

بررسی انتقال حرارت و توزیع دما در فرآیند پخت لاستیک با خواص فیزیکی متغیر در حالت سه بعدی

دکتر حسین شکوهمند

دانشیار گروه مهندسی مکانیک - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

مهندس ریاض ره انجام

کارشناس ارشد مهندسی مکانیک - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

چکیده

از آنجا که قطعات تزریق شده لاستیکی دارای سیکل پخت بوده و زمان این سیکل در مقایسه با زمان کل فرآیند تولید قابل توجه می باشد، کاهش این زمان یکی از اهداف موردنظر برای کاهش هزینه های تولید است. آنچه که در این مقاله دنبال شده تعیین کمترین زمان پخت با حصول اطمینان از کیفیت مطلوب قطعه می باشد. این پیش بینی زمان پخت از طریق حل معادله انتقال حرارت گذرا در داخل قطعه و یافتن چگونگی توزیع دما و درصد پخت در آن میسر گردیده است. معادله انتقال حرارت همراه با شرایط اولیه و مرزی در حالت سه بعدی و با روش عددی تفاضلات محدود حل شده و خواص فیزیکی لاستیک نیز بصورت تابعی خطی از دما منظور شده اند. اثر عوامل مهم در فرآیند پخت لاستیک در قالب یعنی اندازه قطعه، دمای اولیه لاستیک، دمای قالب و نوع آمیزه لاستیک مورد بررسی قرار گرفته است.

مقدمه

کاهش این زمان یکی از اهداف مهم برای کاهش هزینه های تولید می باشد. البته یافتن کمترین زمان پخت باید بگونه ای باشد که اطمینان لازم از کیفیت مطلوب قطعه فراهم آید. برای رسیدن به این هدف دانستن چگونگی توزیع دما و ارتباط آن با زمان در هر نقطه از لاستیک درون قالب لازم است. یافتن توزیع دما و درصد پخت در توده لاستیک با استفاده از نتایج اطلاعات سینتیک واکنش پخت، خواص حرارتی لاستیک و مدل حرارتی مناسب امکان پذیر است. از طریق موازنه حرارت داخلی حاصل از واکنش پخت و هدایت حرارتی در درون لاستیک و سطح مشترک آن با قالب می توان نحوه پیشرفت واکنش پخت را تعیین نمود. آنچه که در اینجا دنبال شده تعیین منحنی های توزیع دما و درصد پخت بر حسب زمان در درون لاستیک در حالت های یک، دو و سه بعدی و مقایسه آنها با یکدیگر است. برای یافتن اثر پارامترهای مهم در فرآیند

قالبگیری تزریقی یک فرآیند سیکی اتوماتیک است که در آن ترکیبات لاستیک بصورت خام وارد محفظه اسکرودر شده و در اثر اعمال فشار و حرارت به صورت سیالی لزج در می آید. آنگاه این سیال به داخل قالب که دمای آن به اندازه کافی برای شروع مرحله سخت شدن لاستیک (ولکانیزاسیون) بالا می باشد تزریق شده و پس از انجام پخت از آن خارج می گردد. بر این اساس کنترل دمای لاستیک در دو مرحله از تزریق دارای اهمیت است که یکی قبل از ورود به قالب و دیگری داخل آن می باشد. افزایش دمای لاستیک در مسیر قبل از قالب باید بگونه ای باشد که هم سیالیت لازم را فراهم کند و هم باعث شروع مرحله سخت شدن آن نگردد. دمای قالب نیز باید چنان باشد که بهترین کیفیت پخت در کل قطعه را فراهم آورد. از آنجا که زمان سیکل پخت قطعه در قالب نسبت به زمان کل فرآیند قابل توجه است،

تابعیت K از دما تابعیت آن از مکان را حذف کرد. به این ترتیب که با توجه به کم بودن اختلاف دمای نقاط مختلف قطعه در یک زمان، می توان در هر مرحله از زمان در حین پخت دمای متوسط کل قطعه (T_a) را محاسبه نموده و مقدار K را براساس این دمای متوسط بدست آورد. باین روش معادله دیفرانسیل حاکم بر انتقال حرارت به شکل زیر در می آید.

