

مطالعه عددی و تجربی جریان سیال غیرنیوتنی با لزجت بالا در فرآیند اکستروژن قطعات پلیمری چند ماده‌ای

سید محمد جوادی*، علی محمد ناصریان نیک

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۲۴

بازنگری: ۱۳۹۷/۰۲/۳۰

پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۲۶

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۵/۱۹

کلمات کلیدی:

شبیه‌سازی

سیال غیر نیوتنی

ویسکوزیته بالا

چند فازی

پلیمر

خلاصه: در طراحی قالب اکستروژن قطعات پلیمری، پیش بینی و کاهش تغییرشکل‌های مقطع نواری پس از خروج از قالب، اهمیت زیادی دارد. در این مقاله اثر توازن سرعت در صفحه‌ی خروجی قالب بر ابعاد قطعه تولید شده مورد مطالعه‌ی عددی و آزمایشگاهی قرار گرفته است. برای پیش بینی توزیع سرعت و فشار، از شبیه‌سازی سه بعدی جریان سیال غیرنیوتنی با ویسکوزیته بالا، در راه‌گاه‌های قالب استفاده شده تا بتوان با تغییرشکل راه‌گاه‌ها، افت فشار را کاهش و نیز توزیع سرعت را یکنواخت کرد. با توجه به اهمیت مرز مواد نرم و سخت در مقطع‌های چند ماده‌ای، برای پیش بینی آن از مدل دو فازی VOF استفاده شده است. ویسکوزیته جریان لاستیک مذاب داخل قالب، از میان‌یابی داده‌های آزمایشگاهی دستگاه RPA بر اساس روش حداقل مربعات استفاده شده است. مقایسه ابعاد پروفیل تولید شده از قالب اولیه (با پروفیل غیر یکنواخت) و قالب اصلاح شده نشان دهنده ابعاد بسیار دقیق‌تر قالب اصلاح شده است. در بخش‌های باریک مقطع که در مجاورت ناحیه‌های وسیع قرار گرفته‌اند، به دلیل عدم امکان رسیدن به سرعت یکنواخت، ابعاد مقطع نوار تولید شده کوچک‌تر از مقدار طراحی است. همچنین بدلیل عدم محدودیت‌های هندسی در روش عددی نسبت به روش تجربی، با طراحی بهینه هندسه راه‌گاه‌ها، افت فشار بیش از ۴۰٪ کاهش می‌یابد.

۱- مقدمه

کار بسیار پیچیده‌ای است که دلیل آن خواص منحصر بفرد لاستیک مذاب از جمله رفتار غیر نیوتنی آن در برابر تنش برشی است. از طرف دیگر هزینه فرآیند طراحی، پارامتر مهمی برای صنایع تولیدی است. در حال حاضر بیش‌تر فرآیند طراحی قالب بر اساس دانش تجربی موجود و مبتنی بر سعی و خطا است که علاوه بر حجم بالای ضایعات، فرآیندی بسیار زمانبر و طولانی است.

طراحی مناسب قالب اکستروژن نیاز به دانش دقیق در مورد جریان و رفتار حرارتی لاستیک مذاب دارد. مقدار تورم ویسکوالاستیک مقطع وابستگی زیادی به دمای ذوب و نرخ برش دارد [۱]. بر اساس تحقیقات انجام شده در یک قالب ایده‌ال، جریان مذاب در خروجی صفحه شکل‌دهنده باید متوازن بوده [۲] و راه‌گاه‌های قالب حداقل افت فشار را داشته و از هرگونه تغییر

نوارهای لاستیکی با توجه به خواص لاستیک، از جمله مقاومت به شرایط محیطی مختلف، کاربردهای متنوعی را در صنایع مختلف به خود اختصاص داده‌اند. این محصولات در صنعت خودروسازی برای بخش‌های مختلف مثل دور در، دور شیشه، دور صندوق و غیره با کاربرد اصلی آب‌بندی بکار گرفته می‌شوند. نوارهای لاستیکی آب‌بندی، صرف نظر از محل کاربرد، باید به عنوان مانعی بین دو محیط، علاوه بر ممانعت از نفوذ آب و گرد و خاک به عنوان عایق صوتی و جذب ضربات عمل کنند. از این رو، با توجه به کاربرد آن‌ها، دقت ابعادی منحنی تولید شده، نقش مهمی بر عملکرد آن دارد. از طرفی طراحی یک قالب برای تولید یک منحنی با دقت ابعادی بالا،

* نویسنده‌دار مکاتبات: mohammad.javadi@qiet.ac.ir



روی دیوار) و افزایش دبی جریان، به دلیل افزایش تنش داخل سیال، تغییرشکل مقطع نوار پس از خروج از قالب باز بیش تر است. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد در حالت سیال ایده‌ال با لغزش کامل روی دیوار، منحنی پس از خروج از قالب تغییرشکلی ندارد.

در سال ۲۰۰۸، مو^۳ و همکاران اثر مدل‌های ویسکوالاستیک را بر جریان داخل قالب و تورم منحنی خروجی با استفاده از روش اجزای محدود بر روی یک قالب ساده مورد بررسی قرار دادند [۱۰]. در سال ۲۰۱۳، اثر پارامترهای ساختاری قالب باز را در فرآیند اکستروژن مقطع‌های پلاستیکی با هسته فلزی مورد مطالعه عددی قرار دادند [۱۱]. مطالعات آن‌ها نشان داد بیش‌ترین افت فشار تابعی از سرعت هسته فلزی است. در سال ۲۰۱۷، مو و همکاران [۱۲] اثر توزیع سرعت یکنواخت در قالب باز اکستروژن را مورد بررسی قرار دادند و یک راه‌کار برای طراحی مقطع‌های پیچیده پیشنهاد نمودند. آن‌ها دریافتند که کانال‌های جریان ورودی و خروجی تعیین‌کننده بدنه اصلی و شیارهای داخلی است.

در سال ۲۰۱۳، گونکالواس^۴ و همکاران [۱۲] یک کد عددی را برای تولید شبکه در هندسه پیچیده قالب‌های باز توسعه داد. کد عددی فوق، معادلات پیوستگی و مومنتوم خطی را برای سیالات نیوتنی حل می‌کند و توانایی تحلیل سیالات غیر نیوتنی را ندارد.

در سال ۲۰۱۴، کوالنکو^۵ و همکاران [۱۳] برای شبیه‌سازی جریان ویسکوالاستیک خروجی از یک اکستروژن با سطح آزاد استفاده از مدل فان-تین-تر^۶ را پیشنهاد نمودند. مطالعات آن‌ها نشان داد شکل مقطع تولید شده به عدد دیورا^۷ و گرادیان فشار وابسته است.

در سال ۲۰۱۴، ییلماز^۸ [۱۴] و همکاران اثر یکنواختی جریان در خروجی قالب باز اکستروژن و افت فشار آن را به عنوان معیارهای مهم طراحی قالب، جریان پلی‌پروپیلن در میان یک قالب اکستروژن مخروطی چرخشی مورد بررسی قرار دادند.

فرآیند تزریق در کنار فرآیند اکستروژن در صنعت تولید قطعه‌های پلیمری از اهمیت زیادی برخوردارند. بطوری‌که برخی از محققین بر مطالعه فرآیند تزریق متمرکز شده‌اند [۶ و ۱۵-۱۸]. موکراس^۹ و

ناگهانی در مسیر جریان به دلیل تشکیل نقطه سکون پرهیز شود [۳ و ۴]. بنابراین، هدف اصلی طراحی قالب، رسیدن به توزیع جریان یکنواخت از نظر سرعت و دما در خروجی قالب است تا اثر تورم لاستیک و تغییرشکل‌های ناشی از آن به حداقل برسد. در حال حاضر صفحه‌های تغذیه‌کننده در قالب‌های با منحنی پله‌ای، یک راه حل برای رسیدن به توزیع سرعت یکنواخت است، بطوریکه در قسمت‌های باز مقطع، راهگاه‌های باریک و برای قسمت‌های باریک مقطع، راهگاه‌های بزرگ در نظر گرفته می‌شود. اگرچه در حال حاضر طراحان قالب در کارخانجات صنعتی، صفحه‌های تغذیه‌کننده قالب را با سعی و خطا بر مبنای تجربه‌های گذشته طراحی می‌کنند، در این روش علاوه بر صرف زمان طولانی، نیاز به انجام تعداد زیاد آزمایش است و در نهایت نیز قالب طراحی شده ممکن است قالب بهینه‌ای از نظر افت فشار نباشد. با این توصیف از وضعیت موجود، شبیه‌سازی جریان می‌تواند به عنوان طرح فوق‌العاده‌ای برای رسیدن به یک قالب مناسب با صرف هزینه و زمان کم باشد.

با وجود تاریخچه طولانی فرآیند اکستروژن قطعه‌های لاستیکی، به دلیل پیچیدگی هندسی، خواص مواد و فرآیند تولید، مطالعات عددی محدودی بر روی این موضوع انجام شده است. از طرفی بیش‌تر این مطالعات بر روی قالب‌های ساده و معمولاً به روش اجزای محدود بوده‌اند [۵ و ۶]. با این وجود در سال ۲۰۰۷، دیاز و همکاران به شبیه‌سازی جریان سیال غیرنیوتنی در یک قالب ساده (تک صفحه) با روش اجزای محدود و مقایسه با نتایج تجربی پرداختند. آن‌ها از نرم افزار انسیس فلوئنت^۱ برای شبیه‌سازی استفاده نمودند [۷].

در سال ۲۰۰۸، دیاز و همکاران به مدل‌سازی جریان غیرهمدمای سیال غیرنیوتنی در داخل قالب اکستروژن لاستیک با استفاده از اجزای محدود پرداختند [۸]. در هیچ یک از مقالات ذکر شده، تحلیل و نتایج خاصی آورده نشده و به صورت بسیار مختصر چاپ شده‌اند.

