

مطالعه رفتار جریان آمیزه‌های لاستیکی در حديدۀ اکسترودر به روش اجزای محدود

مجتبی باقری جاغرق، میرحمیدرضا قریشی^{*}، قاسم نادری و صدیقه سلطانی

گروه مهندسی و فرایند لاستیک، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران، ایران

چکیده: در این پژوهش برای مطالعه رفتار جریان آمیزه‌های لاستیکی در حديدۀ اکسترودر مدلی بر پایه روش اجزای محدود طراحی شد. در این مدل، معادله‌ها در دستگاه مختصات استوانه‌ای به صورت دوبعدی در نظر گرفته شد و شکل ضعیف معادله‌ها به روش استاندارد گلرکین به دست آمد. سپس دستگاه معادله‌ها ی به دست آمده با استفاده از روش اجزای محدود پنالتی پیوسته حل شد. سیال تراکم‌ناپذیر و جریان لایه‌ای و پایدار در نظر گرفته شد. در این مدل سیال غیر نیوتنی فرض شد و رفتار رئولوژیکی آن با دو مدل پاورلا و کرو بیان شد. در انتها جهت بررسی درستی مدل، جریان آمیزه‌ای از لاستیک طبیعی و لاستیک استایرین - بوتادی‌ان در یک حديدۀ متقارن محوری مدل‌سازی شد و نتیجه‌های به دست آمده با نتیجه‌های تجربی به دست آمده از اکستروژن آمیزه مقایسه شد.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی؛ روش اجزای محدود؛ رئولوژی؛ آمیزه لاستیکی؛ مدل پاورلا؛ مدل کرو

مقدمه

از میان فرایندهای موجود برای شکل‌دهی قطعه‌های پلیمری، اکستروژن یکی از فرایندهای مهم و پرکاربرد به شمار می‌رود. در این فرایند، پلیمر به وسیله ی پیچ اکسترودر به حالت مذاب درآمده و سپس با گذشتن از حديدۀ به شکل نهایی دلخواه درمی‌آید. کنترل شرایط فرایندی در اکستروژن از اهمیت بالایی برخوردار است و می‌تواند از اتلاف مواد اولیه و همچنین انرژی جلوگیری کند.

امروزه مدل‌سازی ریاضی جریان مواد پلیمری در هندسه‌های گوناگون توجه بیشتر پژوهشگران را به خود جلب کرده است [۱-۶]،

زیرا این امکان را فراهم می‌آورد تا بدون انجام آزمون و خطا شرایط بهینه فرایندی را تعیین و در وقت، هزینه و انرژی صرفه جویی کرد. روش‌های متعددی برای مدل‌سازی ریاضی جریان مذاب پلیمر در فرایندهای گوناگون وجود دارد که از میان آن‌ها می‌توان روش اجزای محدود را به عنوان یک روش قدرتمند و دقیق برای این کار نام برد. تاکنون تلاش‌های زیادی برای مطالعه و بررسی رفتار جریان مذاب‌های پلیمری در فرایندهای متفاوت، به ویژه اکستروژن، و به روش اجزای محدود، شده است [۷-۹] و در هر یک از آن‌ها، حالت‌ها و شرایط گوناگون فرایندی در نظر گرفته شده است. دسته‌ای از مواد پلیمری که مصرف بالایی در فرایند اکستروژن

دارند الاستومرها هستند. مطالعه رفتار جریانی آمیزه‌های لاستیکی در حدیده اکسترودر بسیار مهم بوده و تاثیر به سزایی در کنترل ویژگی های آن دارد.

در این کار پژوهشی یک مدل ریاضی برای بررسی رفتار رئولوژیکی آمیزه‌های لاستیکی طراحی شد و برای تعیین درستی آن از آمیزه‌های متشکل از لاستیک طبیعی و لاستیک استایرن - بوتادی ان (NR/SBR) استفاده شد. در این مدل از روش اجزای محدود برای حل معادله های جریان در یک حدیده با هندسه متقارن محوری استفاده شد و نیمرخ سرعت و نیمرخ فشار در حدیده و همچنین دبی جرمی محاسبه شد. فرض‌های در نظر گرفته شده در این مدل به قرار زیر است:

- ۱- سیال تراکم‌ناپذیر و جریان لایه‌ای است.
 - ۲- جریان هم دما و پایدار در نظر گرفته شده است.
 - ۳- به دلیل تقارن محوری حدیده، معادله ها نیز در دستگاه استوانه‌ای و به صورت دوبعدی در نظر گرفته شد.
- با در نظر گرفتن تقارن محوری و فرض دوبعدی بودن جریان، حجم معادله ها و محاسبه ها بسیار کاهش یافته و زمان حل نیز بسیار کمتر می‌شود. در انتها اکستروژن این آمیزه با یک اکسترودر آزمایشگاهی انجام شد و فشار و دبی جرمی به صورت تجربی اندازه‌گیری شد. با مقایسه این مقدار تجربی و دبی جرمی به دست آمده از مدل‌سازی، اختلاف قابل قبولی بین نتیجه های دیده شد که بیان گر توانایی مدل توسعه یافته در مطالعه جریان آمیزه‌های لاستیکی در حدیده اکسترودر است.

مروری بر مدل‌سازی‌های انجام شده

از میان مطالعه های بسیاری که در زمینه مدل‌سازی اجزای محدود جریان مذاب‌های پلیمری در حدیده اکسترودر صورت گرفته است، می‌توان به کار میتسولیس اشاره کرد [۹]. او در این کار با روش اجزای محدود به محاسبه میزان تورم ماده خارج شده از حدیده اکسترودر پرداخت. همچنین می‌توان از کار گانویر و همکارانش [۱۰] نام برد. او نیز با یک روش جدید اجزای محدود به بررسی تورم پس از حدیده پرداخت. از دیگر کارهای انجام شده می‌توان کار هوانگ و همکارانش [۱۱]

را نام برد. آن‌ها به بررسی فرایند اکستروژن لوله‌های پلاستیکی پرداخته و طراحی حدیده به کار رفته در این فرایند را بهبود دادند. افزون بر این کارها، مارین و همکارانش [۱] نیز به بررسی جریان یک مذاب پلیمری پرداختند. آن‌ها در کار خود اثرات الاستیک را نیز در نظر گرفته و پیچیدگی‌های دیگری مانند تغییرهای دمایی و همچنین تغییرها با زمان را نیز در بررسی خود گنجانده. در پژوهشی دیگر قریشی و همکارانش [۶] جریان یک ترموپلاستیک الاستومر را در حدیده اکسترودر مدل کردند. این گروه در کاری دیگر [۷] با یک مدل سه بعدی اجزای محدود جریان این ماده را در ناحیه سنجش (metering) اکسترودر بررسی کردند.

برتاس و همکارانش [۵] نیز توانستند با مدل‌سازی جریان در اکسترودر و همچنین در حدیده، نقطه کاری را برای اکستروژن چند نوع متفاوت از پلی‌اتیلن به دست آورند. همچنین نوروزی و همکارانش [۲] توانستند جریان را درون یک کانال دارای انحنا با سطح مقطع مربعی مدل کنند. آن‌ها در این کار به بررسی اثرات انحنا و نوع سطح مقطع روی نیم رخ سرعت و سایر متغیرهای جریان پرداختند.

برای مطالعه نحوه جریان مواد باید معادله های پیوستگی و اندازه ی حرکت برای سیستم مورد نظر نوشته شود. برای حدیده با هندسه متقارن محوری (شکل ۱) این معادلات در دستگاه مختصات استوانه‌ای و به صورت دوبعدی و با صرف نظر کردن از نیروهای عمل کننده روی حجم (مانند نیروی جاذبه) به صورت زیر درخواهد آمد [۱۳].

