food industry. The Third International Conference and the Fourth National Conference on Agriculture, Environment, and Food Security, Jiroft. <https://civilica.com/doc/2347057>
25. Lashkari, H. (2025b). Encapsulation, a novel technology in food processing. The Third International Conference and the Fourth National Conference on Agriculture, Environment, and Food Security, Jiroft. <https://civilica.com/doc/2347156>
26. Lashkari, H., & Esmailzadeh, Sh., (2025c). Common 3D printer configurations in the food industry. *Chemestry & Nanochemistry*, 4(1), 33–47. <https://sanad.iau.ir/Journal/crn/Article/1207081>
27. Lee, J.H, Won, D.J., Kim, H.W., Park, H.J. (2019). Effect of particle size on 3D printing performance of the food-ink system with cellular food materials. *Journal of Food Engineering*, 256, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.-2019.03.014>
28. Li, G., Hu, L., Liu, J., Huang, J., Yuan, C., Takaki, K., & Hu, Y. (2022). A review on 3D printable food materials: types and development trends. *International Journal of Food Science and Technology*, 57, 164–172. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15391>
29. Lille, M., Nurmela, A., Nordlund, E., Metsa-Kortelainen, S., & Sozer, N. (2018). Applicability of protein and fiber-rich food materials in extrusion-based 3D printing. *Journal of Food Engineering*, 220, 20–27. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.04.034>
30. Liu, Y., Tang, T., Duan, S., & Qin, Z. (2020a). Effects of sodium alginate and rice variety on the physicochemical characteristics and 3D printing feasibility of rice paste. *LWT*, 127, 109360. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109360>
31. Lu, W., Nishinari, K., Matsukawa, S., & Fang, Y. (2020). The future trends of food hydrocolloids. *Food Hydrocolloids*, 103, 105713. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105713>
32. Madhumitha, M., Abinash, V., Rahul, T., & Gupta, R.K.(2021). Valorization of food industry wastestreams using 3D printing: a study on noodles prepared from potato peel waste. *Food and Bioprocess Technology*, 14, 1–8. <https://doi.org/10.1007/s11947-021-02675-2>
33. Mantihal, S., Prakash, S., & Bhandari, B. (2019a). Textural modification of 3D printed dark chocolate by varying internal infill structure. *Food Research International*, 121, 648–657. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.12.034>
34. Nachal, N., Moses, J., Karthik, K., & Anandharamakrishnan, C. (2019). Applications of 3D printing in food industry: a review. *Food Engineering Reviews*, 11(3), 123–141. <https://doi.org/10.1007/s12393-019-09199-8>
35. Nazir, A., Asghar, A., & Maan, A.A. (2017). Food gels: gelling process and new applications. *Advances in Food Rheology and Its Applications*, 335–353. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100431-9.00013-9>
36. Oskay, W., & Edman, L. (2009). *The CandyFab Project*. Evil Scientist Laboratories. <https://candyfab.org/>
37. Pan, Y., Sun, Q., Liu, Y., Wei, S., Han, Z., Zheng, O., Ji, H., Zhang, B., & Liu, S. (2024) Investigation on 3D printing of shrimp surimi under different printing parameters and thermal processing conditions, *Current Research in Food Science*, 8, 100745. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2024.100745>

38. Phan, M.M., & Stodolska, M. (2019). Food practices, dietary patterns, and leisure among Mexican Americans in the Midwestern US. *Annals of Leisure Research*, 23, 1–18. <https://doi.org/10.1080/11745398.2019.1571929>
39. Prakash, S., Bhandari, B.R., Godoi, F.C., & Zhang, M. (2019). *Future outlook of 3D food printing*. PP 373–381 In F.C. Godoi, B.R. Bhandari, S. Prakash and M. Zhang eds. *Fundamentals of 3D Food Printing and Applications*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814564-7.00013-4>
40. Rando, P., & Ramaioli, M. (2020). Food 3d printing: effect of heat transfer on print stability of chocolate. *Journal of Food Engineering*, 294, 110415. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110415>
41. Rebaka, V.P., Rachamalla, A.K., Batra, S., & Subbiah, N. (2020). *State of the Art and New Perspectives in Oleogels and Applications*. PP 151–182 in Inamuddin, A. Asiri eds. *Sustainable Green Chemical Processes and their Allied Applications*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42284-4_6
42. Ricci, I., Derossi, A., & Severini, C. (2019). 3D printed food from fruits and vegetables. PP 117–149 in F.C. Godoi, B. R. Bhandari, S. Prakash and M. Zhang eds. *Fundamentals of 3D Food Printing and Applications*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814564-7.00005-5>
43. Shah, P., Shah, V., Shrestha, S., & Mitra, P. (2024) A review on 3D food printing technology in food processing. *Journal of Food Industry*, 8(1), 17–34. <https://doi.org/10.5296/jfi.v8i1.22468>
