

Simulation of Injection Molding Process Including Mold Filling and Compound Curing

Mohamad Reza Erfanian*, Seyed Mohamad Javadi, and Mohamad Moghiman

Department of Mechanics, Ferdowsi University of Mashhad, P.O. Box: 91775-1111, Mashhad, Iran

Received 8 May 2011, accepted 5 October 2011

ABSTRACT

The present work reports and discusses the results of a 3D simulation of the injection molding process of a rubber compound that includes the mold filling stage and material curing, using the computer code is developed in “UDF” part of the Fluent 6.3 CAE software. The data obtained from a rheometer (MDR 2000) is used to characterize the rubber material in order to find the cure model parameters which exist in curing model. Because of non-newtonian behavior of rubber, in this work the non-newtonian model for viscosity was used and viscosity parameters were computed by mean of viscometry test by RPA. After calculation of the physical and curing properties, vulcanization process was simulated for a complex rubber article with non-uniform thickness by solving the continuity, momentum, energy and curing process equations. Predicted filling and curing time in a complex and 3D rubber part is compared with experimentally measured data which confirmed the accuracy and applicability of the method.

Key Words:

Simulation,
curing process,
injection molding,
non-newtonian fluid,
curing time

(*To whom correspondence should be addressed.
E-mail: mohammad.erfanian09@gmail.com

شبیه‌سازی فرایند قالب‌گیری تزریقی شامل مراحل پرشدن قالب و پخت آمیزه

محمد رضا عرفانیان*، سید محمد جوادی، محمد مقیمان

مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مکانیک، صندوق پستی ۱۱۱۱-۹۱۷۷۵

دریافت: ۹۰/۲/۱۸، پذیرش: ۹۰/۷/۱۳

چکیده

در این مقاله، مطالعه عددی فرایند ولکانش در تولید قطعات لاستیکی انجام شده است که به شیوه قالب‌گیری تزریقی ساخته می‌شوند. به منظور یافتن خواص سینتیکی پخت آمیزه لاستیک از برآزش غیرخطی داده‌های ریومتری استفاده شده است. معادلات سینتیک پخت در یک برنامه کمکی در قالب (user defined function) UDF به زبان C نوشته شده و فرایند پخت در یک قطعه سه بعدی پیچیده، به کمک نرم‌افزار Fluent شبیه‌سازی رایانه‌ای شده است. به دلیل رفتار غیرنیوتنی سیالات پلیمری، از مدل گرانیروی غیرنیوتنی و توانی برای محاسبه تنش برشی استفاده شده است که ضرایب آن نیز با برآزش غیرخطی از داده‌های آزمایش گرانیروی به وسیله دستگاه RPA محاسبه شده است. پس از محاسبه خواص فیزیکی و سینتیک پخت آمیزه، فرایند قالب‌گیری تزریقی برای یک قطعه لاستیکی کاربردی (ضربه‌گیر خودروی سمند) با هندسه پیچیده و ضخامت نایکناخت شبیه‌سازی شده است. زمان پرشدن قالب حاصل از حل عددی تطابق خوبی با نتایج تجربی نشان داد. زمان رسیدن به پخت بهینه که مهم‌ترین پارامتر فرایند ولکانش است، با حل عددی معادلات بقای جرم، اندازه حرکت، انرژی و سینتیک پخت محاسبه شد. زمان پخت عددی، سازگاری بسیار خوبی با زمان پخت حاصل از نتایج تجربی ارایه کرد. تطابق نتایج عددی و تجربی، دقت زیاد مدل انتخاب شده برای پخت و گرانیروی را تأیید می‌کند.

واژه‌های کلیدی

شبیه‌سازی،
فرایند پخت،
قالب‌گیری تزریقی،
سیال غیرنیوتنی،
زمان پخت

مقدمه

لاستیک‌ها به دلیل خواص منحصر به فرد، کاربرد فراوانی در صنعت یافته‌اند. آنها برخلاف بیشتر مواد مهندسی، با وجود داشتن خواص تغییر شکل مناسب از خواص استحکامی زیادی برخوردارند. لاستیک‌ها تراکم‌ناپذیرند و مدول حجمی آنها هزار بار بزرگ‌تر از مدول یانگ است. افزون بر این، آنها نسبت به نفوذ مایعات و گازها مقاومت نشان می‌دهند. تمام این ویژگی‌ها ارزش‌های قابل توجهی برای استفاده از لاستیک‌ها در صنایع خودروسازی به شمار می‌آید [۱].

فرایند قالب‌گیری تزریقی الاستومرها به منظور تولید انبوه، یکی از مهم‌ترین فرایندهای ساخت است [۲]. امروزه این فرایند پرکاربردترین شیوه تولید قطعات لاستیکی است. در قالب‌گیری تزریقی گرما به لاستیک داده می‌شود تا بتواند درون حفره‌های قالب جاری شود. سپس، این ماده به درون یک قالب داغ بسته با فشار تزریق می‌شود تا همه حفره قالب را پر کرده و شکل مورد نظر را به خود گیرد. پس از طی زمان مشخص و دست‌یابی به پخت بهینه، قطعه از قالب خارج می‌شود [۳]. از آن‌جا که گرمایش ناقص یا بیش از حد لاستیک سبب کاهش خواص مکانیکی آن می‌شود، بنابراین یافتن زمان پخت بهینه در قطعات لاستیکی با ترکیبات متفاوت اهمیت فراوانی دارد [۴].

در حال حاضر، نحوه دست‌یابی به زمان پخت بهینه مبتنی بر تجربه و روش پرهزینه سعی و خطاست [۳]. آزمایش‌های مختلف در زمان‌های مختلف از شروع قالب‌گیری انجام می‌شود تا زمان پخت قطعه لاستیکی مشخص شود. بنابراین، استفاده از شبیه‌سازی رایانه‌ای به منظور یافتن زمان دست‌یابی به پخت بهینه بسیار مناسب است.

در سال‌های اخیر، مطالعه فرایند وولکانش موضوع مورد علاقه پژوهشگران بسیاری بوده است. در اکثر پژوهش‌های انجام شده، فرایند وولکانش در قطعات لاستیکی بررسی شده است که به شیوه قالب‌گیری فشاری تولید شده‌اند. در حالی که امروزه تقریباً تمام قطعات پیچیده خودرو به روش قالب‌گیری تزریقی تولید می‌شوند [۲].

