بالانس جریان در یک قالب اکستروژن برای تولید محصول با مقطع U شکل

عباس ذوالفقاری [۱]، امیر حسین بهروش [۲]
Zolfaghari217@gmail.com

چکیده

مشخصه مهم قالب اکستروژن، متوازن ساختن (بالانس) جریان در خروجی می‌باشد. هرگونه نابالانسی موجب می‌شود تا محصول دچار اعوجاج گردد و باعث به جا گذاشتن تنش‌های پسماند شود. این تحقیق به بررسی روش طراحی یک قالب از نظر بالانسی برای تولید پروفیل U شکل با ضخامت‌های دیواره متفاوت می‌پردازد. استراتژی بکار رفته برای بالانس کردن استفاده از یک محدود کننده می‌باشد تا بطور موضعی جریان در قسمت ضخیم‌تر را محدود کند. با پارامتری نمودن برخی از اندازه‌های قالب و با استفاده از نرم‌افزار المان محدود FLUENT، ابعاد بهینه قالب بدست آمد. سپس این اندازه‌ها به عنوان ابعاد نهایی برای ساخت قالب در نظر گرفته شد و در ساخت قالب، مکانیزمی برای تغییر ارتفاع محدود کننده در هنگام فرآیند اکستروژن نیز در نظر گرفته شد تا بالانس دقیق‌تری در هنگام فرآیند بدست آید. نتایج بدست آمده گویای مطابقت بین شبیه‌سازی‌ها و آزمایش‌های تجربی می‌باشد.

کلیدواژه:

اکستروژن- طراحی قالب- تابع هدف- بالانس جریان- محدودکننده

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه تربیت مدرس
۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه تربیت مدرس، Amirhb@modares.ac.ir

Archive of SID
www.SID.ir

۱- مقدمه

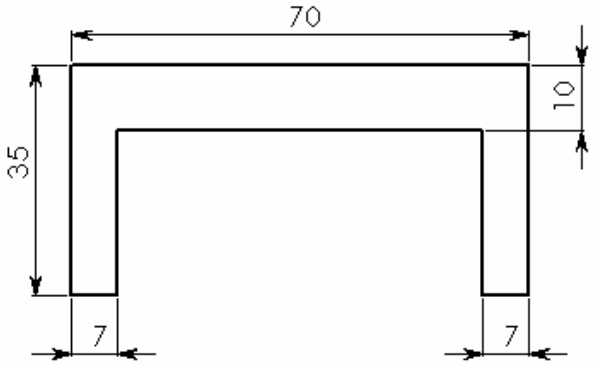
محصولات پلاستیکی به روش‌های مختلفی تولید می‌شوند که در این میان اکستروژن بیشترین سهم تولیدات را دارد (حدود ۳۶ درصد). در هر فرآیند اکستروژن، قالب و اکسترودر دو مشخصه مهم آن هستند. قالب، کانالی است که سطح مقطع خروجی اکسترودر را که اغلب بصورت قالبروی است به پروفیل مورد نظر تبدیل می‌کند. مساحت مقطع خروجی قالب ممکن است از مساحت خروجی اکسترودر کوچکتر یا بزرگتر باشد [۱]. مهمترین بحث در طراحی قالب، بالانس جریان و یا به عبارتی برابر بودن سرعت مواد در خروجی قالب می‌باشد. نابالانسی جریان موجب خواهد شد محصول اکسترود شده ناقص و درهم پیچیده شده و دارای اعوجاج گردد. این اعوجاج در محصول باعث ایجاد تنش پسماند در آن خواهد شد [۲و۳]. طراحی قالب بیش از اینکه بعنوان کار علمی محسوب شود، به کار هنری شبیه‌تر است. نحوه جریان یافتن مذاب، انتقال حرارت آن با محیط و سرعت اکستروژن در فرآیند، مسئله‌ای نیست که بتوان آن را به راحتی مدل نمود. در نتیجه استفاده از بسته‌های نرم‌افزاری تحلیل جریان، تنها راه برای کم کردن سعی و خطا در فرآیند طراحی قالب می‌باشد [۴]. به جز در مورد قالب‌های با مقاطع قالبروی، نمی‌توان انتظار داشت تا هندسه‌ای داشته باشیم که برای پلیمرهای مختلف و تحت شرایط کاری مختلف، مناسب باشد [۵]. طراحی قالب چه با استفاده از تجربه طراح و چه با استفاده از نرم‌افزارهای المان محدود، فرآیندی تکرارپذیر است و گاهاً نیاز به چندین بار اصلاح قالب دارد [۶]. در این مقاله یک طراحی نوین برای قالب پروفیل بصورت علمی-مهندسی و با دیدگاه کاربردی در صنعت پلاستیک نشان داده خواهد شد.