در سال ۲۰۰۸، ها^۲ و همکاران اثر ضریب لغزش و دبی جریان را بر شکل منحنی تولید شده نوار آب‌بند خودرو در یک قالب ساده با استفاده از روش اجزای محدود مورد بررسی قرار دادند [۹]. نتایج آن‌ها نشان داد با افزایش ثابت لغزش (کاهش لغزش سیال

1 ANSYS-CFX

2 Ha

3 Mu

4 Goncalvas

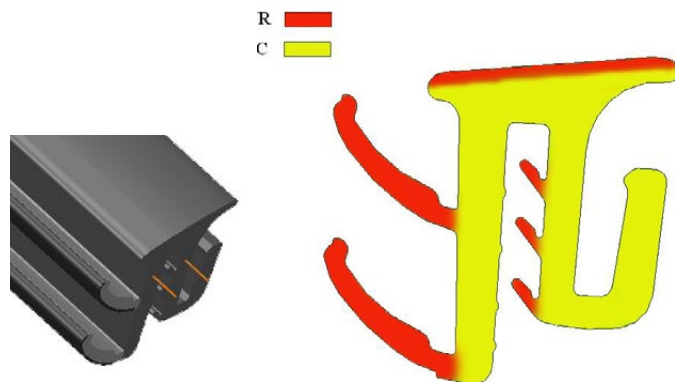
5 Kovalenco

6 Phan-Thein-Tanner model

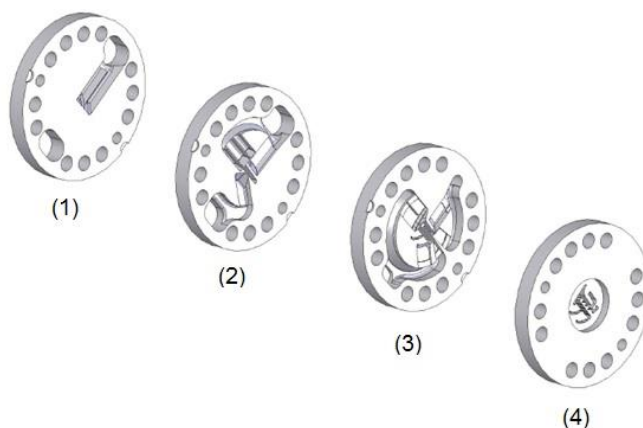
7 Deborah number

8 Yilmaz

9 Mukras



الف) مقطع نوار مورد مطالعه با دو ماده مختلف (سمت راست) و نمونه نوار لاستیکی تولید شده (سمت چپ)



ب) صفحه‌های ۱ تا ۴ قالب باز اکستروژن مورد مطالعه

شکل ۱- الف) مقطع نوار آب‌بند مورد مطالعه و مرز بندی آمیزه‌های نرم (*R*) و سخت (*C*) ب) شماره گذاری صفحه‌های مختلف قالب باز

مسیرهای پیچیده قالب باز به ویژه با نرم‌افزارهای حجم محدود، مورد بررسی قرار نگرفته است. از این‌رو، در این مقاله به مطالعه عددی اثر یکنواختی سرعت در خروجی قالب بر تغییر شکل‌های مقطع و مرز آمیزه‌های پلیمری پس از خروج از قالب باز پرداخته شده است. با توجه به جریان سیال غیرنیوتنی با ویسکوزیته بالا در قالب، در مناطق با نرخ برش پایین، جریان با ویسکوزیته بسیار بالا به سکون رسیده و پخت می‌شود که این می‌تواند کیفیت قطعه تولیدی را کاهش دهد. از این‌رو، در طراحی راهگاه‌ها معیار نرخ برش و مقدار ویسکوزیته در نظر گرفته شده است. نتایج قالب ساخته شده بر حسب نتایج عددی، نشان دهنده کاهش شدید حجم ضایعات و زمان ساخت قالب با منحنی مورد تأیید و همچنین کاهش افت فشار سامانه است.

همکاران [۱۷] در سال ۲۰۱۶، به شبیه‌سازی فرآیند تزریق پروپیلن سنگین پرداختند و نتایج بدست آمده را با نتایج تجربی مقایسه و ارزیابی نمودند. آن‌ها برای شبیه‌سازی نحوه پیشرفت جبهه پلیمر مذاب در فرآیند تزریق تلاش کردند.

در سال ۲۰۱۶، روسدی^۱ و همکاران [۱۸] با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلونت ۱۴، فرآیند تزریق را در قالب بسته مدل‌سازی کردند. مطالعه آن‌ها بر روی اثر فشار و دما در طول پروسه تزریق متمرکز شده است. آن‌ها بر روی اثر فشار سامانه و دما بر روی توزیع سرعت، پیشروی جبهه مواد در حال تزریق و زمان پر شدن قالب مطالعه کردند.

با توجه به مطالعات سایر محققین، شبیه‌سازی فرآیند اکستروژن سیالات غیرنیوتنی پلیمری با چند ماده مختلف (چند فازی) در

1 Rusdi

۲- مواد و روش شکل‌دهی نوارهای آب‌بند خودرو

قالب‌گیری تزریقی و شکل‌دهی پیوسته به روش اکستروژن دو روش عمده در تولید قطعه‌های لاستیکی خودرو است. اما روش اکستروژن، به دلیل مزایای اقتصادی و زمان کوتاه‌تر تولید، به عنوان یک انتخاب مناسب برای تولید قطعه‌های نواری لاستیکی آب‌بند خودرو است. تغذیه، تراکم و ناحیه قالب باز^۱، سه بخش عمده یک فرآیند اکستروژن می‌باشند. قالب باز در فرآیند اکستروژن (که از این به بعد در مقاله به اختصار قالب نامیده می‌شود) قطعه انتهایی نازل یک اکسترودر در فرآیندهای شکل‌دهی پیوسته اکستروژن است که مذاب پلیمری از یک سو وارد آن می‌شود و در طرف دیگر در هنگام خروج به شکل مقطع خروجی قالب در آمده و با یک سطح مقطع ثابت و بطور پیوسته شکل‌دهی شده و از آن خارج می‌شود. در شکل ۱ مقطع نوار آب‌بند مورد مطالعه (نوار لاستیکی گردگیر نگهدارنده شیشه خودرو) نشان داده شده است. منحنی مورد مطالعه از دو آمیزه لاستیکی مختلف بر پایه اتیلن پروپیلن دینه متیلن^۲ که آمیزه نرم آن با R و آمیزه سخت با C نشان داده خواهد شد، تشکیل شده است. در طراحی قالب باز این مقطع، دو دهانه ورودی مواد، یکی برای آمیزه نرم و دیگری برای آمیزه سخت در نظر گرفته شده است که مواد با دبی ثابت به نسبت سطح خروجی هر آمیزه، وارد مجاری قالب می‌شود. بدنه اصلی منحنی به دلیل استحکام و دوام بالا از ماده C با سختی Shore A ۹۰ و بقیه قسمت‌ها به دلیل راحتی مونتاژ و خواص مورد نیاز از ماده R با سختی Shore A ۷۰ ساخته شده است. به دلیل امکان کنترل دبی جریان و توازن آن در خروجی قالب، مسیرهای جریان داخل قالب، در ۴ صفحه مختلف طراحی شده است (شکل ۱ (ب)) که به ترتیب از پایین به بالا با عنوان صفحه‌های ۱ تا ۴ نام‌گذاری می‌شود. صفحه ۱، صفحه پایین قالب بوده که جریان از اکسترودر وارد آن می‌شود و پس از عبور از راهگاه‌های صفحه‌های ۲ و ۳، از زیر وارد صفحه ۴ می‌شود. با توجه به اینکه خروجی صفحه ۴ به شکل منحنی مورد نظر است، این صفحه، صفحه شکل‌دهنده^۳ نامیده می‌شود که ضخامت آن ۸ میلی‌متر است. صفحه شکل‌دهنده معمولاً به شکل مقطع خروجی مورد نظر است، اما با توجه به تغییرشکل نوار لاستیکی پس از خروج از قالب (تورم)، هرگونه اصلاحات نهایی برای

- 1 Die
- 2 Ethylene Propylene Diene Methylene (EPDM)
- 3 Form plate

رسیدن به شکل مورد نظر باید بر روی این صفحه انجام شود. نتایج تجربی نشان می‌دهد گذرگاه‌های باریک، به دلیل عدم بالانس جرم ورودی، منحنی تغییرشکل یافته‌ای دارند و باید در صفحه شکل‌دهنده قالب، ابعاد آن‌ها بزرگ‌تر و برای افزایش دبی جریان در این ناحیه‌های باریک و رسیدن به توازن سرعت، کانال‌های تغذیه مستقیم‌تر، با طول کوتاه‌تر و مقطع بزرگ‌تر (تلفات فشار کم‌تر) در نظر گرفته شوند.

در شکل ۱ مرز بین مواد نرم و سخت مشخص شده است، که هرگونه پیشروی یکی در دیگری می‌تواند موجب تغییر منحنی عملکرد تولید شده و عدم قبول آن گردد. وجود دو ماده مختلف با دماهای ورودی و خواص مواد مختلف، تحلیل این قالب را بسیار پیچیده‌تر از تحلیل قالب‌های تک ماده‌ای کرده است.

