

فناوری چاپ سه بعدی غذا: مروری بر روش‌ها، کاربردها و عوامل موثر بر کیفیت چاپ

شیدا اسمعیل زاده^{۱،۲*} و حنان لشکری^۳

^۱دانشیار، گروه شیمی، واحد داراب، دانشگاه آزاد اسلامی، داراب، ایران.

^۲آزمایشگاه ساخت افزایشی صدرا، مرکز تحقیقات مهندسی شیمی، نفت و پلیمر، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

^۳دانشیار، گروه علوم و صنایع غذایی، واحد زرین دشت، دانشگاه آزاد اسلامی، زرین دشت، ایران

تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۰۹/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۱

چکیده

سازمان غذا و کشاورزی (FAO) تخمین زده است که تا سال ۲۰۵۰، تولید مواد غذایی باید ۷۰ درصد افزایش یابد تا بتواند ۹.۹ میلیارد نفر جمعیت پیش‌بینی شده جهان را تغذیه کند. در نتیجه، نیاز به راه‌حل‌های جدید و نوآورانه برای حل این مشکل و بهبود پایداری مواد غذایی دارای اهمیت است. اخیراً، محصولات غذایی جدیدی با استفاده از فناوری نوین چاپ سه بعدی تولید شده‌اند. چاپ سه بعدی مواد غذایی پتانسیل تولید مواد غذایی سفارشی را از نظر شکل، بافت، طعم، ساختار و ارزش غذایی دارد و این امکان را می‌دهد تا فرمولاسیون‌های منحصر به فرد و جایگزین‌های خوراکی جدیدی ایجاد شود. در این مقاله، مروری بر فناوری‌های مهم چاپ سه بعدی در صنایع غذایی شامل چاپ اکستروژن، فناوری تزریق چسب، چاپ جوهرافشان و تفجوشی انتخابی با لیزر انجام شده است و فاکتورهای تأثیرگذار بر این فناوری‌ها برای دستیابی به یک چاپ دقیق که شامل ویژگی‌های مواد، پارامترهای فرآیند و روش‌های پس از پردازش است و کاربردهای آنها در بخش‌های مختلف غذایی ارائه داده شده است. مزایای زیادی برای فناوری چاپ سه بعدی غذا وجود دارد مانند: طرح‌های سفارشی غذایی، تغذیه شخصی‌سازی شده و دیجیتالی‌شده، ساده‌سازی زنجیره تأمین و گسترش منابع مواد غذایی موجود. با استفاده از این فناوری، برخی از طرح‌های غذایی پیچیده و خارق‌العاده که نمی‌توان با روش‌های معمولی به دست آورد، می‌توانند توسط افراد عادی تولید شوند. همچنین می‌توان برای سفارشی‌سازی اشکال شیرینی‌پزی و تصاویر رنگارنگ روی سطوح بسترهای خوراکی جامد استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: ساخت افزایشی، چاپ سه بعدی مواد غذایی، جوهر خوراکی چاپ پذیر، پارامترهای طراحی غذا.

مقدمه

قرار گرفته است. شخصی‌سازی به‌عنوان نیروی محرکه برای برهم زدن روش‌های مرسوم تولید و تحویل غذا ذکر شده است. با این حال، باید در نظر داشت که شخصی‌سازی مورد نیاز هر جمعیت، چیست.

استفاده از چاپ سه بعدی مواد غذایی به معنای تغییر روش مصرف غذایی نیست. آنچه برای توسعه چاپ سه بعدی مواد غذایی لازم است یافتن کاربرد مناسب آن ماده غذایی است که به نوبه خود به خواص مواد غذایی وابسته است. برای مثال، برخی روش‌های فناوری چاپ سه بعدی مواد غذایی به

محصولات غذایی به سرعت در حال تکامل هستند. بنابراین، همه متخصصان در زمینه تولید مواد غذایی باید آخرین روندها، بهترین شیوه‌ها و ابزارها را دنبال کنند تا در سرعت پیشرفت سهیم باشند. امروزه یکی از این ابزارها و شیوه‌های تولید غذا که در حال توسعه و پیشرفت است، روش ساخت افزایشی یا چاپ سه بعدی مواد غذایی (3DFP)^۱ است. که به عنوان یک ابزار قوی برای دستیابی به شخصی‌سازی و ایجاد رضایت در مشتریان با سلیقه‌های مختلف مورد استفاده

¹Three dimensional food printing

<http://doi:10.22092/fooder.2026.370021.1426>

نویسنده مسئول: sh.esmaielzadeh@iau.ac.ir Email:



برخلاف تولید کاهشی، که در آن مواد خام برای ایجاد محصول نهایی حذف می‌شوند، چاپ سه‌بعدی به طور متوالی مواد را برای دستیابی به هندسه‌های پیچیده اضافه می‌کند. همچنین انعطاف‌پذیری طراحی‌های خاص، قابلیت نمونه‌سازی سریع، توانایی تولید ساختارهای سفارشی با دقت بالا برای ساخت ساختارهای یکپارچه با هندسه پیچیده و امکان بکارگیری دامنه وسیعی از مواد گوناگون را فراهم می‌کند. تمام این ویژگی‌ها باعث شده است که امروزه این فناوری به یک صنعت چند میلیارد دلاری تبدیل گردد. چاپ سه‌بعدی در حال توسعه است و این پتانسیل را دارد که چشم انداز تولید در آینده نزدیک را تغییر دهد و عصر جدیدی از تولید غیرمتمرکز و بر اساس تقاضای مشتری را آغاز کند (Sohel et al., 2025).

انجمن آزمایش و مواد آمریکا (ASTM)^۸ روش‌های هفت‌گانه‌ای برای چاپ سه‌بعدی بر اساس نوع مواد و اصول عملیاتی ارائه داده است. فتوپلیمریزاسیون مخزنی^۹، کستروژن مواد^{۱۰}، همجوشی بستر پودری (PBF)^{۱۱}، تزریق چسب یا جت بایندر^{۱۲}، تزریق مواد یا چاپ جوهرافشان (IJP)^{۱۳}، توزیع مستقیم انرژی (DED)^{۱۴} و ساخت ورقه‌ای (SL)^{۱۵} (Esmailzadeh et al., 2025). در ادامه، از میان روش‌های هفت‌گانه چاپ سه‌بعدی، روش‌هایی که در طراحی مواد غذایی اعمال می‌شود، توضیح داده شده‌اند. کاربران با شناخت هر روش و مزایا و معایب مربوط به آنها فرصت می‌یابند تا براساس کاربرد مورد نیاز، روش مناسب و برتر خود را انتخاب کنند. استفاده از فناوری‌های رایج در چاپ سه‌بعدی مواد غذایی بر اساس عوامل موثر بر دقت چاپ که عبارتند از: چاپ اکستروژن، تفجوشی انتخابی با لیزر،

عنوان جایگزین فرآیندهای قالب‌گیری مواد خمیری استفاده می‌شوند. برخی روش‌های چاپ سه‌بعدی برای غذاهایی قابل استفاده هستند که قوام خمیری داشته باشند و برای چاپ خمیر قنادی، پوره سبزیجات یا گوشت توصیه می‌شوند. برخی روش‌ها تنها در مواردی استفاده می‌شوند که مجموعه مواد غذایی مایع و/یا نیمه جامد نیازهای اساسی مصرف کنندگان را برآورده نمی‌کند (Neamah & Tandio, 2024). در اجرای فناوری چاپ سه‌بعدی مواد غذایی روش‌ها و نکات مختلفی را باید در نظر گرفت. در این مقاله به معرفی فناوری‌های چاپ سه‌بعدی در صنایع غذایی و عوامل موثر بر کیفیت چاپ مواد غذایی پرداخته شده است.

فناوری‌های رایج در چاپ سه‌بعدی مواد غذایی

چاپ سه‌بعدی^۱ که به نام‌های مختلفی مانند ساخت افزایشی^۲، تولید لایه‌ای^۳، نمونه‌سازی سریع^۴ و فناوری ساخت جامد بی‌شکل^۵ نیز شناخته می‌شود یک فناوری پیشگامانه است است که در آن یک شی سه‌بعدی طبق یک طرح دیجیتال، از طریق جابجایی مواد به صورت لایه به لایه با رویکرد جریان انجام کار از پایین به بالا که کاملاً متفاوت با روش‌های مرسوم است، تولید می‌شود. اولین مرحله در تولید یک محصول از طریق فناوری ساخت افزایشی طراحی سه‌بعدی نمونه اولیه است. نرم افزارهای متعددی، از مبتدی تا پیشرفته، برای طراحی سه‌بعدی ساختار نمونه‌ای که باید چاپ شود در دسترس است. طرح اولیه دیجیتال به یک فایل stl تبدیل می‌شود و در نهایت یک فایل G-کد با دستورات لازم برای هدایت پیشران^۶ چاپگر در شرایط از پیش تعیین شده سرعت، جریان و دما تولید می‌شود (Esmailzadeh, 2023).

