مجله مهندسی مکانیک مدرس، دی 1394، دوره 15، شماره 10، ص‌ص 158-164

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی تأثیر زاویه پیچ اکسترودر تک پیچه بر عملکرد پمپاژ آن در سیّالات نیوتنی و غیرنیوتنی

مجتبی دیالمه[1]، عطا کامیابی[2*]، علی مرادی[3]

1- کارشناسی ارشد، بخش مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان
2- استادیار، بخش مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان
3- دانشیار، پژوهشکده پتروشیمی، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران
* کرمان، 7618868366، kamyabi@uk.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 31 خرداد 1394
پذیرش: 27 مرداد 1394
ارائه در سایت: 18 شهریور 1394

کلید واژگان:
زاویه بهینه پیچ اکسترودر
دبی بیشینه
اکسترودر تک پیچه
مدل کارو-یاشودا

چکیده

در این تحقیق اثر زاویه پیچ و عمق کانال بر دبی جریان یک سیال نیوتنی و یک سیال غیر نیوتنی دما ثابت تراکم ناپذیر در اکسترودر تک پیچه بررسی شده است. در این تحقیق از افت فشار صرف‌نظر شده و تنها نیروی محرکه درون اکسترودر، نیروی درگ است. به این منظور کانال اکسترودر به دو صورت کانال مستقیم و مارپیچ در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی کانال مستقیم توسط نرم‌افزار فلوئنت برای سیال نیوتنی انجام گرفت و نتایج با حل تحلیلی در چندین زاویه مقایسه شد. در مرحله بعد یک گام کانال مارپیچ کم عمق برای سیال نیوتنی مورد بررسی قرار گرفت و با حل تحلیلی در زاویه‌های مختلف و در رینولدزهای پایین مقایسه شد. بررسی‌ها دامنه صحت رابطه تحلیلی را در رینولدزهای مختلف نشان داد. نتایج نشان دادند که در رینولدزهای کمتر از 10 و نسبت عمق کانال به شعاع کمتر از 0/2 حل عددی و تحلیلی نتایج یکسانی در سیالات نیوتنی دارند. بنابراین در این بازه می‌توان از حل تحلیلی برای محاسبه زاویه بهینه، محاسبه دبی، توزیع سرعت، توزیع تنش برشی و پارامترهای دیگر استفاده کرد. نتایج مطالعه سیال غیر نیوتنی نشان می‌دهند که دبی پمپاژ اکسترودر در زوایای کم پیچ برای سیال غیر نیوتنی بیش از مورد نیوتنی و در زوایای بالاتر کم‌تر می‌باشد.

Study of the helix angle effect on the pumping performance of Newtonian and non-Newtonian flows in single screw extruders

Mojtaba Dialame[1], Ata Kamyabi [1*], Ali Moradi[2]

1- Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
2- Department of Petrochemical, Iranian Polymer and Petrochemical institute, Tehran, Iran.
* P.O.B. 7618868366 Kerman, Iran, kamyabi@uk.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 21 June 2015
Accepted 18 August 2015
Available Online 09 September 2015

Keywords:
Optimum Angle of Extruder Screw
Maximum Flow Rate
Single Screw Extruder
Carreau Yasuda Model

ABSTRACT

In this research the effect of the screw angle and the depth of the channel were examined on the flow rate of an incompressible Newtonian isothermal and a non-Newtonian fluid flow in a single screw extruder. In the present study only drag force was considered rather than pressure drop. For this purpose, the extruder channel was assumed to be a cubic and spiral channel. Accordingly the Newtonian flow was simulated by Fluent software package and the results were compared with analytical solution in several angles. Then one step from the shallow spiral channel was examined and the results were compared with analytical solution in different angles and also at low Reynolds numbers. Hence, the obtained results reveal the range of validity for the analytical solution at different Reynolds numbers. As the results show, at low Reynolds numbers, up to 10, and the ratio of channel depth to diameter, less than 0.2, numerical and analytical results are the same for Newtonian fluids. Identically, in this range the analytical solution can be used for screw design, calculation of the maximum flow rate, the evaluation of the optimum angle, etc. The results of the study of non-Newtonian fluid showed that the flow rate at low screw angles for non-Newtonian fluids was higher than the Newtonian cases and at high angles, were smaller.

1- مقدمه

در سال‌های گذشته تکنولوژی اکستروژن نقش مهم و تأثیر گذاری را در صنایعی مانند پلیمر، غذایی، کاشی و سرامیک ایفا کرده است و حال این تکنولوژی نیازی ضروری در صنایع مربوطه می‌باشد. فرآیند اکستروژن یکی از روش‌های شکل دهی و ذوب مواد پلیمری از طریق تحت فشار قرار دادن مواد توسط قطعات فلزی است. فرایند اکستروژن ذرات پلاستیکی را به شکل سیالی با ویسکوزیته بالا تبدیل می‌کند و در نهایت به شکل یک جامد یا محصولات منعطف در می‌آورد. در میان تمام روش‌های اکستروژن، اکسترودر

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

M. Dialame, A. Kamyabi , A. Moradi, Study of the helix angle effect on the pumping performance of Newtonian and non-Newtonian flows in single screw extruders, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 15, No. 10, pp. 158-164, 2015 (In Persian)

Archive of SID
www.SID.ir

تک‌پیچه یکی از وسایل پرکاربرد است. اکسترودر وسیله‌ای است که به آمیزه‌های لاستیکی و پلاستیکی، نیرو وارد ساخته تا با فشار در انتهای دستگاه از میان یک قالب عبور نموده و محصولی خاص تولید نماید. پیچ، محفظه، قالب خروجی و موتور الکتریکی از قطعات اصلی اکسترودر می‌باشند. پیچ اکسترودر به سه منطقه خوراک‌دهی[1] تراکم[2] و پیمایش[3] تقسیم می‌شود. در منطقه خوراک‌دهی، مواد از طریق قیف و توسط نیروی گرانش به درون محفظه وارد می‌شوند. در منطقه تراکم به دلیل تراکم ایجاد شده ناشی از افزایش قطر، تنش و گرمای ایجاد شده از محفظه مواد در این ناحیه ذوب می‌شوند. در ادامه سیال از ناحیه پیمایش عبور می‌کند. در این ناحیه قطر پیچ زیاد و ثابت است و سیال به سمت خروجی پمپ می‌شود.

پیشرفت تئوری‌های اکسترودر تک‌پیچه در حدود چهل سال به طول انجامیده است. بررسی‌ها و مدل‌های ارائه شده برای اکسترودرهای تک پیچه در ابتدا به موفقیت چندانی دست پیدا نکرد زیرا تئوری‌های موجود مطابق با طراحی پیچ نبود و فرضیه‌های اعمال شده در عمل قابل اجرا نبودند. اولین تئوری در سال 1922 در این زمینه توسط روواندال ارائه شد که در نسبت‌های بسیار زیاد عرض کانال، W، به ارتفاع کانال، H، قابل قبول بود [1]. در این مدل فرض شده بود که پیچ اکسترودر ثابت و سرعت محفظه برابر با سرعت نوک پره است اما آزمایش‌هایی نشان داد که این فرض دقیق نیست و بهتر است سرعت محفظه برابر با سرعت بدنه پیچ در نظر گرفته شود.

مدل ریاضی سیّال نیوتنی دما ثابت با پیچی با کانال کم عمق توسط تدمور و گوگس در قالب یک مدل برای توزیع سرعت و دبی در سال 1979 ارائه شد [2]. در این مدل مسیر حرکت سیّال از درون کانال یک سطح صاف و مستطیلی و سطح محفظه[4] یک صفحه صاف با سرعت ثابت و با زاویه θ_b نسبت به مسیر کانال در نظر گرفته شد.

