



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

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Salehi M M<sup>1</sup>

Movahhedy M R<sup>1\*</sup>

#### How to cite this article

Salehi M M, Movahhedy M R. Experimental and Analytical Effect of Nuzzle Diameter on Screw Torque and Operating Pressure in Pellet 3D Printing. Modares Mechanical Engineering. 2023; 23(04):265-273.

### 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. At the end, the experimental tests on designed system are done and the result approved the trends of theoretical data.

**Keywords** 3D Printing, Pellet, Extruder, Torque, Operating Pressure, Experimental Tests

### CITATION LINKS

1- Fundamentals of modern manufacturing 2- A pellet 3D printer: device design and process parameters optimization 3- Design and development of an extrusion system for 3D printing biopolymer pellets 4- A novel approach to additive manufacturing: screw extrusion 3D-printing 5- Screw-assisted 3D printing with granulated materials: A systematic review 6- A network-theory-based comparative study of melt-conveying models in single-screw extrusion .7- Processing of plastics 8- Extrusion: the definitive processing guide and handbook

<sup>1</sup> Faculty of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology

#### \*Correspondence

Address Sharif University of Technology, Azadi Ave, Tehran, Iran  
movahhed@sharif.edu  
mm.salehi@mech.sharif.edu

#### Article History

Received: February 10, 2023

Accepted: March 13, 2023

ePublished: April 25, 2023

## بررسی تجربی و نظری اثر قطر نازل استفاده شده در فرآیند پرینت سه‌بعدی گرانولی بر روی گشتاور ماردون و فشار کاری ماده خروجی

محمد مهدی صالحی<sup>۱</sup> محمدرضا موحدی<sup>۱\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

### چکیده

امروزه استفاده از پرینت سه‌بعدی به منظور نمونه سازی به خوبی در صنعت شناخته شده است و تلاش ها در این جهت است که بتوان قطعات عملکردی را نیز در دایره قابلیت های این تکنولوژی وارد نمود تا وسعت عملکردی آن بیش از گذشته شود و جایگزین روش های 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 محدودیت ها، استفاده از مواد اولیه گرانولی مورد توجه قرار دارد. در این مقاله مواد اولیه گرانولی با جنس ABS که دارای کاربرد فراوانی در صنعت می باشد انتخاب گردیده است و تحلیل سیستم اکسترودر با قابلیت استفاده از مواد اولیه گرانولی مورد توجه قرار گرفته است. همچنین ویژگی های عملکردی اکسترودر شامل فشار کاری مجموعه، سرعت چرخش مورد نیاز ماردون و گشتاور لازم برای چرخش آن برای یک دبی ثابت واقعی استخراج شده است که می تواند پایه ای در شناخت بهتر این سیستم باشد و در نهایت تست های آزمایشگاهی بر روی مجموعه طراحی شده اکسترودر، مادون و سیستم محرکه به همراه سیستم حرارتی آن انجام گردید که نتیجه آن روند دیده شده در معادلات نظری را تایید می کند

**کلیدواژه ها:** پرینت سه‌بعدی، مواد گرانولی، اکسترودر، گشتاور، فشار کاری،

تست تجربی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۲

\* نویسنده مسئول: movahhed@sharif.edu

### ۱- مقدمه

روش های ساخت افزایشی گروهی از روش های نوین ساخت هستند که به سرعت در حال توسعه بوده و جایگاه خود را در صنایع خودروسازی، هوافضا و پزشکی باز کرده اند، به گونه ای 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 روش ها برای پرینت سه‌بعدی، روش مبتنی بر اکستروژن (Fused Deposition Modeling) می باشد که در آن یک پلیمر رشته ای ذوب می شود و به صورت لایه لایه، شکل مورد نظر ساخته می شود<sup>[۱]</sup>. این دستگاه به علت کاربر پسند بودن آن به علت راحتی کار و هم چنین قیمت به نسبت مناسب خدمات آن، مورد توجه بیشتر می باشد و سعی می گردد تا مواد و ویژگی های جدید به آن اضافه شود تا بتواند گستره بیشتری از خدمات را پوشش دهد و نیاز به دستگاه های گران قیمت و پیچیده را کم نماید.

