

مدلسازی دینامیکی حدیده‌های اکسترودر به روش اجزای حجمی محدود

Dynamic Modelling of Extrusion Dies by Finite Volume Method

علی حبیبی^۱، بهرام دبیر^۲، محمدرضا گلکارنارنجی^۳

۱- پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشگاه پلیمر، ۳۰۲- دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی شیمی

دریافت: ۱۳۹۴/۴/۲۵، پذیرش: ۱۳۹۵/۱/۲۵

چکیده

فرایند اکستروژن یکی از مهم‌ترین فرایندهای شکل‌دهی مواد در صنایع پلیمری، بویژه لاستیک و پلاستیک، است. تحلیل دینامیکی این فرایند، به دلیل تعدد پارامترهای موثر و کنترل‌کننده و همچنین تداخل متغیرها و پدیده تاخیر انتقال، از پیچیدگی خاصی برخوردار است. برای بهینه‌سازی فرایند و طراحی سیستم کنترل بهینه باید پارامترهای کنترل‌کننده فرایند و ارتباط نظام‌دار بین آنها و مسیر تغییرات گذرای سیستم بررسی شود. در این مقاله، مدلسازی دینامیکی حرکت پلی‌اینل سنگین و پلی‌اینل سبک خطی در حدیده‌های با مقطع دایره‌ای به روش اجزای حجمی محدود مطالعه می‌شود. در فرایند شبیه‌سازی عددی و گسسته‌سازی از مدل جریان بالادست استفاده شده است. بر این اساس، برنامه کامپیوتری جهت بهینه‌سازی پارامترهای رئولوژیکی و برنامه دیگری برای محاسبه فاکتورهای مدل دینامیکی در حالت شبه‌پایا نوشته شده است. به منظور بررسی میزان انطباق مدل ریاضی با شرایط واقعی، نتایج حاصل از مدل ریاضی با داده‌های تجربی مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که با روش اجزای حجمی محدود همراه با مدل جداسازی جریان بالادست می‌توان با دقت و سرعت روشهای محاسباتی را تضمین کرد.

واژه‌های کلیدی: مدلسازی دینامیکی، اکستروژن، حدیده، رئولوژی، روش اجزای حجمی محدود

Key Words: dynamic modelling, extrusion, die, rheology, finite volume method

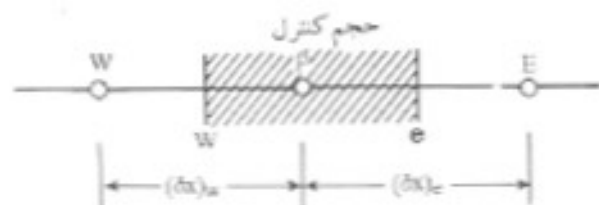
مقدمه

اکستروژن مهم‌ترین روش برای فرآوری پلیمرها و شکل‌دهی آنهاست. در صنعت پلاستیک انواع لوله، ورق، پروفیل و پوشش کابل و سیم به کمک این روش تولید می‌شود [۱-۳].

همچنین با پیشرفتهایی که طی سالهای اخیر در طراحی و ساخت اکسترودر صورت گرفته است، امروزه از این فرایند به عنوان یکی از روشهای مهم اختلاط و آمیزه‌سازی مواد پلیمری استفاده می‌شود [۴،۵]. کارایی و عملکرد بک اکسترودر به حدیده آن بستگی دارد.

حدیده بخشی از اکسترودر است که با عبور آمیزه از آن محصول شکل نهایی را به خود می‌گیرد. حدیده باید این قابلیت را داشته باشد که با حداکثر دبی جریان، قطعه موردنظر را طوری تولید کند که آثار غیرعادی جریان در آن مشاهده نشود. هدف از تحلیل ریاضی جریان پلیمر در حدیده یافتن اطلاعاتی در زمینه افت فشار، خطوط جریان و توزیع مربوط به سرعت، زمان اقامت، تنش برشی و سرعت برش و همچنین تعیین توزیع دما در جریان ناهمدماست [۶،۷]. با استفاده از این اطلاعات می‌توان در مورد یکنواخت بودن نرخ

مجله علمی-فصلنامه‌ای پژوهش‌های مهندسی و فناوری
سال نهم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۹۵



شکل ۱- نمونه‌ای از شبکه بندی برای مسئله یک بعدی.

روش اجزای حجمی محدود

معادله دیفرانسیل انتقال را در حالت یک بعدی و ساده آن، که منشکل از جمله‌های نفوذ و جابه‌جایی است، برای یک خاصیت عمومی به ازای واحد جرم سیستم، ϕ ، در نظر می‌گیریم [۶، ۱۴]:

$$\frac{d}{dx}(\rho u \phi) = \frac{d}{dx} \left(\Gamma \frac{d\phi}{dx} \right) \quad (1)$$

با توجه به جزء حجم کنترل (شکل ۱) از معادله بالا روی حجم کنترل انتگرال می‌گیریم تا معادلات ابتدایی اجزای حجمی محدود (finite volume method) بدست آید [۱۵]:

$$(\rho u \phi)_e - (\rho u \phi)_w = \left(\rho \frac{d\phi}{dx} \right)_e - \left(\rho \frac{d\phi}{dx} \right)_w \quad (2)$$

برای حل عددی معادله ۲ باید مقادیر u و ϕ را در سطوح کنترل w و e بدست آوریم. سپس به کمک اطلاعات سطح کنترل، مقادیر خواص سیستم را در جزء حجمی با استفاده از قضیه دیورژانس (divergence theorem) برآورد کنیم.

برای بدست آوردن نتایج کمی درباره خواص سیستم در سطح کنترل باید از اطلاعات نقاط شبکه (nodal points) استفاده کرد. بر حسب اینکه جهت تقریب مقادیر مرزی از روی نقاط شبکه کدام تابع برونمایی بکار برده شود، روشهای مختلفی ارائه شده است:

- اختلاف مرکزی
- جریان بالادست
- نمایی
- قانون توانی
- هیبرید

در انحام این پژوهش از روش برونمایی جریان بالادست استفاده شده است.