⁸ Vat Photo Polymerization

⁹ Material Extrusion

¹⁰ Powder Bed Fusion

¹¹ Binder Jetting

¹² Material Jetting or Inkjet Printing

¹³ Direct Energy Deposition

¹⁴ Sheet Lamination

¹ 3D printing

² Additive Manufacturing

³ Layered Manufacturing

⁴ Rapid Prototyping

⁵ Solid Free Form Fabrication

⁶ Printhead

⁷ American society of testing and material

تزريق چسب و چاپ جوهرافشان در ادامه آورده شده است (جدول ۱).

چاپ سه بعدي اکستروژن

روش هاي اکستروژن بر اساس يک جريان پيوسته از جوهر به صورت لايه به لايه، که معمولا جوهرهاي بسيار غليظ کلويدي هستند عمل مي کنند. درصد ماده جامد و قوام مناسب خمير بسته به توانايي مواد در تشکيل ژل مي تواند از ۵ درصد تا ۵۰ درصد متغير باشد. جوهر با اعمال تغييرات فشار از طريق نازل جريان مي يابد. در حالت ايده آل، ماده اکستروژن شونده بايد پاسخ سريع و جامد ماندي را در طول فرآيند رسوب گذاري نشان دهد. اين ويژگي را مي توان با توجه به تنش تسليم (به مقدار تنشي که با کاهش آن سيال رفتار شبه جامد پيدا مي کند گفته مي شود) ارزيابي کرد. روش هاي پنوماتيک و مکانيکي (پيستوني يا پيچشي) معمولاً براي اکستروژن در چاپگر سه بعدي مواد غذايي استفاده مي شود. پيکربندي پيستوني براي جريان مواد داراي چسبندگي (ويسکوز) کاربرد دارد، در حالي که سيستم پيچشي را مي توان با کنترل بيشتري بر نحوه توزيع و اختلاط مواد با چسبندگي بالاتر مورد استفاده قرار داد. به عنوان مثال، سيستم پيچشي براي شکلات رنده شده همگن در چاپ استفاده شده است. سيستم هاي پنوماتيکي مي توانند براي توزيع مواد با چسبندگي بالا مناسب باشند (Mantihal *et al.*, 2017). بسته به نوع مواد در فرآيندهاي اکستروژن، روش هاي زير مورد استفاده هستند:

اکستروژن ذوب

مواد مناسب براي اکستروژن ذوب را مي توان به سه شکل استفاده کرد: خميري، پودري و رشته اي^۱ (در کاربردهاي غذايي نادر است). براي اطمينان از قابليت چاپ، کنترل دما در حين چاپ سه بعدي اکستروژني خميرهاي داراي چربي يا شکر (عمدتاً آمورف) ضروري است. به عنوان مثال، اسيدهاي چرب با تعداد اتم هاي کربن بيشتري، نقطه ذوب

بالاتري را نشان مي دهند. همچنين وجود تعداد بيشتري پيوندهاي دوگانه منجر به نقطه ذوب پايين تر ماده مي شوند. محققين، چربي کره را در دستور العمل هاي خمير سنتي بهينه کردند تا از مایع شدن ساختار نمونه چاپ شده هنگام پخت جلوگیری کنند. همان محققان از چربي بيکن (خوک) به عنوان طعم دهنده در چاپ پوره گوشت بوقلمون در ترکيب با افزودني ترانس گلوتاميناز استفاده کردند (Değerli, 2020).

شکلات متداول ترين جوهر خوراكي به دليل ماهيت ذوب شدن آن است. مي توان آن را به صورت ذوب شده (خمير مانند) يا به صورت پودر وارد مخزن چاپگر کرد. در پژوهش هاي اخير از شکلات رنده شده براي چاپ اشکال پيچيده استفاده شده است. ابعاد (ضخامت ديواره، ارتفاع و قطر)، وزن و همچنين خواص فيزيکي (خواص ذوب، رفتار جريان، قابليت ضربه خوردن) شکلات در چاپ سه بعدي داراي اهميت است. در چاپ شکلات، دماي نازل قبل از رسوب در ۳۲ درجه سلسيوس نگه داشته مي شود تا حالت ذوب نمونه اکستروژن شود، زيرا منحنی هاي رفتار جريان نشان مي دهد که ذوب شکلات در ۲۸ تا ۳۰ درجه سلسيوس شروع شده است (Lanaro *et al.*, 2019).

توليد و چاپ رشته هاي خوراكي محدود است. فقط يک حق ثبت اختراع در مورد ترکيب يک ماده فعال مانند عصاره روغن براي طعم، بو يا فوايد دارويي در يک رشته ساخته شده از پلی وينيل پيروليدون، نشاسته و مواد قوام دهنده تاکنون يافت شده است. در اين اختراع، مذاب داغ اکستروژن شده با ابعاد ۱/۷۵ تا ۳ ميلي متر گزارش شده است (Wang *et al.*, 2024). مزيت اين روش آن است که نياز به مراحل پردازش نهايي که معمولا براي چاپگر سه بعدي با استفاده از مواد اوليه نيمه جامد وجود دارد حذف مي گردد.

¹Filaments

جدول ۱- مقایسه فناوری‌های متفاوت چاپ سه بعدی غذایی

Table 1- Comparison of Different ۳D Food Technologies

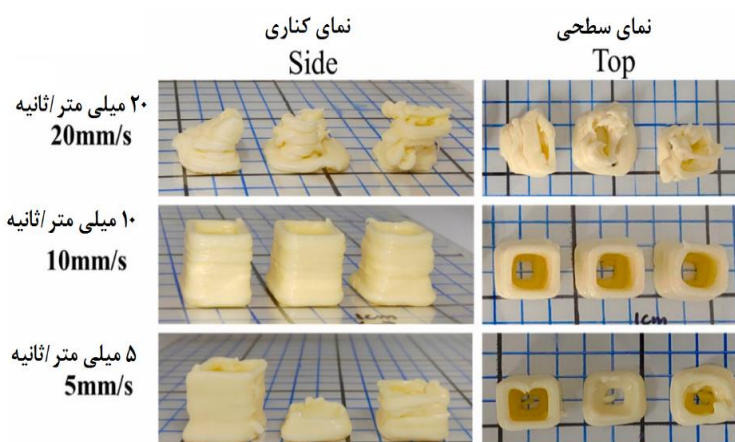
چاپ جوهر افشان Inkjet Printing	تزریق چسب Binder Jetting	تفجوشی انتخابی با لیزر Selective Laser Sintering	چاپ به روش اکستروژن Extrusion-Based Printing	
مواد با ویسکوزیته کم مانند سس پیتزا Low-viscosity material such as pizza sauce	مواد مایع و پودر شده مانند نشاسته، شکر، پروتئین Liquid binder and powdered materials such as starch, sugar, protein	مواد پودری مانند شکر، شکلات، چربی Powdered materials such as sugar, chocolate, fat	شکلات، مواد نرم مانند خمیر، پنیر، پوره گوشت Chocolate, soft material such as dough, cheese, meat puree	مواد مورد استفاده Available material
انطباق پذیری، خواص رئولوژیکی جوهر، خواص سطحی Compatibility, ink rheological properties, surface properties	جریان پذیری، اندازه ذرات، ترشوندگی، ویسکوزیته و کشش سطحی چسب Flowability, particle size, wettability and binder's viscosity and surface tension	دمای ذوب، جریان پذیری، اندازه ذرات، ترشوندگی، دمای انتقال شیشه Melting temperature, flowability, particle size, wettability, T _g	- خواص رئولوژیکی، مقاومت مکانیکی، دمای انتقال شیشه ^۱ Rheological properties, Mechanical strength, T _g	ویژگی‌های مواد Material properties
دما، سرعت چاپ، قطر نازل، ارتفاع چاپ Temperature, printing rate, nozzle diameter, printing height	انواع پیشران ها، سرعت چاپ، قطر نازل ضخامت لایه Head types, printing rate, nozzle diameter, layer thickness	انواع لیزر، قدرت لیزر، چگالی انرژی لیزر، سرعت اسکن، قطر نقطه لیزر، ضخامت لیزر Laser types, laser power, laser energy density, scanning speed, laser spot diameter, laser thickness	ارتفاع چاپ، قطر نازل، نرخ چاپ، سرعت حرکت نازل Printing height, nozzle diameter, printing rate, nozzle movement rate	عوامل پردازش Processing factors
ندارد No	گرما دادن، پخت، پوشش سطح، حذف قسمت‌های اضافی Heating, baking, surface coating, removal of excess parts	حذف قسمت‌های اضافی Removal of excess parts	افزودنی، کنترل دستور پخت Additive, recipe control	عوامل موثر بر دقت چاپ Factors affecting printing precision
انتخاب مواد بیشتر، کیفیت چاپ بهتر، ساخت سریع More material choices, better printing quality, fast fabrication	ساخت مواد غذایی سه‌بعدی پیچیده، پتانسیل رنگی بودن نمونه، طعم‌ها و بافت‌های مختلف Complex ۳D food fabrication, full colour potential, varying flavours and textures	ساخت مواد غذایی سه‌بعدی پیچیده، بافت‌های مختلف Complex 3D food fabrication, varying textures	انتخاب مواد بیشتر، دستگاه ساده More material choices, simple device	مزایا Advantages
طراحی ساده غذا، فقط برای تزئین سطحی Simple food design, only for surface filling or image decoration	محدودیت نوع مواد مورد استفاده، محصولات مغذی کمتر Limited material, less nutritious products	محدودیت نوع مواد مورد استفاده، محصولات مغذی کمتر Limited materials, less nutritious products	عدم توانایی در ساخت طرح‌های پیچیده مواد غذایی، نگهداری ساختارهای سه‌بعدی در پس از پردازش In capable of fabricating of complex food designs, difficult to hold 3D structures in postprocessing	محدودیت‌ها Limitation
				نمونه چاپ شده Products

¹ Glass transition temperature (T_g)

بعدی غذا: مروری بر روش‌ها، کاربردها و عوامل موثر بر کیفیت چاپ فناوری چاپ سه

عمود بر خط دوغاب رسوب‌شده پخش شده و نمونه اکستروژن شده دارای فشردگی کم است. همچنین استفاده از ارتفاع نازل بزرگتر، که منجر به نرسیدن قسمت‌هایی از شکلات به موقع به صفحه‌ی ساخت می‌شود، منجر به چاپ قطعات ناخواسته می‌گردد. دقت چاپ، تحت تأثیر سرعت اکستروژن و سرعت حرکت نازل است که دلیل آن قطر مهره مسیر شکلاتی است که با سرعت حرکت نازل کاهش می‌یابد در حالی که با سرعت اکستروژن افزایش می‌یابد (شکل ۱) (Huang et al., 2023).

