

## شبیه‌سازی رایانه‌ای فرآیند ولکانش به‌منظور محاسبه زمان پخت در یک قطعه لاستیکی با اصلاح معادله سینتیک پخت\*

محمد مقیمان<sup>(۳)</sup>سید محمد جوادی<sup>(۲)</sup>محمد رضا عرفانیان<sup>(۱)</sup>

**چکیده** در این مقاله از روش حل عددی برای شبیه‌سازی فرآیند پخت لاستیک و محاسبه زمان پخت یک قطعه لاستیکی تولید شده به‌روش قالب‌گیری تزریقی استفاده شده است. مهم‌ترین نوآوری کار حاضر محاسبه زمان پخت با اصلاح مدل سینتیک پخت است. معادلات سینتیک در یک کد جانبی گنجانده شده و با افزودن آن به نرم‌افزار فلونت، امکان شبیه‌سازی عددی فرآیند پخت در یک قطعه لاستیکی، فراهم گردیده است. خواص سینتیک آمیزه، ظرفیت گرمایی ویژه و لزجت لاستیک از آزمایش به‌دست می‌آیند. به‌منظور محاسبه زمان پخت به‌روش تجربی از نتایج تست استحکام استفاده شده است. زمان پرشدن قالب و زمان پخت حاصل از حل عددی، سازگاری خوبی با زمان پخت حاصل از نتایج آزمایشگاهی دارند.

**واژه‌های کلیدی** شبیه‌سازی عددی، ولکانش، قالب‌گیری تزریقی، زمان پخت.

### Simulation of Rubber Vulcanization for Calculation of the Curing Time with Modification of the Kinetic Model

M.R. Erfanian S. M. Javadi M. Moghiman

**Abstract** The present work is focused on the computational method for simulation of the rubber vulcanization process in injection molding machines. The main innovation of the work is the calculation of the curing time in a rubbery part using the modification of curing kinetic model. For solving the curing equations, the computer code is developed in "UDF" module of the Fluent. The parameters of curing model, specific heat and viscosity of the rubber are obtained from the experiment. In order to evaluate the experimental curing time, a mechanical compression test is performed on the rubbery part at different times. Predicted mold filling and curing times are compared with experimental data, which confirmed the accuracy and applicability of the method.

**Key Words** Numerical Simulation, Vulcanization, Injection Molding, Curing Time.

\* تاریخ دریافت مقاله ۹۳/۴/۲۸ و تاریخ پذیرش آن ۹۳/۱۰/۷ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول، دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد. Mohammad.Erfanian09@gmail.com

(۲) استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه مهندسی فناوری‌های نوین، قوچان.

(۳) استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد.

## مقدمه

لاستیک‌ها به دلیل خواص منحصر به فرد، کاربرد فراوانی در صنعت یافته‌اند. لاستیک‌ها بر خلاف بیشتر مواد مهندسی، هم خواص استحکامی بالایی دارند و هم از خواص تغییر شکل مناسب برخوردارند. لاستیک‌ها غیر قابل تراکم‌اند و مدول حجمی آن‌ها معمولاً هزار برابر بزرگ‌تر از مدول یانگ می‌باشد [1]. علاوه بر این لاستیک‌ها نسبت به نفوذ مایعات و گازها مقاومت نشان می‌دهند. تمامی این ویژگی‌ها ارزش‌های قابل توجهی برای استفاده از لاستیک‌ها در صنایع خودرو سازی به‌شمار می‌آید [1].

فرآیند قالب‌گیری تزریقی الاستومرها به‌منظور تولید انبوه، یکی از مهم‌ترین فرآیندهای ساخت می‌باشد [2]. امروزه این فرآیند پرکاربردترین شیوه تولید قطعات لاستیکی در صنایع خودروسازی است. در این روش به لاستیک حرارت داده می‌شود تا بتواند درون حفره‌های قالب جاری شود. سپس این ماده تحت فشار قرار می‌گیرد و به درون یک قالب داغ بسته تزریق می‌شود تا همه حفره قالب را پر کند و شکل مورد نظر را به خود بگیرد. پس از طی زمان مشخص و دستیابی به پخت بهینه، قطعه از قالب خارج می‌شود [3]. از آنجایی که گرمایش ناقص یا بیش از حد لاستیک سبب کاهش خواص مکانیکی آن می‌گردد، بنابراین یافتن زمان پخت بهینه در قطعات لاستیکی اهمیت فراوانی دارد [4].

در حال حاضر نحوه دستیابی به زمان پخت بهینه، مبتنی بر تجربه و روش پر هزینه سعی و خطا می‌باشد [3]. آزمایش‌های گوناگونی در زمان‌های مختلف از شروع قالب‌گیری انجام می‌شود تا زمان پخت قطعه لاستیکی مشخص گردد. بنابراین استفاده از شبیه‌سازی رایانه‌ای به‌منظور یافتن زمان دستیابی به پخت بهینه بسیار مناسب خواهد بود.

در سال‌های اخیر مطالعه عددی فرآیند ولکانش موضوع مورد علاقه محققان بسیاری بوده است. در

اکثر پژوهش‌های انجام گرفته، فرآیند ولکانش در قطعات لاستیکی بررسی شده است که به شیوه قالب‌گیری فشاری تولید شده‌اند. در شرایطی که امروزه اکثر قطعات پیچیده خودرو به‌روش قالب‌گیری تزریقی تولید می‌شوند [2].

