



مقاله پژوهشی

بررسی متغیرهای فرآیندی در چاپ سه بعدی شکلات

مریم سعیدی^۱، امیر مسعود رضادوست^{۲*}، حسین بنی اسدی^۳، مرضیه لطفی^۴

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی شیمی، دانشکده نفت و مهندسی شیمی دانشگاه آزاد علوم و تحقیقات تهران
۲. دانشیار، گروه کامپوزیت، پژوهشکده فرآیند، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران
۳. استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده نفت و مهندسی شیمی دانشگاه آزاد علوم و تحقیقات تهران
۴. استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده نفت و مهندسی شیمی دانشگاه آزاد علوم و تحقیقات تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۰۵، تاریخ آخرین بازنگری: ۱۳۹۹/۱۰/۱۹، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۰۳)

چکیده:

فناوری چاپ سه بعدی به روش سرنگی یکی از روش‌های شکل‌دهی قطعات است که به دلیل طراحی و زمان کم نمونه سازی اولیه، توجه بسیاری از صنعتگران و محققان را جلب کرده است. در این روش مواد مختلف از قبیل پلیمری، غذایی و غیره توسط یک سرنگ که توسط مکانیزم سیان سی کنترل می‌شود، به صورت رشته‌هایی نازک در کنار هم قرار می‌گیرند تا مقطعی از قطعه ساخته شود. با تکرار این فرآیند برای لایه‌های بعدی، قطعه نهایی ساخته می‌شود. در این پروژه سعی بر این بوده تا قطعات شکلات به شکل‌های دلخواه با این فناوری ساخته شود. برای این منظور از زیرساخت یک چاپگر سه بعدی تجاری که به یک کلگی سرنگی طراحی شده‌ی خاص با دمای قابل تنظیم مجهز شده بود، استفاده شد. آزمون ریولوژی نشان داد که با افزایش دما، گرانیوی شکلات کاهش می‌یابد و افزایش گرانیوی منجر به بیشتر اکستروژن شدن شکلات شده، وضوح شکل چاپ شده را کم می‌کند. از طرف دیگر پارامترهای فرآیندی نظیر ارتفاع نازل از صفحه چاپ، قطر نازل، قطر فیلامنت و دمای صفحه ساخت نیز بر وضوح چاپ مؤثر است. در این تحقیق قطرهای مختلف تنظیمی نازل در نرم‌افزار چاپ ۱/۹۸ mm، ۲ و ۳ در دماهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت شرایطی که در آن دقت چاپ مطلوب است تعیین شد که عبارت‌اند از دمای ۳۲ °C، ارتفاع برابر با قطر، قطر نازل تنظیمی ۱/۹۸ mm و دمای صفحه ساخت کمتر از ۱۰۰ °C.

کلید واژه‌ها: چاپ سه بعدی، ساخت لایه به لایه، شکلات، ساخت برهم افزا، تولید اختصاصی

۱. مقدمه

چاپگرهای مواد غذایی سه بعدی، به شیوه‌ای مبتکرانه، ساختارهای خوراکی را با طرح‌هایی منحصر به فرد ایجاد می‌کنند. ضمن آن‌که می‌توانند برای بیماران یا افراد با نیازهای خاص، غذاهای با فرمول توصیه شده از طرف پزشک فراهم کنند. ارتباط این فناوری دانشگاهی با صنعت، از زمان آغاز به کار نخستین نمونه اولیه چاپگر مواد غذایی در دانشگاه کورنل در سال ۲۰۰۷ به طور قابل توجهی افزایش یافته است. به همین جهت از سال ۲۰۱۳ افزایش قابل توجهی در ثبت اختراعات مربوط به چاپ مواد غذایی سه بعدی مشاهده شده است [۶]. بیشتر مقالات پژوهشی و مرورهای انجام شده، بر اصلاح فرمولاسیون غذا، تولید مواد غذایی سفارشی، کنترل فرآیند چاپ غذا و اصلاح تجهیزات، متمرکز شده‌اند. در کنار پارامترهای چاپ، انتخاب ماده خوراکی و تنظیم و اصلاح فرمولاسیون آن، از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر دقت چاپ سه بعدی مواد غذایی است. رایج‌ترین مواد خوراکی قابل چاپ تاکنون، شکلات، چربی، ژلاتین، خمیر، پوره سیب‌زمینی، خامه، پنیر و شکر بوده است [۱]. لازم به ذکر است که برخی مواد خوراکی مانند سبزی‌ها و گوشت به تنهایی امکان چاپ سه بعدی ندارند و به این منظور از مواد افزودنی مانند گروه هیدروکلوئیدها که شامل ژلاتین و صمغ زانتان است استفاده می‌شود. به طور کلی در این موارد می‌توان از افزودن مواد غلیظ کننده و ژل کننده برای سیستم غذایی استفاده کرد تا ساختار مناسبی برای چاپ به دست آید [۷]. لیپتون و همکاران [۸، ۱] چاپ انواع مواد غذایی، بوقلمون اصلاح شده و حلزون را با استفاده از ترگلوتامیناز و کرفس را با استفاده از آگار به عنوان افزودنی‌های غذایی و ایجاد امکان پخت بعد از چاپ سه بعدی مورد بررسی قرار دادند. کیم و همکاران [۹] تأثیر اندازه ذرات ($307, 259, 172$ و 50 μm) بر خصوصیات ریولوژیکی و عملکرد چاپ نوعی جوهر مواد غذایی مورد بررسی قرار دادند که شامل ۲۰٪ وزنی پودر اسفناج در ۱۰٪ وزنی مخلوط صمغ زانتان بود. این محققان با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مشاهده کردند ذراتی با اندازه بزرگ‌تر (307 و 259 μm)، ساختار اسکلت مانند و سلولی و ذراتی با اندازه کوچک‌تر (تا 172 μm) ساختاری متخلخل ایجاد می‌کنند. نتایج نشان داد که با افزایش اندازه ذرات پودر

فناوری چاپ سه بعدی اولین بار توسط هال در سال ۱۹۸۶ توسعه یافت. این فناوری به عنوان یک فرآیند ساخت افزایشی^۱ و برای ساخت قطعه از یک مدل سه بعدی کامپیوتری مطرح شده است [۱]. نسبت به روش‌های سنتی تولید، فرآیند ساخت افزایشی برای ساخت قطعات پیچیده، به دلیل کوتاه کردن زمان طراحی و چرخه تولید با کم‌ترین هزینه، روش کارآمدتری محسوب می‌شود [۲]. مراحل کار این نوع فرآیندها، از ایجاد مدل CAD تا کاربرد، به چهار مرحله تقسیم می‌شود. به این صورت که طرح مورد نظر در نرم‌افزارهای چاپ سه بعدی مانند سالیدورک طراحی شده و این طرح به صورت لایه‌های دوبعدی برش خورده و بعد به صورت لایه به لایه روی هم قرار می‌گیرند و در پایان طرح مورد نظر، به صورت سه بعدی ایجاد می‌شود [۳]. این فناوری در بسیاری از زمینه‌های مهندسی و صنعتی مانند صنایع هوایی، دندان پزشکی، ایمپلنت‌های پزشکی، خودرو و در سال‌های اخیر در صنایع غذایی نیز کاربرد پیدا کرده است [۴]. تاکنون فناوری‌های مختلفی از چاپ سه بعدی توسعه پیدا کرده‌اند که عبارت‌اند از مدل‌سازی به روش لایه گذاری هم جوش (FDM)^۲، مدل‌سازی چند افشانه^۳، نمونه‌سازی با رزین‌های حساس به نور (SLA)^۴، ساخت اشیا چند لایه^۵، نمونه‌سازی انجماد سریع^۶، پخت زمینه جامد، نمونه‌سازی شبکه لیزری^۷ و نمونه‌سازی افشانه گرمایی^۸. تفاوت این روش‌ها در نحوه لایه نشانی و نوع ماده مصرفی در آن‌ها است [۵]. ساخت افزایشی محبوب‌ترین فناوری ساخت است که توسط یک برنامه کامپیوتری کنترل می‌شود و نیاز به حداقل تعامل انسانی را دارد. یکی از رایج‌ترین فرآیندهای ساخت افزایشی، مدل‌سازی به روش لایه نشانی هم‌جوش یا FDM است که می‌تواند به عنوان فرآیند پایه برای چاپ سه بعدی مواد غذایی از جمله شکلات نیز مورد استفاده قرار گیرد.

