مقاله ترویجی

کاربرد فنّاوری نوین چاپ سه‌بعدی در صنایع غذایی

عبدالستار عوض صوفیان [۱]، سید مهدی جعفری [۲×]

تاریخ دریافت مقاله: آبان ماه ۱۳۹۷

تاریخ پذیرش مقاله: فروردین ماه ۱۳۹۸

چکیده

استفاده از چاپگر سه‌بعدی، به عنوان یک روش جدید در تولید محصولات صنایع غذایی شناخته شده است، به طوری‌که این فنّاوری، توانایی بالایی برای تولید ساختارهای سه بعدی با هندسه‌های پیچیده، بافت‌های مطلوب و محتوای تغذیه‌ای مناسب را دارد. به همین علت، فنّاوری سه بعدی، نوآوری بزرگی در صنایع غذایی است. چاپگرهای سه‌بعدی، ماشین‌آلاتی هستند که می‌توانند بر روی یک میز قرار گرفته و اشیای سه بعدی از مواد خام را تولید کنند. این چاپگرها می‌توانند تقریباً هر چیزی را تولید کنند. بیشتر چاپگرهای سه بعدی غذا، چاپگرهای رسوبی هستند، بدین معنی که لایه‌های مواد اولیه در یک فرایند شناخته شده به عنوان ساخت افزایشی(لایه به لایه) روی هم قرار می‌گیرند. در این مقاله، معرفی مختصری از پیشرفت‌های اخیر در چاپ سه بعدی مواد غذایی و مواد تشکیل‌دهنده آن ارایه می‌گردد که می‌تواند برای طراحی ماتریس مواد غذایی سه بعدی استفاده شود. همچنین روش‌های فرآیند اکستروژن، چاپ جوهرافشان و پخت لیزری انتخابی نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

واژه‌های کلیدی

چاپگر سه‌بعدی، محصولات غذایی، فرآیندهای اکستروژن، چاپ جوهرافشان، پخت لیزری انتخابی

۱- مقدمه

چاپگرهای سه‌بعدی یا پرینترهای سه بعدی تجهیزاتی هستند که با استفاده از طرح‌های سه بعدی که معمولاً با نرم افزارهای طراحی آماده شده‌اند، مواد را به صورت سه بعدی و واقعی می‌سازند. در این روش تولیدی معمولاً مواد اولیه که به صورت فیلامنت[3] وارد اکسترودر[4] می‌شود، ذوب شده و پس از ذوب به صورت لایه به لایه بر اساس کدهای داده شده به دستگاه تزریق و مواد موردنظر ساخته می‌شوند. در حال حاضر ساخت مدل‌های سه بعدی با این چاپگرها در اکثر صنایع از هوافضا گرفته تا ساخت کیک و شکلات فانتزی و ساختمان‌ها به کار گرفته شده‌اند[۲-۱].

۱- دانشجوی دکتری مهندسی صنایع غذایی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان (sufiyan.sattar@yahoo.com).

۲- استاد دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

(× نویسنده مسئول: smjafari@gau.ac.ir)

3- Filament

4- Extruder

آخرین نسل از چاپگرهای سه‌بعدی مواد غذایی بسیار پیچیده‌تر هستند. این چاپگرها از مواد پودری، لیزرها و بازوهای رباتیک استفاده می‌کنند تا مجسمه‌های شکری، شکلات‌های دارای الگو و شیرینی‌های مشبک ایجاد کنند. ساخت افزایشی یا تولید افزاینده[1](AM) به مجموعه‌ای از محصولات گفته می‌شود که توسط چاپگرهای سه بعدی تولید شده باشند. معنی واژه AM در واقع ساخت یک شیء به وسیله افزودن ماده به آن به صورت لایه به لایه می‌باشد، همچنین با استفاده از روش ساخت فرم آزاد جامد[2] می‌توان غذا را با سرنگ‌هایی خاص به شکل تعریف شده درآورد[۳]. AM در ابتدا برای ساخت اشیاء سه‌بعدی براساس موادی مانند فلزات، سرامیک و پلیمرها طراحی شده بود که هدف آن‌ها ساخت قطعات کامپوزیتی در یک مرحله بود [۵-۴]. در صنایع غذایی، یک کاربرد مربوط به روش‌های چاپ سه بعدی برای طراحی ساختارهای مواد غذایی، ابتدا توسط محققان دانشگاه کورنل[3] گزارش شد که[4] را به عنوان یک چاپگر سه بعدی با قابلیت تولید شکل با استفاده از مواد غذایی مایع معرفی نمودند. سامانه عامل این چاپگرها بر اساس فرآیندهای اکستروژن است. در سال‌های پس از آن بسیاری از مطالعات انجام شده در حوزه سازگاری فناوری AM با طراحی سازه‌های مواد غذایی بود[۷-۶] و این امر نشان دهنده یک چالش است زیرا AM به راحتی برای ساخت و تولید مواد غذایی پیچیده با تغییرات گسترده‌ای در خواص فیزیکی و شیمیایی آن‌ها قابل اجرا نیست. توسعه اخیر روش‌های چاپ سه بعدی، برنامه‌های کاربردی جدیدی را در تولید مواد غذایی سفارشی ایجاد می‌کند.

