مجله مهندسی مکانیک مدرس، آبان ۱۳۹٤، دوره ۱۵، شماره ۱۳، ویژه‌نامه مجموعه مقالات کنفرانس، ص‌ص ٤٤٠-٤٤٤

مجموعه مقالات کنفرانس ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته، تهران، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳ و ۱٤ آبان ۱۳۹٤

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مدل‌سازی اکستروژن پلی‌کپرولاکتون در فرآیند ساخت افزودنی به روش FDM در نرم-افزار Ansys-Polyflow

نفیسه شادور[۱]، محسن بدرسمای[۲*]، احسان فروزمهر[۲]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

* اصفهان، صندوق پستی ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱، mohsen.badrossamay@cc.iut.ac.ir

چکیده

فرآیند ساخت قطعات به روش اکستروژن رشته پلیمری با استفاده از حرارت (FDM) از جمله فرآیندهای ساخت افزودنی است که به روش لایه به لایه قطعات را تولید می‌کند. در این فرآیند پارامترهای مختلفی از جمله نرخ حجمی جریان ورودی، هندسه اکسترودر و نازل، و دمای ناحیه ایجاد مذاب در نحوه اکسترود ماده و کیفیت قطعه نهایی تاثیرگذار است. در این تحقیق فرآیند اکستروژن پلیمر در روش ساخت افزودنی FDM برای پلیمر ترموپلاستیک پلی‌کپرولاکتون با استفاده از نرم‌افزار المان محدود انسیس پلی‌فلو جهت مطالعه رفتار جریان مذاب پلیمر، میدان سرعت و تغییرات افت فشار داخل اکسترودر تحت تاثیر تغییر پارامترهای هندسه نازل اکسترودر، سرعت ورودی و دمای ناحیه ایجاد مذاب، مدل‌سازی شده است. همچنین افت فشار اکسترودر با استفاده از یک مدل عددی و به کمک نرم‌افزار متلب محاسبه شده است. با بدست آمدن مدل المان محدود، تاثیر پارامترهای فرآیند بر افت فشار در دو مدل‌سازی عددی و المان محدود با یکدیگر مقایسه شده و مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد با کاهش زاویه و قطر خروجی نازل، میزان افت فشار افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش دمای ناحیه ایجاد مذاب، مقدار افت فشار اکسترودر کاهش و با افزایش سرعت ورودی ماده، افت فشار افزایش پیدا می‌کند.

کلید واژگان: اکستروژن رشته پلیمری با استفاده از حرارت، پلی‌کپرولاکتون، انسیس پلی‌فلو، متلب، افت فشار

Modelling of polycaprolactone extrusion in additive manufacturing process by fused deposition modelling in ansys-polyflow software

Nafiseh Shadvar, Mohsen Badrossamay*, Ehsan Foroozmehr

Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
* P.O.B. 8415683111, Isfahan, Iran, mohsen.badrossamay@cc.iut.ac.ir

ABSTRACT

The process of parts manufacturing with extrusion of polymer filament by heat (Fused Deposition Modelling) is one of the Additive Manufacturing processes which produces the parts layer by layer. In this process, different parameters (such as volumetric flow rate, extruder and nozzle geometry, and temperature of liquefier) affect the extruded material and the quality of the final part. In this study, the polymer extrusion process is modeled in FDM Additive Manufacturing method for polycaprolactone thermoplastic polymer using finite element Ansys-Polyflow software to study the flow behavior of molten polymer, velocity field and the changes of pressure drop inside the extruder by changing the parameters geometry of extruder nozzle, entry velocity and the temperature of liquefier. Also, the extruder's pressure drop was determined with a mathematical model and Matlab software. By obtaining the finite element model, the effect of process parameters on pressure drop in both mathematical and finite element modelling compared with each other and studied. The obtained results indicate that the pressure drop increases by decreasing the angle and outlet diameter of nozzle. As well as with increase of the temperature of liquefier, the amount of extruder pressure drop decreases and with increase of the entry velocity, the pressure drop increases.

Keywords: Ansys-Polyflow, Fused Deposition Modelling, Matlab, Polycaprolactone, Pressure Drop.

