

پیکربندی های رایج چاپگر سه بعدی در صنعت غذا

حنان لشکری^{۱*}، شیدا اسمعیل زاده^۲

^۱ گروه علوم و صنایع غذایی، واحد زرین دشت، دانشگاه آزاد اسلامی، زرین دشت، ایران.

^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.

چکیده: چاپ سه بعدی یک فناوری جدید در صنعت غذاست که جزء روش های ساخت افزایشی دسته بندی می شود و جایگزینی نوآورانه برای فناوری های مرسوم در تولید مواد غذایی است. این فناوری با خود، آزادی عمل در تولید سفارشی و تعامل بیشتر در طراحی کالا بر اساس تقاضای مشتری را به ارمغان آورده است. با توجه به مزایای ارائه شده نسبت به روش های مرسوم، تولید چاپ سه بعدی به طور فزاینده ای توجه بخش های دانشگاه، تجارت و صنعت را به خود جلب کرده است و دور از انتظار نیست که در آینده نزدیک جایگزین شیوه های امروزی برای تولید مواد غذایی شود. این فناوری از طریق نوآوری مبتنی بر خلاقیت، امکان ساخت اجسام با هندسه های پیچیده را در یک مرحله تولید ارائه می دهد. این مطالعه به بررسی اجزا اصلی سخت افزاری و نرم افزاری چاپگرهای سه بعدی می پردازد. در ابتدا انواع پیکربندی های چاپگر سه بعدی که شامل: دکارتی، دلتا، قطبی و اسکارا هستند را معرفی و سپس به رایج ترین آنها در صنعت غذا اشاره می کند. در ادامه موتور پله ای، سیستم های طراحی به کمک کامپیوتر، اطلاعات پایه در مورد سیستم عامل و کدهای G که هر یک جزء مهم ترین بخش های سخت افزاری و نرم افزاری چاپگرها هستند را مورد بحث و بررسی قرار می دهد.

واژگان کلیدی: پیکربندی ساختاری، تولید سفارشی، چاپگر سه بعدی، ساخت افزایشی، صنعت غذا.

hannan.lashkari@iau.ac.ir

۱- مقدمه

بالا، تنوع در مواد اولیه فلزی و غیرفلزی در تولید قطعات، کاهش هزینه، تولید در اندازه های کوچک تا بزرگ، ساده تا پیچیده، یکپارچه تا چند بخشی و تک ماده ای تا چند ماده ای با ویژگی سفارشی سازی امکان پذیر شده است [۲]. در سال های اخیر فروش چاپگرهای سه بعدی برای استفاده شخصی در حال افزایش است. نیویورک تایمز در سال ۲۰۱۴ چاپ سه بعدی را به عنوان یک فناوری با قدرت تغییر جهان، معرفی کرد و رسانه های دیگر از آن به عنوان ابزاری مخرب برای زنجیره تامین مرسوم نام بردند. در سال های اخیر، این فناوری فرصت های زیادی را در بسیاری از

در سال های اخیر، یک فناوری جدید، دیدگاهی مخالف با انقلاب صنعتی قرن هجدهم (تولید انبوه کالا) را مطرح کرد. این فناوری که چاپگر سه بعدی نام دارد و جزء فناوری های ساخت افزایشی (AM) محسوب می شود به هر فرد این امکان را می دهد که کالایی با ویژگی ها و عملکردهای شخصی و منحصر به فرد و ارزان تولید کند [۱]. با بکارگیری ساخت افزایشی: دقت بالا، سرعت

¹ Additive Manufacturing

زمینه‌های تحقیقاتی و کاربردهای صنعتی مانند ساخت نمونه‌های اولیه، مهندسی بافت، معماری، تولید قطعات یدکی، مهندسی سازه، هوافضا، آموزش، هنر و مصارف غذایی و دارویی ایجاد کرده است [۳].

در صنعت غذا، چاپگر سه بعدی امکان سفارشی‌سازی انبوه یک غذا برای افراد با سلیقه‌های متفاوت را فراهم می‌کند؛ این امر به گونه‌ای انجام می‌شود که با نیازها و درخواست‌های یک مشتری خاص مطابقت داشته باشد. فرمول غذایی نوآورانه با قابلیت سفارشی‌سازی آن از نظر حسی و مواد مغذی؛ از طریق مخلوط کردن چندین ماده که نیازهای ما را برآورده می‌کند، به دست می‌آید و سپس آنها را می‌توان به عنوان مواد غذایی با شکل، ابعاد، ساختار داخلی و بافت شخصی چاپ کرد. مزایای دیگر این فناوری تولید پایدار مواد غذایی است، زیرا در این روش ما کل میزان غذا را چاپ می‌کنیم و ضایعات مواد اولیه صفر است. علاوه بر این، به عنوان یک روش تولید بسیار انعطاف‌پذیر، ممکن است با آن بتوانیم استفاده از مواد غذایی با کربوهیدرات کم را به اشیاء خوراکی نوآورانه (بر پایه جلبک‌ها، حشرات و ...) ارتقاء دهیم [۴].

در میان فناوری‌های ساخت افزایشی از برخی تجهیزات برای ساخت مواد غذایی استفاده می‌کنند. فناوری تف جوشی لیزری^۱ یا پخت لیزری انتخابی^۲ یک روش است که با استفاده از یک منبع گرما به ذوب لایه‌ای از مواد پودری می‌پردازد. پس از آن، یک لایه تازه از همان مواد قبلی، بعد از مرحله همجوشی روی اولین ماده ذوب شده رسوب می‌کند. در پایان فرآیند، پودر استفاده نشده از ساختار سه بعدی خارج می‌گردد. از این روش در سال ۲۰۱۶ برای ساخت ساختارهای سه بعدی نوآورانه شکر استفاده شد [۵ و ۶]. در میان تعداد زیادی از فناوری‌های ساخت افزایشی، اکستروژن سه بعدی^۳ مهم‌ترین روش است. به طور دقیق، اکستروژن مواد غذایی همان اجرای فناوری مدل‌سازی رسوب ذوب شده^۴ است. در اصل، این روش توسط استراتاسیس در سال ۱۹۸۹ ثبت اختراع شد. این فناوری امکان ساخت یک شی سه بعدی را از طریق اکستروژن یک رشته از مواد، طبق یک الگوی مسیر از پیش تعیین شده توسط کامپیوتر، را فراهم می‌کند. اکستروژن مواد غذایی ممکن است در دمای اتاق یا با رسوب مواد ذوب شده رخ دهد. تحقیقات متعدد و

فرآورده‌های مختلفی با این فناوری تاکنون ساخته شده است. به دلیل سادگی و تطبیق‌پذیری آن با مواد غذایی مختلف، مانند خمیر، شکلات، جایگزین‌های گوشت و خمیر سبزیجات به عنوان روش چاپ رایج مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴ و ۷]. چاپ با استفاده از تزریق چسب^۵ و چاپ جوهر افشان^۶ روش‌های رایج دیگر است که به ترتیب برای مواد غذایی پودری که بوسیله یک چسب ذرات در کنار هم پیوسته می‌شوند و مایع که در آن مایع خوراکی به عنوان جوهر چاپ استفاده می‌شوند، کاربرد دارند [۸ و ۹].

با استفاده از این فناوری فرآورده‌های مختلفی تولید شده است، از جمله: تولید کوکی حاوی شکر، نشاسته و پوره سیب‌زمینی، ساخت اشکال نوآورانه کوکی، ساخت اشکال جدیدی از ماکارونی و تولید نمونه آزمایشی فرآورده‌هایی از مواد غذایی نرم مختلف مانند پوره گوشت، پروتئین‌ها، کربوهیدرات‌ها و تولید ژل سوریمی ماهی در دمای اتاق [۴]. لیو و همکاران خواص رئولوژیکی پوره سیب زمینی اضافه شده با مواد مختلف و تأثیر آنها بر کیفیت ساختارهای چاپ سه بعدی را تجزیه و تحلیل کردند [۱۰]. یانگ و همکاران ژل آب لیمو را به عنوان ماده غذایی برای به دست آوردن اشیاء خوراکی سه بعدی نوآورانه ارزیابی کردند [۱۱]. سورینی و همکاران اشکال پیچیده‌ای از محصولات مبتنی بر غلات را با اکستروژن کردن خمیر بر اساس آرد گندم تجاری به دست آوردند [۱۲]. چاپ شکلات رایج‌ترین کاربرد روش اکستروژن است زیرا به راحتی ذوب و از طریق یک نازل کوچک اکستروژن می‌شود و بسیار مورد استقبال مصرف‌کنندگان قرار می‌گیرد. با این وجود، یکی از سخت‌ترین مواد اولیه برای کار به این روش است، به این دلیل که کریستال‌های تری‌گلیسیرید دارای خواص فیزیکی متفاوتی خواهد بود که بر پایداری و ماندگاری شکلات چاپ سه بعدی تأثیر می‌گذارد. نمونه جالب دیگری از اکستروژن ذوب در زمینه تولید مواد غذایی توسط لوتوهیک و همکاران در سال ۲۰۱۸ گزارش شده است، که این فناوری را برای به دست آوردن ساختار پیچیده پنیر ذوب شده در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۲ دقیقه استفاده کردند [۱۳]. مواد تشکیل دهنده هیدروژل‌ها نیز اجزای امیدوارکننده‌ای برای استفاده در چاپگرهای سه بعدی غذا هستند. از هیدروکلوئیدهای زانتان و ژلاتین در ترکیب با سایر مواد برای ساخت ساختارهای

^۴ Fused deposition modelling

^۵ Binder Jet 3D Printing

^۶ Inkjet-based 3D food printing

^۱ Laser sintering 3D food printing

^۲ Selective laser sintering

^۳ Extrusion-based 3D food printing

این نوع چاپگرها، پیکربندی‌های فرعی مختلفی وجود دارد. به عنوان مثال، بستر چاپ ممکن است روی صفحه X و Y حرکت کند، در حالی که پیشران چاپ در امتداد محور Z حرکت می‌کند (چاپگرهای با پیشران Z). از طرف دیگر، پیشران چاپ ممکن است روی محورهای X و Z حرکت کند در حالی که بستر چاپ در امتداد محور Y حرکت می‌کند (چاپگرهای با پیشران XZ). شکل ۱ شمایی از پیکربندی این دو نوع چاپگر را نشان می‌دهد. با این حال، پیکربندی‌های دیگری نیز وجود دارد، مانند چاپگرهای با پیشران XYZ که فقط پیشران چاپگر در امتداد تمامی محورها حرکت می‌کند و بستر چاپ در یک مکان ثابت نگه داشته می‌شود. نمونه‌ی مدرنی از این پیکربندی چاپگر توسط شرکت بای فلو^۶ ساخته شده است که از یک سرنگ پلاستیکی استفاده می‌کند و هر مصرف کننده می‌تواند آن را با دستور العمل‌های خود دوباره پر کند [۱۵] و [۱۶].

