



شبیه‌سازی عددی تورم قالبی در اکستروژن لاستیک‌ها با ANSYS Polyflow: رویکردی در جهت کاهش ضایعات

نادیمه فتحی زاده، محسن دادخواه، شیفته شهبانی

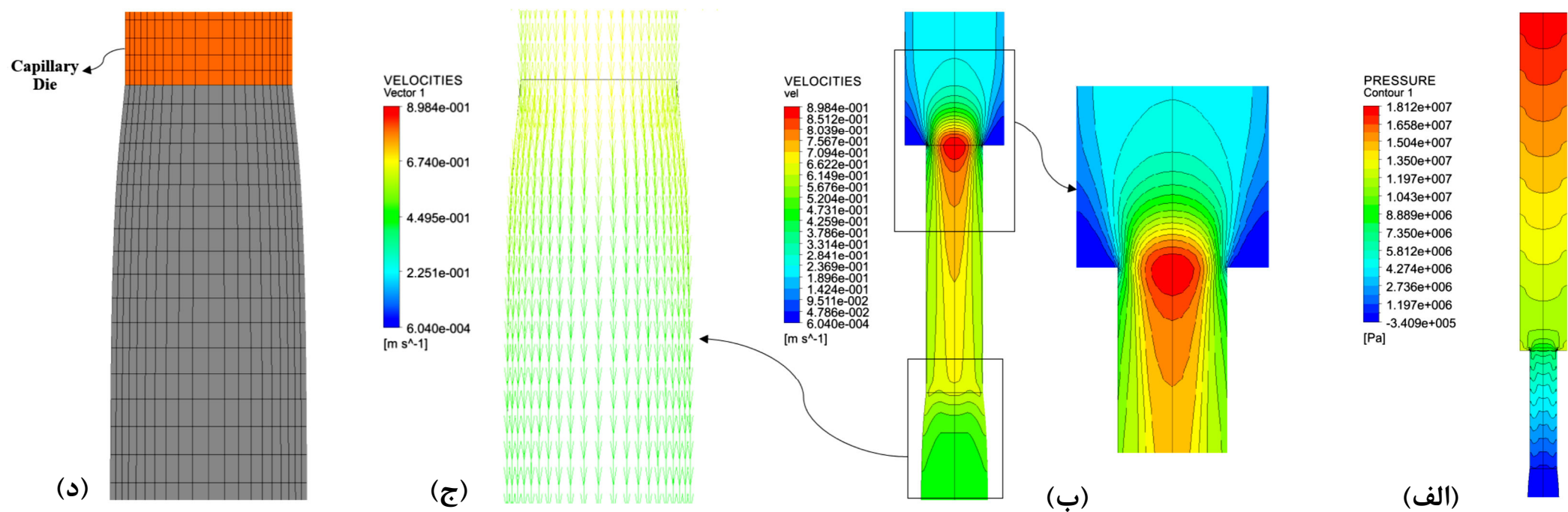
کارشناس اداره طراحی محصول، کارشناس اداره طراحی محصول، مدیر واحد نوآوری و پژوهش مواد گروه صنعتی بارز