۱- مقدمه

ساخت افزودنی[۱] (AM) به دسته‌ای از فرآیندهای تولید اطلاق می‌شود که به وسیله آن‌ها قطعات سه بعدی مستقیما با استفاده از یک فایل طراحی به کمک کامپیوتر[۲] (CAD) و به صورت لایه- لایه ایجاد می‌گردد. قابلیت‌های منحصر بفرد فرآیند ساخت افزودنی نظیر کاهش زمان طراحی تا ساخت قطعه و قابلیت ساخت قطعات با هندسه پیچیده و از جنس‌های خاص باعث شده تا این تکنولوژی‌ها بسیار مورد توجه قرار گیرند. دامنه کاربرد قطعات تولیدی به وسیله این تکنولوژی‌ها بسیار وسیع بوده و حوزه‌های مختلفی نظیر پزشکی، صنعتی، هوافضا و حتی کاربردهای خانگی و فانتزی را شامل می‌شوند [۱]. این فرآیندها از نظر نوع ماده اولیه مورد استفاده، به سه دسته مایع، جامد، و پودر تقسیم‌بندی می‌شوند. فرآیند ساخت قطعات از طریق اکستروژن رشته پلیمری با استفاده از حرارت[۳] (FDM) یک روش ساخت افزودنی براساس ماده جامد است [۲]. در فرآیند FDM قطعه ابتدا به صورت یک مدل سه بعدی در یک نرم‌فزار CAD طراحی شده و به‌صورت فایلی با فرمت STL[۴] ذخیره می‌شود. سپس مدل STL آماده شده، پس از تنظیم پارامترهای تولید مانند جهت ساخت و ضخامت لایه و همچنین پارامترهای نرم‌افزار دستگاه، برای

1. Additive Manufacturing
2. Computer-Aided Design
3. Fused Deposition Modelling
4. Stereo Lithography

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

N. Shadvar, M. Badrossamay, E. Foroozmehr, Modelling of polycaprolactone extrusion in additive manufacturing process by fused deposition modelling in ansys-polyflow software, *Modares Mechanical Engineering*, *Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 440-444, 2015 (in Persian فارسی)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]

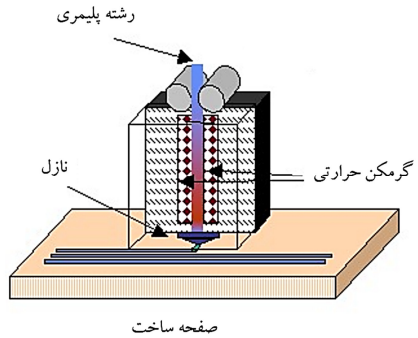
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.13.48.8]

ساخت به دستگاه FDM داده می‌شود [۳]. در شروع فرآیند ساخت، مطابق شکل ۱ رشته پلیمری توسط دو غلتک به داخل ناحیه ایجاد مذاب[1] فرستاده می‌شود. دیواره ناحیه ایجاد مذاب توسط گرمکن حرارتی که در دمایی بالاتر از دمای ذوب پلیمر (T_g) مورد نظر قرار دارد، گرم شده و با این کار پلیمر در این ناحیه به حالت خمیری می‌رسد. سپس با استفاده از فشاری که توسط رشته پلیمری ورودی به آن اعمال می‌گردد، از دهانه نازل اکسترودر خارج می‌شود. پلیمر خروجی با حرکت نازل، روی صفحه ساخت لایه‌نشانی شده و قطعه مورد نظر به صورت لایه به لایه ساخته می‌شود [۴].

پارامترهای موثر بر رفتار جریان مذاب در دستگاه FDM شامل نرخ حجمی جریان ورودی، دمای ناحیه ایجاد مذاب اکسترودر و هندسه اکسترودر و نازل آن است. تغییر اندازه هر کدام از این پارامترها بر نحوه اکسترود ماده و کیفیت قطعه نهایی تاثیرگذار خواهد بود.

اگر چه تاکنون تحقیقات بسیار خوبی در زمینه مدل‌سازی فرآیند FDM صورت گرفته شده است. با این حال مدل‌سازی رفتار جریان مذاب پلیمر در اکسترودرهای مورد استفاده در این فرآیند، تاکنون توسط محققان زیادی مورد مطالعه قرار نگرفته است. بلینی در سال ۲۰۰۲، با مدل‌سازی فرآیند FDM برای مواد سرامیکی و کامپوزیت، دینامیک ناحیه ایجاد مذاب و هندسه دهانه خروجی نازل را با استفاده از معادلات فشار داخل اکسترودر و مدل-سازی المان محدود مورد بررسی قرار داد [۵]. کوزول و سزپانسزکی در سال ۲۰۰۲، فرآیند اکستروژن پلی‌اتیلن را مدل‌سازی کردند و توزیع میدان دمایی این ماده را با نتایج تجربی خود مورد مقایسه قرار دادند [۶]. رامانات و همکاران در سال ۲۰۰۸، رفتار جریان مذاب پلیمر پلی‌کپرولاکتون[2] (PCL) را در یک قالب منحنی شکل در فرآیند FDM با توجه به معادلات افت فشار هندسه کانال، به صورت عددی و المان محدود مدل‌سازی و بررسی کردند [۷]. مارک و جو در سال ۲۰۰۸، تاثیر زاویه و قطر نازل و همچنین ثوابت رئولوژیکی را بر افت فشار پلیمر PCL مورد بررسی قرار دادند [۸]. آگراوال در سال ۲۰۱۴، تاثیر زاویه و قطر خروجی نازل را بر افت فشار PCL برای دو مدل عددی و المان محدود با هم مقایسه کرد [۹].