1. Additive manufacturing
2. Fused deposition modeling
3. PolyJet modeling
4. Stereo lithography
5. Laminated object manufacturing
6. Solid ground curing
7. Laser engineered net shaping
8. Thermojet

برش در لوله نازل، همگن است و گرانروی ماده غذایی تأثیر مستقیمی بر چاپ دارد. هائو و همکاران [۱۳] به منظور بررسی اثر سرعت نازل و حرکت اکستروژن بر هندسه شی چاپ شده، آزمون چاپ یک خط در جهت محور Y را انجام دادند. اندازه‌گیری وزن و ابعاد خطوط چاپ شده نشان داد که میانگین مقدار (وزن/حجم) شکلات خارج شده با سرعت خروج از نازل، افزایش پیدا می‌کند. آن‌ها در سرعت ثابت، تغییراتی بین وزن شکلات‌های چاپ شده مشاهده کردند که دامنه این تغییرات با افزایش سرعت خروج مواد کاهش می‌یافت و با افزایش سرعت حرکت، عرض خط‌های چاپ شده کاهش پیدا می‌کرد. دروسی و همکاران [۱۴] بررسی اثر سرعت چاپ و میزان جریان‌یابی را بر قابلیت چاپ فرمولاسیون مبتنی بر میوه را بررسی کردند. این محققان دریافتند جریان‌یابی بالاتر، مقدار مواد خروجی از نازل را افزایش می‌دهد که آن هم به نوبه خود حجم کل، وزن و طول جانبی نمونه را افزایش و تخلخل را کاهش می‌دهد. بنابراین خواص مواد، قابل چاپ بودن مواد و پارامترهای چاپ از عوامل مهم برای رسیدن به چاپ مواد غذایی با دقت بالا تشخیص داده شدند. پارامترهایی نظیر سرعت حرکت نازل و ارتفاع لایه و همچنین خصوصیات رئولوژیکی مانند مدول ذخیره سازی، تنش عملکرد، شاخص سازگاری و شاخص رفتار جریان نیز بر کیفیت نهایی تأثیر داشتند [۱۷].

در تحقیقات انجام شده، چاپگرهای گران قیمتی به کار گرفته شده‌اند که مخصوص چاپ مواد غذایی ساخته شده‌اند. از آنجایی که این چاپگرها در اختیار همه نیست، هدف از این تحقیق، اصلاح یک سیستم چاپ سه بعدی مرسوم و به‌کارگیری آن برای چاپ سه بعدی شکلات به عنوان نمونه مواد غذایی و بررسی پارامترهای مؤثر در کیفیت چاپ بوده است. بدیهی است روش بکار گرفته شده، با تغییرات مختصری برای سایر مواد غذایی نیز قابل استفاده بوده، می‌تواند جریان جدیدی در تحقیقات فناوری شکل‌دهی مواد غذایی ایجاد نماید.

۲. مواد و روش‌ها

در این پژوهش، شکلات مورد استفاده تهیه شده از شرکت پارمیدا دارای ساکاروز، کاکائو، کره کاکائو، لسیتین سویا و

مواد غذایی موجود، می‌توان مقاومت مکانیکی را افزایش داد و به طور هم‌زمان در مقدار پودر ترکیب شده، محدودیت ایجاد کرد. این یافته می‌تواند در تعیین پارامترهای مورد نیاز برای تهیه سیستم جوهر مواد غذایی مانند زمان جامد شدن و حداکثر محتوای ترکیب پودر مواد غذایی مفید باشد. لیانگ و همکاران [۱۰] ویژگی‌های شکل‌گیری و خواص فیزیکی خمیر پخت را با ترکیبات مختلف مانند آب، ساکارز، کره، آرد و محتوای تخم مرغ تجزیه و تحلیل کردند. آن‌ها دریافتند که می‌توان با برقراری نسبت بالاتری از مواد ژل در خروجی از نازل شکل بهتری از نمونه‌ها ایجاد کرد و کشش و انعطاف‌پذیری پایین‌تری به دست آورد. شرایط چاپ به عوامل دیگر نظیر دما، محتوای مواد و استفاده از مواد افزودنی نیز بستگی داشت که تأثیر قابل توجهی بر فرآیند چاپ و کیفیت سه بعدی داشتند. یانگ و همکاران [۱۱] ترکیب درصد‌های مختلفی از نشاسته (۱۰، ۱۲/۵، ۱۵، ۱۷/۵ و ۲۰) و آب لیمو را مخلوط کردند و چاپ این ترکیبات را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند با افزایش سرعت برشی، گرانروی کاهش می‌یابد که به معنای آن است که آب لیمو رفتار سود و پلاستیک و رقیق شونده‌گی نشان می‌دهد که برای فرآیند مفید است. افزایش مقدار نشاسته نیز به طور کلی گرانروی را افزایش می‌داد که برای حفظ شکل مواد خارج شده از نازل سودمند بود. آن‌ها همچنین مشاهده کردند سرعت خروج از نازل بالا منجر به ایجاد خط‌های موج‌دار با قطرهای بزرگ‌تر و سرعت پایین منجر به خطوط ناپیوسته می‌شود و قطر نازل مستقیماً وضوح و سطح صاف اشیا چاپ شده را تعیین می‌کند. گوا و همکاران [۱۲] دو چاپگر سه بعدی مواد غذایی بر پایه سرنگ و پیچ-اکسترودر را بررسی کرده، پروفایل سرعت در هر دو دستگاه را به دست آوردند. پروفایل سرعت چاپگر سه بعدی بر پایه سرنگ جریان آرام و یکنواختی از بالا به پایین را نشان داد در حالی که پروفایل سرعت بر پایه پیچ-اکسترودر پیچیده بوده و سرعت‌های بالا را در اطراف پیچ نشان می‌داد. نتایج مشاهده شده از این مطالعه نشان داد که روش چاپ سه بعدی بر پایه پیچ برای جوهرهایی با گرانروی و استحکام مکانیکی بالا مناسب نیست. همچنین مشاهده شد که در چاپگرهای سه بعدی غذا که بر پایه خروج مواد از نازل کار می‌کنند، نرخ

بررسی قرار گرفت. تطابق ضخامت خط شکلات چاپ شده با قطر نازل، به عنوان معیار سنجش ارتفاع بهینه استفاده شد. از نرم افزار Digimizer برای اندازه‌گیری ضخامت و عرض خط‌های چاپ شده شکلات استفاده شد. در بیش از ۱۰ نقطه ضخامت و عرض خط‌های چاپ شده اندازه‌گیری و میانگینی از درصد خطا برای هر سه نازل در سه ارتفاع چاپ، گزارش شد. به منظور بررسی شرایط چاپ شکل‌های حجمی از شکلات، آزمون پل‌زنی شکلات انجام شد. این آزمون نشان‌دهنده‌ی حداکثر فاصله‌ای است که یک رشته از فیلامنت بدون پشتیبانی می‌تواند بدون جدا شدن، بین دو پایه چاپ شود [۱۶]. آزمون‌های چاپ در ارتفاع در سرعت‌های کمتر (۶۰۰ و ۲۰۰ mm/min) نیز انجام شد تا فرصت کافی برای خنک شدن شکلات و قرارگیری روی هم لایه‌ها فراهم شود. همچنین برای حفظ ساختار شکلات چاپ شده از المان سرد کننده TEC1-12706 ۱۲ ولت برای سرد کردن صفحه ساخت استفاده شد. این المان دارای سطحی سرامیکی است که سطح گرم آن به یک فن و سطح سرد آن به صفحه آلومینیوم چسبانده شد. به دلیل گرم بودن محیط و به منظور جلوگیری از گرم شدن بیش از حد سطح گرم المان باکس یخی برای انتقال و نگهداری بهتر سرما در زیر سینک حرارتی المان تعبیه شد. همچنین در این پژوهش از نرم‌افزارهای UP sketch، 3D simplify به ترتیب برای طراحی هندسه اولیه، تنظیمات نهایی و جی‌کد کردن طرح برای چاپ استفاده شد.

