



Effect of Nuzzle Diameter on Screw Torque and Operating Pressure in Pellet 3D Printing



ARTICLE INFO

Authors

Salehi MM.¹

Movahhedy MR.^{1*}

¹ Department of Mechanical Engineering, Sharif University, Tehran, Iran.

* Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, Sharif University, Azadi Street, Tehran, Iran
movahhed@sharif.edu

How to cite this article

Salehi MM, Movahhedy MR. Effect of Nuzzle Diameter on Screw Torque and Operating Pressure in Pellet 3D Printing. Modares Mechanical Engineering. Proceedings of 2nd Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools (CAMMT). 2022;22(10):241-246.

ABSTRACT

Nowadays using 3D printing for prototyping is well known in industrial applications and there are efforts to make functional parts with this technology to reach low volume production markets. By using pellets rather than filaments, the limitations caused by lack of variety of materials can be conquered. Also there will be no need to make a massive part as several divided parts and then glue them together.

In this article pellets of ABS, that are well known and functional in industry, are analysed for an extruder to investigate the ability of pellet material extruding. Characteristic specifications of extruder such as operating pressure, screw rotational speed and required torque for rotating the screw are achieved for they are important factors to find out the mechanism for experimental tests and selecting suitable operating parts such as motor and gearbox.

Keywords 3D Printing, Pellet, Extruder, Torque, Operating Pressure

ماهنامه علمی مهندسی مکانیک مدرس. ویژهنامه مجموعه مقالات دومین کنفرانس ملی ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته. مهر ۱۴۰۱، دوره ۲۲، شماره ۱۰، صفحه ۲۴۱-۲۴۶.



بررسی اثر قطر نازل استفاده شده در فرآیند پرینت سه‌بعدی گرانولی بر روی گشتاور واردون و فشار کاری ماده خروجی



چکیده

امروزه استفاده از پرینت سه‌بعدی به منظور نمونه سازی به خوبی در صنعت شناخته شده است و تلاش‌ها در این جهت است که بتوان قطعات عملکردی را نیز در دایره قابلیت‌های این تکنولوژی وارد نمود تا وسعت عملکردی آن بیش از گذشته شود و جایگزین روش‌های ساخت دیگر در تولید کم تیراژ گردد. در این بین محدودیت در جنس مواد رایج که به صورت رشته ای (فیلامنتی) هستند و محدودیت در ساخت قطعات بزرگ، مانعی در این مسیر است. به منظور استفاده از مواد مختلف و جدا شدن از این محدودیت‌ها، استفاده از مواد اولیه گرانولی مورد توجه قرار دارد. در این مقاله مواد اولیه گرانولی با جنس ABS که دارای کاربرد فراوانی در صنعت می‌باشد انتخاب گردیده است و تحلیل سیستم اکسترودر با قابلیت استفاده از مواد اولیه گرانولی مورد توجه قرار گرفته است. در نهایت ویژگی‌های عملکردی اکسترودر شامل فشار کاری مجموعه، سرعت چرخش مورد نیاز واردون و گشتاور لازم برای چرخش آن برای یک دبی ثابت واقعی استخراج شده است که می‌تواند پایه‌ای در شناخت بهتر این سیستم باشد تا مقدمه‌ای برای تست‌های آزمایشگاهی باشد.

مشخصات مقاله

نویسنده‌ها

محمد مهدی صالحی^۱
محمدرضا موحدی^{*۱}

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

* نویسنده مسئول

آدرس: تهران، خیابان آزادی، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی مکانیک

movahhed@sharif.edu

کلیدواژه‌ها پرینت سه‌بعدی، مواد گرانولی، اکسترودر، گشتاور، فشار کاری

۱- مقدمه

روش‌های ساخت افزایشی گروهی از روش‌های نوین ساخت هستند که به سرعت در حال توسعه بوده و جایگاه خود را در صنایع خودروسازی، هوافضا و پزشکی باز کرده‌اند، به گونه‌ای که بسیاری از پژوهشگران بر این باورند که این فناوری آینده ساخت و تولید را دگرگون خواهد ساخت. فناوری ساخت افزایشی، فناوری است که از دهه ۸۰ میلادی به تدریج پا به عرصه وجود گذاشته و در ده سال اخیر جایگاه بسیار مهمی در توسعه صنایع ساخت و تولید پیدا کرده است.