قریشی و نادری در سال ۲۰۰۵ فرایند پخت در یک نمونه را با مدل سینتیک پخت کمال - سرور [۵] بررسی کردند. این مدل نتایج بسیار مناسبی را در مقایسه با نتایج تجربی ارائه می‌داد [۶]. رافعی و همکاران در سال ۲۰۰۹ با ارائه مدلی جدید برای سینتیک پخت، فرایند وولکانش را در قطعه صنعتی مطالعه کردند. این مدل نتایج مناسب‌تری را در ابتدای فرایند پخت نسبت به مدل کمال نشان می‌داد. اما هر دو این مطالعات مربوط به قطعاتی است که به شیوه قالب‌گیری فشاری تولید شده‌اند [۷]. در همین سال Abhilash و همکاران با تلفیق معادله انرژی و ساز و کار شیمیایی پخت، حل عددی فرایند وولکانش را در ورقه باریک با استفاده از مدل ساز و کاری

بررسی کردند [۸]. مدل سینتیک ساز و کاری برای شبیه‌سازی چندان مناسب نیست [۹]. Khor و همکاران در سال ۲۰۰۹ فرایند قالب‌گیری تزریقی را بدون در نظر گرفتن اثر پخت ماده شبیه‌سازی کردند [۱۰]. Arrillaga و همکاران در سال ۲۰۰۷ فرایند پخت را در تولید قطعات به شیوه قالب‌گیری تزریقی در مدلی بسیار ساده با ضخامت یکنواخت مطالعه کردند. آنها در شبیه‌سازی خود از مدل گرانیوی غیرنیوتنی - توانی و با ضرایب پیش فرض موجود در نرم‌افزار MoldFlow که برای نوع خاصی از لاستیک معرفی شده است، استفاده کردند [۱۱]. Ramorino در سال ۲۰۱۰ شبیه‌سازی عددی به کمک نرم‌افزار MoldFlow را از فرایند قالب‌گیری تزریقی شامل پرشدن حفره و پخت آمیزه ارائه داد. اما، در این پژوهش نیز از خواص پیش فرض برای آمیزه لاستیکی استفاده شده بود [۳].

در کار حاضر، نتایج حل عددی فرایند تزریق قالب در تولید ضربه‌گیر خودرو که شامل مراحل پرشدن حفره قالب و پخت آمیزه است، با در نظر گرفتن خواص واقعی آمیزه موجود گزارش و بحث شده است. ابتدا پارامترهای سینتیک پخت مدل کمال - سرور با استفاده از نتایج ریومتری به دست آمده است. همچنین، ضرایب موجود در مدل گرانیوی غیرنیوتنی - توانی به کمک داده‌های آزمایش گرانیوی سنجی برای آمیزه محاسبه شده است. سپس، معادلات مربوط به پرشدن حفره و پخت آمیزه که شامل معادلات جریان، انتقال گرما و سینتیک پخت است، به کمک نرم‌افزار Fluent حل شده است. زمان رسیدن به پخت بهینه در مدل با نتایج تجربی مقایسه شده است.

تجربی

مواد

در این پژوهش، از آمیزه تولید شرکت بسپار سازه از مجموعه کارخانه‌های گروه صنعتی پارت لاستیک استفاده شده است. این آمیزه که فرمول‌بندی ترکیبی معینی دارد، شامل ۶۰٪ NR، ۳۵٪ دوده، مواد نفتی و ۵٪ عامل پخت است.

دستگاه‌ها و روش‌ها

آزمون ریومتری

آزمون ریومتری طبق استاندارد ASTM D 2048 و حرکات نوسانی با زاویه رفت و برگشت با دامنه ۱ درجه در بسامد ۱/۷ Hz و انحراف مجاز ۰/۰۳ انجام و تغییرات گشتاور بر حسب زمان برای دماهای ۱۷۰، ۱۶۰ و ۱۸۰°C اندازه‌گیری شد. آزمایش ۱۰ مرتبه انجام و

این آزمون در ۳ نوبت انجام و تکرارپذیری آن تأیید شده است. مشخصات این آزمون در جدول ۱ آمده است.

آزمون گرماسنجی

گرمای ویژه آمیزه به کمک آزمون DSC ناهمدما (ASTM E1269-05) با سرعت گرمادهی $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ، در محدوده دمایی $70-180^{\circ}\text{C}$ روی نمونه‌ای به وزن تقریبی 10 mg اندازه‌گیری شده است. آزمایش در ۴ نوبت انجام و تکرارپذیری نتایج تأیید شد. مقادیر گرمای ویژه در دماهای مشخص در جدول ۲ آمده است.

آزمون گرانروی سنجی

برای تعیین منحنی تغییرات گرانروی لاستیک بر حسب سرعت برش سامانه RPA 2000 (ASTM D6204) به کار گرفته شده است.

تعیین چگالی و ضریب رسانندگی

لاستیک‌ها تقریباً تراکم ناپذیرند و در حل عددی، چگالی آنها معمولاً ثابت فرض می‌شود. بر اساس مرجع ۶، چگالی لاستیک برابر $1125\text{ kg}/\text{m}^3$ در نظر گرفته می‌شود. ضریب رسانندگی لاستیک‌ها نیز تقریباً یکسان است و بر اساس مرجع ۱۳ بیان می‌شود.