44. Southerland, D., Walters, P., & Huson, D. (2011). *Edible 3D printing*. NIP & Digital Fabrication Conference. (2), 819–822. https://doi.org/10.2352/issn.2169-4451.2011.27.1.art00105_2
45. Sun, J., Zhou, W., Huang, D., & Yan, L. (2018a). *3D food printing: perspectives*. PP 725–755 In T. Gutierrez eds. *Polymers for Food Applications*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-94625-2_26
46. Sun, J., Zhou, W., Huang, D., Fuh, J.Y.H., & Hong, G.S. (2015). An overview of 3D printing technologies for food fabrication. *Food and Bioprocess Technology*, 8(8), 1605–1615. <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1528-6>
47. Sun, J., Zhou, W., Yan, L., Huang, D., & Lin, L.Y. (2018b). Extrusion-based food printing for digitalized food design and nutrition control. *Journal of Food Engineering*, 220, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.02.028>
48. Sundarsingh, A., Zhang, M., Mujumdar, A.S., & Li, J. (2024). Research progress in printing formulation for 3D printing of healthy future foods. *Food and Bioprocess Technology*, 17, 3408–3439. <https://doi.org/10.1007/s11947-023-03265-0>
49. Susana Soares: Insects Au Gratin/Project. (2025). Available online: <https://www.susanasoares.com/index.php?id=82>
50. Takagishi, K., Suzuki, Y., & Umezui, S. (2018). The high precision drawing method of chocolate utilizing electrostatic ink-jet printer. *Journal of Food Engineering*, 216, 138–143. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.08.017>
51. Theagarajan, R., Moses, J.A., & Anandharamakrishnan, C. (2020). 3D extrusion printability of rice starch and optimization of process variables. *Food and Bioprocess Technology*, 13, 1048–1062. <https://doi.org/10.1007/s11947-020-02453-6>
52. United Nations. (2017). World population projected to reach 9.8 billion in 2050 and 11.2 billion in 2100. Department of Economic and Social Affairs, United Nations. <https://doi.org/10.31899/pdr2022.1002>
53. Vancauwenberghe, V., Katalagarianakis, L., Wang, Z., & Meerts, M. (2017). Pectin based food-ink formulations for 3-D printing of customizable porous food simulants. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 42, 138–150. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.06.011>
54. Wang, M.S., Li, D.N., Zang, Z. Sun, X., Tan, H., Si, X., Tian, J., Teng, W., Wang, J., Liang, Q., Bao, Y., Li, B., & Liu, R. (2022). 3D food printing: applications of plant-based materials in extrusion-based food printing. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(26), 7184–7198. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1911929>
55. Warner, E.L., Norton, I.T., & Mills, T.B. (2019). Comparing the viscoelastic properties of gelatin and different concentrations of kappa-carrageenan mixtures for additive manufacturing applications. *Journal of Food Engineering*, 246, 58–66. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.10.033>
56. Wilms, P., Daffner, K., Kern, C., Gras, S.L., & Kohlus, R. (2021). Formulation engineering of food systems for 3d-printing applications— a review. *Food Research International*, 2, 110585. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110585>
57. Wilson, A., Anukiruthika, T., Moses, J.A., & Anandharamakrishnan, C. (2020). Customized shapes for chicken meat-based products: feasibility study on 3D-printed nuggets. *Food and Bioprocess Technology*, 13, 1968–1983. <https://doi.org/10.1007/s11947-020-02537-3>
58. Wilson, A., Anukiruthika, T., Moses, J.A., & Anandharamakrishnan, C. (2021). Preparation of fiber-enriched chicken meat constructs using 3D printing. *Journal of Culinary Science & Technology*, 127–138. <https://doi.org/10.1080/15428052.2021.1901817>

59. Yang, F., Zhang, M., Prakash, S., & Liu, Y. (2018a). Physical properties of 3D printed baking dough as affected by different compositions. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 49, 202–210. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.01.001>
60. Yegin, S., Kopec, A., Kitts, D.D., & Zawistowski, J. (2020). *Dietary fiber: a functional food ingredient with physiological benefits*. PP 531–555 in H.G. Preuss and D. Bagchi eds. *Dietary Sugar, Salt and Fat in Human Health*, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816918-6.00024-X>
61. Zhao, Z.L., Wang, Q., Yan, B., Gao, W., Jiao, X.D., Huang, J., Zhao, J., Zang, H., Chen, W., & Damin, F. (2020). Synergistic effect of microwave 3D print and transglutaminase on the self-gelation of surimi during printing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 67, 102546. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102546>
62. Zinina, O., Merenkova, S., Tazeddinova, D., & Rebezov, M. (2019). Enrichment of meat products with dietary fibers: a review., *Agronomy Research*, 17(4), 1808–1822. <https://doi.org/10.15159/ar.19.163>