در بررسی پژوهش‌های پیشین به این نکته می‌توان اشاره کرد که تاکنون تحقیق جامعی پیرامون فرآیند اکستروژن PCL در FDM، جهت بررسی توزیع میدان سرعت و تاثیر تغییرات سرعت ورودی و دما بر افت فشار اکسترودر صورت نگرفته است. در این تحقیق فرآیند اکستروژن پلیمر PCL در دستگاه FDM با استفاده از نرم‌افزار المان محدود انسیس پلی‌فلو[3] جهت مطالعه رفتار جریان مذاب PCL مدل‌سازی شده و معادلات افت فشار اکسترودر با توجه به خواص رئولوژیکی PCL استخراج شده است. در ادامه نتایج تغییرات افت فشار ماده به دست آمده از تحلیل المان محدود با نتایج مدل‌سازی عددی به دست آمده از معادلات افت فشار مقایسه شده است. اثر تغییر زاویه و قطر خروجی نازل اکسترودر، دمای ناحیه ایجاد مذاب و سرعت ورودی ماده بر افت فشار PCL مورد بررسی قرار گرفته است. طبق نتایج به دست آمده، کاهش زاویه و قطر نازل باعث افزایش افت فشار می‌شود. همچنین افزایش دما، کاهش افت فشار و افزایش سرعت ورودی، افزایش افت فشار را نتیجه می‌دهد.



شکل ۱ سیستم اکستروژن در فرآیند FDM [۵]

1. Liquefier
2. PoLyCaproLactone
3. Ansys-Polyflow

۲- شرح مسئله و روش حل

ویسکوزیته پلیمر مذاب به عنوان یک ماده غیرنیوتنی طبق رابطه ۱ تابع نرخ برش و دما است. از این رو در هر دو مدل‌سازی عددی و المان محدود از مدل رئولوژیکی قانون توان[4] برای تابعیت نرخ برش ویسکوزیته و مدل آرنیوس[5] برای تابعیت دمایی ویسکوزیته استفاده می‌شود [۱۰]. هر کدام از این مدل‌ها و وابستگی ویسکوزیته به آن‌ها در روابط (۱) تا (۳) نشان داده شده است [۱۱].

$$\eta(\dot{\gamma},T) = F(\dot{\gamma})H(T) \qquad (۱)$$

$$F(\dot{\gamma}) = k(\dot{\gamma})^{n-1} \qquad (۲)$$

$$H(\mathrm{T}) = \exp\left(\alpha\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_a}\right)\right) \qquad (۳)$$

در روابط بالا n شاخص قانون توان (بدون بعد)، k ثابت پایداری پلیمر ($\mathrm{Pa \cdot s^n}$)، α نسبت انرژی فعال‌سازی ماده به ثابت ترمودینامیکی ($1/\mathrm{K}$)، T دمای کاری (K) و T_a دمای مرجع که در آن ثوابت n و k به دست می‌آیند (K)، می‌باشد.

۲-۱- مدل‌سازی عددی

برای به دست آوردن معادلات فشار، هندسه قالب اکستروژن مطابق شکل ۲ به سه قسمت تقسیم می‌گردد. با استفاده از اصل تعادل برای یک المان، در هرکدام از این سه قسمت می‌توان معادله افت فشار آن‌ها را در روابط (۴)، (۵) و (۶) مطابق زیر به دست آورد [۱۳،۱۲].