روش برونمایی بر اساس مدل جریان بالادست

این روش به طرح اختلاف جریان بالادست (upstream difference scheme) یا روش سلول‌دهنده نیز معروف است. در روش جریان

سرعت و دما در خروجی حدیده قضاوت کرده و ابعاد حدیده، شکل مجرای توزیع جریان و مشخصات مکانیکی حدیده را محاسبه کرد [۸، ۹]. بطور کلی می‌توان حدیده‌ها را برای تولید سطح مقطعی متفاوت با اشکال ویژه بکار برد. حدیده‌ها را بر حسب شکل هندسی محصول تولید شده به دو دسته، حدیده‌های با اشکال هندسی منظم و حدیده‌های با اشکال هندسی نامنظم، تقسیم می‌کنند. ساده‌ترین انواع حدیده‌های اکستروژن برای تولید محصولات دارای تقارن محوری بکار می‌روند. یکی از اساسی‌ترین مسائل در طراحی و ساخت حدیده، کاهش نقاط ساکن جریان (stagnation points) به حداقل ممکن است. بدین ترتیب، مواد پلیمری در نقاط ساکن جریان فرار نمی‌گیرند و تخریب پلیمر به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد [۷].

در یک حدیده با سطح مقطع ثابت، با افزایش طول آن بر میزان فشار در جلوی پیچ افزوده می‌شود. این پدیده منجر به کاهش دبی خروجی جریان خواهد شد. از سوی دیگر، افزایش طول حدیده منجر به توسعه یافتن جریان و کاهش بروز پدیده‌های کششی چون تورم و انقباض می‌شود [۱۰]. بنابراین، کاهش طول حدیده اگرچه موجب کاهش فشار در جلوی پیچ می‌شود و دبی جریان را افزایش می‌دهد، ولی از سوی دیگر سبب بروز پدیده‌های کششی می‌شود. از این رو، در طراحی حدیده باید به حالت پهنه‌ای بین طول کوتاه و فشار کم و طول بلند و فشار زیاد دست یافت [۱۱].

اساس نظری

معادلات لازم برای تحلیل حرکت پلیمر دو حدیده

جریان مذابهای پلیمری را موقعی می‌توان بطور کامل توصیف کرد که بر دماهای سرعت موضعی و کمپتهای ترمودینامیکی دما، فشار و چگالی در هر نقطه از جریان و در هر لحظه از زمان مشخص باشد. برای بدست آوردن متغیرهای سینماتیکی و ترمودینامیکی حرکت پلیمرهای مذاب در حدیده باید معادلات بقای جرم، انرژی، اندازه حرکت و معادلات مشخصه‌ای راه که حاکم بر رفتار رئولوژیکی پلیمرند، بطور همزمان حل کرد [۱۲، ۱۳].

برای تحلیل حرکت ناهمدمای پلیمرها در حدیده، در کلی‌ترین شکل آن، معادلات زیر لازم است:

- قانون بقای جرم (معادله پیوستگی)،
- قانون بقای اندازه حرکت (معادله حرکت)،
- قانون بقای انرژی (قانون اول ترمودینامیک)،
- معادلات مشخصه (معادلات رئولوژیکی) و
- معادلات حالت ترمودینامیکی پلیمرها.

$$\phi_w \left(\frac{\partial a}{\partial t} \right) + a_N \phi_N + a_s \phi_s + \phi_p^* \rho_p^* \frac{\Delta r \Delta z}{\Delta t} \quad (8)$$

سرانجام، پس از بازآرایی، شکل بسته معادلات جبری حاصل به صورت زیر درمی آید:

$$a_p \phi_p = a_E \phi_E + a_w \phi_w + a_N \phi_N + a_s \phi_s + b$$

$$a_E = (r_e/r_p) D_e + [-F_e, O]$$

$$a_w = (r_w/r_p) D_w + [F_w, O]$$

$$a_N = D_N + [-F_N, O]$$

$$a_s = D_s + [F_s, O]$$

$$a_p^* = \rho_p^* \Delta r \Delta z / \Delta t$$

$$a_p = a_E + a_w + a_N + a_s + a_p^*$$

$$b = S \Delta r \Delta z + \phi_p^* A_p^*$$

روش حل عددی معادلات

در مدلسازی دینامیکی جریان گذرا در یک حدیده با جریان تک محوری شکل ماتریسی معادلات بالا چنین خواهد بود:

$$\begin{bmatrix} b_1 & c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ q_2 & b_2 & c_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_3 & b_3 & c_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & a_i & b_i & c_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{N-1} & b_{N-1} & c_{N-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_N & b_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \dots \\ \phi_i \\ \phi_{N-1} \\ \phi_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \dots \\ d_i \\ d_{N-1} \\ d_N \end{bmatrix}$$

ماتریس سه قطری بالا به کمک الگوریتم توماس حل می شود. الگوریتم توماس بر مبنای ارائه راه حل بازگشتی (recursive solution) استوار است. تاکنون هیچ الگوریتمی سریعتر، کم خرجتر و دقیقتر از الگوریتم توماس برای حل مسائل ماتریس سه قطری ارائه نشده است.

جدول ۱ - مشخصات مواد مصرفی در آزمایشها.

ρ (g/cm ³)	MFI (g/10 min)	پلیمر
0/926	0/9	LLDPE
0/935	0/93	
0/93	1	
0/95	2/3	HDPE
0/956	2/8	

توضیح: اندازه گیری MFI در دمای 190°C و با وزنه 21/6 kg صورت گرفته است.