جدول (۱) ترکیب شکلات تلخ مورد استفاده

Table 1. Composition of Dark Chocolate Samples

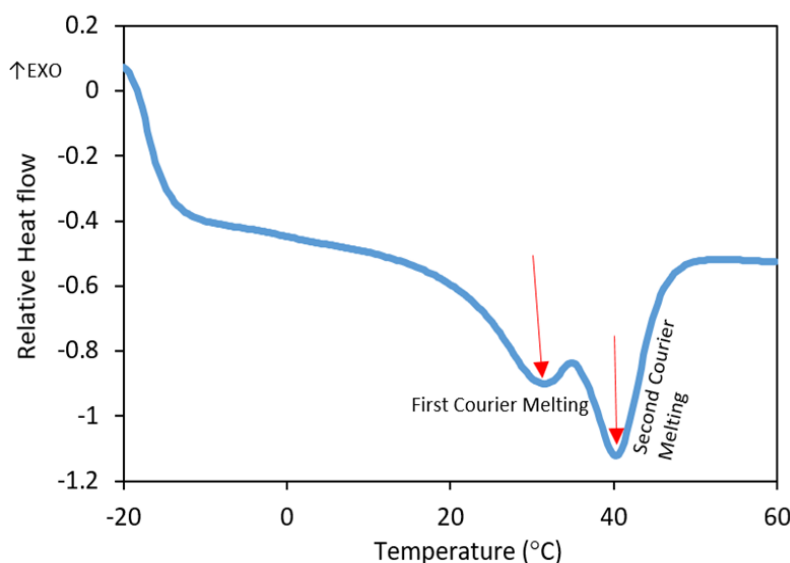
Ingredients اجزاء	
Crystalline sucrose ساکارز کریستالی	24.69
Amorphous sucrose ساکارز بی شکل	24.69
Cocoa کاکائو	45.09
Cocoa butter کره کاکائو	5.3
vanillin وانیل	0.03
Soya lecithin لسیتین سویا	0.2

وانیل (جدول ۱) بود [۱۵]. برای چاپ قطعات شکلات، دستگاه چاپگر سه بعدی FDM مورد استفاده قرار گرفت و برای چاپ شکلات یک کلگی سرنگی روی آن نصب شد. طول و عرض و ارتفاع این چاپگر دارای ابعاد یکسان به مقدار ۲۰ cm بود. سرنگ ۶۰ ml به وسیله‌ی صفحه آلومینیومی پوشیده شد که این صفحه نیز با نوار چسب حرارتی پوشش داده شد تا با قرار دادن المنت حرارتی متصل به یک منبع تغذیه، سرنگ گرم شود. منبع تغذیه PS-405 ساخت شرکت آداک ایران و با ولتاژ و آمپر به ترتیب ۴۰ ولت و ۵ آمپر مورد استفاده قرار گرفت و با تنظیم ولتاژ منبع تغذیه گرمای لازم تأمین می‌شد. به منظور تعیین شرایط چاپ بایستی ابتدا محدوده ذوب آن توسط آزمون گرماسنجی تفاضلی (DSC) تعیین می‌شد که این کار توسط یک دستگاه گرماسنج تفاضلی روبشی با نام تجاری DSC1 ساخت شرکت Mettler Toledo سوئیس تحت اتمسفر نیتروژن انجام شد. حدود ۱۳/۴۲ mg از نمونه با سرعت حرارت دهی ۱۰ °C/min از دمای ۲۰ °C- تا ۶۰ °C حرارت داده شد. همچنین آزمون ربولوژی جهت بررسی رفتار جریان پذیری و سیالیت نمونه با استفاده از دستگاه رئومتر RMS با نام تجاری MCR501 Paar Physica ساخت شرکت Anton-Paar اتریش انجام گرفت. این آزمون با سرعت‌های برشی (1/s) ۱۰ و ۳۰ تحت اتمسفر ازت انجام شد. از آنجایی که در این تحقیق از تجهیز و نرم افزار چاپگر FDM استفاده شده بود، لازم بود که در ابتدا قطر تنظیمی نرم‌افزار، مورد نظر برای چاپ دقیق شکلات به دست آید. لذا به منظور ارزیابی قابلیت دقت چاپ چاپگر سه بعدی، از روش هائو و همکاران [۱۳] در چاپ یک باریکه از مواد غذایی استفاده شد که از این به بعد چاپ خط نامیده می‌شود. آزمون چاپ خط، با چاپ شکلات در قطرهای ۱/۵، ۱ و ۰/۵ mm و با سرعت ۱۲۰۰ mm/min (حداقل سرعت متداول در چاپ سه بعدی) و دمای محیط (۲۳ °C) انجام شد. ابتدا با تغییر در مقادیر مختلفی از قطر تنظیمی فیلامنت، چاپ خط انجام و نهایتاً در این دما برای هر قطر نازل یک مقدار اولیه برای قطر تنظیمی تعیین شد. سپس بهینه کردن ارتفاع نازل از صفحه چاپ با نازل‌هایی با قطرهای مختلف در سرعت ثابت ۱۲۰۰ mm/min انجام شد. برای هر نازل با قطر ϕ ارتفاع‌های ۰/۵ ϕ ، ۱ ϕ و ۱/۵ ϕ مورد

۳. نتایج و بحث

شکلات در شکل (۱) آورده شده است.

نتایج آزمون گرماسنجی تفاضلی روبشی (DSC) برای



شکل (۱). گرمانگاشت حرارتی DSC برای شکلات.

Fig 1. Differential scanning calorimetry for Chocolate.

دلیل مطالعه رفتار جریان شکلات باید توسط ویسکومترهای چرخشی اندازه‌گیری می‌شد [۱۸] تا بتوان فرآیند را در شرایط آزمایشگاهی تحلیل کرد. داده‌های ریولوژی برای بهینه‌سازی پارامترهای مهم چاپ سه بعدی مانند سرعت نفوذ و دمای ماده در طی خروج از نازل استفاده می‌شود.

بنابراین اولین گام، بررسی جریان‌یابی شکلات در دماهای مختلف بود ولی برای انجام آن بایستی تخمینی از نیروهای برشی اعمالی در نازل چاپ داشت. به این منظور قطرهای نازل ۰/۵، ۱ و ۱/۵ mm در دو دمای ۴۰°C و ۳۲°C برای محاسبه سرعت برشی مورد توجه قرار گرفت تا با استفاده از روابط ریولوژی، نیروی برشی تقریبی موجود در نازل‌ها محاسبه شود. به این منظور، چاپ خطی شکلات بر کاغذهای روغنی با قطر میانگین ۳۵ میکرون و وزنی حدوداً ۰/۶۱ تا ۰/۸۷ انجام شد. همچنین در طی هر آزمون، زمان چاپ شکلات محاسبه شد. سپس هریک از شکلات‌های چاپ شده وزن شدند و وزن شکلات چاپ شده محاسبه گردید. حال با وزن شکلات چاپ شده و مدت زمان چاپ دبی جرمی هر یک از آزمون‌ها به دست آمد. از طرفی، قطعه‌ای از شکلات به ابعاد $3/95 \times 3/45 \times 2/73$ cm³ وزنی معادل ۴۷/۰۴ g داشت

همان‌گونه که مشاهده می‌شود دو پیک ذوب در منحنی DSC وجود دارد که نشانه آن است که شکلات مورد استفاده از اجزایی با نقطه ذوب متفاوت تشکیل شده است. پیک اول از دمای ۱۸/۱۵°C آغاز شده و در دمای ۳۴/۷۱°C پایان یافته و پیک دوم از دمای ۳۴/۷۱°C تا دمای ۴۸/۴۶°C بوده است. پیک ذوب اول در دمای تقریبی ۳۱/۳۶°C و پیک دوم در دمای تقریبی ۴۰/۶۰°C رخ می‌دهد. بر این اساس می‌توان دماهای ذوب را در فرآیند چاپ بین ۳۲ تا ۴۰°C تنظیم نمود و با توجه به این که تنظیم شرایط دمایی بایستی به گونه‌ای باشد که حداقل دمای لازم برای جریان‌یابی شکلات استفاده شود تا جامد شدن آن پس از خروج از نازل در حداقل زمان انجام گیرد، دمای حدود ۳۲°C به عنوان دمای مطلوب برای تشکیل پایدارترین دمای ذوب شکلات انتخاب شد.

با توجه به نتایج این آزمون، بایستی میزان جریان‌یابی شکلات برحسب دما نیز با آزمون ریولوژی مورد بررسی قرار می‌گرفت [۱۷]. در فرآیند چاپ شکلات از داخل یک نازل با قطر کم عبور داده می‌شود و به دلیل ایستایی دیواره نازل، یک جریان برشی از مرکز تا دیواره شکل می‌گیرد. به همین

که در آن Q دبی حجمی هر یک از نمونه‌ها، R قطر نازل، π عدد ثابت و γ سرعت برشی است.