تأثیر پارامترهای چاپ بر فرآیند چاپ نمونه در اکستروژن ذوب پارامترهای دستگاهی مانند قطر نازل، ارتفاع نازل، سرعت اکستروژن شدن و سرعت حرکت نازل، بر کیفیت ساختارهای چاپی در فرآیند چاپ ذوب بسیار مهم هستند. در مورد رسوب شکلات نشان داده شده است که فاصله بین نوک نازل و صفحه‌ی ساخت نقش مهمی در کیفیت نمونه چاپ شده دارد. گزارش شده است وقتی ارتفاع نازل کمتر از ارتفاع بهینه باشد، حجم شکلات اکستروژن شده در فضای بین صفحه‌ی ساخت و نازل بسیار زیاد است. بنابراین، دوغاب در جهت‌های



شکل ۱. اثر سرعت‌های مختلف چاپ سه بعدی بر روی چاپ شکلات سفید با اولئوژل. پارامتر چاپ: قطر نازل ۳ میلی‌متر، ارتفاع لایه ۳ میلی‌متر. Fig. 1. The effect of different 2D printing speeds on white chocolate printing with oleogel added. Printing parameter: nozzle diameter 3mm, layer height 3mm (Huang et al., 2023).

به محصول نهایی تهیه شده از شکلات ویژگی‌های پایدارتر، پوشش براق و بافت بهتر می‌دهد. بنابراین، بهینه‌سازی دقیق عملیات حرارتی برای به دست آوردن بلورهای V شکل ضروری است. (Rando et al., 2021).

کاربرد چاپ اکستروژن ذوبی در تولید مواد غذایی چاپ ذوب شکلات برای اولین بار با استفاده از سیستم چاپ سه بعدی خانگی انجام شد. پارامترهای پردازش مانند دما و سرعت اکستروژن که بر دقت چاپ در طول فرآیند چاپ شکلات تأثیر می‌گذارند مورد بررسی قرار گرفتند. چاپ اکستروژن ذوبی شکلات توسط Choc Edge's Choc Creator

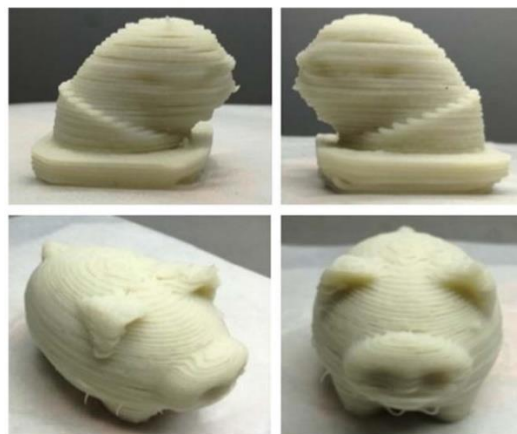
دما یک عامل مهم دیگر برای چاپ نمونه‌ای موفق در فرآیند ذوب است. مطالعاتی بر روی خصوصیات مواد و تأثیر آنها بر کیفیت نمونه چاپ انجام شده است. در طی این فرآیند، به شکلات از پیش ذوب شده یک دانه اضافه شد تا کریستال‌های V شکل بیشتری تولید شود که در رسوب شکلات مناسب است. دوغاب‌های شکلاتی با خواص شبه پلاستیک در دماهای مختلف در رسوب نمونه‌های سه بعدی بسیار دارای اهمیت هستند. در کره کاکائو شش ساختار چند شکلی بلورینه تشکیل می‌شود. بلور V شکل، با دمای ذوب بین ۳۵ تا ۳۸/۸ درجه سلسیوس، مهمترین ساختار بلورینه است و

نوک نازل منتقل می‌شوند. در طول فرآیند اکستروژن، مواد غذایی را می‌توان به طور پیوسته به قیف وارد کرد و چاپ مداوم انجام می‌شود. با این حال، اکستروژن پیچشی برای دوغاب مواد غذایی با ویسکوزیته و استحکام مکانیکی بالا مناسب نیست و نمونه‌های چاپ شده مقاومت مکانیکی مناسبی برای پشتیبانی از لایه‌های رسوب‌شده زیرین خود ندارند. بنابراین منجر به تغییر شکل فشرده با شفافیت کم می‌شوند (Liu et al., 2018). اکستروژن فشار هوا، که طی آن مواد غذایی توسط فشار هوا به نازل رانده می‌شوند، برای چاپ مواد مایع یا مواد با ویسکوزیته کم مناسب است (Sun et al., 2018). اکستروژن سرنگی برای چاپ مواد غذایی با ویسکوزیته و استحکام مکانیکی بالا مناسب است و می‌توان از آن برای ساخت ساختارهای سه بعدی پیچیده با شفافیت بالا استفاده کرد. برخی از نمونه‌های چاپ شده با چاپگر سرنگی در شکل 2 نشان داده شده است. البته باید توجه داشت که اکستروژن فشار هوا و اکستروژن سرنگی تزریق مداوم مواد غذایی در حین چاپ انجام نمی‌دهند.

System's ChefJet، Hershey's CocoJet و Chocabyte تجاری شده است (Pallottino et al., 2016). یک چاپگر اکستروژن ذوب شده توسط شرکت Natural Machines ساخته شده است تا برای چاپ شکلات استفاده شود (Galdeano., 2015). محققان مؤسسه فناوری ماساچوست از شکلات ذوب شده به عنوان مایع توزیع‌کننده استفاده کردند و چاپگری به نام «Digital Chocolatier» ساختند (Zoran & Coelho., 2011).

اکستروژن با مواد نرم

در طول فرآیند چاپ اکستروژن مواد نرم (ژل مانند)، دوغاب غذای خمیری به طور پیوسته از یک نازل متحرک خارج می‌شود و در هنگام خنک شدن به لایه‌های قبلی مانند خمیر، پوره سیب زمینی، پنیر و خمیر گوشت وصل می‌شود. سه مکانیسم اکستروژن شدن در چاپ سه‌بعدی مواد غذایی استفاده شده است: اکستروژن پیچشی^۱، اکستروژن فشار هوا^۲ و اکستروژن سرنگی^۳. در فرآیند اکستروژن پیچشی، مواد غذایی داخل مخزن نمونه قرار می‌گیرند و توسط یک پیچ متحرک به



شکل ۲- نمونه چاپ شده با استفاده از پوره سیب‌زمینی با چاپگر اکستروژن سرنگی
 Fig.2. Printed objects using mashed potatoes with a syringe-based printer (Liu et al., 2018).

³ Syringe-based extrusion

¹ Screw-based extrusion

² Air pressure-based extrusion

مارپیچ می‌شود. پیشنهاد گردیده است که یک رابطه خطی بین سرعت اکستروژن و قطر خطوط سوریمی وجود دارد (Wang *et al.*, 2018).

دمای چاپ نیز باید به خوبی تنظیم شود، زیرا ویسکوزیته مواد غذایی به طور مستقیم با دما در ارتباط است. در یک کار تحقیقاتی با استفاده از چاپگر سه بعدی Vegemite and Marmite، با افزایش دما، ویسکوزیته کاهش یافت. برای اکستروژن کردن مواد در دمای ۲۵ درجه سلسیوس، از فشار ۱۷۲ کیلو پاسکال استفاده شد، اما باید آن را به ۱۰۳ کیلو پاسکال در دمای ۴۵ درجه سلسیوس کاهش داد. اعمال فشار ۱۷۲ کیلو پاسکال برای ساخت اجسام در دمای ۴۵ درجه سلسیوس منجر به جریان بسیار زیاد و تشکیل حوضچه‌ای از مواد شد. با افزایش بیشتر دما تا ۶۵ درجه سلسیوس، اکستروژن خیلی سریع ماده حتی با اعمال فشار بسیار کم (کمتر از ۳۴ کیلو پاسکال) انجام می‌شود (Hamilton *et al.*, 2018).