چاپگرهای دکارتی اولین نسل چاپگرهای سه بعدی بوده‌اند که دارای ساده‌ترین طراحی هستند. همچنین، حرکات آنها بسیار آسان

پیچیده با طیف گسترده‌ای از بافت و طعم استفاده شده است. همچنین از ژل کلسیم/پکتین به عنوان جوهر زیستی و از ژل متیل سلولز به عنوان یک ساختار پایه برای ارزیابی قابلیت چاپ برخی از مواد غذایی انتخاب شده استفاده کردند [۴]. با استفاده از روش بایندر جتینگ از پودر قند برای ساخت ساختارهای سه بعدی برای استفاده تزئینی در دستورالعمل‌های شیرینی‌پزی و از پودر سلولز آمورف و چسب مبتنی بر زانتان در یک فرآیند جت دو بعدی برای ایجاد ساختارهای طراحی شده استفاده شده است [۴ و ۱۴].

با وجود اینکه فناوری چاپ سه بعدی در ۳۰ سال گذشته به کار گرفته شده و به پیشرفت‌های مهمی دست یافته است، کمبودها و کاستی‌هایی را نیز نشان می‌دهد که بیشتر به عدم کیفیت اشیاء مانند دقت چاپ در مقایسه با مدل مجازی سه بعدی آن و همچنین کارایی فرآیند چاپ تعلق دارد. این مقاله به بررسی اجزای اصلی سخت افزاری چاپگرهای سه بعدی، انواع پیکربندی چاپگرهای سه بعدی، موتور پله‌ای و سیستم‌های طراحی به کمک کامپیوتر برای ایجاد مدل مجازی سه بعدی و اطلاعات پایه در مورد سیستم عامل و کدهای G با تاکید بر استفاده در صنایع غذایی می‌پردازد.

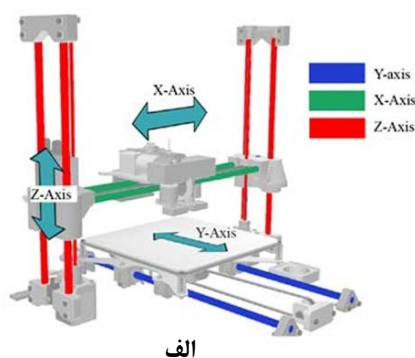
۲- اجزاء اصلی سخت افزاری چاپگرهای سه بعدی

۲-۱- پیکربندی ساختاری چاپگرهای سه بعدی

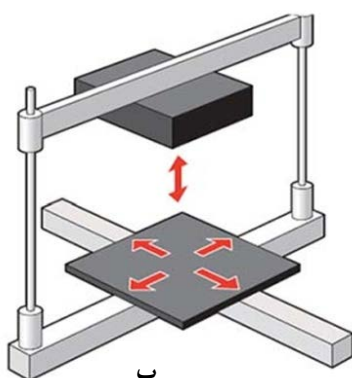
چاپگرهای سه بعدی مورد استفاده در صنایع مختلف، ممکن است دارای چهار پیکربندی ساختاری مختلف دکارتی^۱، دلتا^۲، قطبی^۳ و اسکارا^۴ باشند. اساساً، پیکربندی چاپگر به نحوه‌ی حرکت پیشران^۵ و یا بستر تخته‌ی چاپ در فضای X، Y و Z اشاره دارد و به چاپگر اجازه می‌دهد تا با دنبال کردن مسیرهای طراحی شده بر اساس مدل مجازی سه بعدی، مواد را تزریق و رسوب دهد [۱۵].

۲-۱-۱- پیکربندی دکارتی

پیکربندی دکارتی نشان دهنده یک چاپگر سه بعدی است که بر روی محورهای صفحه دکارتی X، Y و Z حرکت می‌کند. برای



الف



ب

شکل ۱. نمایش چاپگرهای سه بعدی دکارتی. (الف) چاپگر سه بعدی با پیشران XZ و (ب) چاپگر سه بعدی با پیشران Z.

^۴Scara

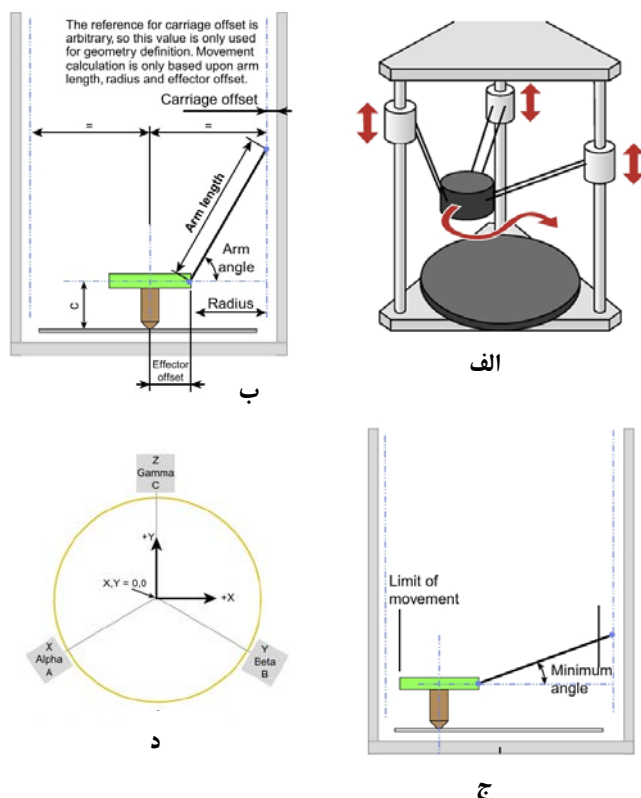
^۵Head

^۶ByFlow

^۱ Cartesian

^۲ Delta

^۳ Polar



شکل ۲. نمایش پیکربندی چاپگر سه بعدی دلتا. (الف) پیکربندی، (ب و ج) قضیه فیثاغورث در دو موقعیت در محور X و (د) موقعیت مکانی که حرکت پیشران ایجاد می کند.

دکارتی سبک وزن هستند. از نقاط ضعف پیکربندی دلتا این است که برای ساخت اجسام بسیار کوچک از دقت کمتری در موقعیت یابی برخوردار است [۱۵ و ۱۶].

۲-۱-۳- پیکربندی قطبی

پیکربندی قطبی به معنای استفاده از مختصات قطبی برای حرکات بستر چاپ در حدود ۳۶۰ درجه و در امتداد فاصله شعاعی است در حالی که موتور دیگری پیشران چاپ را در جهت عمودی حرکت می دهد (شکل ۳). این پیکربندی چاپگر را قادر می سازد تا اندازه کوچکی داشته باشد و ممکن است یک جسم بزرگتر چاپ شود، زیرا بستر چاپ یک دیسک است. به عنوان مثال؛ با ثابت نگه داشتن طول ۴ سانتی متر، برای پیکربندی دکارتی حداکثر بستر چاپ مربعی، ۱۶ سانتی متر مربع به دست می آید، در حالی که برای پیکربندی قطبی سطح ۵۰/۲۴ سانتی متر مربع در دسترس است [۴ و ۱۵]. پیکربندی قطبی توانایی انجام حرکات خمشی و پیچش را

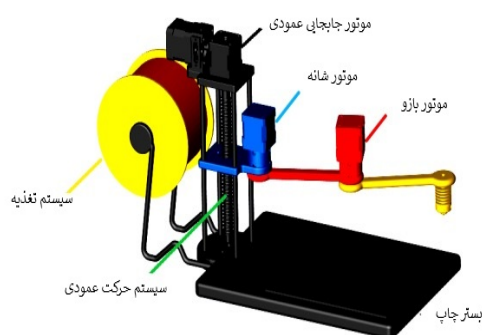
است زیرا در طول یک خط مستقیم در امتداد جهت های X، Y و Z اتفاق می افتد و نیاز به محاسبات کمی دارد. با این وجود، این نوع چاپگرها دارای قطعات متحرک سنگین (موتورهای پله ای، پیشران چاپ و غیره) هستند که سرعت کلی چاپ و کیفیت اشیاء چاپ شده را کاهش می دهند، به ویژه در مورد اشکال پیچیده ای که چندین تغییر جهت را دنبال می کنند. برخی از چاپگرهای سه بعدی دارای پیکربندی های دکارتی مانند چاپک کربادور^۱ یک چاپگر با پیشران XZ هستند که برای ساخت اشکال نوآورانه شکلات استفاده می شوند. فودابنی^۲ یک چاپگر سه بعدی دیگری است که پیشران XYZ با بستر ثابت دارد. اگرچه استفاده و نگهداری از این چاپگرها آسان است، اما برخی تفاوت های مکانیکی و ساختاری باعث ایجاد اختلال در عملکرد آنها می شود. چاپگرهای با پیشران XZ جرم بیشتری برای جابجایی دارند و سرعت چاپ و کیفیت چاپ اشیاء را کاهش می دهند. از سوی دیگر چاپگرهای با پیشران XY و XYZ سریعتر هستند زیرا جرم کمتری برای حرکت دارند. با این حال، چاپگرهای دکارتی قبل از چاپ نیاز به کالیبراسیون دقیق در امتداد فضای دکارتی XYZ دارند [۱۵ و ۱۶].