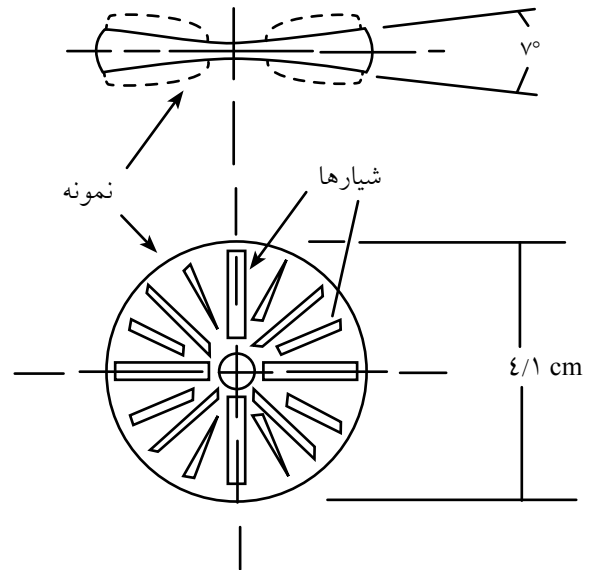
معادلات حاکم و مدل ریاضی

معادله سینتیک پخت

پخت یک واکنش پیچیده شیمیایی است که طی آن اتصالات عرضی بین زنجیرهای پلیمر به وجود می‌آید [۱۴]. درجه پخت نشان‌دهنده مقدار پیش‌رفت واکنش در هر لحظه است که مقداری بین ۰ و ۱ داشته و با α نشان داده می‌شود. درجه پخت بیان می‌کند، در هر زمان واکنش و ولکانش به چه اندازه کامل شده است. مدل‌های مختلف برای توصیف رفتار پخت ماده ارائه شده‌اند. این مدل‌ها را می‌توان به دو گروه اصلی تقسیم کرد: مدل‌های ساز و کاری [۱۵] و مدل‌های تجربی [۱۱]. مدل‌های ساز و کاری، واکنش‌های شیمیایی را که طی فرایند پخت رخ می‌دهد، توصیف و مدل می‌کند. این مدل‌ها توازن گونه‌های شیمیایی درگیر در واکنش را به شکل معادلات ریاضی که مسیر سرعت واکنش را به زمان پخت و دما ارتباط می‌دهد، به‌طور

جدول ۲- مقادیر گرمای ویژه در دمای مشخص.

دما (K)	۴۲۳	۴۳۳	۴۴۳	۴۵۳	۴۶۳
گرمای ویژه	۱۲۰۰	۱۱۹۰	۱۱۸۵	۱۱۸۰	۱۱۷۵



شکل ۱- نمونه پخت شده در سامانه ریومتر.

تکرارپذیری آن تأیید شد. مشخصات هندسی نمونه آزمایشگاهی در شکل ۱ نشان داده شده است. منحنی‌های ریومتری گشتاور - زمان به کمک معادله (۱) به منحنی‌های درجه پخت - زمان تبدیل می‌شود [۱۲]:

$$\alpha = \frac{\gamma_t - \gamma_0}{\gamma_{\infty} - \gamma_0} \quad (1)$$

که در آن α درجه پخت و مقداری بین ۰ و ۱ است، γ_{∞} گشتاور در پایان زمان پخت، γ_t گشتاور در زمان t و γ_0 گشتاور در شروع زمان پخت است.

آزمون سنجش سختی

از آزمون سنجش سختی برای محاسبه سختی قطعه لاستیکی (ضربه‌گیر) در زمان‌های مختلف از شروع فرایند پخت استفاده شده است. این آزمون معیار محاسبه زمان پخت در قطعات پیچیده با ضخامت غیریکنواخت است که امکان آزمایش ریومتری برای آنها وجود ندارد [۳]. بدین منظور، از ماشین خستگی سنج دینامیکی (HT-9711) تولید شرکت Hung Ta کشور تایوان استفاده شده است.

جدول ۱- مشخصات آزمون سنجش سختی ضربه‌گیر.

دمای آزمایش ($^{\circ}\text{C}$)	بسامد (Hz)	دامنه (mm)	پیش بار (dN)
۱۶۵	۱	± 1	۱۲۵

باید مدل سینتیک پختی به کار رود که هم اثر زمانی و هم اثر تغییرات دما را روی سرعت و حالت پخت در نظر گیرد. برای دوره القا مدل پیشنهادی پیشین به شکل زیر استفاده می شود [۱۱]:

$$\bar{t} = \int_0^t \frac{dt}{t_i(T)} \quad (7)$$

در این معادله $t_i(T)$ وابستگی زمان القا به دماست که با معادله (۳) بیان می شود. زمانی که این زمان بی بعد مساوی واحد شود، ($t=1$)، پخت لاستیک شروع می شود.

معادلات بقا

در مرحله پرشدن قالب معادلات بقای جرم و اندازه حرکت حاکم اند که به شکل زیر نوشته می شوند:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (8)$$

معادله (۸) شکل کلی معادله پیوستگی است که برای سیالات تراکم پذیر و تراکم ناپذیر صادق است. معادله بقای اندازه حرکت در دستگاه مختصات ثابت طبق زیر تعریف می شود:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (9)$$

که در آن p فشار ایستا، $\vec{\tau}$ تانسور تنش و $\rho \vec{g}$ و \vec{F} به ترتیب نیروهای حجمی جاذبه و خارجی هستند.

به دلیل رفتار غیرنیوتنی لاستیک از مدل گرانیوی غیرنیوتنی - توانی برای محاسبه تنش برشی در معادله اندازه حرکت استفاده می شود. این مدل که جواب های مناسبی برای سیالات پلیمری ارائه می دهد [۱۹]، به شکل زیر نوشته می شود:

$$\mu = A(\dot{\gamma})^{B-1} \exp\left(\frac{T_0}{T}\right) \quad (10)$$

در معادله (۱۰)، A شاخص تغییر شکل پذیری سیال غیرنیوتنی است و مقدار میانگین گرانیوی را ارائه می دهد. B مقدار انحراف از رفتار نیوتنی سیال غیرنیوتنی، $\dot{\gamma}$ سرعت برش و T_0 دمای مرجع (معمولاً دمای آزمون) است. ضرایب n و k با استفاده از برازش منحنی تغییرات گرانیوی - سرعت برش محاسبه می شود. با معلوم بودن این مقادیر، گرانیوی لاستیک در هر دما و سرعت برش قابل محاسبه خواهد بود. سرانجام معادله انرژی به شکل زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = (k_{eff} \cdot \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\vec{\tau}_{eff} \cdot \vec{v})) + S_h \quad (11)$$

