نشریه صنعت لاستیک ایران
سال۲۶/شماره۱۰۳/پاییز۱۴۰۰

علمی- فنی

شبیه‌سازی فرایند تزریق ترموپلاستیک‌الاستومر پلی‌پروپیلن/استایرن-بوتادین رابر+لاستیک طبیعی (PP+SBR/NR)

Simulation of injection process of polypropylene + styrene-butadiene rubber /natural rubber (PP + SBR / NR) thermoplastic elastomer

چکیده:

ترموپلاستیک الاستومرها (TPEs)، ترکیبی از فرایندپذیری خوب پلاستیک‌ها و خواص مکانیکی الاستومرها را که برای طراحان قطعات مهم هستند، به ارمغان می آورند. این مواد به ویژه در صنعت خودرو برای ساخت انواع قطعات از جمله سپرهای مستحکم استفاده می‌شوند. فرایند تزریق از رایج‌ترین روش‌های ساخت این دسته از پلیمرها بوده که امکان تولید انبوه و صنعتی را فراهم می‌سازد. در این پژوهش، فرایند تزریق سپر ترموپلاستیک‌الاستومری از جنس پلی‌پروپیلن/استایرن-بوتادین رابر+لاستیک طبیعی (PP+SBR/NR) به کمک نرم‌افزار Autodesk Moldflow شبیه‌سازي شد و مکان مناسب درگاه تزریق، شرایط فرایندي بهینه و عیوب احتمالي تزریق مورد بحث و بررسي قرار گرفتند. زمان پرشدن قالب تزریق، فشار تزریق، دمای مذاب و قالب، زمان خنک‌کاری، اعوجاج و شرینکیج از جمله پارامترهایی هستند که در این مطالعه مورد تجزیه و تحلیل واقع شده‌اند. همچنین موقعیت‌های احتمالی حبس هوا و خطوط جوش به عنوان رایج‌ترین عیوب احتمالی تزریق معین شدند.

واژه‌های کلیدی: ترموپلاستیک‌الاستومر، تزریق، سپر، Moldflow

نوع مقاله: پژوهشی

علیرضا بهزادی[۱و*]، امیرحسین یزدان‌بخش[۲]

۱- کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، واحد پژوهش شرکت مهندسی و تحقیقات صنایع لاستیک، تهران، ایران

۲- دانشجوی دکترا، گروه مهندسی پلیمر ، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

ایمیل نویسندگان و عهده‌دار مکاتبات:

1- *alirezabehzadi@ut.ac.ir
2- a.yazdanbakhsh@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۲۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۰

مقدمه

ترموپلاستیک‌الاستومرها که از آن‌ها به عنوان لاستیک‌های گرمانرم نیز یاد می‌شود، ترکیبی از پلاستیک‌ها و لاستیک‌ها هستند و دارای هر دو خواص مواد پلاستیک و لاستیک هستند. به بیان ساده‌تر با ترکیب الاستومرها و پلاستیک‌ها با روش‌های مخصوص به خود، موادی حاصل می‌شود که دارای بعضی از مزیت‌های هر دو ماده بوده و از آن با نام ترموپلاستیک‌الاستومر یاد می‌شود. با این وجود، تفاوت مواد ترموپلاستیک‌الاستومر(گرمانرم) و ترموست‌الاستومر (گرماسخت)ها که هر کدام شامل گستره وسیعی از مواد می شوند، در پیوندهایی است که میان زنجیرهای پلیمری آن‌ها برقرار است. این پیوندها با نام پیوند عرضی[1] شناخته می‌شوند. در مواد ترموست پیوندها شیمیایی بوده که زنجیرها را بصورت استوار و محکم کنار یکدیگر نگه می‌دارند اما در مواد گرمانرم پیوندها فیزیکی و بصورت گره‌خوردگی[2] هستند که توانایی جابجایی در آن‌ها وجود دارد [۱, ۲].

الاستومرها موادی هستند که با گرما نرم نمی‌شوند؛ اما زمانی که صحبت از مواد ترموپلاستیک الاستومر می‌شود، شرایط و خواص متفاوتی وجود دارد و کمی از خواص پلاستیک‌ها در مواد ترموپلاستیک‌الاستومر مشاهده می‌شود. یکی از این خواص، نرم شدن بر اثر حرارت و گرما است، که سبب تسهیل فرایندپذیری شده و لذا ترموپلاستیک‌الاستومرها می‌توانند حتی با روش تزریق، شکل‌دهی شوند. در واقع مزایای هر دو ماده پلاستیک و لاستیک در ماده ای به نام ترموپلاستیک‌الاستومر وجود دارد. به جز خاصیت گرماپذیری که در بالا اشاره شد. از دیگر ویژگی‌ها می‌توان توانایی این ماده در مقابل تغییرشکل را نام برد، ترموپلاستیک‌الاستومرها می‌توانند در برابر نیرو یا تنشی که به آن‌ها وارد می‌شود(مثلا به صورت کششی) تغییرشکل دهند(افزایش طول داشته باشند) و مجدد به حالت قبل خود بازگردند، این ویژگی از توانایی کشسانی بودن این مواد نشات می‌گیرد. ترموپلاستیک‌الاستومرها گستره وسیعی از مواد را شامل می شوند چرا که هر کدام از پلاستیک‌ها و الاستومرها می‌توانند در دسته جدیدی از ترموپلاستیک‌الاستومرها قرار بگیرند[۳].