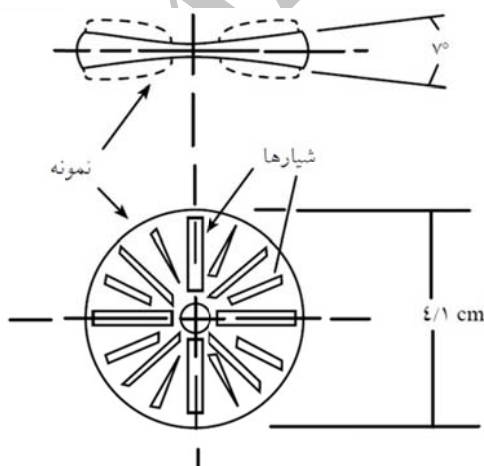
قریشی و نادری [5] در سال ۲۰۰۵ با توسعه یک برنامه کامپیوتری، فرآیند پخت در یک نمونه ساده را بررسی کردند. آن‌ها در این پژوهش از مدل سینیتیک پخت کمال-سرور برای نشان دادن رفتار پخت لاستیک استفاده نمودند که این مدل نتایج بسیار مناسبی را در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی ارائه داد. آریلاج و همکارانش [6] در سال ۲۰۰۷ فرآیند پخت را در تولید قطعات به شیوه قالب‌گیری تزریقی در یک مدل بسیار ساده و با ضخامت یکنواخت مطالعه نمودند. آن‌ها در شبیه‌سازی خود مدل لزجت غیرنیوتنی-توانی را به‌کار گرفتند و از ضرایب مدل لزجت پیش‌فرض موجود در نرم‌افزار مولد فلو که تنها برای نوع خاصی از لاستیک معرفی شده است، استفاده کردند. رافعی و همکارانش [7] در سال ۲۰۰۹ با ارائه مدلی جدید برای سینیتیک پخت، فرآیند ولکانش را در یک قطعه صنعتی که به روش قالب‌گیری فشاری تولید شده است، مورد مطالعه عددی و آزمایشگاهی قرار دادند. ابهیلش و همکارانش [8] در سال ۲۰۰۹ با تلفیق معادله انرژی و مکانیزم شیمیایی پخت، به حل عددی فرآیند ولکانش در یک ورق باریک با استفاده از مدل ساز و کاری (Mechanistic kinetic model) پخت پرداختند. مدل‌های ساز و کاری بسیار پیچیده‌اند و قابلیت استفاده در برنامه‌های عددی را ندارند [9]. خور و همکارانش [10] در سال ۲۰۰۹ با استفاده از شبیه‌سازی رایانه‌ای، فرآیند قالب‌گیری تزریقی را بدون در نظر گرفتن مرحله پخت لاستیک بررسی کردند. رامورینو و همکارانش [3] در سال ۲۰۱۰ با استفاده از حل عددی، فرآیند قالب‌گیری تزریقی و پخت آمیزه لاستیک را مطالعه نمودند؛ اما آن‌ها نیز از خواص پیش‌فرض

صنعتی پارت لاستیک استفاده گردیده است. این آمیزه که فرمول‌بندی ترکیبی معینی دارد، شامل ۶۰٪ NR، ۳۵٪ کربن سیاه و مواد نفتی و ۵٪ عامل پخت می‌باشد.

**آزمایش رئومتر.** آزمون رئومتر به وسیله MDR2000 ساخت شرکت آلفا تکنولوژی اکراین و بر 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 ۱۶۰، ۱۷۰ و ۱۸۰ درجه سلسیوس اندازه گیری شد. این آزمایش ۱۰ مرتبه انجام شد و تکرارپذیری آن تأیید گردید. مشخصات هندسی نمونه آزمایشگاهی در شکل (۱) نشان داده شده است. منحنی‌های رئومتر گشتاور-زمان به کمک معادله (۱) به منحنی‌های درجه پخت-زمان تبدیل می‌گردد [13].

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

که در آن  $\alpha$  درجه پخت و مقداری بین صفر و یک است،  $\gamma_\infty$  گشتاور در پایان زمان پخت،  $\gamma_t$  گشتاور در زمان  $t$  و  $\gamma_0$  گشتاور در شروع زمان پخت است.



شکل ۱ نمونه پخت شده در سامانه رئومتر

موجود در نرم‌افزار مولد فلو برای فرآیند ولکانش آمیزه لاستیکی استفاده نمودند. در سال ۲۰۱۳ لروی و همکاران [11] با ارائه مدل پختی که توانایی مدل‌سازی زمان برگشت (Reversion) در پخت را داشت، نتایج پخت مربوط به یک مدل آزمایشگاهی را ارائه دادند. حسینی و رزاقی [12] در سال ۲۰۱۴، سینتیک پخت لاستیک را با هدف بررسی اثر مواد تشکیل دهنده آمیزه لاستیک مورد بررسی قرار دادند و اثر افزودن عوامل مختلف به ترکیب لاستیک را بر پخت آن ارزیابی نمودند [12].

در این پژوهش، ابتدا خواص مربوط به سینتیک پخت لاستیک با استفاده از نتایج آزمایش‌های رئومتر به دست می‌آید. هم‌چنین ضرایب موجود در مدل ویسکوزیته غیر نیوتنی - توانی توسط داده‌های آزمایش ویسکومتری برای آمیزه لاستیکی مورد نظر محاسبه می‌گردد. سپس با اصلاح معادله سینتیک پخت، معادلات مربوط به فرآیند پخت در قالب یک برنامه رایانه‌ای کمکی و به زبان C توسعه می‌یابد و به نرم‌افزار فلوننت افزوده می‌گردد. با اضافه کردن این برنامه کمکی به نرم‌افزار فلوننت، می‌توان در هر لحظه از زمان توزیع درجه پخت قطعه مورد نظر را به صورت میدانی پیوسته (مانند دما و فشار) مشاهده نمود. از حل هم‌زمان معادلات سینتیک پخت، جریان و انتقال حرارت، فرآیندهای پر شدن حفره (تزریق) و ولکانش شبیه‌سازی رایانه‌ای می‌شود و زمان رسیدن به پخت بهینه در قطعه مورد نظر محاسبه می‌گردد. دقت نتایج عددی در پیش‌بینی زمان پخت قطعه مورد نظر، با مقایسه آن با زمان پخت حاصل از آزمایش سنجش استحکام (Stiffness) مشخص می‌گردد.