بالادست فرض می شود که مقدار یک ویژگی در مرز حجم کنترل برابر مقدار آن در نقطه شبکه بالادست جریان است. بنابراین، اگر $D = \Gamma/\phi x$ و $F = \rho u$ باشد، برای $F_e > 0$ و $F_e < 0$ برای $\phi_e = \phi_p$ و برای $F_e = 0$ تساوی $\phi_e = \phi_p$ برقرار است. با معرفی عملگر ماکسیمم، معادله دو ضابطه ای بالا به شکل فشرده زیر نوشته می شود:

$$F_e \phi_e = \phi_p [F_e, O] - \phi_E [-F_e, O] \quad (3)$$

پس از جایگزینی این معادله در معادله ۲ و ساده سازی و بازآرایی داریم:

$$a_p \phi_p = a_E \phi_E + a_w \phi_w$$

$$a_E = D_e + [-F_e, O] \quad (4)$$

$$a_w = D_w + [-F_w, O]$$

$$a_p = D_e + [F_e, O] + D_w + [-F_w, O] = a_E + a_w + (F_e - F_w)$$

فرمولبندی مسئله برای حدیده ای با سطح مقطع دایره ای و غیر دایره ای معادله دیفرانسیل نفوذ- جابه جایی برای یک حدیده با سطح مقطع دایره ای چنین است [۱۸-۱۶]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r J_r) + \frac{\partial z}{\partial z} = S \quad (5)$$

S سهم جمله منبع (source term) را در معادلات نشان می دهد که می تواند گرادیان فشار در معادله اندازه حرکت و گرمایش گرانو در معادله انرژی باشد:

$$J_r = \rho V_r \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial r} \quad (6)$$

$$J_z = \rho V_z \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial z}$$

معادله پیوستگی (continuity equation) در مختصات استوانه ای به صورت زیر نوشته می شود:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho V_r) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho V_z) = 0 \quad (7)$$

اگر معادلات ۵ و ۷ را به شکل گسسته نوشته و از هم کم کنیم، پس از یک سلسله عملیات ریاضی، معادله زیر بدست می آید:

$$\phi \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \frac{\Delta r \Delta z}{\Delta t} + \left(\frac{r_e}{r_p} \right) a_E + \left(\frac{r_w}{r_p} \right) a_w + a_N + a_s \right) = \phi_E \left(\frac{r_e}{r_p} a_E \right) +$$

جدول ۲ - نتایج آزمون رئومتر مویین برای HDPE با حدیله‌ای به طول ۵/۰۸۶۰۹۶ و قطر سوراخ ۰/۱۲۷۵۰۸ cm.

سرعت حرکت پیستون در حدیله (cm/s)						دما (°C)
۲۰	۶	۲	۰/۶	۰/۲	۰/۰۶	
۴۰۵	۳۳۰	۲۹۸	۱۹۹	۱۳۷	۸۷/۵	۱۷۰
۳۶۰	۳۲۴	۲۶۶	۱۷۹	۱۲۶	۷۱	۱۹۰
۳۶۰	۳۲۴	۲۴۸	۱۵۲	۱۱۹	۴۱	۲۱۰
۳۶۰	۲۹۹	۱۹۰	۱۱۳	۷۶	۳۴/۸	۲۳۰

در برنامه کامپیوتری استفاده شده است.

در جدولهای ۲ تا ۴ نمونه‌ای از آزمونهای رئومتر مویین برای HDPE ارائه شده است و در جدولهای ۵ و ۶ خروجیهای برنامه جهت محاسبه پارامترهای رئولوژیکی مدل ارائه شده است. با استفاده از روش قانون توانی ثابتهای C_1 و C_2 و ثابت تناسب K به صورت زیر بدست می‌آید:

$$C_1 = \log K = -0.32921$$

$$C_2 = n = 0.29980$$

$$K = 0.45792$$

معادله کاریو مورد استفاده به صورت زیر است:

$$\eta = A/(1 - Br)^C$$

که در آن A گرانیوی در سرعت برش صفر است. با استفاده از برنامه کامپیوتری، ثابتهای A و B و C به ترتیب برابر $4387/7120$ ، 0.020 و 0.47779 بدست آمد.

اشاره می‌شود که نمونه‌ای از داده‌های تورم که نشان‌دهنده ویژگیهای کشسان مذاب پلیمری است در ستون سوم جدول ۴ نشان داده شده است.

در بخش دوم آزمایشها، رفتار دینامیکی LLDPE در حدیله دایره‌ای و در سه آرایش دمایی متفاوت بررسی و فشار در مقطع ورودی

تجربی

مواد

مشخصات مواد مصرفی در این پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است.

شرح دستگاه و آزمایشهای انجام شده

دستگاه اکسترودر مورد استفاده در آزمایشها ساخت کارخانه هکک آلمان بوده و مجهز به سه المان گرمایی، سیستم کنترل کامپیوتری، دو مکان (port) جهت نصب ترموکوپل و مبدل فشار و تجهیزات جانبی دیگر است. در انجام آزمایشها از یک پیچ نک مجرای با مشخصات زیر استفاده شده است:

قطر پیچ 0.01905 m، گام پیچ 0.01905 m، عمق مجرا در ابتدا و انتهای پیچ به ترتیب 0.00381 m و 0.0127 m، طول ناحیه سنجش 0.03175 m و L/D برابر ۲۵.

مجموعه آزمایشهای انجام شده در سه بخش متفاوت صورت گرفته است.

در بخش اول آزمایشهای رئومتر و همچنین بررسی ویژگیهای کشسانی مانند پدیده تورم و انقباض روی دو نوع پلی‌اتیلن سنگین (HDPE) و پلی‌اتیلن سبک خطی (LLDPE) در چهار دمای فراورش مختلف و شش سرعت متفاوت انجام و نتایج تجزیه و تحلیل شد. در مرحله بعد، این آزمایشها برای سه نوع حدیله با شکلتهای هندسی متفاوت تکرار شد. سپس، از این داده‌ها برای محاسبه پارامترهای رئولوژیکی مدل‌های دو و سه پارامتری قانون توانی و کاریو (Carreau)

جدول ۳ - نتایج آزمون رئومتر مویین برای HDPE با حدیله‌ای به طول ۲/۵۶۲۸۶ و قطر سوراخ ۰/۰۷۴۹۳ cm.

سرعت حرکت پیستون در حدیله (cm/s)						دما (°C)
۲۰	۶	۲	۰/۶	۰/۲	۰/۰۶	
۶۲۰	۳۵۶	۲۲۷	۲۰۰	۱۶۵	۹۳/۵	۱۷۰
۵۴۵	۳۰۸	۲۱۶	۱۸۴	۱۶۰	۸۵	۱۹۰
۵۱۵	۳۲۰	۲۶۰	۲۰۸	۱۴۸	۷۴	۲۱۰
۴۹۰	۳۲۸	۳۱۲	۲۲۰	۱۳۲	۵۳	۲۳۰

جدول ۴ - نتايج آزمون رثومتري موبين براى HDPE با حديد‌هاى به طول ۵/۰۶۲۲۲ و قطر سوراخ ۱۵۱۶۳۸cm / ۰.