دو روش معمول فرایندکردن ترموپلاستیک‌الاستومرها، فرایند قالبگیری تزریقی و فرایند اکستروژن است. فرایند قالب‌گیری تزریقی بدین صورت است که مواد در قیف اکسترودر ریخته شده و پس از اکسترود شدن، مواد به انتهای اکسترودر می‌رسند. در انتهای اکسترودر نازل و قالب قرار دارد و مواد ذوب‌شده با فشار از سر نازل به داخل قالب تزریق می‌شوند. منظور از روش اکستروژن روشی است که معمولا برای محصولاتی که به طور پیوسته تولید می‌شوند، استفاده می‌شود. که از شرح آن در این مقاله صرف‌نظر شده است[۴].

وجود گستره کاربری وسیع در استفاده از مواد ترموپلاستیک‌الاستومر و انواع آن سبب شده بتوان از این مواد در صنایع مختلفی از جمله صنایع برق، لوازم خانگی، بسته‌بندی، خودرو و غیره استفاده کرد. در ارتباط با جزئیات کاربرد، می‌توان به موارد زیر اشاره نمود: صنعت زیره کفش و چرم، درزبندی، گردگیر، دستکش، چسب حرارتی، سپر خودرو، داشپورد، فیلم و کابل، اصلاح کننده قیر و آسفالت، درپوش‌ها، لوازم ورزشی، واشر، چکمه و غیره از کاربردهای ترموپلاستیک‌الاستومرها هستند[۵].

بیشتر ترموپلاستیک‌الاستومرها دو فازی هستند. شکل‌های شیمیایی فازها به قطبیت مولکول‌ها، حضور افزودنی‌ها و درجه شبکه‌ای‌شدن فاز الاستومری بستگی دارند. یکی از فازها یک ترموپلاستیک سخت و دیگری یک الاستومر نرم است. اتیلن پروپیلن دی ان مونومر (EPDM)، نیتریل بوتادین رابر (NBR)، استایرن بوتادین رابر (SBR) و لاستیک طبیعی (NR) کاربردیترین الاستومرهای به کار رفته در ساختار ترموپلاستیک‌الاستومرها هستند. ترموپلاستیک معمول استفاده‌شده در ساختار آلیاژهای الاستومری پلی‌پروپیلن (PP) است. PP دومین ترموپلاستیک پرمصرف از خانواده پلی اولفین هاست. در مقایسه با پلی‌اتیلن (PE) با چگالی کم و زیاد، PP دارای استحکام ضربه‌ای کمتر

1. cross-link 2. entanglement

ولی دمای کاربری بالاتر و استحکام کششی بیشتر است. PP یکی از پلیمرهای با کارایی متنوع است که در تولید تزریقی قطعات مختلف پلاستیکی صنعت خودرو کاربرد فراوانی دارد[۶].