## آزمایش‌ها

**ترکیب آمیزه.** در این پژوهش از یک آمیزه لاستیک تولید شرکت بسپار سازه از مجموعه کارخانه‌های گروه

آزمون سنجش استحکام. از آزمون سنجش سختی برای محاسبه استحکام سختی قطعات لاستیکی پیچیده در زمان‌های مختلف از شروع فرآیند پخت استفاده می‌شود. این آزمون، معیار محاسبه زمان پخت در قطعات پیچیده با ضخامت غیریکنواخت است که امکان آزمایش رثومتی برای آنها وجود ندارد [3]. در زمان‌هایی از شروع فرآیند پخت که احتمال می‌رود قطعه لاستیکی به‌طور کامل پخت شده است، قطعه لاستیکی از قالب خارج می‌شود و استحکام آن محاسبه می‌شود. زمان متناظر با بالاترین استحکام اندازه‌گیری شده به‌عنوان زمان پخت قطعه مورد نظر شناخته و ثبت می‌شود. برای سنجش استحکام از ماشین سنجش خستگی دینامیکی (HT-9711) تولید شرکت هونگتا و ساخت کشور تایوان استفاده شده است. این آزمون در سه نوبت انجام و تکرارپذیری آن تأیید شده است. مشخصات این آزمایش در جدول (۱) درج شده است.

تعیین چگالی و ضریب رسانندگی. لاستیک‌ها تقریباً تراکم‌ناپذیرند و در حل عددی، چگالی آنها معمولاً ثابت فرض می‌شود. براساس مرجع [5] چگالی لاستیک برابر  $1125 \text{ kg/m}^3$  در نظر گرفته می‌شود. ضریب رسانش لاستیک‌ها نیز تقریباً یکسان است و براساس مرجع [14] بیان می‌شود.

### معادلات حاکم

معادله سینتیک پخت. پخت یک واکنش پیچیده شیمیایی است که در طی آن اتصالات عرضی بین زنجیرهای پلیمر به‌وجود می‌آید [15]. درجه پخت نشان‌دهنده مقدار پیشرفت واکنش در هر لحظه است که مقداری بین ۰ و ۱ دارد و با  $\alpha$  نشان داده می‌شود. درجه پخت بیان می‌کند که در هر زمان واکنش پخت به چه اندازه کامل شده است. مدل‌های مختلف برای توصیف رفتار پخت ماده ارائه شده‌اند. این مدل‌ها را می‌توان به دو گروه اصلی تقسیم نمود: مدل‌های ساز و کاری [16] و مدل‌های تجربی [6]. مدل‌های ساز و کاری، واکنش‌های شیمیایی را که در طی فرآیند پخت رخ می‌دهد، توصیف و مدل می‌کند. این مدل‌ها توازن گونه‌های شیمیایی درگیر در واکنش را به‌شکل روابط ریاضی که مسیر نرخ واکنش را به زمان پخت و دما مرتبط می‌کند، به‌طور کمی بیان می‌کند. این مدل‌ها دارای معادلات پیچیده‌ای هستند. مدل‌های تجربی شکل ساده‌تری دارند و در مطالعات شبیه‌سازی به‌طور

جدول ۱ مشخصات آزمون سنجش استحکام قطعه لاستیکی

دمای آزمایش ( $^{\circ}\text{C}$ )	فرکانس (Hz)	دامنه (mm)	پیش بار (dN)
۱۶۵	۱	۱	۱۰

آزمون گرماسنجی. محاسبه گرمای ویژه آمیزه در آزمون کالریمتری ناهم‌دما به‌وسیله دستگاه (DSC-60) ساخت شرکت Shimadzu ژاپن و برطبق استاندارد ASTM E1269-05 با سرعت گرمادهی  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ، در محدوده دمایی  $70-180^{\circ}\text{C}$  روی نمونه‌ای به جرم تقریبی  $10 \text{ mg}$  انجام شده است. آزمایش در ۴ نوبت انجام و تکرارپذیری نتایج تأیید شد. مقادیر گرمای ویژه در دماهای مشخص در جدول (۲) آمده است.

جدول ۲ مقادیر گرمای ویژه در دماهای مختلف

دما ( $^{\circ}\text{C}$ )	۱۵۳	۱۶۳	۱۷۳	۱۸۳	۱۹۳
گرمای ویژه ( $\text{J}/\text{kg.K}$ )	۱۲۰۰	۱۱۹۰	۱۱۸۵	۱۱۸۰	۱۱۷۵

معادله بقای انرژی در نظر گرفته شود. اگر درجه پخت  $(\alpha)$  براساس معادله (۵) بیان شود، آن گاه نرخ تولید حرارت برطبق معادله (۶) قابل تعریف است [5].

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

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

که در آن  $Q_t$  گرمای آزاد شده تا زمان  $t$  و  $Q_\infty$  گرمای کل آزاد شده واکنش است.

فرآیند پخت مواد الاستومری به طور عمده یک فرآیند ناهم دماست و باید مدل سینتیک پختی به کار رود که هم تأثیر زمانی و هم تأثیر تغییرات دما را روی سرعت و حالت پخت در نظر گیرد. برای دوره القا مدل پیشنهادی پیشین به شکل زیر مورد استفاده قرار می گیرد [6]:

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

در این رابطه  $t_i(T)$ ، وابستگی زمان القا به دما است که با معادله (۳) بیان می شود. زمانی که این زمان بی بعد مساوی ۱ شود، پخت لاستیک شروع می شود.

**معادلات بقا.** معادلات حاکم بر حل این مسأله عبارتند از: بقای جرم، اندازه حرکت، کسر حجمی و انرژی. به دلیل رفتار غیر نیوتنی لاستیک از مدل لزجت غیرنیوتنی - توانی برای محاسبه تنش برشی در معادله بقای اندازه حرکت استفاده می شود. این مدل که جواب های مناسبی برای سیالات پلیمری ارائه می دهد [20,21]، به صورت زیر نوشته می شود:

$$\mu = A(\dot{\gamma})^{B-1} \exp\left(\frac{T_0}{T}\right) \quad (8)$$

گسترده مورد استفاده قرار می گیرند [17]. این مدل ها جزئیات شیمیایی سامانه را نادیده می گیرند و از روابط تقریبی براساس نوع واکنش به کار رفته بهره می برند [6]. 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 فرآیند مناسب می باشند [18,19].