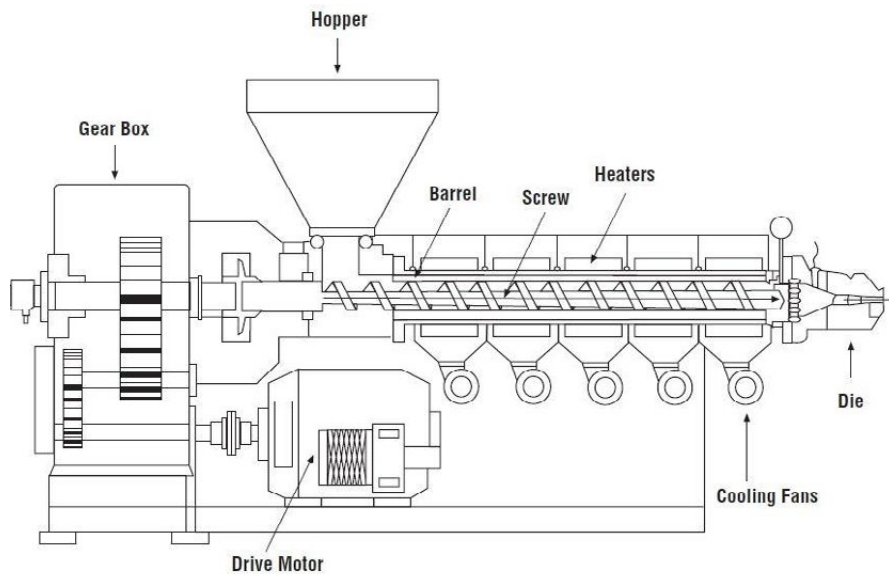
۳- بستر تست

برای مطالعه اثر توازن سرعت در خروجی قالب، چندین قالب مختلف، در شرکت پویا گستر خراسان از مجموعه کارخانجات پارت لاستیک، ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. قالب اول با صفحه شکل‌دهنده ساده (صفحه ۴ قالب) و آخرین قالب، قالب اصلاح‌شده نهایی با شبیه‌سازی است. مقطع‌های نواری در خطوط پیوسته تولید و پخت قطعه‌های نواری لاستیکی ساخت شرکت گِراخ آلمان تولید و به روش هوای داغ [۱۹] پخت شده‌اند. این روش جزء روش‌های پیوسته پخت قطعه‌های نواری لاستیکی است. در شکل ۲، نمونه‌ای از یک دستگاه اکسترودر و موقعیت قالب باز در آن نشان داده شده است.

جهت کنترل ابعاد مقطع نوار تولید شده و اندازه‌گیری مقدار خطای آن، ابتدا نقشه مورد نظر طراح در مقیاس بزرگ‌نمایی ۱۰ برابر روی برگه‌های شفاف چاپ و سپس مقطع نوار تولید شده با استفاده از سایه‌نگار روی آن انداخته می‌شود و اختلاف ابعادی قسمت‌های مختلف مقایسه و اندازه‌گیری می‌گردد.

پارامترهای خواص هر ماده با استفاده از برآزش منحنی بر داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از روش حداقل مربعات برای دماهای مختلف بدست آمده است. داده‌های آزمایشگاهی از نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های ارسالی به پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران با دستگاه تشخیص فرآیند پلاستیکی^۴

4 Rubber Process Analyzer (RPA)



شکل ۲- نمایی از دستگاه اکسترودر خط تولید قطعه‌های نواری لاستیکی و موقعیت قالب باز در خروجی نازل دستگاه

نیوتنی^۲) برای مدل‌سازی آن‌ها استفاده شده است [۲۱]:

$$\eta_0(\gamma) = k_0 \gamma^{n-1} \quad (۲)$$

$$H(T) = e^{-\alpha(T-T_0)} \quad (۳)$$

که γ ، نرخ کرنش برشی، n و k ثابت‌های مدل توانی، α انرژی فعال‌سازی و T_0 دمای مرجع است. معادلات بقا با استفاده از کد عددی فلوئنت، به روش حجم‌های محدود حل شده‌اند، بطوریکه معادلات بر روی حجم‌های کنترل اطراف هر گره، انتگرال‌گیری می‌شوند. ترم‌های جابه‌جایی با طرح قانون توانی و عبارت پخش بر اساس طرح تفاضل مرکزی گسسته شده‌اند.

با توجه به ویسکوزیته بالای سیال داخل راه‌گاه‌ها و سرعت کم جریان، نرخ همگرایی بسیار کند و برای رسیدن به دقت مناسب، معیار همگرایی کم‌تر از 10^{-6} برای معادلات مومنتوم ضروری است. شرایط مرزی جرم ورودی برای دهانه‌های ورودی ماده نرم و سخت به ترتیب با $20/1$ و $55/4$ گرم بر ثانیه و برای خروجی مواد، شرط فشار خروجی در نظر گرفته شده است. این دبی ورودی معادل سرعت خط $8/5$ متر بر دقیقه تولید مقطع نواری است. همچنین برای دیواره‌ها شرط عدم لغزش در نظر گرفته شده است.

بدست آمده‌اند. دستگاه آر. پی. ای یک دستگاه چند هدفه تست رفتار مکانیکی لاستیک تحت شرایط دینامیکی است که در سال ۱۹۹۲ برای اندازه‌گیری خواص الاستیک و ویسکوزیته الاستومرها و ترکیبات آن‌ها طراحی شده است [۲۰].

۴- معادلات حاکم، خواص مواد و شرایط مرزی

معادلات حاکم بر جریان سیال، معادلات ناویر-استوکس سه‌بعدی، با فرض جریان آرام و غیر نیوتنی در حالت مستقل از زمان است. همچنین با توجه به خواص مواد مختلف دو ماده تشکیل‌دهنده مقطع نواری و اهمیت مرز دو آمیزه در عملکرد نوار لاستیکی تولید شده، از مدل دو فازی نسبت حجمی^۱ سیال برای تعیین مرز آمیزه‌ها استفاده شده است [۲۱].

لاستیک ذوب شده به دلیل طبیعت سیال برشی رقیق^۲، یک سیال غیرنیوتنی بوده و ویسکوزیته برشی آن تابعی از نرخ برش و دما است:

$$\eta(\gamma, T) = \eta_0(\gamma) \cdot H(T) \quad (۱)$$

در میان مدل‌های زیادی که برای η_0 و H وجود دارد، به ترتیب از مدل‌های قانون توانی و قانون آرنیوس (قانون توانی برای سیالات غیر

1 Volume of Fluid (VOF)

2 Shear thinning fluid

3 Non-Newtonian power law

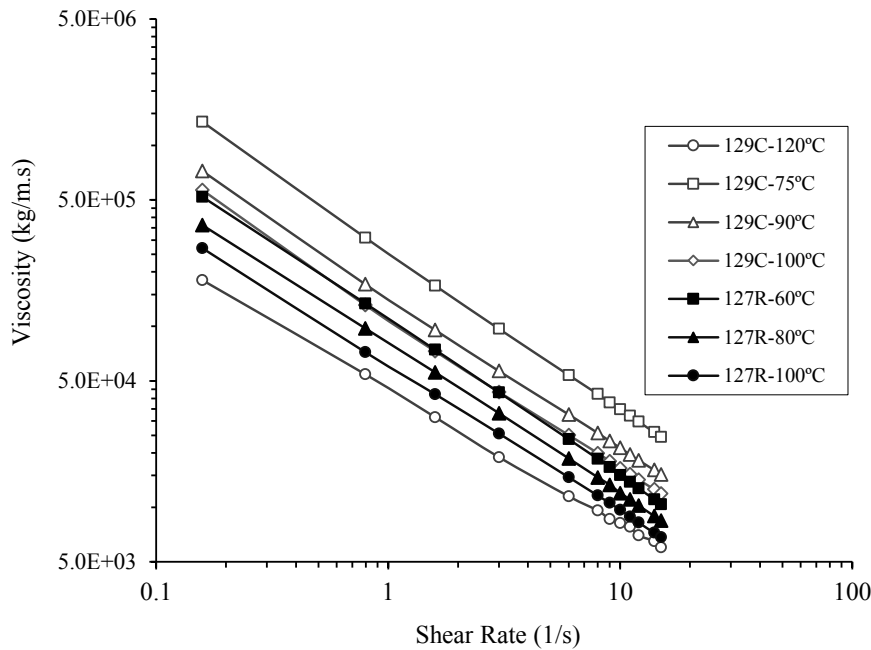
۵-نتایج

در این مقاله با هدف بررسی اثر هندسه جریان بر ویسکوزیته و تنش برشی در جریان پلیمرهای با ویسکوزیته بالا و همچنین اثر توازن سرعت جریان خروجی بر تغییرشکل مقطع نوار لاستیکی پس از خروج از قالب باز (تورم)، از روش عددی حجم‌های محدود برای پیش‌بینی جریان سیال غیرنیوتنی در داخل قالب استفاده شده است. پس از ۱۱۶ بار شبیه‌سازی و انجام اصلاحات با هدف حذف نقطه‌های سکون، کوتاه کردن مسیرها، افزایش سطح مقطع مجاری باریک، گرد کردن مسیرهای تیز، و بخصوص اصلاحات صفحه شکل‌دهنده قالب، در زیر نتایج بدست آمده بررسی و تحلیل شده‌اند.

بر اساس ۷ نمونه تهیه شده از دو ماده نرم و سخت تشکیل‌دهنده مقطع نوار، ویسکوزیته مواد در دماهای مختلف اندازه‌گیری و نتایج آن

در شکل ۳ نشان داده شده‌اند.