۲- طرح مسئله

پروفیل نشان داده شده در شکل (۱) به عنوان پروفیل مطلوب برای تولید در نظر گرفته می‌شود. واضح است که در مقطع ضخیم‌تر این پروفیل، به دلیل مقاومت کمتر در برابر جریان سرعت مواد بیشتر خواهد بود. بعنوان یک اصل کلی در اکستروژن می‌بایست ضخامت کلیه دیواره‌های سطح مقطع یکسان باشد. اما در مواقعی بدلیل ملاحظات کاربردی تولید پروفیل‌هایی با ضخامت‌های متفاوت امری ضروری می‌باشد. بطور مثال قسمتی از قطعه تحت بار بیشتری قرار می‌گیرد و بایستی ضخیم‌تر باشد. افزایش ضخامت مقاطع دیگر از لحاظ اقتصادی ممکن است محدودیت ایجاد کند.

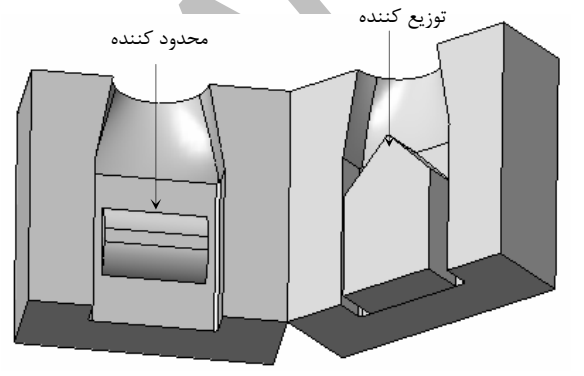
۳- طراحی و ساخت قالب

حتی الامکان قالب باید بصورت مدولار طراحی شود. بنابراین طرح پیشنهادی نشان داده شده در شکل (۲) ارائه شده است. قالب مزبور از ۴ قسمت: نیمه بالایی، نیمه پایینی، یک عضو داخلی که نقش توزیع کنندگی جریان را داشته (در این کار توزیع کننده نامیده



شکل (۱): پروفیل مورد نظر (ابعاد بر حسب میلیمتر)

می شود) و به نیمه پایین قالب پیچ می‌شود و همچنین قطعه دیگری به نام محدود کننده (choker) که نقش محدود کنندگی موضعی جریان در قسمت ضخیم‌تر را برعهده دارد و در نیمه بالایی قالب جای می‌گیرد، تشکیل شده است. ورودی قالب به شکل قالبره با قطر ۵۲ میلیمتر است که برابر با قطر خروجی اکسترودر می‌باشد. این قالبره با انحنایی به یک مستطیل با ابعاد ۷۰×۳۵ میلیمتر تبدیل می‌شود. این قسمت وظیفه انتقال مواد از سر اکسترودر را بر عهده دارد و ناحیه انتقالی (transition zone) نامیده می‌شود. به منظور طراحی بهینه، می‌بایست اندازه‌های قالب بصورت پارامتری تعریف شوند. با بدست آوردن بهینه این پارامترها کانالی بدست خواهد آمد که بهترین توزیع سرعت را در خروجی خواهد داد. تعیین پارامترهای مربوط به فرآیند بهینه‌سازی و انتخاب موثرترین پارامترها در فرآیند بهینه‌سازی بستگی زیادی به تجربه طراح دارد. در این قالب برخی از اندازه‌ها پارامتری در نظر گرفته شده‌اند. این پارامترها مربوط به دو عضو توزیع کننده و محدود کننده می‌باشد که در شکل(۳) نشان داده شده است.