در اینجا از مدل کمال و سرور برای محاسبه درجه پخت استفاده شده است [5].

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

در این معادله،  $n$  درجه واکنش و  $t_i$  زمان القاست. طی این زمان هیچ تغییر شیمیایی در لاستیک رخ نمی دهد و تنها لاستیک دستخوش تغییر فیزیکی گرمایش می شود. این زمان تابعی از دماست و به شکل آرنیوسی بیان می شود:

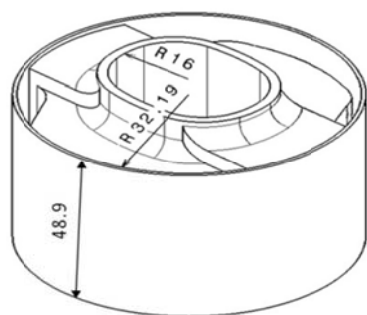
$$t_i = t_0 \cdot \exp\left(\frac{T_0}{T}\right) \quad (3)$$

در معادله (۲)،  $k$  ثابت سرعت واکنش است که آن نیز دارای بیان آرنیوسی است:

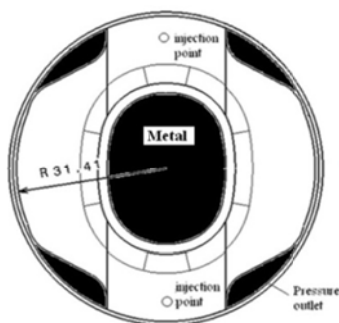
$$k = k_0 \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \quad (4)$$

که در آن  $t_0$ ،  $T_0$ ،  $k_0$  و  $E$  خواص سینتیک پخت اند که به ترتیب ثابت زمانی، ثابت دمایی، ثابت سرعت واکنش و انرژی فعال سازی هستند. این ثابت ها با استفاده از برازش غیرخطی نتایج رئومتر توسط نرم افزار متلب، محاسبه می شوند.  $R$  ثابت جهانی گازها و  $T$  دمای مطلق در هر نقطه است.

به علت این که فرآیند پخت واکنشی گرمازا است، باید گرمای حاصل از آن به عنوان منبع گرمایی در

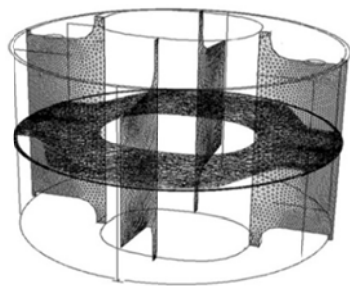


(الف)



(ب)

شکل ۲ قطعه لاستیکی (ابعاد به میلی‌متر) الف. نمای ایزومتریک، ب. نمای بالا (قسمت‌های سیاه‌رنگ نمایانگر فلز هستند)



شکل ۳ نمایش شبکه‌بندی قطعه لاستیکی بر روی صفحات تقارن آن

جدول ۳ مشخصات اصلی فرآیند قالب‌گیری تزریقی براساس داده‌های ثبت شده ماشین تزریق

دمای قالب	دمای تزریق	فشار تزریق	زمان تزریق
( $^{\circ}\text{C}$ )	( $^{\circ}\text{C}$ )	( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	(s)
۱۷۵	۶۵	۹۰	$25 \pm 1$

که در آن، A شاخص تغییرشکل پذیری سیال غیرنیوتنی است و مقدار میانگین لزجت را نشان می‌دهد. B مقدار انحراف از رفتار نیوتنی سیال،  $\dot{\gamma}$  سرعت برش و  $T_0$  دمای مرجع (معمولاً دمای آزمایش) است. ضرایب n و k با استفاده از برازش منحنی تغییرات لزجت- سرعت برش محاسبه می‌شود. با معلوم بودن این مقادیر، لزجت لاستیک در هر دما و نرخ برش قابل محاسبه خواهد بود.

### مدل عددی

**مدل هندسی و شبکه‌بندی دامنه حل.** قطعه مورد نظر که یافتن زمان پخت آن مورد نظر است، ضربه‌گیر خودروست که هندسه و ابعاد آن به میلی‌متر در شکل (۲) ارائه گردیده است. حجم داخلی که در شکل نیز مشخص گردیده است، فلز و سایر قسمت‌ها لاستیک است. در شکل (۳) شبکه‌بندی محیط حل نشان داده شده است. شبکه مورد نظر به اندازه کافی ظریف (۷۶۷۳۴۵ المان هرمی) انتخاب گردیده است؛ به‌طوری که حل عددی از تعداد نقاط شبکه مستقل می‌باشد.

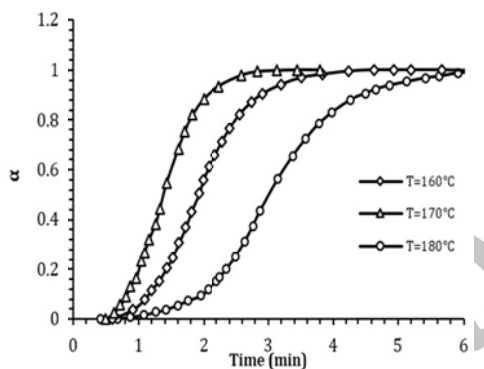
**شرایط مرزی.** لاستیک مذاب در ورود به قالب (نقطه تزریق در شکل (۲-ب)) دارای شرط فشار ورودی با دمای مشخص است. در واقعیت در هنگام پر شدن قالب هوای موجود از منفذهای موجود در قالب خارج می‌شود. بنابراین برای جلوگیری از محبوس ماندن هوا، در حل عددی نوار بالایی قالب به‌عنوان خروجی در نظر گرفته شده است تا هوای موجود به خارج هدایت گردد (شکل ۲-ب). تمامی دیواره‌های قالب دارای شرط مرزی دما ثابت می‌باشند. فرض عدم لغزش در مجاورت دیوار نیز برقرار است. پارامترهای اصلی فرآیند قالب‌گیری براساس داده‌های ثبت شده ماشین تزریق در جدول (۳) ارائه گردیده است.