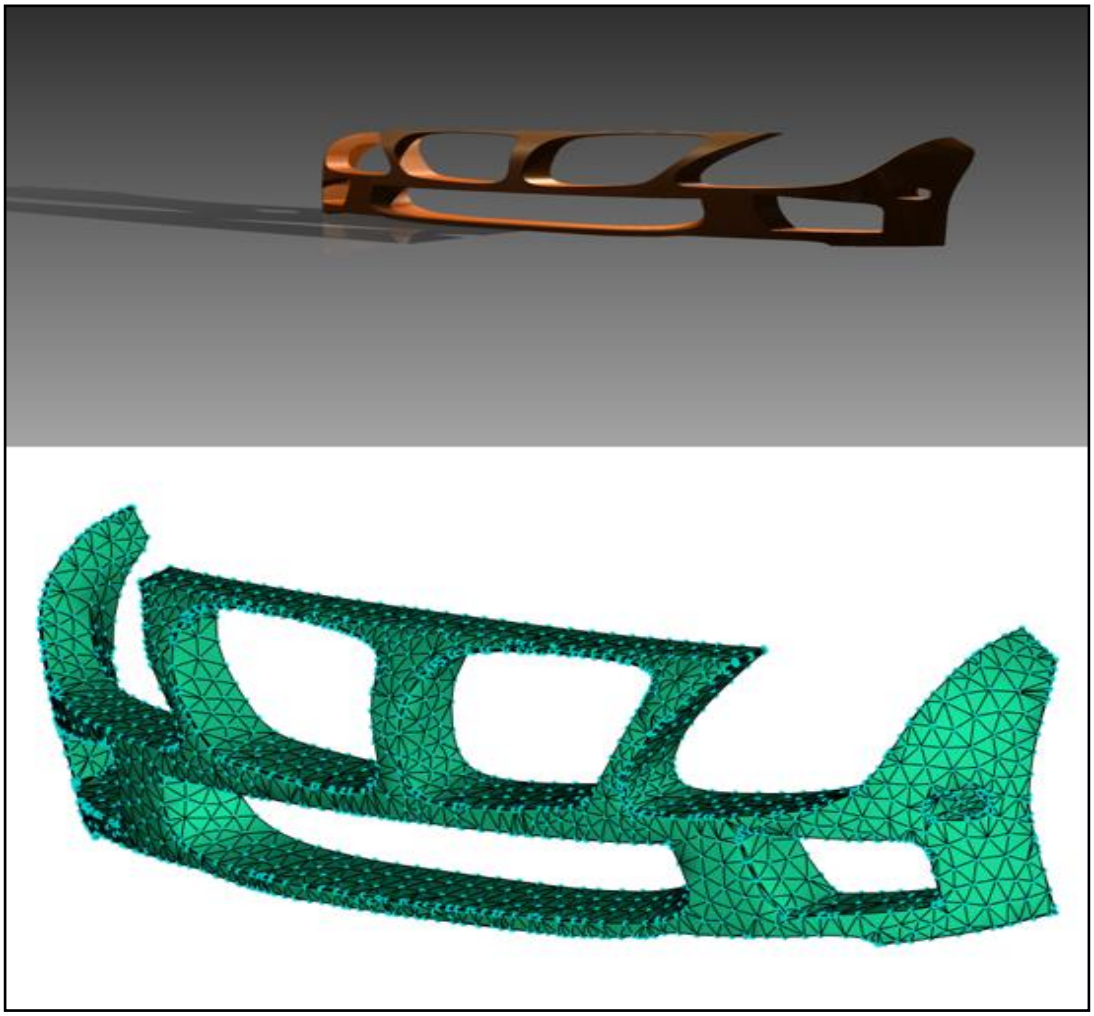
در این پژوهش، فرایند تزریق ترموپلاستیک‌الاستومر PP+SBR/NR به منظور تولید سپرهای مستحکم در صنعت خودرو شبیه‌سازی شده است.

روش شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی فرایند تزریق ترموپلاستیک الاستومر، از نرم افزار Autodesk Moldflow که شناخته‌شده‌ترین نرم‌افزار این حیطه است، استفاده شده است.

مش(شبکه)بندی

مش‌بندی با توجه به ابعاد قطعه مدنظر، (۱۳۴×۱۴۱×۶۴۵) میلی‌متر از نوع Dual domain و با مقدار Global edge length برابر ۱۳/۵ میلی‌متر انجام شد. تعداد ۵۲۲۸ مش مثلثی در نظر گرفته شد. مقدار بیشینه نسبت منظر[1] ۱۹، و درصد تطابق مش ۹۹٪ حاصل شد که این انجام مناسب مش‌بندی را تایید می‌کند. شکل ۱ طرح شبکه‌بندی‌شده قطعه را در محیط نرم‌افزار نمایش می‌دهد.



شکل۱- طرح مش‌بندی شده قطعه

1. Aspect Ratio

ماده تزریق

ترموپلاستیک‌الاستومر PP+SBR/NR، با نام تجاری Vitaprene 47080 به‌عنوان ماده تزریق از بانک مواد (دیتابیس) نرم افزار تعیین شد که مشخصات آن در جدول ۱ نمایش داده شده است.