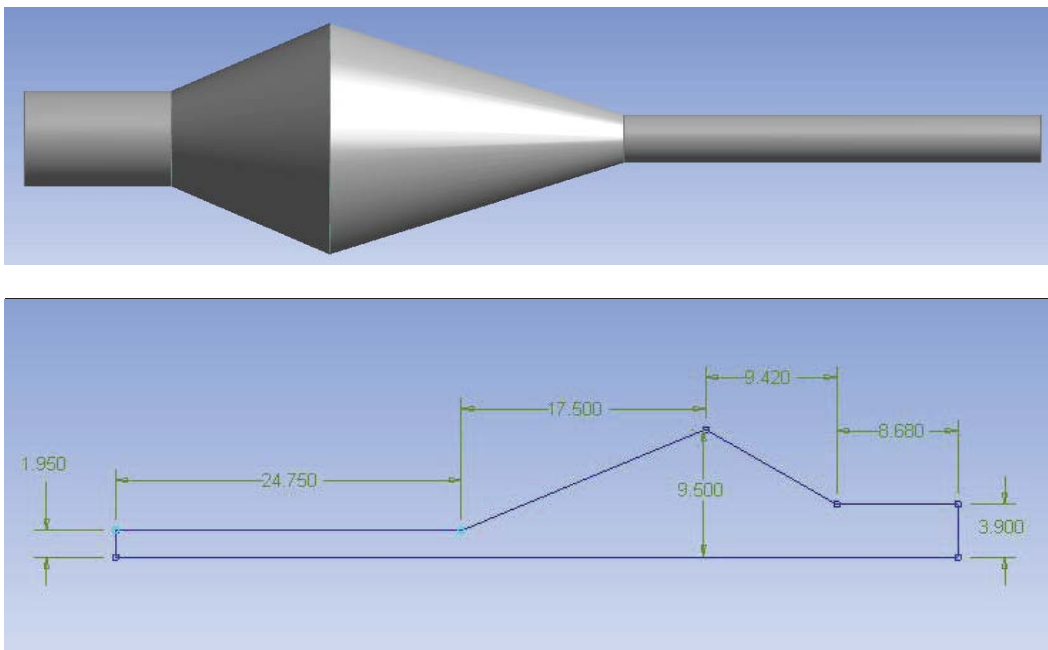
$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r) + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (۱) \quad \text{معادله پیوستگی}$$

(۲) معادله اندازه حرکت در جهت شعاعی (r)

$$\rho \left(v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} - \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\tau_{rr}) + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} - \frac{\tau_{\theta\theta}}{r} \right]$$

(۳) معادله اندازه حرکت در جهت محوری (z)

$$\rho \left(v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} - \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\tau_{rz}) + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right]$$



شکل ۱ شکل سه بعدی و سطح مقطع دو بعدی حدیده استفاده شده برای اکستروژن (واحدها به میلی متر است)

معادلات قانون گرانروی نیوتن است که گرانروی سیال را ثابت و مستقل از میدان در نظر می‌گیرد. اما رفتار رئولوژیکی اکثر مواد در ساده‌ترین حالت وابسته به اندازه تنشور سرعت تغییر شکل است. دو معادله رئولوژیکی به کار رفته در این مطالعه معادله پاورلا (Power-law) و معادله کرو (Carreau) است [۱۴]. در این دو معادله گرانروی سیال تابعی از اندازه تنشور سرعت تغییر شکل است.

$$\eta = \eta_0 \dot{\gamma}^{n-1} \quad (۴) \text{ معادله پاورلا}$$

$$\eta = \eta_0 [1 + (\lambda \dot{\gamma})^2]^{m-1/2} \quad (۵) \text{ معادله کرو}$$

برای حل همزمان این معادله ها و به دست آوردن نیمرخ بردار سرعت نیازمند یک معادله دیگر هستیم که رابطه تنشور تنش (Stress tensor) و تنشور سرعت تغییر شکل (tensor deformation of Rate) را بیان می‌کند. این رابطه به معادله ساختاری یا معادله رئولوژیکی سیال معروف است. با داشتن این معادله دستگاه معادله های ما کامل شده و با حل آن می‌توان سرعت را به دست آورد و سپس با داشتن بردار سرعت می‌توان دبی را محاسبه کرد.

معادله ساختاری سیال

برای بیان رفتار رئولوژیکی یک سیال در جریان‌های با سینماتیک گوناگون، از معادله ساختاری استفاده می‌شود. ساده‌ترین نوع این

$$\underline{v} = 0 \quad (7) \quad \text{شرط مرزی روی دیواره}$$

$$\underline{\hat{n}} \cdot \underline{\underline{\tau}} = 0 \quad (8) \quad \text{شرط مرزی روی محور تقارن}$$

حل اجزای محدود

برای حل دستگاه معادله ها به روش اجزای محدود روش های گوناگونی مانند روش ترکیبی^۱ و روش های پنالتی گسسته^۲ و پنالتی پیوسته^۳ وجود دارد [۱۵ و ۱۶]. در این کار از روش پنالتی پیوسته استفاده شد و مزیت این روش بر دو روش دیگر در این است که حجم معادله ها کمتر بوده و همچنین می توان شرط مرزی فشاری را به طور مستقیم اعمال کرد. در این روش فشار با ضریبی از معادله پیوستگی جایگزین می شود و سپس با قرار دادن مشتقات آن در معادله اندازه حرکت فشار از این معادله حذف می شود.