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \alpha \left[\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} \right] + \frac{G}{\rho C_p} \quad (2)$$

که در آن $\alpha = \frac{K}{\rho C_p}$ ضریب پخش حرارتی لاستیک بوده و خود تابعی از دما میباشد. در این رابطه برای محاسبه ρ ، C_p و K در دماهای مختلف مشابه آنچه که برای K بیان شد در هر مرحله از زمان از دمای متوسط کل قطعه استفاده میگردد. در فرآیند پخت لاستیک پارامتر G متناسب با سرعت واکنش پخت در نظر گرفته می شود.

$$\dot{G} = Q_m \frac{\delta S}{\delta t} \quad (3)$$

Q_m حرارت کل آزاد شده در فرآیند پخت بر واحد حجم لاستیک بوده و $S(x, y, z, T, t)$ درجه، حالت و یا درصد پخت لاستیک (State of cure ; SOC) می باشد که به صورت زیر تعریف می شود.

$$S = \frac{Q_t}{Q_m} \quad (4)$$

Q_t گرمای آزاد شده در اثر واکنش پخت تا زمان t می باشد. برای تعیین واکنش پخت ($\frac{\delta S}{\delta t}$) از طریق آزمایش روشهای مختلفی وجود دارد ولی بهترین و معمولترین روش بر پایه اندازه گیریهای تست (Differential Scanning Calorimetry) DSC می باشد. در این آزمایش می توان گرمای ناشی از واکنش پخت را بصورت تابعی از زمان (تکدما - با ثابت نگهداشتن دمای قطعه) و با بصورت تابعی از دما (دینامیک - با ثابت نگهداشتن نرخ گرمایش قطعه) بدست آورد. سه مدل ریاضی که در مقایسه با نتایج حاصل از DSC

پخت یعنی اندازه قطعه، دمای اولیه، دمای اولیه، لاستیک، دمای قالب و نوع آمیزه لاستیک، معادله حاکم در حالت ساده تر یک بعدی یا به عبارتی در ضخامت یک صفحه لاستیکی حل گردیده است. همچنین شرایط خاصی که در آن می توان حالت سه بعدی را به حالت های یک یا دو بعدی تبدیل نمود مورد بررسی قرار گرفته است. نکته دیگری که در این بررسی مورد توجه قرار گرفته وابستگی خواص فیزیکی لاستیک به دما می باشد که این وابستگی برای جرم حجمی (ρ)، ضریب هدایت حرارتی (K)، ظرفیت گرمایی ویژه (C_p) و ضریب پخش حرارتی (α) بصورت تابعی خطی از دما منظور شده است.

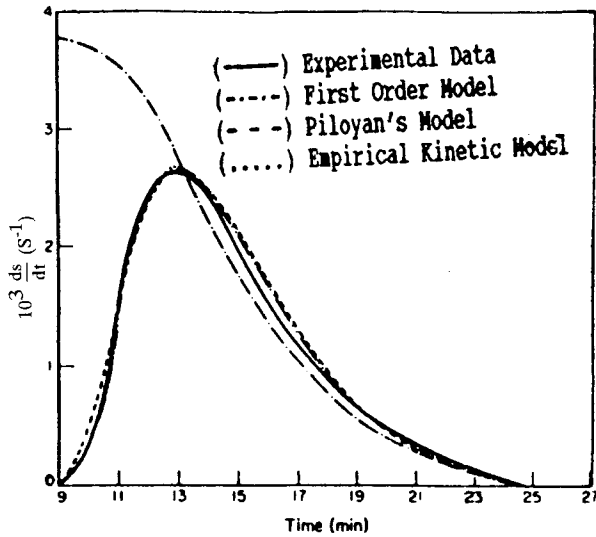
لازم به ذکر است که در عموم مقالاتی که تاکنون در این زمینه منتشر گردیده، مسئله تنها در حالت یک بعدی حل شده و خواص فیزیکی لاستیک نیز ثابت فرض شده اند.