جدول۱- مشخصات ترموپلاستیک الاستومر تزریقی

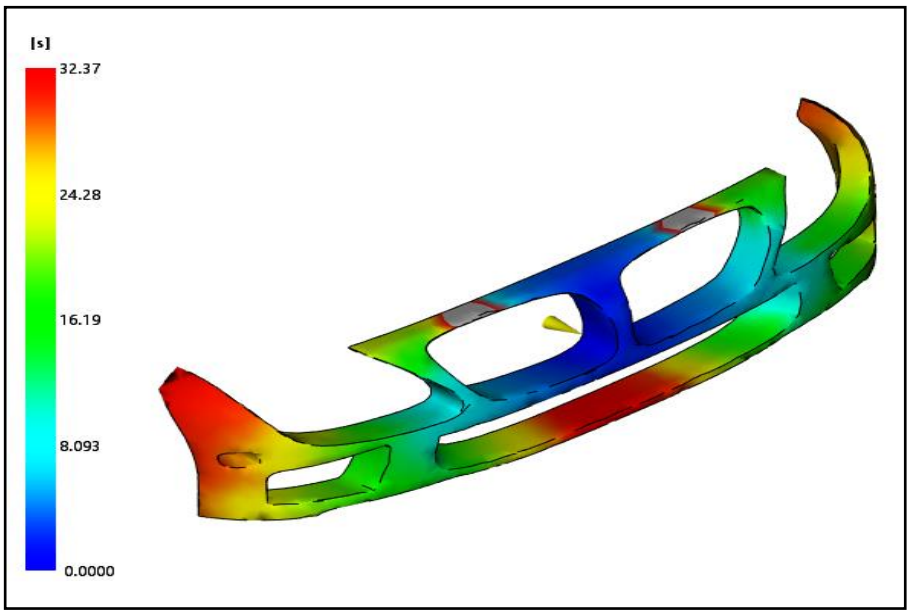
مشخصه	مقدار
مدول الاستیک (E_1)	۱۴۰۸/۶۱ MPa
نسبت پواسون (ϑ_{12})	۰/۳۸۹۷
مدول برشی (G_{12})	۵۰۶/۸۰۶ MPa
ظرفیت گرمایی ویژه در دمای اتاق	$۱۶۴۲\ J/gr.°c$
شاخص جریان مذاب (MFI) در دمای ۲۳۰ درجه سانتی گراد و بار ۱۰ کیلوگرم	$۲/۱۶\ g/10\ min$
دانسیته مذاب (g/cm^3)	۰/۹۳
پرکننده (درصد وزنی)	کلسیم کربنات(۸/۲)

آنالیزها

آنالیزهای Molding Window، Gate Location و Fill+Pack+Warpage+Shrinkage بر روی قطعه مش‌بندی شده انجام شد، که نتایج مشاهدات در زیر آورده شده است.

نتایج و بحث

محل تزریق، مکانی است که ماده پلاستیکی از آنجا تزریق می‌شود. از مهم‌ترین عوامل بهینه‌سازی عملیات قالب‌گیری، انتخاب بهینه محل تزریق است که سبب ایجاد جریان متعادل و متوازن می‌شود. مکان بهینه درگاه تزریق[1] و توزیع زمان پرشدن[2] قطعه در فرایند تزریق در شکل ۲ نشان داده شده است. به‌طور طبیعی نقاطی از قطعه که فاصله بیشتری تا درگاه تزریق دارند ،دیرتر پر می‌شوند. مطابق شکل، زمان پرشدن کامل قطعه (زمان تزریق[3]) ۳۲/۳۷ ثانیه است. در نرم افزار Autodesk Mold-flow، بهینه‌سازی مکان تزریق، براساس تحلیل المان‌محدود به شکلی انجام می‌شود که مکان پیشنهادی، متوازن‌ترین جریان ممکن که تمامی قسمت‌های قالب را پر می‌کند، ایجاد کند. در نواحی کوچک خاکستری‌رنگ، وقوع پدیده پرنشدن کامل قالب[4] محتمل است. هر عاملی که باعث افزایش مقاومت جریان مذاب