سرعت حرکت پيستون در حديد‌ه (cm/s)						دما (°C)
۲۰	۶	۲	۰/۶	۰/۲	۰/۰۶	
۲۹۲	۲۶۸	۲۰۴	۱۴۰	۱۰۴	۴۷	۱۷۰
۲۵۲	۲۴۴	۱۹۰	۱۳۳	۹۵	۴۹	۱۹۰
۲۸۰	۲۳۲	۱۷۰	۱۱۰	۸۲	۴۰	۲۱۰
۲۷۶	۲۰۸	۱۵۰	۸۸	۶۰/۵	۳۳/۴	۲۳۰

نتايج حاصل از برنامه رثولوژيكي وارد برنامه مدل دینامیکی کرد. همچنين با قرض جريان تک سویی، معادلات انتقال به کمک الگوریتم توماس حل شده است. استفاده از الگوریتم توماس در حل ماتریسهای سه قطری، خطای ناشی از روشهای محاسباتی را به دلیل ماهیت تحلیلی آن به حداقل می‌رساند.

بحث و نتیجه‌گیری

نتايج حاصل از جريان در حديد‌هاى با سطح مقطع دایره‌ای در دو بخش تنظیم شده است. در بخش اول، دقت مدل و روش محاسباتی اجزای حجمی محدود و روش جريان بالادست برای مدل‌های رثولوژيكي مختلف با نتايج تحلیلی حاصل از مدل نیوتونی مقایسه شده است. در شکل ۲ منحنی دینامیکی جريان به مدل اعمال شده است. در شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب مقادیر افت فشار و تغییرات تنش برشی در دیواره حديد‌ه در حالت دینامیکی برای مدل‌های مختلف نیوتونی، پلاستیک بینگهام، الیس، قانون توانی و سبسکو مقایسه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود براساس مدل نیوتونی، افت فشار و تنش برشی کمتری نسبت به مدل قانون توانی پیش‌بینی می‌شود. نتايج بالا با اصول نظری قابل انطباق بوده و این اختلاف کم ناشی از ماهیت معادله رثولوژيكي است [۱۸]. مدل‌های الیس و سبسکو، به دلیل در نظر گرفتن گرانشی در تنش برشی صفر، انحراف کمتری از مدل تحلیلی نیوتونی دارند و این مسئله با اساس

به حديد‌ه، میزان گشتاور مصرفی و سرعت برشی وارد شده بوسیله آكسرودر اندازه‌گیری شده است. نمونه‌ای از نتايج حاصل در جدول ۷ ارائه شده است.

بخش سوم آزمایشها شامل تغییر پارامترهای آزمایش قبل از ورود پلیمر به حديد‌ه است و اثر تاریخچه گرمایی و مکانیکی پلیمر روی رفتار دینامیکی آن در حديد‌ه مطالعه شده است.

برنامه کامپیوتری

برنامه نوشته شده شامل دو بخش رثولوژيكي و مدل دینامیکی است. در بخش رثولوژيكي، برنامه شامل روش بهینه‌سازی خطی برای تعیین ضرایب مدل قانون توانی و یک برنامه بهینه‌سازی غیرخطی برای تعیین ضرایب مدل کاریو است. در حل مسئله غیرخطی یادشده از روش انتخاب مرتبه (order selection) استفاده شده است. برنامه دیگر مربوط به مدل دینامیکی جريان پلیمر در حديد‌ه است. برنامه محاوره‌ای به مدل دینامیکی جريان پلیمر در حديد‌ه است. برنامه محاوره‌ای (interactive program) بوده و می‌توان با آن جريان دینامیکی پلیمر را در انواع حديد‌ه‌های متفاوت با سطح مقطع دایره‌ای، مربع مستطیلی و سایر مقاطع غیر دایره‌ای تجزیه و تحلیل کرد. از قابلیت‌های دیگر برنامه این است که می‌توان همه معادلات رثولوژيكي جريان پلیمرها را روی آن سوار کرد. برنامه برای مدل‌های رثولوژيكي نیوتنی، پلاستیک بینگهام، قانون توانی، الیس، سبسکو و کاریو نوشته شده است. از نکات جالب دیگر برنامه این است که می‌توان داده‌های خام تجریری را بوسیله

جدول ۵ - نتايج آزمون رثومتري موبين و پارامترهای رثولوژيكي محاسبه شده برای HDPE در دمای ۱۷۰ °C و قطر محصول روزنرانی (Di) ۸ cm.

η_a (Pa.s)	$\log \gamma$	γ (s ⁻¹)	$\log \tau$ (N/m ²)	τ (N/m ²)	F (N)	V_x (cm/min)	Di/D
۵۲۶۸/۱۸۷	۱/۲۰۴	۱۶/۰۰	۴/۹۲۶	۸۴۲۶۶/۷	۷۷۵/۰	۰/۰۶	
۳۷۰۱/۰۶۸	۱/۷۲۷	۵۳/۳۲	۵/۲۹۵	۱۹۷۳۳۳/۵	۱۸۱۴/۹	۰/۲	۱/۱۶۳
۱۹۴۷/۲۲۸	۲/۲۰۴	۱۵۹/۹۵	۵/۴۹۳	۳۱۱۴۶۷/۰	۲۸۶۴/۵	۰/۶	۱/۲۸۶
۷۵۶/۲۱۸	۲/۷۲۷	۵۳۳/۱۸	۵/۶۰۶	۴۰۳۲۰۰/۴	۳۷۰۸/۲	۲	۱/۳۲۷
۲۷۳/۴۱۲	۳/۲۰۴	۱۵۹۹/۵۴	۵/۶۴۱	۴۲۷۳۳۳/۸	۴۰۲۲/۱	۶	۱/۵۵۵
۱۰۵/۰۳۰	۳/۷۲۷	۵۳۳۱/۸۰	۵/۷۴۸	۵۶۰۰۰۰/۵	۵۱۵۰/۳	۲۰	۱/۶۶۸

توضیح: Di: گرانشی طعری است.