طبق معادله (۳) می‌توان گفت که در صورت داشتن رفتار رقیق شونده، نرخ برشی با قطر نازل رابطه عکس دارد، به این معنا که هرچه قطر نازل کم‌تر باشد، مقدار نرخ برشی آن بیشتر شده، ویسکوزیته کاهش می‌یابد و در نتیجه شکلات بیشتری نسبت به مقدار تنظیمی، از نازل خارج می‌شود [۱۹]. این موضوع با داده‌های به دست آمده (جدول ۲) هم‌خوانی داشت. این امر را می‌توان ناشی از آن دانست که ذرات جامد داخل فرمولاسیون هم‌زمان با عبور شکلات از نازل با قطر کوچک، جهت می‌گیرند و مقاومت آنها در برابر جریان کاهش می‌یابد، در نتیجه گرانیوی کاهش می‌یابد. کاهش گرانیوی به این معناست که جریان پذیری شکلات افزایش یافته و با کاهش قطر نازل مقدار شکلات اکستروژن شده افزایش می‌یابد.

که با استفاده از معادله (۱) چگالی آن $1/26 \text{ g/cm}^3$ به دست می‌آید. در ادامه با داشتن دبی جرمی هر یک از نمونه‌ها و دانسیته شکلات و با استفاده از معادله (۲) دبی حجمی هر نمونه محاسبه گردید و در نهایت طبق معادله (۳)؛ میزان سرعت برشی هر نمونه نیز برای انجام آزمون ریولوژی محاسبه شد. تمامی اطلاعات در جدول (۲) آورده شده است.

$$\rho = m/v \quad (1)$$

در این معادله ρ دانسیته، m وزن و v حجم است.

$$Q = m \times \rho^{-1} \quad (2)$$

در این معادله Q دبی حجمی هر یک از نمونه‌ها، m وزن شکلات هر نمونه و ρ دانسیته است.

$$\gamma = \frac{4 \times Q}{\pi \times R^3} \quad (3)$$

جدول (۲) اطلاعات محاسبه شده زمان چاپ، وزن شکلات، دبی جرمی، دبی حجمی و سرعت برشی شکلات در دو دمای ۴۰ و ۳۲ °C

Table 2. Calculated information of printing load, chocolate weight, mass flow rate, volume flow rate and shear rate at 40 and 32 °C

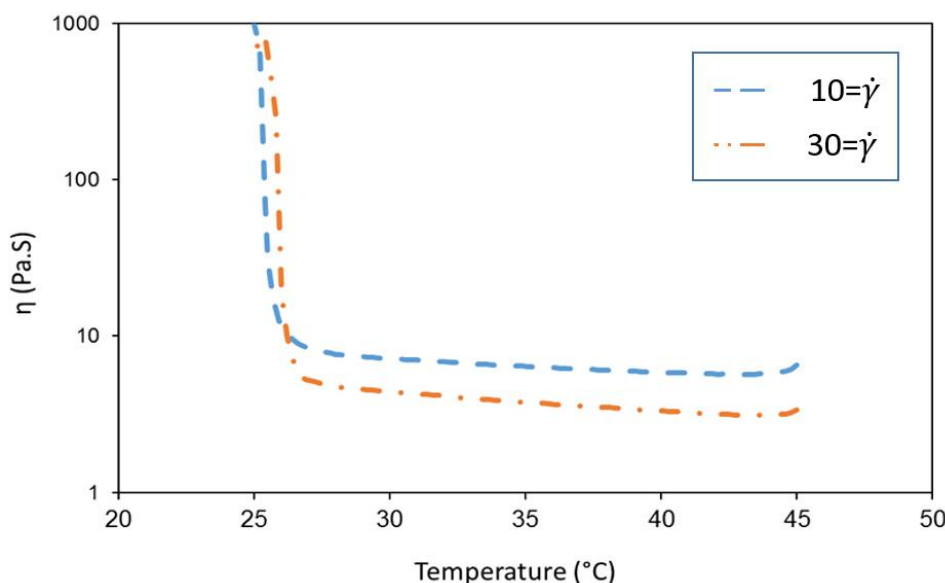
Nozzle diameter (mm) (قطر نازل) (mm)	0.5		1		1.5	
	32	40	32	40	32	40
Temperature (°C) (دما) (°C)						
Print time (s) (زمان چاپ) (s)	-	50	47.6	47.2	52.3	52.4
Chocolate Weight (g) (وزن شکلات) (g)	-	0.2	0.7	0.85	1.5	1.6
Mass flow rate (g / s) (دبی جرمی) (g / s)	-	0.004	0.014	0.018	0.029	0.031
Volumetric flow rate (mm ³ /s) (دبی حجمی) (mm ³ /s)	-	3.33	11.66	15	24.16	25.83
Shear rate (s ⁻¹) (نرخ برش) (s ⁻¹)	-	33.9	14.8	19.09	9.1	9.7

تقریباً مسطح خطی نشان می‌دهد. این رفتار مسطح خطی را می‌توان به این نسبت داد که پس از ذوب بخشی از کاکائو در دمای پایین‌تر (مطابق نتایج آزمون DSC)، رفتار ماده توسط این بخش کنترل می‌شود و با وجود آن‌که بخش‌هایی از آن هنوز ذوب نشده‌اند اما پس از ذوب این بخش از فرمولاسیون، افزایش دما تأثیر چشمگیری بر ویسکوزیته نخواهد داشت.

در ادامه، با توجه به اطلاعات به دست آمده در این بخش آزمون ریولوژی شکلات تحت سرعت‌های برشی ثابت (1/s) ۱۰ و ۳۰ و در محدوده دمایی ۲۰-۵۰ °C انجام شد که نتایج آن در شکل (۲) آورده شده است. با توجه به شکل مشاهده شد که در هر دو سرعت برشی، گرانیوی با افزایش دما تا دمای تقریبی ۲۶ °C کاهش می‌یابد و سپس یک رفتار

دست آمده از ریبولوژی را نیز می‌توان به این موضوع ربط داد که با ذوب بخشی از شکلات، در حالی که هنوز حاوی ذرات جامد است، جریان‌یابی مذاب آن ممکن شده است. همچنین از شکل (۲) مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت برشی، رفتار گرانیوی تغییر نمی‌کند و تنها کاهش بیشتری نشان می‌دهد.

کاهش گرانیوی با افزایش دما، فرآیند لایه نشانی را تسهیل می‌کند اما از آن طرف می‌تواند با ایجاد تأخیر در جامد شدن شکلات چاپ شده، تأثیر منفی بر کیفیت نهایی بگذارد [۲۰-۱۹]. با توجه به نمودار ریبولوژی، می‌توان گفت شکلات در دمای 32°C جریان مناسبی پیدا می‌کند. علت تفاوت دمای ذوب به دست آمده از آزمون DSC با دمای جریان‌یابی به