شکل ۲- توزیع زمان پرشدن قطعه در فرایند تزریق

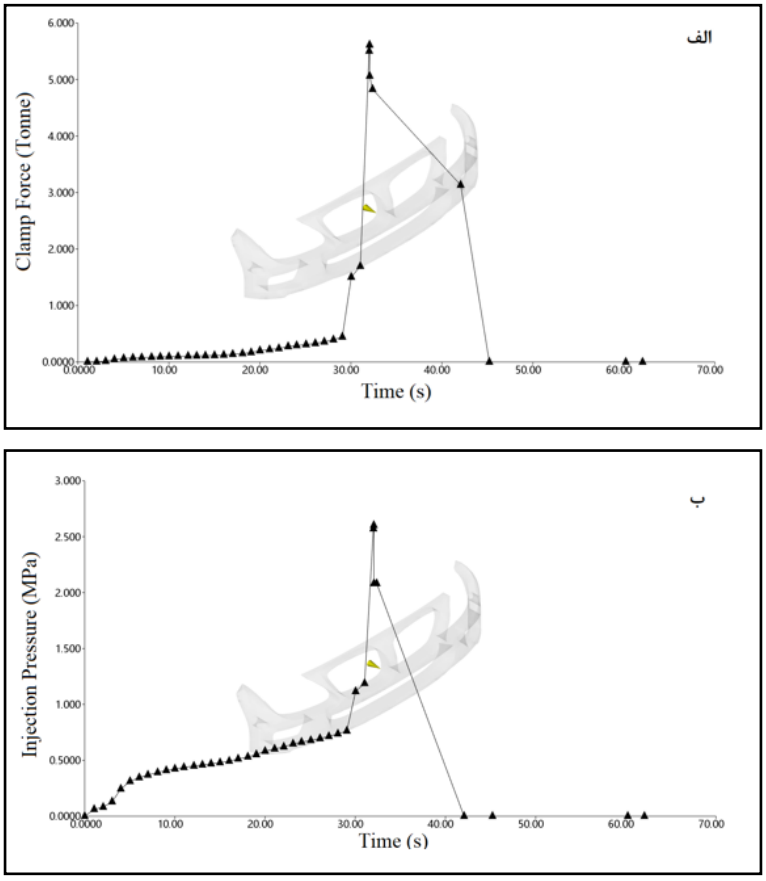
1. Injection Gate 2. Fill time 3. Injection time 4. Short shot

در قالب شده و مانع ورود مواد به مقدار کافی به داخل حفرات قالب شود، باعث به وجود آمدن این عیب می شود. افزایش دمای قالب یا دمای مذاب پلیمری، افزایش فشار تزریق و قرار دادن خروجی هوا در محل‌های مناسب از جمله راهکارهای به حداقل رساندن این پدیده در حین فرایند تزریق است. به کمک آنالیز Molding window، مناسب‌ترین شرایط فرایند تزریق مشخص شد که جدول ۲ نمایانگر آن است. این آنالیز، اثر شرایط مختلف تزریق بر روی فرایند تزریق پلاستیک را نشان می‌دهد و در آن شرایط مختلف تزریق یکی پس از دیگری امتحان شده تا با شبیه‌سازی کامپیوتری شرایط بهینه حاصل شود. این شرایط عبارت است از دمای قالب، دمای مذاب و زمان تزریق. بعد از تحلیل (بر مبنای المان محدود)، نرم‌افزار محدوده مناسبی برای زمان تزریق، دمای قالب و دمای مذاب پیشنهاد می‌دهد.

جدول۲- ملاحظات فرایندی تزریق

بیشینه نیروی گیره	5.613 tone
بیشینه فشار تزریق	2600 MPa
دمای بهینه قالب	50 °C
دمای بهینه مذاب	227.92 °C
زمان تزریق	32.37

روند تغییرات نیروی گیره[1] و فشار تزریق[2] در قالب، در نمودار شکل ۳ نشان داده شده است، که مطابق انتظار با شروع فرایند تزریق، افزایش یافته و پس از رسیدن به مقدار بیشینه در زمان تزریق، کاهش یافته و در نهایت به مقدار صفر می‌رسد که پیروی از این اصول پایه فرایند تزریق، اعتبار شبیه‌سازی انجام شده را تصدیق می‌کند.

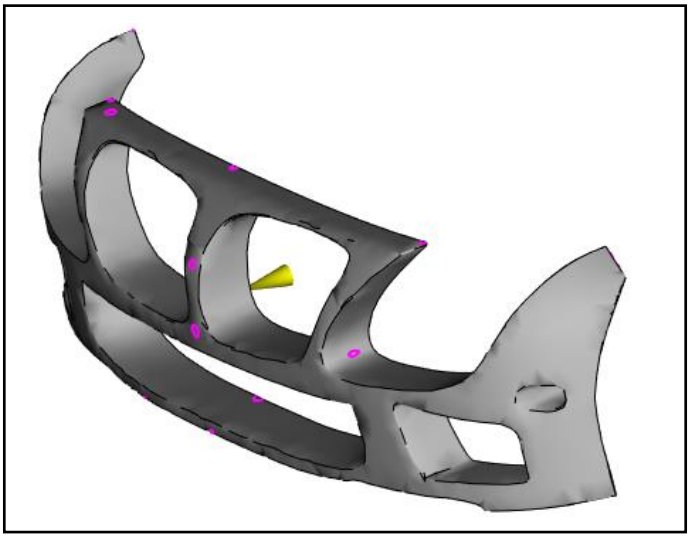


شکل۳ - الف) نمودار نیروی گیره بر حسب زمان تزریق ، ب) نمودار فشار تزریق بر حسب زمان تزریق