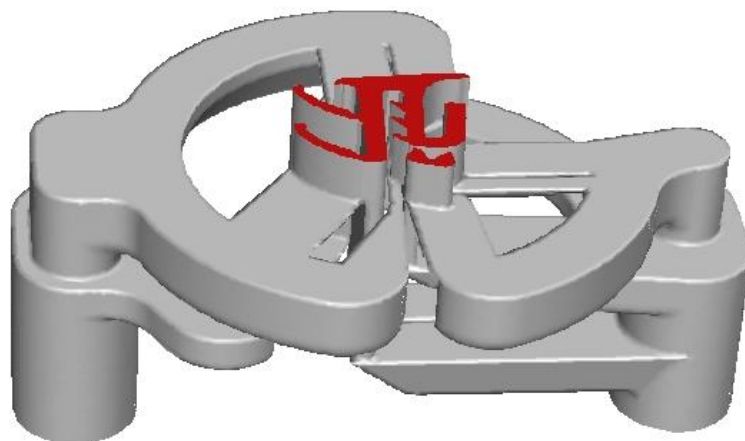
بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده و برازش منحنی، مقادیر ثابت در معادلات (۲) و (۳) محاسبه و وارد نرم‌افزار فلونت گردید (جدول ۱). در شکل ۱ (ب) صفحه‌های قالب مورد مطالعه و مسیرهای تولید شده برای عبور جریان در آن‌ها نشان داده شده است. به منظور شبیه‌سازی مسیر جریان، با ایجاد هندسه راهگاه‌ها از روی هندسه قالب، محیط حل تولید و شبکه‌بندی می‌شود. در شکل ۴ مسیر جریان از ورودی قالب (خروجی اکسترودر) تا خروجی قالب اولیه موجود و قالب اصلاح‌شده، نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود علاوه بر کوتاه‌تر شدن مسیرها در قالب اصلاح‌شده، کانال‌های تغذیه بخش‌های باریک و لبه‌های تیز مقطع مطابق شکل ۵ از زیر صفحه شکل‌دهنده، بزرگ شده است. از آنجا که کانال‌های باریک افت فشار



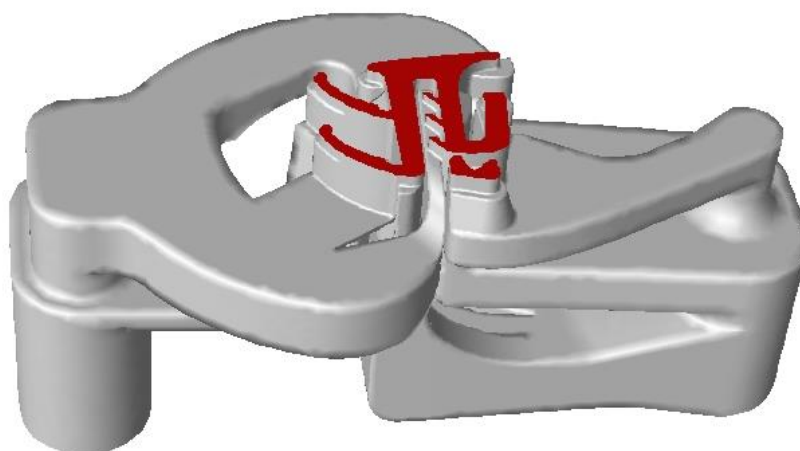
شکل ۳- ویسکوزیته دو ماده نرم (R) و سخت (C) بر حسب نرخ برش در دماهای مختلف

جدول ۱- ثابت‌های محاسبه شده به کمک نمودار ویسکوزیته-نرخ برش

نام ماده	ضریب توان، n	ضریب k_0	T_{ref}
ماده نرم (R)	۰/۱۸۵	۲۹۸۰۰	۲۵۳
ماده سخت (C)	۰/۱۲۵	۵۴۰۰۰	۳۶۳



الف - قالب اولیه



ب - قالب اصلاح شده

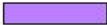
شکل ۴- الف) مسیر راه‌گاه‌های قالب اولیه و ب) قالب اصلاح شده نهایی

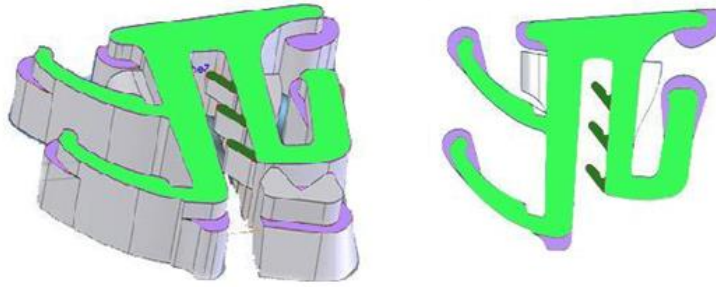
بخصوص در صفحه ۴، صفحه شکل‌دهنده، از اهمیت خاصی برخوردار است. برای بررسی اثر شبکه‌بندی، جریان داخل قالب به ترتیب برای سه شبکه مختلف با تعداد ۲۳۵۸۲۰، ۳۲۴۰۴۸ و ۴۵۶۸۵۲ شبیه‌سازی گردید که اختلاف افت فشار محاسبه شده برای دو شبکه با تعداد سلول متوسط و زیاد کم‌تر از ۱/۶٪ ماده سخت و ۳/۳ درصد برای ماده نرم است. همچنین اختلاف بیشینه سرعت محاسبه شده در صفحه خروجی با دو شبکه فوق کم‌تر از ۱٪ است. نتایج در جدول ۲ آورده شده است:

همچنین در مقطع خروجی، از شبکه ۰/۲ میلی‌متری و در دهانه‌های ورودی از شبکه ۲ میلی‌متری استفاده شده است. در شکل ۶ (ب) بهترین شبکه محاسباتی تولید شده در مقطع خروجی قالب و

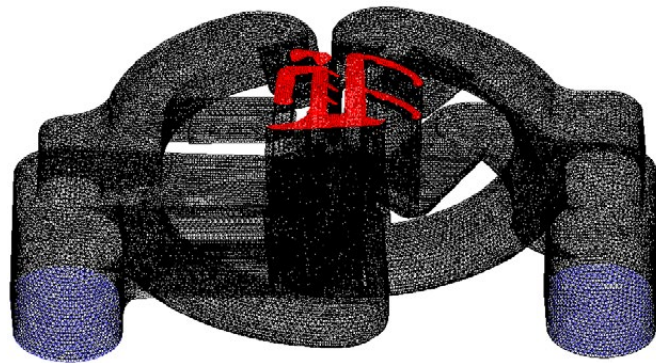
زیادی در صفحه ۴ قالب دارند، در این روش با کاهش افت فشار، جرم بیش‌تری به این ناحیه‌های رسانده می‌شود. همچنین در قالب بهینه، علاوه بر حذف تعداد زیادی از نقطه‌های سکون (حذف همه نقطه‌های سکون به دلیل مشکلات ساخت، میسر نبود) و خم‌های تیز، تا حد ممکن سعی شده از کانال‌های با طول کم‌تر استفاده شود. همچنین با توجه به امکان پیش‌بینی نتایج در حل عددی، قوانینی مانند رعایت تقارن نسبی در طراحی راه‌گاه‌ها و پیچ‌های تنظیم دبی جریان (با افزایش یا کاهش سطح مقطع کانال) حذف گردیده است.

در شکل ۶ محیط حل و شبکه تولید شده در ورودی‌ها، خروجی و روی دیواره‌های قالب باز اولیه و نهایی نشان داده شده است. با توجه به نوع جریان و پیچیدگی هندسی محیط حل، تولید شبکه مناسب

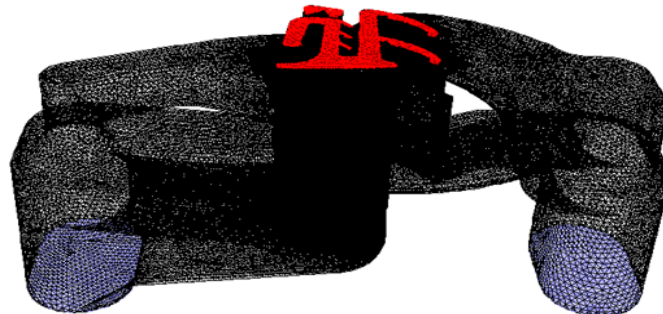
Enlarged feeders 



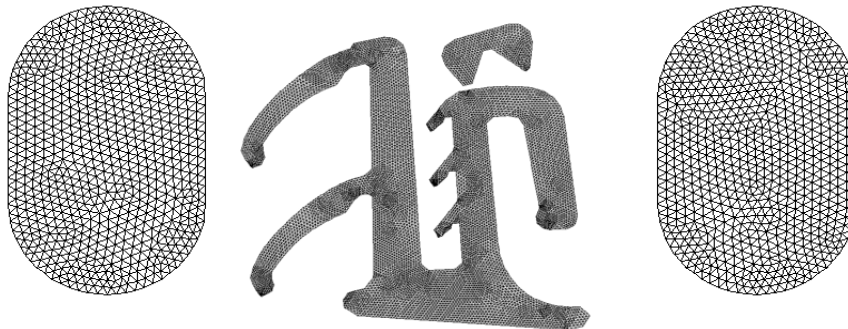
شکل ۵- مقطع خروجی قالب باز و کانال‌های تغذیه بزرگ شده در زیر صفحه شکل دهنده



الف) شبکه‌بندی قالب اولیه



ب) شبکه‌بندی قالب اصلاح شده



ج) شبکه‌بندی دهانه‌های ورودی و مقطع خروجی در هر دو قالب باز

شکل ۶ الف) و ب) به ترتیب شبکه‌بندی محیط حل قالب اولیه و اصلاح شده نهایی، ج) ابعاد شبکه در مقطع‌های ورودی و خروجی قالب

جدول ۲- مقایسه نتایج عددی برای شبکه بندی‌های مختلف

تعداد سلول محاسباتی	بیشینه سرعت خروجی، m/s	افت فشار مسیر ماده نرم، MPa	افت فشار مسیر ماده سخت، MPa
۲۳۵۸۲۰	۰/۲۸۶	۳/۱۵۸۷	۳/۶۵۳۸
۳۲۴۰۴۸	۰/۲۷۵	۳/۴۳۵۲	۳/۸۱۵۲
۴۵۶۸۵۲	۰/۲۷۵	۳/۵۵۰۰	۳/۸۷۹۰

دهانه‌های ورودی آن نشان داده شده است.