$$\Delta P_1 = 2L_1\left(\frac{v}{\emptyset}\right)^{\frac{1}{m}}\left(\frac{m+3}{\left(D_1/2\right)^{m+1}}\right)^{\frac{1}{m}} . e^{\left(\alpha\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_a}\right)\right)} \qquad (۴)$$

$$\Delta P_2 = \frac{m}{3\tan(\alpha/2)}\left(\frac{v}{\emptyset}\right)^{\frac{1}{m}}\left(\frac{1}{D_2^{\frac{3}{m}}}-\frac{1}{D_1^{\frac{3}{m}}}\right)$$
$$\left[\left(D_1/2\right)^2 . 2^{(m+3)}. \qquad (m+3)\right]^{\frac{1}{m}} . e^{\left(\alpha\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_a}\right)\right)} \qquad (۵)$$

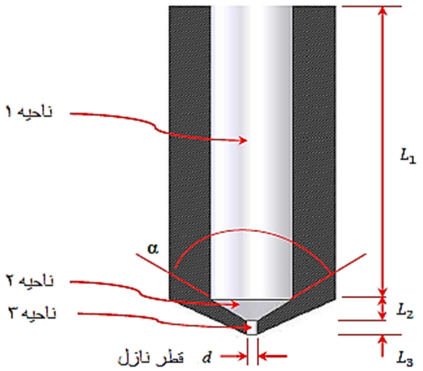
$$\Delta P_3 = 2L_3\left(\frac{v}{\emptyset}\right)^{\frac{1}{m}}\left(\frac{(m+3)\left(D_1/2\right)^2}{\left(D_2/2\right)^{m+3}}\right)^{\frac{1}{m}} . e^{\left(\alpha\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_a}\right)\right)} \qquad (۶)$$

در نهایت افت فشار کلی هندسه مدل طبق رابطه (۷) از مجموع افت فشار سه قسمت به دست می‌آید. در این تحقیق با استفاده از معادلات افت فشار به دست آمده، مدل‌سازی عددی رفتار جریان مذاب PCL در نرم‌افزار متلب[6] انجام شده است.

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 \qquad (۷)$$

4. Power Law Model
5. Arrhenius Model
6. Matlab

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.13.48.8]

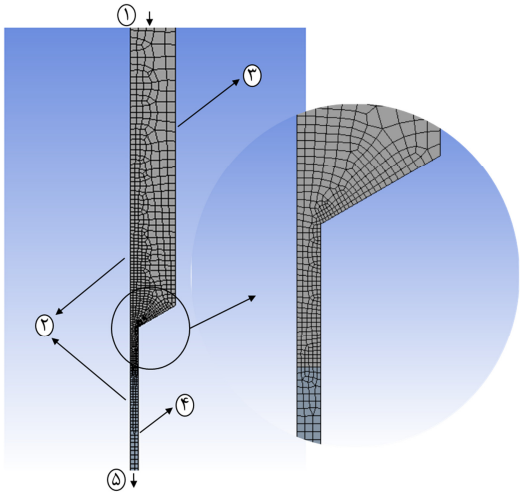


شکل ۲ شماتیک هندسه قالب اکسترودر دستگاه FDM [۸]

۲-۲- مدل‌سازی المان محدود

در این تحقیق برای حل المان محدود مسئله از نرم‌افزار انسیس پلی فلو استفاده شده است. این نرم‌افزار با حل معادلات پیوستگی، مومنتوم و جریان سیال ویسکوز و همچنین با تعریف خواص و مدل رئولوژیکی پلیمر مورد نظر، قابلیت مدل‌سازی جریان پلیمر مذاب را در فرآیند اکستروژن دارد. در این مدل‌سازی با توجه به تقارن مسئله و جهت کاهش تعداد المان‌ها و برای حل سریع‌تر، تنها نیمی از هندسه دو بعدی پلیمر مذاب در قالب اکسترودر مدل شده است. این هندسه از لحاظ شرایط مرزی از دو ناحیه متفاوت تشکیل شده است. ناحیه‌ای که پلیمر درون اکسترودر دستگاه FDM تحت تاثیر گرمکن حرارتی با دمایی بالاتر از دمای ذوب PCL قرار دارد و ناحیه‌ی دیگر که پلیمر نیمه مذاب از نازل خارج شده و تحت تاثیر انتقال حرارت با محیط، جامد می‌شود. در هر کدام از این دو ناحیه مطابق شکل ۳ با توجه به میزان تنش برشی که به ماده اعمال می‌شود، المان‌های با سایزهای مختلف برای مش‌بندی استفاده شده است. تمامی المان‌های به کار رفته از نوع چهارضلعی می‌باشد.

