**ساخت قطعات شکلات به روش چاپ سه بعدی؛ بهینه سازی شرایط فرآیندی**

مریم سعیدی۱، امیر مسعود رضادوست۲\* حسین بنی اسدی۳ مرضیه لطفی۴

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات

۲ استادیار پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، آزمایشگاه چاپ سه بعدی

3 استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات

4 استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات

[a.rezadoust@ippi.ac.ir](mailto:a.rezadoust@ippi.ac.ir)\*

**چکیده**

فناوری مدل‌سازی به روش لایه نشانی هم جوش (FDM) یکی از روش‌های شکل‌دهی قطعات است که به دلیل طراحی و زمان کم تولید توجه بسیاری از صنعتگران و محققان را جلب کرده است. در این روش مواد مختلف از قبیل پلیمری، غذایی، فلزی و ... از نازل چاپگر عبور کرده و مذاب آن بر صفحه چاپ نشانده می‌شود. بدین ترتیب با نشاندن رشته‌های خروجی از نازل در کنار هم، یک لایه از قطعه تشکیل شده و با تکرار لایه‌ها، قطعه نهایی ساخته می‌شود. در این پروژه سعی بر این بود تا قطعات شکلات به شکل‌های دلخواه با این فناوری ساخته شود. برای این منظور از یک چاپگر سه بعدی سیزاین لایت مجهز به یک کلگی سرنگی طراحی شده خاص با دمای قابل تنظیم استفاده شد. برای تعیین دمای ذوب شکلات، از آزمون DSC استفاده شد. نتایج نشان داد که محدوده دمایی مناسب برای چاپ شکلات، °C ۴۰-۳۲ است. آزمون ریولوژی نشان داد که با افزایش دما، گرانروی شکلات کاهش می‌یابد و افزایش گرانروی منجر به بیشتر اکسترود شدن شکلات و وضوح شکل چاپ شده را کمتر می‌کند. از طرف دیگر؛ پارامترهای فرآیندی نظیر ارتفاع نازل از صفحه چاپ، قطر نازل و قطر فیلامنت نیز بر وضوح چاپ موثر است. در این پروژه قطرهای مختلف فیلامنت؛mm 98/1، 2 و 3 در دماهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت شرایطی که در آن دقت چاپ مطلوب است تعیین شد.

**کليد واژه ها:**

شکلات، چاپ سه بعدی، ساخت برهم افرا، چاپ شکلات سه بعدی، پارامترهای چاپ

**مقدمه:**

صنایع غذایی این فناوری را در سال 2006 -2007زمانی که اولین چاپ غذا توسط پرفسور هود لیپستن در دانشگاه کورنل انجام شد، پذیرفتند ]2,1[. در محدوده کوتاهی، محققان در سراسر جهان انواع غذاها را با استفاده از طیف وسیعی ازچاپگرهای سه بعدی موجود در بازار و یا چاپگرهای ساخته شده در خانه‌ها چاپ کردند. فناوری‌های چاپ سه بعدی مختلفی وجود دارد که می‌تواند بر اساس نوع ماده غذایی استفاده شود. به عنوان مثال می‌توان چاپگر جوهر افشان، چاپ براساس اکستروژن که مخصوص مواد نرم مثل پنیر و شکلات است و چاپ براساس فناوری لیزر را ‌نام برد. با توجه به مدل‌های گفته شده، چاپ بر اساس اکستروژن بر پایه لایه نشانی مخلوط است که به دلیل ماهیت نیمه جامد مواد غذایی، برای چاپ سه بعدی آن‌ها مناسب‌تر است] 2،3[.

لانارو[[1]](#footnote-1) و همکاران ] 4[برای تعیین نقطه ذوب شکلات، آزمون DSC را انجامد دادند. آن‌ها دریافتند نقطه ذوب شکلات بین 29 تا 31 است در حالی‌که جامد شدگی در دمای 5/23 اتفاق می‌افتد. بنابراین گزارش کردند نقطه جامد شدگی در محدوده دمایی بین5/23 تا 31 که با داده‌های ریولوژی تایید کردند.