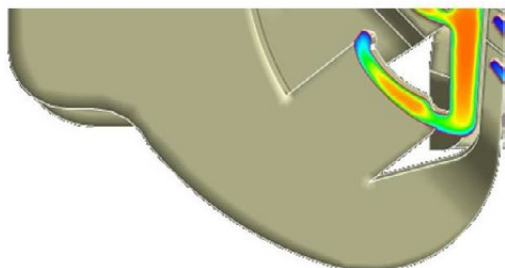
در شکل ۷ توزیع سرعت در یکی از یال‌های مقطع و مسیر جریان آمیزه نرم ورودی به آن، قبل و بعد از اصلاح هندسه، نشان داده شده است. مشاهده می‌شود در قالب اصلاح‌شده (سمت چپ) جریان به صورت عمود بر مقطع و در مسیر کوتاه‌تری وارد صفحه شکل‌دهنده شده و توزیع سرعت یکنواخت‌تری در طول یال مقطع ایجاد کرده است ولی قبل از اصلاح مسیر (شکل سمت راست)، بیش‌ترین سرعت در نوک یال بوده و اختلاف سرعت در نقطه‌های مختلف یال بیش‌تر است.

در شکل ۸ توزیع فشار روی سطح راه‌گاه‌ها برای قالب اولیه و قالب اصلاح‌شده نشان داده شده است. مشاهده می‌شود بیش‌ترین فشار در ورودی آمیزه نرم و سخت بوده و در محل خروجی آمیزه از قالب، فشار به صفر می‌رسد. متوسط فشار در ورودی ماده نرم در قالب اولیه ۶/۲۴ مگاپاسکال بوده که در قالب اصلاح‌شده به ۳/۸۱ مگاپاسکال کاهش یافته است. همچنین متوسط فشار در ورودی ماده سخت در قالب اولیه ۸/۳۲ مگاپاسکال و در قالب اصلاح‌شده ۳/۴۳ مگاپاسکال است. مشاهده می‌شود با اصلاح مسیر راه‌گاه‌ها، افت فشار آمیزه نرم ۳۹٪ و

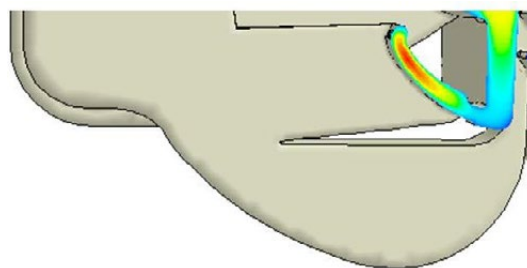
آمیزه سخت (C) ۵۸٪ نسبت به قالب اولیه کاهش یافته است.

در شکل ۹، با تعیین چندمقدار حدی بین 10^3 kg/m.s تا 10^5 kg/m.s برای ویسکوزیته، ناحیه‌های بیش از مقدار تعیین شده با رنگ قرمز نشان داده شده است. مشاهدات تجربی پس از تولید منحنی با قالب اصلاح‌شده نشان می‌دهد ناحیه‌های پخت شده لاستیک در قالب با ناحیه‌های سکون و ناحیه‌های با ویسکوزیته بیش از 10^4 kg/m.s تطابق خوبی دارد. این ناحیه‌های در قالب بهینه وسعت بسیار کم‌تری دارد. در شکل ۹ (الف) ناحیه‌های قرمز رنگ، ناحیه‌های با ویسکوزیته بیش از 10^5 kg/m.s را نشان می‌دهد که در قالب بهینه منطقه کم‌تری را نسبت به قالب اولیه دارد. در قالب بهینه حذف این نقطه‌های با پخ زدن، به دلیل قرار گرفتن راه‌گاه‌ها در چند صفحه مختلف، امکان پذیر نمی‌باشد. در سایر شکل‌ها مشاهده می‌شود ویسکوزیته سیال در بخش‌های اصلی راه‌گاه‌های قالب بهینه بین 1000 kg/m.s تا 5000 kg/m.s است، در صورتی که در قالب اولیه بین 5000 kg/m.s تا 50000 kg/m.s است.

همچنین ناحیه‌های قرمز در شکل‌های مختلف می‌تواند طراح را در صورت تمایل به اصلاح هندسی راه‌گاه‌ها و حذف ناحیه‌های با

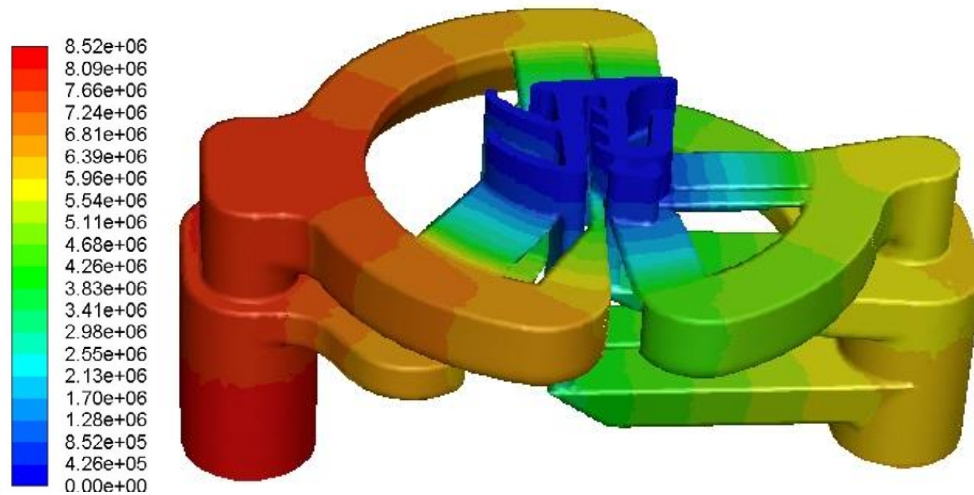


(ب) بعد از اصلاح شکل هندسی راه‌گاه

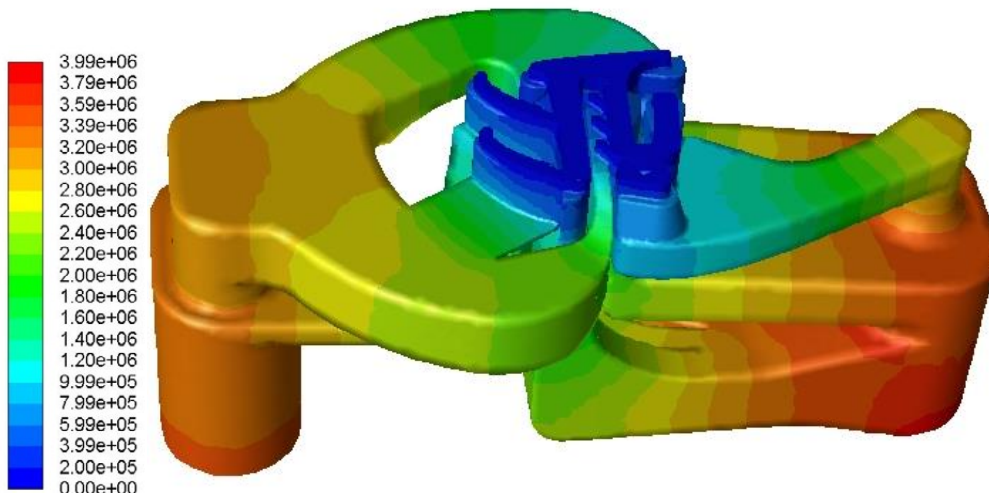


(الف) قبل از اصلاح شکل هندسی راه‌گاه

شکل ۷- مقایسه توزیع سرعت (m/s) در بخشی از مقطع خروجی و مسیر جریان تغذیه‌کننده آن: (الف) قبل و (ب) بعد از اصلاح هندسی



الف) قالب اولیه



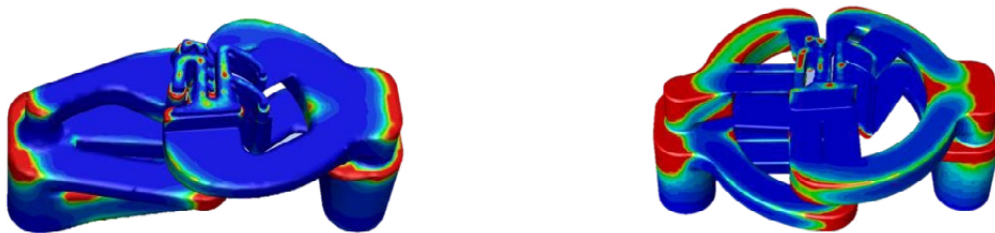
ب) قالب اصلاح شده

شکل ۸- مقایسه توزیع فشار (Pa) در راه‌گاه‌های مختلف: الف) قالب اولیه و ب) قالب اصلاح شده نهایی

تاکنون طراحی بر حسب یکنواختی تنش در روی دیواره‌های قالب و معیار ویسکوزیته انجام نشده است، ولی نتایج این دو متغیر در این مقاله نشان می‌دهد می‌توان از مقادیر ویسکوزیته آمیزه در طول مسیر برای اصلاح شکل هندسی آن و از معیار تنش برشی برای تغییر مقطع راه‌گاه در مسیرهای مختلف جریان استفاده نمود که نیاز به بررسی و شبیه‌سازی‌های بیشتر دارد.