مدل هندسه دو بعدی در انسیس پلی‌فلو جهت تعریف شرایط مرزی برای حل معادلات حرکت و انرژی به صورت یک مسئله غیرهم‌دما و حالت پایدار تعریف می‌شود. مدل هندسی و مرزهای اعمال شده به آن در شکل ۳ نشان داده شده است. این مرزها مطابق جدول ۱ دارای ۵ شرط مرزی جریان و دما هستند.



شکل ۳ مدل هندسی با مش‌بندی و مرزهای اعمال شده در دو ناحیه

جدول ۱ شرایط مرزی جریان و دما

شماره مرز	شرایط مرزی جریان	شرایط مرزی دمایی
۱	نرخ جریان ورودی	دمای ثابت ورودی
۲	صفحه تقارن	صفحه تقارن
۳	شرط عدم لغزش روی دیواره قالب	دمای ثابت روی دیواره
۴	سطح آزاد اکسترود شده	انتقال حرارت با محیط
۵	جریان آزاد خروجی	جریان خروجی

۲-۳- پارامترهای مسئله

در این تحقیق پارامترهای هندسی زاویه و قطر خروجی نازل و همچنین دمای ناحیه ایجاد مذاب و سرعت ورودی ماده به عنوان پارامترهای دستگاه FDM، مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. زاویه نازل بین چهار مقدار ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه و قطر خروجی نازل در اندازه‌های ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴و ۰/۵ میلی‌متر متغیر است. همچنین دمای ناحیه ایجاد مذاب بین مقادیر ۱۲۰، ۱۳۰، ۱۴۰، ۱۵۰و ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت ورودی بین مقادیر ۰/۶، ۰/۸، ۱/۰، ۱/۲و ۱/۴ میلی‌متر بر ثانیه تغییر می‌کند. برای تعیین تاثیر زاویه و قطر نازل، از دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد و برای تعیین تاثیر دما، از قطر نازل ۰/۵ میلی‌متر و زاویه ۱۲۰ درجه استفاده شده است. طول کلی اکسترودر ۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده که در آن، طول خروجی نازل ۱/۵ میلی‌متر می‌باشد. نرخ حجمی جریان ورودی PCL در مدل‌سازی، با توجه به سرعت میانگین ۱/۰ میلی‌متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

طبق آزمایشاتی که رامانات و همکاران جهت به دست آوردن مدل رئولوژیکی قانون توان برای جریان مذاب پلیمر PCL انجام دادند، در دمای ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد، ثوابت قانون توان به‌صورت n=0.233 و k=48785 $\mathrm{Pa \cdot s^n}$ به دست آمد [۱۴،۷]. در این پژوهش نیز مقدار این دو متغیر مطابق مقادیر فوق در معادلات در نظر گرفته شده است.

۳- نتایج و بحث

مدل‌سازی فرآیند اکستروژن پلیمر PCL با استفاده از خواص ماده و شرایط مرزی مسئله در نرم‌افزار انسیس پلی‌فلو انجام شده و پارامترهای سرعت جریان و فشار داخل اکسترودر به عنوان خروجی مسئله معرفی شده‌اند. شکل ۴ توزیع میدان سرعت PCL در قالب اکسترودر و خروجی آن را برای سرعت ورودی ۱/۰ $\frac{\mathrm{mm}}{\mathrm{s}}$، زاویه نازل ۱۲۰ درجه، قطر ۰/۵ mm، و دمای ۱۴۰°C نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، در ناحیه ایجاد مذاب سرعت جریان تغییرات ناچیزی داشته و تقریبا مقداری ثابت است. در قسمت نازل اکسترودر تا قبل از خروج ماده، با کوچک شدن قطر نازل بیشترین حد سرعت جریان برای PCL دیده می‌شود و سرعت بحرانی است. در واقع در این ناحیه بیشترین میزان تنش برشی به ماده وارد می‌شود.