در پرینترهای سه‌بعدی رایج، از فیلامنت های یک کیلوگرمی استاندارد به قطر ۱/۷۵ میلی متر برای ساخت قطعات استفاده می شود. البته فیلامنت های سه کیلوگرمی نیز موجود هستند که بیشتر دارای قطر ۳ میلی متر هستند. در این فرآیند رشته ای فیلامنت با استفاده از یک کشنده که در مجموعه اکسترودر تعبیه شده است به داخل میله اکسترودر وارد می شود و پس از رسیدن به حرارت مورد نظر توسط گرم کن های تعبیه شده بر روی میله از نازل خارج شده و قطعه تشکیل می شود.

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

- محدود بودن وزن برای پرینت قطعات بزرگ.
- اتلاف رشته های باقی مانده از هر بسته پس از ساخت
- قیمت حدود ده برابری این مواد نسبت به مواد گرانولی
- عدم تنوع مواد در فیلامنت های رایج

هدف از این تحقیق، بررسی سیستم های پرینت بدون نیاز به فیلامنت های رایج می باشد 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 مهم ترین 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 می شود. سپس بر روی تحلیل اکسترودر و معادلات حاکم بر جریان ماده تمرکز خواهد شد و در انتها خروجی های مورد نظر برای بررسی عملکرد پرینت سه‌بعدی گرانولی ارائه خواهد گردید.

### ۲- مرور ادبیات

لیو و همکارانش<sup>[۲]</sup> 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 روش های ساخت مناسب این مواد دارد. از میان روش های 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 رایج ترین این پلیمرها دانست که معمولا به صورت فیلامنت در می آیند و در فرآیند مورد استفاده قرار می گیرند. 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 می شوند.

مقایسه با سیستم فیلامنتی، استفاده از مواد گرانولی در حجم مورد نیاز قطعه و عدم پیچیدگی ساختار آن می‌باشد. در مقابل، این سیستم ضعف‌هایی 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 مزیت‌هایی است که در ادامه بررسی می‌گردند.

- 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 مقاله‌ای 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 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 سیستم‌های 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 ماشین‌ها 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)

وایمن و همکارانش [3] 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 گستره 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.

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 گرانول‌ها را برای این منظور مطرح کردند زیرا مواد اولیه در ابتدا به صورت گرانولی موجود است. استفاده از گرانول برخی از محدودیت‌های 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 رشته‌هایی از مواد مورد نظر هستند که با تلورانس دقیق در قطر آن ساخته می‌شوند. این مواد به سمت قسمت ذوب‌کننده فشار داده می‌شود که وجود تغییرات در قطر آن می‌تواند باعث مشکل‌گیر 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 معمولاً 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

برای المان کوچک ABCD مقدار نرخ جریان به صورت معادله (۱) بدست می آید و فرض می شود که سرعت در بین این دو صفحه به صورت خطی تغییر می کند:

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

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 می کند. حال باید شرایط اکسترودر را با این شرایط تطبیق دارد و معادله مخصوص به اکسترودر را استخراج نمود. در شکل ۴ مشخصات مربوط به اکسترودر و ابعاد گذاری های آن آورده شده است.

$$V_d = \pi DN \cos \phi \quad (3)$$

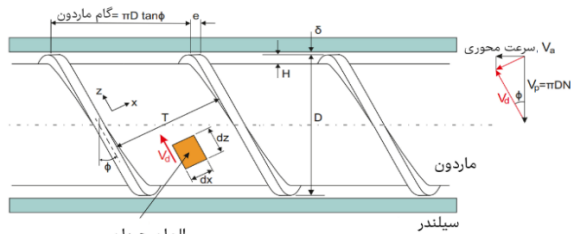
مقدار عرض کانال با توجه به گام ماردون و مشخصات هندسی به صورت معادله (۴) بدست می آید:

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

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

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

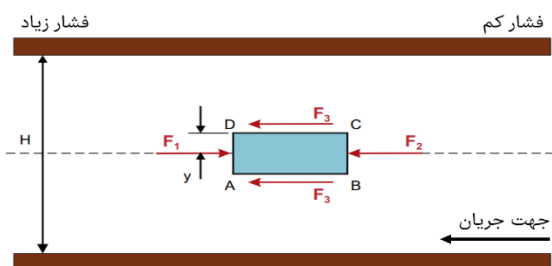
مقدار نرخ برشی در محدوده آماده سازی برابر با  $\left[ \frac{V_d}{H} \right]$  می باشد.



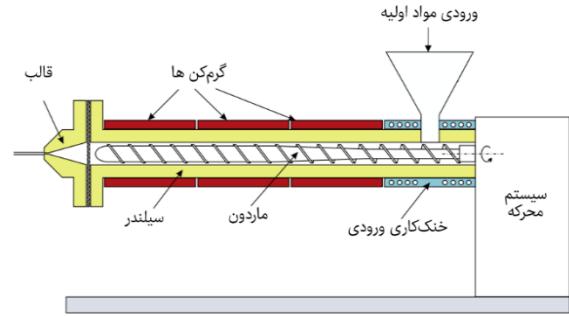
شکل ۴ المان گیری برای حرکت سیال در داخل اکسترودر

• جریان ناشی از فشار:

در این قسمت کانال با جریانی مواجه است که به وجود آورنده آن تفاوت فشار می باشد. در صورتی که المان ABCD در شکل ۵ در نظر گرفته شود، نیروهای اعمالی به این المان بررسی می گردد:

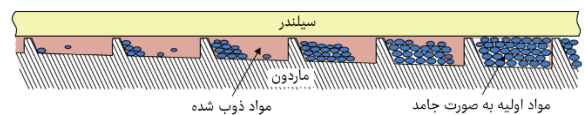


شکل ۵ المان گیری برای بررسی جریان ناشی از گرادیان فشار



شکل ۱ شماتیک اکسترودر با یک ماردون [7]

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 می بایست استخراج شوند تا با نیاز تعیین شده پرینت سه بعدی مطابقت پیدا کنند. هر دو مورد بستگی به سرعت چرخش ماردون خواهد داشت. در فرآیند اکستروژن، هر چه مواد در راستای ماردون جلو می رود، مقدار بیشتری از ماده دچار تغییر فاز می شود و از حالت جامد به حالت مایع تبدیل می گردد. (شکل ۲)

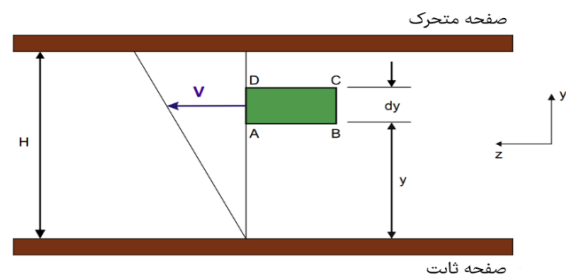


شکل ۲ روند تبدیل مواد گرانولی از حالت جامد به حالت مذاب

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 می شود که در ناحیه آماده سازی (Metering)، مذاب دارای ویسکوزیته ثابت است و جریان به صورت همدمای در یک کانال عریض با عمق کم می باشد. (نسبت عمق به عرض کانال کم است).

• جریان درگ:

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



شکل ۳ المان سیال در حرکت بین دو صفحه موازی

## 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 عبارت های 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 می آید.

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

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.