مزایای بالقوه فنّاوری چاپ سه‌بعدی در بخش مواد غذایی، مانند طرح‌های غذایی سفارشی، برنامه غذایی شخصی و دیجیتال شده، ساده‌سازی زنجیره تأمین و گسترش مواد غذایی موجود در مواد غذایی مشهود است. با استفاده از این فنّاوری، برخی از طرح های پیچیده و منحصربفرد غذایی که توسط هنرهای دستی یا قالب معمولی قابل دستیابی نیستند، می‌تواند توسط افراد عادی بر اساس فایل‌های آماده که شامل دانش‌های آشپزی و مهارت‌های هنری از سرآشپزها، متخصصین تغذیه و طراحان غذا می‌باشد، انجام گردند[۹-۸]. همچنین می‌توان از این روش‌ها برای شکل دادن به شکلات، شیرینی و ایجاد تصاویر رنگی بر روی سطح مواد غذایی خوراکی سفارشی استفاده نمود [۱۱-۱۰]. علاوه بر این، چاپ مواد غذایی سه بعدی اجازه می‌دهد تا نیازهای غذایی و انرژی شخصی فرد را با توجّه به وضعیت فیزیکی و تغذیه خود دیجیتال‌سازی و شخصی‌سازی کنند[۱۳-۱۲]. زنجیره تأمین مواد غذایی متعارف را می‌توان با چاپ مواد غذایی سه بعدی ساده کرد. کاربرد جهانی این روش باعث می‌شود که فعالیت‌های تولید به آرامی به مکان‌هایی نزدیک‌تر به مشتریان منتهی شود و حجم حمل‌ونقل کاهش یابد، بنابراین بسته‌بندی، توزیع و هزینه های سنگین کاهش می‌یابد [۱۵-۱۴]. با وجود پیشرفت‌های اخیر در چاپ سه بعدی مواد غذایی، این فنّاوری هنوز دارای هزاران چالش است که باید بر آن‌ها غلبه کرد. در حال حاضر، بسیاری از مواد تشکیل‌دهنده محصولات غذایی، پیش از اینکه یک چاپگر بتواند آن‌ها را دستکاری کند، باید به خمیر تبدیل شوند و فرآیند چاپ به طور معمول بسیار وقت‌گیر است. بسیاری از چاپگرهای سه بعدی موجود محدود به مواد خشک و فاسدنشدنی هستند چون بیشتر پروتئین‌ها و فرآورده‌های لبنی در معرض خطر فساد هستند.

۲- مروری بر پژوهش‌های انجام شده در حوزه چاپ سه بعدی مواد غذایی

محققان در سال[5] (۲۰۱۸) مقاله‌ای تحت عنوان بررسی ژل آب لیمو به عنوان ماده غذایی مدل برای چاپ سه‌بعدی و بهینه‌سازی شاخص‌های چاپ را ارائه کردند. هدف از این مطالعه، ایجاد یک ساختار جدید مواد غذایی با چاپ سه بعدی مبتنی بر سامانه ژل لیمو است. این

1- Additive Manufacturing
2- Solid Freeform Fabrication
3- Kornel
4- Fab @ Home Model 1
5- Zhang

محققین اثر نشاسته سیب زمینی (۱۰، ۱۲/۵، ۱۵، ۱۷/۵ و ۲۰ گرم در ۱۰۰ گرم) را بر خواص رئولوژیکی[1] و خواص مکانیکی ژل‌های لیمو بررسی کردند. علاوه بر این، تأثیر شاخص‌های چاپ (ارتفاع نازل، قطر نازل، سرعت اکستروژن و سرعت حرکت نازل) بر کیفیت محصولات چاپی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آن‌ها نشان داد که قطر نازل می‌تواند به عنوان یک عامل کلیدی بر کیفیت چاپ تأثیر بگذارد. معادله‌ای برای توضیح رابطه میزان اکستروژن، قطر نازل و سرعت حرکت نازل پیشنهاد شده است. در این سامانه چاپ، قطر نازل ۱ میلی متر، سرعت اکستروژن ۲٤ میلی‌متر بر ثانیه و سرعت حرکت نازل ۳۰ میلی‌متر بر ثانیه، شاخص‌های بهینه برای چاپ ساختارهای سه بعدی مطابق با هندسه هدف با وضوح بالا، بافت سطحی صاف و بدون تغییر شکل فشرده به ثبت رسید[١٦]. محققان در سال(۲۰۱۸) مطالعه‌ای تحت عنوان چاپ غذای شخصی همراه با تصاویر پرتره را انجام دادند. این پژوهش بر اساس دو مرحله کلیدی به دست آمد. ابتدا روش‌های پردازش تصویر برای استخراج ویژگی‌های تصویر برجسته اعمال گردید. تشخیص تصویر قوی و سنتز[2] طرح، به طور اختیاری در افزایش ویژگی‌های تصویر برای تصاویر پرتره درگیر شده است. در مرحله دوم، یک الگوریتم بهینه‌سازی جدید ارائه شد تا مسیر چاپ را برای چاپ مواد غذایی مورد نیاز و کارآمد نگه دارد[۱۷].

محققان در سال (۲۰۱۸) گزارشی با عنوان صنعت چاپ سه بعدی در چاپ زیستی را ارائه کردند. در این تحقیق بیان شده است که اهداف اصلی تولید مدل‌های جامد پلیمر سه بعدی جایگزین شده است و امروزه بیو چاپ سه‌بعدی در زمینه‌های علمی و تجاری مانند سامانه‌های رسانش دارو، آزمایش لوازم آرایشی و چاپ سه بعدی برای حمایت از رشد بافت استفاده می‌شود. در حالی که بسیاری از فعالیت‌های جهانی بر مبنای تحقیق است، در حال حاضر، یک عنصر قابل توجّه تجاری وجود دارد که این فنّاوری‌های جدید را به تجربه مدرن متصل می‌کند. کابردهای جاری چاپ سه بعدی عبارتند از: ایجاد دستگاه‌ها و ایمپلنت‌هایی که برای چندین سال در دسترس بوده‌اند و امکان تولید ایمپلنت‌های شخصی را برای ارتقاء روش‌های عملیاتی و اعمال پروتز سه بعدی برای بازسازی فراهم می‌کنند[۱۸]. محققان در سال (۲۰۱۷) تحقیقی تحت عنوان چاپ سه بعدی: دقت چاپ و کاربرد در بخش غذا را انجام دادند. این پژوهشگران اعلام کردند که برای تحقق بخشیدن به چاپ دقیق، سه جنبه اصلی باید مورد بررسی قرار گیرد: خواص مواد، شاخص‌های فرآیند و روش‌های بعد از فرآیند. این محققان تأکید داشتند که توجّه به عوامل زیر منجر به چاپ موفّق می‌شود:

- خواص رئولوژیکی،
- سازوکارهای اتصال،
- خواص ترمودینامیکی[3]،
- پیش تیمار و روش‌های بعد از فرآیند.