شکل ۵ نمودار تغییرات افت فشار را برحسب زاویه و قطر نازل در مدل‌سازی المان محدود با استفاده از انسیس پلی‌فلو نشان می‌دهد. همان‌طور که در این نمودار مشاهده می‌شود، با کاهش قطر نازل از ۰/۵ mm تا ۰/۲ mm افت فشار افزایش می‌یابد. با این حال این افزایش افت فشار به طور یکنواخت نیست، به گونه‌ای که از قطر ۰/۳ به ۰/۲ میلی‌متر افت فشار به شدت بالا می‌رود. این مسئله نشان می‌دهد در قطر نازل ۰/۲ mm به دلیل کوچک شدن بیش از حد قطر نازل، سرعت و تنش برشی در نازل به شدت افزایش می‌یابد. در نتیجه خروج پلیمر از این ناحیه کوچک بسیار سخت بوده و فشار بالاتری برای خروج ماده، مورد نیاز خواهد بود. برای تامین این میزان فشار بالا، باید نیروی بسیار زیادی به پلیمر ورودی اعمال شود. موتور اکسترودری که قابلیت

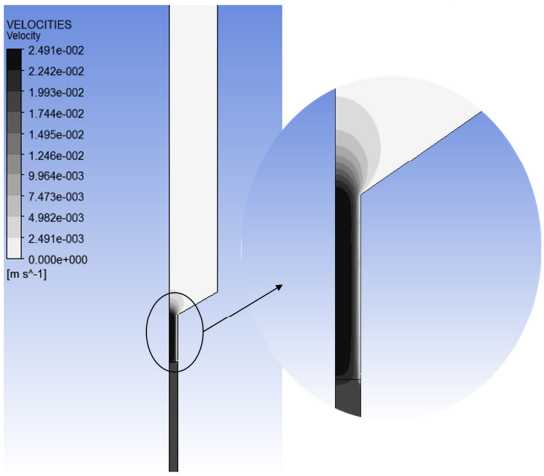
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.13.48.8]

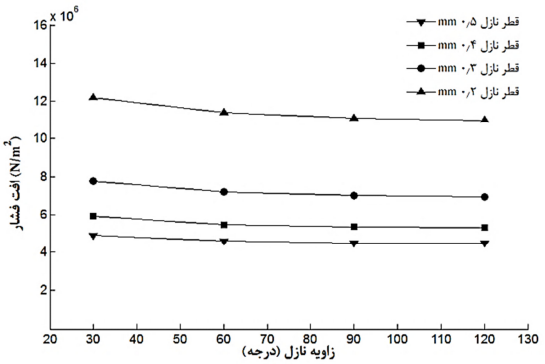
تامین چنین نیرویی داشته باشد، در صورت وجود، هزینه بالایی داشته و مقرون به صرفه نمی‌باشد.

در نمودار شکل ۵ همچنین مشاهده می‌شود که با کاهش زاویه نازل از ۱۲۰ تا ۳۰ درجه، افت فشار افزایش می‌یابد. این تغییر افت فشار از زاویه ۱۲۰ تا ۶۰ درجه نسبتا یکنواخت بوده ولی در زاویه نازل ۳۰ درجه به دلیل کوچک شدن بیش از حد زاویه نازل و به تبع آن بالا رفتن تنش برشی، افزایش میزان افت فشار بیشتر دیده می‌شود.

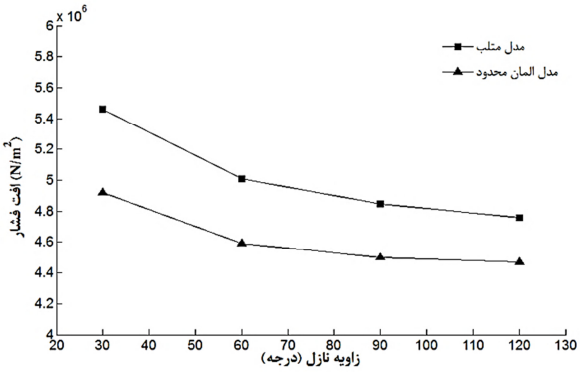
در این تحقیق برای مطابقت بیشتر شرایط دو مدل المان محدود و عددی، دمای ورودی PCL با دمای دیواره قالب یکسان در نظر گرفته شده است. به این معنی که PCL در ابتدای کار به صورت مذاب وارد قالب اکسترودر می‌شود. در شکل ۶ نمودار تغییرات میزان افت فشار بر حسب زاویه در قطر نازل ثابت۰/۵mm را برای دو مدل‌سازی عددی و المان محدود نشان می‌دهد. در این نمودار روند تغییرات افت فشار در دو مدل‌سازی مشابه است. با این حال، بین نتایج به دست آمده از دو مدل اختلاف وجود دارد. این اختلاف به دلیل فرضیات و ساده‌سازی‌هایی است که برای به دست آوردن معادلات افت فشار برای حل مدل عددی در نرم‌افزار متلب، انجام شده است، که به طور مثال می‌توان به درنظر نگرفتن تغییرات سرعت در جهت طول کانال اشاره کرد [۸]. در حالی که در مدل المان محدود در نرم‌افزار انسیس پلی‌فلو، برای هر کدام از المان‌ها و گره‌ها تمامی معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی حل شده و معادله جریان ناویر استوکس برای سیال ویسکوز، به طور دقیق بررسی شده است.