## نتایج و بحث

در این مقاله به کمک روش حل عددی، شبیه‌سازی رایانه‌ای فرآیند پخت در تولید یک قطعه صنعتی که به شیوه قالب‌گیری تزریقی تولید شده است، ارائه گردیده است. برای این منظور یک برنامه کمکی که شامل معادلات سینتیک پخت لاستیک می‌باشد، به نرم‌افزار فلونت افزوده می‌شود و با حل هم‌زمان این معادلات و معادلات بقا، فرآیند پخت لاستیک شبیه‌سازی می‌شود و زمان پایان پخت پیشگویی می‌گردد.

شکل (۴) منحنی تغییرات گشتاور نسبت به زمان (منحنی رئومتري) نمونه آزمایشگاهی آمیزه لاستیک مورد استفاده در قطعه مورد نظر 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 می‌آید و سبب افزایش لزجت آمیزه می‌گردد. بنابراین گشتاور عکس‌العملی ناشی از نوسان نمونه افزایش می‌یابد. به کمک معادله (۱) می‌توان منحنی رئومتري را به منحنی درجه پخت-زمان تبدیل نمود.

می‌شود، با افزایش دما و به دلیل افزایش سرعت واکنش، اتصالات پلیمری سریع‌تر شکل می‌گیرد و در نتیجه آمیزه در زمان کمتری به پخت ( $\alpha \approx 1$ ) دست پیدا می‌کند. هرچه دمای واکنش پخت بیشتر شده است، شیب منحنی پخت نیز افزایش یافته است. به منظور محاسبه درجه و ثابت سرعت واکنش پخت در معادله (۲)، معادله سینتیکی پخت بر روی منحنی‌های شکل (۵) برازش شده است. مقادیر  $T_0$  و  $t_0$  نیز به‌طور مستقیم از داده‌های رئومتري و ثابت‌های  $k_0$  و  $E$  با استفاده از منحنی تغییرات  $\ln(k)$  برحسب معکوس دما ( $K$ ) محاسبه می‌شوند. پارامترهای سینتیک پخت در جدول (۴) ارائه شده‌اند.



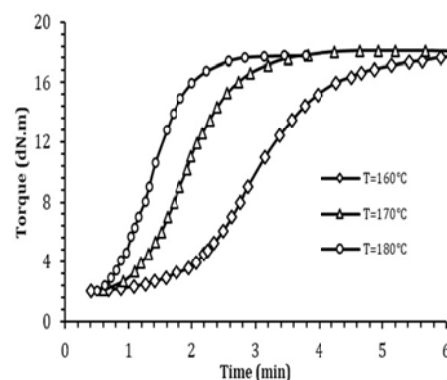
شکل ۵ منحنی درجه پخت برحسب زمان برای نمونه آزمایشگاهی آمیزه مورد استفاده در قطعه لاستیکی در دماهای متفاوت

جدول ۴ خواص سینتیک پخت لاستیک

براساس مدل کمال - سرور [۲۰]

$K_0$	$n$	$E$	$t_0$	$T_0$
$1/37 \times 10^{22}$	۴/۹۵۷	۳۵۸۸۳۲	$2/80 \times 10^{-11}$	۱۲۶۹۰

هم‌چنین با دقت در نتایج آزمایشگاهی مشاهده می‌شود که ثابت درجه واکنش پخت ( $n$ ) در هر دمایی مقدار متفاوتی دارد. در فرآیند پخت قطعات ضخیم (بیشتر از ۵ میلی‌متر) به سبب ضریب رسانش حرارت پایین لاستیک ( $0.2-0.4 \text{ W/m.K}$ )، اختلاف دمای قابل

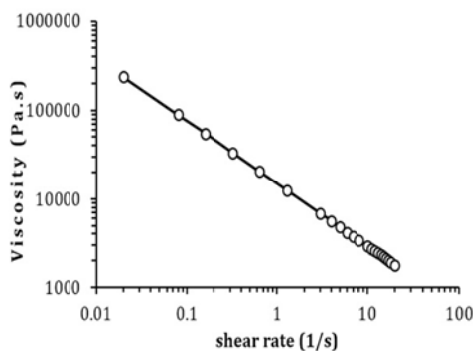


شکل ۴ منحنی گشتاور زمان برای نمونه آزمایشگاهی آمیزه مورد استفاده در قطعه لاستیکی در دماهای متفاوت

شکل (۵) تغییرات درجه پخت-زمان را برای دماهای مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده

اکنون با مشخص شدن تمامی پارامترهای معادلات سینیتیک پخت، امکان محاسبه درجه پخت در هر زمان با استفاده از هر دو مدل عادی کمال-سرور و تصحیح یافته وجود دارد.

برای مرحله تزریق نیز باید لزجت لاستیک مذاب که یک سیال غیرنیوتنی است، محاسبه شود. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، از آزمون گرانشی برای محاسبه تغییرات لزجت لاستیک مذاب استفاده شده است. با داشتن منحنی تغییرات لزجت لاستیک برحسب نرخ برش که در شکل (۷) نشان داده شده است، ثابت‌های مدل لزجت در معادله (۸) به کمک برآزش منحنی محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است که داده‌های تجربی لزجت در دمای  $120^{\circ}\text{C}$  ثبت شده‌اند. در جدول (۶) ثابت‌های مدل لزجت درج شده‌اند.