E-mail Address: nadimeh.fathizadeh@gmail.com

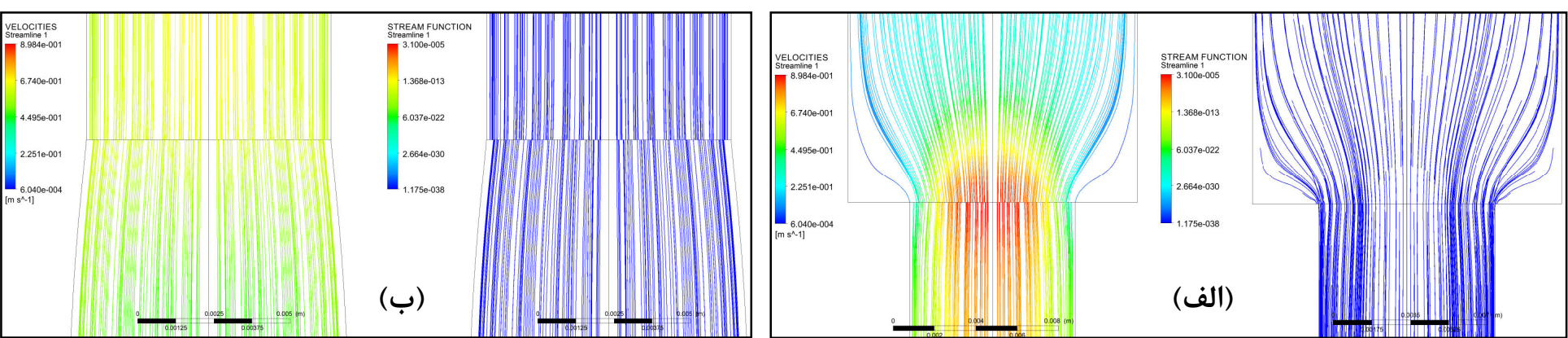


سرعت پروفیل سرعت پارابولیک در داخل قالب را تأیید می‌کند که در ناحیه خروجی به دلیل تورم، سرعت مماسی کاهش و سرعت شعاعی افزایش می‌یابد. بردارهای سرعت جریان همگرا در داخل قالب و واگرا در ناحیه آزاد را برجسته می‌کنند که با پدیده تورم هم‌خوانی دارد (شکل ۳-ج). نحوه جابه‌جایی شبکه در خروجی و شبکه‌بندی مجدد در قسمت (د) شکل (۳) نشان داده شده‌است. خطوط جریان در قسمت ورودی و خروجی کانال را می‌توانید در شکل (۴) مشاهده نمایید. الگوی واگرای جریان در خروجی کاملاً مشخص است.

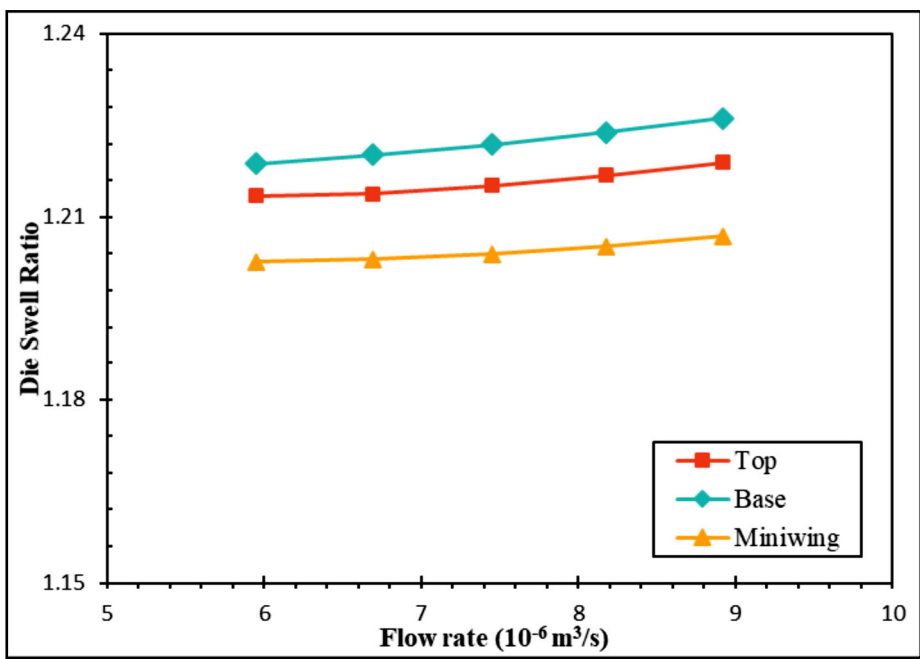
نتایج شبیه‌سازی ترکیبات ترد در شکل ۵ آورده شده است. تغییرات سرعت ورودی بر تورم تأثیر مستقیم دارد و منجر به ناهمگنی ضخامت تا ۲۵٪-۱۵ می‌شود که نرخ ضایعات را افزایش می‌دهد. افزایش سرعت با افزایش دما و کاهش ویسکوزیته ظاهری همراه است که شدت تورم را تشدید می‌کند. در سرعت‌های پایین‌تر، نرخ برشی کاهش یافته و تورم کمتر با توزیع ضخامت یکنواخت‌تر است، اما بهره‌وری محدود می‌شود، تفاوت تورم در سه ترکیب ناشی از خواص متفاوت آن‌هاست. ویسکوزیته در نرخ برشی صفر با تورم رابطه معکوس دارد. در ترکیبات ترد، بررسی تورم در ناحیه بالایی قالب (مربوط به تاب ترد) اهمیت دارد زیرا ضخامت نهایی و کیفیت سطحی را تعیین می‌کند.