علاوه بر این، در چاپ سه بعدی مواد غذایی سه چالش وجود دارد:

۱) دقّت چاپ،

۲) بهره وری فرآیند،

۳) تولید مواد رنگی، دارای عطر و طعم و محصولات چندساختار [۱۹].

محققان در سال (۲۰۱۷) مقاله‌ای تحت عنوان چاپ مواد غذایی کم‌هزینه سه‌بعدی را ارائه کردند. این مقاله مشکلاتی را که یک کاربر معمولی با استفاده از چاپگر غذایی سه بعدی دارد، ارائه و توضیح می‌دهد. ریپوسا پروسا ۱۳[4] یک چاپگر سه بعدی است که با تجهیزات اکستروژن، قادر به تولید مواد در قالب ریز، متمرکز در صنعت کیک با پاستای شکر، توسعه یافته است. این اکسترودر اجازه چاپ مواد جدیدی را می‌دهد که قبلاً نمی‌توانست مورد استفاده قرار گیرد، زیرا در دماهای پایین، سازگاری جامد دارند. اکسترودر جدید با دو نوع

1- Rheological
2- Synthesis
3- Thermodynamic
4- Repusa Prusa I3

پاستیل مورد آزمایش قرار گرفت: شکلات نوتلا و چسبناک. نمونه اولیه در حال حاضر، فرصت‌های مختلفی را برای بهبود کیفیت سطوح، استفاده از پاستا با رنگ‌های مختلف، بیش از یک اکسترودر ارائه می‌دهد [۲۰].

۳- فنّاوری‌های چاپ سه بعدی لایه به لایه

بسته به اصل ساخت، تعدادی از روش‌های چاپ سه بعدی را می‌توان در زمینه مواد غذایی و برای پاسخگویی به تقاضای طراحی مواد غذایی و فرآوری مواد سازگار معرفی کرد. جدول (۱) خلاصه‌ای از روش‌های چاپ سه‌بعدی را معرفی می‌کند که در حال حاضر، برای طراحی غذا مورد استفاده قرار می‌گیرد. فرآیندها بر اساس نوع مواد مورد استفاده طبقه‌بندی می‌شوند: مایع، پودر یا سلول‌های کشت شده. سیستم‌های کشت سلولی برای چاپ گوشت استفاده می‌شوند [۲۱].

٤- فنّاوری‌های جدید چاپگر سه بعدی در صنعت مواد غذایی

مدل‌های متنوع منجمد در بیسکویت‌ها و شکلات‌ها، نوشته‌هایی که با آن مواد غذایی را تزئین می‌کنند و لوگوهایی که بر روی محصولات غذایی تزئین شده هستند، بخش جذّابی در بازار صنعت غذا ایجاد کرده‌اند.

در حال حاضر، آماده نمودن چنین غذاهای تزئینی آموزش‌های خاصی داده می‌شود و برای طراحی و ساخت نیاز به زمان بیشتری دارد، که منجر به هزینه نسبتاً بالاتری از محصولات مواد غذایی در تولید انبوه می‌شود. علاوه بر این، مواد غذایی و اثرات آن بر متابولیسم و سلامت در افراد متفاوت است. برای بهبود وضعیت سلامت فردی، مفهوم تغذیه شخصی که هدف آن طراحی و تنظیم رژیم غذایی مخصوصاً براساس وضعیت سلامت فرد است، منافع عمومی را به طور قابل توجّهی افزایش داده است.

جدول ۱- فهرست روش‌های چاپ سه بعدی مورد استفاده برای طراحی مواد غذایی[۲۲]

روش	اصول	مکانیسم ساخت	کاربرد
	ماده اولیه: مایع		
اکستروژن مواد نرم	اکستروژن و رسوب	بدون تغییر فاز، محلول شدن لایه‌های کنترل شده با خواص رئولوژیکی مناسب	بسته‌بندی، پنیر فرآوری‌شده، خمیر، پوره گوشت
اکستروژن ذوب	اکستروژن و رسوب‌سازی	جامدسازی در شرایط فوق سرد	شکلات، کنجد
شکل‌گیری هیدروژل	اکستروژن و رسوب	اکستروژن یونی یا آنزیم	ژلاتین
جت چاپ جوهر	رسوب با استفاده از روش قطره‌ای	بدون تغییر فاز، محل قرارگیری لایه‌ها تحت کنترل خواص رئولوژیکی مواد	شکلات، خمیر مایع، چاشنی قند، خمیر گوشت، پنیر، مربا، ژل
	ماده اولیه: پودر		
اتصال دهنده‌های مایع	بسته‌بندی پودر و بسته‌بندی بر اساس مورد درخواست داده شده	نیروهای چسبنده یا واکنش‌های شیمیایی بین پودر و بسته‌بندی	شکلات
پراکندگی لیزر پودر اتصال	منبع حرارت (لیزر) پخت و ذوب قند	پختن و ذوب کردن قند / چربی	چربی، شکر
پخت لیزری انتخابی/ پختن با هوای داغ	پودر اتصال و منبع حرارت (هوای گرم)	پخت و ذوب	شکر
	ماده اولیه : سلول		
چاپ زیستی	رسوب با استفاده از روش قطره‌ای	خودآموزی سلول‌ها	گوشت

فرآیندهای آماده‌سازی سنتی غذا حتّی با فنّاوری‌های فرآوری پیشرفته نمی‌توانند چنین خواسته‌هایی را برآورده سازند [۱۴]. چاپ سه بعدی می‌تواند به عنوان تولید مواد غذایی لایه‌ای شناخته شود [۱۵] که یکی از راه‌های بالقوه برای برطرف کردن این مشکل محسوب می‌گردد. در واقع، چاپ سه بعدی یک فرآیند ساخت و ساز دیجیتالی کنترل شده است که می‌تواند لایه‌های پیچیده مواد غذایی سه بعدی را ایجاد کند[۲٤] .