یانگ و همکاران ]5[ ترکیب درصدهای مختلفی از نشاسته (10، 5/12، 15، 5/17 و 20) با آب لیمو مخلوط کردند و چاپ این ترکیبات را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند با افزایش سرعت برشی، گرانروی کاهش می‌یابدکه این پدیده نشان‌دهنده این است که آب لیمو رفتار سود پلاستیک و رقیق شوندگی نشان می‌دهد که این موضوع برای اکسترود کردن مواد از نازل مفید است. همچنین افزایش مقدار نشاسته به طور کلی گرانروی را افزایش می‌دهد. که این امر برای حفظ شکل مواد اکسترود شده سودمند است.

**بيان مسأله:**

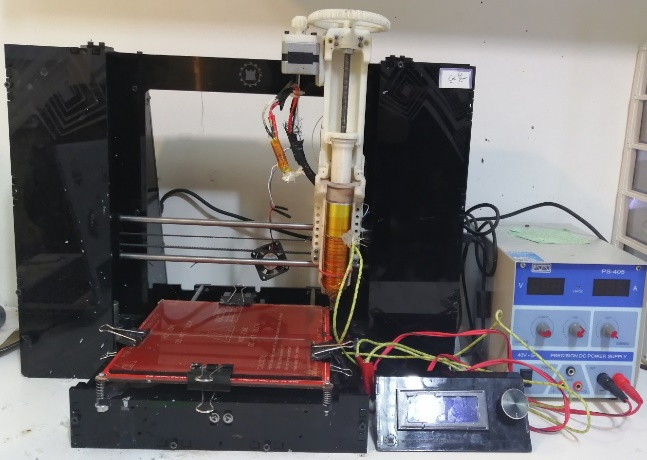
امروزه اختصاص سازی روندی است که در بسیاری از محصولات و فرآیند‌ها طی می‌شود و فناوری چاپ سه بعدی یکی از مهم‌ترین ابزارهای آن است. یکی از حوزه‌های جدید تحقیقات در فناوری‌های چاپ سه بعدی، چاپ مواد غذایی است که می‌توان با تنظیم فرمولاسیون خاص، برای افراد محصولات قابل خوردن خاصی ساخت. این خاص بودن هم در جنبه‌های ظاهری مطرح است و هم در اجزای تشکیل دهنده. همچنین برای رسیدن به کیفیت عالی لازم است فرمول‌های قابل چاپ خوردنی طراحی شوند و شرایط فرآیندی آن‌ها مانند ابعاد نازل، سرعت چاپ، دمای فرآیند و غیره بهینه سازی شود.

**هدف پژوهش:**

تعیین شرایطی که بتوان شکلات را به صورت سه بعدی چاپ کرد، هدف این پژوهش است.

**روش و چگونگي انجام پژوهش:**

در این پژوهش، دستگاه چاپگر سه بعدی FDM مورد استفاده قرار گرفت و برای چاپ شکلات یک ماژول سرنگی روی آن نصب شد. طول و عرض و ارتفاع این چاپگر دارای ابعاد یکسان به مقدار cm 20 است .نمایی از این دستگاه در شکل ۱ نشان داده شده است. سرنگml 60 به وسیله ی صفحه آلومینیومی پوشیده شدکه این صفحه نیز با نوار چسب حرارتی پوشش داده شد تا با قراردادن المنت حرارتی که متصل به یک منبع تغذیه است، سرنگ گرم شود. با تنظیم ولتاژ منبع تغذیه گرمای لازم تامین می‌شد.