۲-۱-۲- پیکربندی دلتا

دومین چاپگر تجاری محبوب و پرکاربرد پیکربندی دلتا است. در این حالت، حرکات در فضای سه بعدی توسط سه جفت بازو، مجاز است در حالی که بستر چاپ ثابت است (شکل ۲الف). هر بازو به یک حلقه متصل است که در امتداد جهت عمودی حرکت می کند. حرکات پیشران چاپگر در فضای XYZ بسیار آسان است زیرا از قضیه فیثاغورث پیروی می کند (شکل ۲ب). دلیل این امر این است که طول بازو به عنوان وتر مثلث در نظر گرفته می شود، به طوری که حرکات در جهت X نتیجه حرکات بازوها در جهت عمودی است. شکل های ۲ب و ج دو موقعیت پیشران چاپ را در امتداد محور X نشان می دهند که با تغییر وتر و زاویه مثلث ساخته شده توسط طول بازو، موقعیت X و Z به دست می آید. هر سه جفت بازو به طور همزمان حرکت می کنند و آنها را قادر می سازد تا دقیقاً به موقعیت یک میدان گرد برسند (شکل ۲د). از مزایای این پیکربندی می توان به امکان ساخت اشیاء بزرگ و سرعت بالای چاپ اشاره کرد زیرا قطعات مکانیکی در مقایسه با چاپگر پیکربندی

² Foodini

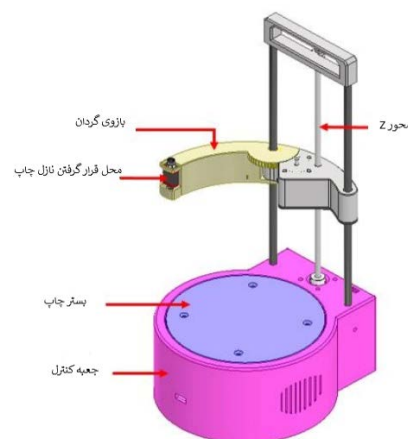
¹ Choc Creator



شکل ۴. نمایش شماتیک پیکربندی چاپگر سه بعدی اسکارا.

۲-۱-۵- پیکربندی‌های استفاده شده در صنعت غذا

انجام یک بحث انتقادی برای انتخاب بهترین پیکربندی برای برنامه‌های چاپ مواد غذایی کار دشواری است. به طور کلی، مهم‌ترین عواملی که باید در نظر گرفته شوند عبارتند از: هزینه، سرعت چاپ، ابعاد نازل، امکان حفظ دمای متوسط بالا، دقت حرکتی که بر کیفیت جسم چاپ شده تأثیر می‌گذارد و همچنین اندازه جسم چاپ شده و نحوه نگهداری آسان چاپگر. امروزه استفاده از چاپگر سه بعدی در بخش مواد غذایی، چه برای تحقیقات و چه برای کاربردهای عملی، در مراحل اولیه تحقیق و توسعه است. در مورد مواد ترموپلاستیک مانند اسید پلی لاکتیک، اکریلونیتریل بوتادین استایرن و غیره، این فناوری به استاندارد کیفیت بسیار بالایی رسیده است و مهمترین ویژگی آن، وضوح بالای اشیاء چاپ شده است. امروزه در صنعت غذا، محققان و صنعتگران تلاش خود را بر روی کاربرد بالقوه این فناوری برای به دست آوردن مواد غذایی نوآورانه با اشکال پیچیده، بافت‌های جدید، محتوای غذایی شخصی‌سازی شده و همچنین با استفاده از مواد نوآورانه (پودر حشرات، جلبک‌ها و غیره) متمرکز کرده‌اند. وضوح بالای ساختار چاپی و کیفیت کلی آن به این معنی است که میزان تشابه بین مدل مجازی سه بعدی طراحی شده و غذای چاپ سه بعدی به دست آمده، چقدر است؟ اما باید در نظر داشت که این مسئله در صنعت غذا خیلی حساس نیست، ولی در بخش‌های دیگر از حساسیت بیشتری برخوردار است. به عنوان مثال، رایج‌ترین قطر نازل‌های مورد استفاده برای کاربردهای غذایی بین ۰/۸ تا ۲ میلی‌متر است که به طرز چشمگیری بزرگتر از نازل‌های متداول برای مواد پلاستیکی (۰/۴ میلی‌متر یا کمتر) است. در پزشکی یا چاپ بافت،



شکل ۳. نمایش شماتیک پیکربندی چاپگر سه بعدی قطبی.

به راحتی فراهم می‌کنند، در حالی که مختصات دکارتی در انجام این حرکات به طور موثر در صورت ترکیب همزمان مشکل دارند. پیکربندی قطبی توانایی بهینه‌سازی مسیرها و حرکت از یک نقطه به نقطه دیگر را به سادگی دارند. با ترکیب تنها دو محور بازو و یک میز چرخشی، ایجاد پروفیل‌های پیچیده، به ویژه محصولاتی با پروفیل‌های استوانه‌ای و متقارن آسان است که به کاهش زمان و انرژی مورد نیاز برای تکمیل محصول کمک می‌کند [۱۷]. علی‌رغم اینکه برخی از چاپگرهای سه بعدی قطبی در دسترس هستند، تا آنجا که ما می‌دانیم، فقط چاپگر سه بعدی زوکاو^۱ برای مصارف غذایی کاربرد دارد [۱۵].

۲-۱-۴- پیکربندی اسکارا

پیکربندی اسکارا نوعی پیکربندی است که به معنای استفاده از یک بازوی رباتیک است که می‌تواند در امتداد صفحه XY حرکت کند، در حالی که یک موتور جداگانه حرکت را در جهت عمودی تضمین می‌کند (شکل ۴). سیستم تغذیه برای چاپ سه بعدی در پشت ربات قرار می‌گیرد و در انتهای بازوی رباتیک گسترش می‌یابد. هدف از این سیستم این است که ربات مسیر داده شده در طرحی که کامپیوتر رسم کرده را از برنامه تا چاپ مدل جامد مورد نظر، بتواند دنبال کند. امروزه، تا آنجا که ما می‌دانیم، از هیچ برنامه‌ای از این پیکربندی برای مواد غذایی استفاده نشده است [۱۸].

² Selective Compliant Assembly Robot Arm

¹ XOCO

کیفیت ساختار چاپ شده باید بسیار بالا باشد و قطر نازل‌ها در محدوده میکرون است [۱۹].

در اغلب موارد آزمایش‌های انجام شده در بخش مواد غذایی، محققین به ندرت اطلاعات خاصی را در مورد پیکربندی مکانیکی چاپگرها و نحوه‌ی حرکات آنها گزارش کردند. لاناو و همکاران از یک مدل چاپگر تجاری با پیشران XZ با نام ORD Bot hadron، برای چاپ شکلات استفاده کردند [۲۰ و ۲۱]. وانگ و همکاران، چاپ سه بعدی ژل سوریمی را با استفاده از سیستم‌های XYZ مطالعه کردند [۹]. لیو و همکاران از یک چاپگر سه بعدی با نام تجاری nScript Inc., United States استفاده کردند که دارای سیستم موقعیت‌یابی XYZ بود و به نظر می‌رسد که آنها از پیکربندی پیشران چاپ XZ استفاده کرده‌اند [۱۰]. لو توهیک و همکاران از یک چاپگر YZ برای مطالعه امکان سنجی استفاده از چاپگر برای ساخت پنیر استفاده کردند که ساخت بریتانیا بود که امکان استفاده از اکسترودر سرنگ پر از پنیر را فراهم می‌کرد و در دمای ثابت نگهداری می‌شد [۱۳]. کیم و همکاران از یک چاپگر سفارشی ساخته شده در دانشگاه کره استفاده کردند. نویسندگان تصویری از چاپگر سه بعدی را نشان دادند که پیکربندی دکارتی را با پیشران چاپ XZ داشت [۲۲]. همیلتون و همکاران از یک پیشران چاپ XYZ برای چاپ دو نوع اسپریدهای صبحانه (Marmite و Vegemite) که هر دو به شکل‌های پیچیده دو بعدی و سه بعدی بر روی یک تکه نان چاپ شدند، استفاده کردند [۲۳]. لیل و همکاران از چاپگری که برای چاپ زیستی بافت و مجهز به سیستم توزیع میکرومقیاس بود برای چاپ خمیرهای غذایی متشکل از نشاسته، پروتئین، پودر شیر و مواد غنی از فیبر به تنهایی یا مخلوط با یکدیگر در نسبت‌های مختلف استفاده کردند. این یک چاپگر حرفه‌ای مبتنی بر پیکربندی‌های دکارتی است که از یک پمپ هوشمند نوآورانه استفاده می‌کند که امکان رسوب رشته‌های مواد با قطر بسیار کوچک تا ۱۲/۵ میکرومتر را فراهم کرده که به طور خاص از ۰/۴۱ میلی‌متر برای چاپ استفاده شد [۲۴]. وانکائوونبرگه و همکاران استفاده از چاپگر سه بعدی با پیکربندی دکارتی با پیشران چاپ XZ را برای غنی‌سازی جوهر خوراکی پکتین با سلول‌های گیاهی زنده (یعنی سلول‌های برگ کاهو) را مطالعه کردند. بر اساس مثال‌های بالا، چاپگرهای مبتنی

بر پیکربندی دکارتی تقریباً تنها چاپگرهایی هستند که برای آزمایش‌های تحقیقاتی استفاده می‌شوند [۲۵]. تحقیقات کمتری از پیکربندی‌های دلتا استفاده کردند نظیر؛ سورینی و همکاران در دانشگاه فوگیا (ایتالیا) که از یک چاپگر دلتا مجهز به اکسترودر سفالی برای اکسترودر کردن اهرام خوراکی نوآورانه متشکل از ترکیبی از میوه و سبزیجات استفاده کردند. همین گروه تحقیقاتی همچنین یک میان وعده بر پایه میوه برای کودکان ۳ الی ۱۰ ساله و یک میان وعده بر پایه غلات چاپ کردند [۱۲].

با این حال، اکثر چاپگرهای سه بعدی که برای تولید مواد غذایی استفاده می‌شوند، چاپگرهای تجاری برای مواد پلاستیکی هستند که برای به دست آوردن نتایج خوب در چاپ مواد غذایی اصلاح شده‌اند. با این حال، چندین نقص در چاپ مواد غذایی وجود دارد که دلیل اصلی آن ناتوانی چاپگر در انطباق خود با خواص رئولوژیکی مختلف مواد غذایی مانند شکلات، خامه‌های سبزیجات، پنیر و غیره است. با این وجود، به دست آوردن اشیاء خوراکی چاپ شده با وضوح بالا بسیار دشوار است.

۲-۲- موتور پله‌ای

موتور پله‌ای^۱ یک موتور الکتریکی است که برای هر پالس قدرت در یک مرحله‌ی از پیش تعریف شده حرکت می‌کند و حرکات یک چاپگر سه بعدی را در چهار محور هدایت می‌کند. با توجه به ویژگی‌های مکانیکی خاص موتور، هر مرحله آن یک چرخش زاویه‌ای است. پرکاربردترین موتور پله‌ای دارای زاویه پله ۱/۸ درجه است که برای یک دایره کامل ۳۶۰ درجه، تعداد ۲۰۰ مرحله چرخش را امکان پذیر می‌کند، گرچه با ویژگی‌های ابعادی و ساختاری مختلف می‌توان زاویه چرخش گام‌های متفاوتی را تعریف کرد. شکل ۵ یک موتور پله‌ای متداول را نشان می‌دهد که برای چاپگرهای سه بعدی استفاده می‌شود. یک موتور پله‌ای دارای دو بخش اصلی استاتور الکترومغناطیسی چند دندانه و روتور چند دندانه است.