شکل (۳) الف) کنتور فشار، ب) کنتور بزرگی سرعت و ج) بردارهای سرعت در قسمت خروجی قالب، برای جریان با دبی 1.85 e-5 m³/s



شکل (۴) خطوط جریان در الف) ورودی قالب و ب) خروجی قالب



شکل (۵) نمودار مقدار تورم قالبی محاسبه‌شده برای آموخته‌های ترد در دبی‌های مختلف

نتیجه‌گیری نهایی

نتایج نشان می‌دهد که بهینه‌سازی مجازی سرعت اکستروژر با Polyflow جایگزین مناسبی برای روش‌های تجربی پرهزینه است. قابلیت بهینه‌سازی سایر عوامل مانند هندسه قالب، نرخ جریان و خواص رئولوژیکی به صورت مجازی وجود دارد. این رویکرد ضایعات ناشی از ابعاد نامناسب را تا ۲۰٪ کاهش می‌دهد [۴]. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده از مدل‌سازی چندفازی سه‌بعدی اکستروژر واقعی استفاده شود تا اثرات دما، فشار و توزیع ویسکوزیته دقیق‌تر بررسی گردد. افزودن انتقال حرارت و کوپل دما-جریان به مدل مفید است، هرچند نیاز به سیستم محاسباتی قوی دارد.

مراجع

- [1]. Mitsoulis, E., Hatzikiriakos, S. G., Christodoulou, K., & Vlassopoulos, D., "Sensitivity Analysis of the Bagley correction to shear and extensional rheology", Rheologica Acta, 37(5), 438-448, 1998.
- [2]. Tanner, R. I., "A theory of die-swell", Journal of Polymer Science A-2 8, 2067–2078, 1970.
- [3]. Zhang, Y., Zhang, X., Yang, M., Li, Y., Yang, Q., Gong, J., & Gao, X., "Experimental validation of two constitutive models for numerical simulation on the extrusion of rubber blends", Polymer Engineering & Science, 63 (11), 3865-3878, 2023.
- [4]. Konaganti, V. K., "Extrudate Swell of High Density Polyethylene in Capillary and Slit Dies", Doctoral Thesis, The University of British Columbia, 2016.
- [5]. Mitsoulis, E., Battisti, M., Neunhäuserer, A., Perko, L., Friesenbichler, W. & Kajiwara, T., "Flow behavior of rubber in capillary and injection moulding dies", Plast Rubber Compos, 46(3), 110-118, 2017.
- [6]. Wang G. L., Zhou, H. J., Zhou, H. C. and Chen Liang, "Viscoelastic Numerical Simulation Study on the Co-Extrusion Process of Tri-Composite Tire Tread", Materials Journal, 2023.
- [7]. Du, Z., "Study of the Swell Behavior of Rubber Compounds", Doctoral Thesis, Clausthal University of Technology, China, 2024.