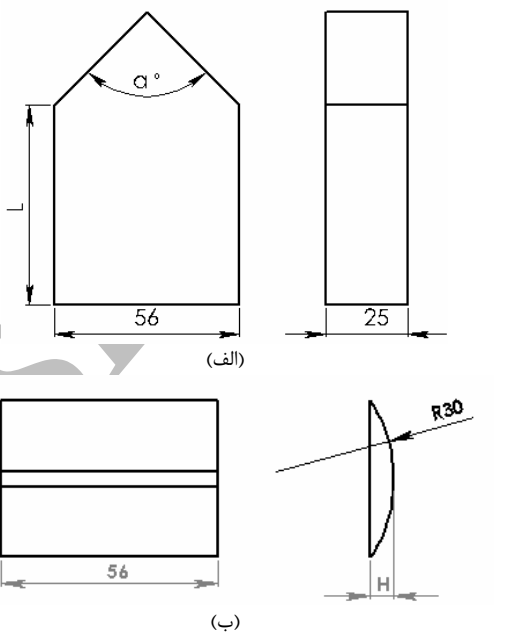
شکل (۲): دو نیمه قالب همراه با محدود کننده و توزیع کننده

ابعاد پارامتری بکار رفته هر کدام در ۳ سطح قابل تغییر هستند. جدول (۱) سطوح این پارامترها را نشان می‌دهد. با توجه به قانون

Archive of SID

www.SID.ir

ضرب تعداد ۲۷=۳×۳×۳ قالب مختلف خواهیم داشت که می‌بایست تحلیل جریان در آن صورت گیرد و بهینه‌ترین حالت انتخاب شود. طول ناحیه انتقالی ۵۰ و فاصله لبه محدود کننده تا انتهای ناحیه انتقالی ۲۰ میلیمتر به عنوان اندازه‌های ثابت در نظر گرفته شد.



شکل (۳): اندازه‌های ثابت و متغیر؛ الف) توزیع کننده، ب) محدود کننده

جدول (۱): پارامترها و مقادیر آنها

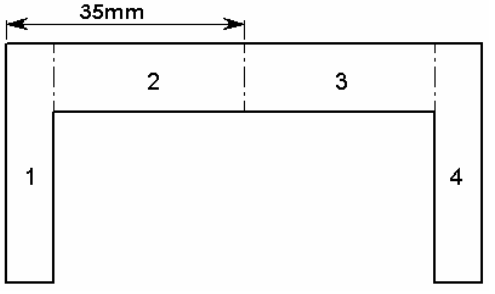
پارامتر	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
α (degree)	۴۵	۶۷٫۵	۹۰
L (mm)	۶۰	۸۰	۱۰۰
H (mm)	۲	۴	۶

طول ناحیه انتقالی ۵۰ و فاصله لبه محدود کننده تا انتهای ناحیه انتقالی ۲۰ میلیمتر به عنوان اندازه‌های ثابت در نظر گرفته شد. برای مقایسه این مدل‌ها با یکدیگر می‌بایست سرعت در خروجی قالب و در راستای اکستروژن در همه نقاط را با یکدیگر مقایسه نمود. بدین منظور سطح مقطع خروجی قالب را به چند ناحیه تقسیم نموده و سرعت متوسط هر ناحیه را بدست آورده و سپس از تابع هدف نشان داده شده در رابطه (۱) مقدار بالانس بودن بصورت کمی محاسبه خواهد شد:

$$\phi = \frac{\sum_{i=1}^{p}\left(v_i - v_{average}\right)^2}{p\left(p-1\right)v^2{}_{average}} \qquad (۱)$$

p تعداد نواحی تقسیم‌بندی شده و $v_{average}$ سرعت متوسط کل مقطع و v_i سرعت ناحیه i ام در خروجی قالب می‌باشد. مقدار این تابع بین صفر الی یک می‌باشد. اگر سرعت همه نواحی با هم برابر باشد مقدار تابع صفر و بنابراین قالب صد در صد بالانس می‌باشد. از طرفی اگر تمام جریان تنها از یک مقطع خارج شود بعنوان بدترین حالت بالانس در نظر گرفته شده که در عبارت فوق مقدار منتجه برابر یک خواهد بود. با توجه به اینکه مقدار تابع هدف همیشه مثبت است، لذا مینیمم نمودن عبارت فوق، به معنی بدست آوردن حداکثر بالانس برای طرح مورد نظر و پارامترهای موجود می‌باشد [۷].

چهار ناحیه تقسیم‌بندی شده در خروجی از یک مدل در شکل (۴) نشان داده شده است. با توجه به صفحه تقارن موجود در پروفیل در تحلیل جریان فقط یک نیمه مدل تحلیل خواهد شد.