در چاپ اکستروژن، خواص مواد غذایی مانند رطوبت، خواص رئولوژیکی، مکانیسم‌های تشکیل پیوند و خواص حرارتی، برای یک چاپ موفق بسیار مهم هستند. ویسکوزیته مواد نرم باید به اندازه کافی کم باشد تا به راحتی از طریق یک نازل ریز اکستروژن شود و به اندازه کافی زیاد باشد تا لایه‌های رسوب شده بعدی را نگه دارد. رئولوژی مواد نرم (ژل مانند) را می‌توان بر اساس نیروهای ذرات جزئی و یا کلونیدی تنظیم کرد. در چاپ سه بعدی، برای جلوگیری از ژل شدن زودرس مواد در داخل نازل، باید خواص الاستیک همراه با کنترل زمانی مکانیسم‌های ژل شدن در نظر گرفته شود. مکانیسم‌های ژل سازی را می‌توان در پنج دسته طبقه بندی کرد: ژل شدن حرارتی، پیوند شیمیایی، پیوند یونی، تشکیل توده کلونیدی

اثر پارامترهای چاپ بر فرآیند چاپ اکستروژن با مواد نرم پارامترهای چاپ موثر بر فرآیند، توسط بسیاری از محققان مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از ارتفاع نازل کمتر از ارتفاع بهینه منجر به ایجاد خطوط اکستروژن شده ضخیم تر از آنچه در نظر گرفته شده است می‌گردد. در حالی که ارتفاع بیشتر منجر به این می‌شود که قسمت‌هایی از خطوط اکستروژن شده قبل از اینکه نازل به گوشه بپیچد به صفحه‌ی ساخت نرسد و در نتیجه منجر به برش‌های نادرست گردد (Ye *et al.*, 2024).

تعیین اثر قطرهای مختلف نازل بر محصول تولید شده آسان است. یک قانون سرانگشتی ایمن این است که کوچکترین قطر نازل را انتخاب کرد که امکان اکستروژن آسان مواد را فراهم کند، زیرا ساخت نمونه با بهترین وضوح و سطح صاف در طول چاپ دارای اهمیت می‌باشد. قطر نازل به طور قابل توجهی بر دقت چاپ و صافی سطح تاثیر می‌گذارد. چاپ سه بعدی خمیر ماهی (سوریمی) نشان داد که استفاده از نازل با قطر کوچک ۰/۸ میلی متر به دلیل وجود رشته سوریمی اکستروژن شده نامناسب در طول انجام فرآیند، منجر به مدل‌های نسبتاً ضعیفی می‌شود. برعکس، استفاده از قطر نازل بزرگتر (۱/۵ میلی متر) می‌تواند خطوط ثابت را اکستروژن کند، اما وضوح و دقت نمونه پایین است (Liu *et al.*, 2018).

برای ایجاد تعادل خوب در بهره‌وری و دقت چاپ، سرعت اکستروژن و سرعت حرکت نازل در چاپ اکستروژن مهم هستند. گزارش شده است وقتی تمام پارامترهای دیگر ثابت نگه داشته می‌شوند تغییر سرعت نازل بر ارتفاع نازل تاثیر می‌گذارد. سرعت خیلی زیاد (۳۲ میلی متر بر ثانیه) منجر به اثر کشش می‌شود و باعث شکستن رشته‌های اکستروژن شده می‌گردد، در حالی که سرعت حرکت بسیار کم (۲۰ میلی متر بر ثانیه) منجر به بروز ناپایداری جریان دوغاب و تشکیل فرم

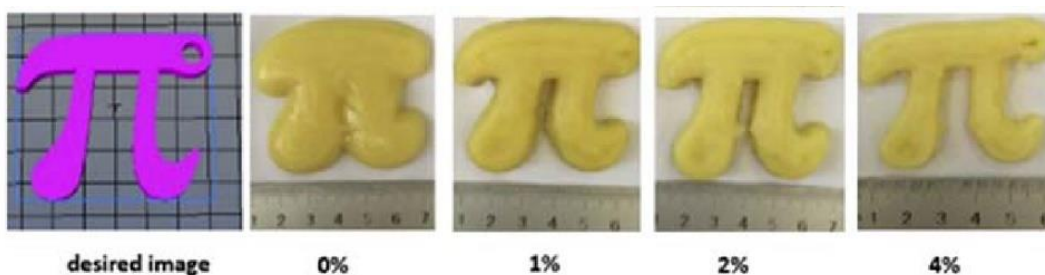
شکل خوبی را نشان می‌دهند، اما اکستروژن پذیری به دلیل قوام نسبی و ویسکوزیته بالا، دشوار می‌گردد. نمونه‌های چاپ شده در شکل ۳ نشان داده شده است (Liu *et al.*, 2018).

کاربرد چاپ اکستروژن مواد نرم در تولید مواد غذایی محققان دانشگاه کرنل ساخت خامه کیک، پنیر فرآوری شده و شیرینی‌های شکر را با استفاده از چاپ اکستروژن مورد مطالعه قرار دادند (Wang *et al.*, 2022). این فناوری همچنین توسط سازمان تحقیقات علمی کاربردی هلند (TNO)^۴ برای ساخت انواع غذاها با استفاده از مواد سنتی و مواد غیرسنتی مانند جلبک‌ها و حشرات استفاده شده است. چاپگر دیگر اکستروژنی مواد غذایی توسط Natural Machines ساخته شده است تا برای پر کردن سطح و تزئینات گرافیکی استفاده شود. بسیاری از انواع مواد غذایی مانند ژل آب لیمو، پنیر فرآوری شده، ژل پکتین، تنقلات میوه‌ای، شکلات و بسیاری از محصولات غذایی دیگر با استفاده از فناوری چاپ اکستروژن چاپ شده‌اند (Agunbiade *et al.*, 2022).

پیچیده^۱ (کمپلکس کواسرواتیو) و پیوند آنزیمی (Kamlow., 2023).

اثر خواص رئولوژیکی پوره سیب زمینی بر چاپ سه بعدی با افزودن غلظت‌های مختلف نشاسته سیب زمینی بررسی شد. نتایج نشان داد که مواد مطلوب برای چاپ سه بعدی مواد غذایی نه تنها باید دارای تنش تسلیم^۲ (τ_0) و مدول الاستیک (G') مناسب باشند تا بتوانند اشکال چاپ شده را حفظ کنند، بلکه باید دارای شاخص قوام نسبی^۳ (K) و شاخص رفتار جریان (n) پایین باشند تا به راحتی از نازل چاپگر خارج شوند. با اضافه شدن ۲ درصد نشاسته سیب زمینی به پوره سیب زمینی، قابلیت اکستروژن پذیری و چاپ پذیری عالی نشان داده شد. بنابراین، نمونه‌ها توانستند در طول زمان فرم شکل را حفظ کنند و وضوح صاف داشتند. بدون افزودن نشاسته سیب زمینی مقادیر G' و τ_0 کمتر است. بنابراین، نمونه‌های چاپ شده با گذشت زمان تغییر شکل می‌دهند.

با افزودن ۴ درصد نشاسته سیب زمینی به پوره سیب زمینی به دلیل τ_0 و G' مناسب، نمونه‌های چاپ شده حفظ



شکل ۳- تصاویر و نمونه‌های چاپی با استفاده از پوره سیب زمینی با غلظت‌های مختلف نشاسته سیب زمینی

Fig.3. Desired images and printed objects using mashed potatoes with addition of different concentrations of potato starch (Liu *et al.*, 2018).

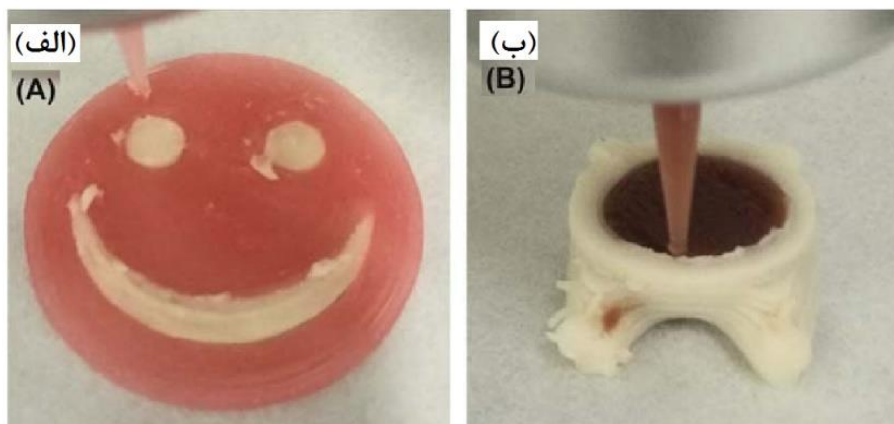
⁴Netherlands Organization for Applied Scientific Research

¹Complex coacervate formation

² Yield stress

³ Relative low consistency index

بعدی غذا: مروری بر روش‌ها، کاربردها و عوامل موثر بر کیفیت چاپ فناوری چاپ سه



شکل ۴- برخی از نمونه‌های چاپ شده با استفاده از چاپ اکستروژنی. (الف) پوره سیب زمینی و ژل آب توت فرنگی؛ (ب) پوره سیب زمینی و مربای توت فرنگی.