شکل (۲) تغییرات گرانیوی شکلات با دما

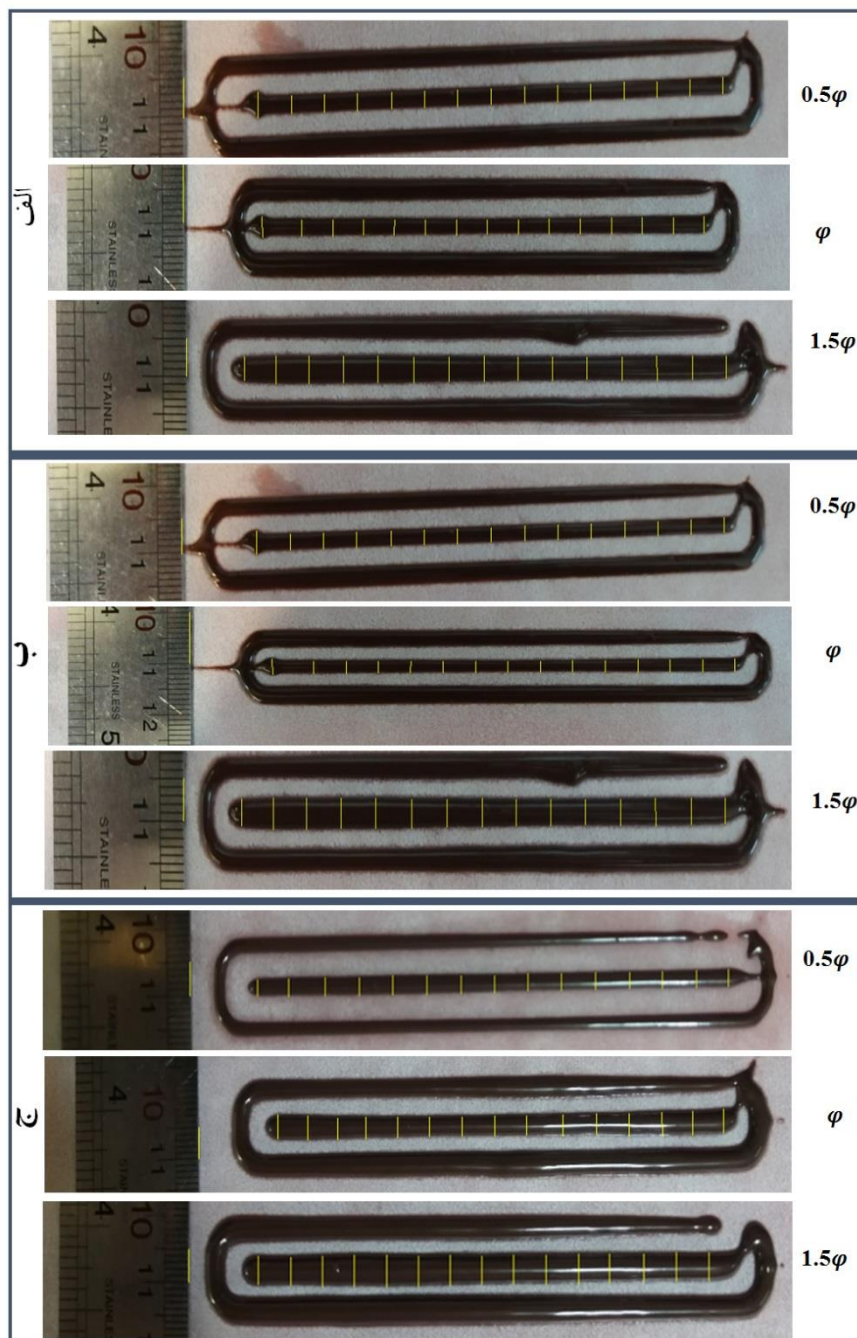
Fig 2. Chocolate viscosity changes with temperature

در چاپ سه بعدی شکلات، باید توجه داشت که افزایش دما منجر به کاهش گرانیوی [۲۱] و افزایش دبی همراه است که این موضوع باعث افزایش خروجی نازل و کاهش وضوح چاپ می‌شود [۱۹]. بنابراین برای چاپ شکلی مطلوب و دقیق از شکلات، بهینه‌سازی پارامترهایی نظیر ارتفاع، قطر نازل، ضخامت یا همان قطر شکلات خارج شده با دما بایستی مورد بررسی قرار گیرد [۲۲-۲۳].

در چاپ سه بعدی شکلات، باید توجه داشت که افزایش دما منجر به کاهش گرانیوی [۲۱] و افزایش دبی همراه است که این موضوع باعث افزایش خروجی نازل و کاهش وضوح چاپ می‌شود [۱۹]. بنابراین برای چاپ شکلی مطلوب و دقیق از شکلات، بهینه‌سازی پارامترهایی نظیر ارتفاع، قطر نازل، ضخامت یا همان قطر شکلات خارج شده با دما بایستی مورد بررسی قرار گیرد [۲۲-۲۳].

۱.۳. کالیبراسیون قطر و ارتفاع نازل از صفحه چاپ

همان‌طور که در بخش روش‌ها اشاره شد، ابتدا با تغییر در مقادیر مختلفی از قطر تنظیمی فیلامنت، برای هر قطر نازل یک مقدار اولیه برای قطر تنظیمی تعیین شد. سپس با تغییر ارتفاع در سه مقدار نصف قطر، برابر قطر و $1/5$ برابر قطر و



شکل (۳) نمودار چاپ خط در سه ارتفاع ۰/۵، ۱ و ۱/۵ برابر قطر نازل از صفحه چاپ با قطر نازل الف) ۰/۵ mm، ب) ۱ mm و ج) ۱/۵ سرعت ۱۲۰۰ mm/min

Fig 3. Diagram of the results of optimization of the nozzle height of the printing plate with the nozzle diameter a) 0.5 mm, b) 1 mm and c) 1.5 mm 1200 min / min

خط چاپ شده، به این علت بود که یکنواختی آن‌ها نیز مورد ارزیابی قرار گیرد که این یکنواختی با میله خطای هر داده قابل مشاهده است. نکته قابل ذکر این است که در هر سه

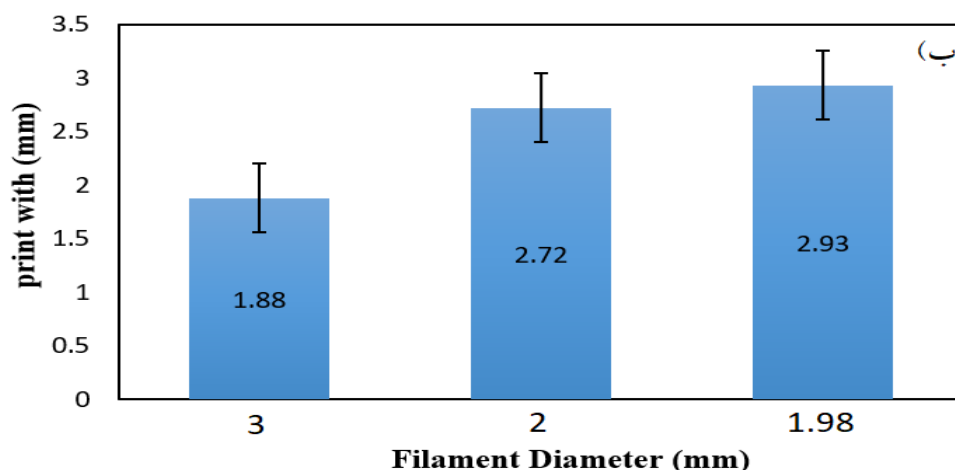
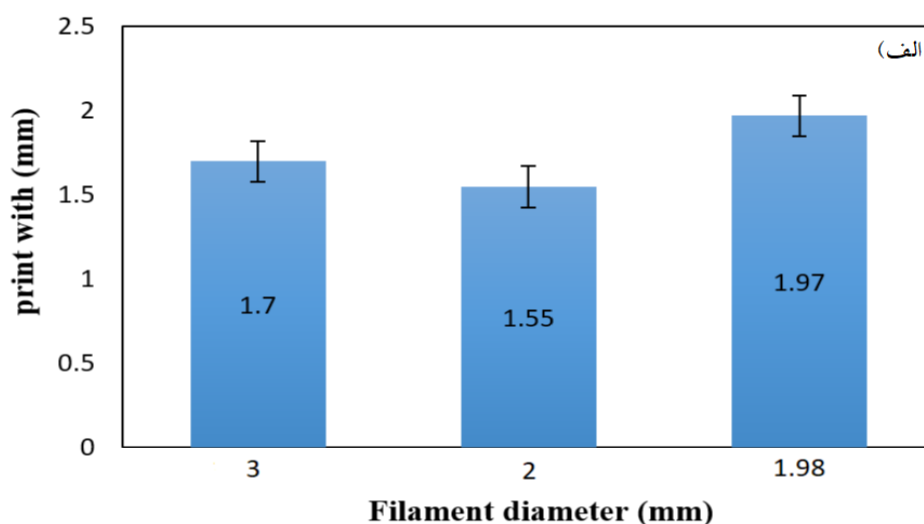
با توجه به شکل (۳) بیشترین دقت در چاپ شکلات با قطر نازل ۱/۵ mm و ضخامت φ همان ارتفاع نازل از صفحه چاپ برابر با قطر نازل مشاهده شد. تکرار اندازه‌گیری‌ها در طول

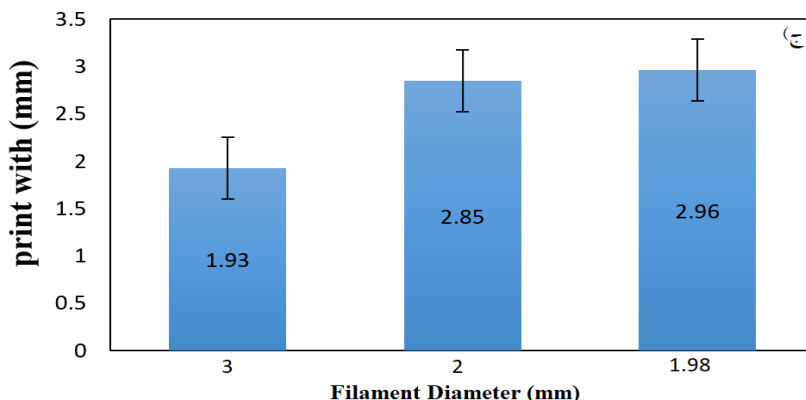
برای بهینه سازی قطر شکلات خارج شده مورد توجه قرار گیرد. به این منظور در سه دمای مختلف و با سه قطر فیلامنت، بهینه سازی قطر مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در شکل (۴) آورده شده است.