$$\tau = 2\eta_0 s D + T_1 \quad (1)$$

$$\exp \left[\frac{\tau}{\eta_0} \tau(T_1) \right] * T_1 + \lambda \left[\left(1 - \frac{\xi}{2} \right) * \frac{\tau}{T_1} + \frac{\xi}{2} * \frac{1}{T_1} \right] = 2\eta_0 (1 - s) D \quad (2)$$

که در این رابطه η_0 ویسکوزیته در نرخ برشی صفر (Pa. s)، s نسبت ویسکوزیته خالص، D تانسور نرخ تغییر شکل، λ زمان آسایش، ξ اختلاف تنش نرمال دوم، ε پارامتر کشش‌پذیری و Δ و ∇ به ترتیب مشتق فوق همرفت پایین و بالا^۱ هستند. T_1 تانسور تنش اضافی سیال غیرنیوتنی است. لغزش دیواره نقش مهمی در کاهش تنش‌های برشی و افزایش تورم قالبی دارد. به‌منظور مدل‌سازی این رفتار از مدل ریاضی لغزش Navier استفاده شد، که بدین صورت نوشته می‌شود [۲]:

$$f_v = -k(v - v_{wall})^n \quad (3)$$

که در آن e پارامترهای ماده، v سرعت مماسی سیال، v_{wall} سرعت مماسی دیواره و ضریب لغزش k نشان دهنده درجه لغزش است. نسبت تورم قالبی (B) از نسبت قطر ماده اکستروژده به قطر قالب ($B = D_i / D_0$) محاسبه می‌گردد. پارامترهای رئولوژیک مورد نیاز برای الاستومرهای شبیه‌سازی‌شده در جدول (۱) آورده شده‌است.

جدول (۱) خواص و پارامترهای رئولوژیک برای الاستومرهای شبیه‌سازی‌شده [۳ و ۶]

	PTT Model				Navier's law			ρ (g/cm³)
	η_0	λ	ε	ξ	s	e	k	
Rubber A	33,680	0.1	0.3	0.8	0.112	0.35	5e5	1.109
Cap	142,708	10.8	0.019	0.19	0	0.1	1e6	1.172
Base	116,929	9.5	0.014	0.21	0	0.1	1e6	1.163
Miniwing	202,837	11.6	0.022	0.14	0	0.2	1e6	1.102

شرایط شبیه‌سازی

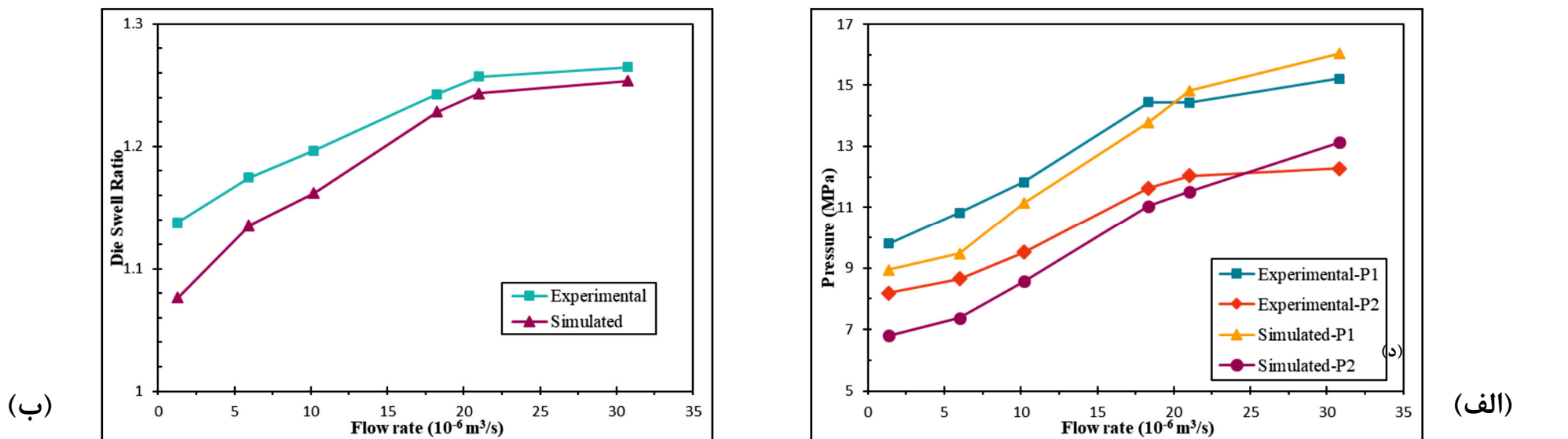
به‌دلیل تقارن موجود در مسئله از یک هندسه دو بعدی با شرط مرزی تقارن چرخشی^۱ استفاده شده‌است. شرایط مرزی عبارتند از:

- B1: Inlet: Volume flow rate (Q, m³/s)
- B2: symmetry, fs=0, vn=0
- B3: Wall, Slip Condition: Navier law: $k: 5e5$, $e: 0.35$
- B4: Free surface: active remeshing for modeling die swell
- B5: Outlet: fn=0, fs=0.

سیال تراکم‌ناپذیر و جریان به‌صورت پایدار^{۱۱} و هم‌دما فرض شده‌است. برای فشارهای زیر ۶ مگاپاسکال قابل‌قبول می‌باشد، اما برای فشارهای بیشتر از این مقدار ممکن است موجب ایجاد خطا ایجاد شود.

استقلال شبکه و اعتبار سنجی

برای اطمینان از دقت و پایداری نتایج عددی، استقلال شبکه نیز بررسی گردید. شبکه‌های کاملاً ساختار یافته با تعداد العان‌های متفاوت (از ۱۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰ العان) ساخته‌شد، با تمرکز بر ناحیه قالب و خروجی برای دقیق سطح آزاد) تولید شدند (قسمت (ب) شکل (۲)). نتایج نشان‌داد که با افزایش تعداد العان‌ها به بیش از ۶۰۰۰، تغییرات فشار در خروجی کمتر از ۱/۱۵٪ است؛ بنابراین، برای تعادل دقت و هزینه‌های محاسباتی شبکه بهینه با ۱۲۲۰ العان و ۱۸۶۷ نود (با اندازه العان کوچک‌تر در نزدیکی دیواره به‌منظور مدل‌سازی بهتر لغزش) برای شبیه‌سازی‌های بعدی انتخاب‌گردید. این گام، خطاهای ناشی از شبکه‌بندی ناکافی را حذف کرده و پایه‌ای محکم برای اعتبارسنجی فراهم آورد. شبیه‌سازی در دبی‌های ورودی مختلف شبیه‌سازی تکرار شد و مقدار فشار در دو بخش (شکل (۲)) و نسبت تورم قالبی محاسبه‌شد. این نتایج در نمودارهای شکل (۲) آورده شده‌است. مقایسه‌ی نتایج عددی با داده‌های آزمایشگاهی [۲] نشان داد که مدل PTT فشار را برای دبی‌های بالاتر (بیشتر از ۶m³/s) با دقت خوب (خطای کمتر از ۵٪) پیش‌بینی می‌کند، اما در دبی‌های پایین‌تر کمی کمتر تخمین می‌زند (به دلیل محدودیت‌های معادله PTT در نرخ برشی پایین). نسبت تورم با افزایش دبی از حدود ۱/۱ تا ۳/۱ افزایش می‌یابد که با داده‌های تجربی تطابق دارد. لحاظ شرط لغزش Navier دقت نتایج را بهبود می‌بخشد.