Fig.4. Some printed samples using extrusion-based printing (our group). (A) mashed potatoes and strawberry juice gel; (B) mashed potatoes and strawberry jam (Godoi *et al.*, 2018).

اثر پارامترهای چاپ بر فرآیند چاپ تفجوشی

پارامترهای پردازش مانند انواع لیزر، قطر لیزر، قدرت لیزر و سرعت اسکن باید به دقت تنظیم شوند تا نتیجه دلخواه به دست آید. برهمکنش بین مواد پودری و پرتو لیزر برای کیفیت نمونه‌های ساخته شده در تفجوشی انتخابی با لیزر بسیار مهم است، زیرا قدرت برهمکنش به انواع لیزر بستگی دارد و همجوشی مواد تحت تأثیر چگالی انرژی لیزر قرار می‌گیرد. چگالی انرژی لیزر بالاتر، که با تنظیم سرعت اسکن و قدرت لیزر به دست می‌آید، به دلیل زمان برهمکنش طولانی‌تر منجر به تولید قطعات متراکم‌تر با استحکام مکانیکی قوی‌تر می‌شود. هنگامی که چگالی انرژی لیزر کمتری اعمال شود، ساختار متخلخل و شکننده به دست می‌آید (Llamas-Unzueta *et al.*, 2025).

CandyFab از هوای گرم برای تفجوشی و ذوب انتخابی پودر قند استفاده می‌کند. زمان برهمکنش بین شلیک هوای گرم و پودر قند ۱ تا ۳ ثانیه است که با توجه به دمای هوا و ضخامت لایه تعیین می‌شود. قطر لیزر بزرگتر باعث شد نمونه‌ها کمتر شکسته شوند و سرعت ساخت بالاتری با افزایش حرارت و سرعت به دست آید، ولی دقت و وضوح نمونه ضعیف است.

تفجوشی انتخابی با لیزر

تفجوشی انتخابی با لیزر (SLS) یک فناوری است که از قدرت یک لیزر برای ذوب انتخابی ذرات پودر به صورت لایه به لایه تا تشکیل یک ساختار سه بعدی استفاده می‌کند. لیزر بر روی سطح هر لایه سطح مقطع را اسکن می‌کند و به طور انتخابی پودر را ذوب می‌کند. پس از اسکن هر مقطع، لایه جدیدی از پودر روی آن پوشانده می‌شود. این روند تا زمانی که ساختار مورد نظر تکمیل شود تکرار می‌شود. در نهایت، پودر ذوب نشده حذف شده و برای چاپ بعدی بازیابی می‌شود. موانع متعددی برای استفاده از این روش در بخش مواد غذایی وجود دارد: الف) مواد پودری مناسب که بتوانند بدون تجزیه مواد داخلیشان در طول فرآیند ساخت، با هم ذوب شوند. ب) ساخت نمونه‌های خوراکی محدود به دلیل محدودیت در مواد اولیه غذایی.

به طور کلی، SLS امکان تولید ساختارهای سه بعدی پیچیده مستقل با وضوح بالا را فراهم می‌کند، برای توسعه کاربرد این فناوری در غذاهای سنتی لازم است طیف موجود مواد غذایی را گسترش داد (Jonkers *et al.*, 2022).

پودر قند ایجاد کرده است که نمی‌توان آن‌ها را با روش‌های معمولی تولید کرد (Fujiwara et al., 2025).

روش تزریق چسب

چاپ تزریق چسب روشی است که در طی آن ماده اولیه پودری به صورت لایه به لایه با استفاده از تزریق کنترل شده مواد چسب‌مانند به وسیله پیشران متحرک چاپگر به هم متصل می‌شوند. چسب (بایندر) سطح مقطع فعلی را به مقاطع ذوب شده قبلی و بعد از آن متصل می‌کند. پودر ذوب نشده قطعات ذوب شده را در طول فرآیند ساخت پشتیبانی می‌کند و امکان تولید ساختارهای پیچیده را فراهم می‌کند. در نهایت، پودر استفاده نشده حذف شده و برای استفاده بیشتر بازیافت می‌شود. فناوری تزریق چسب را می‌توان برای ساخت ساختارهای سه‌بعدی پیچیده و ظریف استفاده کرد. این روش پتانسیل تولید نمونه‌های خوراکی سه‌بعدی رنگارنگ با ترکیب‌بندی مختلف را دارا می‌باشد (Farooq, Ranjan., 2023).

اثر پارامترهای چاپ بر فرآیند چاپ به روش تزریق

عوامل پردازش مانند انواع پیشران، سرعت چاپ، مسیر قطرات، قطر نازل و فرکانس رزونانس پیشران، بر دقت نمونه چاپی تأثیر می‌گذارند. به طور کلی، قطر نازل بزرگتر به افزایش سرعت چاپ کمک می‌کند اما وضوح و دقت نمونه ساخته شده را کاهش می‌دهد. برای دستیابی به یک چاپ موفق، عوامل پردازش ذکر شده در بالا باید به درستی تنظیم شوند. در فرآیند تزریق چسب، خواص مواد پودری و چسب (بایندر) برای ساخت موفقیت‌آمیز نمونه دارای اهمیت هستند. چسب باید دارای ویسکوزیته مناسب، کشش سطحی، چگالی جوهر و خواص مناسب برای جلوگیری از پخش شدن از نازل‌ها داشته باشد. غلظت چسب نیز برای ساخت نمونه با دقت ابعادی مورد نظر مهم است.

جریان‌پذیری پودر نیز مهم است. پودر با جریان‌پذیری مناسب به غلتک اجازه می‌دهد تا به راحتی لایه‌های نازکی

تغییر قطر لیزر از ۵ میلی‌متر به حدود ۱/۶ میلی‌متر، وضوح و دقت چاپ را بهبود می‌بخشد، اما سرعت ساخت و استحکام مکانیکی نمونه چاپ شده کاهش می‌یابد. ساخت یک نمونه خوراکی رنگارنگ و دقیق، به روش تفجوشی انتخابی با لیزر با استفاده از لیزر کربن دی‌اکسید با قطر نقطه لیزر ۰/۶ میلی‌متر و پارامترهای خاص (فاصله لایه ۰/۱ میلی‌متر، سرعت ۱۲۵۰ میلی‌متر بر ثانیه، توان لیزر ۵۰ درصد و ضخامت لایه ۰/۳ میلی‌متر) انجام شده است (Puértolas et al., 2024).

خواص مواد شامل: اندازه ذرات، روان‌پذیری، چگالی ظاهری و ترشوندگی مواد پودری تأثیر زیادی بر دقت چاپ نمونه با روش تفجوشی انتخابی با لیزر دارد. چگالی پودر و تراکم‌پذیری نیز مهم هستند، زیرا آنها به طور جدی بر جریان‌پذیری پودر در داخل ظرف تأثیر می‌گذارند که به نوبه خود به شکل‌گیری نمونه در هنگام اعمال منبع لیزر به بستر پودر کمک می‌کند. پودر خوراکی ترجیحی در تفجوشی انتخابی با لیزر باید پودری با جریان آزاد باشد که بتوان آن را بدون کلوخه شدن استفاده کرد. علاوه بر این، ماده پودری نباید چسبندگی داشته باشد و هیچ تمایلی به تجمع یا چسبیدن به صفحه‌ی ساخت را نداشته باشد. اندازه ذرات بر دقت چاپ و وضوح نمونه چاپ شده اثر می‌گذارد. ضخامت لایه‌ی کمتر منجر به استحکام مکانیکی قوی‌تر و کاهش تخلخل نمونه‌های چاپ شده می‌شود. حداقل ضخامت لایه‌ای که می‌تواند در تفجوشی انتخابی با لیزر استفاده شود با حداکثر اندازه ذرات پودر تعیین می‌شود (Shabir et al., 2022).

کاربرد چاپ لیزری در تولید مواد غذایی

تفجوشی انتخابی با لیزر برای ساخت ساختارهای پیچیده با استفاده از شکر یا پودرهای غنی از قند استفاده شده است. ساختارهای سه‌بعدی ظریف و پیچیده توسط محققان TNO با استفاده از شکر و پودر کاکائو NesQuik چاپ شده است. با استفاده از تفجوشی انتخابی با لیزر، شرکت CandyFab با موفقیت ساختارهای پیچیده و جذاب مختلفی را با استفاده از

تصویر روی سطوح غذا مانند کوکی، کیک و پیتزا می‌ریزد. دو نوع روش چاپ جوهرافشان وجود دارد:

چاپ جوهر افشان پیوسته (C-IJP)^۲ و چاپ جوهر افشان قطره‌ای^۳. در یک چاپگر جوهرافشان پیوسته، جوهر به طور مداوم از طریق یک پیشران حرارتی که با فرکانس ثابت ارتعاش می‌کند، خارج می‌شود. در چاپگرهای قطره‌ای، جوهر تحت فشار اعمال شده توسط یک سوپاپ از پیشران‌ها خارج می‌شود. به طور کلی، سرعت چاپ سیستم‌های قطره‌ای پایین‌تر از سیستم‌های پیوسته است، اما وضوح و دقت تصاویر تولید شده بالاتر است (Liu et al., 2025).