شکل ۴ توزیع میدان سرعت جریان PCL در قالب اکسترودر



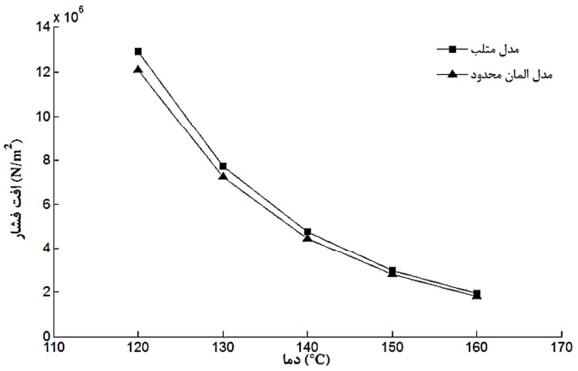
شکل ۵ نمودار تغییرات افت فشار برحسب زاویه و قطر نازل در دمای ۱۴۰ °C و سرعت ورودی ۱/۰ mm/s برای مدل‌سازی المان محدود



شکل ۶ نمودار تغییرات افت فشار برحسب زاویه نازل برای قطر نازل ۰/۵ mm برای مدل‌سازی عددی و المان محدود

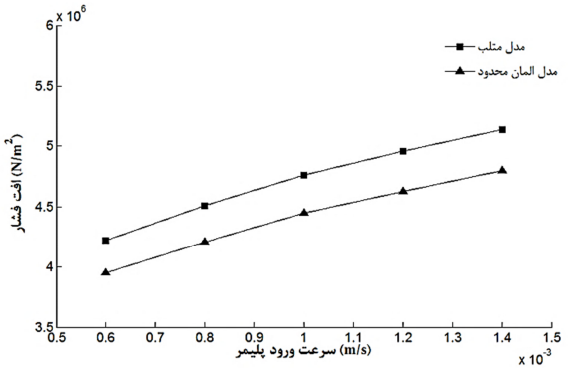
در نمودار شکل ۷ تغییرات افت فشار PCL بر حسب دمای ناحیه ایجاد مذاب اکسترودر برای قطر نازل ۰/۵ میلی‌متر و زاویه ۱۲۰ درجه در دو مدل عددی و المان محدود نشان داده شده است. در این نمودار برای هر دو مدل‌سازی مشاهده می‌شود که با افزایش دما از ۱۲۰ تا ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد، افت فشار ابتدا به سرعت و سپس به تدریج کاهش می‌یابد. نزدیک بودن مقادیر به دست آمده برای دو مدل‌سازی، اعتبار مدل ارایه شده را تایید می‌کند. در توجیه روند کاهش افت فشار می‌توان به این نکته اشاره کرد که با بالا رفتن دما، پلیمر از حالت مذاب خود فراتر می‌رود و حالت سیالیت به خود می‌گیرد. حال هر چه دما بیشتر افزایش یابد، سیالیت ماده بیشتر شده و به فشار کمتری برای خروج نیاز دارد. به طور دقیق‌تر با افزایش دما، ویسکوزیته پلیمر کاهش می‌یابد و مقاومت آن در مقابل حرکت در اکسترودر کاهش پیدا می‌کند.

در شکل ۸ نمودار تغییرات افت فشار PCL برحسب تغییرات سرعت ورودی نشان داده شده است. این نمودار برای قطر ۰/۵ mm، و زاویه نازل ۱۲۰ درجه و دمای ۱۴۰ °C به‌دست آمده است. همان‌طور که از نمودارها مشاهده می‌شود، برای هر دو مدل عددی و المان محدود افت فشار PCL با افزایش سرعت ورودی از ۰/۶ تا ۱/۴ میلی‌متر بر ثانیه، افزایش می‌یابد. علت اختلاف نتایج دو نمودار، در ساده‌سازی‌های انجام شده در معادلات افت فشار مدل عددی و حذف تغییرات سرعت در راستای طولی است. در حالی که در مدل المان محدود، در حل معادله ناویر استوکس اثر تغییرات سرعت در همه جهات و در همه المان‌ها برای به دست آوردن افت فشار در نظر گرفته شده است.