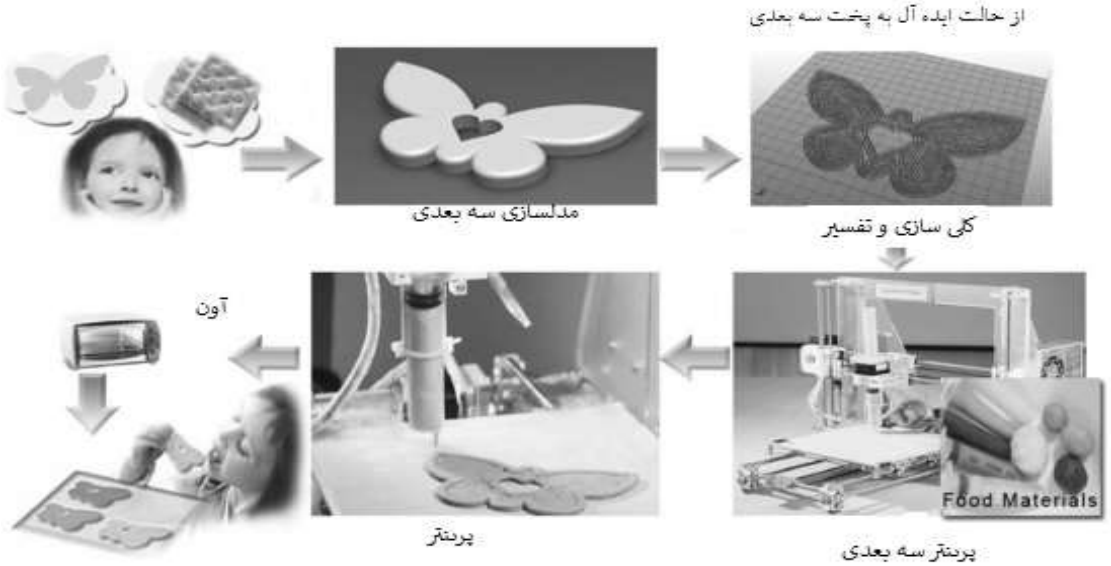
در این بخش، ابتدا چاپ غذا و تولید مواد غذایی مبتنی بر روباتیک مورد بررسی قرار می‌گیرد، و سپس بحث در مورد طرح‌های چاپ مواد غذایی از نظر الزامات طراحی، عوامل توسعه و طراحی رابط کاربری بررسی می‌شود.

٤-١- چاپ مواد غذایی و تولید مواد غذایی مبتنی بر روباتیک

فرآوری مواد غذایی اغلب نیاز به حرکت سریع و تکراری دارد. بنابراین، استفاده از اتوماسیون در فرآیند تولید مواد غذایی می‌تواند کارایی آن و کیفیت محصول غذایی را بهبود بخشد. چاپ مواد غذایی (شکل ۱) و تولید مبتنی بر روباتیک می‌توانند عملیات فرایند آماده‌سازی مواد غذایی را کاهش داده و حجم کاری انسانی را کم کنند، با این حال، تجربه کاربر، خلاقیت و کنترل کاربران در محور اصلی کار با آن‌ها می‌باشد. این فناوری به کاربران به طور مستقیم اجازه می‌دهد که مواد غذایی را اصلاح کنند و هدف دوم کاهش مشارکت انسانی و حجم کار با خودکارسازی فرآیندهای دستی مختلف است. فنّاوری‌های مبتنی بر روباتیک برای جایگزینی عملیات با کارایی سخت، خودکارسازی مراحل فردی یا تعویض عملیات دستی در خانه، خدمات غذا و صنایع غذایی طراحی شده‌اند [۲۳].

٤-٢- پخت لیزری انتخابی / پختن با هوای داغ

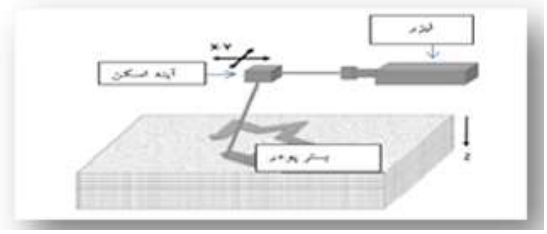
لیزر و هوای گرم (شکل ۲ و ۳) می‌توانند به عنوان یک منبع پخت، برای جوشاندن ذرّات پودر و ایجاد یک لایه جامد استفاده شوند. چاپگر مواد غذایی لیزری برای قندهای قلیایی و پودر نس کوآیک[1] برای ساخت مواد سه-بعدی جامد استفاده می‌شود. مواد پخته شده بخشی از محصول را تشکیل می‌دهند در حالی که پودر نرم برای حمایت از ساختار در جای خود نگهداری می‌شود [۱٦]. این دستگاه، جریان هوای داغ را انتخاب کرده و به یک



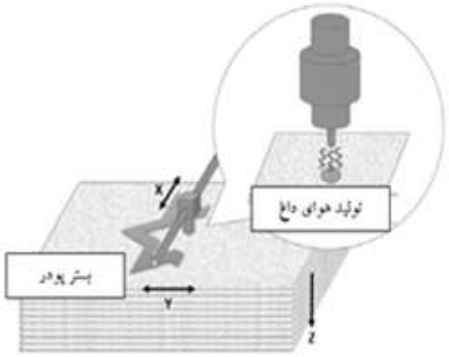
شکل ۱- توصیف اجمالی فرآیند چاپگر سه بعدی