یکی از این روش‌ها برای پرینت سه‌بعدی، روش FDM (Fused Deposition Modeling) می‌باشد که در آن یک پلیمر رشته‌ای ذوب می‌شود و به صورت لایه لایه، شکل مورد نظر ساخته می‌شود^[۱]. این دستگاه به علت کاربر پسند بودن آن به علت راحتی کار و هم‌چنین قیمت به نسبت مناسب خدمات آن، مورد توجه بیشتر می‌باشد و سعی می‌گردد تا مواد و ویژگی‌های جدید به آن اضافه شود تا بتواند گستره بیشتری از خدمات را پوشش دهد و نیاز به دستگاه‌های گران قیمت و پیچیده را کم نماید.

در پرینترهای سه‌بعدی رایج، از فیلامنت‌های یک کیلوگرمی استاندارد به قطر ۱/۷۵ میلی‌متر برای ساخت قطعات استفاده می‌شود. البته فیلامنت‌های سه کیلوگرمی نیز موجود هستند که بیشتر دارای قطر ۳ میلی‌متر هستند. در این فرآیند رشته‌ی فیلامنت با استفاده از یک کشنده که در مجموعه اکسترودر تعبیه شده است به داخل میله اکسترودر وارد می‌شود و پس از رسیدن به حرارت مورد نظر توسط گرم‌کن‌های تعبیه شده بر روی میله از نازل خارج شده و قطعه تشکیل می‌شود.

با اینکه کار کردن با این مجموعه راحت است و به گونه‌ای در صنعت پرینت سه‌بعدی به صورت رایج در آمده است. اما معایبی نیز دارد که در ادامه به آن اشاره می‌شود.

- محدود بودن وزن برای پرینت قطعات بزرگ
- اتلاف رشته‌های باقی مانده از هر بسته پس از ساخت
- قیمت حدود ده برابری این مواد نسبت به مواد گرانولی

- عدم تنوع مواد در فیلامنت‌های رایج

هدف از این تحقیق، بررسی سیستم‌های پرینت بدون نیاز به فیلامنت‌های رایج می‌باشد که در آن بتوان از مواد گرانولی ABS به منظور پرینت قطعات استفاده نمود.

لذا در ادامه، مجموعه پرینت سه‌بعدی با استفاده از مواد گرانولی مورد تحقیق قرار گرفته است و مهم‌ترین بخش آن یعنی مجموعه اکسترودر مورد تحلیل واقع شده است تا در راستای اجرای عملی این پروژه، اطلاعات لازم را در اختیار قرار دهد. ابتدا در بخش مرور ادبیات به بررسی مقالات مرتبط با این حوزه پرداخته می‌شود. سپس بر روی تحلیل اکسترودر و معادلات

حاکم بر جریان ماده تمرکز خواهد شد و در انتها خروجی‌های مورد نظر برای بررسی عملکرد پرینت سه‌بعدی گرانولی ارائه خواهد گردید.

۲- مرور ادبیات

لیو و همکارانش^[۲] در سال ۲۰۱۹ بر روی پرینت سه‌بعدی مواد گرانولی از جنس پلی کاپرو لاکتور (PCL) تحقیق نمودند که دارای خواص خوب در زمینه پزشکی است.

این ماده نقش مهمی را در مهندسی بافت، مواد پزشکی و شیمی ایفا میکند و نیاز به روش‌های ساخت مناسب این مواد دارد. از میان روش‌های مختلف پرینت سه‌بعدی، روش FDM با توجه به قیمت ارزان، سرعت بالا و راحتی کار مورد نظر قرار گرفته است.

انواع مختلفی از پلیمرها در پرینت سه‌بعدی با روش FDM کاربرد دارند که میتوان PLA و ABS را از رایج‌ترین این پلیمرها دانست که معمولاً به صورت فیلامنت در می‌آیند و در فرآیند مورد استفاده قرار می‌گیرند. ضعف خاصیت ذوب-مقاومت ماده PCL باعث شده است که امکان تولید فیلامنت از این ماده وجود نداشته باشد؛ در نتیجه PCL خالص امکان استفاده در این فرآیند را ندارد. این خاصیت تنها مربوط به این ماده نیست و برخی از بایومواد نیز در فرآیند فیلامنت سازی دچار مشکل میشوند.