کمی بیان می کند. این مدل ها دارای معادلات پیچیده ای هستند. مدل های تجربی شکل ساده تری دارند و در مطالعات شبیه سازی به طور گسترده استفاده می شوند [۱۶]. این مدل ها جزئیات شیمیایی سامانه را نادیده می گیرند و از معادلات تقریبی بر اساس نوع واکنش به کار رفته بهره می برند [۱۱]. مدل های تجربی زیادی برای بیان رفتار پخت لاستیک ارائه شده اند که تنها برخی از آنها برای مدل های سه بعدی و ماهیت گذرا بودن فرایند مناسب هستند. [۱۷، ۱۸]. در این جا از مدل کمال - سرور برای محاسبه درجه پخت استفاده شده است [۵]:

$$\alpha = \frac{K \cdot (t - t_i)^n}{1 + K \cdot (t - t_i)} \quad (2)$$

در معادله (۲)، t_i دوره القاست. طی این زمان هیچ تغییر شیمیایی در لاستیک رخ نمی دهد و تنها لاستیک دست خوش تغییر فیزیکی شده است. این پارامتر تابعی از دماست و به شکل آرنیوسی بیان می شود:

$$t_i = t_0 \cdot \exp\left(\frac{T_0}{T}\right) \quad (3)$$

در معادله (۴)، k ثابت سرعت واکنش است که آن نیز دارای بیان آرنیوسی است:

$$k = k_0 \cdot \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \quad (4)$$

خواص پخت شامل T_0, t_0, k_0 و E است که به ترتیب ثابت زمانی، ثابت دمایی، ثابت سرعت واکنش و انرژی فعال سازی هستند. این ثابت ها با استفاده از برازش غیرخطی نتایج ریومتری به کمک نرم افزار Matlab، محاسبه می شوند. R ثابت جهانی گازها و T دمای مطلق در هر نقطه است.

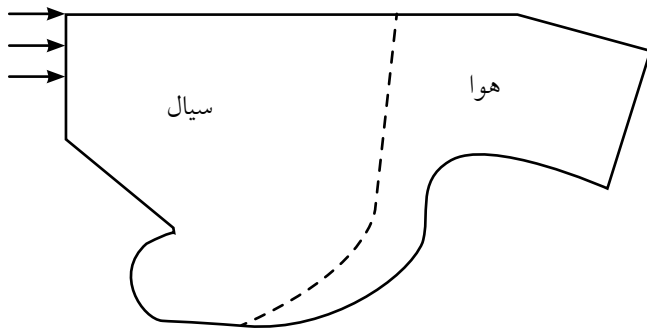
به علت این که فرایند پخت واکنشی گرمازا است، باید گرمای حاصل از آن به عنوان منبع گرمایی در معادله بقای انرژی در نظر گرفته شود. اگر درجه پخت (α) بر اساس معادله (۵) بیان شود، آنگاه سرعت تولید گرما طبق معادله (۶) قابل تعریف است [۶]:

$$\alpha = \frac{Q_t}{Q_\infty} \quad (5)$$

$$\dot{Q} = Q_\infty \left(\frac{d\alpha}{dt} \right) \quad (6)$$

که در آن Q_t گرمای آزاد شده تا زمان t و Q_∞ گرمای کل آزاد شده واکنش است که با آزمایش مشخص می شود.

فرایند پخت مواد الاستومری به طور عمده فرایندی ناهمدماست و

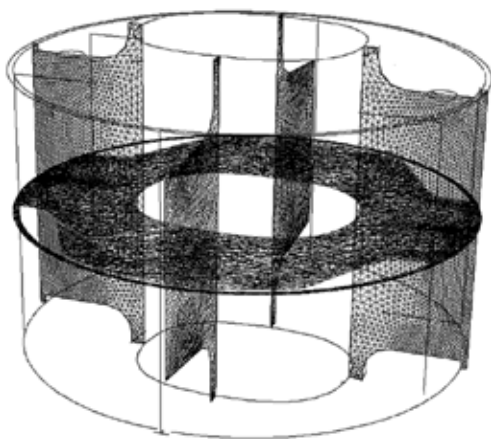


شکل ۲- طرح‌واره تزریق سیال به داخل قالب (نقطه چین سطح مشترک سیال - هواست).

مشخص شده است، فلزی و سایر بخش‌ها لاستیک است. برای شبکه‌بندی از اجزای مثالی شش‌گه‌ای استفاده شده که در شکل ۴ نشان داده شده است. کیفیت شبکه مورد نظر به اندازه‌ای است که اثری بر نتایج حل عددی ندارد.

شرایط مرزی

سیال در ورود به قالب (نقطه تزریق در شکل ۳-ب) دارای شرط دما و فشار ورودی مشخص است. در واقع هنگام پرشدن قالب هوای موجود از منفذهای موجود در قالب خارج می‌شود. بنابراین برای جلوگیری از محبوس ماندن هوا، در حل عددی نوار بالایی قالب به عنوان خروجی در نظر گرفته شده است تا هوای موجود پیش از فرایند تزریق به خارج هدایت شود (شکل ۳-ب). تمام دیواره‌های قالب دارای شرط مرزی دما ثابت است. فرض عدم لغزش در مجاورت دیوار نیز برقرار است. پارامترهای اصلی فرایند قالب‌گیری بر اساس



(ب)

که در آن k_{eff} ضریب رسانندگی مؤثر است $(k+k_f)$ ، که k_f ضریب رسانندگی جریان آشفته بوده، در این جا صفر است). سه عبارت اول سمت راست در معادله (۱۱) بیان‌کننده انتقال انرژی در نتیجه به ترتیب رسانندگی، پخش گونه و اتلاف گرانی است. S_h شامل گرمای مربوط به واکنش شیمیایی است که طبق معادله (۶) بیان می‌شود.