در شکل ۱۱ توزیع سرعت در خروجی قالب و همچنین در یک مقطع عرضی از قالب، نشان داده شده است. در محل خم‌های ۹۰ درجه مسیر، در ناحیه‌های آبی رنگ با سرعت بسیار پایین، ویسکوزیته

ویسکوزیته بالا، هدایت نماید. نتایج ویسکوزیته در مرکز کانال‌های قالب نیز نشان می‌دهد در قالب اولیه ویسکوزیته جریان در مرکز کانال از مرتبه 200000 kg/m.s و در قالب بهینه که از کانال‌هایی با مقطع کوچک‌تر و گوشه‌های گرد استفاده شده است، 30000 kg/m.s است. در شکل ۱۰ تنش برشی روی دیواره‌های کانال‌های جریان نشان داده شده است. همانطور که مقایسه این نتایج با نتایج شکل ۹ نشان می‌دهد، در ناحیه‌های با تنش برشی پایین، ویسکوزیته جریان افزایش زیادی می‌یابد. همچنین کانال‌های جریان، در قالب بهینه یکنواختی بیشتری از نظر تنش برشی نسبت به قالب اولیه دارد.



الف) ناحیه‌های قرمز رنگ با ویسکوزیته بزرگ‌تر از 10^5



ب) ناحیه‌های قرمز رنگ با ویسکوزیته بزرگ‌تر از 5×10^4



ج) ناحیه‌های قرمز رنگ با ویسکوزیته بزرگ‌تر از 10^4



د) ناحیه‌های قرمز رنگ با ویسکوزیته بزرگ‌تر از 5×10^3



ه) ناحیه‌های قرمز رنگ با ویسکوزیته بزرگ‌تر از 10^3

شکل ۹- مقایسه ناحیه‌های با ویسکوزیته $(kg/m.s)$ بالا بین قالب اولیه (سمت راست) و قالب اصلاح‌شده نهایی

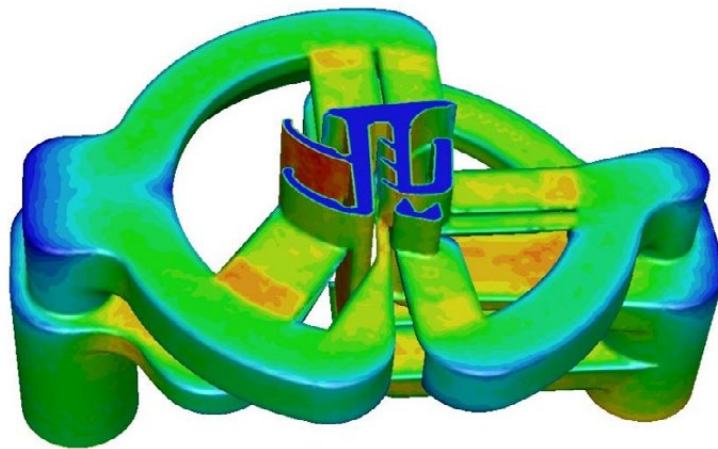
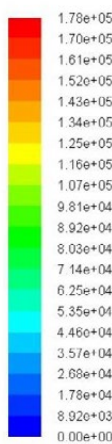
(سمت چپ): الف) $10^5 \leq \mu$ ، ب) $5 \times 10^4 \leq \mu$ ، ج) $10^4 \leq \mu$ ، د) $5 \times 10^3 \leq \mu$ ، ه) $10^3 \leq \mu$

شده با مدل کسر حجمی سیال و مرز مواد در مقطع نواری تولید شده با قالب بهینه مقایسه شده است. مشاهده می‌شود پیش‌بینی مرز مواد با نتایج تجربی موجود تطابق خوبی نشان می‌دهد.

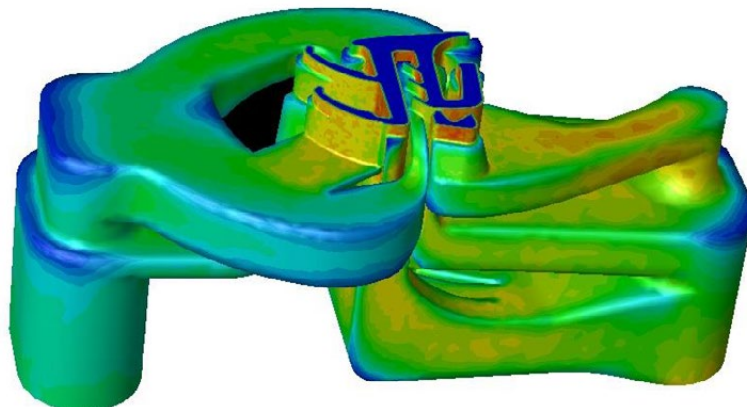
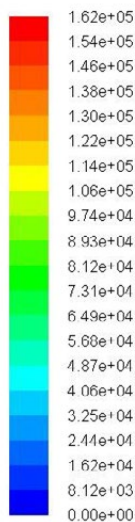
نتایج آزمایش قالب اصلاح‌شده، نشان دهنده ۳۹٪ کاهش افت فشار در ورودی ماده نرم و ۵۶٪ کاهش افت فشار در ورودی ماده سخت است که با نتایج عددی بدست آمده تطابق خوبی نشان می‌دهد. در جدول ۳ مقادیر افت فشار محاسبه شده و نتایج تجربی قالب اصلاح‌شده، آورده شده است.

سیال وارد ناحیه قرمز (در شکل ۹) می‌گردد که تا حد امکان حذف این نقطه‌ها مانع ماند و پخت آمیزه لاستیکی شده و کیفیت محصول را افزایش می‌دهد. هر چند به دلیل تشکیل راهگاه‌های قالب در ۴ صفحه مختلف، امکان گرد کردن همه گوشه‌های تیز و حذف این نقطه‌ها میسر نیست.

در شکل ۱۲ مرز محاسبه شده برای دو آمیزه نرم و سخت در کانال‌های مختلف قالب نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱۳ مرز مواد مشخص شده در مقطع مورد نظر طراح، مرز مواد محاسبه

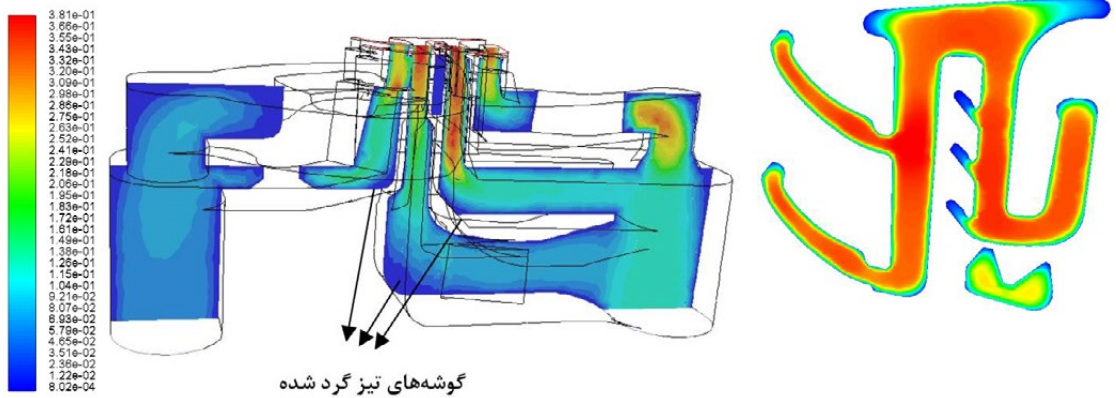


الف) قالب اولیه



ب) قالب اصلاح شده

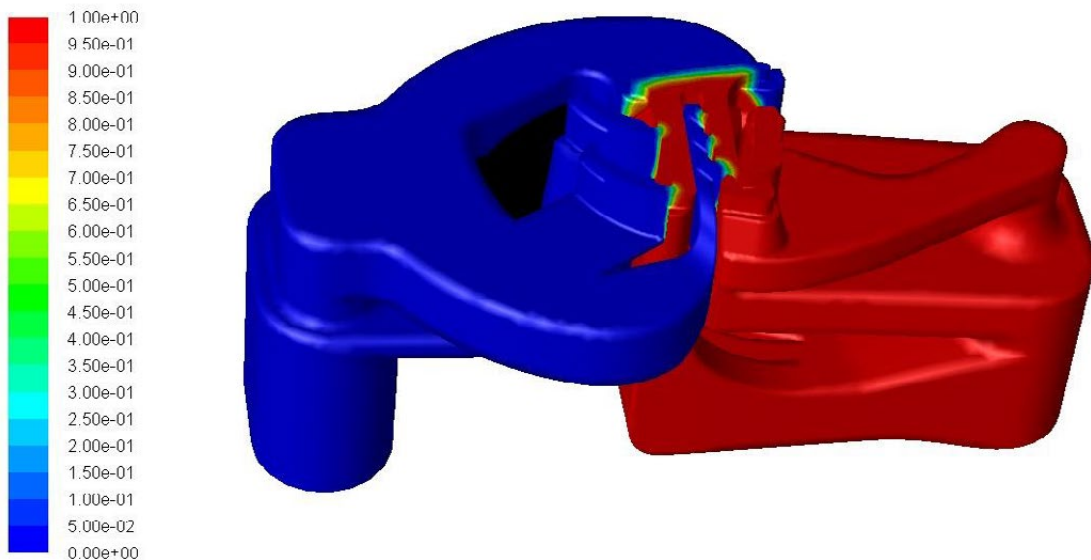
شکل ۱۰- مقایسه توزیع تنش برشی (Pa) روی دیواره‌های قالب: الف) قالب اولیه و ب) قالب اصلاح شده نهایی