در سال 1992 کمپبل و همکارانش در آزمایشی اکسترودر تک‌پیچه را در چهار حالت مختلف مدل کردند: 1- در حالتی که تنها محفظه چرخش داشته باشد، 2- تنها بدنه پیچ چرخش داشته باشد، 3 تنها پره چرخش داشته باشد، 4- بدنه پیچ و پره با هم چرخش داشته باشند [3]. از این تحقیق نتیجه گرفته شد که جریان به وجود آمده از چرخش پیچ با تئوری موجود هم‌خوانی نداشته و پره پیچ تأثیر بسیاری بر نیروی درگ دارد. کمپبل و همکارانش به تأثیر بسیار مهم پره پیچ پی بردند و پیشنهاد کنار گذاشته شدن مدل رووِل و فنلیسن را ارائه کردند.

لی و شی ئی در سال 1996 مدلی بر پایه تأثیر پره‌های پیچ بر شرایط مرزی سرعت در مسیر کانال ارائه کرده‌اند [4]. آزمایش‌های لی و شی ئی منجر به محاسبه ثابت‌هایی در رابطه توزیع سرعت در مسیر کانال و دبی جریان شد که این ثابت‌ها وابسته به نسبت عرض کانال، w به ارتفاع کانال، H، هستند . این ثابت‌ها تنها برای نسبت بزرگ و نسبت کوچک H/R تعریف شده‌اند و برای حد وسط استفاده نمی‌شوند. قریشی و همکارانش در سال 2005 جریان یک سیال پلیمری را درون اکسترودر تک پیچه با مدل قانون توانی[5] با حل عددی بررسی کردند. در نهایت داده‌های بدست آمده از حل تحلیلی را با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه کردند [5].

کیم و همکارانش در پژوهشی در سال 2006 جریان و عملکرد اختلاط را درون اکسترودر تک پیچه توسط حل عددی بررسی کردند [6]. در این تحقیق حرکت یک سیال غیر نیوتنی دما ثابت با مدل لزجت کارو-یاشودا[6] را با تغییر سرعت و گام پیچ شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد که سرعت بالای پیچ، اختلاط پراکنده را افزایش می‌دهد و افزایش گام پیچ، اختلاط توزیعی را بالا خواهد برد. در سال 2008 وینیسیوس و همکارانش با ارائه یک حل تحلیلی برای سیالات نیوتنی رابطه تدمور و گوگس را با اعمال اثر پره پیچ بهبود بخشیدند [7]. در این حل با اعمال فرضیات ساده کننده تدمور و گوگس در شرایط مرزی به‌جای حرکت محفظه، پیچ اکسترودر متحرک و شرایط مرزی روی پره و بدنه آن فرض شد.

در سال 2010 تانگ و همکارانش در پژوهشی مطالعات کمپبل و همکارانش را در قالب شبیه‌سازی، توسط نرم‌افزار بررسی کردند و توزیع فشار و سرعت را در چهار آزمایش محاسبه کردند [8]. در همین سال یاماسونگ و نومیانگ با شبیه‌سازی یک گام پیچ اکسترودر توزیع تنش برشی و سرعت را برای یک سیال غیر نیوتنی با مدل قانون توانی در قسمت ورودی خوراک محاسبه کردند [9].کروز و پینو در سال 2011 حل تحلیلی برای یک سیال غیر نیوتنی درون یک اکسترودر تک پیچه با عمق کانال بسیار کم ارائه کردند [10]. مدل استفاده شده برای مذاب پلیمری مدل ساده شده فان تین تانر[7] می‌باشد. در پژوهش کروز و پینو از اثر انحنای پیچ صرف نظر شد و خواص سیال مستقل از دما فرض شد.

در بیشتر تحقیق‌های انجام شده تا به امروز (به جز محاسبات تدمور و گوگس) توزیع سرعت، دبی و فشار را برای یک زاویه محاسبه می‌کردند. به عنوان مثال در بعضی پژوهش‌ها بدون در نظر گرفتن نسبت ارتفاع به شعاع کانال و زوایای دیگر، سرعت و افت فشار را برای یک پیچ بررسی کردند [9]. در بعضی دیگر محاسبات تنها محدود به کانال مستقیم بود [8]. در این پژوهش با بررسی رفتار سیال، دبی حجمی در زوایا و نسبت‌های ارتفاع به شعاع مختلف بررسی خواهد شد. این بررسی‌ها در دو زمینه سیالات نیوتنی و سیالات غیر نیوتنی انجام می‌گیرد. ابتدا کانال مسطح مطابق با فرضیات تدمور و گوگس توسط نرم‌افزار فلوئنت شبیه‌سازی می‌شود. سپس با اعمال فرضیات، دبی حجمی در چندین زاویه متفاوت محاسبه و با حل تحلیلی مقایسه می‌شود. سپس برای بررسی صحت رابطه تحلیلی در رینولدزهای مختلف یک کانال مارپیچ شبیه‌سازی شده و نتایج آن با نتایج حل تحلیلی مقایسه می گردد. تفاوت کانال مارپیچ با کانال مستطیلی در این است که در کانال مارپیچ اثر پره پیچ نیز اعمال خواهد شد.

در زمینه سیالات نیوتنی انتخاب یک مدل مناسب برای لزجت بسیار با اهمیت است. به همین منظور در این تحقیق از مدل کارو-یاشودا برای بیان لزجت استفاده شد. در بسیاری از تحقیق‌های انجام شده رفتار لزجت سیال را با مدل قانون توانی بیان کردند که مدل مناسبی نمی‌باشد [5]. این مدل در نرخ برش‌های خیلی کم و خیلی زیاد نتایج قابل قبولی را ارائه نمی‌دهد. برای محاسبه زاویه بهینه ابتدا با عبور دادن یک سیال غیر نیوتنی از کانال مارپیچ دبی حجمی در زوایای مختلف محاسبه می‌گردد. سپس یک سیال نیوتنی با لزجتی مشابه با لزجت سیال غیر نیوتنی در نظر گرفته می‌شود.

2- شرح مسأله

در مدل تحلیلی تدمور و گوگس، کانال مارپیچی که در واقعیّت وجود دارد را با کانال مستطیلی با نسبت طول به ارتفاع بالا تقریب زدند. همان‌طور که در شکل 1 نشان داده شده است مسیر جریان جهت z می‌باشد. محفظه کانال با

1- Feed Zone
2- Compression Zone
3- Metering Zone
4- Barrel
5- Power-law

6- Carreau-Yasuda
7- Phan-Thien-Tanner

Archive of SID
www.SID.ir

سرعت v_b در جهت‌های x و y و زاویه θ_b روی کانال اکسترودر حرکت می‌کند تا جریانی مشابه با جریانی که درون یک کانال مارپیچ واقعی وجود دارد ایجاد شود. با توجه به شکل 1 سرعت در جهت‌های x و z از طریق روابط (1) و (2) محاسبه می‌شند:

$$v_{b_z} = v_b \cos(\theta_b) \quad (1)$$

$$v_{b_x} = v_b \sin(\theta_b) \quad (2)$$

تابعیت عرض کانال (w) و طول یک گام پیچ (L_s)، با زاویه پیچ اکسترودر به صورت روابط (3) و (4) می‌باشد:

$$w = L_s \cos(\theta_b) - e \quad (3)$$

$$L_s = \pi D \tan(\theta_b) \quad (4)$$

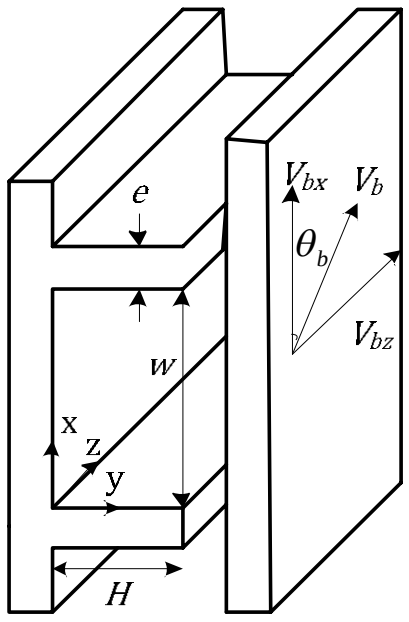
که D قطر پیچ و e ضخامت پره می باشد (شکل 2).