این آزمون در سه دمای ۳۲، ۳۶ و ۴۰°C با قطرهای فیلامنت به ترتیب ۲، ۳ و ۱/۹۸ mm و همچنین با قطر نازل ۱/۵mm انجام شد. چاپ خطی شکلات در هر سه دما و با هر یک از قطرهای فیلامنت گفته شده، انجام شد و میزان دقت هر یک از قطرهای بیان شده با نرم افزار مورد بررسی قرار گرفت.

قطر نازل با صرف نظر از ارتفاع تعریف شده مقدار قطر شکلات خارج شده از قطر نازل مورد استفاده بیشتر شد که این نشان دهنده آن است که مقدار فشار و دبی ورودی بیشتر است. پس باید قطر فیلامنت را کالیبره کرده تا به میزان مطلوبی که می خواهیم دست پیدا کنیم. تا این قسمت قطر نازل ۱/۵ mm و ارتفاع معادل با قطر نازل و یا مناسب تشخیص داده شد.

با توجه به نتایج به دست آمده از آزمون های انجام شده می توان دریافت که قطر تنظیمی فیلامنت باید از قطر نازل بیشتر باشد تا قطر شکلات چاپ شده با قطر نازل برابر شود؛ و همزمان بایستی تأثیر دما بر کالیبره کردن قطر فیلامنت





شکل (۴) نمودار نتایج بهینه سازی قطرهای مختلف فیلامنت با دماهای الف) ۳۲ °C ب) ۳۶ °C ج) ۴۰ °C
Fig 4. Graph of optimization results of different diameters of filaments with temperatures of: a) 32 °C b) 36 °C c) 40 °C

همچنین هرچه دما افزایش یابد قطر شکلات خارج شده بیشتر می‌شود.

۲.۳. تأیید عملی شرایط بهینه در چاپ سه بعدی شکلات

با توجه به نتیجه به دست آمده از بهینه کردن قطر نازل و ارتفاع نازل از صفحه چاپ، یک شکل نسبتاً پیچیده انتخاب شد تا نتیجه بهینه‌سازی‌ها در وضوح تصویر ارزیابی شود. نتیجه این ارزیابی در شکل ۵ آورده شده است. علت چاپ نشدن شکل فوق با نازل ۰/۵ mm این بود که به دلیل قطر کم نازل، شکلات به سرعت سرد شده و در مجرای نازل گرفتگی ایجاد می‌کرد، بنابراین فقط این چاپ در دو قطر بزرگتر انجام شد.

طبق اطلاعات به دست آمده در دمای ۳۲ °C، زمانی که قطر فیلامنت برابر با ۲ mm قرار داده می‌شود، قطر شکلات چاپ شده به طور میانگین برابر با ۱/۵۵ mm خواهد بود و همچنین در دمای ۳۶ °C و ۴۰ °C با قطر فیلامنت ۳ mm به ترتیب برابر با ۱/۸۸ mm و ۱/۹۳ mm نیز مشاهده شد. با توجه به نتیجه مشاهده شده از دو قطر فیلامنت ۲ و ۳ mm، مشاهده شد که کاهش اندک قطر تنظیمی، (معادل ۹۸mm) نتیجه دقیق‌تری ایجاد کرده، در نهایت قطر شکلات چاپ شده با قطر نازل برابر می‌شود. بنابراین صحت نتیجه به دست آمده در بخش قبل مشاهده شد و در قطرهای بررسی شده، مقدار قطر فیلامنت باید از قطر نازل بیشتر باشد تا قطر شکلات چاپ شده با قطر نازل مورد استفاده برابر شود و



ب

الف

شکل (۵) چاپ شکلات با سرعت ثابت ۱۲۰۰ mm/min و ضخامت و قطرهای نازل الف) ۱/۵ mm و ب) ۱ mm
Fig 5. Chocolate printing at a constant velocity of 1200 mm / min and thickness with nozzle diameters a) 1.5 mm and b) 1 mm.

است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، چاپ در دمای 40°C تصویری با وضوح پایین‌تر نتیجه داده است. چاپ تعدادی از اشکال پیچیده با شرایط بهینه (دمای 32°C ، نازل با قطر $1/5\text{ mm}$ و فاصله نازل تا صفحه برابر $1/5\text{ mm}$) نیز انجام شد که در شکل (۷) آورده شده است.

همان‌گونه که قبلاً ذکر شده میزان دما در چاپ طرح‌های پیچیده تأثیر به‌سزایی دارد. به منظور ارزیابی میزان این تأثیر، چند طرح پیچیده دیگر انتخاب شد و چاپ آن‌ها در دو دمای پیک اول ذوب و پیک دوم یعنی به ترتیب 32°C و 40°C انجام شد که تصویر آن‌ها در شکل (۶) آورده شده



شکل (۶) چاپ طرح پیچیده با قطر نازل $1/5\text{ mm}$ و سرعت ثابت 1200 mm/min (الف) 32°C و (ب) 40°C
Fig 6. with nozzle diameter of 1.5 mm and constant speed of 1200 mm/min a) 32°C and b) 40°C