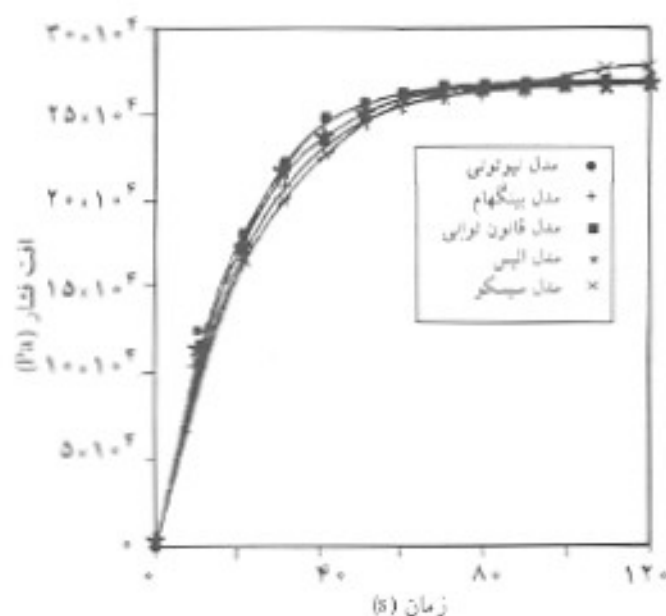
جدول ۶ - محاسبه پارامترهای مدل‌های رئولوژیکی.

$\eta_a - \eta_c$ (Pas)	$\log \eta_c$	η_c (Pas)	$\log \eta_a$	η_a (Pas)	γ (s ⁻¹)
-۸۷/۱۹	۸/۱۳۵	۳۴۱۳/۲۹	۸/۱۱۰	۳۳۲۶/۱۰	۱۶/۰۰
۶۱/۳۵	۷/۷۳۰	۲۲۷۵/۳۴	۷/۷۵۶	۲۳۳۶/۶۹	۵۳/۳۲
۳۱/۴۹	۷/۰۸۸	۱۱۹۷/۹۰	۷/۱۱۴	۱۲۲۹/۳۹	۱۵۹/۹۵
۲/۱۲	۶/۱۶۴	۴۷۵/۳۳	۶/۱۶۸	۴۷۷/۴۴	۵۳۳/۱۸
-۱۲/۹۲	۵/۲۲۳	۱۸۵/۵۴	۵/۱۵۱	۱۷۲/۶۲	۱۵۹۹/۵۴
۲/۶۷	۴/۱۵۳	۶۳/۶۵	۴/۱۹۴	۶۶/۳۱	۵۳۳۱/۸۰

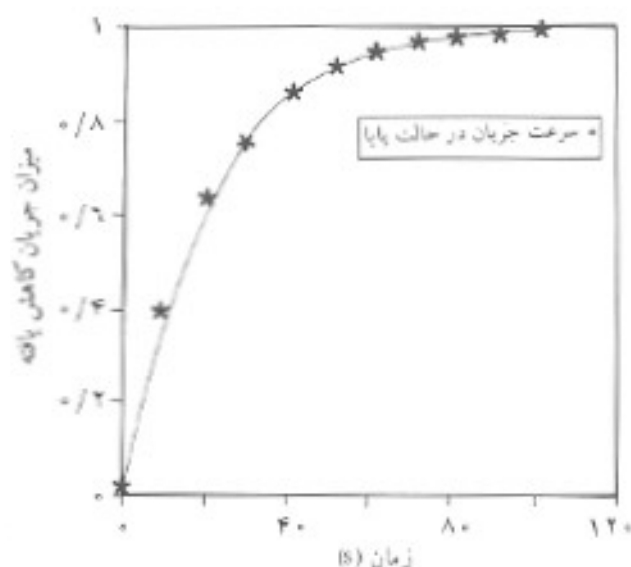
توضیح: η_c گراری محاسبه شده است.

سازگاری دارد. در شکل‌های ۸ و ۹ اثر دما بر رفتار دینامیکی افت فشار و تغییرات تنش برشی در دیواره حدیده با سطح مقطع دایره‌ای نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش دما، آثار غیرنیوتونی کاهش می‌یابد و مقدار پارامترهای پادشده با افزایش دما کم می‌شود. اثر دما در تغییر دمایی مرحله دوم، یعنی از ۱۹۰ تا ۲۱۰ °C، مشهودتر است زیرا آثار غیرنیوتونی در این مرحله بشدت کاهش می‌یابد [۱۹]. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ اثر دما بر توزیع تنش برشی و سرعت مطالعه شده است. منحنیها در حالت پکنواخت بدست آمده‌اند و همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش دما، تنش برشی و سرعت ناحیه مرکزی کاهش می‌یابد و نیم‌رخ آنها تخت می‌شود، زیرا با کاهش گرادیان، نیم‌رخ سرعت پکنواخت‌تر می‌شود. در شکل ۱۲ الف، ب و ج فشار دینامیکی مدل با افت فشار اندازه‌گیری و مقایسه شده است.

نظری سازگاری دارد. در شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب توزیع تنش برشی و سرعت برش نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در ناحیه نزدیک به دیواره، که سرعت برش آنها زیاد است، براساس مدل‌های الیس و قانون توانی مقادیر کمتری نسبت به مدل نیوتونی پیش‌بینی می‌شود. همچنین مشخص است که در سرتهای برشی کم در قسمت مرکزی حدیده تنش برشی پیش‌بینی شده کمی بیشتر از مقادیر نیوتونی است. دلیل اختلاف آن است که در این مدل‌ها گرادیان در شدت برش صفر بیشتر از مقدار نیوتونی منظور می‌شود. در شکل ۷ توزیع سرعت ارائه شده است. همان‌طور که از این شکل پیداست، طبق مدل قانون توانی، در ناحیه مرکزی مقدار دبی جریان کمتری پیش‌بینی می‌شود و علت اختلاف این است که در مدل قانون توانی مقدار گرادیان در تنش برشی صفر بی‌نهایت در نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب، دبی خروجی در ناحیه مرکزی حدیده کمتر از مقدار واقعی بدست می‌آید، که این مطلب با نتایج نظری و مطالعات محققان



شکل ۳ - افت فشار در دیواره حدیده برای پنج مدل جریان مختلف برای HDPE.



