

شبیه سازی عددی اثر جریان کششی و بر خوردی پلیمر پیزوالکتریک در حدیده استوانه‌ای همگرا

عبدالحسین دارمی زاده^۱، علی اکبر یوسفی^{۲*}

۱- آبادان، پالایشگاه آبادان، صندوق پستی: ۵۵۵

۲- تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، پژوهشکده فرایند، گروه پلاستیک، صندوق پستی ۱۱۲-۱۴۹۷۵

دریافت: ۱۳۹۲/۶/۵، پذیرش: ۱۳۹۲/۱۰/۳۰

با توجه به اهمیت ساختار بلوری بر خواص پیزوالکتریک پلیمر پلی‌وینیلیدن فلوئورید و اثر جریان کششی موجود در فرایند بر تقویت این ساختار خاص، در این پژوهش شکل هندسی کاملاً جدیدی که به شکل استوانه‌ای بوده و شامل کانال با ناحیه انتهایی همگراست، بررسی شد. جریان مذاب در درون حدیده، با نرم‌افزار فلوئنت تحلیل شد. نتایج حاصل از مدل‌سازی، بیانگر وجود جریان کششی بسیار مؤثر در ناحیه رسیدن جریان‌ها به یکدیگر (ابتدای ناحیه همگرا) و حاکم بودن این جریان در طول ناحیه همگراست. به کمک نتایج این پژوهش، می‌توان حدیده‌ای ساخت که جریان کششی زیادی را بر مذاب وارد کند. با معرفی این فناوری نیاز به کشش سرد پلیمر پس از فرایند، که تا کنون فقط محدود به تولید فیلم‌های پیزوالکتریک است، برطرف می‌شود. از این هندسه ساده می‌توان با کمی تغییر، برای تولید فیلم‌های استوانه‌ای و روکش‌های مدور پیزوالکتریک استفاده کرد.

بسیارچ
فصلنامه علمی-ترویجی
سال سوم، شماره ۳
صفحه ۶۵-۵۸، ۱۳۹۲
ISSN: 2252-0449

چکیده



عبدالحسین دارمی زاده



علی اکبر یوسفی

واژگان کلیدی

جریان کششی،
پیزوالکتریک،
حدیده،
شبیه‌سازی،
پلی‌وینیلیدن فلوئورید

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

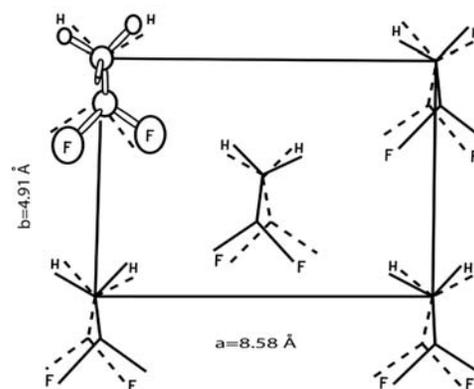
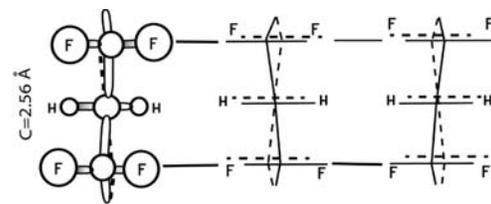
a.yousefi@ippi.ac.ir

مقدمه

امروزه پلیمرهای پیزوالکتریک کاربرد فراوانی در ساخت اجزای سامانه‌های الکترونیکی و میکروالکترونیکی پیدا کرده‌اند. با توجه به مزایایی که این پلیمرها دارند، آنها بخش مهمی از ساخت حسگرهای پیزوالکتریک را در این صنایع به خود اختصاص داده‌اند. حسگرهای پلیمری پیزوالکتریک، رشد سریعی در تجارت جهانی پیدا کرده است. طبق گزارش شرکت EHAG، این حسگرها ۱۸ میلیارد دلار از تجارت حسگرها را در جهان به خود اختصاص داده‌اند [۱-۴].

مزایایی که پلیمرها را برای این کاربردها مناسب ساخته است، عبارتند از: قیمت نسبتاً ارزان، فناوری تولید ساده و قابلیت استفاده روی کلیه سطوح. همچنین این مواد با توجه به ساختارهای مولکولی متفاوت دارای خواص و دامنه حسگری گسترده‌ای هستند [۱].