معمولاً سه نوع اصلی موتورهای پله‌ای که مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از: آهنربای دائمی، با رلوکتانس متغیر و هیبریدی. در این میان، رایج‌ترین مدل در فناوری چاپگر سه بعدی، پله‌ای

¹ Stepper motor

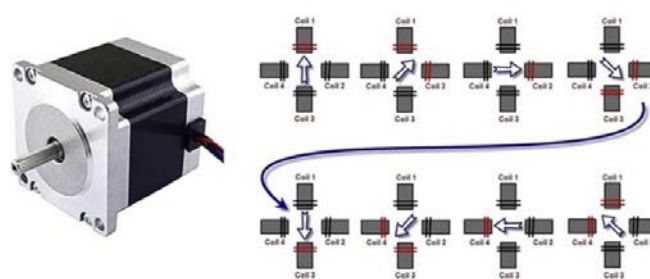
پله‌ای مربوط نمی‌شود. جدول ۱ گشتاور نگهدارنده موتورهای پله‌ای با ابعاد و طول مربع‌های مختلف را نشان می‌دهد [۴].

شایان ذکر است که نوع موتور پله‌ای مورد استفاده نه تنها برای دقت حرکات، بلکه برای کنترل میزان مواد رسوب شده در حین چاپ ضروری است. "اکستروژن پیچشی" و "اکستروژن پیستونی" رایج‌ترین سیستم‌های اکستروژن مورد استفاده در چاپگر سه بعدی غذا هستند. در اکستروژن پیچشی، مواد غذایی معمولاً در ظرفی قرار می‌گیرند و توسط یک پیچ متحرک که توسط یک موتور پله‌ای کنترل می‌شود، در سراسر نازل فشار داده می‌شود. در حالت دوم، یک سرنگ پلاستیکی با خمیرهای غذایی پر می‌شود و پیستون آن توسط یک موتور پله‌ای کنترل می‌شود که آن را به سمت پایین (یا به سمت بالا) حرکت می‌دهد و امکان اکستروژن مواد غذایی در سراسر نازل را فراهم می‌کند. چرخش این پیچ معمولاً به عنوان محور چهارم چاپگرهای سه بعدی در نظر گرفته می‌شود که به آن محور E نیز گفته می‌شود. این امر برای کیفیت شیء چاپی بسیار مهم است زیرا میزان مواد اکستروژن شده در حین چاپ را کنترل می‌کند. مکانیسم اکستروژن با هوای فشرده این گونه است که هوای فشرده استریل مواد را در سراسر سیلندر و نازل هل می‌دهد، در کاربردهای زیست پزشکی استفاده شده است. در شکل ۶ طرح شماتیک اکستروژن مورد استفاده در چاپگر سه بعدی غذا نشان

جدول ۱. اطلاعات اولیه (شماره NEMA، تعداد انباشته‌ها و گشتاور نگهدارنده) رایج‌ترین موتورهای پله‌ای مورد استفاده برای چاپ سه بعدی

گشتاور نگهدارنده (N-m)				
چهار استکی	سه استکی	دو استکی	یک استکی*	اندازه قاب
N/A	N/A	۰/۱۱	۰/۰۵	NEMA 11
۰/۸۰	۰/۵۵	۰/۳۷	۰/۲۲	NEMA 17
۲/۵۰	۱/۹۰	۱/۱۲	۰/۵۴	NEMA 23
N/A	۲/۵۰	۱/۲۵	۰/۸۷	NEMA 24
۱۱/۹۶	۸/۹۰	۶/۰۰	۲/۸۰	NEMA 34

* استک نشان‌دهنده تعداد روتور و استاتورهای چیده شده است. شماره NEMA اندازه قاب مربع موتور (اینچ) را نشان می‌دهد.



شکل ۵. نمایش شماتیک موتور پله‌ای.

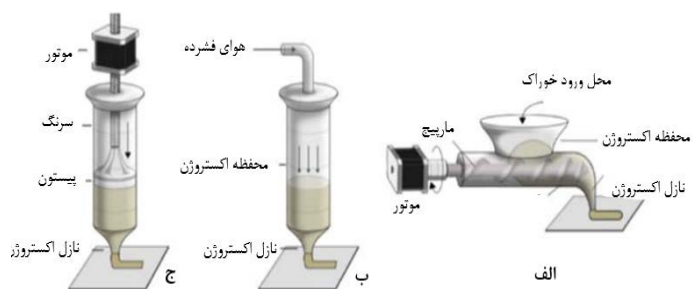
هیبریدی است. شکل ۵ اصول اولیه عملکرد یک موتور پله‌ای را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. یک استاتور آهنربای الکتریکی چهار دندانه (یعنی سیم پیچ‌ها) و روتور را می‌توان دید که موقعیت فعلی روتور با فلش نشان داده شده است. هنگامی که سیم پیچ ۱ انرژی می‌گیرد، روتور آن را جذب می‌کند و در موقعیت ۱ قرار می‌گیرد. هنگامی که سیم پیچ ۱ خاموش می‌شود و به سیم پیچ ۲ قدرت داده می‌شود، روتور با رسیدن به موقعیت ۲ با چرخش ۹۰ درجه جذب می‌گردد. وضعیت مشابه زمانی رخ می‌دهد که سیم پیچ‌های ۳ یا ۴ انرژی می‌گیرند و به روتور اجازه می‌دهند ۱۸۰ و ۲۷۰ درجه بچرخد. به همین ترتیب، برخی از موقعیت‌های میانی با روشن کردن همزمان دو سیم پیچ مجاز هستند. به عنوان مثال، با دادن قدرت به سیم پیچ‌های ۱ و ۲، روتور با چرخش ۴۵ درجه در بین آنها قرار می‌گیرد. با تغییر پیکربندی مکانیکی موتورهای پله‌ای و همچنین تغییرات پالس جریان داده شده به سیم پیچ‌ها، ممکن است تعداد زیادی موقعیت میانی به دست آید که امکان حرکت دقیق‌تر را فراهم می‌کند. رایج‌ترین موتور پله‌ای، در مجموع ۲۰۰ مرحله چرخش در اطراف دایره کامل ۳۶۰ درجه را امکان‌پذیر می‌کند. این روتور از ۵۰ دندان تشکیل شده است، در حالی که استاتور دارای ۴۸ دندان است و به گونه‌ای الکترومغناطیسی شده‌اند که می‌توانند یک پله ۱/۸ درجه را به دست آورند [۲۶].

از دیگر ویژگی‌های موتورهای پله‌ای اندازه‌ی مربعی است که توسط انجمن ملی تولیدکنندگان برق ایالات متحده (NEMA) استاندارد شده است و نشان‌دهنده‌ی طول آن است که گشتاور نگهدارنده موتور را مشخص می‌کند. NEMA 17 موتوری را مشخص می‌کند که یک مربع ۱/۷ اینچی در ۱/۷ اینچی است، اما ممکن است حاوی یک یا چند استاتور و روتور "انباشته" باشد که گشتاور آن ممکن است افزایش یابد. بنابراین، شماره NEMA به قدرت موتور

¹ US National Electrical Manufacturers Association (NEMA's number)

داده شده است. علیرغم اینکه استفاده از موتورهای پله‌ای مختلف ممکن است تأثیرات قابل توجهی بر کیفیت اشیاء چاپ سه بعدی داشته باشد، یافتن اطلاعات در مورد نوع موتورهای پله‌ای مورد استفاده برای کاربردهای غذایی بسیار دشوار است. همانطور که در بالا گزارش شد، تغییر قابل توجهی در گشتاور منتقل شده به پیستون سرنگ (یا هر نوع پیکربندی اکستروژن) با تغییر اندازه و طول موتور پله به دست می‌آید. البته این می‌تواند هنگام کار با گروانروی‌های مختلف مواد غذایی مانند ژل‌های پکتین، خمیر مینتی بر غلات، ترکیبی از سبزیجات، گوشت، ماهی، فرمولاسیون‌های غذایی پیچیده یا به عنوان جایگزین، هنگام چاپ فرمولاسیون‌های غذایی پیچیده که گرانروی آنها با تغییر نوع و مقدار مواد تغییر می‌کند، از اهمیت بالایی برخوردار باشد [۲۷].

تا آنجا که ما می‌دانیم، تنها در دو مقاله نوع موتور پله‌ای که حرکات چاپگر سه بعدی را کنترل می‌کند، گزارش شده است. لائارو و همکاران تأثیر برخی از متغیرهای چاپ بر کیفیت شکلات چاپی را با استفاده از موتور پله‌ای NEMA 17 با زاویه گام 0.9° درجه همراه با پیچ ۱۰ میلی‌متر قطر اسمی و گام ۲ میلی‌متر مورد مطالعه قرار دادند [۲۰]. همچنین سورینی و همکاران ترکیبی از میوه‌ها و سبزیجات را برای ساخت هرم خوراکی نوآورانه با استفاده از موتور پله‌ای NEMA 17 چاپ کردند. آنها از یک چاپگر پیکربندی دلتا مجهز به مکانیسم اکستروژن پیش‌پیشی استفاده کردند [۱۲].



شکل ۶ مکانیسم اکستروژن در فرآیند چاپ سه بعدی مواد غذایی. (الف) اکستروژن پیش‌پیشی، (ب) با هوای فشرده و (ج) پیستونی.