شکل (۲) مقایسه بین مقدار: الف) فشار محاسبه‌شده در دو قسمت ۱ و ۲ با نتایج آزمایشگاهی و ب) تورم قالبی در نتایج شبیه‌سازی

به‌منظور بررسی کاربردی‌تر مدل شبیه‌سازی در شرایط صنعتی، شبیه‌سازی با سه آمیزه ترد رادیال سواری براساس پارامترهای رئولوژیکی جدول (۱) و با سرعت‌هایی برابر شرایط واقعی عملکرد اکستروژر انجام گردید.

بحث و نتایج

کنتور فشار، سرعت و بردارهای سرعت در دبی ورودی برابر با ۵-۱/۸۵e مترمکعب برثانیه، در شکل (۳) آورده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود کنتور فشار توزیع فشاری یکنواخت در طول کانال ورودی و افت فشار قابل توجه در ناحیه خروجی نشان می‌دهد (شکل (۳) قسمت (الف)). حداکثر فشار در نزدیکی ورودی مشاهده شد که با افزایش دبی، این مقدار افزایش می‌یابد. این توزیع مستقیماً با رفتار ویسکوالاستیک مرتبط است و نشان‌دهنده ذخیره تنش‌های الاستیک در داخل قالب و آزادسازی آن‌ها در خروجی است. کانتور بزرگی

چکیده ضایعات ناشی از تولیدهای آزمایشی یا عدم انطباق نیم‌ساخته‌ها یکی از مضلات صنایع تایرسازی است. در این پژوهش، مدل عددی جریان ویسکوالاستیک غیرنیوتنی پلیمرها در فرآیند اکستروژن با استفاده از نرم‌افزار ANSYS Polyflow شبیه‌سازی شده تا پدیده تورم قالبی و توزیع فشار بررسی شود. هدف اصلی، ارزیابی قابلیت شبیه‌سازی در کاهش ضایعات تولیدی از طریق بهینه‌سازی مجازی پارامترهای فرآیندی مانند نرخ جریان و شرایط رئولوژیکی پلیمر است. برای مدل‌سازی دقیق رفتار رئولوژیکی مذاب پلیمر، از مدل ویسکوالاستیک غیرخطی PTT بهره گرفته شد که توانایی توصیف همزمان ویژگی‌های ویسکوز و الاستیک ماده را دارد. همچنین، لغزش دیواره با قانون Navier مدل‌سازی گردید تا دقت پیش‌بینی تورم افزایش یابد. مدل با داده‌های آزمایشگاهی اعتبار سنجی گردید. شبیه‌سازی برای سه آمیزه ترد رادیال سواری تکرار شد و مشخص گردید که ویسکوزیته در نرخ برشی صفر با تورم رابطه معکوس دارد. این رویکرد می‌تواند در طراحی قالب‌های اکستروژن و کاهش هزینه‌های تولیدی در صنایع لاستیک (مانند تایر) کاربرد داشته باشد.

واژه‌های کلیدی : تورم قالبی، شبیه‌سازی عددی، مدل PTT، کاهش ضایعات، لغزش دیواره، خواص رئولوژیک.