گوشه‌های تیز گرد شده
(ب) توزیع سرعت در یک صفحه قالب

(الف) توزیع سرعت قالب نهایی در خروجی

شکل ۱۱- الف) توزیع سرعت (m/s) در الف) خروجی قالب نهایی و ب) یک صفحه از قالب نهایی



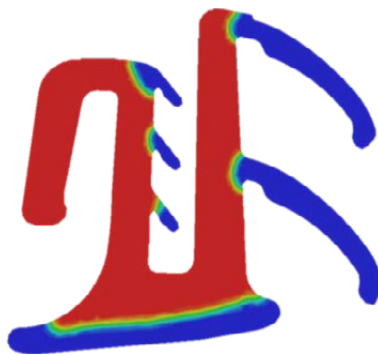
شکل ۱۲- مرز آمیزه نرم و سخت در راهگاه‌های قالب اصلاح‌شده با استفاده از مدل کسر حجمی سیال

جدول ۳- مقایسه مقادیر محاسبه شده و اندازه‌گیری‌های تجربی فشار متوسط در ورودی قالب برای دو آمیزه نرم و سخت

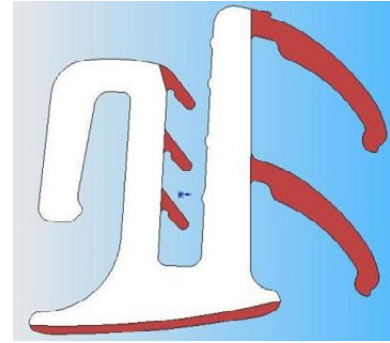
فشار در ورودی قالب نهایی، MPa		فشار در ورودی قالب اولیه، MPa		
عددی	تجربی	عددی	تجربی	
۳/۸۷۹	۴/۳	۶/۲۴	۷/۱	ورودی ماده نرم
۳/۵۵	۴/۰۲	۸/۳۲	۹/۲	ورودی ماده سخت



مرز مواد در مقطع نواری تولید شده



مرز مواد محاسبه شده از مدل کسر



مرز مواد مورد نظر طراح

حجمی سیال

شکل ۱۳- مقایسه مرز مواد در منحنی تولید شده (سمت راست) و منحنی طراحی (سمت چپ)

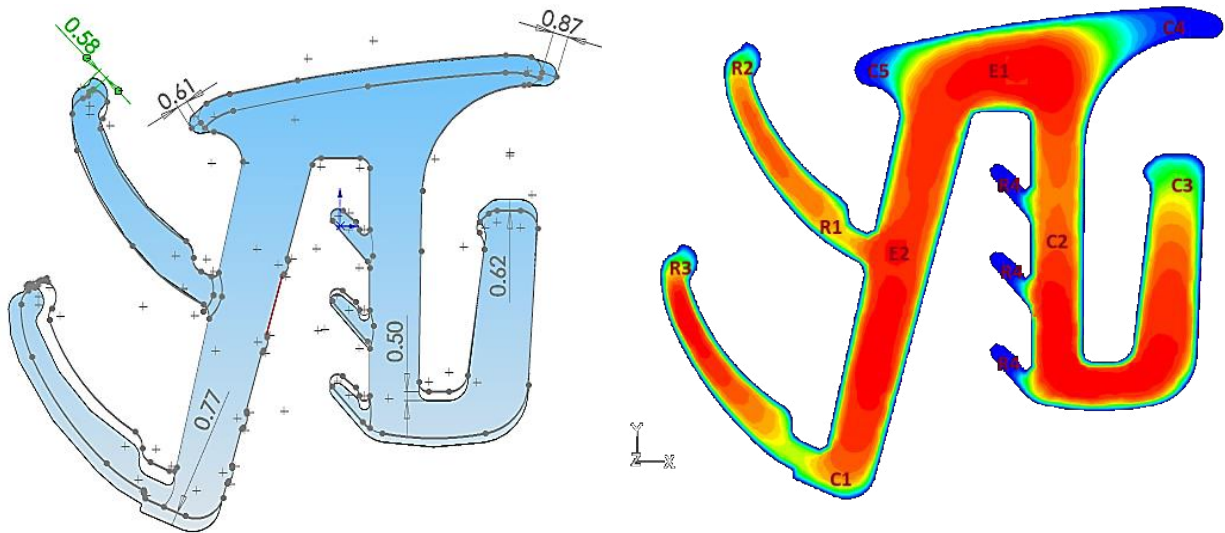
با منحنی طراحی مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد ابعاد سایر قسمت‌های منحنی تولید شده مناسب بوده و در محدوده مجاز است، ولی در ناحیه‌های C_4 و C_5 (نام‌گذاری مطابق شکل ۱۴ الف)) ابعاد منحنی تولید شده کوچک‌تر از حد مجاز بوده و لازم است ابعاد قطعه در قالب بزرگ‌تر در نظر گرفته شود، تا پس از کاهش طول منحنی تولید شده، در محدوده مجاز قرار گیرد. در شکل ۱۵ الف) توزیع سرعت در مقطع خروجی برای قالب اصلاح‌شده نهایی، نشان داده شده است. از مقایسه این توزیع سرعت با توزیع سرعت مشخص شده در شکل ۷، مشاهده می‌شود کاهش و عدم یکنواختی سرعت در یال‌ها (نقطه‌های R_2 و R_3) و انتهای پایه اصلی (C_1) و پایه فرعی منحنی (نقطه‌های C_2 و C_3) بطور کامل بر طرف شده است و انتظار می‌رود در نمونه تولیدی، این بخش‌ها ابعاد دقیقی داشته باشند. همچنین توزیع سرعت در نقطه‌های C_4 و C_5 که ترکیبی از آمیزه نرم و سخت می‌باشند، بهبود چشم‌گیری یافته است. هرچند مجاورت این ناحیه‌های باریک در کنار ناحیه‌های وسیع منحنی (E_1)، اصلاح آن را مشکل ساخته و رسیدن به یکنواختی کامل بسیار مشکل است.

پس از تولید مقطع نواری با ابعاد مورد نظر طراح، خواص مکانیکی و عملکردی آن اندازه‌گیری و بررسی شد. به دلیل شرایط پخت و ابعاد دقیق مقطع تولید شده با ابعاد مورد نظر طراح، مقطع تولید شده مورد تأیید و در خط تولید شرکت قرار گرفت. در

اختلاف موجود می‌تواند به دلیل صرف‌نظر کردن از اثرات لغزش جریان روی دیواره باشد.

در شکل ۱۴ توزیع سرعت در یکی از نمونه قالب‌های اصلاح‌شده (نه طرح نهایی) و تغییر ابعاد مقطع نوار تولید شده نسبت به نمونه طراحی (با استفاده از دستگاه سایه نگار) نشان داده شده است. ناحیه‌های بحرانی برای آمیزه سخت با C_i و برای آمیزه نرم با R_i نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در بحرانی‌ترین ناحیه‌های از آمیزه سخت، به دلیل کاهش سرعت در ناحیه‌های C_4 و C_5 ، منحنی تولید شده، به ترتیب، $0/187$ و $0/61$ میلی‌متر کوتاه‌تر از منحنی طراحی است. همچنین در پایه اصلی منحنی، به دلیل کاهش سرعت در انتهای پایه (C_1) که مجاور دیواره‌های جانبی بیش‌تری قرار داشته است، $77/0$ میلی‌متر و پایه بعدی منحنی به دلیل کمبود سرعت در نقطه C_2 ، $0/55$ میلی‌متر کوتاه‌تر از مقطع مورد نظر تولید شده‌اند. در آمیزه نرم، یال پایین، R_3 ، ابعاد مناسبی داشته ولی یال بالا (R_1 و R_2) $58/0$ میلی‌متر کاهش طول داشته است. هر چند این یال از نقطه تماس به پایه آمیزه سخت دقت و کیفیت خوبی داشته است. موژه‌های R_4 ، ناحیه‌های بسیار بحرانی در منحنی است که در منحنی تولید شده، با وجود توزیع سرعت نامناسب در شبیه‌سازی، ابعاد مورد قبولی دارند. این بخش از نوار لاستیکی در قالب اولیه اصلاً تولید نشده بود.