$$p = -\lambda^* \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r) + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \quad (9)$$

در این معادله λ^* ضریب پنالتی است و خود آن به صورت ضریبی از ناروانی در نظر گرفته می شود.

$$\lambda^* = \lambda \eta \quad (10)$$

با به کار بردن روش استاندارد گلرکین و جایگزین کردن تنش به شکل کلی $\underline{\underline{\tau}} = \eta \underline{\underline{\dot{\gamma}}}$ در معادله های اندازه حرکت و همچنین جایگزینی فشار با توجه به معادله (۹)، به معادله های ضعیف شده زیر می رسیم

$$(11) \quad \text{معادله ضعیف اندازه حرکت در جهت (r)}$$

$$\int \rho \omega \left(v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) d\Omega + \int \left(\frac{\partial \omega}{\partial r} \eta \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) + \frac{\partial \omega}{\partial z} \left(\lambda \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r) + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right] + 2\eta \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \right) d\Omega = \int \omega \left(\eta \left[\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right] n_r + \left[-p + 2\eta \frac{\partial v_z}{\partial z} \right] n_z \right) d\Gamma$$

در این معادلات η ضریب ثابت معادله، n توان معادله و λ یک ثابت زمانی است. همچنین اندازه تنسور سرعت تغییر شکل برای هندسه مورد نظر (به صورت دوبعدی و در دستگاه استوانه ای) به صورت زیر تعریف می شود.

(۶) اندازه تنسور سرعت تغییر شکل

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[\left(2 \frac{\partial v_r}{\partial r} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right)^2 + \left(2 \frac{v_r}{r} \right)^2 + \left(2 \frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \right]}$$

معادله پاورلا تنها رفتار رقیق شونده با برش (shear thinning) مذاب پلیمری را پیش بینی می کند اما معادله کرو قادر به پیش بینی رفتار نیوتنی مذاب در برش های اندک نیز هست و از این جهت بر مدل پاورلا برتری دارد.

جدول ۱ پارامترهای رئولوژیکی آمیزه NR/SBR به دست آمده از

رئومتری اسلیت

	مدل پاورلا	مدل کرو
ρ (g/cm ³)	۰/۹۱	۰/۹۱
n	۰/۵۳	۰/۵۳
K (Pa.s ⁿ)	۳۶۱۷۱	۳۶۱۷۲
λ (s)	-	۰/۹۲

شرایط مرزی

آخرین گام در تعریف مسأله مشخص کردن شرایط مرزی مربوط به آن است. در این مسأله با توجه به هندسه حدیده و دو بعدی در نظر گرفتن آن از دو نوع شرط مرزی استفاده می کنیم. بر روی دیواره شرط مرزی نوع اول (دیریکله) را داریم و سرعت برابر صفر است. در روی محور حدیده با توجه به تقارن مسأله شرط مرزی نوع دوم (نیومان) را خواهیم داشت و اندازه حرکت نفوذی از آن را صفر در نظر می گیریم. این دو شرط مرزی در معادله های زیر آورده شده است.

تنظیم شد و دمای حدیده اکسترودر در ۹۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. داده‌های رئولوژیکی نیز در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شدند.

نتیجه‌ها و بحث

برای انجام مدل‌سازی در ابتدا نیازمند انتخاب یک مش مناسب بودیم و با انجام مدل‌سازی برای چندین مش و بررسی روند تغییر پاسخ با ریزتر شدن مش، یک مش مناسب را برگزیدیم. بدین ترتیب با انتخاب یک مش‌بندی مناسب و اجرای روند گفته شده در بخش‌های پیشین، مدل‌سازی جریان انجام شد. مش به کار رفته در این کار دارای ۳۲۰۰ جزء چهار ضلعی چهار گره‌ای و در جمع ۳۳۸۱ گره بود. شکل‌های ۲ و ۳ به ترتیب نیم رخ سرعت و نیم رخ فشار در این حدیده را نشان می‌دهد.