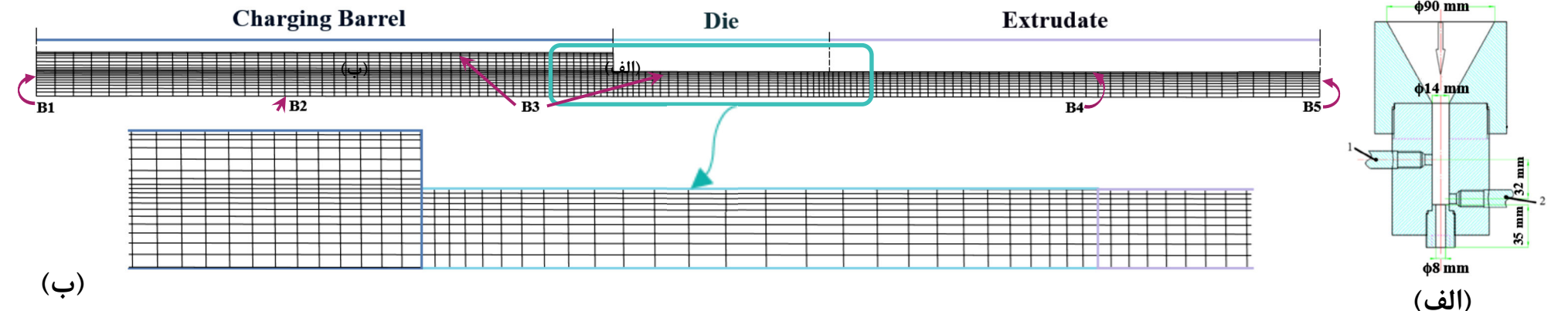
محرور مقاله : مدیریت بهره‌وری/ رهبری در راستای توسعه فناوری و نوآوری

مقدمه

یکی از فرایندهای مهم و کلیدی در صنایع پلیمری، فرآیند اکستروژن می‌باشد که برای تولید محصولات متنوعی از جمله لوله‌ها، پروفایل‌ها و لاستیک‌های صنعتی کاربرد دارد. با این حال، این فرآیند اغلب با چالش‌هایی مانند تورم قالبی^۱، لغزش دیواره^۲ و توزیع ناهمگن فشار همراه است، که منجر به تولید ضایعات می‌شود. شبیه‌سازی عددی به عنوان ابزاری قدرتمند، امکان پیش‌بینی رفتار جریان پلیمرها را فراهم می‌نماید و با به حداقل رساندن روش‌های آزمون و خطا^۳ باعث کاهش ضایعات و هزینه‌ها می‌گردد. تورم قالبی ناشی از آزادسازی تنش‌های الاستیک ذخیره‌شده در ماده هنگام عبور از اکستروژر است. این رفتار ویسکوالاستیک باعث می‌شود ابعاد اکستروژنه خروجی بزرگ‌تر از ابعاد قالب شود و بر کیفیت محصولات نهایی (مانند اجزای پروفیل‌دار تایر) تأثیر منفی بگذارد [۱]. تاکنون مطالعات متعددی با شبیه‌سازی عددی تورم قالبی مواد لاستیکی انجام شده‌است. مدل ریاضی ارائه‌شده توسط Tanner در سال ۱۹۹۸ میلادی یکی از اولین کارهای انجام‌شده در این زمینه بود که تورم را بر اساس خواص ویسکوالاستیک پیش‌بینی کرد [۲]. با گذشت زمان این مدل براساس داده‌های تجربی برای پلیمرهای مذاب توسعه یافت و نشان داد که تورم قالبی به‌شدت به خواص الاستیکی مواد وابسته است. مطالعات اولیه بر مدل‌های ویسکوز ساده مانند مدل Bird-Carreau تمرکز داشتند که ویسکوزیته را به عنوان تابعی از نرخ برش توصیف می‌کنند و برای جریان‌های با الاستیسیته ضعیف مناسب هستند [۳]. Konaganti (۲۰۱۶) با استفاده از مدل‌های PTT^۴ و Bird-Carreau در نرم‌افزار Polyflow، تأثیر هندسه قالب و لغزش دیواره را بر تورم اکستروژنه پلی اتیلن شبیه‌سازی کرد و دریافت که نرخ برشی زیادتر منجر به تورم قالب بیشتر می‌شود. وی نشان داد که بهینه‌سازی هندسه دای می‌تواند ضایعات را تا ۲۰٪ کاهش دهد [۴]. Mitsoulis و همکارانش (۲۰۱۷) با بررسی رئولوژیکی رفتار جریان یک ترکیب لاستیکی در قالب‌های موبین و تزریقی دریافتند که با لحاظ کردن لغزش در دیواره‌ها، نتایج شبیه‌سازی با آزمایش‌های انجام‌شده مطابقت بهتری خواهدداشت [۵]. Wang و همکارانش (۲۰۲۳) فرایند کواکستروژن تولید ترد تایر را با روش‌های تجربی و نیز از طریق شبیه‌سازی عددی بررسی کردند و تأثیر پارامترهای فرآیند (نرخ جریان ورودی و سرعت کشش) و ساختار قالب (زاویه همگرایی و ضخامت) بر شکل و کیفیت ترد را تحلیل نمودند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از شبیه‌سازی عددی می‌تواند به طراحی قالب و افزایش راندمان طراحی کمک کند [۶]. Zhang و همکارانش با استفاده از نرم‌افزار ANSYS Polyflow فرایند اکستروژن دو ماده الاستیک مختلف را مدل‌سازی کردند و مدل PTT را دقیق‌تر از Bird-Carreau برای پیش‌بینی رفتار رئولوژیکی، تورم، توزیع فشار و سرعت دانستند [۳]. Du (۲۰۲۴) رفتار تورم قالبی ترکیبات لاستیکی را به‌صورت جامع مطالعه‌کرد و نشان داد افزایش پرکننده‌های کربنی تورم را کاهش می‌دهد. هم‌چنین مدل‌های ویسکوالاستیک PTT، Giesekus، FENE-P را برای پیش‌بینی تورم در شرایط صنعتی پیشنهادکرد [۷]. امروزه می‌توان با بهره‌گیری از شبیه‌سازی‌های عددی، فرآیندهای تولیدی کارآمدتری را طراحی نمود، به‌گونه‌ای که از حجم ضایعات ایجادشده در اثر فرایند نادرست و یا تولید آزمایشی کاسته‌شود. در این پژوهش، جریان ویسکوالاستیک غیرنیوتنی پلیمر درون قالب با استفاده از نرم‌افزار ANSYS Polyflow شبیه‌سازی شد. این نرم‌افزار یک نرم‌افزار تخصصی CFD^۵ مبتنی بر FEM^۶ می‌باشد. هدف، تحلیل پدیده تورم قالبی و تأثیر سرعت و خواص پلیمر بر آن به‌منظور ارائه راهکارهایی برای کاهش ضایعات می‌باشد.