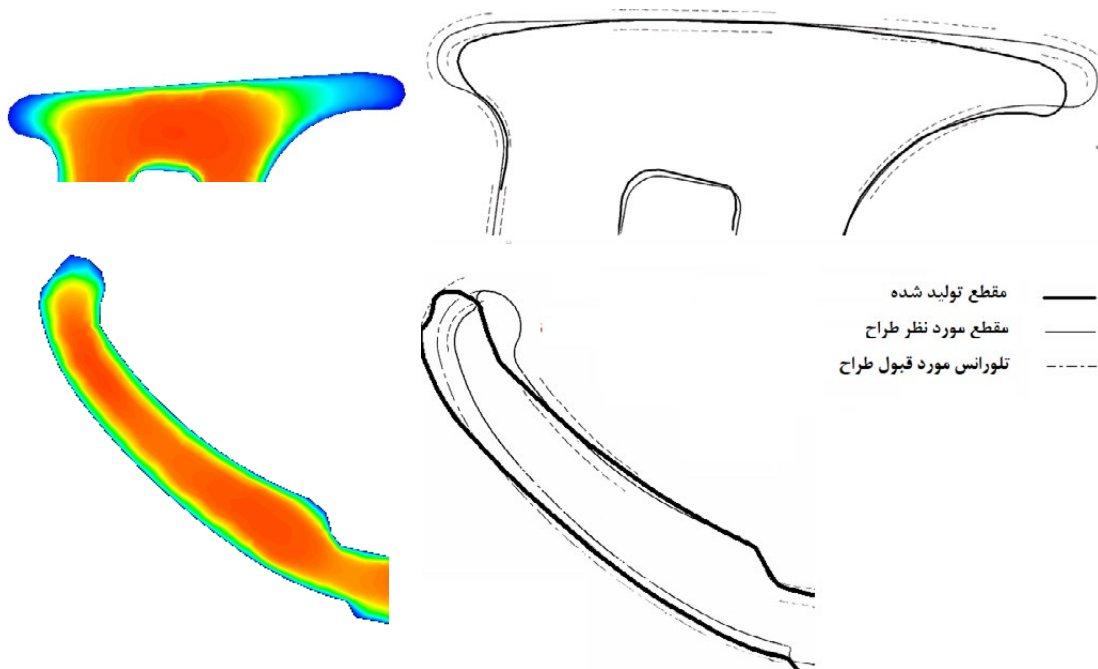
در شکل ۱۵ ابعاد مقطع در نقطه‌های بحرانی منحنی تولید شده



(ب) تغییر شکل‌های منحنی تولید شده به میلی‌متر

(الف) توزیع سرعت در خروجی قالب

شکل ۱۴- الف) توزیع سرعت در خروجی قالب، ب) تغییر شکل‌های منحنی تولید شده (به میلی‌متر) در یکی از آزمایش‌های انجام شده



شکل ۱۵- مقایسه ابعادی ناحیه‌های بحرانی مقطع تولید شده با تلورانس مجاز طراحی (راست) و توزیع سرعت در ناحیه‌های بحرانی قالب نهایی (چپ)

۶- جمع‌بندی

در این مقاله با شبیه‌سازی جریان دو آمیزه لاستیکی مختلف در فرآیند قالب اکستروژن با استفاده از مدل دو فازي مخلوط، هندسه بهینه‌ای بر مبنای حذف نقطه‌های سکون، کاهش طول مسیر جریان،

مجموع، با وجود زمان بالای محاسبات، روش شبیه‌سازی نسبت به روش سعی و خطا (روش مبتنی بر تجربه) ۶۵٪ زمان تولید اولین نمونه و ۸۰٪ میزان ضایعات نوار لاستیکی در مرحله تولید اولین نمونه را کاهش داد.

قوچان بابت حمایت مالی طرح با شماره گرنت ۷۹۰۳ تشکر و قدردانی می‌گردد.

مراجع

- [1] W.S. Lee, H.Y. Ho, Experimental study on extrudate swell and die geometry of profile extrusion, *Polymer Engineering & Science*, 40(5) (2000) 1085-1094.
- [2] Y. Mu, L. Hang, A. Chen, G. Zhao, D. Xu, Influence of die geometric structure on flow balance in complex hollow plastic profile extrusion, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91(1-4) (2017) 1275-1287.
- [3] Z. Tadmor, C.G. Gogos, Principles of polymer processing, John Wiley & Sons, 2013.
- [4] D. Rosato, Die design and performance, in: *Extruding Plastics*, Springer, 1998, pp. 228-282.
- [5] K. Koshelev, G. Pyshnograï, M.Y. Tolstykh, Modeling of the three-dimensional flow of polymer melt in a convergent channel of rectangular cross-section, *Fluid Dynamics*, 50(3) (2015) 315-321.
- [6] Y. Mu, G. Zhao, X. Wu, L. Hang, H. Chu, Continuous modeling and simulation of flow-swell-crystallization behaviors of viscoelastic polymer melts in the hollow profile extrusion process, *Applied Mathematical Modelling*, 39(3) (2015) 1352-1368.
- [7] J. del Coz Díaz, P.G. Nieto, J.O. Meré, A.B. García, Computer simulation of the laminar nozzle flow of a non-Newtonian fluid in a rubber extrusion process by the finite volume method and experimental comparison, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 353(8) (2007) 981-983.
- [8] J. del Coz Díaz, P.G. Nieto, A.B. García, J.G. Muñoz, J.O. Meré, Finite volume modeling of the non-isothermal flow of a non-Newtonian fluid in a rubber's extrusion die, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 354(47) (2008) 5334-5336.
- [9] Y. Ha, J. Cho, T. Kim, J. Kim, Finite element analysis of rubber extrusion forming process for automobile weather strip, *Journal of materials*

حذف جریان‌های آهسته یا به عبارتی ناحیه‌های با ویسکوزیته بالا (بدلیل وابستگی ویسکوزیته به نرخ برش)، حذف گوشه‌های تیز با گرد کردن محل خم‌ها، کاهش زمان جریان در قالب و از همه مهم‌تر حفظ توازن سرعت در خروجی قالب پرداخته شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد حذف گوشه‌های تیز سبب افزایش سرعت جریان در کانال‌ها و کاهش ویسکوزیته می‌گردد. در ناحیه‌های با سرعت پایین یا ناحیه‌های سکون، آمیزه لاستیکی می‌تواند به مرور زمان پخت شده و مانند یک جسم جامد مسیر جریان را عوض نماید. بر اساس نتایج بدست آمده می‌توان گفت:

۱- روش دو فازی نسبت حجمی سیال، مدل مناسبی برای تعیین مرز مواد نرم و سخت در جریان مواد پلیمری است.

۲- توازن سرعت در خروجی قالب، تغییرشکل‌های مقطع پس از خروج را به مقدار زیادی کاهش می‌دهد.

۳- افزایش قطر کانال‌های جریان در زیر صفحه شکل‌دهنده، می‌تواند راه‌کاری مناسب جهت افزایش سرعت در ناحیه‌های باریک منحنی باشد. در این روش افت فشار شدید جریان در ناحیه‌های باریک کاهش یافته و سبب افزایش دبی جرمی این ناحیه‌ها می‌گردد. البته، این روش می‌تواند هزینه و زمان ساخت را بطور چشم‌گیری افزایش دهد. بنابراین، باید هر دو نکته مد نظر طراح باشد و تا حد امکان با تنظیم قطر راه‌گاه‌ها در صفحه‌های زیرین، جریان را متوازن نماید.

۴- در ناحیه‌های باریک مجاور به یک ناحیه بزرگ و باز، امکان رسیدن به توازن سرعت بسیار مشکل بوده و بهتر است جهت رسیدن به دقت ابعادی مورد نظر، پس از آزمایش قالب طراحی شده و تولید نمونه قطعه، بر اساس کاهش طول این ناحیه‌ها در نمونه تولیدی، ابعاد در صفحه شکل‌دهنده قالب اصلاح گردد.

۵- با وجود پیچیدگی‌های زیاد مسأله شامل اندازه‌گیری خواص سیال، محاسبه ضرایب ویسکوزیته، مدل‌سازی و شبکه‌بندی هندسه و اعمال نمونه تولید شده، تطابق بسیار خوبی با نتایج تجربی نشان می‌دهد.

۶- ابعاد منحنی تولید شده و مرز مواد با توزیع سرعت و مرز مواد پیش‌بینی شده از نرم افزار تطابق بسیار خوبی نشان می‌دهد.

قدردانی

در نهایت از شرکت پویا گستر خراسان جهت همکاری در آزمایش و آزمایش نمونه‌های طراحی شده و همچنین از دانشگاه صنعتی

- parts based on a known melt pressure field, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90(5) (2017) 2363-2376.
- [10] R. Nakhoul, P. Laure, L. Silva, M. Vincent, A multiphase Eulerian approach for modelling the polymer injection into a textured mould, *International Journal of Material Forming*, (2016) 1-14.
- [17] S.M. Mukras, F.A. Al-Mufadi, Simulation of HDPE Mold Filling in the Injection Molding Process with Comparison to Experiments, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41(5) (2016) 1847-1856.
- [18] M. Rusdi, M. Abdullah, A. Mahmud, C. Khor, M. Abdul Aziz, Z. Ariff, Numerical Investigation on the Effect of Pressure and Temperature on the Melt Filling During Injection Molding Process, *Arabian Journal for Science & Engineering (Springer Science & Business Media BV)*, 41(5) (2016).
- [19] G. Maschinenbau, Gerlach Manufactures Vulcanization Equipment, in: 333, 2018.
- [20] J.S. Dick, C. Harmon, A. Vare, Quality assurance of natural rubber using the rubber process analyzer, *Polymer Testing*, 18(5) (1999) 327-362.
- [21] ANSYS FLUENT Theory Guide, 2011.
- processing technology, 201(1) (2008) 168-173.
- [10] Y. Mu, G. Zhao, Numerical study of nonisothermal polymer extrusion flow with a differential viscoelastic model, *Polymer Engineering & Science*, 48(2) (2008) 316-328.
- [11] Y. Mu, G. Zhao, A. Chen, X. Wu, Modeling and simulation of polymer melts flow in the extrusion process of plastic profile with metal insert, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(1) (2013) 629-646.
- [12] N. Gonçalves, O. Carneiro, J. Nóbrega, Design of complex profile extrusion dies through numerical modeling, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 200 (2013) 103-110.
- [13] K. Kovalenko, A. Kolosov, V. Sivetskii, A. Sokol'skii, Modeling Polymer Melt Flow at the Outlet from an Extruder Molding Tool, *Chemical and Petroleum Engineering*, 49(11) (2014) 792-797.
- [14] O. Yilmaz, E. Kısasöz, F.S. Guner, C. Nart, K. Kirkkopru, A comprehensive 3D analysis of polymer flow through a conical spiral extrusion die, *Fibers and Polymers*, 15(1) (2014) 84-90.
- [15] K. Krebelj, N. Mole, B. Štok, Three-dimensional modeling of the stress evolution in injection molded