همان‌طور که از این دو شکل پیداست در ابتدای ورود جریان به حدیده سرعت اندکی بالا بوده و در میانه حدیده به دلیل افزایش سطح مقطع گرادیان فشار در جهت محور حدیده کاهش یافته و به همین خاطر سرعت پایین می‌آید. اما در ادامه با کاهش سطح مقطع و بالا رفتن گرادیان فشار در جهت محور، سرعت نیز به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۲ و ۳ می‌بینیم که مدل توانسته تا حد قابل قبولی فشار را مشابه مقدار اندازه‌گیری شده (اختلاف فشار در جدول ۲ گزارش شده است) به دست آورد. اما در انتهای حدیده انتظار می‌رود فشار به فشار اتمسفر کاهش یابد و صفر شود حال آنکه مدل این توانایی را نداشته و فشار بیشتری را محاسبه کرده است که این مطلب از ضعف روش اجزای محدود پنهالی پیوسته در محاسبه فشار ناشی می‌شود. حال با داشتن نیم رخ سرعت در حدیده می‌توانیم در هر سطح مقطع دلخواه دبی را محاسبه کنیم.

جدول ۲ مقایسه دبی تجربی و مقدار به دست آمده از مدل‌سازی را نشان می‌دهد. همان‌طور که از نتایج پیداست دبی مدل‌سازی با خطای قابل قبولی به دبی تجربی نزدیک است و مقدار خطا هنگام استفاده از مدل کرو کمتر است.

همان‌طور که پیش از این نیز گفته شد برتری مدل کرو در پوشاندن رفتار نیوتنی ابتدایی مذاب پلیمری است در حالیکه مدل پاورلا تنها می‌تواند رفتار رقیق شونده با برش را پوشش دهد. البته حتی با

(۱۲) معادله ضعیف اندازه حرکت در جهت (z)

$$\int \rho \omega \left(v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) d\Omega + \int \lambda \omega \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) d\Omega + \int 2\eta \frac{\omega}{r} \frac{v_r}{r} d\Omega + \int \left[\frac{\partial \omega}{\partial r} \left[\lambda \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + 2\eta \frac{\partial v_r}{\partial r} \right] + \frac{\partial \omega}{\partial z} \eta \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \right] d\Omega = \int \omega \left(\left[-p + 2\eta \frac{\partial v_r}{\partial r} \right] n_r + \eta \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) n_z \right) d\Gamma$$

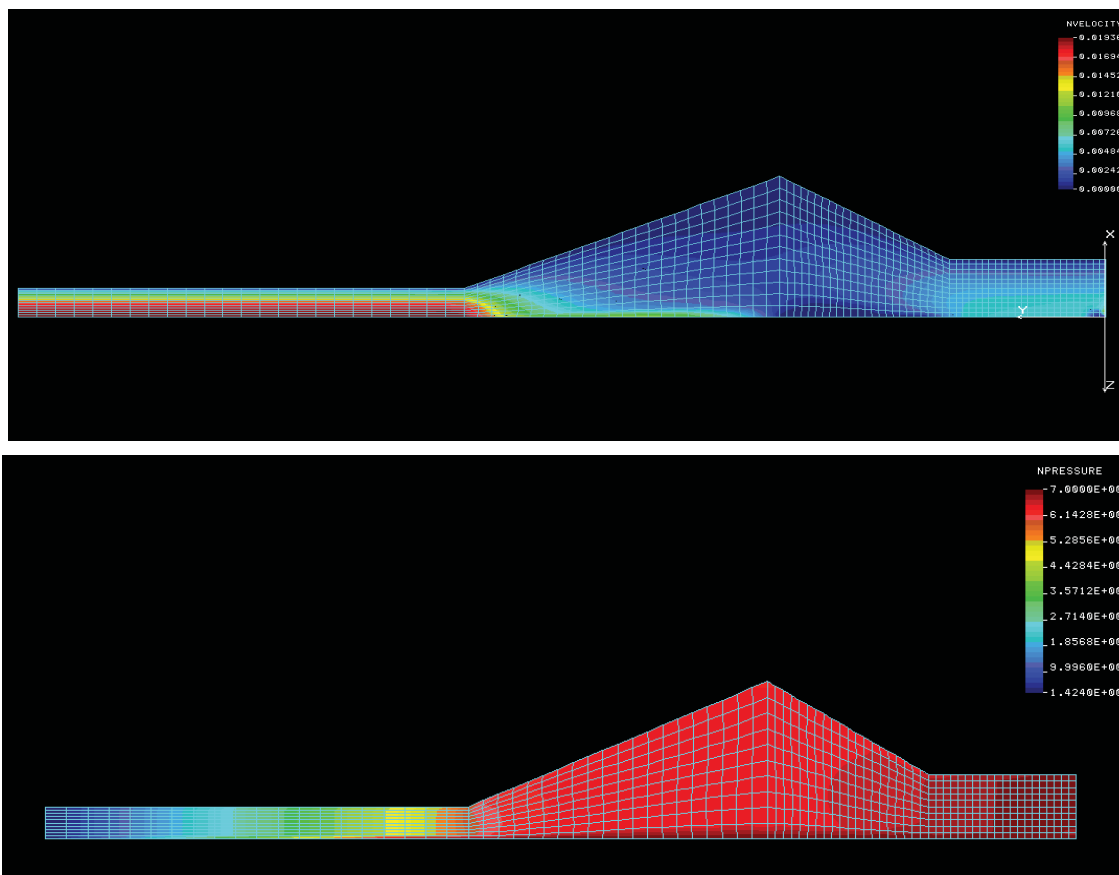
حال با داشتن معادله‌های ضعیف شده، انتخاب یکی از دو مدل رئولوژیکی ارایه شده و همچنین اعمال شرایط مرزی می‌توان دستگاه معادله‌های بالا (معادله‌های (۱۱) و (۱۲)) را حل نموده و نیمرخ سرعت و فشار را به دست آورد. سپس با داشتن سرعت در هر نقطه می‌توان دبی جرمی را محاسبه کرد. در کار حاضر، مدلی تحت زبان برنامه‌نویسی فترن نوشته و از اجزای چهار ضلعی چهار گره‌ای برای مش‌بندی هندسه حدیده استفاده شده است.