شکل ۷ منحنی تغییرات لزجت لاستیک مذاب برحسب نرخ برش در دمای  $120^{\circ}\text{C}$  با استفاده از آزمون گرانشی

جدول ۶ ثابت‌های مدل لزجت در دمای  $120^{\circ}\text{C}$

A	B	T0
۵۵۰۳	۰/۲۹۲۹	۳۹۳

در شکل (۸) نحوه پر شدن قالب توسط لاستیک در زمان‌های مختلف از شروع فرآیند تزریق نشان داده شده است. در این شکل کسر حجمی لاستیک در زمان‌های مختلف از شروع تزریق بر روی صفحه‌های تقارن مدل نشان داده شده است. براساس مشخصات ماشین تزریق زمان در جدول (۳) زمان لازم برای پر

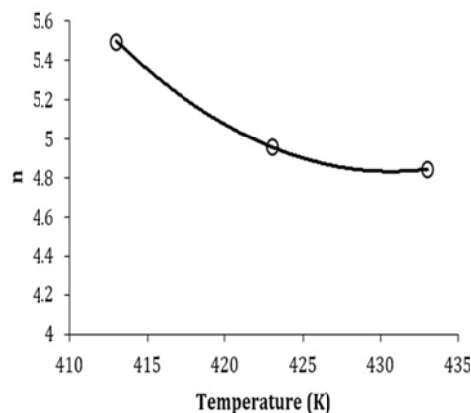
توجهی بین نواحی قطعه لاستیکی وجود دارد و بنابراین هر نقطه از آن درجه واکنش متفاوتی دارد. از آنجایی که پخت این قطعات در یک محدوده دمایی متفاوت اتفاق می‌افتد، لازم است تا مدل پختی توسعه داده شود که توانایی محاسبه n در هر دما را دارا باشد. در این قسمت مدل کمال-سرور، با استفاده از رسم منحنی تغییرات درجه واکنش برحسب دمای آزمایش که در شکل (۶) نشان داده شده است و با در نظر گرفتن یک تابع دو جمله‌ای برای n تصحیح شده است. بنابراین مدل سینیتیک پخت کمال-سرور در یک دمای ثابت به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\alpha = \frac{kt^{aT^2+bT+c}}{1 + kt^{aT^2+bT+c}} \quad (9)$$

در رابطه بالا، ضرایب a، b و c ثابت‌های منحنی درجه واکنش هستند و با استفاده از برآزش منحنی و تغییرات درجه واکنش برحسب دما محاسبه می‌شوند. این ضرایب در جدول (۵) درج شده‌اند.

جدول ۵ ضرایب معادله درجه ۲ درجه واکنش سینیتیک پخت

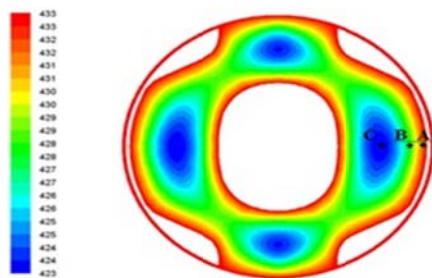
a	b	c
۰/۰۰۲۱۲	-۱/۸۳۰۴	۳/۹۸۹۹



شکل ۶ منحنی تغییرات درجه واکنش پخت برحسب دما



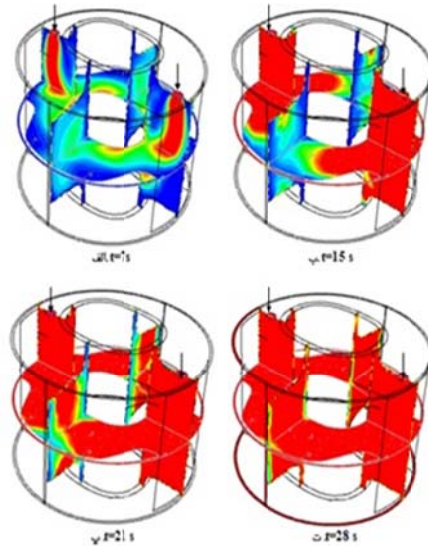
دمایی متفاوتی دارد. این اختلاف دما که مخصوصاً در قطعات ضخیم قابل توجه است، سبب می‌گردد که هر ناحیه از ضربه‌گیر و در هر زمان از فرآیند، درجه پخت متفاوتی داشته باشد. بنابراین نواحی لاستیک، مقادیر متفاوتی از درجه واکنش ( $n$ ) را تا انتهای فرآیند تجربه می‌کنند. لذا استفاده از مدل سینتیک پختی که توانایی محاسبه مقادیر مختلف درجه واکنش را برحسب زمان داشته باشد، ضروری است.



شکل ۹ توزیع پیوسته دما روی صفحه تقارن قطعه لاستیکی در زمان  $t=250$  s

در شکل (۱۰) توزیع پیوسته درجه پخت با استفاده از مدل پخت کمال-سرور تصحیح شده (معادله ۹) بر روی صفحه‌های تقارن ضربه‌گیر و در زمان‌های گوناگون از ابتدای فرآیند ولکانش ارائه گردیده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، در زمان  $t=250$  s واکنش پخت از لبه‌ها و نواحی نزدیک به قالب شروع گردیده است. از دیدگاه فیزیکی دمای این نقاط به دلیل مجاورت به قالب زودتر از سایر نقاط افزایش می‌یابد و سبب می‌شود که زودتر به پخت برسد. از نظر تئوری و طبق معادله (۷)، افزایش دما سبب می‌گردد که انتگرال محاسبه شده (دوره القا) در زمان کمتری به یک برسد و در نتیجه واکنش پخت زودتر شروع شود. در زمان  $t=350$  s نقاط نزدیک به قالب کاملاً پخت شده‌اند؛ در حالی که درجه پخت نقاط میانی ضربه‌گیر صفر است. همان‌طور که قبلاً بیان شد علت این رفتار در پایین بودن ضریب رسانش حرارتی لاستیک می‌باشد. در

شدن فضای قالب  $1 \pm 25$  ثانیه است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، حل عددی با دقت مناسبی این زمان را ۲۸ ثانیه پیش‌گویی کرده است.