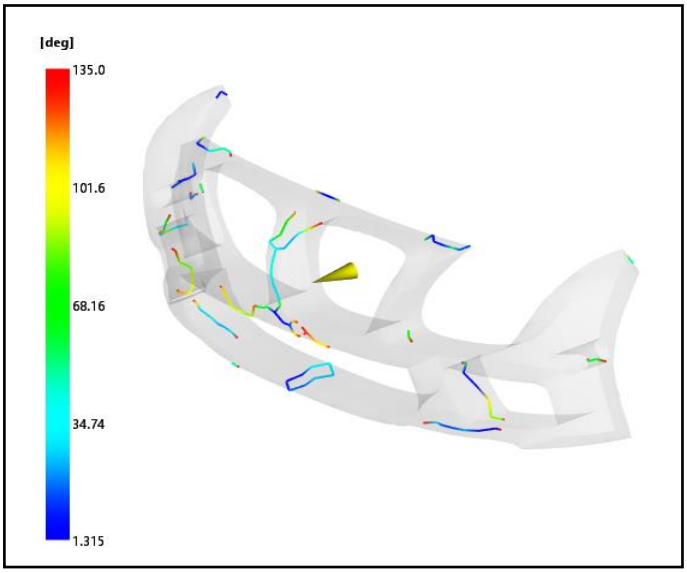
1. Clamp Force 2. Injection Pressure

پدیده حبس هوا[1] از عیوب احتمالی فرایند تزریق است. وقوع این پدیده در نمونه در اثر برخورد دو جریان مذاب با یکدیگر یا یک جریان مذاب و دیواره‌ی حفرات، در محلی که دیرتر از دیگر موقعیت‌ها پر می‌شود، محتمل است. بنابراین، در این قطعه احتمال مشاهده حبس هوا در لبه‌ها و کناره‌ها بیشتر است(شکل ۴) که باید تمهیدات لازم از قبیل قرار دادن منفذ تهویه (Vent) در این موقعیت‌ها، توسط اپراتور تزریق در نظر گرفته شود.

از دیگر عیوب متداول فرایند تزریق، تشکیل خطوط جوش[2] بر سطح قطعه است. این حالت هنگامی رخ می‌دهد که دو جریان مذاب در قالب تزریق از دو جهت مختلف به هم می‌رسند. می‌توان با افزایش دمای قالب یا مذاب و همچنین کاهش زمان تزریق این مشکل را کنترل کرد. شکل ۵ موقعیت‌های احتمالی تشکیل خطوط جوش بر سطح سپر ترموپلاستیک‌الاستومری را نمایش می‌دهد که همانند غالب عیوب تزریق، این موقعیت‌ها بیشتر در لبه‌ها و کناره‌های قطعه قرار دارند.