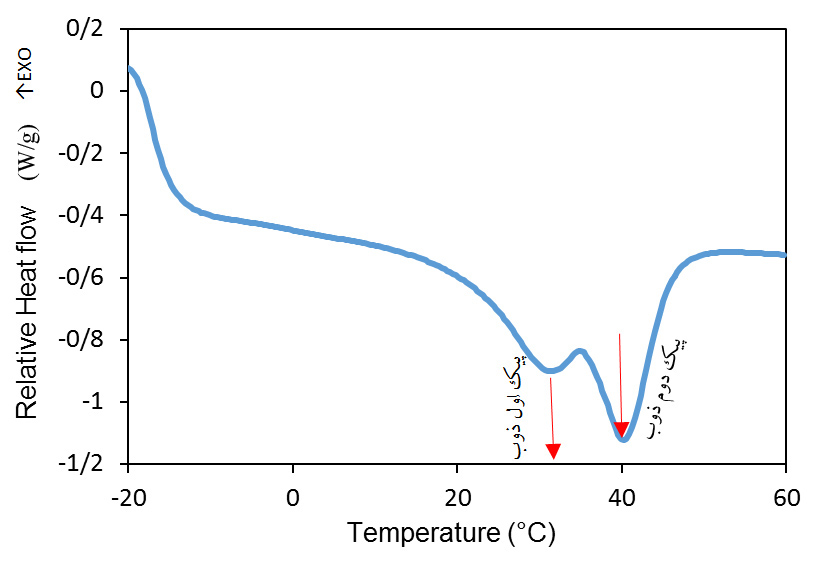


**شکل ۱- پرینتر مجهز به کلگی سرنگی با دمای قابل تنظیم**

به منظور تعیین شرایط چاپ بایستی ابتدا محدوده ذوب آن توسط آزمون گرماسنجی تفاضلی تعیین شود که این کار توسط یک دستگاه گرماسنج تفاضلی روبشی با نام تجاری DSC1 ساخت شرکت Mettler Toledo سوئیس تحت اتمسفر نیتروژن انجام شد. حدود mg42/13 از نمونه با سرعت حرارت دهی C/min° 10 از دمایC°20- تا C°60 حرارت داده شد. همچنین آزمون ریولوژی 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) 10 و 30 تحت اتمسفر ازت انجام شد.

**يافته ها و نتيجه گيری:**

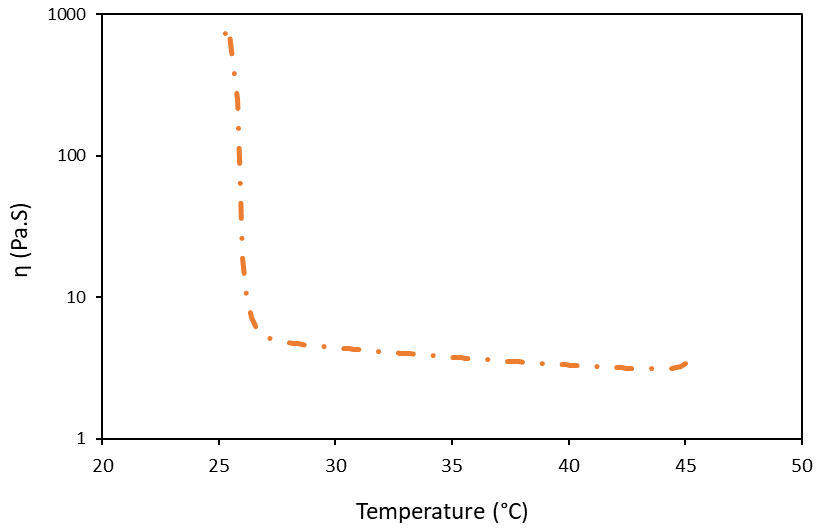
نتایج آزمون گرماسنجی تفاضلی روبشی (DSC) برای شکلات در شکل ۲ آورده شده است.



**شکل ۲- آزمون گرماسنجی روبشی تفاضلی شکلات برای تعیین نقطه ذوب**

همان‌گونه که مشاهده می‌شود دو پیک ذوب در منحنی DSC مشاهده می‌شود که نشانه آن است که شکلات مورد استفاده از اجزایی با نقطه ذوب متفاوت تشکیل شده است. پیک اول از دمایC° 15/18 آغاز شده و در دمای C° 71/34 پایان می‌یابد و پیک دوم از دمایC° 71/34 تا دمای C° 46/48 بوده و کمینه آن درC ° 15/18 اتفاق می‌افتد. پیک ذوب اول در دمای تقریبی C° 36/31 و پیک دوم در دمای تقریبی C° 60/40 رخ می‌دهد. بر این اساس می‌توان دماهای ذوب را در فرآیند چاپ بین ۳۲ تا oC ۴۰ تنظیم نمود و با توجه به این‌که 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، از این نمودار دمای حدود oC32 به عنوان دمای مطلوب برای تشکیل پایدار ترین دمای ذوب شکلات مناسب به نظر می‌رسد. البته این در صورتی است که شکلات در دمای فوق، جریان یابی کافی برای فرآیند چاپ داشته باشد.

باتوجه به نتایج این آزمون، بایستی میزان جریان یابی شکلات بر حسب دما نیز با آزمون ریولوژی مورد بررسی قرار گیرد. نتیجه آزمون ویسکوزیته بر حسب دما برای شکلات مورد استفاده در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود که افزایش دما باکاهش گرانروی همراه است که این موضوع باعث افزایش دبی خروجی نازل و کاهش وضوح چاپ می‌شود. بنا براین باید دبی خروجی نازل سرنگ متناسب با شرایط دمایی و قطر نازل طوری تنظیم شود که ابعاد چاپ نزدیک به ابعاد نازل باشد تا امکان چاپ دقیق اشکال طرح داده شده، ممکن شود.