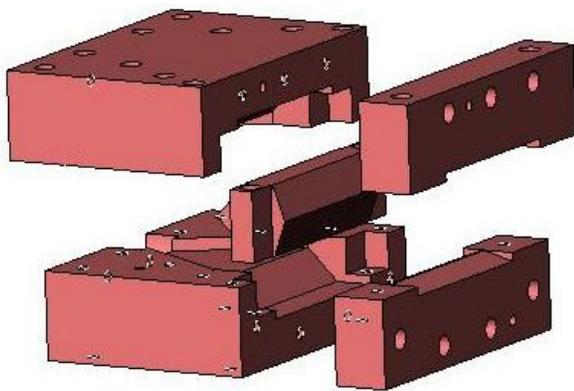
سرامیک‌های فروالکتریک دارای مزایای زیادی هستند که آنها را برای بسیاری از کاربردها مناسب ساخته است. این مواد دارای قابلیت نفوذ دی‌الکتریک، ضرایب پیزوالکتریک و خواص جفت شدن الکترومکانیکی زیادی هستند. اما معایب این سرامیک‌ها از جمله، مقاومت مکانیکی ضعیف و امپدانس آکوستیک زیاد آنها نسبت به پلیمرها، کاربرد این سرامیک‌ها را در برخی زمینه‌ها محدود ساخته است. با توجه به خواص پلیمرها، آنها می‌توانند این معایب را پوشش دهند و در مواردی که سرامیک‌ها محدودیت کاربرد دارند، استفاده شوند.



شکل ۱- سلول واحد بتا PVDF [۵].

پلی‌وینیلیدن فلئوراید (PVDF) به علت دارا بودن خواص الکتریکی خوب، مقاومت شیمیایی و گرمایی زیاد، قابلیت پوشش‌دهی و فرایندپذیری خوب، از پلیمرهای پیزوالکتریک مهم مورد مطالعه در دو دهه اخیر است. از مهم‌ترین مزایای این پلیمر نسبت به سرامیک‌های پیزوالکتریک، امپدانس صوتی کم (نزدیک به آب و بافت‌های انسانی) و همچنین خواص مکانیکی مطلوب است که آنها را برای بسیاری از کاربردها از جمله استفاده در پزشکی و زیردریایی‌ها مناسب ساخته است.

شکل β مهم‌ترین شکل بلوری پلی‌وینیلیدن فلئوراید است. به دلیل خاصیت پیزوالکتریک و پیزوالکتریک این نوع بلور و کاربرد آن در حسگرها و مبدل‌ها، ساختار یاد شده حائز اهمیت فراوانی است. این نوع بلور عمدتاً از تبدیل بلور آلفا به بتا با اعمال تنش مکانیکی در فرایندی به نام کشش سرد به دست می‌آید. ساختار بلوری شکل بتا به‌طور تمام ترانس با بعد c برابر با 2.56 \AA توسط Kondera-shev [۵] شناسایی شد (شکل ۱). از روش‌های جدید دیگری که با استفاده از آن می‌توان به‌طور مستقیم به فاز بلوری β رسید، اعمال جریان کششی قوی روی مذاب پلیمر هنگام اکستروژن فیلم است (شکل ۲). در این روش با استفاده از شکل هندسی ویژه، جریان مذاب در طول حدیده و هنگام خروج از آن تحت کشش شدید قرار می‌گیرد. این جریان کششی باعث جهت‌گیری زنجیرهای پلیمر در جهت جریان و تغییر شکل شناسی بلورهای حاصل می‌شود [۱۰-۶]. در پلیمرهای بی‌شکل زنجیرهای پلیمر به شکل کلاف‌های درهم رفته هستند. اعمال نیرو باعث جهت‌گیری قطعه‌ها در راستای نیرو و گاهی باز شدن گره‌ها می‌شود. با کاهش دما، زنجیرها کشیده و منجمد می‌شوند، به‌طوری که پس از برداشتن تنش به حالت اولیه خود برنمی‌گردند [۱۱، ۱۲]. این جهت‌گیری باعث بهبود خواص،



شکل ۲- شکل هندسی حدیده برای تولید فیلم پیزوالکتریک [۱۸، ۱۹].