شکل (۴): تقسیم‌بندی‌های صورت گرفته برای بدست آوردن مقدار تابع هدف

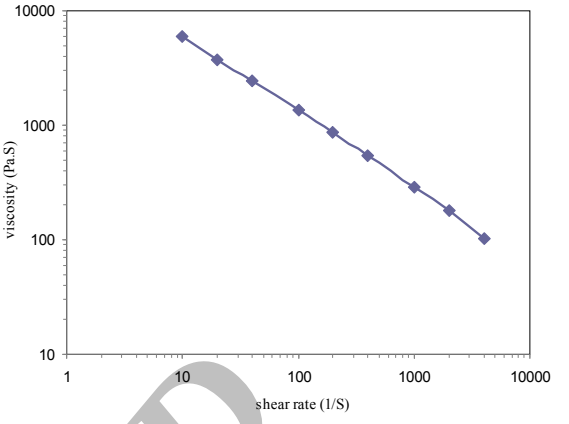
به دلیل پیچیده بودن جریان در چنین قالب‌هایی از نرم‌افزار المان محدود FLUENT برای تحلیل جریان استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که این نرم‌افزار از خواص الاستیکی پلاستیک‌ها صرف نظر کرده و فقط خواص ویسکوز مذاب را در نظر می‌گیرد. شرایط مرزی عبارتند از:

- ورودی: سرعت برابر ۱ mm/s معادل ۷٫۱۲ kg/hr و دمای مذاب ۱۷۰ درجه سانتیگراد
- خروجی: فشار برابر فشار اتمسفر
- دیواره‌ها: دارای شرط عدم لغزش

مشخصات تعریف شده در نرم‌افزار مربوط به مخلوطی از ۵۰ درصد پلی‌اتیلن سنگین از گرید اکستروژن (HDPE EX3) محصول شرکت پتروشیمی اراک و ۵۰ درصد پلی‌اتیلن سبک (LDPE 0200) محصول شرکت پتروشیمی امیرکبیر می‌باشد. مشخصات رئولوژیکی قابل استفاده در نرم افزار ویسکوزیته η می‌باشد که از رابطه $\eta = k\dot{\gamma}^{n-1}$ بدست می‌آید که در آن k و n مشخصات ماده و $\dot{\gamma}$ نرخ برشی می‌باشد. با استفاده از یک دستگاه کاپیلاری رئومتر نمودار ویسکوزیته-نرخ برشی بدست آمده که در شکل ۵ نشان داده شده است.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل (۵): نمودار ویسکوزیته بر حسب نرخ برشی

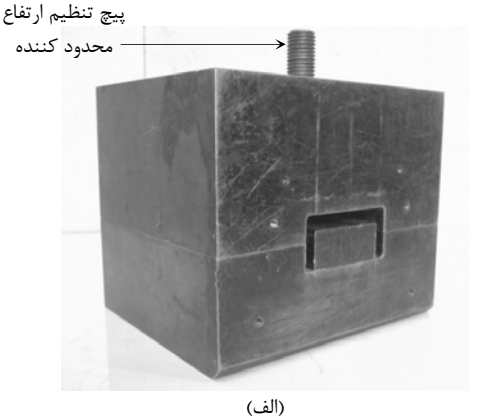
با استفاده از نمودار شکل (۵) ضرایب $k = 28632\,Pa.S^n$ و $n = 0.331$ حاصل شد.

با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته کمترین مقدار تابع هدف برابر ۰/۰۰۰۱۱۵۶ بدست آمد که مربوط به قالب با اندازه‌های داده شده در جدول ۲ می‌باشد. در ادامه به علت کوچک بودن ϕ از $\Psi = \phi \times 1000$ استفاده خواهد شد.

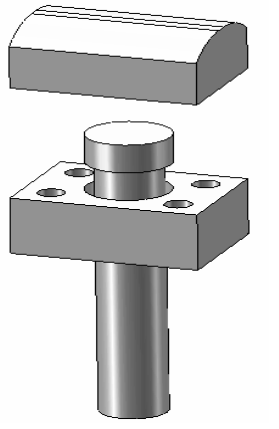
جدول (۲): ابعاد بهینه قالب بدست آمده

H (mm)	α (degree)	L (mm)	Ψ
۶	۹۰	۶۰	۰/۱۱۵۶

اما برای بالانس دقیق‌تر و قابل تنظیم در حین کار، محدود کننده طوری طراحی شده است که ارتفاع آن در حین اکستروژن قابل تغییر خواهد بود. محدوده این تغییر ارتفاع بین صفر الی ۱۰ میلیمتر قابل تغییر خواهد بود. شکل (۶) قالب ساخته شده و همچنین مکانیزم بالا و پایین رفتن محدود کننده در قالب را نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)