از نظر فیزیکی فرایند تزریق عبارت است از: پرشدن حجم قالب به وسیله سیال (لاستیک مذاب) که جای‌گزين هوا می‌شود (شکل ۲). در چنین جریانی فازها کاملاً لایه‌ای و از یک‌دیگر مجزا هستند و سطح مشترک آنها به آسانی قابل تعریف است [۲۰]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_A \rho_A) + \nabla \cdot (r_A \rho_A \mathbf{u}_i) = 0 \quad (12)$$

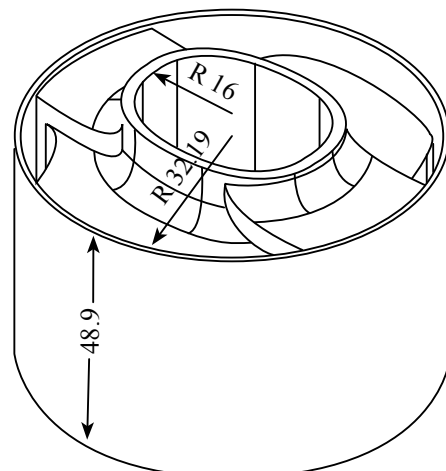
معادله (۱۲) کسر حجمی را برای سیال (لاستیک) محاسبه می‌کند. معادله VOF برای سیال B حل نمی‌شود، بلکه از معادله (۱۳) محاسبه می‌شود:

$$r_A + r_B = 1 \quad (13)$$

در معادله (۱۳)، r_B و r_A به ترتیب کسرهای حجمی مربوط به لاستیک و هواست.

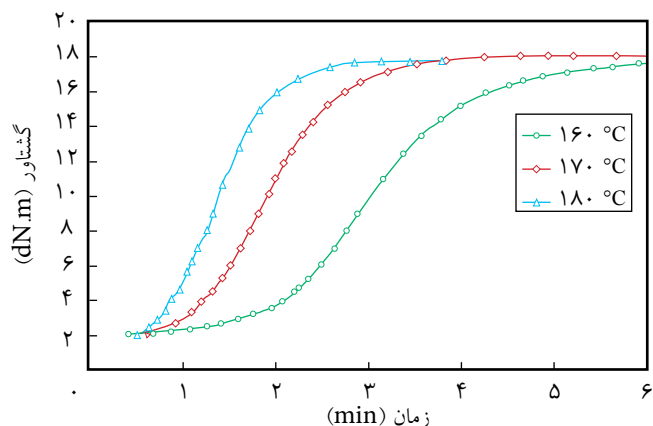
مدل هندسی و شبکه‌بندی

در شکل ۳ ابعاد هندسه مورد نظر که مدلی سه‌بعدی از ضربه‌گیر خودروست، نشان داده شده است. حجم داخلی که در شکل نیز



(الف)

شکل ۳- (الف) نمای سه‌بعدی ضربه‌گیر و (ب) نمای مقابل ضربه‌گیر (ابعاد به میلی‌متر هستند).

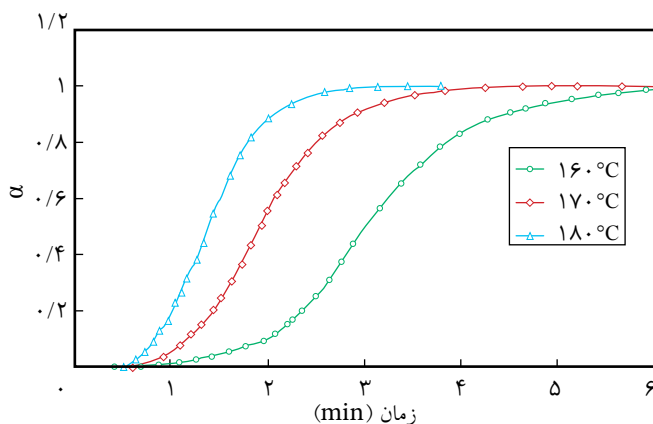


شکل ۵- تغییرات گشتاور بر حسب زمان در دماهای مختلف آزمون ریومتری.

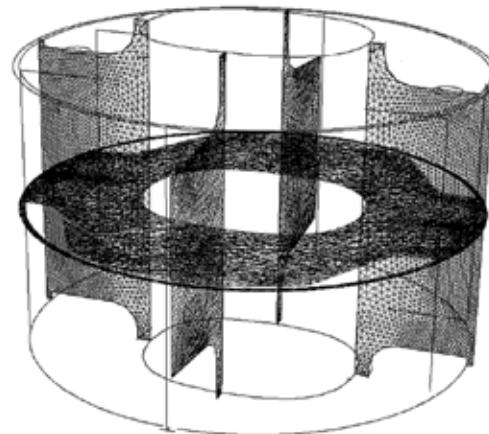
افزایش سرعت واکنش، اتصالات پلیمری سریع‌تر شکل گرفته و در نتیجه آمیزه در زمان کمتری به پخت ($\alpha=1$) دست پیدا می‌کند. به منظور محاسبه درجه و ثابت سرعت واکنش پخت در معادله (۲)، معادله سینتیکی پخت روی منحنی‌های شکل ۶ برازش شده است. مقادیر T_0 و t_0 نیز به طور مستقیم از داده‌های ریومتری و ثابت‌های k_0 و E با استفاده از منحنی تغییرات $\ln(k)$ بر حسب معکوس دما (k) محاسبه می‌شوند. پارامترهای سینتیک پخت در جدول ۴ ارائه شده‌اند.

دینامیک پرشدن قالب

در شکل ۷، تغییرات گرانیوی آمیزه بر حسب سرعت برش در دمای 120°C ارائه شده است. تطابق خوبی بین نتایج تجربی (نماد) که از آزمایش گرانیوی‌سنجی به دست آمده‌اند و نتایج عددی مدل گرانیوی غیرنیوتنی و توانی (خط) قابل مشاهده است. ثابت‌های



شکل ۶- تغییرات درجه پخت - زمان در دماهای مختلف آزمون ریومتری.



شکل ۴- شبکه‌بندی محیط حل.

مشخصات ماشین تزریق Jing day-JD-RL 700T در جدول ۳ ارائه شده است.

نتایج و بحث

در این پژوهش، با تلفیق معادلات بقای جرم، اندازه حرکت و انرژی در شرایط دو فاز مجزا به همراه یک سابروتین توسعه یافته به منظور انجام محاسبات سینتیک پخت، شبیه‌سازی رایانه‌ای فرایند ولکانش در تولید قطعات تولید شده به شیوه قالب‌گیری تزریقی به وسیله نرم‌افزار Fluent انجام شد.