- ۱- جریان پلیمر در سراسر طول حدیده به‌حالت لایه‌ای است و سیال تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته می‌شود.
- ۲- رفتار رئولوژیکی سیال از مدل گرانروی قانون توانی پیروی می‌کند.
- ۳- با توجه به تقارن حدیده، جریان تقارن محوری در نظر گرفته می‌شود.
- ۴- جریان سیال، حالت پایا در نظر گرفته می‌شود.
- ۵- جریان مذاب هم‌دم در نظر گرفته شده و از تغییرات دمایی مذاب در طول مسیر صرف‌نظر می‌شود.
- ۶- فشار خروجی مذاب برابر با فشار اتمسفر و سرعت مذاب روی دیواره‌ها صفر است.

مدل ریاضی

در مختصات کارتزین برای یک سیال غیرنیوتنی و تراکم‌ناپذیر معادلات حاکم برای جریانی پایا و لایه‌ای، در حالت دوبعدی به شکل زیر نوشته می‌شود [۱۵]:
معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

معادله اندازه حرکت برای جزء x:

$$\rho \left(V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \right) + \rho g_x \quad (2)$$

معادله اندازه حرکت برای جزء y:

$$\rho \left(V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} \right) + \rho g_y \quad (3)$$

در این معادلات، V_x و V_y اجزای x و y بردار سرعت، p فشار، ρ چگالی و g_x و g_y اجزای x و y شتاب جاذبه هستند. τ_{xx} و τ_{xy} ... اجزای تنسور تنش هستند که برای سیال نیوتنی از معادله (۴) به‌دست می‌آیند:

$$\tau = \eta \Delta \quad (4)$$

η گرانروی برشی سیال غیرنیوتنی است که برای سیال قانون توانی به شکل زیر به دست می‌آید:

$$\eta = \eta_0 \left(\frac{1}{2} I_2 \right)^{\left(\frac{n-1}{2} \right)} \quad (5)$$

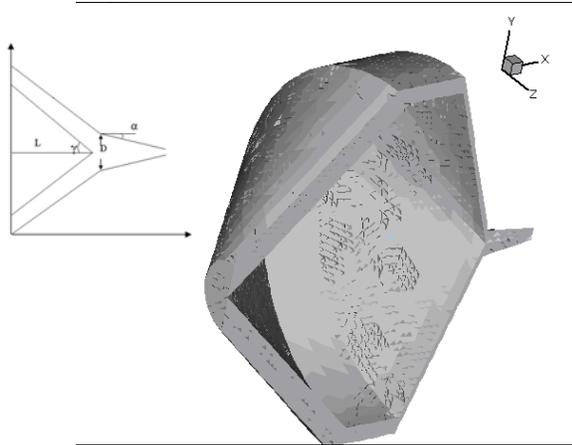
- به‌ویژه خواص مکانیکی این پلیمرها می‌شود. به‌طور خلاصه، PVDF پیزوالکتریک به‌عنوان پلاستیک مهندسی چقرمه، سبک و انعطاف‌پذیر در ضخامت‌های مختلف تهیه می‌شود. خواص آن به‌عنوان یک مبدل عبارت از:
- ۱- دامنه فرکانس گسترده (۰/۰۰۱ Hz تا 10^9 Hz)،
 - ۲- دامنه دینامیکی گسترده (10^{-8} psi تا 10^6 psi)،
 - ۳- امپدانس آکوستیک کم (نزدیک به آب و بافت‌های انسانی)،
 - ۴- کامپلیانس کشسان زیاد،
 - ۵- خروجی ولتاژ زیاد در تهیه حسگرها (۱۰ برابر بیشتر از سرامیک‌های پیزوالکتریک برای نیروی ورودی مشابه)،
 - ۶- توان دی‌الکتریک زیاد،
 - ۷- مقاومت فشاری و استحکام مکانیکی زیاد،
 - ۸- قابلیت تولید در طرح‌ها و شکل‌های مختلف و
 - ۹- قابلیت چسباندن با چسب‌های مختلف.