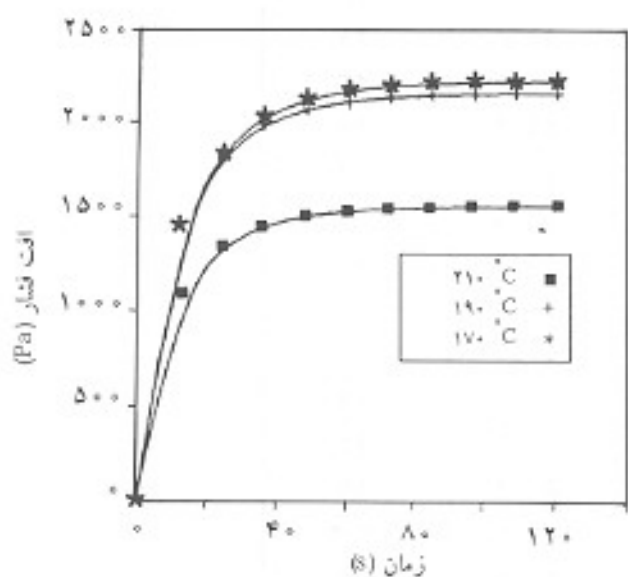
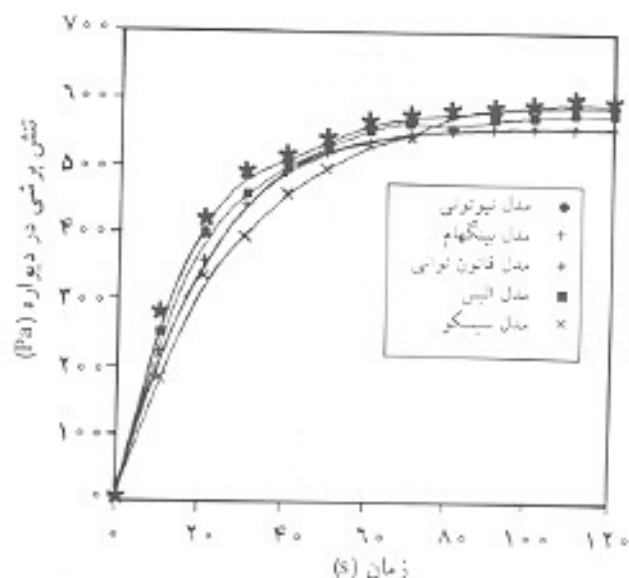
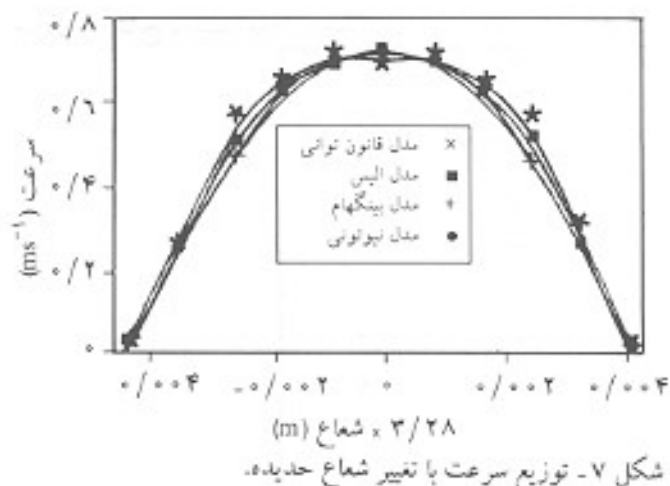
شکل ۴ - میزان جریان کاهش یافته HDPE در برابر زمان.

جدول ۷. نتایج بدست آمده از دستگاه برابندر در دمای 170°C .

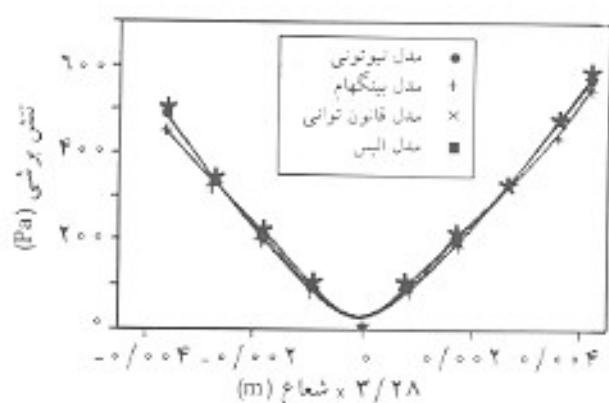
فشار در مقطع ورودی به حیدیه (bar)	دما ($^{\circ}\text{C}$)	S_1 (min^{-1})	گشتاور (Nm)	زمان اندازه‌گیری (s)
۱/۰۰۰	۱۷۰	۳۰	۵۸/۷	۲
۱/۵۵۶	۱۷۰	۳۰	۶۲/۲	۷
۱/۵۵۲	۱۷۰	۳۰	۶۰/۳	۱۲
۱/۲۰۸	۱۷۱	۳۰	۶۳/۲	۱۷
۱/۲۱۴	۱۷۱	۳۰	۶۵/۷	۲۲
۱/۲۱۷	۱۷۰	۳۰	۶۷/۲	۲۷
۱/۲۱۹	۱۷۳	۳۰	۵۸/۹	۳۲
۱/۲۲۴	۱۷۳	۳۰	۵۹/۰	۳۷
۱/۲۳۷	۱۷۳	۳۰	۵۹/۲	۴۲
۱/۲۳۸	۱۷۰	۳۰	۵۶/۸	۴۷
۱/۲۴۱	۱۷۰	۳۰	۵۸/۷	۵۲
۱/۲۴۵	۱۷۰	۳۰	۵۹/۹	۵۷
۱/۲۴۹	۱۷۰	۳۰	۵۷/۷	۶۲
۱/۲۵۱	۱۷۰	۳۰	۵۷/۵	۶۷
۱/۲۵۵	۱۷۰	۳۰	۵۶/۴	۷۲
۱/۲۵۷	۱۷۰	۳۰	۵۶/۷	۷۷
۱/۲۵۶	۱۷۰	۳۰	۵۴/۳	۸۲
۱/۲۵۸	۱۷۰	۳۰	۵۸/۳	۸۷
۱/۲۶۱	۱۷۰	۳۰	۵۳/۲	۹۲
۱/۲۶۱	۱۷۰	۳۰	۵۱/۵	۹۷
۱/۲۶۲	۱۷۱	۳۰	۵۱/۴	۱۰۲
۱/۲۶۲	۱۷۱	۳۰	۵۱/۷	۱۰۷
۱/۲۶۲	۱۷۱	۳۰	۵۱/۶	۱۱۲
۱/۲۶۳	۱۷۰	۳۰	۵۱/۴	۱۱۷
۱/۲۶۳	۱۷۰	۳۰	۵۱/۴	۱۲۲
۱/۲۶۳	۱۷۰	۳۰	۵۱/۷	۱۲۷
۱/۲۶۳	۱۷۰	۳۰	۵۱/۶	۱۳۲
۱/۲۶۳	۱۷۰	۳۰	۵۲/۱	۱۳۷
۱/۲۶۳	۱۷۰	۳۰	۵۱/۸	۱۴۲