****

**شکل ۳- ویسکوزیته شکلات بر حسب دما**

توضیح اینکه نرم افزاری که برای دستگاه چاپ شکلات استفاده شده است، در اصل برای چاپ فیلامنت پلیمری به روش FDM است. در این نرم افزار قطر فیلامنت از قبل تنظیم شده و چاپ قطعه با توجه به این قطر انجام می‌شود. از آنجایی که تغییرات ویسکوزیته این فیلامنت‌ها در حدی نیست که در خروجی نازل تغییری ایجاد کند، با در نظر گرفتن تورم دای در نرم‌افزار، می‌توان چاپ دقیقی انجام داد. اما در چاپ سه بعدی شکلات توسط سرنگ، دیگر فیلامنت اولیه‌ای وجود ندارد و حجم خروجی نازل نیز با توجه به میزان برش اعمالی و دما تغیرات زیادی خواهد داشت. بنابراین بایستی برای هر شرایط دمایی (قطر نازل و دمای چاپ) همبستگی بین قطر فیلامنت (مجازی) در نرم‌افزار و خروجی نازل انجام شود تا حتی المقدور ابعاد خروجی آن در نرم‌افزار پیش‌بینی شود تا خروجی چاپ از وضوح مطلوبی برخوردار باشد. طبق اطلاعات بیان شده با تغییر در مقادیر مختلفی از قطر فیلامنت تست انجام شد،که نهایتا در این دمای ثابت برای هر قطر نازل یک مقدار مشخص برای قطر فیلامنت در نظر گرفته شد.

حال تاثیر دما را بر روی کالیبره کردن قطر فیلامنت برای بهینه سازی قطر شکلات اکسترود شده مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظورآزمون در دمای °C ۱±۳۳و با نازل mm5/1 انجام شد، که نتایج آن در شکل ۴ آورده شده است. این آزمون با سه بار تکرار انجام شد. قطر فیلامنت در مقادیر مختلف چاپ و اندازه گیری شد، که در نهایت دو مقدار نهایی آن در این جا گزارش شد است. در ابتدا قطر فیلامنت برابر با mm2 قرار داده شد و قطر شکلات چاپ شده تقریبا برابر با mm2/1 به دست آمد. چون اندازه قطر شکلات اکسترود شده با قطر نازل در حال استفاده برابر نشد در نتیجه مقدار قطر فیلامنت کاهش داده شد تا قطر بهینه (**mm ۵/1**) به دست آید. لازم به ذکر است که هر چه قطر فیلامنت کاهش یابد مقدار ماده بیشتری اکسترود می‌شود. با توجه به نکته ذکر شده اندازه تنظیمی قطر فیلامنت در نرم‌افزار از mm2 به mm98/1 کاهش داده شد و در این قطر، ابعاد شکلات چاپ شده برابر با قطر نازل به دست آمد.



**شکل ۴- کالیبره کردن قطر شکلات اکسترود شده با قطرهای فیلامنت الف) mm2 ب) mm98/1 در دما و قطر نازل به ترتیب °C 33 و mm5/1.**

همانگونه که قبلا ذکر شده میزان دما در چاپ طرح‌های پیچیده تاثیر به سزایی دارد. به منظور ارزیابی میزان این تاثیر، چند طرح پیچیده دیگر انتخاب شد و چاپ آن‌ها در دو دمای پیک اول ذوب و پیک دوم یعنی به ترتیب ۱±°C ۳۳ و°C40 انجام شد،که تصویر آن‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است.



**شکل ۵- چاپ طرح پیچیده با قطر نازلmm 5/1 و سرعت ثابت mm/min 600 الف) °C33 و ب) °C40**

ابتدا شکلات را در دمای °C33 ذوب کرده و طرح مورد نظر، با سرعت ثابت mm/min 600 چاپ شد (شکل ۵-الف). شکلات در این دما به صورت خمیری شکل و پیوسته اکسترود شد. چاپ در دمای °C40 (شکل ۵-ب) است تصویری با وضوح پایین‌تر به دست آمد و در دمای پایین‌تر، جزئیات طرح به خوبی به تصویر کشیده شده است. در مورد سایر اشکال پیچیده نیز همین نتیجه حاصل شد (شکل ۶).