در مدل تدمور و گوگس فرض بر این است که کانال کم عمق، سیال نیوتنی، دما ثابت، کاملاً توسعه یافته و نسبت طول کانال به ارتفاع زیاد باشد. در شرایط پایا معادلات ناویر-استوکس به صورت معادلات (5 تا 7) نوشته می‌شود [11]:

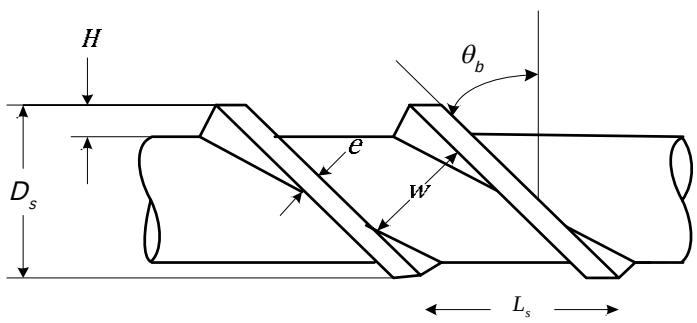
$$\rho\left(v_x\frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y\frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z\frac{\partial v_x}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu\left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2}\right) \quad (5)$$

$$\rho\left(v_x\frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y\frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z\frac{\partial v_y}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu\left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2}\right) \quad (6)$$

$$\rho\left(v_x\frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y\frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z\frac{\partial v_z}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu\left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2}\right) \quad (7)$$



شکل 1 هندسه کانال مستقیم در حل تحلیلی تدمور و گوگس



شکل 2 هندسه و پارامترهای پیچ اکسترودر

در این رابطه‌ها ρ ثابت است. چون جریان کاملاً توسعه یافته است، در نتیجه سرعت تابعیت z نخواهد داشت. چون کانال کم عمق است از سرعت در جهت y نیز صرف‌نظر می‌شود. به دلیل نسبت بالای طول به عرض کانال، $\partial v_y/\partial x$، $\partial v_x/\partial x$ برابر صفر می‌شوند و با استفاده از معادله پیوستگی $\partial v_y/\partial y$ نیز صفر خواهد شد. در نتیجه معادلات ناویه-استوکس به صورت معادلات (8 تا 10) ساده می‌شوند:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \mu\frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \quad (8)$$

$$\frac{\partial P}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \mu\left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2}\right) \quad (10)$$

در ادامه با حل معادلات فوق، رابطه نهایی دبی جریان در کانال به صورت رابطه (11) نوشته می‌شود:

$$Q = \frac{v_{b_z} wH}{2}\left(\frac{16w}{\pi^3 H}\sum_{i=1,2,3}^{\infty}\frac{1}{i^3}\tanh\left(\frac{i\pi H}{2w}\right)\right) \quad (11)$$

در رابطه (11)، μ لزجت سیال است [2].

3- روش حل

3-1- روش حل و شرایط مرزی کانال مستقیم

هندسه کانال توسط نرم‌افزار گمبیت طراحی می‌شود سپس با اعمال شرایط مرزی مناسب روی دیواره‌های کانال، حرکت سیال شبیه‌سازی می‌شود. روش حل معادلات در این‌جا روش گسسته سازی صریح در حالت پایا و بدون در نظر گرفتن معادله انرژی می‌باشد. برای ایجاد سرعت بالا در محاسبات و به دلیل تعداد کم معادلات (عدم حضور معادلات آشفتگی و انرژی) و پیچیده نبودن آنها روش حل کوپل فشار و سرعت، روش سیمپل[1]، گسستگی فشار در حالت استاندارد و گسستگی اندازه حرکت پاد بادسوی درجه اول برای معادله تکانه خطی در نظر گرفته شد. از تغیرات نیز دمایی صرف نظر شده است. دلیل صرف نظر از تغییرات دمایی اولاً مقایسه با نتایج دیگران، دوماً پیچیده‌تر شدن مسأله و سوماً در دسترس نبودن پارامترهای دمایی مدل مورد استفاده است. مشخصات جریان و هندسه کانال مستطیلی در جدول 1 و شکل 3 مشاهده می‌شود. در کانال مستطیلی سطح محفظه با زوایای متفاوت از صفر تا 90 درجه و با سرعت ثابت به صورت انتقالی[2] و با شرط عدم لغزش حرکت می‌کند. در این کانال w ثابت و برابر 1 فرض می‌شود و در هر زاویه تنها جهت حرکت سطح بالای کانال تغییر خواهد کرد، در نتیجه بقیه دیواره‌ها ثابت می‌باشند. چون طول کانال اکسترودر زیاد است و در هر π رادیان چرخش، هندسه و میدان سرعت عینا تکرار می‌شوند با صرف‌نظر کردن از اثرات ابتدا و انتهای اکسترودر می‌توان از شرط مرزی تناوبی استفاده کرد، در نتیجه دو سطح مقطع ابتدا و انتهایی کانال با شرط تناوبی[3] تعریف شدند. با حرکت سطح بالایی کانال در زاویه‌های مختلف جریانی به صورت جریان ایجاد شده در کانال واقعی اکسترودر شبیه‌سازی می شود .در شکل 3، عرض کانال برابر w، ارتفاع کانال برابر H و برابر 0/166 متر، می‌باشد. عدد رینولدز در این قسمت 5 در نظر گرفته شد.

1- SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations)
2- Translation
3- Periodic

Archive of SID
www.SID.ir

3-2- روش حل و شرایط مرزی کانال مارپیچ

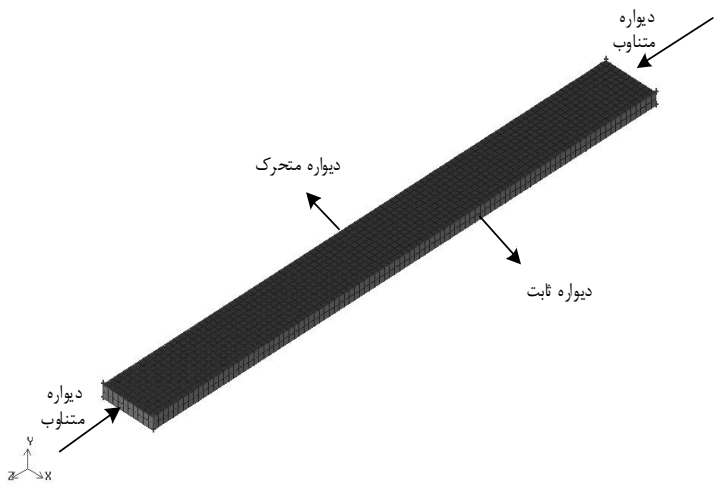
3-2-1- سیّال نیوتنی

در این قسمت بر اساس فرضیات تدمور و گوگس روش حل کانال مارپیچ بررسی می‌شود. چون طول یک گام پیچ (L_s) با تغییر زاویه تغییر می‌کند با توجه به معادله (4) برای هر زاویه یک طول منحصر به فرد وجود خواهد داشت. محفظه با سرعت زاویه‌ای ثابت به صورت چرخشی[1] و با شرط عدم لغزش حرکت می‌کند. در این‌جا پیچ ثابت و بدون حرکت می‌باشد. هندسه کانال مطابق شکل 4 است. در این قسمت H، 0/1 m و از اثر ضخامت پره صرف‌نظر شده است. روش حل، روش گسسته‌سازی صریح مطابق با گسسته سازی و فرضیات کانال مستطیلی می‌باشد. جریان نیز پایا و آرام فرض شده است.