وایمن و همکارانش^[۳] در سال ۲۰۱۸ بر روی ساخت و ارتقای یک اکسترودر مخصوص پرینت گرانول‌های بایوپلیمری تحقیق نمودند. سیستم اکستروژن یکی از اجزای اصلی پرینترهای سه‌بعدی محسوب می‌شود ولی اکسترودرهای رایج در بازار و مورد استفاده در پرینترهای سه‌بعدی برای موادی مورد استفاده هستند که به شکل رشته‌های فیلامنت هستند (PLA و ABS جزو رایج‌ترین فیلامنت‌ها هستند). این در حالی است که پرینت موادی که به شکل فیلامنت موجود نیستند و یا به صورت رایج در بازار وجود ندارند، مورد بررسی و تحقیق قرار نگرفته‌اند که میتوان به مواد بایوپلیمر و یا ترکیب مواد مختلف اشاره نمود. در این تحقیق سیستم اکستروژن بر پایه گرانول مورد تحقیق است تا بتواند مواد بایوپلیمر را در پرینت سه‌بعدی مورد استفاده قرار دهد. در سیستم اکستروژن از تعدادی فاکتورهای کنترلی استفاده شده است تا خروجی پایدار بدست بیاید.

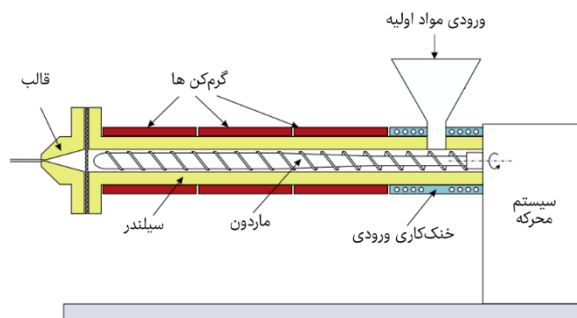
طبق بررسی‌های این تیم، هر دو عامل دستگاه و سیستم اکسترودر در کیفیت قطعات نهایی اهمیت دارند. با وجود اینکه اکسترودر گرانولی وجود داشته است اما تا کنون استفاده گسترده در پرینت سه‌بعدی نداشته است و علت آن دشوار بودن گرفتن خروجی مناسب مواد از آن می‌باشد. پیشنهاداتی نیز برای پژوهش‌های آینده مطرح شده است تا با استفاده از اضافه نمودن چند سنسور حرارتی، شرایط دمایی کنترل بیشتری گردد و همچنین سنسور فشار برای عملکرد دقیق‌تر تغذیه‌کننده گرانول استفاده گردد.

قرار می‌گیرد. استفاده از این ساختار می‌تواند باعث گسترش مواد مورد استفاده و کاربردهای جدید در پرینت سه‌بعدی گردد، هزینه مواد اولیه را با حذف فرآیند واسطه کاهش دهد و نرخ خروجی مواد را نسبت به سیستم های رایج بیشتر نماید.

با توجه به مقالات، پرینت سه‌بعدی با استفاده از مواد گرانولی می‌تواند شرایط جدیدی را در زمینه این تکنولوژی ایجاد کند و گستره مواد زیاده‌تر در آن مورد استفاده قرار گیرد. همچنین به علت اینکه محدودیت حجم مواد اولیه وجود ندارد می‌توان قطعات بزرگ را به صورت یکپارچه و بدون توقف تولید نمود. لذا در ادامه به بررسی تحلیلی از عملکرد مجموعه اکسترودر پرداخته می‌شود تا با استفاده از آن بتوان مشخصات این سیستم را شناسایی نمود و پس از آن، به صورت عملیاتی مورد استفاده قرار داد.

۳- تحلیل جریان مواد در اکسترودر

اکستروژن (Extrusion) یکی از مهمترین فرآیندهای مربوط به مواد پلاستیکی می‌باشد. به صورت سالانه این نوع ماشین ها در حدود ۱۱۴ میلیون تن مواد پلاستیک استفاده میکنند [6]. در این فرآیند یک پلیمر در حالت ذوب شده و با اعمال نیرو از یک قالب عبور داده میشود تا یک شکل خاص به صورت پیوسته با سطح مقطع ثابت تولید شود. (شکل ۱)



شکل ۱) شماتیک اکسترودر با یک مادون [۷]

به منظور طراحی یک اکسترودر، نیاز به بررسی عملکرد آن از طریق تحلیل مواد مذاب در قسمت انتهایی آن وجود دارد. دبی مورد نظر و فشار ایجاد شده در انتهای اکسترودر پارامترهایی هستند که میبایست استخراج شوند تا با نیاز تعیین شده پرینت سه‌بعدی مطابقت پیدا کنند. هر دو مورد بستگی به سرعت چرخش مادون خواهد داشت. در فرآیند اکستروژن، هر چه مواد در راستای مادون جلو میرود، مقدار بیشتری از ماده دچار تغییر فاز میشود و از حالت جامد به حالت مایع تبدیل میگردد. (شکل ۱۳)