جدول ۱) متغیرهای معادله، توضیحات و واحد آنها

واحد	توضیحات	پارامتر
mm	قطر سیلندر	$D$
Rev/s	سرعت ماردون	$N$
Pa.s	ویسکوزیته	$\eta$
mm	عمق ماردون در قسمت نهایی	$H$
درجه	زاویه حمله لبه ها در ماردون	$\phi$
Pa	فشار کاری	$P$
m	طول کل سیلندر	$L$
m <sup>2</sup>	سطح داخلی سیلندر	$A$

## ۴- حل مجموعه معادلات و بررسی نتایج

به منظور شبیه سازی و بدست آوردن نتایج، مشخصات سیلندر و ماردون مورد نظر برای تست های آزمایشگاهی مورد استفاده قرار می گیرد. قطر سیلندر ۱۲ میلی متر، عمق ماردون در قسمت انتهایی ۱/۳۵ میلی متر، زاویه حمله لبه ها در ماردون ۱۷/۶۵ درجه و طول کل سیلندر ۱۹۰ میلی متر در نظر گرفته می شود.

در معادلات به منظور بدست آوردن مجهول ها، نیاز به فرض نمودن مقدار دبی خروجی از مجموعه می باشد. بدین منظور از داده پرینت سه بعدی یک قطعه معیار با روش فیلامنتی استفاده گردیده است؛ زیرا در ابتدا هدف، پرینت قطعه با همان مشخصات پرینتر های رایج می باشد. 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 ۱۵ بدست می آید.

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

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

$$F_3 = \tau_y dz dx$$

در معادله (۶)، فشار سیال در محل المان است و  $\tau_y$  تنش برشی آن می باشد. 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.

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

## • دبی نشتی:

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

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

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

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

در فرآیندهای ساخت با دقت مناسب، مقدار دبی نشتی در نظر گرفته نمی شود. همچنین گرادیان فشار به صورت خطی در نظر گرفته خواهد شد. با وجود اینکه تحلیل ها 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 می باشد.

هنگامیکه یک قالب به اکسترودر متصل می شود، 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 می شود:

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

که در آن  $K$  مربوط به مشخصه قالب می باشد 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 می آید.

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

مورد استفاده برای ماده ABS در پرینت سه بعدی 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 واردون کاهش پیدا خواهد کرد اما نیاز به نیروی محرکه قوی تری وجود دارد تا بتواند بر اصطکاک ناشی از گردش واردون به علت سرعت کم غلبه نماید.

در نتیجه با توجه به محاسبات و نتایج بدست آمده، پرینت سه بعدی 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- آزمایش‌های تجربی

در این بخش، ابتدا توضیحاتی در ارتباط با ساخت نمونه آزمایشی از اکسترودر و واردون ارائه می‌گردد و سپس نتایج تجربی بدست آمده آورده می‌شود.

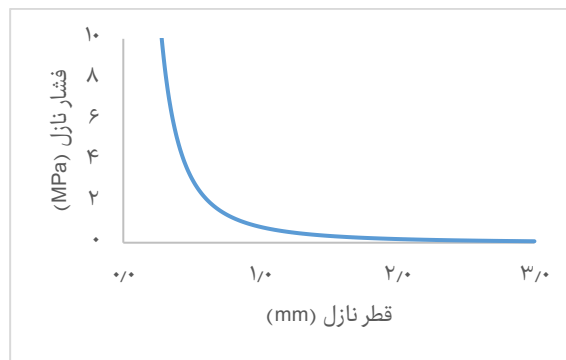
با توجه به عملکرد واردون و لزوم حمل مواد گرانولی و فشرده سازی مواد که در نهایت با وجود گرم‌کن‌های موجود به صورت ذوب شده در می‌آیند، نیاز به تغییر سطح مقطع ریشه واردون می‌باشد. سطح مقطع نزدیک به ورودی مواد کوچک‌تر است و هر چه به انتها نزدیک می‌شود، این سطح مقطع بزرگتر می‌شود. (شکل ۹) طول واردون ۲۰ تا ۳۰ برابر قطر سیلندر می‌باشد و نسبت فشرده سازی که نسبت عمق ورودی به خروجی می‌باشد، ۲ تا ۴ می‌باشد [۸]. همچنین بر روی واردون پره‌هایی وجود دارد که با چرخش واردون، مواد را به سمت نازل حرکت می‌دهد.