اثر پارامترهای چاپ بر فرآیند چاپ

ویسکوزیته و خواص رئولوژیکی جوهر خوراکی برای دقت و صحت چاپ بسیار مهم است. لازم است جوهرهای خوراکی ویسکوزیته پایینی داشته باشند تا جریان‌پذیری مناسبی را فراهم کنند و بتوانند به راحتی از نازل‌های کوچک پیشران چاپ خارج شوند. ویسکوزیته مطلوب جوهرها بین ۲/۸ تا حدود ۶ میلی‌پاسکال ثانیه می‌باشد.

دما یکی دیگر از عوامل مهم در چاپگر جوهرافشان است، زیرا می‌توان از آن برای اصلاح خواص رئولوژیکی و انرژی سطحی جوهرها استفاده کرد. دمای پایین ممکن است برای کاهش انرژی سطح اعمال شود و تمایل پخش جوهر را کاهش دهد. دمای مورد نیاز برای دستیابی به ویسکوزیته مطلوب با ترکیبات جوهر تغییر می‌کند (Voon et al., 2019).

سازگاری تصویر چاپ شده با سطوح زیرلایه‌ها نقش مهمی در تعیین کیفیت و وضوح تصویر نهایی دارد. شیمی سطح زیرلایه‌ها و جوهر بر رفتار برهمکنش قطرات جوهر وقتی بر روی سطح ریخته می‌شوند، تأثیر می‌گذارد. گاهی اوقات لازم است قبل از چاپ تصویر، سازگاری سطح زیرلایه را با پوشش دادن سطح با یک لایه چسب یا دیگر لایه‌های تقویت‌کننده

بسازد، که ساخت را با دقت بالا تسهیل کند. برعکس، جریان-پذیری ضعیف، وضوح و دقت قطعات چاپ شده را به دلیل پوشش مجدد ناکافی کاهش می‌دهد. در این روش، پودرهای دارای جریان آزاد با خواص پخش و بسته‌بندی مناسب ترجیح داده می‌شوند. این بدان معنی است که پودر چسبنده نباشد و تمایلی به تجمع یا چسبیدن به صفحه‌ساخت را نداشته باشد. ترشوندگی^۱ پودر یکی دیگر از عوامل موثر در چاپ دقیق است. پیشنهاد شده است که خیس شدن خیلی کم مواد پودری منجر به چسبندگی مجدد بستر پودر می‌شود که برای چاپ بعدی مضر است. خیس شدن بسیار زیاد و واکنش آهسته بین پودر و چسب، وضوح و دقت نمونه چاپ شده را کاهش می‌دهد. میزان رطوبت پودر خوراکی مورد استفاده در فرآیند تزریق چسب باید کمتر از ۶ درصد بر اساس ترکیب ماده پودر باشد. اندازه ذرات و توزیع پودرها نیز بر دقت و صحت چاپ اثر می‌گذارد، زیرا تغییر اندازه ذرات بر توزیع اندازه منافذ در بستر پودر تأثیر می‌گذارد و بنابراین بر نحوه اتصال با یک چسب تأثیر دارد. برای دستیابی به پودر خوراکی با کیفیت پخش و بسته‌بندی مناسب، ذرات پودر درشت را می‌توان با ذرات پودر ریز مخلوط کرد (Farooq, Ranjan., 2023).

کاربرد چاپ تزریق چسب در تولید مواد غذایی

فرآیند تزریق چسب مزایایی مانند ساخت سریع، ساخت نمونه‌های پیچیده و هزینه کم مواد را دارد. بر اساس این روش، ساخت نمونه‌های خوراکی با استفاده از شکر و مخلوط نشاسته انجام شده است. محققان برای تولید طیف گسترده‌ای از نمونه‌های خوراکی رنگارنگ و خوش‌طعم، مانند انواع کیک‌های با ظاهر پیچیده، از این فرآیند استفاده کرده‌اند (Zuh et al., 2022).

چاپ جوهرافشان

چاپ جوهرافشان جریان‌ی از قطرات را از یک پیشران حرارتی به منطقه خاصی از نمونه برای پر کردن سطح یا تزیین

³Drop-on-demand Inkjet printing

¹ Wettability

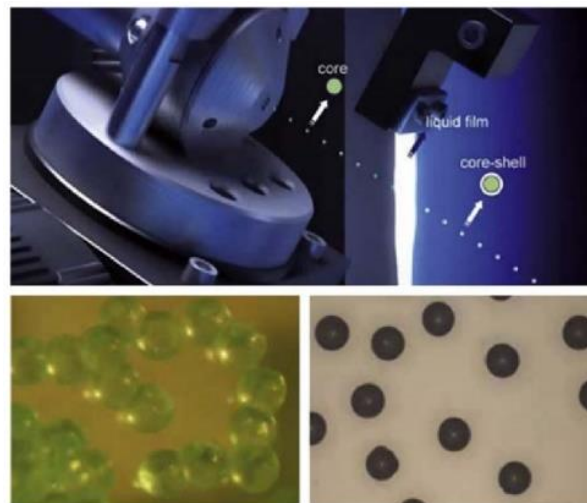
²Continuously Inkjet printing

به ثبت رسانده است که از چربی و مواد خوراکی تشکیل شده‌اند. در این مورد، زیرلایه می‌تواند شامل قطعات شیرینی-پزی با سطوح غیرصاف و آبگریز باشد. همچنین شرکت چند ملیتی آمریکایی Procter and Gamble از فناوری جوهرافشان برای طعم دادن به زیرلایه‌های خوراکی استفاده کرده است. محققان TNO یک روش برپایه اتصال ذرات مایع به نام چاپ بستر پودری را ارائه کردند. در این روش، نمونه‌های سه‌بعدی خوراکی با تزریق مواد مایع غذایی (به عنوان بایندر) روی یک بستر پودری حاوی پودر غذای فرموله شده متشکل از پروتئین محلول در آب و/یا یک هیدروکلوئید تولید می‌شوند (Hakim *et al.*, 2024). آنها پیشران چاپی را اختراع کردند که قطرات تک توزیعی^۱ تولید می‌کند که پس از خشک شدن به پودر تبدیل می‌شوند. پیشران چاپ دارای ۵۰۰ نازل با ظرفیت ۱۰۰ لیتر در ساعت است. شکل ۶ نمونه‌هایی از ذرات پوسته هسته ساخته شده با چاپگر ریزپوشانی TNO را نشان می‌دهد که در آن هسته شربت نعنای با پوسته موم و روغن بذر کتان با پوسته کاراگینان دیده می‌شود.

بهبود بخشید. گاهی چسبی مانند شلاک یا پلی (۱-وینیل-۲-پیرولیدون) به جوهر خوراکی اضافه می‌شود. لعاب‌های بر پایه آب حاوی صمغ‌ها یا سایر مواد فعال سطحی (سورفکتانت‌ها)، مانند پلی‌گلیسرول اولئات‌ها و پلی‌سوربات‌ها، نیز برای بهینه شدن امکان چاپ تصاویر با وضوح بالا بر روی سطح استفاده شده‌اند. (Voon *et al.*, 2019).

کاربرد چاپ جوهرافشان در تولید مواد غذایی

چاپ جوهرافشان به طور کلی با مواد با ویسکوزیته پایین کار می‌کند. بنابراین، در زمینه پر کردن سطح یا تزئین تصویر استفاده می‌شود. از چاپگر Food Jet از نازل‌های غشایی برای ریختن قطرات خوراکی بر روی بسترهای خوراکی مانند بیسکویت، کیک و کراکر برای تشکیل یک سطح جذاب استفاده می‌کند. این چاپگر Chef Jet از فرآیند جوهرافشان برای تولید طیف گسترده‌ای از دستور پخت‌های قنادی از جمله شکر، فوندانت، آب نبات شیرین و ترش در اشکال و طعم‌های مختلف استفاده می‌کند. شرکت صنایع غذایی Mars، استفاده از پیشران چاپ فرایند حرارتی برای چاپ تصاویر با وضوح بالا را



شکل ۵- نمونه‌هایی از ساختارهای هسته-پوسته چاپ شده: شربت نعنای موم (چپ، پایین) و روغن دانه کتان - کاراگینان (راست، پایین).

Fig.5. Illustrates examples of core-shell particles mint syrup core with wax shell (left, bottom) and linseed oil with carrageenan shell (right, bottom) (TNO, 2017).

¹Monodisperse

تأثيرات زيست محيطي و اقتصادي چاپ سه‌بعدي غذا

چاپ سه‌بعدي غذا مزايای خاصی در اقتصاد و محيط زيست دارد از جمله: توليد مواد غذايي کنترل شده، کاهش هزينه‌های توليد، کاهش نيازهای حمل و نقل مواد غذايي، کاهش نيازهای بسته‌بندی و تأثير مستقيم و غيرمستقيم بر محيط زيست. در اين راستا به جهت کنترل اقتصاد در اين صنعت، جوهرهای غذايي می‌توانند به صورت خميري يا پودري که قبل از چاپ به دستگاه اضافه می‌شود، به مقصد ارسال شوند. چاپ سه‌بعدي می‌تواند ضايعات مواد غذايي پس از برداشت و پس از فرآوری را کاهش دهد و ماندگاری مواد غذايي را افزايش دهد. اين استفاده از چاپ سه‌بعدي می‌تواند برای بهبود پايداری عرضه مواد غذايي با ايجاد غذاهای با كيفيت بالا از منابع پروتئينی جایگزین (مانند گیاهان، ميكروب‌ها يا حشرات) به جای استفاده از پروتئين‌های منابع حیوانی (مانند گوشت، ماهی، تخم مرغ يا شير) مورد استفاده قرار گیرد (Severini, et al., 2018).