امروزه اشکال هندسی زیادی برای ایجاد جریان کششی در حین فرایند فیلم‌های پلیمری، پیشنهاد شده است. از معمول‌ترین اشکال هندسی، هندسه جریان همگراست. در این شکل هندسی، به‌علت تغییر سرعت جریان در طول مسیر حرکت، جریان کششی قابل توجهی بر مذاب اعمال می‌شود [۱۳]. این هندسه جریان توسط خمایی [۱۴] بررسی و معادلات سرعت جریان در نواحی مختلف آن به دست آمده است. سبحانی [۱۵] نیز جریان کششی را درون قالب با هندسه همگرا برای تولید صفحات نازک بررسی کرد. در این شکل هندسی، ابتدا جریان دو شاخه شده و پس از عبور از دو کانال، در یک خط به هم می‌رسند. در این محل به خاطر حذف دیواره‌هایی که سرعت سیال روی آن صفر است، جریان کششی مؤثری بر سیال اعمال می‌شود. جریان مذاب پس از عبور از دو کانال در یک ناحیه مشترک با ارتفاع ورودی برابر با مجموع ارتفاع دو کانال به هم می‌رسد و پس از حرکت در طول مسیری همگرا، در نهایت خارج می‌شود.

در مقاله حاضر، برای نخستین بار جریان مذاب پلیمر درون یک حدیده با ساختار استوانه‌ای شبیه‌سازی شده است. درون این حدیده، جریان پس از عبور از کانال همگرا در یک نقطه به هم‌دیگر می‌رسد و از آن نقطه از راه کانال خروجی به سمت بیرون هدایت می‌شود. از مزایای این طرح، امکان تولید میله‌های پیزوالکتریک بدون نیاز به فرایند کشش سرد است.

فرض‌های اولیه

مدل‌سازی جریان براساس فرض‌های اولیه زیر انجام گرفته است:



شکل ۳- شکل هندسی جریان استوانه‌ای برای تولید میله‌های استوانه‌ای پیزوالکتریک.

است. یعنی هر چه مقدار این پارامتر بزرگتر از ۰/۵ باشد، بر مقدار جریان کششی افزوده شده و از مقدار جریان کششی کاسته می‌شود و برعکس [۱۵].

معادلات بقای پیوستگی و اندازه حرکت در شرایط دائمی، تراکم‌ناپذیر، خواص ثابت و تقارن محوری در نظر گرفته شده است. برای جریان‌های آشفته از میان‌گیری رینولدز از معادلات ناویر-استوکس استفاده می‌شود.

طراحی شکل هندسی مناسب

در این پژوهش برای نخستین بار، حدیده‌ای با شکل هندسی جریان استوانه‌ای انتخاب شده و جریان کششی در آن به منظور دستیابی به میله‌هایی از جنس PVDF با ساختاری مناسب بررسی شده است. از ویژگی‌های بسیار بارز این هندسه، سادگی آن در ساخت و همچنین قابلیت خوب آن در تولید فیلم‌های مدور و استوانه‌ای است که تا کنون به دلایل مشکلات ساخت و عدم امکان کشش سرد، تولید آن به سختی امکان‌پذیر است. همان‌طور که در شکل ۳ جدول ۱- سرعت متوسط ورود مذاب به حدیده در سرعت‌های مختلف ماریچ.

سرعت خطی متوسط (cm/s)	سرعت وزنی خروجی (g/s)	سرعت پیچ (rpm)
۰/۰۰۶	۰/۱۵۸	۱۵
۰/۰۱۱	۰/۲۶۴	۳۰
۰/۰۳۱	۰/۷۶۲	۴۵
۰/۰۴۳	۱/۰۷۳	۶۰

η_0 پایداری سیال، n ثابت قانون توانی معادل ۰/۳۶ و I_2 نامتغیر (invariant) دوم تنسور سرعت تغییر شکل است که به شکل معادله (۶) تعریف می‌شود [۱۴، ۱۵]:

$$I_2 = \left(2 \frac{\partial V_x}{\partial x} \right)^2 + \left(2 \frac{\partial V_y}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V_y}{\partial x} + \frac{\partial V_x}{\partial y} \right)^2 \quad (6)$$