۳- سیستم‌های طراحی به کمک کامپیوتر (CAD) برای ایجاد مدل‌های مجازی سه‌بعدی غذا

سیستم‌های طراحی به کمک کامپیوتر (CAD) در بسیاری از زمینه‌های مهندسی مکانیک، معماری، فناوری برق و غیره کاربرد دارند. ایجاد یک مدل مجازی سه بعدی، اولین مرحله از برنامه‌ریزی فرآیند تولید است. در سال‌های اخیر با توجه به افزایش استفاده از چاپگر سه بعدی برای کاربردهای صنعتی و خصوصی، افزایش قابل توجهی در طراحی سیستم‌های CAD نیز رخ داده است. انجام یک دسته‌بندی دقیق برای سیستم‌های طراحی کامپیوتری آسان نیست؛ زیرا در آنها چندین تفاوت وجود دارد از جمله: تفاوت در صدور مجوز، عملکردهای خاص، قابلیت استفاده، نرم افزار رایگان یا سیستم‌های با منابع قابل دسترس، پشتیبانی آنلاین، کاربران آنلاین، طرح‌های رایگان و اساسی، آموزش‌های کمکی، نوع فرمت فایل‌های پشتیبانی شده. نرم افزارهای CAD حرفه‌ای تجاری در دسترس عبارتند از: اتودسک^۵، اسکچ آپ^۴، بلندر^۶؛ طراحی اسپارک مکانیکی^۵ و سالیب ورکس^۶. این برنامه‌ها قابلیت زیادی برای کمک به کاربران حرفه‌ای برای ایجاد، تجزیه و تحلیل و بهینه‌سازی پروژه‌های خود دارند، اما بدون شک قبل از اینکه به طور کامل از قدرت خود بهره‌مند شوند، به سال‌ها تجربه نیاز دارند.

اتودسک بسته‌ای از نرم افزارها است که در سه زمینه اصلی: (۱) معماری، مهندسی و ساخت و ساز؛ (۲) مجموعه طراحی و ساخت محصول و (۳) مجموعه رسانه‌ها و سرگرمی قابل استفاده است. در مجموع ۱۱ نرم افزار CAD متناسب با مصارف خاص را می‌توان در اتودسک یافت، که برای طراحی مکانیکی، برای استفاده رایج در طراحی دو بعدی و سه بعدی، برای گرافیک کامپیوتر و ساخت انیمیشن سه بعدی و غیره کاربرد دارند. اتودسک یک نرم افزار با چند نوع مجوز است، برخی از آنها را می‌توان به صورت رایگان برای دانشجویان به مدت ۳ سال دانلود کرد. اخیراً از یک پلتفرم خاص آن برای بهینه‌سازی طراحی پروتز دندان متناسب با فرد در کشورهای در حال توسعه استفاده شده است. اتودسک همچنین خدمات کمکی را از طریق آموزش‌ها و انجمن‌های در دسترس برای کاربران، دانش‌آموزان و توسعه دهندگان ارائه می‌دهد.

اسکچ آپ در ابتدا توسط گوگل برای کاربرانی که با مدل‌سازی ساختمان و معماری آشنا هستند، توسعه داده شد. طراحی خانه‌ها، مناظر و کل ساختمان‌ها کاربرد اصلی این نرم افزار است، اما از آن

^۴ Blender (Blender Foundation)

^۵ Design Spark Mechanical (Design Spark, Inc)

^۶ SolidWorks (Dassault Systèmes SolidWorks Corp)

^۱ Computer-aided Design (CAD)

^۲ Autodesk (Autodesk Inc.)

^۳ SketchUp (Trimble Inc.)

برای توسعه اشیاء مجازی در برنامه‌های کاربردی چاپگر سه بعدی استفاده شده است. اسکچ آپ شامل سه سطح نرم افزاری مختلف است: اسکچ آپ پرو که یک نرم افزار مجوز است که به صورت تجاری در دسترس است، اسکچ آپ فری که یک مدل سازی سه بعدی رایگان است که به طور مشترک در مرورگر وب کار می کند و اسکچ آپ اسکول که یک برنامه نرم افزار رایگان برای اهداف آموزشی ارائه می دهد.

بلندر یک نرم افزار سه بعدی رایگان و منبع باز است که در ابتدا برای بهبود انیمیشن سه بعدی توسعه یافته و بسیار قدرتمند است که دارای قابلیت های زیادی برای خلاقان هنری و انیماتورها است. اگرچه برای استفاده به مهارت های خاصی نیاز دارد، اما چندین آموزش، مستندات و پشتیبانی فعال به مبتدیان کمک می کند تا ساختارهای پیچیده ای برای چاپگر سه بعدی ایجاد کنند.

سالیید و رکس بسته ای از نرم افزارها است که برای هدایت ایده های نوآورانه در یک محصول تجاری توسعه یافته است. سالیید و رکس در هر مرحله از فرآیند توسعه محصولات نوآورانه به افراد کمک می کند. این برنامه یک برنامه لایسنس بسته است که دارای بسته های فرعی مختلفی از نرم افزار است که در عملکرد خود برای کاربردهای مکانیکی یا الکتریکی و برای شبیه سازی سه بعدی در یک محیط واقعی سفارشی شده اند.

فری کاد^۱ یک نرم افزار مدل سازی سه بعدی پارامتریک است که هدف آن کمک به هر نوع کاربر برای طراحی اشیاء واقعی با هر ابعادی است. این یک نرم افزار رایگان است که توسط تعدادی از کاربران توسعه و بهبود یافته است. علاوه بر این، فری کاد مبتنی بر استفاده از اشیایی است که با ویژگی های خاصی تعریف شده و کاربران مجاز به تغییر آنها با توجه به نیازهای خود هستند. در میان ویژگی های این نرم افزار، ماژول پَس^۲ مفید است که به کاربران امکان را می دهد مسیر چاپگر سه بعدی را در حین حرکت چاپ، بررسی و اصلاح کنند؛ با هدف جلوگیری از حرکات نامطلوب و غیرمعمول غیر چاپی که اغلب ممکن است زمان چاپ را افزایش دهد یا مغایرت با مدل مجازی اصلی ایجاد کند.

در میان نرم افزارهای رایگان، تینکر کد^۳ یک پلت فرم بسیار آسان برای ایجاد چندین نوع شی سه بعدی به طور مستقیم در مرورگر است. این نرم افزار از چندین شکل از پیش ساخته شده (مربع، دایره، هرم، لوله و غیره) استفاده می کند که می توان آنها را با هم ترکیب و ساختارهایی با تعداد نامحدودی از اشکال، ابعاد و ساختارها بدست آورد. علاوه بر این، به هیچ نوع تجربه ای در مدل سازی سه بعدی نیاز ندارد و امکان ذخیره پروژه در فضای ابری، اشتراک گذاری آن با سایر کاربران یا عمومی کردن آن را فراهم می کند. به این ترتیب، هر نوع شی منتشر شده می تواند توسط همه کاربران برای یک پروژه سه بعدی جدید بررسی، اصلاح و استفاده شود.

آنشپ^۴ یک نرم افزار مدل سازی سه بعدی کاملاً مبتنی بر فضای ابری است. این مدل سازی سه بعدی پارامتریک است که با استفاده از آن می توانیم یک طرح دو بعدی را ترسیم و آن را در یک مدل مجازی سه بعدی اکستروود کنیم. برای اولین طراحی دو بعدی، چندین ابزار مفید و همچنین تعداد زیادی آموزش ویدیویی در اختیار دارد که برای مبتدیان به راحتی قابل درک است. سه نسخه در دسترس از این نرم افزار وجود دارد. نسخه آموزشی رایگان که فقط اسناد آموزشی را تولید می کند. دومی یک نسخه خصوصی و رایگان است، برای مدل سازی خصوصی مانند استفاده از چاپگر سه بعدی در خانه مفید است. آخرین نسخه یک نسخه حرفه ای است که با برخی ویژگی ها مانند اسناد خصوصی، عملکردهای سفارشی، صورت حساب متمرکز و پشتیبانی اولویت دار غنی شده است.

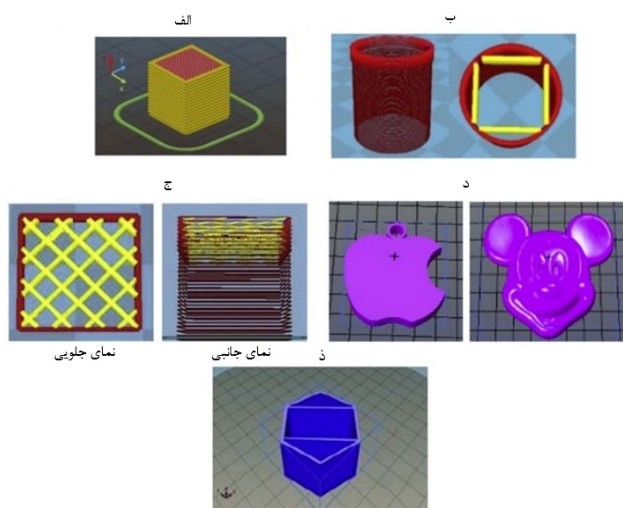
نرم افزار سه بعدی ساز^۵ نرم افزار رایگان ویندوز برای ایجاد اشیاء سه بعدی قبل از چاپ است. در میان قابلیت ها، این نرم افزار امکان ایجاد اشکال نوآورانه را با ترکیب اشکال ساده اولیه (مکعب، دایره، استوانه و غیره) یا با دانلود و اصلاح بسیاری از ساختارهای سه بعدی از یک کتابخانه گسترده در اختیار، فراهم می کند. علاوه بر این، سازنده سه بعدی دارای دو عملکرد به نام های "دوربین" یا "اسکن" است که امکان وارد کردن تصاویر دو بعدی از طریق عکس یا اسکن و ایجاد یک مدل سه بعدی را فراهم می کند [۴].

^۴ Onshape
^۵ 3D Builder

^۱ FreeCAD
^۲ Path
^۳ Tinkercad

CAD انجام نشده است. علاوه بر این، اگرچه یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های فناوری‌های چاپگر سه بعدی آزادی طراحی سازه‌های نوآورانه و پیچیده است، اما تنها اشکال ساده در علوم مواد غذایی چاپ شده است.