1- Nes Quik

ماده پودری تبدیل می‌کند. بستر پودر تولید، به سمت پایین و با مواد گرم ذوب می‌شود تا موجب افزایش حرارت شده و نفوذ را به لایه قبلی تسهیل کند. فرآیند پخت، ساخت سریع چندین محصول غذایی را در قالب یک محصول غذایی



شکل۲- چاپ انتخابی با لیزر

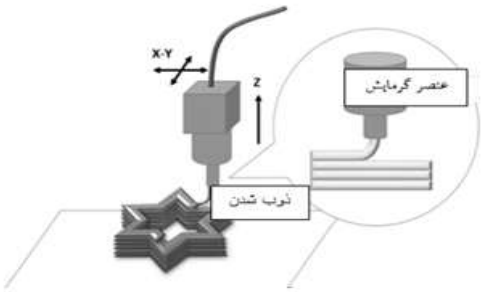


شکل۳- پخت در هوای داغ

فراهم می‌کند بدون اینکه به کیفیت محصول آسیب برساند. با این حال، فقط برای مواد شکر و چربی با نقطه ذوب پایین مناسب هستند و فرآیندهای ساخت و همچنین ساختار ماشین پیچیده می‌باشند زیرا متغیرهای زیادی را دربرمی‌گیرد.

٤-۳- اکستروژن داغ- اکستروژن[1] مذاب در دمای اتاق

اکستروژن داغ- ذوب، همچنین به نام مدل[2] رسوب نیز شناخته شده است. تنها فنّاوری چاپ سه بعدی است که قطعات چاپ شده با آن، در برابر حرارت، ضربه‌های مکانیکی و رخدادهای شیمیایی مقاوم است. مطابق (شکل ٤)، ابتدا فایل سه بعدی جسم مورد نظر از طریق رایانه و نرم افزارهای سه‌بعدی طراحی شده و با فرمت قابل شناسایی برای چاپگرهای سه بعدی ذخیره می‌شود. فایل ذخیره شده بر روی اس دی کارت کپی شده و به چاپگر متصل می‌گردد. حال با روشن کردن دستگاه، محتوای حافظه



شکل٤- اکستروژن داغ- اکستروژن مذاب در دمای اتاق

جانبی برای پیدا کردن فایل چاپ جستجو آغاز شده و به محض یافتن و خواندن آن، شروع به ساخت جسم سه بعدی به صورت لایه به لایه می کند.

برای ساخت لایه‌ها، مواد اولیه از طریق یک سیم پیچ و منبع تغذیه به نازل اکستروژن هدایت شده و این نازل با ذوب کردن مواد اولیه، آن‌ها را بر روی پلتفرم[3]، اکسترود می‌کند. نازل و پایه همزمان با هم در تماس‌اند به طوری که ابعاد شئ با مختصات x,y,z توسط پایه و نازل در هنگام چاپ کنترل می‌شود.

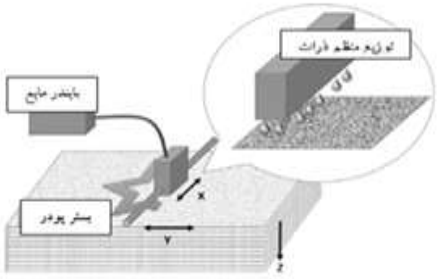
در این روش، نازل اکستروژن حرکتی افقی و عمودی را برای رسم سطح مقطع نمونه مورد نظر بر روی پلتفرم طی می‌کند. این لایه نازک که از پلاستیکی سخت می‌باشد، بلافاصله به لایه زیر چسبیده و هنگامی که لایه کامل می‌شود با دقّتی معادل یک شانزدهم اینچ برای ساخت لایه بعدی حرکت می‌کند. زمان چاپ و تولید نمونه بستگی به ابعاد نمونه‌ای دارد که در حال تولید است. اشیاء کوچک‌تر (در حدود چند اینچ مکعب) و اجسام با طول بیشتر ولی ضخامت کم را به سرعت چاپ می‌کند. ولی اشیایی که دارای پیچیدگی‌های بالا و ابعادی بزرگ‌تر هستند، سرعت

1- Extrusion
2- Fused Deposition Modeling
3- Plateform

دستگاه را نسبت به حجم کار کاهش می‌دهند [۱۷]. محققان دانشگاه صنعتی ماساچوست (MIT)[1] از شکلات داغ ذوب شده به عنوان یک مایع تخلیه استفاده کردند و یک نمونه کارکردی از شکلات دیجیتالی را به دست آوردند [۱۵]. در این پروژه، هوای فشرده برای فشار دادن شکلات ذوب شده از محفظه و ساخت آب نبات ویژه استفاده شد. با استفاده از روش اکستروژن داغ، یک جوهر چاپگر سه بعدی، غذایی چاپ شده با تصاویر رنگی سه بعدی بر روی پایه اکسترود شده ایجاد کرد [۱۸]، در حالی که یک مرحله پخت برای خشی کردن لایه‌ها لازم بود. برخی از مواد قابل انتشار و چاپ مانند پنیر و سرامیک می‌توانند در دمای اتاق به طور مساوی اکسترود بشوند [۱۹]. سرعت جریان مواد را می‌توان با کنترل دریچه‌های الکترومغناطیسی تنظیم کرد و این تنظیم با نمونه‌های کره بادام زمینی، ژله و شکلات نوتلا[2] مورد آزمایش قرار گرفت [۲۰]. این روش اکستروژن می‌تواند ترکیبات پیچیده را با استفاده از مواد تک مرحله‌ای با تکرارپذیری بالا تولید نماید [۲۱] و چاپگرهای غذایی که براساس روش اکستروژن طراحی شده‌اند، معمولاً دارای اندازه جمع و جور و هزینه نگهداری کم هستند؛ اما از نظر مواد، زمان ساخت و زمان‌بندی طولانی و خواص لایه‌بندی شده ناشی از نوسانات دما، بسیار محدود هستند.