Δ تنسور سرعت تغییر شکل است که در حالت دوبعدی به شکل معادله (۷) بیان می‌شود:

$$\Delta = \begin{bmatrix} 2 \frac{\partial V_x}{\partial x} & \frac{\partial V_y}{\partial x} + \frac{\partial V_x}{\partial y} \\ \frac{\partial V_y}{\partial x} + \frac{\partial V_x}{\partial y} & 2 \frac{\partial V_y}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (7)$$

از پارامتر λ به عنوان معیار ارزیابی مقدار جریان کششی موجود، در نواحی مختلف حدیده استفاده می‌شود که این پارامتر به شکل معادله (۸) تعریف شده است:

$$\lambda = \frac{|\dot{\gamma}|}{|\dot{\gamma}| + |w|} \quad (8)$$

که $|\dot{\gamma}|$ ، قدرمطلق دترمینان تنسور سرعت تغییر شکل است و برای جریان دوبعدی به شکل معادله (۹) بیان می‌شود:

$$|\dot{\gamma}| = 4 \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \cdot \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) - \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right)^2 \quad (9)$$

$|w|$ ، دترمینان تنسور چرخش بوده و برای جریان دوبعدی به شکل معادله (۱۰) می‌شود:

$$|w| = \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^2 \quad (10)$$

در نتیجه از جای‌گذاری معادلات (۹) و (۱۰) در معادله (۸)، معادله (۱۱) حاصل می‌شود:

$$\lambda = \frac{\left| 4 \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \cdot \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) - \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right)^2 \right|}{\left| 4 \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \cdot \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) - \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right)^2 \right| + \left| \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^2 \right|} \quad (11)$$

λ همواره بین ۰ و ۱ است. مقادیر ۰ و ۱ به ترتیب بیانگر جریان چرخشی و کششی خالص و مقدار ۰/۵ بیانگر جریان برشی ساده

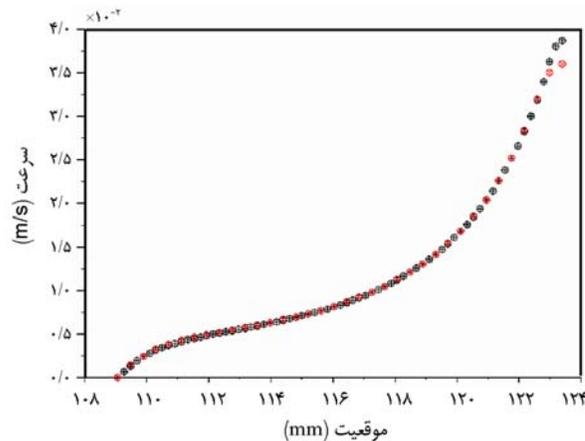
با سازمان و منطبق بر مرز است. در نزدیکی خروجی حدیده به دلیل باریک شدن کانال، برای بررسی بهتر اثر دیواره‌ها بر جریان تراکم شبکه‌بندی افزایش یافته است. برای بررسی تاثیرپذیری حل از تعداد شبکه، تعداد شبکه‌های ۱۳۶۵، ۵۲۴۹ و ۲۰۵۴۹ بررسی شد (شکل ۴). به دلیل اختلاف بسیار ناچیز جواب‌های حاصل شبکه با تعداد ۵۲۴۹ برای تحلیل استفاده شد.

نتایج و بحث

همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود، نیم‌رخ سرعت در ورودی ناحیه همگرا تغییر کرده و با حذف شدن دیواره‌هایی که سرعت مذاب روی آنها صفر است، جریان کششی بر مذاب اعمال می‌شود. در نتیجه، زنجیرهای پلیمری موجود در این نواحی تحت کشش قرار می‌گیرند.

شکل‌های ۵ و شکل ۶ به ترتیب توزیع سرعت را در قسمت همگرای انتهایی حدیده به ترتیب در زاویه‌های ۵ و ۱۱/۵ نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در طول ناحیه همگرا بر مقدار سرعت افزوده می‌شود. در ناحیه ابتدایی همگرا یعنی در موقعیتی که کانال‌ها به هم می‌رسند کاهش سرعت دیده می‌شود. این امر به واسطه برخورد جریان‌های روبه‌رو اتفاق افتاده و در نقطه برخورد سرعت نزدیک صفر است. پس از آن نیم‌رخ سرعت دوباره بازیابی شده و افزایش سرعت مشاهده می‌شود.