شکل ۸ نمونه‌های خوراکی طراحی شده با CAD را نشان می‌دهد. وِناونبرگ و همکاران برای طراحی یک مکعب ساده به ابعاد ۱/۵ سانتی‌متر مکعب از اتوکد استفاده و با استفاده از جوهر خوراکی بر پایه ژل پکتین با متوکسیل پایین آن را چاپ کردند (شکل ۸ الف). همچنین از اتوکد برای کپسوله کردن سلول‌های گیاهی زنده در ژل‌های پکتین استفاده کردند که به شکل مکعبی با ضلع ۱/۵ سانتی‌متر چاپ شده است [۲۵ و ۲۹]. سورینی و همکاران با استفاده از تینکر کد یک مکعب سه بعدی ۱۸ میلی‌متر مکعب طراحی و آن را با فرمول غذایی بر پایه موز چاپ کردند (شکل ۸ ب) [۱۲]. همچنین درآسی و همکاران یک شکل هرمی مثلثی با قاعده ۳۰ میلی‌متر در ۳۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۰ میلی‌متر چاپ کردند (شکل ۸ ج) [۳۰]. لیو و همکاران از پوره سیب‌زمینی برای چاپ ساختارهای نازک مختلف مانند سیب، شکل قلب، سر خرس و غیره استفاده کردند (شکل ۸ د) [۱۰]. مانتهال و همکاران با استفاده از تینکر کد شکلات یک ساختار شش ضلعی چاپ کردند (شکل ۸ ذ) [۳۱]. محققین دیگری از نرم افزارهای متفاوت CAD استفاده کردند و مواردی نظیر: چاپ اسپردهای صبحانه با استفاده از سالید وُرس در قالب طرح یک هرم، صورت خندان و ماهی و بررسی مدل‌سازی رسوب ذوب شده کازئینات سدیم در اشکال هندسی مختلف توسط اسکچ اپ و مسیرساز را مطالعه کردند [۴].

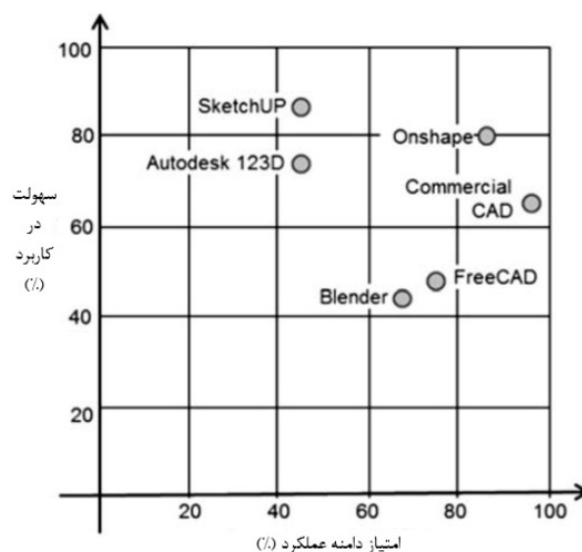


شکل ۸. برخی از مدل‌های مجازی سه‌بعدی که برای چاپ سه‌بعدی استفاده شدند.

اخیراً، جانک و کوئن ۹ مورد از مهم‌ترین برنامه‌های نرم افزاری CAD مورد استفاده برای برنامه‌های چاپگر سه بعدی را مقایسه کردند (شکل ۷).

با هدف ارزیابی سودمندی برخی از نرم افزارهای CAD، چندین پارامتر متعلق به ویژگی‌های کلی «سهولت استفاده» و «دامنه‌ی عملکردها» مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. برای گروه اول، ویژگی‌های خاصی مانند آموزش‌های موجود، کیفیت رابط کاربری گرافیکی، تعداد مستندات موجود برای استفاده از آنها و قابلیت عملکرد بصری خود نرم افزار در نظر گرفته شد. در خصوص دامنه‌ی عملکردها، تعداد اشکال هندسی در اختیار و امکان استفاده رایگان از نسخه‌های حرفه‌ای از مهم‌ترین ویژگی‌هایی بود که در نظر گرفته شد. همانطور که انتظار می‌رفت، نتایج نشان داد که برای نرم افزارهای تجاری، شهودی بودن رابط کاربری گرافیکی در اولویت نیست، بلکه تا حدودی شبیه به استاندارد بالای عملکرد است. نتایج نشان داد که با توجه به سهولت استفاده از ویژگی، اسکچ آپ آسان‌تر در نظر گرفته شده است. از سوی دیگر، پلندر و فری کد از نظر دامنه عملکردها امتیاز بالاتری را کسب کردند، در حالی که از نظر راحتی بازنده بودند [۲۸].

همانطور که گفته شد، چندین مدل ساز CAD سه بعدی می‌توانند برای طراحی ساختارهای غذایی نوآورانه استفاده شوند، اما تجزیه و تحلیل چاپگر سه بعدی غذا نشان می‌دهد که فقط از تعداد کمی از آنها استفاده می‌شود و هیچ نوع مقایسه‌ای بین سیستم‌های مختلف



شکل ۷. نمایش امتیاز به دست آمده توسط انواع نرم افزارهای CAD از نظر سهولت استفاده و دامنه عملکردها.

۴- برنامه‌ریزی فرآیند چاپ سه‌بعدی مواد غذایی

هنگامی که مدل مجازی سه بعدی توسط نرم افزار CAD ایجاد می‌شود، باید به مجموعه‌ای از اطلاعات پیچیده تبدیل شود و حرکات چاپگر را در فضای XYZ و همچنین رسوب مواد را کنترل کند. در پی این هدف، یک فرآیند پیچیده برنامه‌ریزی باید به طور دقیق انجام شود، زیرا قطعاً بر اثربخشی ساخت و کارایی چاپگر سه بعدی که همان کیفیت شی چاپ سه بعدی و زمان چاپ است، تأثیر می‌گذارد. با این حال، این دو جنبه متضاد هم هستند، زیرا با بهبود کیفیت چاپ (وضوح شی)، افزایش زمان چاپ مشاهده می‌شود [۴].

همانطور که توسط جین و همکاران گزارش شده است، فرآیند برنامه‌ریزی شامل چهار مرحله است: جهت‌گیری ساخت، تولید تکیه‌گاه، برش و برنامه‌ریزی مسیر اکسترودر. جهت ساخت به معنای جهت‌گیری مدل مجازی در فضای سه بعدی قبل از چاپ است. این متغیر از اهمیت بالایی برخوردار است زیرا بر حرکات چاپگر در حین اکستروژن و تعداد لایه‌هایی که باید رسوب کنند و بر خواص مکانیکی جسم چاپ شده تأثیر می‌گذارد. به عنوان مثال، اگر یک استوانه ساده را در جهت عمودی در نظر بگیرید، چاپگر با طراحی یک دایره برای هر لایه، مواد را رسوب می‌دهد، در حالی که مدل مجازی سه بعدی سیلندر به صورت افقی باشد، برای هر لایه یک مستطیل ترسیم می‌کند. این امر هم استحکام و هم کیفیت سطح سیلندر چاپ شده را می‌تواند تحت تأثیر قرار دهد. با توجه به ساختار غذایی، جهت ساخت تأثیر مهمی بر برخی از ویژگی‌های بافتی مانند سختی، قابلیت جویدن و چسبندگی دارد که این موارد بر درک حسی فرآورده‌هایی مانند شکلات، بیسکویت و تنقلات مبتنی بر غلات موثر هستند. علاوه بر این، توانایی افزایش سختی کلی ساختار مواد غذایی چاپ سه بعدی می‌تواند برای جلوگیری از فروریزش در حین حمل و نقل در زنجیره غذایی بسیار مفید باشد. انتخاب تکیه‌گاه^۱ عامل مهم دیگر است. یک تکیه‌گاه به ویژه در مورد ساختارهای پیچیده (یعنی برآمدگی با زاویه بیشتر از ۴۵ درجه) که به سختی ممکن است وزن خود را حفظ کنند، مورد نیاز است. با این حال، استفاده از یک تکیه‌گاه ممکن است

خواص مهم جسم چاپ شده مانند استحکام آن، سطح تمام شده و زمان چاپ را تغییر دهد. مرحله بعدی برش است، فرآیندی که در آن مدل مجازی سه بعدی در مجموعه‌ای از صفحات موازی با جهت شی، برش داده می‌شود. هر طرح شامل مسیر اکستروژن است که مسیر دو بعدی را تعریف می‌کند و به دنبال آن اکسترودر خطوط جسم را رسوب می‌دهد و یک منطقه داخلی خاص را پر می‌کند. با توجه به برخی مشخصات فنی، تعداد مشخصی از لایه‌ها تا تکمیل مدل مجازی سه بعدی رسوب داده می‌شود. برش قطعاً بر کیفیت ساختار چاپ سه بعدی تأثیر می‌گذارد زیرا نه تنها حرکات چاپ (یعنی رسوب کانتور مواد و پر کردن آن) بلکه حرکات غیر چاپی را نیز تعریف می‌کند، که به معنای حرکات اکسترودر بین دو نقطه بدون هیچ گونه رسوب مواد است. مطالعه و بهینه‌سازی برنامه‌ریزی مسیر یک زمینه تحقیقاتی بسیار مهم است، اما برای کاربردهای غذایی، هرگز برای انجام آزمایش‌های دقیق در نظر گرفته نشده است. علاوه بر این، در هیچ منبع علمی در مورد کیفیت ساختار غذای سه بعدی چاپ شده ذکر نشده است. به غیر از جهت‌گیری شی که در مرحله قبلی مدل‌سازی سه بعدی تعریف شده است، سه مرحله دیگر برنامه‌ریزی فرآیند را می‌توان با استفاده از یک نرم افزار برش مدیریت کرد که امکان تنظیم مهم‌ترین متغیرهای چاپگر سه بعدی غذا را فراهم می‌کند و حرکات چاپگر را کنترل می‌کند. در بخش‌های بعدی محبوب‌ترین نرم افزارهای برش مورد استفاده برای تهیه و تعریف شرایط فرآیند چاپ معرفی می‌شوند [۳۲].

۵- اصول اساسی نرم افزار برش برای تهیه چاپ سه‌بعدی مواد غذایی

برش دهنده سه بعدی ابزاری است که مدل سه بعدی را برای چاپ به روشی مناسب برای به دست آوردن بهترین ساختار سه بعدی آماده می‌کند. علاوه بر این، نرم افزار برش، کد G حاوی اطلاعات مربوط به حرکات چاپگر را تولید می‌کند. با استفاده صحیح از نرم افزار برش، کاربران می‌توانند شکاف بین مدل مجازی و شی واقعی را پر کنند. همچنین در این زمینه همانند سیستم‌های CAD، تعداد زیادی برنامه نرم افزاری برش سه بعدی در اختیار هر نوع کاربری

¹ Support

قرار دارد که اکثر آنها رایگان هستند. از متداول ترین برنامه های نرم افزار برش سه بعدی می توان به کِرفْت ور^۱، کورا^۲، آیس اس ال^۳، کی ای اس برش دهنده^۴، اکتوپرینت^۵، میکربات پرینت^۶، اسلیک تری آر^۷ و رپتیر^۸ اشاره کرد.