سرعت قابل ملاحظه‌ای در روشهای محاسباتی می‌شود. از این جهت استفاده از این روش در حل مسائل پدیده‌سازی مدلها بسیار مفید است. برای شکلهای هندسی پیچیده و نامنظم به کمک روشهای اصلاحی اجزای حجمی محدود می‌توان شبکه‌بندی مناسبی را در مرز سیستم برقرار کرد. ولی، در چنین حالتی به دلیل ناآوانی روش پادشده در تولید مشهای مناسب، در حالی که همچنان از سرعت زیادی برخوردار است،

همان‌طور، که ملاحظه می‌شود تفاوت کمی بین مقادیر پیش‌بینی شده براساس این مدلها و مقادیر تجربی وجود دارد که این مطلب را می‌توان به وجود پدیده‌های کشسان نسبت داد. بدیهی است که استفاده از مدلهایی که بتوان در آنها پدیده‌های کشسان و آثاری از قبیل تورم و انقباض را منظور کرد به بهبود نتایج کمک خواهد کرد. بکارگیری روش اجزای حجمی محدود در حل معادلات انتقال منجر به دقت و

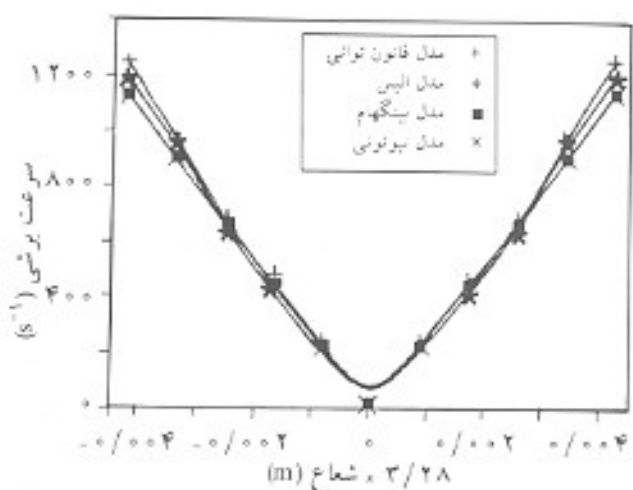
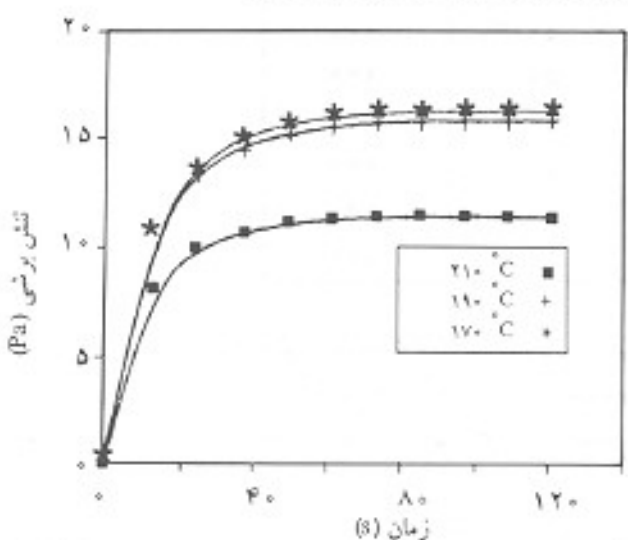


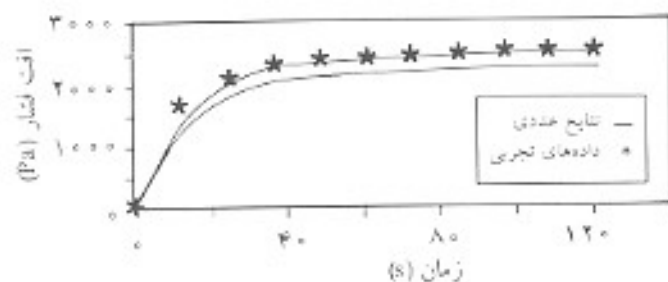
شکل ۴- تغییرات میزان تنش برشی در دیواره برای پنج مدل مختلف HDPE.



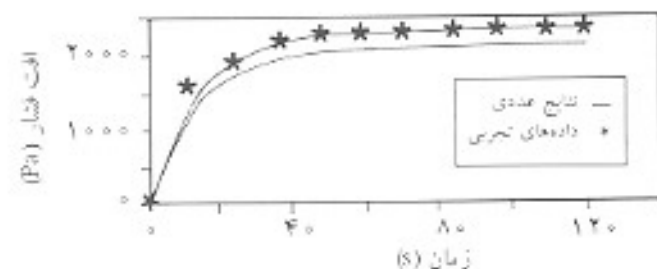
شکل ۸- اثر دما بر افت فشار برای HDPE.