شکل ۲) روند تبدیل مواد گرانولی از حالت جامد به حالت مذاب

والکنایز و همکارانش [4] در سال ۲۰۱۳ روش پرینت با استفاده از ماردون را معرفی نمودند. ایشان با معرفی روش FDM به عنوان روشی شناخته شده در زمینه پرینت سه‌بعدی و مواد فیلامنتی رایج در این روش، استفاده از گرانول ها را برای این منظور مطرح کردند زیرا مواد اولیه در ابتدا به صورت گرانولی موجود است. استفاده از گرانول برخی از محدودیت های تولید فیلامنت را پوشش میدهد که میتوان به تلورانس دقیق تولید ماده و عدم امکان استفاده از گستره مواد موجود اشاره نمود. به صورت کلی، سه روش برای اکسترودر نمودن مواد معرفی شده و مورد بررسی قرار گرفته است.

۱- استفاده از فیلامنت: در حالت استفاده از فیلامنت، مواد اولیه مورد استفاده به شکل رشته هایی از مواد مورد نظر هستند که با تلورانس دقیق در قطر آن ساخته میشوند. این مواد به سمت قسمت ذوب کننده فشار داده میشود که وجود تغییرات در قطر آن میتواند باعث مشکل گیر کردن فیلامنت، بالا آمدن مواد مذاب و ایجاد کمانش در آن شود.

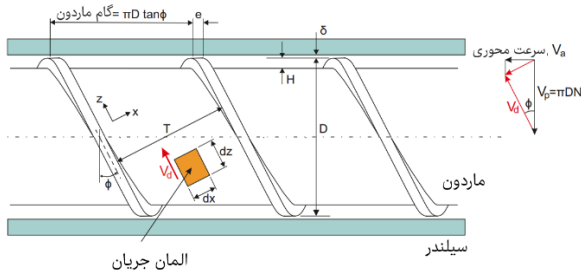
۲- استفاده از یک سرنگ: مورد دیگر استفاده از یک سرنگ برای پرینتر است. این حالت معمولا در شرایطی استفاده می‌شود که مواد در یک فرآیند شیمیایی به صورت جامد در می‌آیند که بیشتر در مواد پزشکی دیده میشود. مهمترین مزیت این سیستم در مقایسه با سیستم فیلامنتی، استفاده از مواد گرانولی در حجم مورد نیاز قطعه و عدم پیچیدگی ساختار آن می‌باشد. در مقابل، این سیستم ضعف هایی دارد. از جمله:

- لزوم دمای بالای سرنگ برای ذوب همه مواد و کاهش کیفیت مواد داخل آن (degrade)
- ویسکوزیته‌های متفاوت به علت عدم یکنواختی توزیع دما
- نیاز به تغذیه مجدد در پرینت قطعات بزرگ
- امکان متوقف شدن فرآیند به علت هوای محبوس شده و وجود هوا در مواد پرینت شده.

۳- استفاده از اکسترودر: این مکانیزم به صورت رایج در فرآیندهای تولید پلاستیک به منظور ساخت ممتد یک پروفیل ثابت مورد استفاده قرار میگیرد. این مکانیزم دارای مزیت هایی است که در ادامه بررسی میگردد.

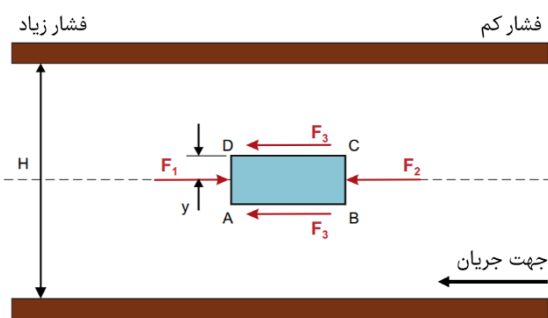
- امکان استفاده مستقیم از مواد گرانولی موجود
- قابلیت تولید ممتد
- وجود گستره زیاد از مواد پلاستیکی قابلیت استفاده
- حفظ کیفیت پلیمرها به دلیل انتقال گرمای کنترل شده
- قابلیت همگن سازی ماده در هنگام خروج مواد
- خروج هوای محبوس در مکانیزم و عدم تاثیر در خروجی

نتو و همکارانش [5] در سال ۲۰۲۱ مقاله ای مروری در رابطه با پرینت سه‌بعدی مواد گرانولی با استفاده از تجهیزات پیچی منتشر نمودند. تمرکز این مقاله بر روی ساخت افزایشی اکستروژنی است با این تفاوت که مواد اولیه به صورت گرانول مورد استفاده



شکل ۴) المان گیری برای حرکت سیال در داخل اکسترودر
• جریان ناشی از فشار:

در این قسمت کانال با جریانی مواجه است که به وجود آورنده آن تفاوت فشار می‌باشد. در صورتی که المان ABCD در شکل ۴ در نظر گرفته شود، نیروهای اعمالی به این المان بررسی می‌گردد:



شکل ۴) المان گیری برای بررسی جریان ناشی از گرادیان فشار

$$F_1 = \left(P + \frac{\partial P}{\partial z} * dz \right) y dx, F_2 = P y dx \quad (6)$$

$$F_3 = \tau_y dz dx$$

در معادله (۶)، P فشار سیال در محل المان است و τ_y تنش برشی آن می‌باشد. در صورت رسیدن سیال به تعادل، نیروها نیز در حال تعادل خواهند بود. در صورتیکه سیال به عنوان سیال نیوتونی فرض شود، مقدار تنش را میتوان به نرخ برش با ویسکوزیته مرتبط ساخت. نرخ برش نیز تابعی از سرعت خواهد بود.

$$\tau_y = \eta \dot{\gamma} = \eta \frac{dV}{dy} \rightarrow y \frac{dP}{dz} = \eta \frac{dV}{dy} \quad (7)$$

با انتگرال گیری از دو طرف، میتوان به دبی فشاری رسید.

$$Q_p = - \frac{\pi D H^3 \sin^2 \phi}{12 \eta} \frac{dP}{dL} \quad (8)$$

• دبی ناشی:

این دبی از مقدار لقی بین ماردون و سیلندر عبور میکند و معادلات آن به علت ماهیت ایجاد آن یعنی فشار، مانند قبل است. تنها میبایست مقادیر آن به صورت متناسب جایگزین گردد.

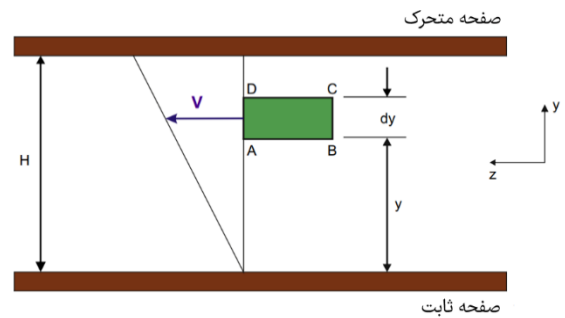
$$Q_L = - \frac{\pi^2 D^2 \delta^3}{12 \eta e} \tan \phi \frac{dP}{dL} \quad (9)$$

در نهایت مقدار دبی خروجی از اکسترودر از جمع جبری موارد استخراج شده بدست می‌آید:

سه عامل برای بدست آوردن دبی نهایی اکسترودر مورد بررسی قرار خواهد گرفت. جریان درگ ناشی از وجود پره روی ماردون، جریان ناشی از فشار به علت افزایش فشار در انتها و جریان ناشی به علت وجود لقی بین ماردون و سیلندر. بدست آوردن معادلات در خروجی با این فرض انجام می‌شود که در ناحیه آماده سازی (Metering)، مذاب دارای ویسکوزیته ثابت است و جریان به صورت همدم در یک کانال عریض با عمق کم می‌باشد. (نسبت عمق به عرض کانال کم است.)

• جریان درگ:

در این جریان فرض می‌شود که مذاب بین دو صفحه موازی در حال حرکت است. (شکل ۳)



شکل ۳) المان سیال در حرکت بین دو صفحه موازی

برای المان کوچک ABCD مقدار نرخ جریان به صورت معادله (۱) بدست می‌آید و فرض میشود که سرعت در بین این دو صفحه به صورت خطی تغییر میکند:

$$dQ = V \cdot dy \cdot dx, V = V_d \left[\frac{y}{H} \right] \quad (1)$$

با جایگذاری سرعت در معادله دبی، و انتگرال از آن میتوان به دبی کل رسید.

$$Q_d = \int_0^H \int_0^T V_d \left[\frac{y}{H} \right] \cdot dy \cdot dx = \frac{1}{2} THV_d \quad (2)$$

معادله بدست آمده به صورت کلی دبی را بین دو صفحه توصیف میکند. حال باید شرایط اکسترودر را با این شرایط تطبیق داد و معادله مخصوص به اکسترودر را استخراج نمود. در **Error!** **Reference source not found.** مشخصات مربوط به اکسترودر و ابعاد گذاری های آن آورده شده است.

$$V_d = \pi D N \cos \phi \quad (3)$$

مقدار عرض کانال با توجه به گام ماردون و مشخصات هندسی به صورت معادله (۴) بدست می‌آید:

$$T = (\pi D \tan \phi - e) \cos \phi \quad (4)$$

در بیشتر اوقات مقدار e که ضخامت پره ها می‌باشد نسبت به عبارت $\pi D N \tan \phi$ کوچک است و میتوان از آن صرف نظر کرد و معادله دبی به شکل ساده تری بیان میشود.

$$Q_d = \frac{1}{2} \pi^2 D^2 N H \sin \phi \cos \phi \quad (5)$$

مقدار نرخ برشی در محدوده آماده سازی برابر یا $\left[\frac{V_d}{H} \right]$ می‌باشد.