مخزن‌های جوهر غذا را می‌توان دوباره استفاده کرد و در نتيجه بازيافت و کاهش بيشتري ضايعات امکان‌پذير می‌شود. بسياری از محققان در زمينه مواد بسته‌بندی پايدار، مانند فيلم‌های خوراکی ساخته شده از پروتئين‌ها، پلی‌ساکاريدها، ليپيدها و کامپوزيت‌های آنها، که می‌توانند برای کاهش اثرات زيست‌محيطی مرتبط با نگهداری مواد غذايي استفاده شوند، فعاليت دارند. اين فيلم‌های خوراکی می‌توانند جوهرهای غذايي را ذخيره کنند و در نتيجه اثرات زيست‌محيطی آنها را کاهش دهند. از طرف ديگر، می‌توان از فناوري چاپ سه‌بعدي نيز برای ايجاد اين فيلم‌های خوراکی استفاده کرد. سلولز به دليل فراوانی، مقرون به صرفه بودن، زيست‌تخریب‌پذیری و خواص آن، یکی از اميدوارکننده‌ترین مواد برای ايجاد فيلم‌های خوراکی است. تحقيقات قبلی نشان داده است که غذاهای چاپ سه‌بعدي می‌توانند هزينه و انرژی مرتبط با نگهداری، حمل و نقل و توزيع مواد غذايي را کاهش دهند (Enfield et al., 2023).

یکی ديگر از حوزه‌هایی که چاپ سه‌بعدي کاربرد دارد مزايای زيست‌محيطی است، توليد جایگزین‌های گیاهی برای محصولات حیوانی مانند گوشت، ماهی، تخم مرغ و لبنیات است. در واقع، توليد دام منبع اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای، استفاده از زمين، استفاده از آب، آلودگی و از بين رفتن تنوع زيستی است. در نتيجه، جایگزینی غذاهای حیوانی با نسخه‌های گیاهی می‌تواند تأثير عمده‌ای بر محيط زيست داشته باشد. کاربرد چاپ سه‌بعدي، بررسی آنالوگ‌های گوشت با كيفيت بالا از جوهرهای غذايي حاوی پروتئين‌های جایگزین مانند پروتئين‌های مشتق شده از گیاهان، ميكروب‌ها يا حشرات است. علاوه بر اين، چاپ سه‌بعدي می‌تواند برای ايجاد گوشت برپايه سلول يا گوشت کشت‌شده نيز استفاده شود. در اين حالت، از چاپگر سه‌بعدي برای تشکيل داربستی استفاده می‌شود که حاوی سلول‌های زنده گرفته شده از یک حيوان است. اين سلول‌ها رشد و تکثير می‌شوند و در نهايت منجر به

ضايعات مواد غذايي یک مشکل اساسی است که در هر مرحله از زنجيره تأمین مواد غذايي رخ می‌دهد و پايداری توليد جهانی مواد غذايي را کاهش می‌دهد نیمی از کل مواد غذايي توليد شده در سراسر جهان منجر به ضايعات پس از برداشت می‌شود که خسارت‌های مالی زيادی را به دنبال دارد. ضايعات غذايي شامل مواد غذايي است که هنوز قابل خوردن هستند اما به دليل اينکه ديگر مطلوب نيستند هدر می‌روند، هنوز برای مصرف بی‌خطر هستند و بقايای غذاهای آماده. در کشورهای در حال توسعه و توسعه نیافته، ضايعات مواد غذايي به دليل زنجيره تأمین ناکارآمد و سيستم‌های توزيع ناکافی ايجاد می‌شود. چاپ سه‌بعدي مواد غذايي می‌تواند از روش‌های مختلف برای رفع اين مشکلات استفاده شود (Jiang et al., 2019). علاوه بر اين، غذاهای چاپ سه‌بعدي می‌توانند میزان مواد بسته‌بندی مورد نياز صنعت غذا را کاهش دهند.

و گسترش منابع مواد غذایی (کاهش حجم حمل و نقل و در نتیجه کاهش هزینه‌های بسته‌بندی و توزیع)، تنوع در منبع مواد غذایی (استفاده از مواد غذایی غیرمرسوم مانند حشرات، مواد گیاهی با فیبر بالا و محصولات جانبی گیاهی و حیوانی)، صرفه‌جویی در مواد و مدت زمان تهیه غذای سفارش شده و ساخت ساختارهای جذاب از محصولات خوراکی برای افزایش علاقه و اشتهای مصرف‌کنندگان، کاهش ضایعات مواد غذایی. اگرچه فناوری‌های ساخت افزایشی مزایای متعددی نسبت به فرآیندهای تولید مرسوم ارائه می‌دهند، اما نمی‌توان از محدودیت‌های آنها چشم‌پوشی کرد. پارامترهای متعددی وجود دارند که باید برای چاپ سه‌بعدی مواد غذایی بهینه‌سازی شوند. این پارامترها شامل نیروی مکانیکی، فرمولاسیون مواد و انتخاب جوهرهای غذایی مناسب برای چاپ، ویژگی‌های جوهرهای غذایی (خواص رئولوژیکی، اندازه ذرات و غیره)، پارامترهای فرآیند (قطر نازل، سرعت جریان مواد اولیه، سرعت چاپ، فاصله چاپ و غیره) و روش‌های پس از پردازش (پختن، سرخ کردن و غیره) است. ترکیب نامناسب مواد اولیه در منبع مواد اولیه، پایداری منبع مواد اولیه در طول فرآیند چاپ و متغیرهای پس از چاپ از نگرانی‌ها هستند. تضمین کیفیت و کنترل دقیق تغذیه، ایمنی و سلامت غذای حاصل از چاپ سه‌بعدی حائز اهمیت است.

تعارض منافع

نویسندگان هیچگونه تعارض منافی برای اعلام ندارند.

ساختارها و بافت‌های شبیه گوشت می‌شوند (Handral *et al.*, 2020).

نتیجه‌گیری

فناوری چاپ سه‌بعدی می‌تواند بُعد جدیدی به غذاهای فرآوری شده ببخشد و به تولید غذاهای مغذی و مقرون‌به‌صرفه کمک کند. با توجه به تقاضا برای سفارشی‌سازی در مقیاس بزرگ و راحتی بیشتر تولید محصولات غذایی توسط فناوری چاپ سه‌بعدی از نظر جذابیت، زیبایی‌شناختی و اهمیت مواد مغذی مناسب در شبکه‌های غذایی، بازار چاپ سه‌بعدی مواد غذایی با سرعت زیادی در حال رشد است. این فناوری نقش مهمی در بازار نوظهور آشپزی دیجیتال ایفا کرده است. تلاش‌های متعددی در تولید طعم‌ها و بافت‌های رنگارنگ و متنوع و البته مغذی محصولات غذایی با استفاده از روش‌های چاپ اکستروژن، فناوری تزریق چسب، چاپ جوهرافشان و تفجوشی انتخابی با لیزر در حال انجام است دلایلی که رشد این فناوری را ارتقا می‌دهند عبارتند از سازگاری با محیط زیست و پایداری فناوری در درازمدت، استفاده از مواد اولیه کمتر با تقاضای انرژی کمتر، طرح‌های غذایی پیچیده و عجیب (که به روش دستی یا قالب‌های معمولی امکان پذیر نیست)، طرح‌های سفارشی غذا، سفارشی‌سازی شکل‌های شیرینی، سفارشی‌سازی تصاویر رنگارنگ بر روی سطوح زیرلایه‌های خوراکی جامد، تغذیه شخصی و دیجیتالی (با توجه به وضعیت جسمانی و تغذیه‌ای مصرف‌کننده)، ساده کردن زنجیره تامین

منابع

- Agunbiade, A. O., Song, L., Agunbiade, O. J., Ofoedu, C. E., Chacha, J. S., Duguma, H. T., & Guine, R. P. (2022). Potentials of 3D extrusion-based printing in resolving food processing challenges: A perspective review. *Journal of food process engineering*, 45(4), e13996. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13996>.
- Değerli, C. (2020). Processed meat production in 3 dimensional (3D) printing technology. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 8(5), 1018-1026. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v8i5.1018-1026.2978>.