شکل ۴- موقعیت‌های احتمالی وقوع حبس هوا در فرایند تزریق قطعه

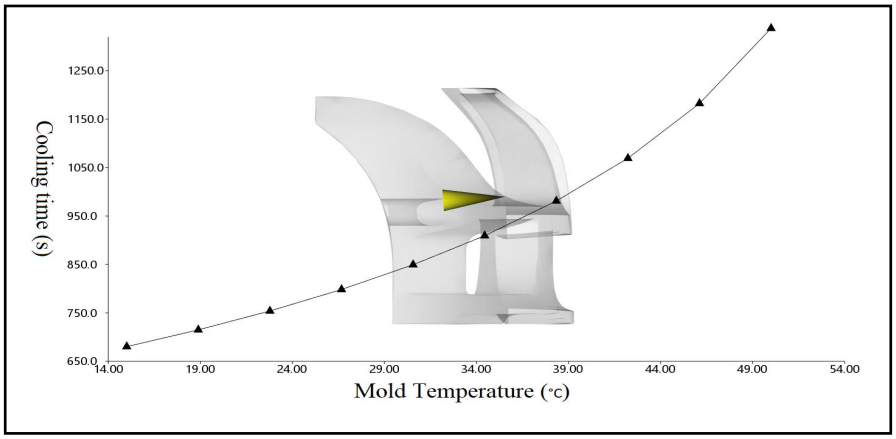


شکل ۵- موقعیت‌های احتمالی خطوط جوش در فرایند تزریق قطعه

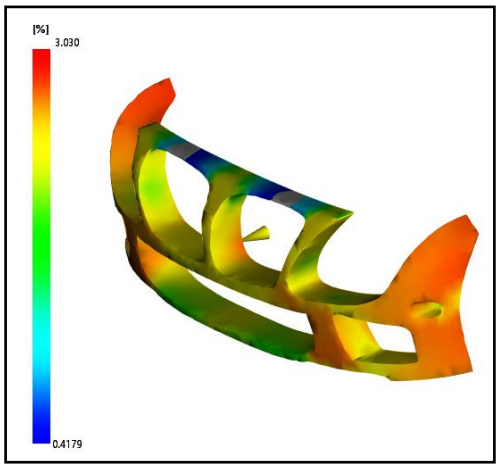
1. Air Trap 2. Weld Lines

یکی از مهم‌ترین پارامترها در تحلیل نتایج شبیه‌سازی یک فرآیند تزریق پارامتر زمان خنک‌کاری[1] است. این پارامتر بیانگر زمان ماندن قطعه از شروع پرشدن قالب تا زمان خروج است که در شکل ۶ نمودار آن برحسب دمای قالب نشان داده شده است. باید در نظر گرفت که کاهش این زمان برای کمک به بعد اقتصادی تولید قطعه مطلوب است. معمولا در فرآیند قالب‌گیری تزریقی در صورتی که در هندسه‌ی قطعه لایه‌های ضخیم وجود داشته باشد، انتقال حرارت برای این قسمت‌ها مشکل شده و زمان خنک‌کاری برای قطعه افزایش می‌یابد که برای کاهش آن طراحی دوباره قطعه و کاهش بهینه ضخامت پیشنهاد شده است. مطابق انتظار، زمان خنک‌کاری با افزایش دمای قالب افزایش می‌یابد که روند نمودار شکل ۶ نیز تاییدکننده این مهم است.

یکی از مهم‌ترین پارامترها در شبیه‌سازی فرایند تزریق، بحث شرینکیج[2] (جمع شدگی) است که ابعاد نهایی نمونه‌ها از آن تاثیر می‌پذیرد که توزیع آن در سپر در شکل ۷ نشان داده شده است. عوامل موثر بر میزان جمع‌شدگی یک نمونه را می‌توان در سه فاکتور خلاصه کرد: ماهیت ماده، هندسه قطعه و شرایط فرآیندی. مطابق شکل، بیشینه جمع شدگی سپر پس از فرایند تزریق، تنها حدود ۳ درصد خواهد بود که در کناره‌های آن مشاهده می‌شود. این مقدار با مقادیر ذکرشده مجاز در مقالات معتبر[۷] همخوانی دارد.