جدول ۱) متغیرهای معادله، توضیحات و واحد آن‌ها

واحد	توضیحات	پارامتر
mm	قطر سیلندر	D
Rev/s	سرعت ماردون	N
Pa.s	ویسکوزیته	η
mm	عمق ماردون در قسمت نهایی	H
درجه	زاویه حمله لبه‌ها در ماردون	ϕ
Pa	فشار کاری	P
m	طول کل سیلندر	L
m^2	سطح داخلی سیلندر	A

۴- حل مجموعه معادلات و بررسی نتایج

به منظور شبیه‌سازی و بدست آوردن نتایج، مشخصات سیلندر و ماردون مورد نظر برای تست‌های آزمایشگاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد. قطر سیلندر ۱۲ میلی‌متر، عمق ماردون در قسمت انتهایی ۱/۳۵ میلی‌متر، زاویه حمله لبه‌ها در ماردون ۱۷/۶۵ درجه و طول کل سیلندر ۱۹۰ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود.

در معادلات به منظور بدست آوردن مجهول‌ها، نیاز به فرض نمودن مقدار دبی خروجی از مجموعه می‌باشد. بدین منظور از داده پرینت سه‌بعدی یک قطعه معیار با روش فیلامنتی استفاده گردیده است؛ زیرا در ابتدا هدف، پرینت قطعه با همان مشخصات پرینترهای رایج می‌باشد. برای ساخت این قطعه، پنج ساعت و ۴۵ دقیقه زمان صرف گردید و مقدار ماده مصرفی ۹۴/۲ گرم بوده است. با توجه به چگالی ماده، مقدار دبی موثر در معادله ۲۲ بدست می‌آید.

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{9.42 * 10^{-5} m^3}{20700 s} = 4.55 * 10^{-9} \frac{m^3}{s} \quad (15)$$

با توجه به شرایط حل معادلات و روند اشاره شده، مقدار فشار کاری مجموعه در هنگام پرینت در محل نازل و مقدار مربوط به گشتاور مورد نیاز بر حسب قطر نازل خروجی به ترتیب در شکل ۵ و شکل ۶ نشان داده شده است. همچنین در شکل ۷ گشتاور مورد نظر ماردون بر حسب قطر نازل آورده شده است.

$$Torque = 1.26d^3 - 0.7d^2 + 0.15d + 0.03 \quad (16)$$

در معادله ۱۶ رابطه گشتاور بر حسب قطر بدست آمده است. واحد گشتاور، نیوتن-میلی‌متر و واحد قطر میلی‌متر می‌باشد. محدوده قطر نازل بر اساس قطرهای رایج موجود در پرینت سه‌بعدی انتخاب گردیده است.

در قطرهای کم، با توجه به سرعت‌های بدست آمده، مشکلی بابت ایجاد سرعت وجود ندارد، اما در این قطرها، فشار کاری بسیار بالا است و در نتیجه این فشار بالا منجر به نیروی محوری زیاد به سیستم موتور-گیربکس خواهد شد و با توجه به مقدار تحمل نیروی مجاز سیستم‌های رایج در این زمینه، کوچک‌ترین قطر مورد استفاده برای ماده ABS در پرینت سه‌بعدی گرانولی، ۰/۱۵ میلی‌متر خواهد بود و کوچکترین کردن این مقدار، به سیستم آسیب وارد میکند. اما هرچه قطر افزایش پیدا کند، فشار کاری و به تبع آن نیروی محوری ماردون کاهش پیدا خواهد کرد اما نیاز به نیروی محرکه قوی تری وجود دارد تا بتواند بر

$$Q_L = \frac{1}{2} \pi^2 D^2 N H \sin \phi \cos \phi - \frac{\pi D H^3 \sin^2 \phi}{12 \eta} \frac{dP}{dL} - \frac{\pi^2 D^2 \delta^3}{12 \eta e} \tan \phi \frac{dP}{dL} \quad (10)$$

در فرآیندهای ساخت با دقت مناسب، مقدار دبی نشتی در نظر گرفته نمی‌شود. همچنین گرادیان فشار به صورت خطی در نظر گرفته خواهد شد. با وجود اینکه تحلیل‌ها در محدوده آماده سازی انجام شده است اما به صورت تقریبی می‌تواند برای تمام اکسترودر استفاده شود.

$$\frac{dP}{dL} = \frac{P}{L} \quad (11)$$

مقدار L مربوط به طول اکسترودر می‌باشد.