**شکل ۶- چاپ طرح‌های پیچیده با با شرایط بهینه**

**بحث و نتيجه گيري:**

در این پروژه برای بهینه کردن چاپ شکلات پارامترهای فرآیندی مانند نقطه ذوب شکلات و سیالیت شکلات با استفاده از ازمون‌های DSC و ریولوژی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج DSC نشان داد که نقطه‌ی ذوب مناسب برای چاپ سه بعدی شکلات، °C3۳ است. سیالیت ماده غذایی چاپ شده یکی از پارامترهای بسیار مهم در چاپ سه بعدی مواد غذایی است. با توجه به آزمون ریولوژی مشاهده شد که با افزایش دما، گرانروی کاهش می‌یابد. کاهش گرانروی منجر به تسهیل فرآیند اکستروژن شکلات می‌شود. از طرف دیگر پارامترهای چاپ در چاپ سه بعدی حائز اهمیت است که ما در این پروژه اثر قطر فیلامنت و دما بر دقت چاپ انجام شد. قطرهای مختلف فیلامنت نشان داد که با افزایش دما، مقدار قطر فیلامنت افزایش می‌یابد. این امر منجر به برابر شدن قطر فیلامنت چاپ شده با قطر فیلامنت تنظیم شده می‌شود. همچنین مشاهده شد که کاهش دما تاثیر مستقیم بر دقت و وضوح اشکال چاپ شده دارد. با کاهش دما، شکلات اکسترود شده به صورت خمیری شکل در می‌آید که این پدیده باعث بهبود در فرآیند لایه نشانی شده و اشکالی با وضوح مناسب حاصل می‌شود.

**3D printing of Chocolate; optimization of the process parameters**

Maryam Saeedi 1, Amir masoud Rezadoust \*2, Hosein Baniasadi 3, Marzieh Lotfi 4

1 M.Sc. student, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran

2 Assistant professor, Iran Polymer and Petrochemical Institute, additive manufacturing Lab

3Assistant Professor, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran

4Assistant Professor, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran

\*Email: [a.rezadoust@ippi.ac.ir](mailto:a.rezadoust@ippi.ac.ir)

**Abstract**

**Fused deposition modeling (FDM) technology is one of the recent manufacturing methods that has attracted the attention of many industrial and research groups because of short time needed for design and production. In this method, various materials such as polymer, food or even metal are passed through a nozzle and the flowed materials is deposited on a print bed. Thus, by putting the extruded materials together, a layer is formed and by repeating the process, the final part is made. In this project, it is tried to make chocolate pieces in the desired shape with this technology. For this purpose, an FDM 3D printer equipped with a specially designed syringe nozzle with adjustable temperature was used. DSC test was used to determine the melting temperature of the chocolate. The results showed that the appropriate temperature range for chocolate printing is between 33-40 °C. Rheology tests showed that with increasing temperature, the viscosity of the chocolate decreased and the increase in viscosity resulted in more extruded chocolate and reduced the print resolution. On the other hand, the process parameters such as the layer height, the nozzle diameter and the filament diameter also affect the print resolution. In this project different diameters filaments diameter and printing temperature were investigated and optimum print conditions were determined.**

**فهرست منابع:**

[1] Jayaprakash, S., Ituarte, I.F. and Partanen J 2019 Prosumer-Driven 3D Food Printing: Role of Digital Platforms in Future 3D Food Printing Systems. In Fundamentals of 3D *Food Print. Appl.* **2024** 331–54

[2] Prakash S, Bhandari B R, Godoi F C and Zhang M 2019 *Future Outlook of 3D Food Printing* (Elsevier Inc.)

[3] Liu, Y., Liang, X., Saeed, A., Lan, W. and Qin W 2019 Properties of 3D printed dough and optimization of printing parameters *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* **54** 9–18

[4] Lanaro, M., Forrestal, D.P., Scheurer, S., Slinger, D.J., Liao, S., Powell, S.K. and Woodruff M A 2017 3D printing complex chocolate objects: Platform design, optimization and evaluation. *J. Food Eng.* **215** 13–22

[5] Yang F, Zhang M, Bhandari B and 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.

1. [↑](#footnote-ref-1)