شکل ۶- نمودار زمان خنک‌کاری بر حسب دمای قالب



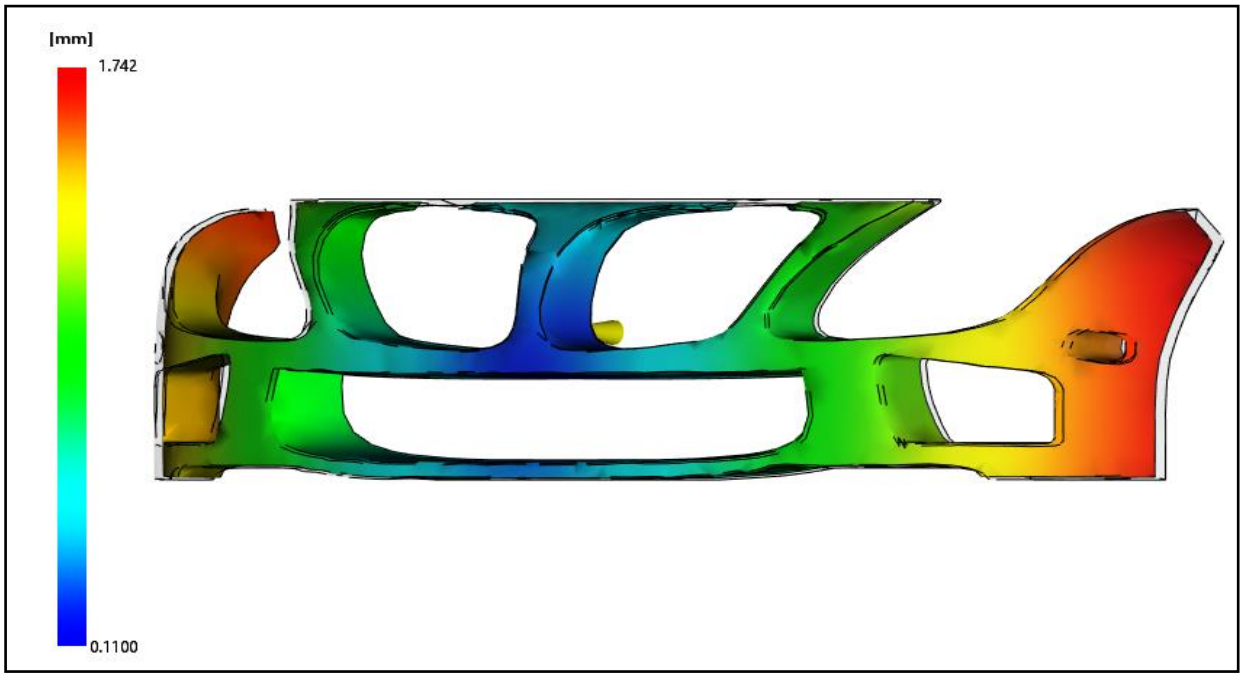
شکل ۷- توزیع جمع‌شدگی قطعه تزریقی

1. Cooling time 2. Shrinkage

اعوجاج[1] حاصل در قطعات تولید شده به روش قالب‌گیری تزریقی همواره مسئله‌ای مشکل‌ساز بوده است تا جایی که ممکن است عملکرد قطعه را تحت تاثیر قرار داده و آن را در هنگام استفاده با تخریب مواجه کند. عوامل موثر بر اعوجاج قطعات تزریقی شامل سرد شدن غیریکنواخت قسمت‌های مختلف قالب، انقباض غیریکنواخت قطعه، اثرات جهت‌گیری اجزای پلیمری، و اثرات گوشه‌ها هستند، که بسته به نوع قطعه اثر هر کدام نسبت به دیگر عوامل بیشتر یا کمتر خواهد بود. شکل ۸، توزیع اعوجاج را در سپر نمایش می‌دهد. به کمک آنالیز اعوجاج، میزان حداکثری تغییرفرم[2]، حدود ۱/۷ میلی‌متر حاصل شد که عمدتا در نواحی دور از درگاه تزریق (کناره‌ها) است.

سپاسگزاری

IRM ...



شکل ۸- توزیع اعوجاج قطعه تزریقی

مراجع

1. A. Fazli and D. Rodrigue, "Waste rubber recycling: A review on the evolution and properties of thermoplastic elastomers," Materials, vol. 13, no. 3, p. 782, 2020.
2. G. Holden, "Thermoplastic elastomers," in Rubber technology: Springer, 1987, pp. 465-481
3. S. Amin and M. Amin, "Thermoplastic elastomeric (TPE) materials and their use in outdoor electrical insulation," Rev. Adv. Mater. Sci, vol. 29, no. 2011, pp. 30-115, 2011.

1. Warpage 2. Deflection

4. Á. Kmetty, T. Bárány, and J. Karger-Kocsis, "Injection moulded all-polypropylene composites composed of polypropylene fibre and polypropylene based thermoplastic elastomer," Composites Science and Technology, vol. 73, pp. 72-80, 2012.
5. C. C. Ibeh, Thermoplastic materials: properties, manufacturing methods, and applications. CRC Press, 2011.
6. J. K. Mishra, J.-H. Ryou, G.-H. Kim, K.-J. Hwang, I. Kim, and C.-S. Ha, "Preparation and properties of a new thermoplastic vulcanizate (TPV)/organoclay nanocomposite using maleic anhydride functionalized polypropylene as a compatibilizer," Materials Letters, vol. 58, no. 27-28, pp. 3481-3485, 2004.
7. A. Kościuszko, D. Marciniak, and D. Sykutera, "Post-Processing Time Dependence of Shrinkage and Mechanical Properties of Injection-Molded Polypropylene," Materials, vol. 14, no. 1, p. 22, 2021.

Simulation of injection process of polypropylene + styrene-butadiene rubber /natural rubber (PP + SBR / NR) thermoplastic elastomer

A. Behzadi[1,*], A.H Yazdan-bakhsh[2]

1. Master, University of Tehran, Research Unit of Rubber Engineering and Research Company, Tehran, Iran
2. PhD Student, Department of Polymer Engineering, Faculty of Chemical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

*Corresponding author Email: alirezabehzadi@ut.ac.ir

Abstract: Thermoplastic elastomers (TPEs) bring a combination of good plasticity of plastics and mechanical properties of elastomers that are important to component designers. These materials are especially used in the automotive industry to make a variety of parts, including strong shields. The injection process is one of the most common methods of making these polymers, which allows mass and industrial production. In this study, the injection process of elastomeric thermoplastic shield made of polypropylene / styrene-butadiene rubber + natural rubber (PP + SBR / NR) was simulated using Autodesk Moldflow software and the appropriate injection port location, optimal process conditions and possible injection defects Were discussed. Injection mold filling time, injection pressure, melt and mold temperature, cooling time, warpage and shrinkage are among the parameters that have been analyzed in this study. Also, possible positions of air trapping and weld lines were identified as the most common possible injection defects.

Keywords: thermoplastic Elastomer, injection, Bumper, Moldflow