در شکل‌های ۷ و ۸ توزیع پارامتر λ در قسمت انتهایی کانال به ترتیب در زاویه‌های ۵ و ۱۱/۵ مشاهده می‌شود. در این شکل‌ها توزیع بسیار گسترده‌ای از جریان کششی در ناحیه همگرا دیده می‌شود که در نوع خود بسیار مطلوب است و تولید کنندگان را از



شکل ۴- بررسی اثر تعداد شبکه‌ها بر جواب‌ها.

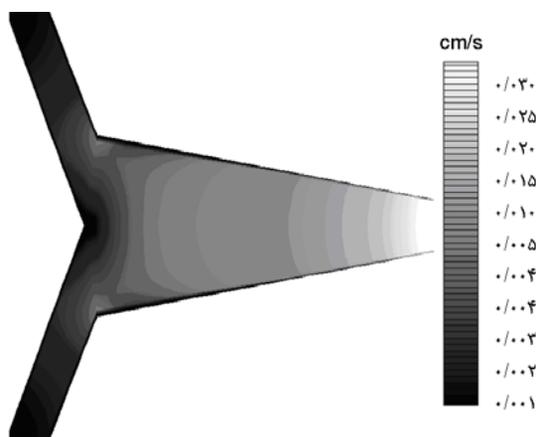
دیده می‌شود، ابعاد این حدیده براساس خروجی به قطر ۶ mm، زاویه همگرایی برابر با ۱۲° و زاویه کانال ۷۰° معین شده است. در این شکل هندسی، جریان مذاب ابتدا وارد کانال شده و پس از تراکم و افزایش سرعت در جهت جریان، در یک ناحیه مشترک به هم می‌رسد و با عبور از ناحیه همگرا خارج می‌شود.

شرایط مرزی

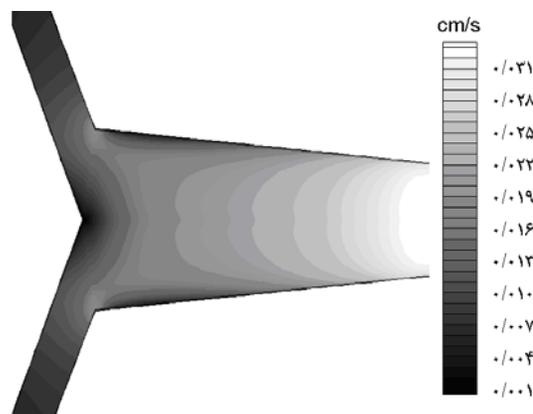
برای شرایط مرزی، مقدار سرعت جرمی خروجی ماده در دمای ۲۴۰°C از اکسترودر طبق جدول ۱ استفاده شد. در خروجی حدیده نیز فشار معادل فشار جو در نظر گرفته شده است.

شبکه بندی

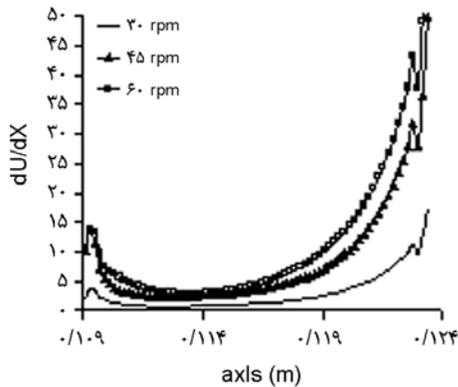
برای مدل‌سازی این حدیده (شکل ۳) به دلیل تقارن ۳۶۰° سطح مقطع آن به شکل تقارن محوری انتخاب شد. برای شبکه‌بندی از نرم‌افزار پیش‌پردازنده گمبیت استفاده شد. شبکه مورد نظر از نوع



شکل ۶- کانتور سرعت در ناحیه همگرای انتهایی با زاویه ۱۱/۵.



شکل ۵- کانتور سرعت در ناحیه همگرای انتهایی حدیده با زاویه همگرایی ۵.



شکل ۹- توزیع نرخ تغییرات سرعت محوری روی خط مرکزی حدیده در سرعت‌های مختلف پیچ اکسترودر.