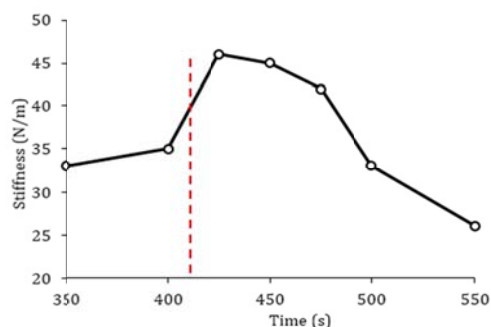


شکل ۸ نحوه پر شدن قالب توسط فاز لاستیک

پس از پر شدن کامل قالب، با جایگزین کردن شرط مرزی دیواره به جای ورودی فشار، دبی ورودی جریان صفر می‌شود و آمیزه در اثر نفوذ حرارت از دیواره قالب به سمت داخل پخت می‌شود. در شکل (۹) توزیع پیوسته میدان دما پس از گذشت ۲۵۰ ثانیه از شروع فرآیند بر روی صفحه تقارن ضربه‌گیر (در راستای محور آن) ارائه گردیده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اختلاف دمای زیادی بین بخش‌های مختلف ضربه‌گیر یعنی بین نقاط نزدیک به قالب و نقاط دور از آن به دلیل ضریب رسانش پایین لاستیک وجود دارد. چهار ناحیه در شکل با رنگ تیره مشخص است که با گذشت زمانی در حدود ۲۵۰ ثانیه از شروع گرما دادن، هنوز به دمای نهایی قالب نرسیده‌اند. سه نقطه متفاوت A، B و C در این شکل مشخص شده‌اند که موقعیت مختلفی نسبت به سطح قالب دارند. نقطه A نزدیک‌ترین و نقطه C دورترین نقطه به سطح قالب است. مشخص است که هر نقطه ضربه‌گیر تاریخچه

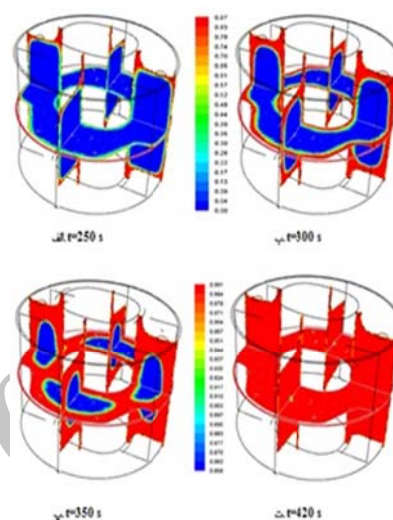
از فرآیند ولکانش، قطعه از قالب خارج و میزان استحکام آن سنجیده می‌گردد. نتایج آزمایش استحکام برای ضربه‌گیر در زمان‌های مختلف پخت در شکل (۱۲) ارائه شده است. از آنجا که در بهترین زمان پخت، قطعه بالاترین خواص مکانیکی از جمله استحکام را دارا است [3]، لذا هر زمان از فرآیند که قطعه بالاترین استحکام را داشته باشد به‌عنوان زمان پخت بهینه شناخته می‌شود. بنابراین در شکل (۱۲)، ضربه‌گیر در زمان  $t=427$  s دارای بیشترین استحکام می‌باشد و این زمان به‌عنوان زمان پایان پخت بهینه آزمایشگاهی شناخته می‌گردد. لازم به ذکر است که ضربه‌گیر رسانش لاستیک در حین فرآیند پخت به‌طور خطی با دما کاهش می‌یابد [5]. در این پژوهش ضربه‌گیر رسانش لاستیک قبل از واکنش پخت و دارای مقدار ثابت در کل فرآیند فرض شده است که این فرض موجب می‌گردد نواحی میانی لاستیک (نقطه C در شکل ۹) زودتر به دمای نهایی خود دست می‌یابد و زمان پخت، اندکی زودتر از معمول گزارش گردد.

بنابراین مشاهده می‌شود که مدل سینتیک پخت تصحیح شده در این پژوهش به‌دلیل در نظر گرفتن یک تابع درجه دوم برای تغییرات درجه واکنش پخت نسبت به دما، با دقت بیشتری زمان پایان پخت قطعه لاستیکی سه‌بعدی را پیش‌بینی کرده است. بنابراین می‌توان زمان پایان پخت را در قطعات پیچیده لاستیکی که در فرآیند قالب‌گیری تزریقی تولید می‌شوند، بدون نیاز به آزمون‌های سعی و خطا که منجر به افزایش ضایعات و هزینه‌های تولید می‌گردند، محاسبه نمود.

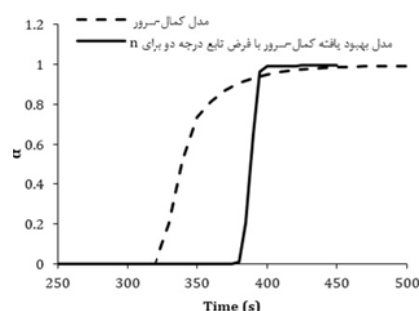


شکل ۱۲ منحنی تغییرات استحکام قطعه لاستیکی در زمان‌های مختلف از شروع فرآیند ولکانش

شکل (۱۱) منحنی درجه پخت-زمان قطعه لاستیکی با استفاده از دو مدل کمال-سرور عادی و تصحیح شده در این مقاله، با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، زمان پخت (معادل درجه پخت ۰/۹۹) در مدل معمولی کمال-سرور در حدود  $t=470$  s و در مدل تصحیح یافته در حدود  $t=400$  s می‌باشد.



شکل ۱۰ توزیع پیوسته میدان پخت قطعه لاستیکی در زمان‌های مختلف، در مدل معمولی کمال-سرور در حدود  $t=450$  s و در مدل تصحیح یافته در حدود  $t=420$  s می‌باشد.