شکل ۷ نمودار تغییرات افت فشار بر حسب دمای ناحیه ایجاد مذاب در قطر نازل ۰/۵mm و زاویه ۱۲۰ درجه برای مدل‌سازی عددی و المان محدود

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.13.48.8]



شکل ۸ نمودار تغییرات افت فشار بر حسب سرعت ورودی پلیمر در قطر ۰/۵ و زاویه نازل ۱۲۰ درجه و دمای ۱۴۰°C برای دو مدل‌سازی عددی و المان محدود

٤- جمع‌بندی

در این تحقیق فرآیند اکستروژن پلیمر ترموپلاستیک PCL در روش ساخت افزودنی FDM با استفاده از نرم‌افزار المان محدود انسیس پلی‌فلو جهت مطالعه رفتار جریان مذاب پلیمر PCL مدل‌سازی شده است. با تغییر پارامترهای زاویه و قطر خروجی نازل اکسترودر و همچنین دمای ناحیه ایجاد مذاب و سرعت ورودی ماده، تغییرات افت فشار PCL برای دو مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار متلب و مدل‌سازی المان محدود با استفاده از نرم‌افزار انسیس پلی‌فلو، با یکدیگر مقایسه شده و مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان داد میزان افت فشار در اکسترودر دستگاه FDM با کاهش زاویه و قطر خروجی نازل، افزایش می‌یابد. از طرفی با افزایش دمای ناحیه ایجاد مذاب، میزان افت فشار کاهش و با افزایش سرعت ورودی پلیمر، افت فشار افزایش می‌یابد.

این نتایج همچنین نشان داد در قطر نازل ۰/۲ mm فشار اکسترودر به شدت بالا می‌رود که برای تامین این فشار به اعمال نیروی بالایی از طرف موتور نیاز است. تامین این نوع موتور اکسترودر باعث بالا رفتن هزینه‌ها شده و مقرون به صرفه نیست.

٥- مراجع

[1] O. Carneiro, A. Silva, R. Gomes, Fused deposition modeling with polypropylene, *Materials & Design*, Vol. 83, pp. 768-776, 2015.
[2] L. Novakova-Marcincinova, Application of Fused Deposition Modeling Technology in 3D Printing Rapid Prototyping Area, *Manufacturing and Industial Engineering,* Vol. 11, No. 4, pp. 35-37, 2012.
[3] I. Gibson, D. W. Rosen, B. Stucker, *Additive manufacturing technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, New York, USA: Springer Science+Business Media, 2010.
[4] W. K. Langford, Achieving Precise Flow in Fused Deposition Modeling Extruders, Engineering Management 52, Tufts University, 2012.
[5] A. Bellini, *Fused Deposition of Ceramics: A Comprehensive Experimental, Analytical and Computational Study of Material Behavior*, PHD Thesis, Drexel University, 2002.
[6] J. Koszkul, K. Szczepański, Modelling of temperature distribution during extrusion process, in *Proceeding of*.
[7] H. Ramanath, C. Chua, K. Leong, K. Shah, Melt flow behaviour of poly-ε-caprolactone in fused deposition modelling, *Journal of Materials Science: Materials in Medicine,* Vol. 19, No. 7, pp. 2541-2550, 2008.
[8] M. Roxas, *Fluid dynamics analysis of desktop-based fused deposition modeling rapid prototyping*, Bachelor Thesis, University of Toronto, 2008.
[9] A. Agrawal, *Computational and mathematical analysis of dynamics of fused deposition modelling based rapid prototyping technique for scaffold fabrication*, Master Thesis, National Institute of Technology Rourkela, 2014.
[10] Z. Tadmor, C. G. Gogos, *Principles of polymer processing*, second edition ed., Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2013.
[11] J. Aho, Rheological characterization of polymer melts in shear and extension: measurement reliability and data for practical processing, *Tampereen teknillinen yliopisto. Julkaisu-Tampere University of Technology. Publication; 964*, 2011.
[12] A. Bellini, S. Guceri, M. Bertoldi, Liquefier dynamics in fused deposition, *Journal of Manufacturing Science and Engineering,* Vol. 126, No. 2, pp. 237-246, 2004.
[13] W. Michaeli, *Extrusion Die for Plastic and Rubber : Design and Engineering Computation*, 2th edition ed., 1992.
[14] E. Schwach, L. Averous, Starch-based biodegradable blends: morphology and interface properties, *Polymer International,* Vol. 53, No. 12, pp. 2115-2124, 2004.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.13.48.8]