شکل ۵ تغییرات گشتاور نسبت به زمان (منحنی ریومتری) را در دماهای مختلف آزمایش نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در هر سه دما مقدار گشتاور با گذشت زمان افزایش می‌یابد. زیرا با افزایش زمان و آغاز واکنش پخت، اتصالات عرضی در ساختار پلیمر به وجود آمده و سبب افزایش گرانیوی آمیزه می‌شود. بنابراین، گشتاور عکس‌العملی ناشی از نوسان نمونه افزایش می‌یابد.

شکل ۶ تغییرات درجه پخت - زمان را برای دماهای مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش دما و به دلیل

جدول ۳- مشخصات اصلی فرایند.

مقدار	پارامترهای تزریق
25 ± 1	زمان تزریق (s)
65	دمای تزریق ($^\circ\text{C}$)
175	دمای قالب ($^\circ\text{C}$)

جدول ۴- خواص سینتیکی پخت لاستیک.

k_0	n	E	t_0	T_0
$1/37 \times 10^{32}$	۴/۹۵۷	۳۵۸۸۳۲	$2/80 \times 10^{-11}$	۱۲۶۹۰

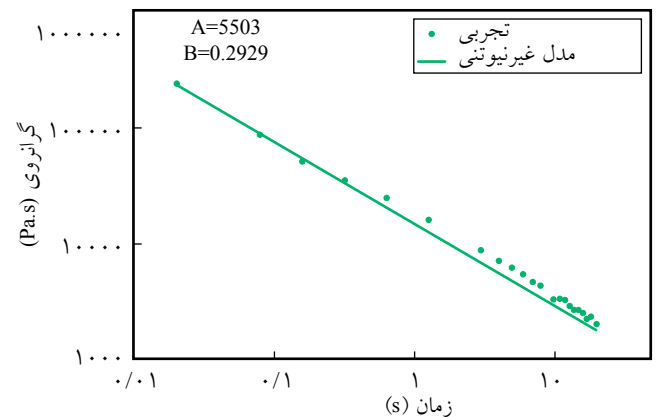
مدل گرانروی که با استفاده از برازش نقاط تجربی محاسبه شده‌اند، روی شکل درج شده‌اند.

الگوی پرشدن قالب به وسیله فاز لاستیک در شکل ۸ ارایه شده است. در این شکل کسر حجمی لاستیک در زمان‌های مختلف از شروع تزریق روی صفحه‌های تقارن مدل نشان داده شده است (بخش کم‌رنگ نمایانگر فاز هواست). بر اساس مشخصات ماشین تزریق در جدول (۲) زمان لازم برای پرشدن حجم قالب 25 ± 1 s است که حل عددی با دقت مناسبی این زمان را 28 s پیش‌گویی کرده است.

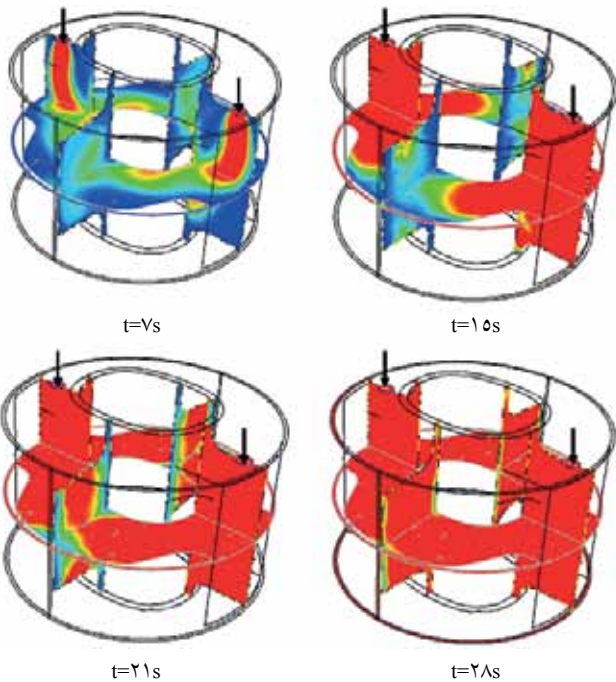
فرایند وولکانش ضربه‌گیر در قالب

در شکل ۹، توزیع پیوسته از میدان دمای ضربه‌گیر در زمان 200 s و روی صفحه تقارن آن نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، گرادیان دمای زیادی بین بخش‌های مختلف ضربه‌گیر یعنی بین نقاط نزدیک به قالب و نقاط دور از آن به دلیل ضریب رسانندگی کم لاستیک وجود دارد. با گذشت زمانی در حدود 200 s از شروع گرمادهی، هنوز بخش‌های دور از قالب ضربه‌گیر به دمای نهایی قالب نرسیده‌اند. این اختلاف دما که به ویژه در قطعات ضخیم قابل توجه است، سبب می‌شود که هر ناحیه از ضربه‌گیر درجه پخت منحصر به فرد داشته باشد. در همین زمان، توزیع درجه پخت ضربه‌گیر روی صفحه تقارن آن در شکل ۱۰ نشان داده شده است. سه نقطه مشخص شده در این شکل دارای درجه

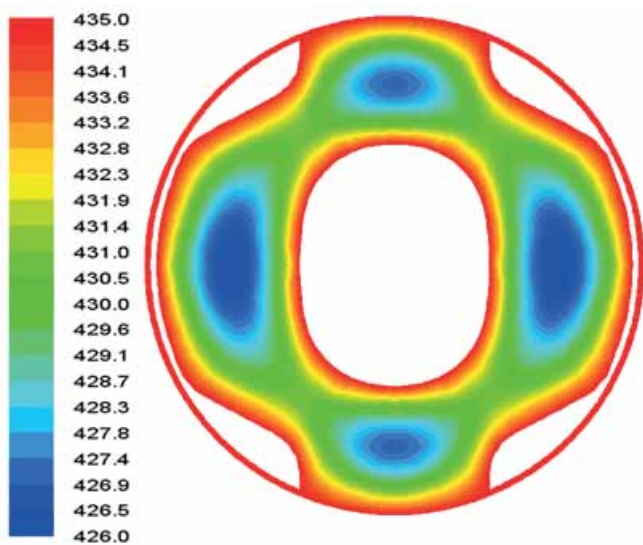


شکل ۷- تغییرات گرانروی سرعت برش برای داده تجربی و مدل غیرنیوتنی توانی در دمای 120°C .