انتخاب نوع نرم افزار به عوامل زیادی بستگی دارد، اما اولین اطلاعاتی که باید در نظر گرفته شود این است که آنها به یک روش برش نمی خورند. خواص اشیاء سه بعدی برای چاپ و مواد مورد استفاده برای چاپ از مهم ترین عواملی است که ممکن است در انتخاب برش دهنده تأثیر بگذارد. با این حال، سهولت استفاده و تعداد پارامترهایی که امکان تنظیم آنها وجود دارد، ویژگی های اصلی هستند. امروزه بیش از هر چیز دو برنامه کورا و اسلیک تری آر بیشترین کاربرد را برای چاپ مواد غذایی دارند. هر دو رایگان هستند و استفاده از آنها آسان است و توسط کتابچه های راهنما، آموزش های ویدیویی و کاربران فعال در این حوزه، پشتیبانی می شوند. با این حال، هر کاربر باید تست های اولیه برش را انجام دهد تا مشخص کند کدام برش با نیازهای خود مطابقت دارد. کدهای G تولید شده توسط برش دهنده های مختلف، چاپگر را متفاوت حرکت می دهند. این بدان معناست که حرکات مختلف چاپی و غیر چاپی به دست آمده از نرم افزار برش دهنده هم بر جنبه بصری و هم بر پایداری مکانیکی محصول نهایی و در نهایت کیفیت آن تأثیر می گذارد [۴، ۳۳ و ۳۴].

۶- سیستم عامل چاپگر سه بعدی

سیستم عامل یک برنامه، مجموعه ای از دستورالعمل های ذخیره شده در رایانه یا حافظه هر دستگاه سخت افزاری است و دستورالعمل هایی را در مورد نحوه عملکرد دستگاه ها ارائه می دهد. همچنین ارتباط بین سخت افزار و نرم افزار را امکان پذیر می کند. لیستی از مهم ترین سیستم عامل ها توسط شرکت رپ رپ^۹ گزارش شده است، اما همانطور که در سراسر جهان نشان داده شده است، سیستم های عامل مارلین^۱، رپتیر^۸ و رپ رپ بیشترین استفاده برای چاپگر سه بعدی غذا را دارند. مهمترین چیزی که باید

در نظر داشت این است که سیستم عامل تنظیمات مهم چاپگر را تعریف می کند و این تنظیمات در لحظه توسعه سیستم عامل ثابت و از پیش تعریف شده است. برای کاربران حرفه ای، می توان سیستم عامل را به طور دقیق سفارشی کرد (یعنی تنظیمات خاص)، آن را کامپایل (تبدیل کدهای برنامه نویس به زبان ماشین (کدهای ۰ و ۱)) کرد و در نهایت آن را به مادربرد چاپگر ارسال کرد. این بخش بر روی بررسی و بحث در مورد مهم ترین تنظیمات تعریف شده در سیستم عامل متمرکز شده است، که می تواند بر کیفیت چاپ تأثیر بگذارد و سرآشپزها، محققان، شرکت ها و کاربران خصوصی نمی توانند از آنها غافل شوند.

بر این اساس، با هدف توضیح بهتر برخی از تنظیمات، به سیستم عامل Marlin اشاره شده است. این برنامه شامل اطلاعات سخت افزاری، اطلاعات اکسترودر (تعداد اکسترودرها، تک نازل، منبع تغذیه و غیره)، تنظیمات حرارتی (حسگرهای دما برای پیشران چاپ و بستر چاپ، محدوده دما و غیره) و تنظیم حرکت سینماتیکی است. به عنوان مهم ترین سیستم عامل، Marlin از تمام سیستم های حرکتی پرکاربرد مانند تنظیمات دکارتی، دلتا، اسکارا و ... پشتیبانی می کند. البته، کامپایل کردن صحیح سخت افزار و پیکربندی سینماتیکی از اهمیت بالایی برخوردار است، به خصوص زمانی که با یک چاپگر نمونه اولیه سه بعدی کار می کنیم یا زمانی که بخشی را برای برآوردن نیازهای خاص خود تغییر می دهیم. در زیر مهمترین تنظیمات سیستم عامل با توجه به سینماتیک چاپگر تعریف می شود:

گام پیش فرض هر واحد به ازای هر واحد: این مشخصه تعداد گام هایی را که هر موتور پله ای برای تولید حرکتی به اندازه ۱ میلی متر انجام می دهد را تعریف می کند. مقادیر پیش فرض ۸۰، ۸۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ گام برای محوره های X، Y، Z و E در نرم افزار Marlin 1.1 تعریف شده اند. این پارامترها دقت حرکت چاپگر را کنترل می کنند. گام های هر واحد تحت تأثیر چندین ویژگی مکانیکی موتورهای پله ای قرار دارند، از جمله گام، تعداد دندان های پولی، گام رشته و نوع اکستروژن. یک محاسبه گر بسیار مفید آنالین

⁷ Slic3R

⁸ Repetier

⁹ RepRap

¹ Marlin

¹ Default axis step per unit

¹ CraftWare

² Cura

³ IceSL

⁴ KISSlicer

⁵ OctoPrint

⁶ MakerBot Print

برای گام‌های هر واحد به عنوان تابعی از ویژگی‌های موتور پله‌ای در وبسایت www.prusaprint-er.org ارائه شده است.

حداکثر سرعت پیش فرض^۱ (mm/s): این مشخصه حداکثر نرخ سرعت برای حرکات در تمام چهار محور، X-Y-Z و E را تعیین می‌کند. مقادیر ۵۰۰، ۲۰۰، ۴۵ و ۵۰۰ به ترتیب برای محوره‌های X، Y، Z و E در راهنمای پیکربندی Marlin 1.1 گزارش شده است. این پارامترها از اهمیت زیادی برخوردارند، زیرا به این معنی است که حداکثر سرعت چاپگر محدود است که قابل عبور نیست.

مقدار پیش فرض حداکثر شتاب^۲ (mm/s²): این مشخصه حداکثر شتاب (یا کاهش شتاب) در حین چاپ را مشخص می‌کند. مقادیر پیش فرض ۳۰۰۰، ۳۰۰۰، ۱۰۰ و ۱۰۰،۰۰۰ به ترتیب برای محوره‌های X، Y، Z و E گزارش شده‌اند. مهم‌ترین نکته در این تنظیم این است که هنگام چاپ با سرعت چاپ ۵۰ mm/s، مدت زمانی لازم است تا سرعت از ۰ به ۵۰ mm/s افزایش یابد. این زمان به حداکثر شتاب پیش فرض مربوط می‌شود. همچنین دلیلی است که باعث می‌شود زمان تخمینی چاپ، توسط نرم‌افزارهای برش معمول، کمتر از مقادیر تجربی باشد. به عنوان مثال، در نظر گرفتن شتاب ۳۰۰۰ mm/s²، سرعت چاپ ۱۵۰ mm/s و طول چاپ ۵۰ mm، این اتفاق می‌افتد که به دلیل شتاب، سرعت مطلوب بعد از ۴ میلی‌متر به دست می‌آید. همین موضوع در هنگام کاهش سرعت نیز صدق می‌کند که برای متوقف کردن چاپگر به ۴ میلی‌متر فاصله نیاز خواهد بود. از آنجایی که نرم‌افزارهای برش (سایزینگ) تنظیمات شتاب/کاهش شتاب را در نظر نمی‌گیرند، این باعث ایجاد تفاوت‌های قابل توجهی بین زمان تخمینی چاپ و زمان واقعی چاپ می‌شود [۴ و ۳۵]. سوپرینی و همکاران تفاوت بین زمان تخمینی و زمان تجربی چاپ را هنگام چاپ یک شکل هرمی از ترکیب میوه و سبزیجات تحلیل کردند. وقتی از سرعت چاپ بالای ۲۱ میلی‌متر بر ثانیه استفاده شد، زمان چاپ به طور قابل توجهی بیشتر از مقدار تخمینی بود. به طور منطقی، این به تأثیر شتاب و کاهش شتاب گزارش شده در بالا مربوط بود [۳۶].

جرک^۳ (میلی‌متر بر ثانیه): تنظیمی است که با شتاب کار می‌کند و مقدار حداکثر تغییر سرعت را که به‌طور آنی مجاز است،

نشان می‌دهد. به‌خصوص هنگام چاپ مقاطع کوچک، اگر جرک خیلی کم باشد، چاپگر مدت زیادی معطل خواهد شد که ممکن است باعث ایجاد نقض شود. مقادیر پیش فرض ۲۰، ۲۰، ۴۰ و ۵ میلی‌متر بر ثانیه به ترتیب برای محوره‌های X، Y، Z و E گزارش شده است [۴].

۷- G-CODE: زبانی برای هدایت چاپگرها و بهینه سازی کیفیت چاپ

G-code پلی بین مدل مجازی سه بعدی طراحی شده توسط نرم افزار CAD و حرکت واقعی چاپگر است که امکان تولید محصول غذایی چاپ سه بعدی را فراهم می‌کند. کد G مخفف کد هندسی است و به چاپگر می‌گوید که کجا حرکت کند، از چه سرعتی استفاده کند، چه دمایی را اعمال کند (در صورت وجود)، چه جمع شدن را در هر توقف چاپ تنظیم کند و غیره. G-code توسط نرم افزار برش تولید می‌شود و انتخاب آن بر کیفیت محصولات نهایی تأثیر می‌گذارد. البته دانش اطلاعات اولیه G-code باید اولین قدم برای درک نحوه عملکرد چاپگر سه بعدی و بهینه‌سازی فرآیند چاپ باشد. علاوه بر این، به خاطر داشته باشید که هر حرکت چاپگرهای سه بعدی برای ساخت مواد پلاستیکی بهینه شده است. به این ترتیب، دانش G-code برای چاپ مواد غذایی امروزه یک نیاز اساسی است. دستورات اولیه کد G به عنوان اولین قدم برای بهینه سازی دقیق رفتار چاپگر در حین چاپ مواد غذایی است. درک عمیقی از کدهای G کامل را می‌توان در کتابچه راهنمای کد G را از آدرس (<http://reprap.org/wiki/G-code>) دریافت کرد [۴].