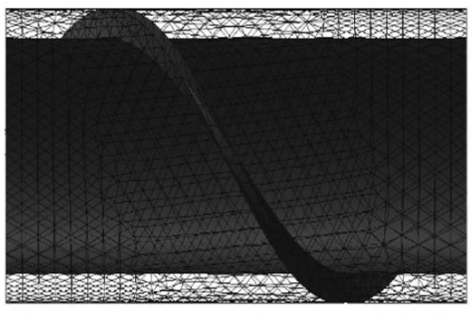
3-2-2- سیّال غیر نیوتنی

در سیّالات غیر نیوتنی لزجت ثابت نیست، در نتیجه نیاز به انتخاب مدلی مناسب برای لزجت است. به طور معمول در اکسترودرها از مدل‌های نیوتنی تعمیم یافته[2] برای لزجت استفاده می‌شود [12]. از مدل‌های قابل استفاده، مدل پاورلا در نرخ برش‌های خیلی کم و خیلی زیاد نتایج غیر قابل قبولی را ارائه می‌دهد و مدل بینگهام[3] برای سیالاتی که نیاز به تنش اولیه دارند مناسب می‌باشد. در این پژوهش دو نمونه پلی استایرن با مدل کارو-یاشودا (معادله 12) و مشخصات جدول 1 بررسی می‌شود [13]. از مزایای مدل کارو-یاشودا این است که مشکلات مدل قانون توانی را ندارد و در نرخ برش-های بسیار کم و بی‌نهایت مقدار η را بی‌نهایت و صفر نشان نمی‌دهد و با در دست داشتن η_0 و η_∞ می‌توان نرخ برش و η را تنظیم کرد. از مشکلات این مدل توجیه نکردن خواص الاستیک در سیالات ویسکوالاستیک است؛ اما چون سیال استفاده شده در این پژوهش ویسکوالاستیک نیست مشکلی ایجاد نخواهد شد.

$$\eta = \eta_\infty + (\eta_0 - \eta_\infty)[1 + (\dot{\gamma}\lambda)^2]^{\frac{n-1}{2}} \quad (12)$$



شکل 3 شبکه‌بندی کانال مستقیم



شکل 4 شبکه بندی کانال مارپیچ در زاویه 45 درجه

جدول 1 پارامترهای رابطه کارو یاشودا مربوط به پلی استایرن

	η_0	η_∞	λ	n	T_0
1	1400	0	1/6	0/2	100
2	90	0	0/379	0/265	100

هندسه کانال در این قسمت مطابق با شکل 4 می‌باشد. تمامی فرضیات و گسسته سازی کانال مارپیچ با سیال نیوتنی در این قسمت نیز صادق می-باشد.

4- نتایج و بحث

4-1- استقلال از شبکه

برای نشان دادن استقلال نتایج از شبکه بندی، دبی در چندین زاویه و با سه شبیه‌سازی با تعداد نقاط شبکه متفاوت بررسی شدند و نتایج مطابق جدول 2 بدست آمده‌اند.

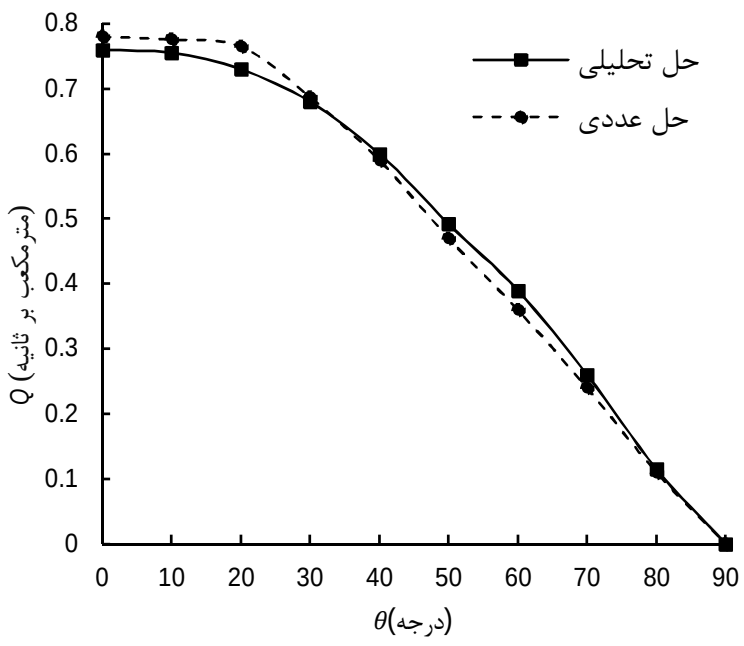
همان‌طور که در جدول 2 مشاهده می‌شود، شبکه‌بندی‌های مورد استفاده به قدری ریز هستند که نتایج شبیه‌سازی تقریباً از تعداد سلول‌های محاسباتی مستقل هستند. در نتیجه سلول بندی‌های این تحقیق بین 50000 تا 200000 در نظر گرفته شد.

4-2- کانال مستطیل با سیال نیوتنی

در این قسمت جریان نیوتنی در کانال مستطیلی مورد بررسی قرار می‌گیرد. مشخصات سیّال در نرم‌افزار وارد شده و دبی جریان برای زوایای مختلف بدست آمده است. در گام بعد برای محاسبه دبی در حل تحلیلی معادله (9) در نرم‌افزار متلب کد نویسی شد. با صرف‌ظر از افت فشار در عدد رینولدز 5 دبی در زوایای مورد نظر محاسبه شد، سپس داده های دبی بدست آمده از حل تحلیلی و عددی بر حسب زاویه مطابق شکل 5 رسم شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند با خطای بسیار کم دو حل تحلیلی و شبیه‌سازی عددی نتایج یکسان دارند. توزیع سرعت در مقطعی از کانال در شکل 6 و بردارهای سرعت در شکل 7 مشاهده می‌شوند.

جدول 2 دبی های محاسبه شده در شبیه‌سازی های متفاوت

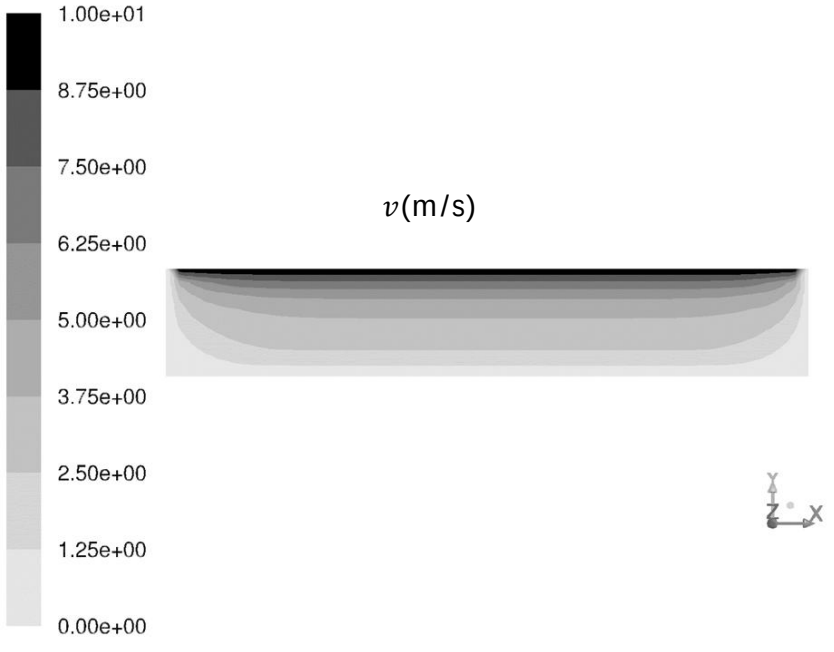
زاویه	دبی در هندسه‌ای با50000 سلول	دبی در هندسه‌ای با200000 سلول	دبی در هندسه‌ای با400000 سلول
20 درجه	0/236	0/234	0/23
40 درجه	0/35	0/352	0/349
60 درجه	0/39	0/306	0/306