٤-٤- چاپ توسط مواد چسبنده[3]

فنّاوری بایندر جتینگ[4] را به طور کلی و خلاصه می‌توان فنّاوری پاشیدن چسب بر روی پودر شن یا فلز نام برد. این عملیات بدین صورت انجام می‌شود که پاشش چسب موجب کنار هم قراردادن ذرّات ماسه یا فلز می‌شود تا لایه دو بعدی را تشکیل دهد. در واقع، چاپ‌های بایندر جتینگ را فنّاوری چاپ غیرمستقیم می‌نامند چرا که قطعه یا قالب چاپ شده، پس از چاپ نیز نیاز به عملیاتی برای تکمیل شدن و در واقع قابل استفاده بودن دارد. در (شکل ۵) نشان داده شده است که هر لایه پودر به طور مساوی در پلت فرم تولید و اسپری‌های حاوی مایع برای اتصال دو لایه پودر متوالی توزیع شده است [۲۵]. قبل از ساخت، یک لایه از ذرّات آب به منظور تثبیت مواد پودر و به حداقل رساندن اختلالات ناشی از تسمه باند، اسپری می‌شود[۲٦]. بایندر جتینگ شامل مزایایی مانند ساخت



شکل۵- بایندر جتینگ بستر پودر

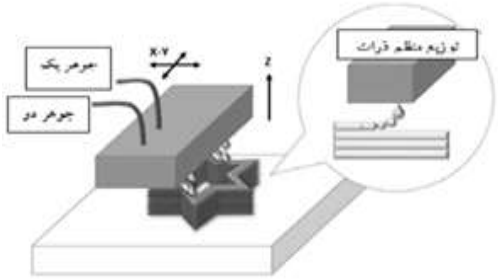
سریع و کم هزینه مواد می‌باشد؛ اما مواردی از قبیل: سطح زبر انتهایی و هزینه دستگاهی بالا از معایب این روش محسوب می‌گردد. غذای با محتوای قند بالا و مقدار کمی مواد مغذّی ممکن است جذاب باشد؛ اما اغلب با چاقی، دیابت نوع دو و بیماری قلبی ارتباط دارد و این موضوع، پتانسیل و بازار این فنّاوری را محدود می‌کند.

٤-٥- چاپ جوهر افشان

همانطور که در (شکل ۶) نشان داده شده است، چاپ مواد غذایی جوهر افشان یک جریان قطره‌ای از یک چاپگر نوع سرنگی در یک قطره بر روی سطحی می‌باشد که برای کلوچه، کیک و یا ساخت شیرینی استفاده می‌شود [۲۶] و در این زمینه از جت‌های نازل غشایی پنوماتیک استفاده می‌کنند تا قطره‌ها روی بسترهای پیتزا یا بیسکویت تحت گرانش سرازیر شوند و شکل بگیرند. چهار فنّاوری فوق برای طراحی ماشین‌های تجاری به روز شده است: اکستروژن داغ ذوب برای چاپ شکلات، اکستروژن دمای

1- Massachusetts Institute of Technology
2- Notela
۳- Binder jetting یک فرایند تولید لایه به لایه است که در آن یک ماده متصل‌کننده مایع به صورت انتخابی برای پیوستن ذرّات پودر استفاده می‌شود.
4- Binder Jetting

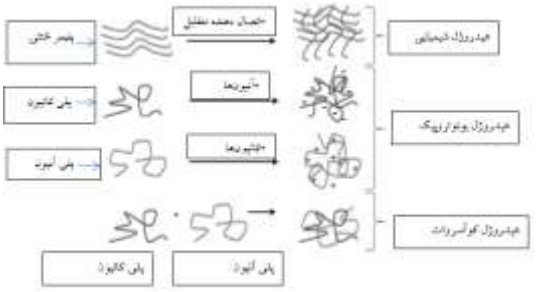
اتاق برای چاپ پیتزا، تحت نیروی جت برای چاپ قند و چاپ جوهرافشان برای تزیین یا پر کردن سطح، کاربرد دارند. بدیهی است نگرانی‌های مربوط به ایمنی غذا، به شدّت استفاده از فنّاوری‌هایی را محدود می‌کند که شامل لیزر و پرتو الکترون در چاپ مواد غذایی هستند.



شکل٦- چاپ جوهر افشان

٤-٦- اکستروژن تشکیل‌دهنده هیدروژل

اکستروژن، مواد تشکیل‌دهنده هیدروژل[1] به شدّت به خواص رئولوژیکی پلیمر و مکانیزم تشکیل ژل بستگی دارد. در ابتدا، محلول پلیمری باید خاصیت ویسکوپلاستیک[2] را داشته باشد و سپس قبل از اینکه لایه‌های متوالی روی هم قرار گیرند، به ژل‌های خودمحور تبدیل شوند. برای جلوگیری از ژل شدن زودرس محلول پلیمری داخل چاپگر، باید کنترل موقتی مکانیسم‌های تشکیل ژل انجام شود. به طور کلی، مکانیسم‌های تشکیل‌دهنده هیدروژل را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد: (۱) اتصال شیمیایی، (۲) اتصال یونوتروپیک و (۳) تشکیل کوآسرواسیون[3] پیچیده، همانطور که در (شکل ۷) نشان داده شده است[۲۶] بعید به نظر می‌رسد اتصال شیمیایی برای طراحی غذا اعمال شود، زیرا بسیاری از واکنش‌های اتصال شیمیایی، مزاحم هستند و باید از ساختار طراحی شده حذف شوند. برعکس، اتصال یونوتروپیک به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است[۲۷]. به عنوان مثال، آلژینات یک پلی‌ساکارید تشکیل شده از ساختارهای مانورونی و اسید گلوکورونیک است که توسط یون‌های کلسیم به هم متصل می‌شوند و منجر به ژل یونوتروپیک می‌شوند. هیدروژل کوآسرواسیون پیچیده زمانی تولید می‌شود که یک پلی‌آنیون و یک پلی‌کاتیون با یکدیگر متصل شوند.