مقدار زاویه حمله پره‌ها در عمل، ۱۷/۷ درجه در نظر گرفته می‌شود که انتخاب آن دارای دو دلیل است: [۷]

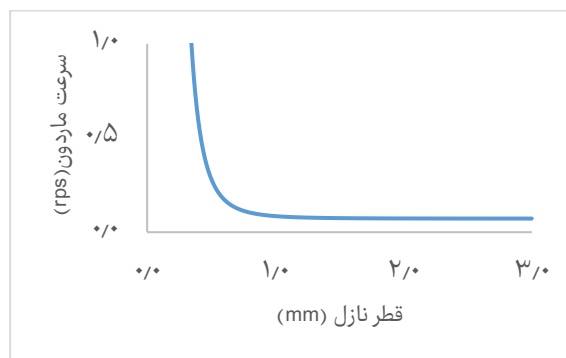
- این عدد مربوط به زاویه ای است که در آن گام پیچ با قطر برابر است و نتیجه آن ساخت راحت تر واردون خواهد بود.
- برای بیشتر طول واردون، انتقال مواد جزو کاربرد اصلی است که در این موارد زاویه های ۱۷ تا ۲۰ درجه بهینه است.

قطر مربوط به اکسترودر بر اساس مقدار دبی مورد نیاز قابل انتخاب است. با توجه به ماهیت فرآیند و نیاز به دبی کم در پرینت سه بعدی می‌بایست قطر کمتر انتخاب شود. از طرفی برای ایجاد ناحیه فشرده سازی، نیاز است که قطر در حدی باشد که بتوان ویژگی‌های مورد نظر را در آن ایجاد نمود. لذا با مشورت از سازندگان واردون، قطر واردون ۱۲ میلی‌متر انتخاب گردید.

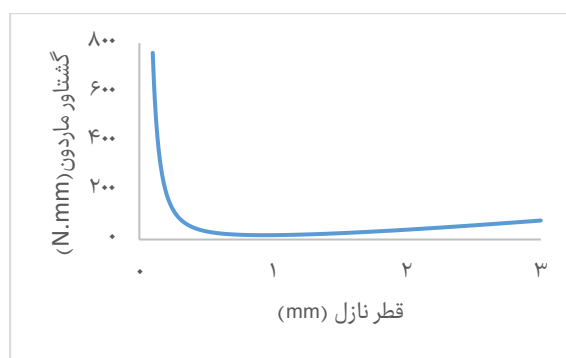
به منظور مقایسه بهتر بخش نظری با تجربی، از عدد ۲۰ به جای ۴/۵۵ استفاده می‌گردد. با توجه به شرایط حل معادلات و روند اشاره شده، مقدار فشار کاری مجموعه در هنگام پرینت در محل نازل و مقدار مربوط به گشتاور مورد نیاز بر حسب قطر نازل خروجی به ترتیب در شکل ۶ و ۷ نشان داده شده است. همچنین در شکل ۸ گشتاور مورد نظر واردون بر حسب قطر نازل آورده شده است.



شکل ۶) فشار خروجی مواد در نازل بر حسب قطر آن



شکل ۷) سرعت واردون مورد نیاز برای تامین دبی بر حسب قطر نازل



شکل ۸) گشتاور مورد نیاز واردون بر حسب قطر نازل استفاده شده

در قطرهای کم، با توجه به سرعت های 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 سیستم های رایج در این زمینه، کوچک ترین قطر