هنگامیکه یک قالب به اکسترودر متصل می‌شود، نیازمندیهای هر کدام با دیگری تفاوت دارد. اکسترودر زمانی دارای خروجی بیشینه است که فشار خروجی کم باشد. از طرفی خروجی اکسترودر ورودی قالب است و هر چه فشار آن بیشتر باشد، خروجی از قالب بیشتر خواهد بود. خروجی قالب، یعنی دبی آن با فرض نیوتونی بودن سیال، به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$Q = KP \quad (12)$$

که در آن K مربوط به مشخصه قالب می‌باشد و مقدار آن برای قالبی به شعاع R و طول L_d برابر است با: $K = \frac{\pi R^4}{8 \eta L_d}$ با جایگزین کردن معادله مربوط به قالب در معادله اکسترودر، این نقطه کاری شناسایی خواهد شد و فشار کاری بدست می‌آید.

$$P_{op} = \frac{2 \pi \eta D^2 N H \sin \phi \cos \phi}{\left(\frac{R^4}{2 L_d}\right) + \left(\frac{D H^3 \sin^2 \phi}{3 L}\right)} \quad (13)$$

گشتاور ماردون

یکی از موارد مربوط به طراحی، اطلاع از مقدار گشتاور مورد نیاز برای انتقال مواد گرانولی، ذوب نمودن آن و خروج آن از اکسترودر می‌باشد. این مقدار برای انتخاب موتور مناسب به منظور چرخش ماردون لازم است و در صورت نیاز و با توجه به سرعت پایین کار، امکان استفاده از گیربکس برای اتصال به موتور نیز وجود دارد تا بتوان موتور کوچکتری را انتخاب نمود. گشتاور را میتوان به صورت مستقیم از عبارت‌های استخراج شده در قسمت دبی بدست آورد و نیروی اصطکاکی مواد مذاب داخل سیلندر را به گشتاور مورد نیاز تبدیل نمود. در نتیجه مقدار نهایی گشتاور از معادله (۱۴) بدست می‌آید.

$$T_q = \left(\pi D N \cos \phi \frac{\eta}{H} + \frac{H}{2} \frac{dP}{dL} \sin \phi \right) \frac{AD}{2} \quad (14)$$

در جدول ۱ پارامترهای مورد استفاده در معادلات به همراه توضیحات و واحد آن‌ها آورده شده است. در این بین مقدار قطر سیلندر، عمق ماردون، طول کل سیلندر و سطح داخلی سیلندر مشخص است و مابقی موارد میبایست از معادله مشخصه اکسترودر و نمودار خواص ماده بدست بیاید.

یک آزمایش تجربی بود استخراج گردید. این مقادیر به صورت مستقیم در طراحی، ساخت و خرید اجزا موثر خواهد بود. با بررسی خروجی‌ها، نتیجه به اینصورت بدست آمد که به علت ماهیت ماردون و سیلندر و فشار کاری بالا، پرینت سه‌بعدی با قطرهای نازل کمتر از ۰/۱۵ میلی‌متر میسر نیست و باعث آسیب به سیستم مکانیکی خواهد شد. همچنین مزیت این روش در ساخت قطعات بزرگ خواهد بود که زمان ساخت را کاهش خواهد داد.

در ادامه این کار، ساخت تجهیزات ماردون و سیلندر در دستور کار قرار دارد تا بتوان نتایج بدست آمده در معادلات را با نتایج تجربی مقایسه نمود. همچنین پس از نهایی شدن آزمایش‌های اولیه، مجموعه ساخته شده بر روی دستگاه پرینت سه‌بعدی و نادر ۳۵۰ ساخت شرکت آیدیزاین (idesign3d.ir) نصب می‌گردد تا آزمایش‌های مربوط به ساخت قطعات سه‌بعدی در آن انجام گیرد و خواص و دقت قطعات مورد بررسی و مقایسه قرار گیرد.