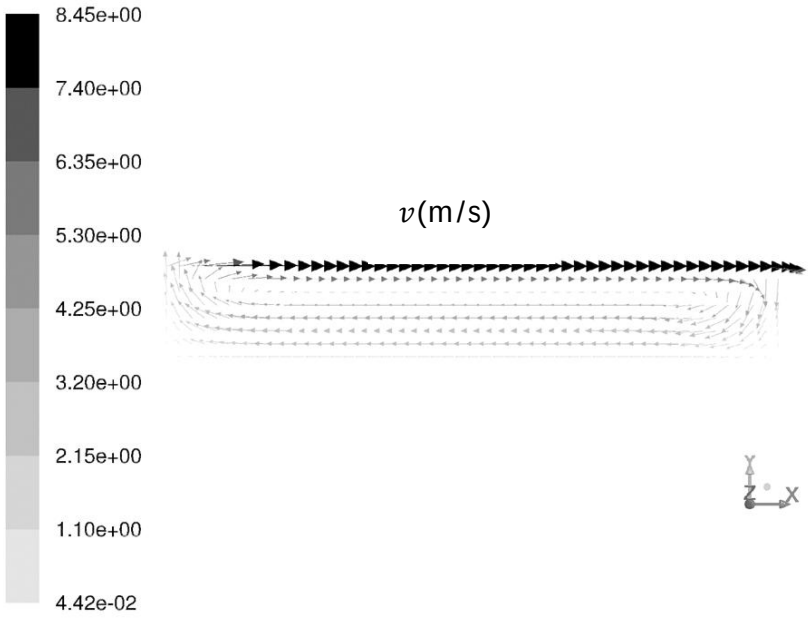
شکل 5 مقایسه دبی در حل عددی و حل تحلیلی کانال مستقیم بر حسب زاویه در رینولدز 5

1- Rotational
2- Generalized Newtonian Flow
3- Bingham

Archive of SID
www.SID.ir



شکل 6 توزیع سرعت در کانال مستقیم در زاویه 45 درجه در رینولدز 5



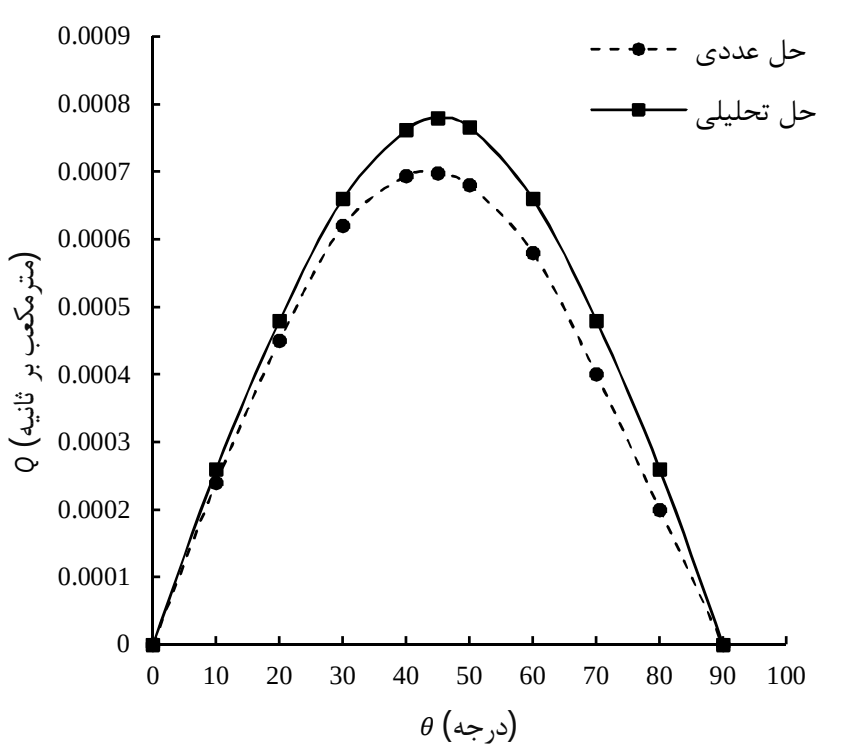
شکل 7 بردارهای سرعت در کانال مستقیم در زاویه 45 درجه در رینولدز 5

همان‌طور که در شکل 7 مشاهده می‌شود در گوشه‌های پایین و همچنین در ارتفاعی معادل با دو سوم ارتفاع کانال سرعت‌ها بسیار کم می‌باشند و منطقه ساکن و بدون حرکت است. این نتیجه با نتایج حل تحلیلی مطابقت می‌کند.

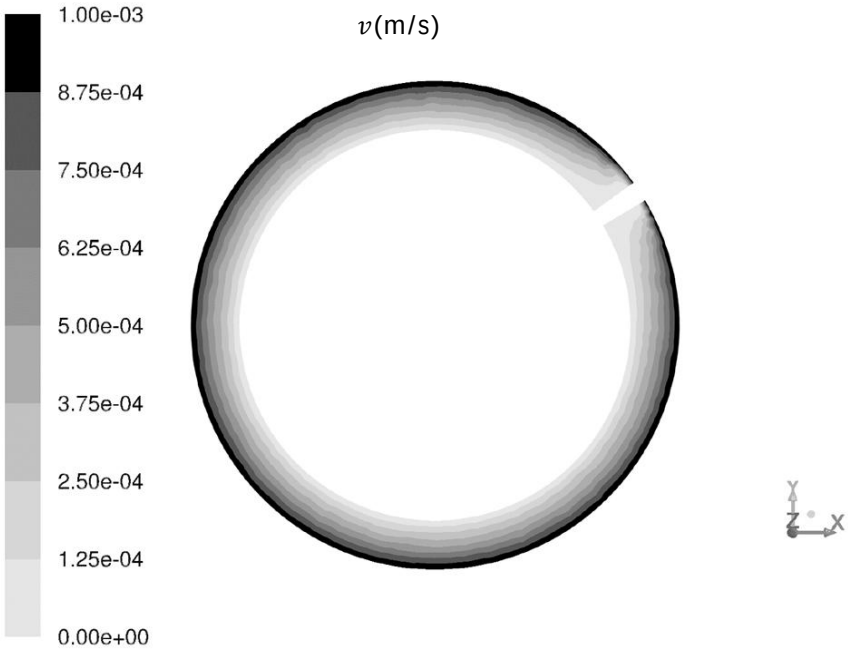
4-3- کانال مارپیچ با سیال نیوتنی

در این بخش جریان سیال نیوتنی در کانال مارپیچ مورد بررسی قرار گرفته است. در کانال مارپیچ قطر ریشه پیچ اکسترودر ثابت در نظر گرفته شده است. با جایگذری شرایط مرزی گفته شده برای کانال مارپیچ در نرم‌افزار شبیه‌سازی انجام شد. سرعت محفظه، ω، برابر با 0/002 rad/s در نظر گرفته شد که طبق رابطه $v = R\omega$، سرعت در حل تحلیلی برابر 0/001 m/s می‌باشد. شکل 8 نتایج دبی محاسبه شده در هر دو حل تحلیلی و عددی را در نسبت عمق کانال به شعاع (H/R) برابر 0/2 و رینولدز 1 را نشان می‌دهد. در شکل 9 توزیع سرعت و در شکل 10 بردارهای سرعت در یک مقطع از کانال مارپیچ در زاویه 45 درجه نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که طبق فرضیات انجام شده با افزایش زاویه از صفر درجه دبی جریان ابتدا افزایش می‌یابد و در زاویه 45 درجه به بیشترین مقدار خود می‌رسد. در زاویه 45 درجه بیشترین دبی و پمپاژ وجود خواهد داشت. در ادامه افزایش زاویه باعث کاهش دبی خواهد شد؛ زیرا عملکرد پره‌ها بیشتر بر پدیده اختلاط سیال تأثیر خواهد گذاشت و پمپاژ کمتری صورت خواهد گرفت.