- Enfield, R. E., Pandya, J. K., Lu, J., McClements, D. J., & Kinchla, A. J. (2023). The future of 3D food printing: Opportunities for space applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(29), 10079-10092. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2077299>
- Esmailzadeh, Sh. (2023). Metal additive manufacturing technology: A review of biomedical applications. *Chemical Research and Nanomaterials*, 2(3), 25-41. (In Persian)
- Esmailzadeh, Sh. Vaghefi, M. Esmailzadeh, B. & Tavallali, M.S.(2025) 3D Printing Technology and Additive Manufacturing: a Review of Biomedical Application, *Razi Journal of Medical Sciences*. 32 (59). (In Persian) <https://doi.org/10.47176/rjms.32.59>.
- Farooq, S., & Ranjan, N. (2023). A review on binder jetting and selective laser sintering: A novel assessment of the processes for 3D insect food printing materials. *3D Printing of Sustainable Insect Materials*, 173-190. https://doi.org/10.1007/978-3-031-25994-4_11.
- Fujiwara, K., Igeta, Y., Toba, K., Ogawa, J., Furukawa, H., Hashizume, M., & Ito, N. (2025). Laser Cook Fusion: Layer-Specific Gelation in 3D Food Printing via Blue Laser Irradiation. *Food and Bioprocess Technology*, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s11947-025-03817-6>.
- Galdeano, J. A. L. (2014). 3D printing food: The sustainable future (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, 2014 (Programes de mobilitat" outgoing"(ETSEIB).
- Godoi, F. C., Bhandari, B., Prakash, S., & Zhang, M. (1 Eds.). (2018). *Fundamentals of 3D food printing and applications*. Academic press. Chapter 2, p.36.
- Hakim, L., Deshmukh, R. K., Lee, Y. S., & Gaikwad, K. K. (2024). Edible ink for food printing and packaging applications: a review. *Sustainable Food Technology*, 2(4), 876-892. <https://doi.org/10.1039/D4FB00036F>.
- Hamilton, C.A., Alici, G., & Marc, P., (2018). 3D printing vegemite and marmite: redefining "breadboards". *Journal of Food Engineering*, 220, 83-88. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.01.008>.
- K. Handral, H., Hua Tay, S., Wan Chan, W., & Choudhury, D. (2022). 3D Printing of cultured meat products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(1), 272-281.
- Huang, J. H. R., Lim, G. C. W., Su, C. H. J., & Ciou, J. Y. (2023). Improvement of 3D white chocolate printing molding effect with oleogels. *Heliyon*, 9(9), e19165. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19165>.
- Jiang, J., Zhang, M., Bhandari, B., & Cao, P. (2020). Current processing and packing technology for space foods: a review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 60(21), 3573-3588. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1700348>.
- Jonkers, N., Van Dommelen, J. A. W., & Geers, M. G. D. (2022). Selective Laser Sintered food: A unit cell approach to design mechanical properties. *Journal of Food Engineering*, 335, 111183. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111183>.
- Kamlow, M. A. (2023). How to formulate for structure and texture via 3D-Printing–design and characterization of edible biopolymer gels to act as release vehicles. (Doctoral dissertation, University of Birmingham). <http://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/12915>.
- Lanaro, M., Desselle, M. R., & Woodruff, M. A. (2019). 3D printing chocolate: properties of formulations for extrusion, sintering, binding and ink jetting. "In *Fundamentals of 3D food printing and applications*". Academic Press. 151-173. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814564-7.00006-7>.
- Liu, S., Han, Z., & Luo, X. (2025). A Comprehensive Review on Inkjet-Printed Intelligent Food Packaging Materials: Principle, Ink Formulation, Functional Inks, and Potential Applications. *Food Frontiers*. 1-27. <https://doi.org/10.1002/fft2.70034>.
- Liu, Z., Zhang, M., Bhandari, B., & Yang, C., (2018). Impact of rheological properties of mashed potatoes on 3D printing. *Journal of Food Engineering*, 220, 76-82. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.04.017>.

- Llamas-Unzueta, R., Reguera-García, A., Montes-Morán, M. A., & Angel Menéndez, J. (2025). Porous carbons with complex 3D geometries via selective laser sintering of whey powder. *Scientific Reports*, 15(1), 1881. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-84976-y>.
- Mantihal, S., Prakash, S., Godoi, F.C., & Bhandari, B., (2017). Optimization of chocolate 3D printing by correlating thermal and flow properties with 3D structure modeling. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. *Innovative food science & emerging technologies*, 44, 21-29. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.09.012>.
- Neamah, H. A., & Tandio, J. (2024). Towards the development of foods 3D printer: Trends and technologies for foods printing. *Heliyon*. 10, e33882. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33882>.
- Pallottino, F., Hakola, L., Costa, C., Antonucci, F., Figorilli, S., Seisto, A., & Menesatti, P. (2016). Printing on food or food printing: a review. *Food and Bioprocess Technology*, 9, 725-733. <https://doi.org/10.1007/s11947-016-1692-3>.
- Puértolas, E., Pérez, I., & Murgui, X. (2024). Potential of CO₂ laser for food processing: Applications and challenges. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(21), 7671-7685. <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2188954>.
- Rando, P., & Ramaioli, M. (2021). 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>.
- Severini, C., D. Azzollini, M. Albenzio, & A. Derossi. (2018). On Printability, Quality and Nutritional Properties of 3D Printed Cereal Based Snacks Enriched with Edible Insects. *Food Research International*, 106, 666–676. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.01.034>.
- Shabir, I., Khan, S., Dar, A. H., Dash, K. K., Shams, R., Altaf, A., & Pandey, V. K. (2022). Laser beam technology interventions in processing, packaging, and quality evaluation of foods. *Measurement: Food*, 8, 100062. <https://doi.org/10.1016/j.meafoo.2022.100062>.
- Sohel, A., Sahu, S., Mitchell, G. R., & Patel, M. K. (2025). 3D Food Printing: A Comprehensive Review and Critical Analysis On Technologies, Food Materials, Applications, Challenges, And Future Prospects. *Food Engineering Reviews*, 1-29. <https://doi.org/10.1007/s12393-025-09400-1>.
- Sun, J., Zhou, W., Yan, L., Huang, D., & Lin, L., (2018). 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>.
- TNO, (2017). The Future of Food. Retrieved from: https://www.tno.nl/media/2216/future_of_food.pdf.
- Voon, S. L., An, J., Wong, G., Zhang, Y., & Chua, C. K. (2019). 3D food printing: A categorised review of inks and their development. *Virtual and Physical Prototyping*, 4(3), 203-218. <https://doi.org/10.1080/17452759.2019.1603508>.
- Wang, L., Zhang, M., Bhandari, B., & Yang, C., (2018). Investigation on fish surimi gel as promising food material for 3D printing. *Journal of Food Engineering*, 220, 101-108. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.02.029>.
- Wang, M., Li, D., Zang, Z., Sun, X., Tan, H., Si, X., & 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>.
- Wang, Y., McClements, D. J., Bai, C., Xu, X., Sun, Q., Jiao, B., & Dai, L. (2024). Application of proteins in edible inks for 3D food printing: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 153, 104691. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104691>.
- Ye, J., Lin, X., Lu, H., Shen, H., Wang, Z., & Zhao, Y. (2024). Layout and geometry optimization design for 3D printing of self-supporting structures. *Structures*, 59, 105699. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105699>.

- Zhu, S., Ramos, P. V., Heckert, O. R., Stieger, M., van der Goot, A. J., & Schutyser, M. (2022). Creating protein-rich snack foods using binder jet 3D printing. *Journal of Food Engineering*, 332, 111124. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111124>.
- Zoran, A., & Coelho, M., (2011). Cornucopia: the concept of digital gastronomy. *Leonardo* 44(5), 425-431. https://doi.org/10.1162/LEON_a_00243.

Review paper

3D Food Printing Technology: A Review of Methods, Applications, and Factors Affecting Printing Precision

Sheida Esmaielzadeh*, Hannan Lashkari

*Corresponding Author: Associate professor, Department of Chemistry, Dar.C., Islamic Azad University, Darab, Iran.

Email: sh.esmaielzadeh@iau.ac.ir

Received: 8 July 2025 Accepted: 8 December 2025

<http://doi:10.22092/fooder.2026.370021.1426>

Abstract:

The Food and Agriculture Organization (FAO) estimates that by 2050, food production must rise by 70% in order to feed the world's projected 9.9 billion people. Therefore, newer and novel technologies are deemed essential to feed the world's population in the most sustainable way. Lately, new food products have been produced using the novel technology of 3D printing. The 3D food printing holds the potential to produce highly customized food in terms of shape, texture, flavor, structure and nutritional value and enable us to create new unique formulations and edible alternatives. In this paper, a review of important 3D printing technologies in the food industry, including extrusion, inkjet printing, binder jetting and selective laser sintering, is presented. Factors affecting these technologies to achieve accurate printing, including material properties, process parameters, and post-processing methods, and their applications in various food sectors are presented. There are many potential advantages of 3D printing technology applied to the food sector, such as customized food designs, personalized and digitalized nutrition, simplifying the supply chain and broadening the source of available food material. Using this technology, some complex and fantastic food designs which cannot be achieved by traditional methods can be produced by ordinary people. It also can be used to customize confectionery shapes and colorful images onto surfaces of solid edible substrates.

Keywords: Additive manufacturing, Food's 3D printing, Printability of food ink, Design parameters of food.

<http://doi:10.22092/fooder.2026.370021.1426>

Email: sh.esmaielzadeh@iau.ac.ir نویسنده مسئول:



© 2026, The Author(s). Published by [Agricultural Engineering Research Institute](https://www.fooder.ac.ir/). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). Which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.