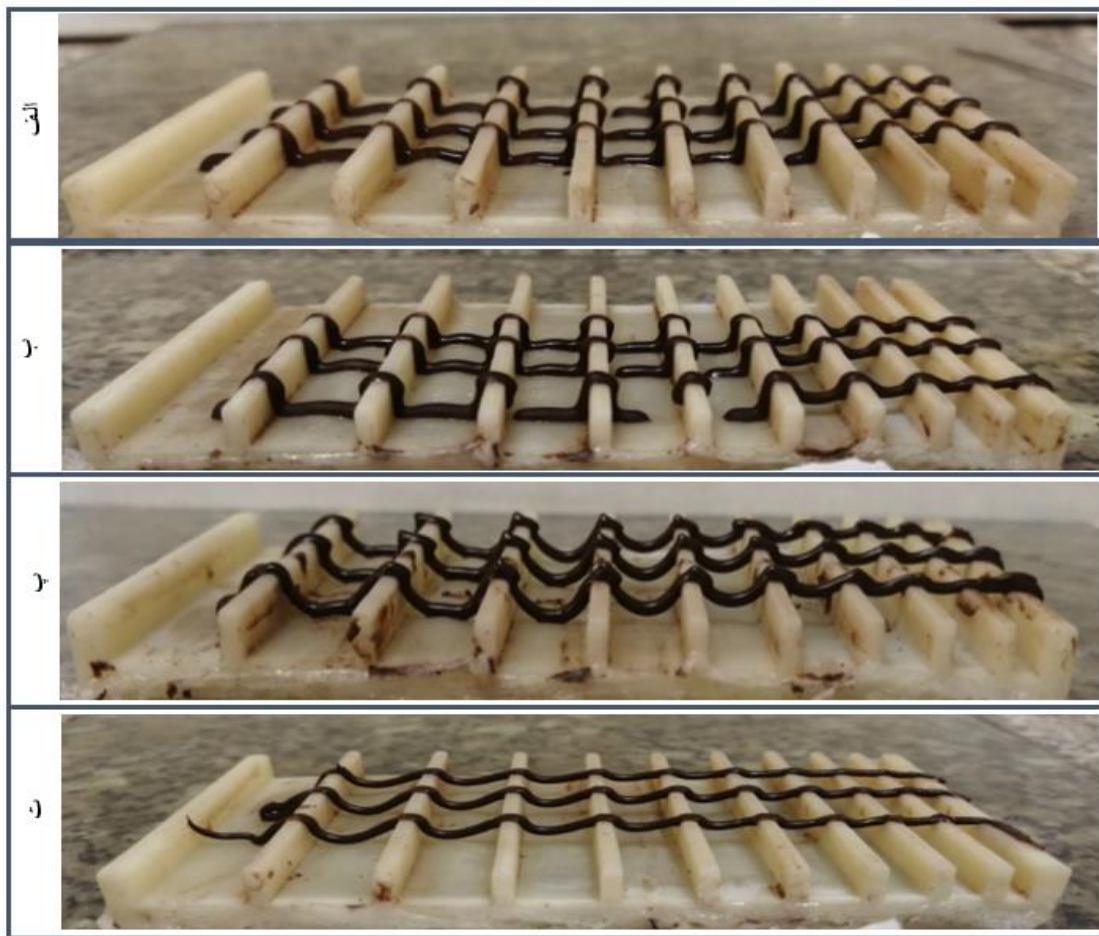


شکل (۷) چاپ اشکال پیچیده با قطر نازل $1/5\text{ mm}$ در دمای 32°C و سرعت ثابت 1200 mm/min
Fig 7. Complex shapes with a nozzle diameter of 1.5 mm at 32°C and a constant speed of 1200 mm/min

۳.۳. تأثیر دما بر دقت چاپ در ارتفاع

شده، نشان داد که شکلات در دمای 42°C پل به طول 3 mm ، در دمای 39°C طول 4 mm ، در دمای 36°C طول تقریبی 6 mm و در دمای 32°C طول تقریبی پل 7 mm را گذراندند. این نتیجه نیز نشان دهنده آن است که دمای 32°C برای چاپ اشکال پیچیده، بدون نیاز به مواد حامی دمای مناسب‌تری است. پس از این مرحله، با دمای مطلوب به دست آمده، آزمون چاپ شکلات در ارتفاع انجام شد.

همان‌طور که در بخش روش‌ها اشاره شد، روشی که برای بررسی اثر پارامترهای چاپ برای اشیا حجیم انتخاب مناسب است، آزمون پل زنی است. باید دانست ضمن آنکه دمای پایین‌تر برای چاپ تک لایه بهتر است، اما جوش خوردن لایه‌ها در دمای بالاتر بهتر انجام می‌شود؛ بنابراین، آزمون پل‌زنی در دماهای مختلف: 32°C ، 36°C ، 39°C و 42°C با قطر نازل $1/5\text{ mm}$ انجام شد. نتایج آزمون که در شکل (۸) آورده



شکل (۸) آزمون پل با قطر نازل $1/5\text{ mm}$ در دمای الف) 42°C ، ب) 39°C ، پ) 36°C و ت) 32°C
Fig 8. Bridge test with nozzle diameter of 1.5 mm at a) 42°C , b) 39°C , c) 36°C , and d) 32°C

شده است. در هنگام چاپ به دلیل دمای پایین، شکلات تقریباً خمیری شکل است، به همین دلیل سه لایه ابتدایی طرح به راحتی چاپ و روی هم قرار گرفت؛ اما نکته قابل توجه این است که هر چه به تعداد لایه‌ها افزوده شد به جای

۴.۳. چاپ شکلات در ارتفاع

چاپ شکلات در ارتفاع با استفاده از داده‌های آزمون پل‌زنی انجام شد. شکلات با طرح شش ضلعی در دو ارتفاع 3 mm و 30 mm در دمای 32°C چاپ شد که در شکل (۹) آورده

انجام شد اما زمان کافی برای خنک شدن لایه چاپ شده وجود نداشت؛ بنابراین بایستی سطح زیر شکلات، خنک می‌شد که این کار به کمک المان خنک کننده و در دمای زیر 10°C انجام شد.

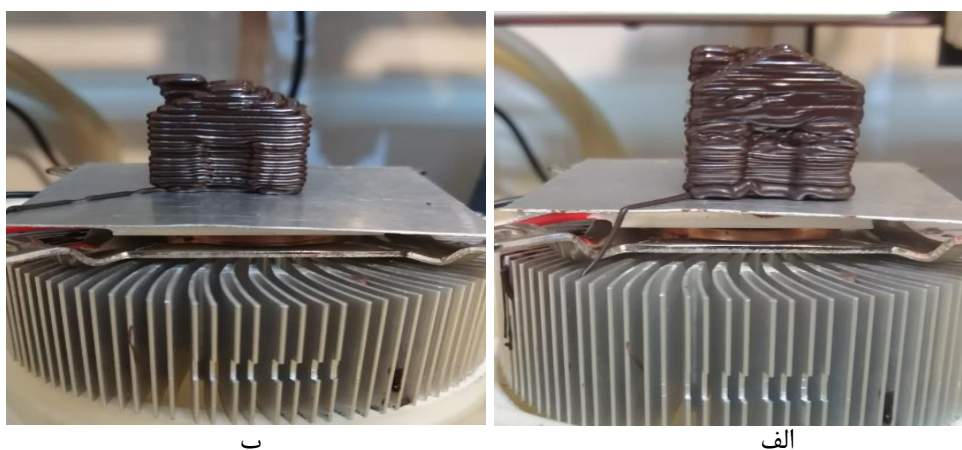
اینکه روی هم قرار گیرند کنار هم قرار می‌گیرند. برای حل این موضوع دو راه کار استفاده شد، اول کاهش سرعت چاپ (ابتدا به 600 و بعد 200mm/min) و دوم کاهش دمای صفحه ساخت. در مرحله اول با اینکه چاپ با سرعت پایین



شکل (۹) چاپ شکلات با قطر نازل 1.5 mm در دمای 32°C و سرعت 200 mm/min (الف) ارتفاع 3 mm (ب) ارتفاع 30 mm
Fig 9. Chocolate printing with a nozzle diameter of 1.5 mm at 32°C and a speed of 200 mm/min a) height 3 mm b) height 30 mm

اینکه به دلیل کاهش ضخامت، وضوح بین لایه‌ها کم‌تر شده، به دلیل جریان یابی بیشتر شکلات، شکل کلی قطعه حاصل نشده است؛ و نکته قابل توجه دیگر آنکه دمای صفحه ساخت به شدت در کیفیت شکل نهایی چاپ تأثیر داشت و بدون سرد کردن صفحه ساخت، قطعه شکل نمی‌گرفت و به هم می‌ریخت.

چاپ شکلات در ارتفاع، با دو ضخامت لایه مختلف انجام شد که تصویر آن در شکل ۱۰ آورده شده است. در این قسمت چاپ شکلات با ابعاد $25 \times 25 \times 2.5\text{ mm}$ ، به ترتیب با سرعت و دمای ثابت 200mm/min و 32°C انجام شد. در چاپ شکلات با ضخامت φ لایه‌ها ضخیم‌تر و مرز بین هر لایه به وضوح قابل رؤیت است اما شکل کلی قطعه بهتر دیده می‌شود؛ ما در شکل دوم با نصف شدن ضخامت علی‌رغم



شکل (۱۰) چاپ شکلات در ارتفاع با قطر نازل 1.5mm در دمای 32°C و سرعت ثابت 200mm/min با ضخامت‌های (الف) $\varphi/5$ و (ب) φ .

Fig 10. Chocolate printing at a nozzle height of 1.5 mm at 32°C and a constant velocity of 200 mm/min with the thicknesses of a) 0.5 mm and b) φ

۴. نتیجه‌گیری

می‌شدند. همچنین این موضوع مشخص شد که با تغییر دما، میزان جریان خروجی از نازل چاپ تغییر می‌کند و برای هر دما می‌بایستی قطر فیلامنت در نرم‌افزار تنظیم شود تا خروجی نازل برابر با قطر نازل شود تا وضوح تصویر ایجاد شده توسط چاپ، مناسب باشد. این قطر برای شرایط دمایی مورد مطالعه ۱/۹۸ mm تعیین شد. از دیگر متغیرهای مؤثر بر کیفیت چاپ شکلات، فاصله نازل از صفحه ساخت بود که بهترین نتایج در فاصله برابر با قطر نازل به دست آمد. نتایج نشان داد که فرآیند سرد کردن پس از چاپ در کیفیت آن و نیز امکان ساخت قطعات ضخیم بسیار مؤثر است. لذا وجود المان سرد کننده برای چاپ قطعات دارای ارتفاع، ضروری تشخیص داده شد.