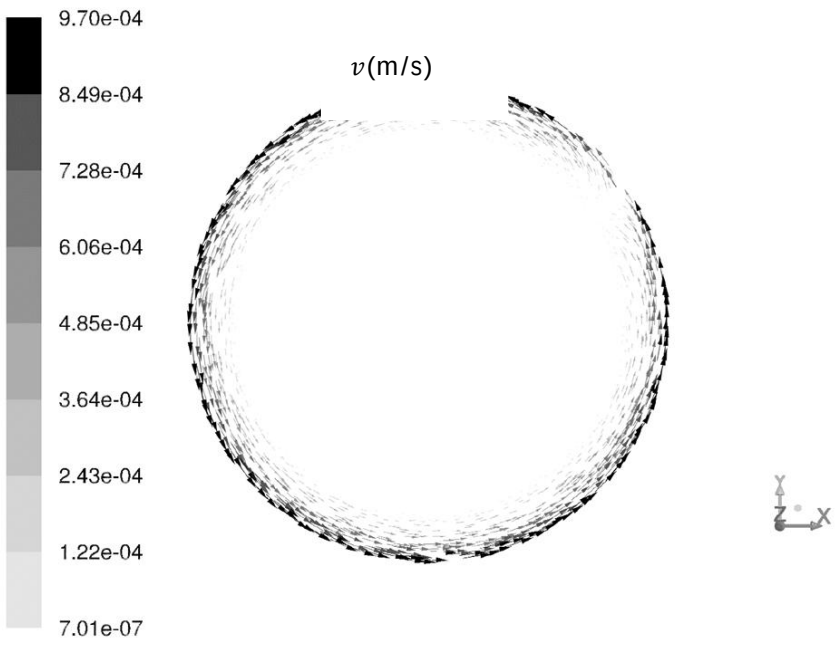
همان‌طور که در شکل 8 مشاهده می‌شود در زاویه‌های کوچک (کم‌تر از 40 درجه) چون عرض کانال خیلی کم می‌شود، فرض رینولدز پایین بیشتر به واقعیت نزدیک می‌گردد.



شکل 8 مقایسه دبی جریان سیّال نیوتنی در حل عددی و تحلیلی بر حسب زاویه در H/R = 0/2 و رینولدز 1



شکل 9 توزیع سرعت سیّال نیوتنی در کانال مارپیچ در زاویه 20 درجه، H/R = 0/2 و رینولدز 1



شکل 10 بردارهای سرعت سیّال نیوتنی در کانال مارپیچ در زاویه 20 درجه، H/R = 0/2 و رینولدز 1

حال برای تحقیق و بررسی دامنه صحت رابطه تحلیلی یک بار دیگر مسئله در رینولدزهای زیاد حل می‌شود و دبی رینولدزهای مختلف محاسبه می‌شوند. برای این منظور یک بار رینولدز 10 و بار دیگر 50 در نظر گرفته شده است.

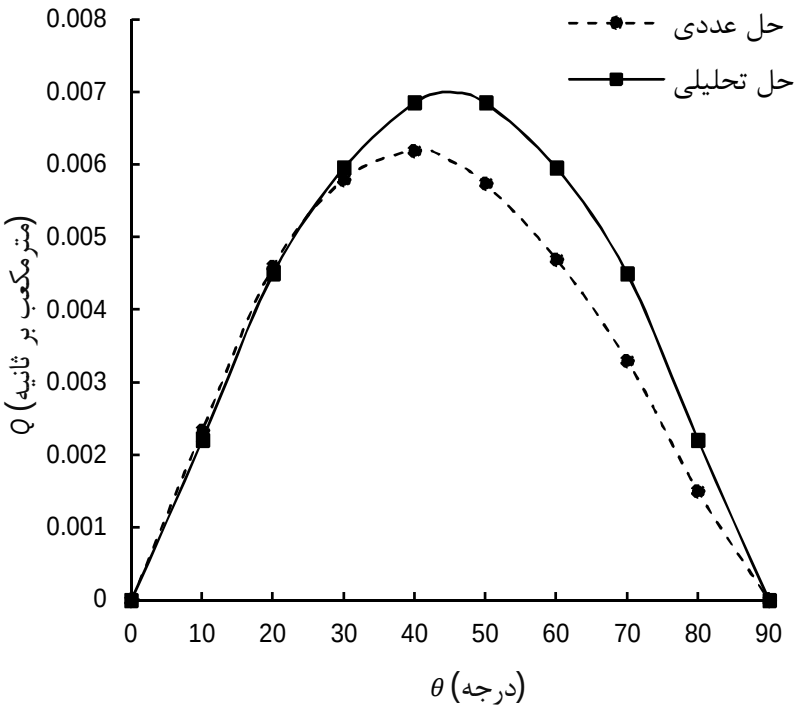
www.SID.ir

بقیه پارامتر ها از جمله H/R مقادیر قسمت قبل می باشند. نتایج در شکل-های 11 و 12 قابل مشاهده هستند.

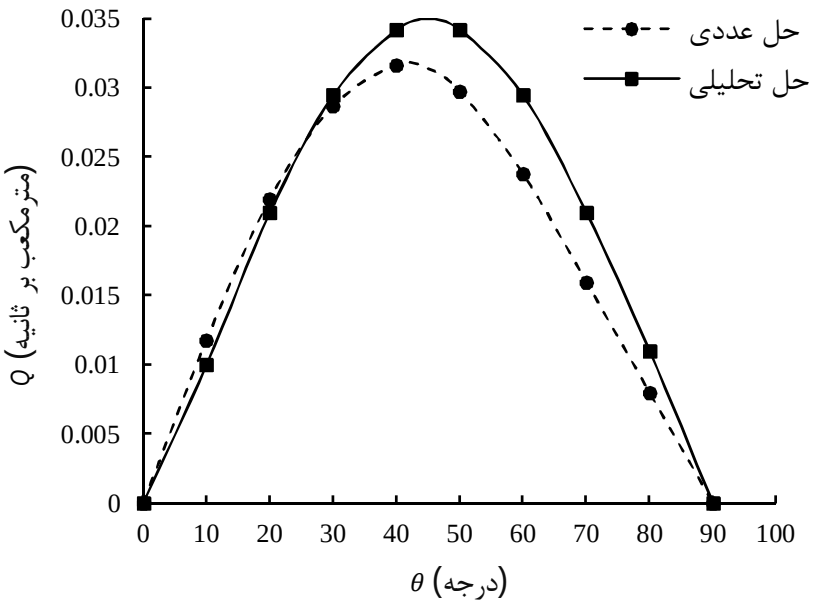
نتایج نشان می‌دهند که با افزایش رینولدز نتایج حل تحلیلی و عددی از یکدیگر فاصله خواهند گرفت و خطا در حل تحلیلی تدمور و گوگس افزایش می‌یابد. به عبارتی صحت حل تحلیلی تقریبا در رینولدز های پایین‌تر از 10 می‌باشد و در رینولدز های بالاتر نتایج با هم مطابقت دقیقی ندارند. علت فاصله گرفتن حل تحلیلی از حل عددی به فرضیات حل تحلیلی مربوط می-شود. در حل تحلیلی فرض می‌شود رینولدز پایین، کانال مستقیم و نسبت طول به عرض کانال بسیار زیاد باشد. وقتی که فرض می‌شود کانال مستقیم است دیگر نیروی جانب مرکز نیز وجود نخواهد داشت. این عوامل باعث می-شود که حل تحلیلی مخصوصاً در رینولدزهای بالا از حل عددی فاصله بگیرد.

اکنون با ثابت نگه داشتن عدد رینولدز دو حل عددی و تحلیلی در H/R های بالاتر بررسی می‌شوند. در رینولدز 1 دو شبیه‌سازی با $H/R =$ 0/3 و $H/R =$ 0/4 و انجام گرفت. مقایسه نتایج در شکل‌های 13 و14 نشان داده شده‌اند.