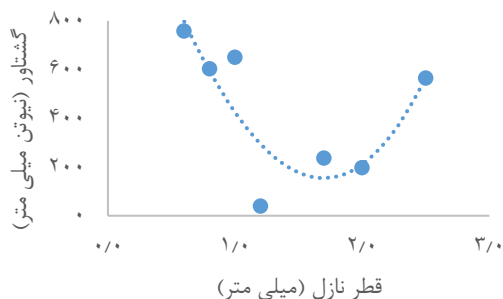
برای رسیدن به داده های نظری موجود، از هفت نازل به قطرهای ۰/۶، ۰/۸، ۱، ۱/۲، ۱/۷، ۲ و ۲/۵ میلی متر استفاده شده است و سرعت، گشتاور و موقعیت زاویه ای موتور با استفاده از رابط کاربری ایجاد شده، به عنوان خروجی مجموعه استخراج گردیده است. همچنین به منظور یافتن دبی جرمی اکسترودر از یک ترازو با دقت دو رقم اعشار استفاده شده است که به صورت متناوب در ارتباط با کامپیوتر اطلاعات را ثبت می نماید.

یکی دیگر از ورودی های سیستم، سرعت مربوط به چرخش ماردون می باشد که از سرعت ۲ دور بر دقیقه آغاز می گردد و به تدریج افزایش می یابد و این افزایش تا زمانی که از لحاظ مکانیکی به سیستم آسیبی وارد نشود بالا می رود. به علت حجم بالای اطلاعات خروجی، بخش کوچکی از اطلاعات دریافت شده به عنوان نمونه در جدول ۲ آورده شده است. این اطلاعات مربوط به نازل ۰/۸ میلی متر با سرعت ۴۰ دور بر دقیقه می باشد.

جدول ۲) متغیرهای معادله، توضیحات و واحد آن ها

موقعیت زاویه ای (پالس)	زمان خواندن موقعیت زاویه ای (ثانیه)	گشتاور (درصد گشتاور نامی)	سرعت (دور بر دقیقه)	زمان خواندن سرعت و گشتاور (ثانیه)
۶۶۸۴۲۵۹	۳۸۸۹۲/۰۹۷	۱۴	۴۱	۳۸۸۹۲/۰۸۱
۶۶۸۴۸۳۹	۳۸۸۹۲/۱۹۰	۱۶	۴۰	۳۸۸۹۲/۱۵۹
۶۶۸۵۳۴۲	۳۸۸۹۲/۲۶۹	۱۷	۳۹	۳۸۸۹۲/۲۲۲
۶۶۸۵۹۶۶	۳۸۸۹۲/۳۶۲	۱۵	۴۰	۳۸۸۹۲/۳۱۵
۶۶۸۶۶۱۶	۳۸۸۹۲/۴۵۶	۱۶	۳۹	۳۸۸۹۲/۴۰۹
۶۶۸۷۱۷۲	۳۸۸۹۲/۵۳۴	۱۴	۴۰	۳۸۸۹۲/۵۱۸
۶۶۸۷۵۸۹	۳۸۸۹۲/۵۹۷	۱۴	۴۰	۳۸۸۹۲/۵۸۱
۶۶۸۸۱۴۷	۳۸۸۹۲/۶۹۰	۱۴	۴۰	۳۸۸۹۲/۶۴۳

با بررسی نتایج بدست آمده، می توان نمودار گشتاور بر اساس قطر نازل را بدست آورد. این نمودار در شکل ۱۲ آورده شده است.



شکل ۱۲) نتایج تجربی گشتاور مورد نیاز ماردون برحسب قطر نازل

## ۶- تحلیل نتایج

به منظور مقایسه بهتر، نتایج تجربی و نظری گشتاور دوران ماردون در یک نمودار آورده می شود. (شکل ۱۳)



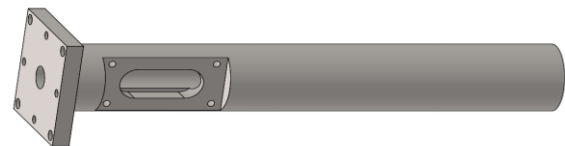
شکل ۹) ماردون طراحی شده

سیلندر مجموعه به صورت کلی ساخت پیچیده ای ندارد و تنها می بایست نکاتی در آن مورد بررسی قرار گیرد.