شکل۷- شبیه‌سازی مکانیسم‌های تشکیل‌دهنده هیدروژل: پیوند شیمیایی، پیوند یونوتروپیک و تشکیل کوآسرواسیون[۲۷]

۵- نتیجه گیری

طراحی مواد غذایی سه بعدی از طریق فنّاوری AM به شدّت وابسته به خواص مواد و سازه‌های اتصال است. در سال‌های اخیر، تلاش‌های زیادی برای دستیابی به خواص انتهایی سازه‌های سه بعدی با داشتن ویژگی‌های نهایی استفاده شده یا بیشتر از آنچه که از طریق روش تولید سنتی به دست آمده است، استفاده شده است. از دیدگاه ما، بسیاری از چالش‌هایی که با فنّاوری AM به وجود می‌آیند، در زمینه مهندسی مواد غذایی به (۱) بهره‌وری فرآیند و (۲) نوآوری و عملکرد محصول مربوط است. بهره‌وری فرآیند بستگی به خواص مواد و سرعت رسوب لایه‌ها دارد. به عنوان مثال، قدرت تفکیک فرآیندهای اکستروژن، مرسوم‌ترین روش AM، از طریق رسوب لایه‌های بسیار نازک به دست می‌آید که زمان و هزینه عملیات را افزایش

1- Hydrogel
2- Viscoplastic
۳- یک فاز مایع غلیظ و کلوئیدی است که ممکن است از یک محلول کلوئیدی در کنار یک مولکول سوم جدا شود.

می‌دهد. چالش‌ها و روندهای اخیر، باعث ورود مهندسین صنایع غذایی به حوزهٔ چاپ سه بعدی در صنایع غذایی شده است. با این حال، هنوز هم بسیاری از مشکلات برای این فنّاوری به طور گسترده‌ای در بخش مواد غذایی به دلایل مختلف وجود دارد که عبارتند از:

۱) دقّت چاپ و صحت؛

۲) بهره‌وری روند؛

۳) تولید مواد رنگی حاوی چندین عطر، بو و چند ساختار.

دقّت و صحت چاپ برای استفاده از فناوری چاپ سه بعدی در بخش مواد غذایی حیاتی است. یکی از مزایای استفاده از چاپ سه بعدی، ساخت یک ساختار جذّاب محصولات غذایی است تا جالب به نظر برسد و اشتهای مصرف‌کننده را افزایش دهد. با این حال، فعلاً تعداد کمی از آثار متمرکز بر دقّت چاپ منتشر شده است. برای رسیدن به یک چاپ دقیق و خوب، خواص مواد (به عنوان مثال خواص رئولوژیکی، اندازه ذرّات و ...)، شاخص‌های فرآیند (یعنی قطر نازل، سرعت چاپ، فاصله چاپ، و...) و روش‌های بعد از فرآیند (یعنی پخت، سرخ کردن و ...) باید ارزیابی شوند. بازده تولید می‌تواند هزینه‌ها را کاهش دهد. یک مثال معمول از افزایش بهره‌وری فرآیند این است که سرعت چاپ را بالا ببریم و از نازل بزرگ یا لیزر بزرگ استفاده کنیم. با این حال، این موضوع، اغلب منجر به کاهش دقّت و چاپ بی‌کیفیت می‌شود، در نتیجه چاپ مواد غذایی سه بعدی را در شرایط نامطلوب قرار می‌دهد. در حال حاضر، چاپ سه بعدی در زمینه‌های غذایی مانند غذاهای نظامی و فضایی، غذای سالمندان و انواع شیرینی استفاده می‌شود. تأکید می‌شود که با فرض اطمینان از صحت قابل قبول چاپ، قطر بزرگ نازل و سرعت چاپ سریع باید اتخاذ شود. یکی دیگر از روش‌های بالقوه برای بهبود بهره‌وری چاپ، استفاده از چاپگرهای چند نازله برای ساخت است. با این حال، پیچیدگی سامانه کنترل و چالش فنی را افزایش خواهد داد، بنابراین لازم است مطالعات قابل توجّهی برای دستیابی به هر دو روش دقیق چاپ و بهره‌وری بالای فرآیند انجام شود. شاخص‌های رنگ، طعم و بافت غذا در یک ساختار غذایی سه بعدی با ویژگی‌های مورد نظر برای انتخاب افراد مهم است. تلاش‌های زیادی در تولید طیف رنگی و بافت محصولات غذایی با استفاده از فنّاوری چاپ سه بعدی شده است.

٦- منابع

۱. موسوی، س. م، (۱۳۹۶)، «**معرفی روش تولید چیپ‌های میکروفلوییدیک با تکنولوژی نوین چاپ سه بعدی**»، کنفرانس ملّی پژوهش‌های نوین در برق، کامپیوتر و مهندسی پزشکی، کازرون، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کازرون

۲. قنبرپور، م، سیدافقهی، س.س، (۱۳۹۵)، «**چاپگرهای سه بعدی، خصوصیت روش-های مختلف و مواد مورد استفاده**»، سومین کنفرانس ملّی و اولین کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌های کاربردی در علوم شیمی و مهندسی شیمی و سومین کنفرانس ملّی و اولین کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌های کاربردی در زیست‌شناسی، تهران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر.

3. Hull, C.W. Hull, (1986), Apparatus for Production of Three-dimensional Objects by Stereo lithography.

4. Kodama, H. (1981), **"Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer,"** Cross Ref View Record in Scopus, 52 (11), pp. 1770-1773.