روش تحقیق

با توجه به عدم دسترسی به داده‌های آزمایشگاهی، مدل با داده‌ها و نتایج منتشرشده در مطالعه‌ی Zhang (مرجع [۳]) اعتبارسنجی شد. هندسه، شرایط مرزی و پارامترهای رئولوژیکی بر اساس مرجع مذکور انتخاب گردیدند. هندسه دستگاه اکستروژن با قالب موبیگی^۷ براساس ابعاد آورده‌شده در مقاله مذکور (قطر قسمت شارژ و قطر قالب به‌ترتیب برابر با ۱۴ و ۸ میلی‌متر، نسبت طول قالب به قطر آن ۴/۳۷۵) با استفاده از نرم‌افزار Design Modeler ایجادگردید. قسمت (الف) شکل (۱) شماتیکی از هندسه را نشان می‌دهد.



شکل (۱) الف) شماتیکی از قالب موبیگی و ب) نمایی از شبکه‌بندی قالب موبیگی

معادلات حاکم

علاوه‌بر معادلات پیوستگی و مومنوم، برای مدل‌سازی ترم تنش ترکیبات لاستیکی در معادله مومنوم از مدل PTT استفاده‌شد که خواص ویسکوالاستیک (مانند تنش‌های نرمال دوم و بازیابی الاستیک) را برای لاستیک‌های با ویسکوزیته بالا مناسب توصیف می‌کند. رابطه مدل PTT بدین صورت است [۲]:

1. die swell
2. wall slip
3. trial and error
4. Phan-Thien-Tanner
5. Computational Fluid Dynamics
6. Finite Element Method
7. Capillary Die