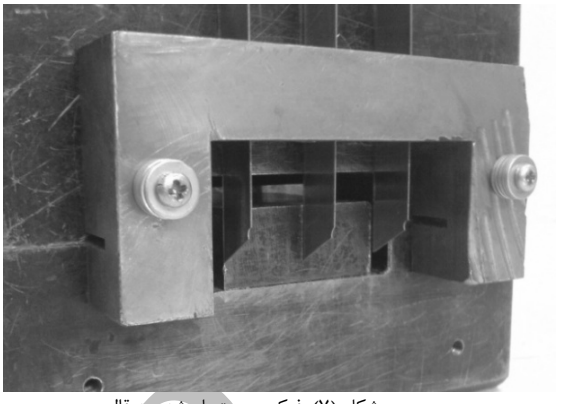
شکل (۶): الف) قالب ساخته شده، ب) مکانیزم تغییر ارتفاع محدود کننده

۴- روش آزمایش

آزمایش‌ها با استفاده از یک اکسترودر دو ماردونه (twin screw) و ناهمسوگرد (counter rotating)، با قطر ماردون ۶۲/۵ میلیمتر با نسبت طول به قطر ۲۲ انجام شده است. از همان ترکیبی که در قسمت طراحی دای و شبیه‌سازی آمده است، به عنوان ماده پلاستیک برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد. برای تعیین سرعت متوسط هر ناحیه می‌بایست مواد در خروجی به چند بخش مجزا تقسیم شود. بدین منظور فیکسچری طراحی شده که بتواند ۳ تیغه را برای برش محصول، در مکان‌های مشخصی جای دهد. شکل (۷) این فیکسچر را که به خروجی قالب متصل شده است نشان می‌دهد. محصول بعد از عبور از تیغه‌ها با دو دمنده هوا به منظور جلوگیری از چسبیدن دوباره مقاطع به یکدیگر خنک می‌شوند. دور ماردون با توجه به شبیه‌سازی‌ها ۱/۵ دور بر دقیقه تنظیم شد. دمای المنت‌ها نیز طوری تنظیم شده است که در سر اکسترودر دمای مواد ۵ ºC ± ۱۷۰ باشد. در بازه زمانی ۴ دقیقه، ۵ نمونه محصول برای هر ناحیه بدست آمد. این نمونه‌ها هر کدام مطابق با ناحیه برشی مربوطه شکل (۴) شماره‌گذاری شده و سپس با ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم توزین گردیده‌اند. سرعت متوسط هر ناحیه در خروجی با استفاده از رابطه $v_i = \frac{m_i}{\rho A_i t}$ که m_i میانگین جرم بدست آمده برای ۵ نمونه هر ناحیه در مدت زمان اندازه‌گیری t (۴ دقیقه)، A_i سطح مقطع ناحیه iام و ρ چگالی می‌باشند، محاسبه می‌شود. بعد از بدست آوردن سرعت متوسط هر ناحیه، مقدار تابع هدف بدست آمد. برای دست‌یابی به بهترین بالانس در حین اکستروژن (کمترین مقدار تابع هدف) ارتفاع محدود کننده، H، تغییر یافت. تغییر بین دو ارتفاع محدود کننده ۱ میلیمتر می‌باشد.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل (۷): فیکسچر متصل شده به قالب

۵- نتایج و بحث

در جدول (۳) سرعت متوسط نواحی به همراه تابع هدف آن‌ها آمده است. همانطوری که مشخص است سرعت در نواحی متقارن کمی تفاوت دارد که ناشی از خطای موقعیت دهی محدود کننده می‌باشد. کمترین مقدار تابع هدف و بنابراین بهترین بالانس در ارتفاع ۷ میلیمتری بدست آمده است. شکل (۸) پروفیل بدست آمده در ارتفاع بهینه را نشان می‌دهد. برآمدگی‌ها تا حدودی به عدم وجود کالیبراتور (calibrator) و خنک کاری در دمای اتاق بر می‌گردد.