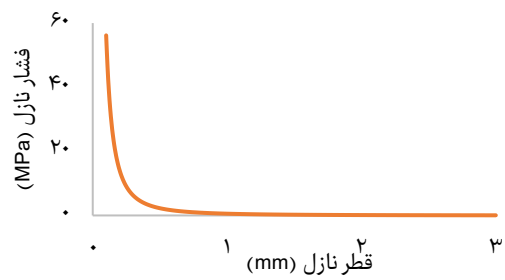
تاییدیه اخلاقی: بدینوسیله تایید می‌نماید که این مقاله حاصل تحقیق انجام شده توسط نویسندگان است و در انجام آن کدهای اخلاقی رعایت شده است.

تعارض منافع: بدینوسیله تایید می‌نماید که در انجام این تحقیق تعارض منافع وجود نداشته است.

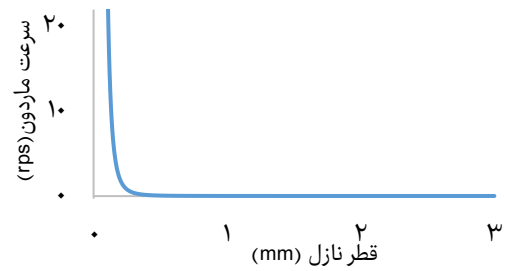
منابع مالی: این تحقیق با حمایت ستاد توسعه فناوری‌های فتونیک، لیزر، مواد پیشرفته و ساخت انجام گردیده است.

مراجع

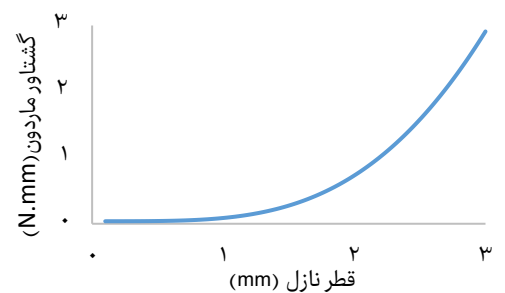
- 1- Groover MP. Fundamentals of modern manufacturing: materials processes, and systems: John Wiley & Sons; 2007.
- 2- Liu S, Zhao P, Wu S, Zhang C, Fu J, Chen Z. A Pellet 3D Printer: Device Design and Process Parameters Optimization. *Advances in Polymer Technology*. 2019;2019:5075327.
- 3- Whyman S, Arif KM, Potgieter J. Design and development of an extrusion system for 3D printing biopolymer pellets. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;96(9):3417-28.
- 4- Valkenaers H, Vogeler F, Ferraris E, Voet A, Kruth J-P, editors. A novel approach to additive manufacturing: screw extrusion 3D-printing. *Proceedings of the 10th International Conference on Multi-Material Micro Manufacture*; 2013: Research Publishing; Singapore.
- 5- Netto JM, Idogava HT, Santos LEF, de Castro Silveira Z, Romio P, Alves JL. Screw-assisted 3D printing with granulated materials: a systematic review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021:1-17.
- 6- Marschik C, Roland W, Miethlinger J. A network-theory-based comparative study of melt-conveying models in single-screw extrusion: A. isothermal flow. *Polymers*. 2018;10(8):929.
- 7- Crawford RJ, Martin PJ. *Plastics engineering*: Butterworth-Heinemann; 2020.



شکل ۵) فشار خروجی مواد در نازل بر حسب قطر آن



شکل ۶) سرعت ماردون مورد نیاز برای تامین دبی بر حسب قطر نازل



شکل ۷) گشتاور مورد نیاز ماردون بر حسب قطر نازل استفاده شده

اصطکاک ناشی از گردش ماردون به علت سرعت کم غلبه نماید. در نتیجه با توجه به محاسبات و نتایج بدست آمده، پرینت سه‌بعدی گرانولی نسبت به حالت فیلامنتی می‌بایست از قطرهای بزرگتری استفاده نماید که این مورد ساخت قطعات با ظرافت بیشتر را برای روش گرانولی محدود خواهد کرد اما این سیستم میتواند به صورت قابل توجهی خروجی دبی بالایی را در قطرهای زیاد ایجاد نماید که برای قطعات بزرگ می‌تواند مزیت زمانی زیادی داشته باشد.

۵- جمع‌بندی

در این مقاله بر روی روش پرینت سه‌بعدی با مواد گرانولی از جنس ABS تحقیق و بررسی قرار گرفت تا بتوان شرایط آن را نسبت به مواد مرسوم که به صورت فیلامنتی است، تشخیص داد.

در ادامه معادلات، مکانیزم جریان خروجی و معادلات حاکم بر آن مورد توجه قرار گرفت و فشار کاری، سرعت ماردون و گشتاور مورد نیاز برای گردش ماردون برای یک دبی ثابت که برگرفته از