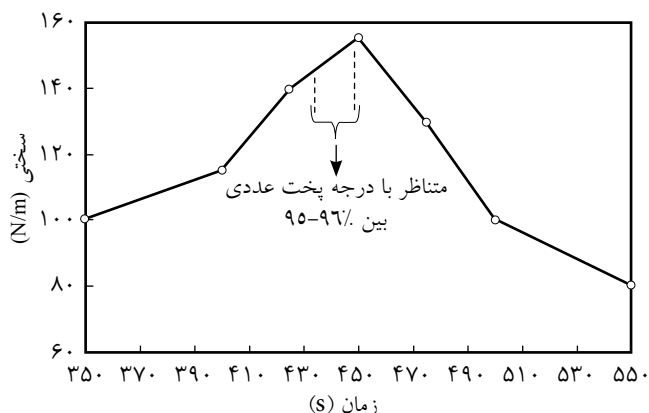


شکل ۸- الگوی پر شدن قالب (بخش کم‌رنگ مشخص‌کننده فاز هواست).

پختی متفاوت با یک‌دیگرند که علت آن تاریخچه دمایی متفاوت در هر کدام از این نقاط است. منحنی تغییرات درجه پخت بر حسب زمان فرایند وولکانش برای این نقاط در شکل ۱۱ ارایه شده است. مشاهده می‌شود، نقطه نزدیک‌تر به قالب (A) که در مدت زمان کمتری به دمای نهایی قالب رسیده است، زودتر (در حدود 35 s) به پخت بهینه نیز دست پیدا می‌کنند. این ناهمگنی در پخت منجر



شکل ۹- توزیع پیوسته میدان دما روی صفحه تقارن ضربه‌گیر در راستای محور آن در زمان 200 s.



شکل ۱۲- تغییرات سختی ضربه گیر در زمان های مختلف از شروع فرایند تزریق.

۷٪) زمان پخت بهینه را برآورد کرده است. لازم به ذکر است، اگر از ۲۸ s زمان تزریق و حل معادلات جریان چشم پوشی شود و تنها معادلات انتقال گرما و پخت حل شود، زمان پخت در حدود ۲۷۰ s محاسبه می شود که اختلاف زیادی با نتیجه تجربی دارد.

نتیجه گیری

به منظور شبیه سازی فرایند قالب گیری تزریقی، مدل سه بعدی توسعه یافت. برنامه کمکی نیز برای انجام محاسبات سینتیک پخت به نرم افزار Fluent اضافه شد. فرایند قالب گیری تزریقی شامل مراحل پرشدن قالب و پخت آمیزه مدل سازی رایانه ای شد. کاربردی بودن روش با مقایسه نتایج عددی و تجربی زمان پخت بهینه به اثبات رسید. به طوری که خطای حل عددی ۱۰٪-۵ بوده است. تطابق نتایج عددی و تجربی، مؤید دقت زیاد و مناسب بودن مدل پخت و گرانی و سازگار بودن آنها با ماهیت ناهمدمای بودن مسئله است.

قدردانی

از همکاری صمیمانه گروه صنعتی پارت لاستیک در ارائه نتایج تجربی، سپاس گزاری می شود.

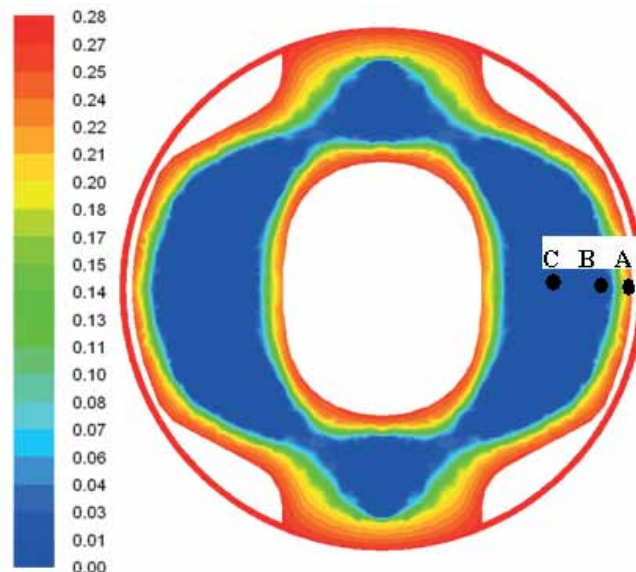
اختصارات

E انرژی فعال سازی

k ثابت سرعت معادله پخت

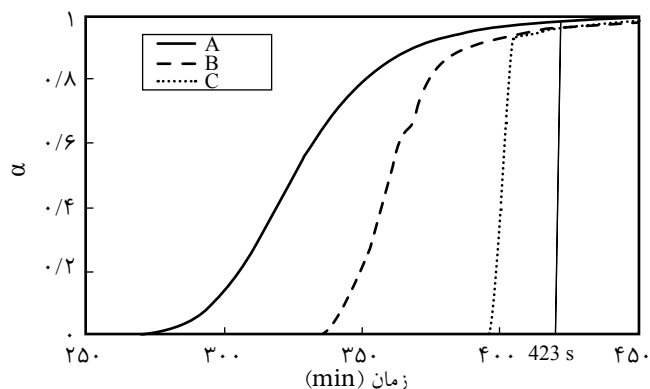
k ضریب رسانندگی گرمایی

k_0 ثابتی در معادله ثابت سرعت معادله پخت



شکل ۱۰- توزیع درجه پخت روی صفحه تقارن ضربه گیر در راستای محور آن در زمان ۳۰۰ s.