مورد اول مقدار لقی است که پره می بایست با قطر داخلی داشته باشد. بیشترین قطر پره ها می بایست ۰/۸ میلی متر از قطر سیلندر که مقدار آن ۱۲ میلی متر در نظر گرفته شده است کوچکتر باشد. مورد دیگر نحوه اتصال مجموعه به بدنه و تثبیت آن است زیرا ماردون به موتور متصل می گردد و موتور نیز به سیلندر بسته خواهد شد. در نتیجه می بایست از این قطعه به عنوان اتصال ثابت استفاده نمود.

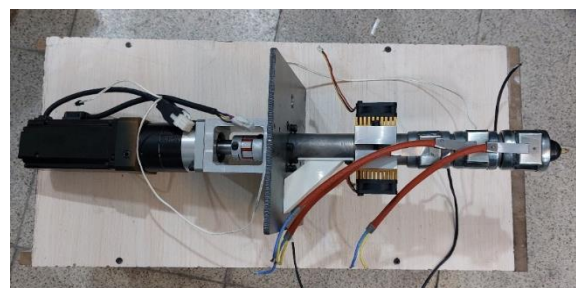
مورد سوم مربوط به سیستم نازل می باشد که می بایست برای خروج مواد به سیلندر بسته شود و نحوه اتصال آن به صورت پیچی بر روی سیلندر خواهد بود. در نهایت اکسترودر نیاز به قطعه ای دارد که مواد اولیه را به ورودی آن هدایت کند و مواد اولیه از طریق آن به مجموعه اضافه بشود. لذا جایی برای اتصال قطعه هدایت کننده مورد نیاز خواهد بود.

لذا با توجه به نکات بالا، طرح سه بعدی قطعه در شکل ۱۰ آورده شده است.



شکل ۱۰) نمای سه بعدی سیلندر

بر اساس اطلاعات بدست آمده از حل نظری مساله، موتور مناسب به منظور چرخاندن ماردون انتخاب گردید و به مجموعه اضافه شد. در نهایت پس از ساخت اجزا و تجهیزات مورد نیاز، مجموعه نازل گرانولی مونتاژ گردید که در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱) مجموعه اکسترودر مونتاژ شده

به منظور انجام آزمایش ها، از مواد گرانولی جنس ABS که در فرآیند تزریق پلاستیک مورد استفاده قرار می گیرد، استفاده شده است.

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.

همچنین مجموعه آزمایشی از یک اکسترودر به همراه سیستم رانش و سیستم حرارتی طراحی و ساخته شد و آزمایش‌های متناسب با فرآیند نظری بر روی آن اجرا گردید و مشاهده شد که روند جواب‌های بدست آمده از آزمایش‌های تجربی با نتایج نظری همخوانی دارد و مرتبه اعداد بدست آمده یکسان می‌باشد.

در ادامه این کار، انجام تست‌های بیشتر با نازل‌هایی با قطر کوچک‌تر در برنامه قرار دارد تا بتوان نتایج بدست آمده در معادلات را با دقت بیشتری مقایسه نمود. همچنین می‌توان خواص مواد پلیمری استفاده شده را با انجام آزمایش‌های رئولوژی بدست آورد و مدلی دقیق‌تر را در معادلات نظری استفاده نمود و در صورت لزوم خواص تراکم‌پذیری ماده را نیز به بخش نظری اضافه نمود. درگام بعد، مجموعه ساخته شده بر روی دستگاه پرینت سه‌بعدی وندار 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.

**تشکر و قدردانی:** از شرکت آسال لیزر ساخت (آیدیزاین) بابت در اختیار قراردادن تجهیزات برای آزمایش‌های تجربی تشکر و قدر دانی می‌گردد.