شکل ۵- توزیع تنش برشی برای چهار مدل مختلف HDPE.

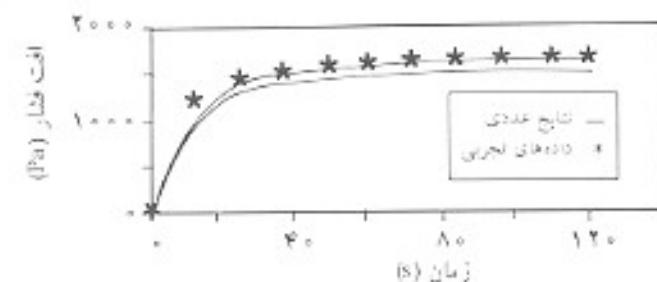




(الف)



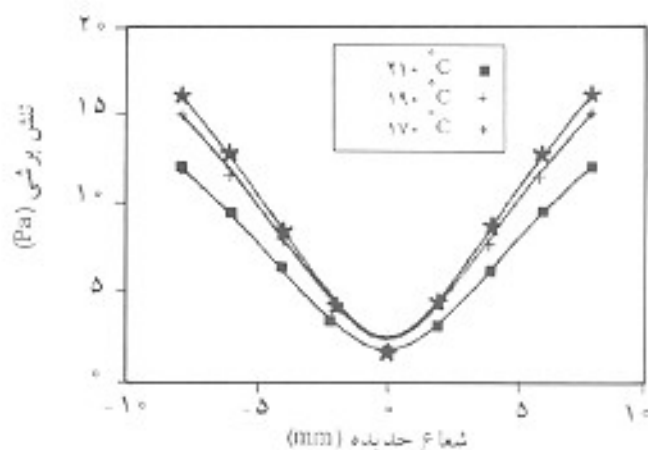
(ب)



(ج)

شکل ۱۲- مقایسه داده‌های تجربی با نتایج عددی افت فشار نسبت به زمان: (الف) 170°C ، (ب) 190°C و (ج) 210°C .

- V_i : سرعت در جهت i
- S : جمله منبع
- D : قطر حیدره
- L : طول حیدره
- V_x : سرعت حرکت پستون در حیدره موئین
- F : نیروی وارد بر پستون در حیدره موئین
- n : توان در معادله قانون توانی
- K : ضریب تناسب در معادله قانون توانی
- S_i : سرعت برش در اکسترودر
- T : دما
- P_p : فشار پشت حیدره

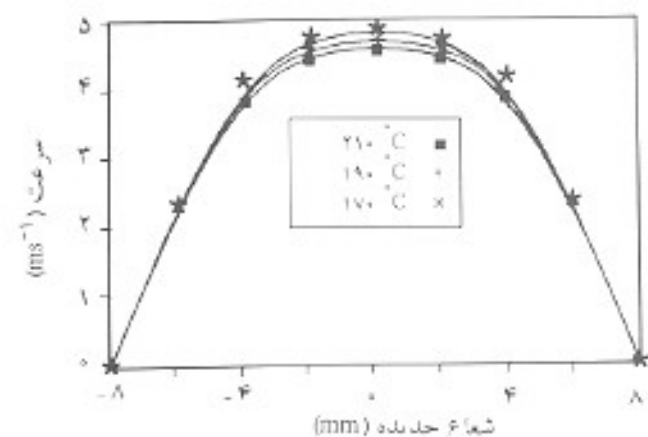


شکل ۱۰- اثر دما بر توزیع تنش برشی در شعاعهای مختلف حیدره برای HDPE

دقت آن کاهش می‌یابد. در چنین حالتی باید از روش اجزای محدود یا روش اجزای مرزی محدود (boundary element methods) که ویژگیهای تولید مش را دارند استفاده کرد.

فهرست نمادها

- m : چگالی
- U : سرعت جریان میال
- ρ : خاصیت عمومی به ازای واحد جرم
- Γ : ضریب نفوذ عمومی
- $[m, n]$: ماکسیمم دو مقدار m و n
- J : شار نفوذ در جهت i



شکل ۱۱- اثر دما بر توزیع سرعت در شعاعهای مختلف حیدره برای HDPE

مراجع

- 10 Rauwendaal C., SPE 45th, ANTEC 87, 64, 1987.
- 11 Rao N. S.; *Designing Machines and Dies for Polymer Processing with Computer Programs*; Hanser, 1983.
- 12 Bird, Byron and Stewart; *Transport Phenomena*; John Wiley & Sons, New York, 1960.
- 13 Chan D.; *Polym. Eng. Sci.*; **26**, 2, 152, 1986.
- 14 Paterson I. and Kerf T. D.; ANTEC; 483, 1987.
- 15 Chirsch; *Numerical Computation of Internal and External Flows*; John Wiley & Sons, England, 1990.
- 16 Tadmor Z.; *Polym. Eng. Sci.*; **14**, 2, 112, 1974.
- 17 Ybarra R. M.; *AIChE*; **26**, 5, 751, 1991.
- 18 Jplu T. A.; *Ind. Eng. Chem., Fund.*; **22**, 183, 1983.
- 19 Hartnet J. P.; *J. Heat Transfer*; **114**, 296, 1992.
- 1 Bernhardt E. C.; *Processing of Thermoplastic Material*; McGraw Hill, New York, 1959.
- 2 *Principle of Polymer Processing*; John Wiley & Sons, New York, 105-128, 1979.
- 3 Ibid, 333-395.
- 4 Kramer W. A., SPE 45th, ANTEC 87, 32, 1987.
- 5 Rauwendaal C.; *Mixing in Polymer Processing*; Marcel Dekker, 1991.
- 6 Vratopoulos E. P.; *Chem. Eng.*; **46**, 2, 629, 1989.
- 7 Covas J. A.; *J. Elastomers Plast.*; **23**, 218, 1991.
- 8 Vergers B.; *Polym. Eng. Sci.*; **24**, 12, 1984.
- 9 Ito K.; *Modern Plast.*; 71, Nov. 1977.