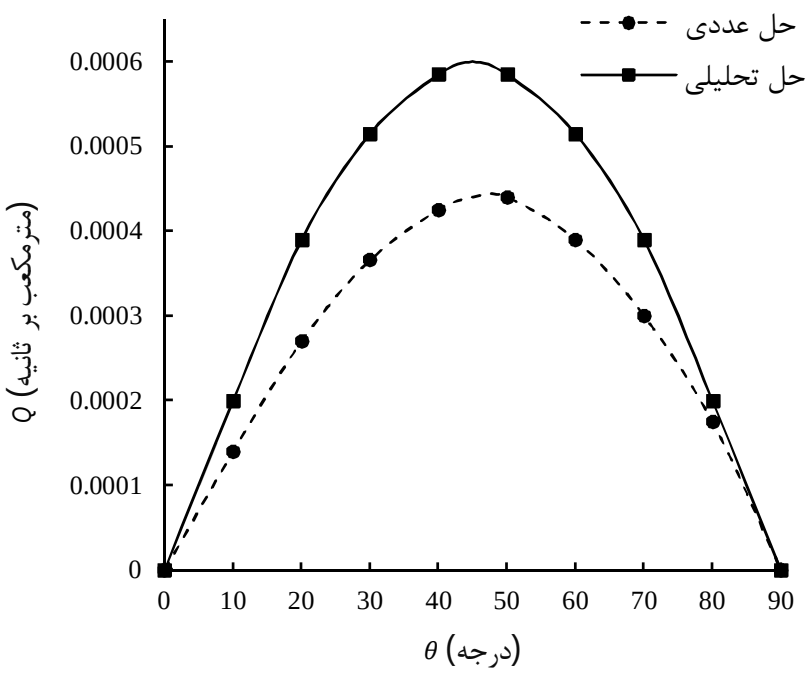
از مقایسه اشکال 13 و 14 با شکل 8 معلوم می‌شود که فرضیات تدمور و گوگس در رینولدز پایین تقریباً در $H/R =$ های بالاتر از 0/2 دارای خطای زیادی خواهد بود.



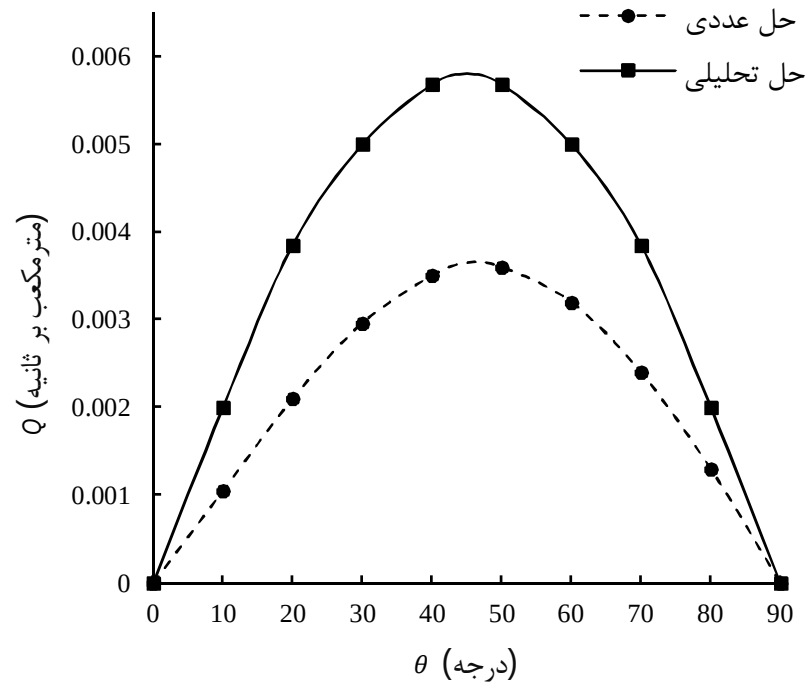
شکل 11 مقایسه دبی در حل تحلیلی و عددی بر حسب زاویه در رینولدز 10 و $H/R =$ 0/2 در سیّال نیوتنی



شکل 12 مقایسه دبی حل تحلیلی و عددی بر حسب زاویه در رینولدز 50 و $H/R =$ 0/2 در سیّال نیوتنی



شکل 13 مقایسه دبی حل تحلیلی و عددی بر حسب زاویه در رینولدز 1 و $H/R =$ 0/3



شکل 14 مقایسه دبی حل تحلیلی و عددی بر حسب زاویه در رینولدز 1 و $H/R =$ 0/4

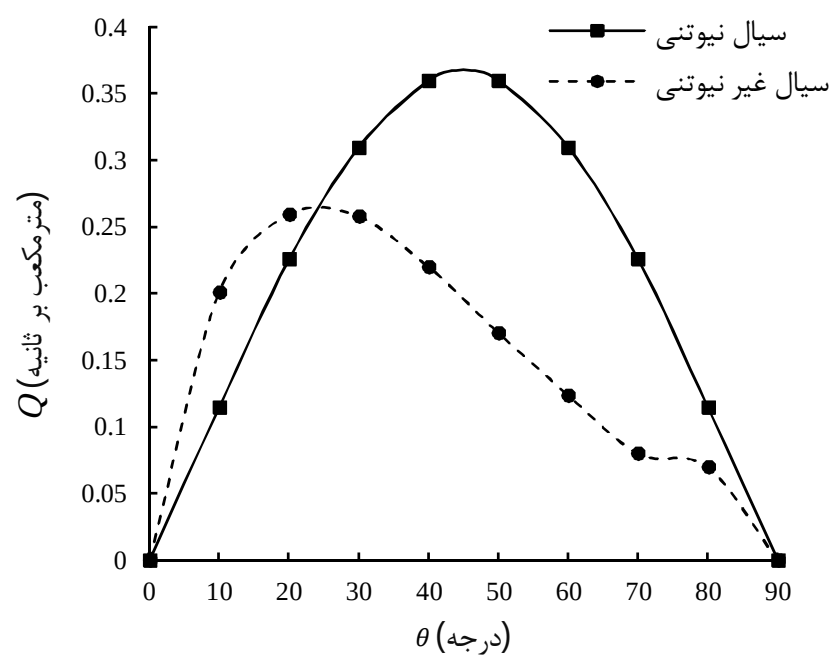
4-4- کانال مارپیچ با سیال غیر نیوتنی

اساس کار این بخش مانند شبیه‌سازی کانال مارپیچ با سیال نیوتنی می‌باشد با این تفاوت که در آن قسمت لزجت سیّال ثابت فرض می‌شد اما در اینجا لزجت با مدل کارو-یاشودا (جدول 2) در نرم‌افزار تعریف شده است. باید توجه داشت که در این قسمت نیز عدد رینولدز باید کوچک باشد.

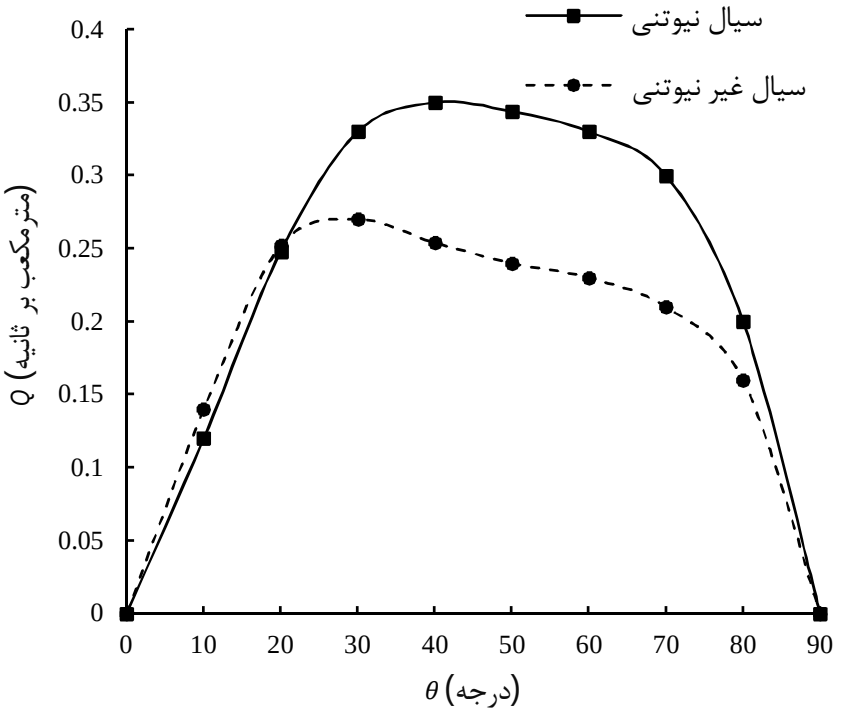
شبیه‌سازی برای دو سیال با مشخصات جدول 2 انجام گرفت. در هر دو مورد، سیال غیرنیوتنی با یک سیال نیوتنی با لزجتی برابر η_0 مقایسه شدند. نتایج دبی محاسبه شده برای این دو سیال در شکل‌های 15 و 16 نمایش داده شده است.