به کاهش خواص مکانیکی مطلوب می شود [۱۳]. هم چنین، شیب منحنی پخت برای نقطه C بیشتر از سایر نقاط مشخص شده است، زیرا گرمای رسانشی از تمام جهت های ضربه گیر به این نقطه وارد شده است (برخلاف نقطه A که شار گرمایی تنها از یک جهت به آن می رسد) و سبب افزایش دمای پخت این نقطه در مدت زمان کوتاه تری می شود. حل عددی، زمان نهایی پخت ضربه گیر $\alpha=0.96$ بر اساس مرجع (۳) را در زمان ۴۳۰-۴۲۰ s پیش بینی می کند. نتایج تجربی حاصل از آزمون استحکام که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، بیشترین مقدار را در زمان ۴۵۰ s از شروع فرایند دارد. بدین معنی که از نظر تجربی، در این زمان قطعه پخت شده است. بنابراین می توان نتیجه گرفت، حل عددی با دقت بسیار خوبی (خطا در حدود



شکل ۱۱- منحنی تغییرات درجه پخت برای سه نقطه مختلف ضربه گیر.

T_{∞} دمای جو (K)	Q_{∞} گرمای کل آزاد شده در واکنش (J)
n ثابتی در معادله پخت	Q_t گرمای آزاد شده تا زمان t (J)
α درجه پخت	\dot{Q} سرعت تولید گرما (W)
γ_t گشتاور در زمان t (dN.m)	R ثابت جهانی گازها
γ_0 گشتاور در شروع واکنش (dN.m)	t زمان (s)
γ_{∞} گشتاور در انتهای واکنش (dN.m)	t_i دوره القا
ρ چگالی	t_0 ثابت زمانی در معادله زمان القا
A شاخص تغییر شکل پذیری در مدل گرانیروی	t_{90} زمان پخت بهینه (s)
$\dot{\gamma}$ سرعت برش	T دما (K)
B مقدار انحراف از رفتار نیوتنی	T_0 ثابت دمایی در معادله زمان القا

مراجع

- Vergnad J.M. and Rosca I.D., *Rubber Curing and Properties*, CRC, Taylor-Francis Group, New York, 1-11, 2009.
- Holm E.J. and Langtangen H.P., A Unified Finite Element Model for the Injection Molding Process, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, **178**, 413-429, 1999.
- Ramorino G., Girardi M., Agnelli S., Franceschini A., Baldi F., Viganò F., and Ricco T., Injection Molding of Engineering Rubber Components: A Comparison between Experimental Results and Numerical Simulation, *Int. J. Mater. Form.*, **3**, 551-554, 2010.
- Zhang P., Zhao F., Yaun Y., Shi X., and Zhao S., Network Evolution Based on General-Purpose Diene Rubbers/Sulfur/TBBS System during Vulcanization (I), *Polymer*, **51**, 257-263, 2010.
- Kamal M. and Sourour S., Kinetics and Thermal Characterization of Thermoset Cure, *Polym. Eng. Sci.*, **13**, 590-599, 1973.
- Ghoreishy M.H.R. and Naderi G., Three Dimensional Finite Element Modeling of Rubber Curing Process, *J. Elast. Plast.*, **37**, 37-53, 2005.
- Rafei M., Ghoreishy M.H.R., and Naderi G., Developments of an Advanced Computer Simulation Technique for the Modeling of Rubber Curing Process, *Comput. Mater. Sci.*, **47**, 539-547, 2009.
- Abhilash P.M., Kannan K., and Varkey B., Simulation of Curing of a Slab Rubber, *Mater. Sci. Eng.*, **168**, 237-241, 2010.
- Ghosh P., Katara S., Patkar P., and Caruthers J.M., Sulfur Vulcanization of Natural Rubber for Benzothiazole Accelerated, *Rubber Chem. Technol.*, **76**, 592-693, 2003.
- Khor C.Y., Ariff Z.M., Ani F.C., Mujeebu M., Abdullah M.K., and Joseph M.A., Three-Dimensional Numerical and Experimental Investigations on Polymer Rheology in Meso-Scale Injection Molding, *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, **37**, 131-139, 2010.
- Arrillaga A., Zaldua A.M., Atxurra R.M., and Farid A.S., Techniques Used for Determining Cure Kinetics of Rubber Compounds, *Eur. Polym. J.*, **43**, 4783-4799, 2007.
- Dongcheol C., Abdul Kader M., Baik-Hwan C., Yang I., and Changwoon N., Vulcanization Kinetics of Nitrile Rubber/Layered Clay Nanocomposites, *J. Appl. Polym. Sci.*, **98**, 1688-1696, 2005.
- Javadi M., Erfanian M., and Moghiman M., Numerical Investigation of Curing Process in Reaction Injection Molding of Rubber for Quality Improvements, *Key Eng. Mater.*, **462**, 1206-1211, 2011.
- Bianchi O., Fiorio R., Martins J.N., Zattera A.J., and Scuracchio C.H., Crosslinking Kinetics of Blends of Ethylene Vinyl Acetate and Ground Tire Rubber, *J. Elast. Plast.*, **41**, 175-189, 2009.
- Fan R.L., Zhang Y., Huang C., and Gong P., Simulation and Verification for Sulphur Accelerated Vulcanization of Gum Natural Rubber Compound, *Rubber Chem. Technol.*, **75**, 287-295, 2002.
- Ghoreishy M.H.R., Rafei M., Naderi G., Bakhshandeh G.R., and Nasiri M., Computer Simulation of Cure Process of an Axisymmetric Rubber Article Reinforced by Metal Plates Using

- Extended ABAQUS Code, *Iran. J. Polym. Sci. Technol.*, (InPersian), **23**, 121-131, 2010.
17. Isayev A.I. and Deng J.S., Non-Isothermal Vulcanization of Rubber Compounds, *Rubber Chem. Technol.*, **61**, 340-361, 1988.
18. Tong J. and Yan X., Non-Isothermal Vulcanization of Rubber Compounds, *J. Reinforc. Plast. Compos.*, **22**, 983-1002, 2003.
19. Del Coz Diaz J.J., Garcia Nieto P.J., Bello Garcia A., and Guerrero Munoz J., Finite Volume Modeling of The Non-Isothermal Flow of a Non-Newtonian Fluid in a Rubber's Extrusion Die, *J. Non-Crystal. Solid.*, **354**, 5334-5336, 2008.
20. Rui Alexandre, *Numerical Simulation of the Filling and Curing Stages in Reaction Injection Molding Using CFX*, PhD Thesis, University of Aveiro, 2007.