5. Malone and Lipson, E. Malone, H. Lipson, (2007), Fab@Home: the personal desktop fabricator kit, Rapid Prototyp. J., 13 (4) (2007), pp. 245-255.

6. Grood, J.P.W., Grood, P.J., (2011). **"Method and Device for Dispensing a Liquid."** Google Patents.
7. Sol, I. E. J., Van der Linden, D., & Van Bommel, K. J. C. (2015). **"3D Food Printing: the Barilla Collaboration."** *Feb-2015.*
8. Pinna, C., Ramundo, L., Sisca, F. G., Angioletti, C. M., Taisch, M., & Terzi, S. (2016). **"Additive Manufacturing applications within Food industry: an actual overview and future opportunities."** In *21st Summer School Francesco Turco 2016*(pp. 18-24). AIDI-Italian Association of Industrial Operations Professors.
9. Pallottino, F. et al., (2016). **"Printing on Food or Food Printing: a Review."** Food and Bioprocess Technology, 9(5), pp.725–733.
10. Slade, L. & Levine, H., (1994). **"Water and the glass transition - Dependence of the glass transition on composition and chemical structure: Special implications for flour functionality in cookie baking."** Journal of Food Engineering, 22(1-4), pp.143–188
11. Von Hasseln, K.W., Von Hasseln, E.M., Williams, D.X., Gale, R.R., 2014.
12. Sun, J., Peng, Z., Yan, L., Fuh, J.Y.H., Hong, G.S., (2015). 3D food printing – an inno-vative way of mass customization in food fabrication Vol. 1.
13. Zoran, A., & Coelho, M. (2011). **"Cornucopia: the concept of digital gastronomy."** Leonardo, 44(5), 425–431.
14. Wegrzyn, T. F., Golding, M., & Archer, R. H. (2012). **"Food layered manufacture: a new process for constructing solid foods."** Trends in Food Science & Technology, 27(2), 66–72.
15. Haiming Zhao, Jufeng Wang, Xiaoyu Ren, Jingyuan Li, Xiaogang Jin, (2018). **"Personalized food printing for portrait images, Computers & Graphics,"** Volume 70, Pages 188-197.
16. Combellack, E., Z.M. Jessop, **"I. S. Whitaker, (2018). 3DBioprinting for Reconstructive Surgery, 20 – The commercial 3D bioprinting industry,"** Techniques and Applications, Pages 413-421.
17. Zhenbin Liu, Min Zhang, Bhesh Bhandari,Yuchuan Wang, (2017), **"3D printing: Printing precision and application in food sector,"** Trends in Food Science & Technology.Volume 69, Part A, Pages 83-94.
18. IA Ferreira, JL Alves, (2017), **"Low-cost 3Dfood printing, Ciência & Tecnologia dos Materiais,"** Volume 29, Issue 1, Pages e265-e269.
19. Bollini, M., Barry, J. & Rus, D. (2011). **"Bakebot: baking cookies with the PR2, In: The PR2 workshop: challenges and lessons learned in advancing robots with a common platform,"** IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Francisco, USA.
20. Burritobot, (2014). **"A 3-D printer that spits out burritos."** Available at: https://www.pinterest.com/pin/115967759125319211/. Accessed Dec 2014.
21. CandyFab, (2007). **"The CandyFab project."** Available at http://wiki. Candy fab.org /Main _Page. Accessed Dec 2014.
22. Godoi, F.C., Prakash, S. & Bhandari, B.R., (2016). **"3D printing technologies applied for food design: Status and prospects."** Journal of Food Engineering, 179, pp.44–54.
23. Huang, S. H., Liu, P., & Mokasdar, A. (2013). **"Additive manufacturing and its societal impact: a literature review."** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 67(5–8), 1191–1203.

24. Fanli Yang, Min Zhang, Bhesh Bhandari, Yaping Liu, (2018), **"Investigation on lemon juice gel** as **food material for 3Dprinting and optimization of printing parameters,"** LWT - Food Science and Technology, Volume 87, January 2018, Pages 67-76.
25. Crump, S. S. (1991). **"Fast, precise, safe prototypes with FDM. In: Proceedings of ASME annual winter conference,"** 50, 53–60.
26. 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 Prototyping, 5, 57–64.
27. Huang, S. H., Liu, P., & Mokasdar, A. (2013). **"Additive manufacturing and its societal impact: a literature review."** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 67(5–8), 1191–1203.
28. Serizawa, R., Shitara, M., Gong, J., Makino, M., Kabir, M.H., Furukawa, H., (2014). **"3D jet printer of edible gels for food creation."** In: Proceedings of SPIE - the International Society for Optical Engineering.
29. Hao, L., Mellor, S., Seaman, O., Henderson, J., Sewell, N., Sloan, M., (2010). **"Material characterisation and process development for chocolate additive layer manufacturing."** Virtual Phys. Prototyp. 5 (2), 57e64.
30. Diaz, J. V., Noort, M. W. J., & Van Bommel, K. J. C. (2017). *U.S. Patent Application No. 15/116,048*.
31. Crump, S.S., (1991). **"Fast, Precise, Safe Prototypes with FDM, American Society of Mechanical Engineers."** Production Engineering Division (Publication) PED, pp. 53e60.
32. Pallottino, F. et al., (2016). **"Printing on Food or Food Printing: a Review."** Food and Bioprocess Technology, 9(5), pp.725–733.
33. Haque, M.K., Roos, Y.H., 2006. **"Differences in the physical state and thermal behavior of spray-dried and freeze-dried lactose and lactose/protein mixtures. Innov."** Food Sci. Emerg. Technol. 7 (1e2), 62e73.

آدرس نویسنده

گرگـان- میـدان بسـیج- پـردیس دانشـگاه- دانشکده صنایع غذایی