در این پروژه چاپ سه بعدی شکلات و متغیرهایی مانند دمای ذوب شکلات، میزان جریان یابی آن، تنظیمات فرآیند چاپ مانند ضخامت لایه، قطر نازل و دمای چاپ مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد شکلات مخلوطی از مواد مختلف است که محدوده ذوب نسبتاً وسیعی دارند اما اولین دمای ذوب مشاهده شده در فرمولاسیون آن، جریان‌یابی خوبی در شکلات ایجاد می‌نماید و می‌تواند به عنوان دمای چاپ مورد استفاده قرار گیرد. این دما برای شرایط مورد مطالعه ۳۲°C تعیین شد. قطر نازل ۱/۵ mm در وضوح تصویر مؤثر دیده شد. به طور کلی نازل‌های بزرگ (۱ و ۱/۵ mm) وضوح تصویر کمتری ایجاد می‌کنند و نازل‌های کوچک (۰/۵ mm) به دلیل زودتر سرد شدن شکلات، دچار گرفتگی

مراجع

- [1] Feng, C., Zhang, M., & Bhandari B. (2018). Materials properties of printable edible inks and printing parameters optimization during 3D printing: a review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, 8398, 1–8.
- [2] Mohamed, O.A., Masood, S.H., & Bhowmik, J. L. (2015). Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. *Adv. Manuf.*, 3, 42–53.
- [3] Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2010). Design for additive manufacturing. In *Additive manufacturing technologies*. Boston: Springer, pp. 299-332
- [4] Mantihal, S., Kobun, R., & Lee, B. (2020). International Journal of Gastronomy and Food Science 3D food printing of as the new way of preparing food: A review. *Int. J. Gastron. Food Sci.*, 22, 100260.
- [5] Hwang, S., Reyes, E.I., Moon, K.S., Rumpf, R.C., & Kim, N.S. (2015). Thermo-mechanical characterization of metal/polymer composite filaments and printing parameter study for fused deposition modeling in the 3D printing process. *J. Electron. Mater.*, 44, 771–777.
- [6] Jayaprakash, S., Ituarte, I.F., & Partanen, J. (2019). Prosumer-Driven 3D Food Printing: Role of Digital Platforms in Future 3D Food Printing Systems. In F.C. Godoi, B.R. Bhandari, S. Prakash & M. Zhang, (Eds.). *Fundamentals of 3D Food Printing and Applications*. London: Academic Press, pp. 331-354
- [7] Pérez, B., Nykvist, H., Brøgger, A. F., Larsen, M. B., & Falkeborg, M. F. (2019). Impact of macronutrients printability and 3D-printer parameters on 3D-food printing: A review *Food Chem.*, 287, 249–57.
- [8] Lipton, J., Arnold, D., Nigl, F., Lopez, N., Cohen, D.L., Norén, N., & Lipson, H. (2010). Multi-material food printing with complex internal structure suitable for conventional post-processing. *Solid Free. Fabr. Symp.*, 809–815.
- [9] Lee, J. H., Won, D. J., Kim, H. W., & Park, H. J. (2019). Effect of particle size on 3D printing performance of the food-ink system with cellular food materials. *J. Food Eng.*, 256, 1-8.
- [10] Liu, Y., Liang, X., Saeed, A., Lan, W., & Qin, W. (2019). Properties of 3D printed dough and optimization of printing parameters *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, 54, 9–18.
- [11] Yang, F., Zhang, M., Bhandari, B., & Liu, Y. (2018). Investigation on lemon juice gel as food material for 3D printing and optimization of printing parameters *LWT - Food Sci. Technol.*, 87, 67–76.
- [12] Guo, C. F., Zhang, M., & Bhandari, B. (2019). A comparative study between syringe-based and screw-based 3D food printers by computational simulation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162, 397-404.
- [13] 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, 57–64.
- [14]Tan, C., Toh, W. Y., Wong, G., & Lin, L. (2018). Extrusion-based 3D food printing–Materials and machines. *Int. J. Bioprinting*, 4, 143.
- [15]Gloria, H., Sievert, & D. (2001). Changes in the physical state of sucrose during dark chocolate processing *J. Agric. Food Chem.*, 49, 2433– 2436.
- [16]Lanaro, M., Forrestal, D.P., Scheurer, S., Slinger, D.J., Liao, S., Powell, S.K., & Woodruff, M. A. (2017) 3D printing complex chocolate objects: Platform design, optimization and evaluation. *J. Food Eng.*, 215, 13–22.
- [17]Gonçalves, E. V., & Lannes, S. C. D. S. (2010). Chocolate rheology. *Food Sci. Technol*, 30, 845-851.
- [18]Chevalley, J., (1975). Rheology of chocolate. *Journal of texture studies.*, 6, 177-196.
- [19]Liu, Z., Zhang, M., Bhandari, B., & Wang, Y. (2017). 3D printing: Printing precision and application in food sector *Trends Food Sci. Technol.*, 69, 83–94.
- [20]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 *Innov. food Sci. Emerg. Technol.*, 44, 21–29.
- [21]Mantihal, S., Prakash, S., Godoi, F. C., & Bhandari, B. (2019). Effect of additives on thermal, rheological and tribological properties of 3D printed dark chocolate *Food Res. Int.*, 119, 161–169.
- [22]Dankar, I., Haddarah, A., Omar, F. E. L., Sepulcre, F., & Pujolà, M. (2018). 3D printing technology: The new era for food customization and elaboration *Trends Food Sci. Technol.*, 75, 231–242.
- [23]Nachal, N., Moses, J. A., Karthik, P., & Anandharamakrishnan, C. (2019). Applications of 3D Printing in Food Processing *Food Eng. Rev.*, 11, 123–141.
- [24]Derossi, A., Caporizzi, R., Ricci, I., & Severini, C. (2019). Critical Variables in 3D Food Printing. In In F.C. Godoi, B.R. Bhandari, S. Prakash & M. Zhang, (Eds.). *Fundamentals of 3D food printing and applications*. London: Academic Press, pp. 41-91
- [25]Liu, Z., & Zhang, M. (2019). 3D Food Printing Technologies and Factors Affecting Printing Precision. In In F.C. Godoi, B.R. Bhandari, S. Prakash & M. Zhang, (Eds.). *Fundamentals of 3D Food Printing and Applications*. London: Academic Press, pp. 19-40

Research Article
Investigation of process variables in 3D printing of chocolate

Maryam Saeedi¹, Amir masoud Rezadoust^{2*}, Hosein Baniasadi³, Marzieh Lotfi⁴

- 1. M.Sc. student, Department of Chemical Engineering, Faculty of Petroleum and Chemical Engineering, Tehran Azad University of Science and Research**
- 2. Associate professor, Department of Composite, Process Research Institute, Iran Polymer and Petrochemical Institute**
- 3. Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Petroleum and Chemical Engineering, Tehran Azad University of Science and Research**
- 4. Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Petroleum and Chemical Engineering, Tehran Azad University of Science and Research**

Abstract

3D printing syringe-cartridge dispensing is one of the methods of forming parts that has attracted the attention of many researchers who work in academic and industrial fields due to its design-ability and short prototyping time. In this method, different materials such as polymer, food, etc. are put together in thin rasters by a syringe controlled by a CNC mechanism to make a section of the part. By repeating this process for the next layers, the final part is formed. In this project, an attempt has been made to evaluate the process parameters of complex shapes of chocolate parts created by this technology. For this purpose, the infrastructure of a commercial 3D printer was equipped with a specially designed syringe head with adjustable temperature. DSC (Differential scanning calorimetry) test showed that the appropriate temperature range for melting chocolate is 32-40 ° C. Rheological tests showed that the viscosity of chocolate decreases with the temperature and that in turn, leads to more extrusion of chocolate and reducing the resolution of the printed shape. On the other hand, process parameters such as nozzle distance from the printing plate, nozzle diameter, filament diameter and fabrication plate temperature also affect the print resolution. In this study, different nozzle diameters set of 1.98, 2 and 3 mm in printing software, at different temperatures were employed and finally the optimal printing resolution conditions were determined as the temperature of 32 ° C, distance equal to the nozzle diameter, nozzle diameter value set as 1.98 mm and manufacturing plate temperature less than 10 ° C.

Keywords: 3D printing, layer by layer manufacturing, chocolate, Additive manufacturing, customized production

* Corresponding author: a.rezadoust@ippi.ac.ir