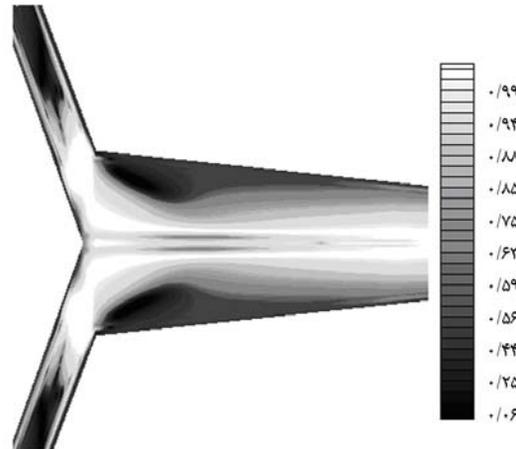
مستقیم به کانال همگرا متصل‌اند و سرعت مذاب روی آنها همچنان صفر است. در نزدیکی دیواره‌ها به دلایل آثار لایه مرزی و گراندرو بودن سیال جریان چرخشی و برشی دیده می‌شود. بیشترین مقدار توزیع λ نزدیک به یک روی محور تقارن دیده می‌شود. ولی تحلیل انجام شده برای زاویه‌های بیشتر همگرایی نشان‌دهنده تاثیر مستقیم آنها روی شدت کشش جریان بوده است.

همان‌طور که در شکل‌های ۷ و ۸ ملاحظه می‌شود، افزایش سرعت ورودی اثر چشم‌گیری بر مقدار جریان کششی ندارد. روند وجود جریان کششی در محل رسیدن جریان‌ها به یکدیگر و در امتداد ناحیه همگرا و بالا و پایین ورودی ناحیه همگرا در سرعت‌های مختلف مارپیچ یکسان است.

از معیارهایی که برای ارزیابی جریان کششی استفاده می‌شود، تغییرات سرعت در جهت جریان $(\partial v_x / \partial x)$ است. به طوری که با افزایش این کمیت مقدار کشیدگی و جریان کششی افزایش می‌یابد. شکل ۹ توزیع این پارامتر را در داخل حدیده و روی محور مرکزی ناحیه انتهایی آن را برای حالتی نشان می‌دهد که مارپیچ با سرعت‌های متفاوت می‌چرخد. تغییرات سرعت در جهت محور افقی x بیانگر وجود جریان کششی و جهت‌گیری و کشیدگی زنجیرها در این ناحیه است. در سرعت‌های متفاوت تغییرات سرعت مثبت است و حاکی از وجود جریان کششی در تمام سرعت‌هاست.

نتیجه‌گیری

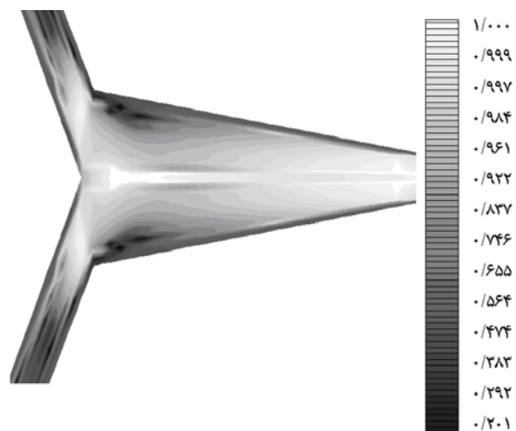
در این پژوهش، یک هندسه جدید استوانه‌ای مدور برای ایجاد



شکل ۷- کانتور توزیع ضریب کشش λ در ناحیه همگرایی انتهایی با زاویه همگرایی 5° .

انجام کشش سرد ثانویه بی‌نیاز می‌سازد.

در حالی که در سایر هندسه‌های دوبعدی فقط تا فاصله $0.74 D$ (ارتفاع ورودی ناحیه همگرا) جریان کششی قوی مشهود بوده است [۸، ۱۲]، در این هندسه جدید تقریباً در تمام طول کانال توزیع ضریب λ نزدیک به یک مشاهده می‌شود. در قسمت‌های بالا و پایین ورودی ناحیه همگرا، جریان چرخشی و برشی مشاهده می‌شود که این مورد در کانال با زاویه 5° مشهودتر است. دلیل ایجاد این جریان، تغییر ناگهانی نیم‌رخ سرعت در محل رسیدن جریان‌ها به یکدیگر به علت حذف دیواره‌های داخلی کانال است که سرعت مذاب روی آنها صفر است. به طوری که در قسمت مرکزی ورودی ناحیه همگرا زنجیرهایی که سرعت آنها روی دیواره کانال داخلی صفر است با حذف شدن این دو دیواره، تحت کشش شدید قرار می‌گیرند. این در حالی است که دو دیواره دیگر این کانال‌ها به طور



شکل ۸- کانتور توزیع ضریب کشش λ در ناحیه همگرایی انتهایی با زاویه همگرایی $11/5^\circ$.