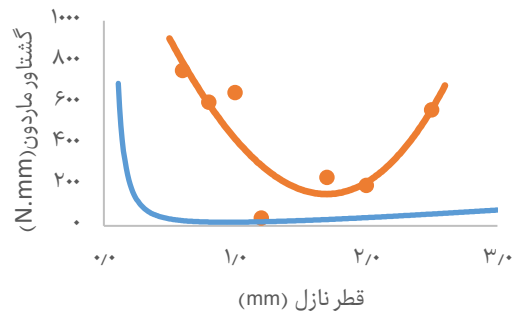
**تاییدیه اخلاقی:** بدینوسیله تایید می‌نماید که این‌مقاله حاصل تحقیق انجام شده توسط نویسندگان است و در انجام آن کدهای اخلاقی رعایت شده است.

**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.

#### منابع

- 1-Groover MP. Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems. John Wiley & Sons; 2020 Jul 15.
- 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; 2019:1-8.
- 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; 96:3417-28.
- 4- Valkenaers H, Vogeler F, Ferraris E, Voet A, Kruth JP. A novel approach to additive manufacturing: screw



شکل ۱۳) مقایسه نتایج تجربی و نظری گشتاور دوران ماردون

در نمودار مقایسه‌ی گشتاورهای مورد نیاز برای گردش ماردون، همانطور که مشاهده می‌شود مرتبه اعداد یکسان هستند و سیر کلی جواب‌های خروجی یکسان است و نمودارها دارای کمینه نسبی هستند با این تفاوت که این کمینه در تحلیل انجام گرفته در قطر نازل حدود ۱ میلی‌متر اتفاق می‌افتد اما در واقعیت این مقدار حدود ۱/۷ میلی‌متر می‌باشد. پیش‌بینی انجام شده برای افزایش گشتاور در قطرهای کم و زیاد نیز در تست‌های تجربی وجود دارد و علت این موضوع وجود دو عامل متضاد برای افزایش گشتاور در دو بازه می‌باشد. عامل اول در قطرهای کم مربوط به افزایش فشار به منظور ایجاد جریان خروجی می‌باشد و عامل دوم در قطرهای زیاد به کاهش سرعت حرکت مواد در ماردون بازمی‌گردد که در نتیجه آن به علت خاصیت ماده، نیاز به نیروی بیشتری خواهد بود. عامل دیگری که می‌تواند تفاوت زیادی در نتایج نظری و تجربی ایجاد کند، بُعد حرارتی و تغییر خواص مواد در حین فرآیند می‌باشد. در هنگام استفاده از نازل با قطر کم، سرعت حرکت مواد زیاد می‌شود تا بتواند دبی مورد نظر را تامین نماید اما این افزایش سرعت سبب می‌گردد تا ماده به دمای تنظیم شده برای خروج از نازل نرسد و به صورت عملی با دمای کمتری از نازل خارج شود؛ لذا گرانبوی ماده بالا خواهد رفت و در نتیجه آن گشتاور مورد نیاز برای حرکت دادن آن افزایش می‌یابد. از طرفی دیگر استفاده از قطر بزرگتر باعث می‌شود که سرعت جریان ماده کاهش پیدا کند و به همین علت نرخ کرنش ماده در خروج از نازل کاهش می‌یابد که این کاهش باعث افزایش ویسکوزیته و در نتیجه افزایش گشتاور خروجی می‌گردد.

#### ۷- جمع‌بندی

در این مقاله بر روی روش پرینت سه‌بعدی با مواد گرانبوی 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 یک آزمایش تجربی بود استخراج گردید. این مقادیر به صورت مستقیم



extrusion 3D-printing. In Proceedings of the 10th international conference on multi-material micro manufacture 2013 (pp. 235-238). Research Publishing; Singapore.

5- Justino Netto JM, Idogava HT, Frezzatto Santos LE, Silveira ZD, Romio P, Alves JL. Screw-assisted 3D printing with granulated materials: A systematic review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021.15:2711-27.

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. Processing of plastics. Plastics engineering. 2020:279-409.

8- Giles Jr HF, Mount III EM, Wagner Jr JR. Extrusion: the definitive processing guide and handbook. William Andrew; 2004.