۸- نتیجه گیری

مطالعات علمی و فعالیت صنایع در مورد چاپگر سه بعدی غذا و در پی آن محصولات نوآورانه در بازار مواد غذایی به طور مداوم در حال افزایش است. در طول ۵ سال گذشته، آزمایش‌هایی با هدف چاپ مواد غذایی با اشکال و ساختارهای نوآورانه با استفاده از انواع مختلفی از مواد غذایی مانند شکلات، خمیر برای تولید کلوچه و تنقلات، پنیر، ژل آب میوه، خمیر میوه و سبزیجات و غیره به صورت

³ Jerk

¹ Default_max_feedrate

² Default_max_acceleration

است. فناوری چاپ سه بعدی وعده داده است که ابزاری برای تولید محصولات غذایی جدید از طیف وسیعی از مواد غذایی رایج و محصولاتی با ارزش افزوده باشد که این امر علاوه بر فرایند جایگزینی مواد غذایی امروزی، به شیوه های زیست محیطی پایدار نیز کمک خواهد کرد. این فناوری علاوه بر فقدان محدودیت برای طراحی ظاهری، امکان اصلاح کیفیت بافتی، مکانیکی و تغذیه ای محصولات چاپ سه بعدی را به گونه ای می دهد که از طریق تولید مرسوم غیر عملی بوده است. با این حال، پیشرفت های بیشتری در این فناوری مورد نیاز است تا امکان استفاده از آن برای تولید طیف وسیع تری از مواد غذایی و با کیفیت بهتر فراهم شود.

مراجع

1. P. Chow, T. Kubota, S. Georgescu, Computer Aided Design and Appl., 12 (6), 784 (2015).
2. Sh. Esmailzadeh, Che. Res. Nanomater., 2(3), 25 (2023).
3. M. Asharaf, M.G. Rashed, I. Gibson, Space and Comp. Struct., Perth, Australia, (2018).
4. A. Dick, S. Prakash, B. Bhandari, 3D Printing, Food Formulation Novel Ingredients and Processing Techniques, first edition (Wiley & Blackwell, 2021) pp.101- 116.
5. F.C. Godoi, S. Prakash, B.R. Bhandari, J. Food Eng., 179, 44 (2016).
6. N. Jonkers, J. van Dommelen, M. Geers, J. Food Eng., 335, 111183 (2022).
7. A.O. Agunbiade, L. Song, O.J. Agunbiade, C.E. Ofoedu, J.S. Chacha, H.T. Duguma, S.M. Hossaini, W.A. Rasaq, I. Shorstkii, C.M. Osuji, J. Food Process Eng., 45(4), 13996 (2022).
8. A. Le-Bail, B.C. Maniglia, P. Le-Bail, Curr. Opin. Food Sci., 35, 54 (2020).

جوهر خوراکی انجام شده است و نتایج اصلی در مهم ترین مجلات بین المللی منتشر شده یا به کنگره های علمی ارائه گردیده است. بیشتر موارد، اگرچه کاربرد بالقوه چاپگر سه بعدی را در بخش مواد غذایی ثابت کردند، اما نشان دادند که محصولات به دست آمده در مقایسه با مدل مجازی سه بعدی دارای مغایرت های متعددی هستند. این بدان معناست که آنچه طراحی می شود قابل ساخت نیست. این امر باعث کاهش بازارپسندی مواد غذایی چاپ سه بعدی می شود زیرا یکی از مهم ترین عوامل این فناوری، توانایی چاپ هر نوع شکل و ساختاری است که مصرف کنندگان در ذهن دارند. بین آنچه چشم در تصویر می بیند و آنچه پس از چاپ عکس ها بدست می آید، شکافی وجود دارد که تحت تاثیر متغیرهای زیادی است که بهینه سازی آنها برای خواص غذایی، کار دشواری است، زیرا خواص مهم غذایی مانند ترشوندگی، گرانروی، چگالی و همچنین توانایی حفظ وزن آن ممکن است تحت تاثیر متغیرهای زیستی به طور قابل توجهی تغییر کند. اگرچه متغیرهای اساسی چاپ مانند سرعت چاپ، جریان، ارتفاع لایه، قطر نازل و... توسط برخی از محققان مورد مطالعه قرار گرفته است، اما درک کاملی از تاثیر و بهینه سازی آنها هنوز به دست نیامده است. نرم افزارها و کدهای تولید شده توسط نرم افزار برش نیز دارای اهمیت هستند. آنها قطعاً حرکات چاپگر را در هر چهار محور X, Y, Z و E کنترل می کنند، اما همیشه بر اساس خواص مواد ترموپلاستیک مانند PLA و BSA کار می کنند. اما در هنگام چاپ مواد غذایی ممکن است اتفاق های غیر منتظره رخ دهد و خواص مواد غذایی در حین انجام کار تغییر کند. به طور کلی، چاپگر سه بعدی غذا در مراحل اولیه توسعه فناوری است و زمانی که تمام متغیرهای چاپ با دقت بالا تنظیم و کنترل شوند، مزایای زیادی به دست خواهد آمد. نیاز است که دو شاخه اصلی تحقیق، تشویق شوند: (۱) بهبود رفتار چاپ برای مواد غیر پلاستیکی و (۲) درک دقیق اثر متغیرهای فرآیند و بهینه سازی آنها. حوزه اول شامل جنبه های زیادی است که عملکرد چاپگر، نرم افزار برش و تولید کد G باعث می شود رفتار چاپگر با ویژگی های خاص غذا سازگارتر شود، در حالی که بخش دوم به هر جنبه ای که مربوط به تاثیر متغیرهای فرآوری بر کیفیت محصولات غذایی چاپ سه بعدی است، ارتباط دارد. به علاوه جنبه بصری و ثبات کیفیت در طول زمان یا فرایند بعد از تولید، مانند پخت و پز، سرخ کردن عمیق و نگهداری در یخچال و غیره از اهمیت ویژه ای برخوردار

- 23 C.A. Hamilton, G. Alici, M. in het Panhuis, J. Food Eng., 220, 83 (2018).
24. M. Lille, A. Nurmela, E. Nordlund, S. Metsä-Kortelainen, N. Sozer, J. Food Eng., 220, 20(2018).
25. V. Vancauwenberghe, V.B.M. Mbong, E. Vans-treels, P. Verboven, J. Lammertyn, B. Nicolai, J. Food Eng., 1 (2017).
26. RepRap, 2017. Stepper Motor. http://reprap.org/wiki/Stepper_motor.
27. J. Sun, W. Zhou, L. Yan, D. Huang, L.-y. Lin, J. Food Eng., 220, 1 (2018).
28. S. Junk, C. Kuen, In: Procedia 26th CIRP Design and Conference, 430 (2016).
29. V. Vancauwenberghe, L. Katalagarianakis, Z. Wang, M. Meerts, M. Hertog, P. Verboven, P. Moldenaers, M.E. Hendrickx, J. Lammertyn, B. Nicolai, Innov. Food Sci. Emerg. Tech. 42, 138 (2017).
30. A. Derossi, R. Caporizzi, D. Azzollini, C. Severini, J. Food Eng. 220, 65 (2018).
31. S. Mantihal, S. Prakash, F. Condi Godoi, B. Bhandari, Innov. Food Sci. Emerg. Tech. 5, 123 (2018).
32. Y. Jin, Y. He, G. Fu, A. Zhang, J. Du, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 48, 132 (2017).
33. Ultimaker, (2018) <https://ultimaker.com/>
34. Slic3r, (2018) <https://slic3r.org>.
35. Marlin, (2018) <http://marlinfw.org/>.
36. C. Severini, A. Derossi, I. Ricci, R. Caporizzi, A. Fiore, J. Food Eng., 220, 89 (2018).
9. X. Wang, M. Zhang, L. Zhang, J. Xu, X. Xiao, X. Zhang, Mater. Today Commun., 31, 103263 (2018).
10. Z. Liu, M. Zhang, B. Bhandari, C. Yang, J. Food Eng., 220, 76 (2018).
11. F. Yang, M. Zhang, B. Bhandari, Y. Liu, LWT-Food Sci. Tech., 87, 67 (2018).
12. C. Severini, A. Derossi, D. Azzollini, Innov. Food Sci. Emerg. Tech. 38, 281 (2016).
13. C. Le Tohic, J.J. O'Sullivan, K.P. Drapala, V. Chartrin, T. Chan, A.P. Morrison, J.P. Kerry, A.L. Kelly, J. Food Eng., 220, 56 (2018).
14. S. Holland, T. Foster, W. MacNaughtan, C. Tuck, J. Food Eng., 220, 12 (2018).
15. Ontwerp, C.M., (2018) http://www.michielcornelissen.com/portfolio_page/xoco-chocolate-printer/
16. B.S. Madeira, C.Z. Fraga, C. Bonin, D. Lohmann, D.C. Lencina, A. Da costa Sabino Netto, Mater. Res. 20, (2018).
17. N. T. Khiet, L. K. Lam, P. Q. Phong, Inter. Res. J. Eng. Tech., 10(10), 465 (2023).
18. A. Saygın Ogulmuş, A. Çakan, M. Tinkır, Inter. J. Sci. Tech. Res., 5(12), 140 (2016).
19. F. Pati, D.H. Ha, J. Jang, H.H. Han, J.W. Rhie, D.W. Cho, Biomaterials 62, 164 (2015).
20. M. Lanaro, D.P. Forrestal, S. Scheure, D.J. Slinger, S. Liao, S.K. Powell, M.A. Woodruff, J. Food Eng., 13 (2017).
21. M. Lanaro, D.P. Forrestal, S. Scheurer, D.J. Slinger, S. Liao, S.K. Powell, M.A. Woodruff, J. Food Eng., 215, 13 (2017).
22. H.W. Kim, H. Bae, H.J. Park, J. Food Eng., 215, 23 (2017).



Common 3D printer configurations in the food industry

Hannan Lashkari^{1*}, Sheida Esmaielzadeh^{2,3}

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

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.

Abstract: 3D printing is a new technology in the food industry that is categorized as an additive manufacturing method and is an innovative alternative to conventional technologies in food production. This technology offers freedom in customized production and greater interaction in product design based on customer demand. Given the advantages provided over traditional methods, 3D printing production is increasingly attracting the attention of academia, business, and industry, and it is not surprising that it may replace today's methods for food production in the near future. This technology offers the possibility of manufacturing objects with complex geometries in a single production phase through creativity-based innovation. These study discuss the main hardware and software components of 3D printers. Initially, it introduces various configurations of 3D printers, including cartesian, delta, polar, and scara, and then refers to the most common ones in the food industry. In the following, the stepper motor, computer-aided design systems, basic information about the operating system, and G codes, each of which is an essential part of the hardware and software of printers, will be discussed and examined.

Keywords: Structural configuration, Custom production, 3D printer, Additive manufacturing, Food industry.