بخش تجربی

آمیزه‌ای از لاستیک طبیعی و لاستیک استایرین-بوتادیان به نسبت ۴۰ به ۶۰ روی یک غلتک آزمایشگاهی (Shwabenthan polymix ۲۰۰L) تهیه شد. لاستیک طبیعی از نوع ۲۰ SMR و لاستیک استایرین-بوتادیان از نوع SBR ۱۵۰۲ بود و مدت اختلاط روی غلتک در حدود ۳۰ دقیقه بود. پس از تهیه آمیزه، به آن ۲۴ ساعت استراحت داده شد.

برای به دست آوردن پارامترهای رئولوژیکی موجود در دو معادله پاورلا و کرو آمیزه مورد نظر تحت آزمون رئومتری اسلیت قرار گرفت. با برازش منحنی روی داده‌های به دست آمده از این رئومتری، پارامترهای مورد نظر به دست آمدند.

داده‌های رئولوژیکی این آمیزه در جدول ۱ آورده شده است. پس از آن آمیزه را در یک اکسترودر آزمایشگاهی (Shwabenthan politest ۲۰T) اکسترودر کرده و داده‌های دبی بر حسب اختلاف فشار برای آن ثبت شد. اکسترودر استفاده شده دارای ۳ ناحیه حرارتی بود که دو تای آن روی سیلندر و سومی روی حدیده بود. دمای دو ناحیه حرارتی روی سیلندر به ترتیب ۷۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۲ نیمرخ فشار در حدیده (بدست آمده با استفاده از مدل کرو)

جدول ۲ نتیجه های مدل سازی و مقایسه آن با دبی تجربی

نام مدل	اختلاف فشار (bar)	دبی مدل سازی (s/g)	دبی تجربی (s/g)	درصد خطا (%)
پاورلا	۶۸	۰/۱۳۳۵	۰/۱۱۳۳	۱۷
کرو	۶۸	۰/۱۲۸۲	۰/۱۱۳۳	۱۲

به این ترتیب می توان نتیجه گرفت که مدل توسعه یافته توانایی مدل سازی رفتار جریان آمیزه های لاستیکی در حدیده اکسترودر را داشته و همچنین دو مدل پاورلا و کرو می توانند با خطای قابل قبولی برای بیان رفتار رئولوژیکی این آمیزه ها به کار روند. هرچند برای دستیابی به پاسخ های دقیق تر نیازمند به کار بردن معادله های

استفاده از مدل کرو نیز هنوز خطا وجود دارد و این خطا از این مطلب ناشی می شود که در این مدل سازی رفتار آمیزه الاستومری به طور کامل، ویسکوز در نظر گرفته شده است در صورتیکه می دانیم رفتار این مواد ویسکولاستیک بوده و باید در معادله های ساختاری پاسخ الاستیک جزئی نیز گنجانده شود.