احتیاجی به کشش سرد آن نیست. در ضمن، شکل پیشنهادی با وجود قابلیت اعمال کشش فراوان از سادگی زیادی برخوردار است و با کمی تغییر نیز امکان استفاده از آن برای تولید لوله های نازک پیزوالکتریک وجود دارد.

مراجع

1. Bar-Cohen Y., Xue T., and Lih S., Polymer Piezoelectric Transducers for Ultrasonic NDE, *NDT net*, **1**, Sep. 1996, <http://www.ndt.net/article>.
2. <http://www.ehag.ch>.
3. Harsanyi G., *Polymer Films in Sensor Application*, Technomic, USA, 1995.
4. Giannetti E., Semi-Crystalline Fluorinated Polymers, *Polym. Inter.*, **50**, 10-26, 2001.
5. Lovinger A.J., Poly(Vinylidene Fluoride), *Developments In Crystalline Polymers*, Bassett D.C. (Ed.), Applied Science, London, Chap. 5, 1982.
6. Salimi A. and Yousefi A.A., Conformation Changes and Phase Transformation Mechanisms in PVDF Solution-Cast Films, *J. Polym. Sci. Part B: Polym. Phys.*, **42**, 3487-3495, 2004.
7. Kaura T., Nath R., and Perlman M.M., Simultaneous Stretching and Corona Poling of PVDF Films, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **24**, 1848-1852, 1991.
8. Khomami B. and Mchugh A.J., Processing-Property Interactions in Poly(Vinylidene Fluoride). II. Morphology and Property Characterization of Extruded Films, *J. Appl. Polym. Sci.*, **36**, 877-889, 1988.
9. Khomami B. and Mchugh A.J., Processing-Property Interac-

جریان کششی در تولید میله های پیزوالکتریک تحلیل شده است. نتایج حاصل بیانگر آن است که این هندسه قابلیت ایجاد یک جریان کششی قوی بر مذاب PVDF را دارد. این امر سبب کشیده شدن زنجیرهای پلیمری بی شکل و باز شدن کلاف های آن می شود. با این عمل، خاصیت پیزوالکتریک پلیمر پس از سرد شدن باقی مانده و

- tions in Poly(Vinylidene Fluoride). I. An Analysis of Melt Stress History in an Extensional Flow Geometry, *J. Appl. Polym. Sci.*, **36**, 859-876, 1988.
10. Salimi A. and Yousefi A.A., FTIR Studies of Phase Crystal Formation in Stretched PVDF Films, *Polym. Test.*, **22**, 696-704, 2003.
11. یوسفی علی اکبر، سلیمی علی، گزارش پروژه تولید فیلم نازک بتا- پلی وینیلیدن فلئورید، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، ۱۳۸۱
12. سبحانی هادی، یوسفی علی اکبر، رضوی نوری محمد، بررسی اثر جریان های کششی بر تشکیل فاز بلوری β در فیلم های اکسترود شده پلی وینیلیدن فلئورید، مجله علوم و تکنولوژی پلیمر، ۱۹، ۵۱-۴۳، ۱۳۸۵.
13. Liang J.Z. and Ness J.N., Effect of Die Angle on Flow of Behavior of High Impact Polystyrene Melt, *Polym. Test.*, **16**, 403-412, 1997.
14. Khomami B. and Mchugh A.J., Elongational Flow in a Two-dimensional Channel Geometry, *J. Appl. Polym. Sci.*, **33**, 1495-1505, 1987.
15. سبحانی هادی، مطالعه ساختار بلوری فیلم پلی وینیلیدن فلئورید اکسترود شده با استفاده از قالب دوکاناله، پایان نامه کارشناسی ارشد، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، ۱۳۸۴.