شکل ۱۱ مقایسه منحنی درجه پخت - زمان برای دو مدل عادی و تصحیح یافته کمال-سرور

همان‌طور که قبلاً بیان شد، آزمون استحکام به‌منظور یافتن زمان پخت بهینه برای قطعات پیچیده انجام می‌گردد؛ بدین صورت که در زمان‌های مختلف

## نتیجه گیری

در این پژوهش فرآیند ولکانش لاستیک در تولید قطعات لاستیکی به روش قالب گیری تزریقی با هدف محاسبه زمان پخت مورد مطالعه عددی قرار گرفته است. به منظور محاسبه خواص سینتیک پخت، از داده های آزمایش رثومتري که به پخت یک نمونه آزمایشگاهی می پردازد، استفاده شده است. برای محاسبه پارامترهای مدل لزجت، از آزمایش گرانیوی سنجی و برای تعیین ظرفیت گرمای ویژه لاستیک از آزمایش گرماسنجی استفاده شده است. همچنین مدل سینتیک پخت لاستیک به منظور افزایش دقت، اصلاح شده است. مشخص گردید که مدل اصلاح شده با فرض یک تابع درجه دو برای درجه واکنش پخت، با دقت بالاتری زمان پخت قطعه لاستیکی را پیش بینی کرده است.

k سرعت معادله پخت

 $k_0$  ثابت سرعت معادله پخت $Q_t$  گرمای آزاد شده واکنش پخت تا زمان  $t$  (J) $Q_\infty$  کل گرمای آزاد شده واکنش پخت (J) $Q^\circ$  سرعت تولید حرارت (W)R ثابت جهانی گازها ( $\text{Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$ )

t زمان (s)

 $t_i$  دوره القا $t_0$  ثابت زمانی در معادله دوره القا

T دما (K)

 $T_0$  ثابت دمایی در معادله دوره القا

n درجه واکنش پخت

## علائم یونانی

 $\alpha$  درجه پخت $\gamma_0$  گشتاور در شروع واکنش پخت (dN.m) $\gamma_t$  گشتاور در زمان  $t$  (dN.m) $\gamma_\infty$  گشتاور در انتهای واکنش پخت (dN.m)

## تقدیر و تشکر

از همکاری صمیمانه گروه صنعتی پارت لاستیک در ارائه نتایج آزمایشگاهی تقدیر و تشکر می گردد.

## فهرست علائم

A شاخص تغییر شکل پذیری در مدل لزجت

B مقدار انحراف از رفتار نیوتنی در مدل لزجت

 $C_p$  گرمای ویژه ( $\text{JKg}^{-1}\text{K}^{-1}$ )E انرژی فعال سازی واکنش پخت ( $\text{Jg}^{-1}\text{mol}^{-1}$ )

## مراجع

1. Vergnad, J.M. and Rosca, I.D., "Rubber Curing and Properties", CRC Press, Taylor-Francis Group. New York pp. 1-11, (2009).
2. Holm, E.J. and Langtangen, H.P., "A Unified Finite Element Model For The Injection Molding Process", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 178, pp. 413-429, (1999).
3. Ramorino, G., Girardi, M., Agnelli, S. and Franceschini, A., "Injection Molding of Engineering Rubber Components: A Comparison Between Experimental Results and Numerical Simulation", *International Journal of Material Forming*, Vol. 3, pp. 551-554, (2010).
4. 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*, Vol. 51, pp. 257-263, (2010).
5. Ghoreishy, M.H.R. and Naderi, G., "Three Dimensional Finite Element Modeling of Rubber Curing Process", *Journal of Elastomers and Plastics*, Vol. 37, pp. 37-53, (2005).

6. Arrillaga, A., Zaldua, A. M.R., Atxurra, M. and Farid, A.S., "Techniques Used For Determining Cure Kinetics of Rubber Compounds", *European Polymer Journal*, Vol. 43, pp. 4783-4799, (2007).
7. M. Rafei, M.H.R. Ghoreishy, Naderi, G., "Developments of An Advanced Computer Simulation Technique for the Modeling of Rubber Curing Process", *Computational Materials Science*, Vol. 47, pp. 539-547, (2009).
8. Abhilash, P.M., Kannan, K. and Varkey, B., "Simulation of Curing of a Slab Rubber", *Materials Science and Engineering*, Vol. 168, pp. 237-241, (2010).
9. Ghosh P., Katare, S. and Caruthers, J.M., "Sulfur Vulcanization of Natural Rubber for Benzothiazole Accelerated", *Rubber Chemistry and technology*, Vol. 76, pp. 592-693, (2003).
10. Khor, C., Ariff, Y. 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", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 131-139, (2010).
11. Leroy, E., Souid, A. and Deterre, R., "A continuous kinetic model of rubber vulcanization predicting induction and reversion", *Polymer Testing*, Vol. 32, pp. 575-582, (2013).
12. Hosseini, M. and Razzaghi, M., "Vulcanization kinetics of nano-silica filled styrene butadiene rubber", *Polymer*, Vol. 55, pp. 6426-6434, (2014).
13. Dongcheol, C., Abdul Kader, M., Baik-Hwan, C., Yang, I. and Changwoon, N., "Vulcanization kinetics of nitrile rubber/layered clay nanocomposites", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 98, pp. 1688-1696, (2005).
14. Javadi, M., Moghiman, M., Erfanian, M.R. and Hosseini, N., "Numerical Investigation of Curing Process in Reaction Injection Molding of Rubber For Quality Improvements", *Key Engineering Materials*, Vol. 462, pp. 1206-1211, (2011).
15. 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", *Journal of Elastomers and Plastics*, Vol. 41, pp. 175-189, (2009).
16. Fan, R.L., Zhang, Y., Huang, C. and Gong, P., "Simulation and Verification For Sulphur Accelerated Vulcanization of Gum Natural Rubber Compound", *Rubber Chemistry and technology*, Vol. 75, pp. 287-295, (2002).
17. 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", *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, Vol. 23, pp. 121-131, (2010).
18. Isayev, A.I. and Deng, J. S., "Non Isothermal Vulcanization of Rubber Compounds", *Rubber Chemistry and Technology*, Vol. 61, pp. 340-361, (1988).
19. Tong, J. and Yan, X., "Non Isothermal vulcanization of rubber compounds", *Journal of Reinforced Plastic and Composites*, Vol. 22, pp. 983-1002, (2003).
20. Kamal, M. and Sourour, S., "Kinetics and Thermal Characterization of Thermoset cure", *Polymer Engineering and Science*, Vol. 13, pp. 590-599, (1973).
21. Del Coz, J. J., Diaz Garcia Nieto, P. J. and Bello Garcia, Guerrero Munoz, A., J., "Finite Volume Modeling of The Non-Isothermal Flow of a Non-Newtonian Fluid in a Rubber's Extrusion Die", *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 354, pp. 5334-5336, (2008).