در شکل 16 چون رینولدز کم‌تر است نتایج حل نیوتنی به حل تحلیلی تدمور و گوگس نزدیک‌تر می‌باشد. اما در شکل 15 به دلیل افزایش رینولدز حل نیوتنی با حل تحلیلی تدمور و گوگس فاصله گرفته است. همان‌طور که در شکل‌های 15 و 16 مشاهده می‌شود تا زوایای بین 20 تا 30 درجه دبی پمپاژ سیال غیر نیوتنی بیش از نیوتنی است. این امر می‌تواند به دلیل جریان‌های ناشی از کاهش شدید لزجت سیال غیر نیوتنی باشد که این جریان‌های ثانویه می‌توانند به اختلاط نیز کمک زیادی کنند.

www.SID.ir



شکل 15 مقایسه دبی حل عددی سیال نیوتنی با لزجت 1400 و سیال غیر نیوتنی با η_0=1400 بر حسب زاویه



شکل 16 مقایسه دبی حل عددی سیال نیوتنی با لزجت 90 و سیال غیر نیوتنی با η_0 =90 بر حسب زاویه

همان‌طور که در شکل 15 نشان داده شده است، در زوایای بیش از 30 درجه دبی پمپاژ سیال غیر نیوتنی کم‌تر از سیال نیوتنی می‌باشد این امر به دلیل کاهش لزجت سیال غیر نیوتنی می‌باشد. از آنجا که در شکل 15، η_0 بسیار بیشتر از η_0 بررسی شده در شکل 16 می‌باشد در نتیجه در شکل 15 کاهش لزجت بیشتری قابل انتظار است. دلیل اختلاف بوجود آمده در شکل‌های 15 و 16 این است که لزجت سیالات غیر نیوتنی تابع نرخ برش است. از این رو دیده می‌شود اختلاف نتایج با حل نیوتنی در شکل 16 بسیار کمتر از شکل 15 می‌باشد.

5- نتیجه‌گیری

حل عددی و تحلیلی برای کانال مستطیلی و مارپیچ در زاویه‌های متعدد بررسی شد. در کانال مستطیلی در رینسولدزهای کم‌تر از 5 نتایج حل عددی و تحلیلی مطابق با هم می‌باشند. در کانال مارپیچ با سیال نیوتنی در رینولدز-های کم‌تر از 10 و نسبت عمق کانال به شعاع کانال کم‌تر از 0/3 نتایج حل عددی و تحلیلی با یکدیگر مطابقت داشتند. با افزایش رینولدز و نسبت عمق کانال به شعاع کانال نتایج حل عددی و تحلیلی، به دلیل فرضیاتی که در حل تحلیلی صورت گرفته شده است، نیز از هم فاصله خواهند گرفت. در زمینه سیالات غیر نیوتنی، مقایسه نتایج دبی‌ها در سیالات نیوتنی و غیر نیوتنی نشان می‌دهد که در زوایای پیچ کم‌تر از حدود 25 درجه دبی سیال نیوتنی بیش از سیال غیر نیوتنی است. در زوایای بیش از حدود 25 درجه به دلیل کاهش لزجت سیال غیر نیوتنی، دبی این سیالات کم‌تر از مورد نیوتنی خواهد شد.

در کل همان‌طور که نشان داده شد صحت دامنه رابطه تحلیلی تدمور و گوگس بسیار محدود می‌باشد به طوری که ارتفاع مسیر جریان و رینولدز باید مقادیر کوچکی باشند. همچنین با تطبیق نتایج تحلیلی تدمور و گوگس و کانال مارپیچ در سیالات نیوتنی نتیجه گرفته شد که در رینولدزهای کم‌تر از 10 و نسبت عمق کانال به شعاع کانال کم‌تر از 0/3، می‌توان از اثر پره پیچ صرف‌نظر کرد.

6- فهرست علایم

D	ارتفاع کانال (m)
H	قطر پیچ (m)
L_s	طول یک گام پیچ (m)
P	فشار ($kgm^{-1}s^{-2}$)
R	شعاع پیچ (m)
Re	عدد رینولدز
T	دما (K)
u	سرعت (ms^{-1})
w	عرض کانال (m)

علائم یونانی

θ_b	زاویه (درجه)
μ	لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)
ρ	چگالی (kgm^{-3})

7- مراجع

[1] C. Rauwendaal, *Polymer Extrusion, Hanser Publishers,* New York, 2014.
[2] Tadmor, Zehev, and C. G. Gogos. *Principles of polymer processing, John Wiley & Sons,* New Jersey, 1986.
[3] G. A. Campbell, P. A. Sweeney, and J. N. Felton, Experimental investigation of the drag flow assumption in extruder analysis, *Polymer Engineering & Science* Vol. 32, No. 23, pp. 1765-1770, 1992.
[4] Y. Li, and F. Hsieh, Modeling of flow in a single screw extruder, *Journal of Food engineering*,Vol. 27, No. 4. pp. 353-375, 1996.
[5] M. H. R,Ghoreishy, M. Razavi-Nouri, and G. Naderi, Finite element analysis of a thermoplastic elastomer melt flow in the metering region of a single screw extruder, *Computational materials science,* Vol. 34, No. 4, pp. 389-396, 2005.
[6] N. Kim, H. Kim, and J. Lee, Numerical analysis of internal flow and mixing performance in polymer extruder I: single screw element, *Korea-Australia Rheology Journal,* Vol. 18, No. 3, pp. 143-151, 2006.
[7] M. V. C. Alvez, J. R. Barbosa, and A. T. Prata, Analytical solution of single screw extrusion applicable to intermediate values of screw channel aspect ratio, *Journal of food engineering,* Vol. 92, No. 2, pp. 152-156, 2009.
[8] G. Tang, B. Zhang, and J. Pei. 3D Model and Numerical Simulation of Ceramic Paste in the Screw Channel of De-Airing Pug Mill, *E-Product E-Service and E-Entertainment (ICEEE),* 2010 *International Conference on, IEEE,* 2010.
[9] R. Yamsaengsung, and Ch. Noomuang, Finite Element Modeling for the Design of a Single-Screw Extruder for Strach-Based Snack Products, *Proceedings of the World Congress on Engineering,* Vol. 3, 2010.
[10] D. O. A. Cruz, and F. T. Pinho, Analysis of isothermal flow of a Phan-Thien-Tanner fluid in a simplified model of a single-screw extruder, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics,* Vol. 167, pp. 95-105, 2012.
[11] R. B. Bird, R. C. Armstrong, O. Hassager, C. F. Curtiss, *Dynamics of polymeric liquids, Wiley,* Vol. 1, pp. 210. New York, 1977.
[12] F. A. Morrison, *Understanding rheology, Oxford University Press,* New York, 2001.
[13] K. Yasuda, R. C. Armstrong, and R. E. Cohen, Shear flow properties of concentrated solutions of linear and star branched polystyrenes, *Rheologica Acta,* Vol. 20, No. 2, pp. 163-178, 1981.

Archive
www.SID.ir