طبیعی و لاستیک استایرین - بوتادی‌ان اکسترود شد و اختلاف فشار و دبی به عنوان داده‌های تجربی ثبت شد. مقایسه نتایج مدل‌سازی و تجربی نشان دهنده توانایی مدل طراحی شده و روش پنالتی پیوسته در مدل‌سازی جریان و توانایی دو مدل پاورلا و کرو و برتری مدل کرو بر مدل پاورلا، در بیان رفتار رئولوژیکی آمیزه‌های لاستیکی است.

ساختاری پیچیده‌تر هستیم.

نتیجه‌گیری

در این کار تحقیقاتی از روش اجزای محدود پنالتی پیوسته برای مدل‌سازی رفتار جریان یک آمیزه لاستیکی در حدیده اکسترودر استفاده شد. رفتار رئولوژیکی این آمیزه با دو معادله ساختاری پاورلا و کرو بیان شد. سپس یک آمیزه لاستیکی متشکل از لاستیک

مراجع

- [8] Ghoreishy, M. H. R. و Razavi-Nouri, M. Journal of Applied Polymer Science, Vol.
- [9] E. Mitsoulis, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg,
- [10] Ganvir, V. و Lele, A. و Thakkar, R. و Gautham, B.P. Non-Newtonian J. و Fluid Mech. 156, 21-28, 2009.
- [11] Huang, Y. Gentle, C.R. Lacey, M. Prentice, P. Materials and Design 21, 465-475, 2000.
- [12] Ashmore, J. و Shen, A. Q. و Kavehpour, H. P. H. Stone, A. McKinley, G. H. و Eng Math, J 60, 17-41, 2008.
- [13] Bird, R.B. Stewart, W.E. و Lightfoot, E.N., New York, 2002.
- [14] Bird, R.B. Armstrong, R. C. Hassager, O., John Wiley & Sons, 1987.
- [15] Nassehi, V. England, 2002.
- [16] Reddy, J.N. Gartling, D.K. second ed., CRC Press, New York, 2001.
- [1] Marin, J.M., Rasmussen, R.H.K., Non-Newtonian Fluid J. Mech. 162, 45-53, 2009.
- [2] Norouzi, M., Kayhani, M.H., Shu, C., Nobari, M.R.H. J. Non-Newtonian Fluid Mech. 165, 323-339, 2010.
- [3] Pramod D. Patil, Isaias Ochoa, James J. Feng, Savvas G. Hatzikiriakos, J. Non-Newtonian Fluid Mech. 153, 25-33, 2008.
- [4] Eric Lee, Yun-Hai Lee, Yao-Tzung Pai, Jyh-Ping Hsu, Chemical Engineering Science, 57, 507-514, 2002.
- [5] Bretas R.E.S. و Granado, C., Eur. Polym. J., vol. 29, No. 6, 769-772, 1993.
- [6] Ghoreishy, M.H.R. Razavi-Nouri, M. Naderi, G., Computational Materials Science, 34, 389-396, 2005.
- [7] Ghoreishy, M. H. R. Razavi-Nouri, M. Naderi, G. Plastics, Rubber and Composites, Vol. 29, No.5, 224-228, 2000.

Finite element study of the flow of rubber compounds in an extruder die

M. Bagheri-Jaghargh, M.H.R. Ghoreishy*, G. Naderi and S. Soltani

Polymer and Petrochemical Institute, , Tehran, Iran

Abstract: A finite element model was developed that can simulate the flow behavior of rubber compounds in extruder dies. In this model 3D flow equations were considered in cylindrical coordinate system and the weak form was derived based on standard Galerkin method. Then the equation set was solved using continuous penalty finite element method. Fluid was considered to be incompressible and the flow was assumed to be laminar and steady state. In this model fluid was presumed as non-Newtonian and Power-law and Carreau constitutive models were applied to reflect its rheological behavior. In the end to verify the model, the flow of a NR/SBR compound was simulated through an axisymmetric die and its results were compared to the experimental results of the extrusion of the compound.

Keywords: Modeling, Finite element method, Rheology, Rubber compounds, Power-law model, Carreau model

*E mail: m.h.r.ghoreishy@ippi.ac.ir