جدول (۳): سرعت متوسط (mm/s) نواحی به همراه تابع هدف

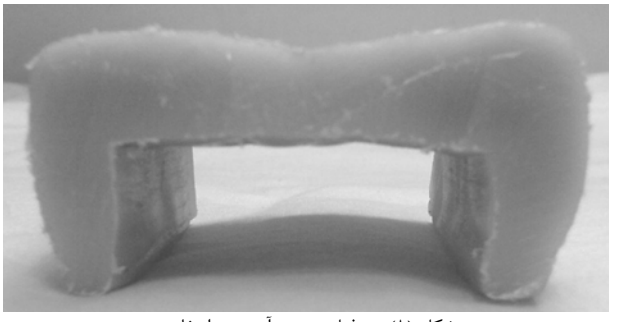
H (mm)	v_1	v_2	v_3	v_4	Ψ
۴	۰/۵۲۶۱	۰/۷۴۲۰	۰/۷۳۴۷	۰/۵۲۰۹	۹/۶۷۰۷
۵	۰/۵۵۵۸	۰/۷۱۳۲	۰/۷۰۶۱	۰/۵۵۰۳	۵/۱۳۳۷
۶	۰/۵۹۵۵	۰/۶۹۵۸	۰/۶۸۸۹	۰/۵۸۹۵	۲/۰۲۲۱
۷	۰/۶۴۱۶	۰/۶۳۴۷	۰/۶۲۸۴	۰/۶۳۵۲	۰/۰۱۷۹
۸	۰/۶۸۷۱	۰/۶۰۵۳	۰/۵۹۹۳	۰/۶۸۰۳	۱/۳۴۵۳

برای مقایسه بین شبیه‌سازی و آزمایشات، ارتباط بین تابع هدف و ارتفاع محدود کننده با تابع درجه ۲ بیان شده است.

$$\Psi_{sim} = 0.2402H^2 - 3.2079H + 10.7164 \qquad (۲)$$

$$\psi_{\exp} = 1.1362H^2 - 15.7162H + 54.3559 \qquad (۳)$$

با مشتق‌گیری از روابط ۲ و ۳، اپتیموم ارتفاع محدود کننده و مینیموم مقدار این توابع هدف بدست خواهد آمد.



شکل (۸): پروفیل بدست آمده در ارتفاع بهینه

$$\frac{d\Psi_{sim}}{dH} = 0 \Rightarrow \left(H_{opt}\right)_{sim} = 6.678mm,\ \left(\psi_{opt}\right)_{sim} = 0.0059 \qquad (۴)$$

$$\frac{d\Psi_{\exp}}{dH} = 0 \Rightarrow \left(H_{opt}\right)_{\exp} = 6.916mm,\ \left(\psi_{opt}\right)_{\exp} = 0.0083 \qquad (۵)$$

با مقایسه روابط (۴) و (۵) مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از آزمایشات تجربی با شبیه‌سازی‌ها تقریباً مشابه با هم بدست آمد.

۶- نتیجه‌گیری

نتایج بدست آمده گویای این نکته است که بکارگیری صحیح نرم‌افزارهای المان محدود همراه با یک فرآیند بهینه‌سازی، موجب کاهش قابل توجه عمل سعی و خطا در طراحی قالب می‌گردد. تعیین ابعاد حساس در بهینه‌سازی، خود به تجربه طراح بستگی دارد. همچنین بعنوان یک اصل کلی حتی الامکان می‌بایست کانال داخلی قالب قابل تغییر باشد تا بتوان به بالانس دقیق‌تری در هنگام فرآیند دست یافت که در این پژوهش به وضوح این موارد نشان داده شد. همچنین از نقطه نظر صنعتی با توجه به پروفیل بدست آمده، کارایی قالب در حد مطلوب می‌باشد.

۷- مراجع

[1] Kostic, M. and Reifschneider,L., "Design of Extrusion Dies", Encyclopedia of Chemical Processing DOI: 10.1081/E-ECHP-120039324, 2006.

[2] Nobrega, M. J., Carneiro, S. O., Oliviera, J. P. and Pinho, T. F., "Flow Balance Optimization of Profile Extrusion Dies", 18th Annual conf. of the Polymer Processing Society, PPS-18, Guimaraes, Portugal, 2002.

[3] Soury, E., Behravesh, A. H., Ghasemi, H. and Zolfaghari, A., "Design and Manufacture of an Extrusion Die for Wood-Plastic Composite", journal of Reinforced Plastic And Composites, doi:10.1177/0731684408089507.

[4] Michaeli, W., "Extrusion Dies for Plastics and Rubber", Hanser Publication. 1992.

[5] Rauwendaal, CH., "Polymer Extrusion", Fourth Edition, Hanser Publication, 2001.

Archive of SID

www.SID.ir

[6] Hossam. Landon, Mark.,M., "Die Balancing: Coupling Flow Simulation, Shape Deformation, & Optimization". ANTEC. 835-839, 2006.

[۷] فرج پور، م.، بهروش، م. ح.، "طراحی قالب اکستروژن پلاستیک به کمک رایانه: توازن سرعت‌های خروجی"، ششمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران، تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۲.

Archive of SID

www.SID.ir