معادلات حاکم بر انتقال حرارت

فرض می شود که لاستیک بصورت سیالی لزج با دمای اولیه T_0 وارد قالبی میگردد که دمای سطوح آن در طول فرآیند ثابت و برابر با T_m می باشد. از موازنه انرژی بین جریان حرارتی هدایت شده از سطح قالب و گرمای حاصل از واکنش پخت در یک المان سه بعدی مکعبی، رابطه عمومی هدایت حرارتی در حالت گذرا نتیجه می شود.

$$\rho C_p \frac{\delta T}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta x} \left(K \frac{\delta T}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(K \frac{\delta T}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(K \frac{\delta T}{\delta z} \right) + \dot{G} \quad (1)$$

در این رابطه ρ جرم حجمی C_p ظرفیت گرمایی ویژه و K ضریب هدایت حرارتی لاستیک و G نرخ تولید حرارت داخلی بر واحد حجم لاستیک در اثر واکنش پخت می باشد. چنانچه گفته شد خواص فیزیکی لاستیک یعنی ρ ، C_p و K بصورت تابعی از دما در نظر گرفته می شوند. از آنجا که K تابع دما و دما تابع مکان است پس K نیز تابعی از مکان خواهد بود. برای ساده کردن رابطه (۱) می توان با حفظ



شکل ۱ - مقایسه مدل‌های پیشنهادی برای سرعت واکنش پخت لاستیک [مرجع ۱۲]

این شکل بوضوح اختلاف بین مدل‌ها را بیان می‌کند. چنانکه دیده می‌شود مدل مرتبه یک بیان‌کننده رفتار لاستیک در مراحل اولیه پخت نیست ولی دو مدل دیگر بخوبی منطبق بر نتایج تجربی هستند. در این بررسی مدل دوم یعنی مدل پیلویان بعنوان مدل ریاضی سینتیک پخت اختیار شده است. از تلفیق روابط (۲)، (۳)، (۴)، (۵) و (۶) دو معادله دیفرانسیل زیر بعنوان روابط اصلی که بطور همزمان برای یافتن توزیع دما و درصد پخت در لاستیک بکار می‌روند بدست می‌آیند.

برای بیان سینتیک پخت ارائه شده‌اند عبارتند از:

$$\frac{\delta S}{\delta t} = \lambda (1-S)^n \quad (5)$$

$$\frac{\delta S}{\delta t} = \lambda S^m (1-S)^n \quad (6)$$

$$\frac{\delta S}{\delta t} = \frac{n}{\lambda} t^{1-n} S^2 \quad (7)$$

ضریب λ در این رابطه بصورت رابطه واکنش آرنیوس بیان می‌شود.

$$\lambda = A \exp(-E_a / RT) \quad (8)$$

که در آن ضریبی ثابت E_a انرژی واکنش لاستیک، R ثابت گازها $(8.314 \times 10^{-3} \frac{KJ}{mol.K})$ و T دمای مطلق لاستیک می‌باشد. مدل اول به مدل سینتیک مرتبه n (یا مرتبه یک به جزء $n = 1$) معروف است. مدل دوم که یک مدل پیچیده‌تر بوده و توسط Piloyan و همکارانش ارائه گردیده است را می‌توان مدل سینتیک مرتبه $m+n$ نامید. مدل سوم یک مدل تجربی پیشنهادی برای ایجاد ارتباط مستقیم بین سرعت واکنش با زمان آن است. هر سه این مدل‌ها براساس سینتیک پخت تک‌دما بیان شده و ثابتهای آن از آنالیز منحنی حاصل از تست بدست DSC می‌آیند. شکل (۱) مقایسه این مدل‌های پیشنهادی برای یک آمیزه لاستیک را بایکدیگر و نیز با نتایج تجربی حاصل از تست DSC نشان می‌دهد [۱۲]

$$\frac{\delta T(x,y,z,t)}{\delta T} = \alpha(T_a) \left[\frac{\delta^2 T(x,y,z,t)}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T(x,y,z,t)}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 T(x,y,z,t)}{\delta z^2} \right] + \frac{Q_m}{\rho(T_a)C_p(T_a)} \frac{\delta S(x,y,z,t)}{\delta t} \quad (9)$$

$$\frac{\delta S(x,y,z,t)}{\delta T} = A \exp[-E_a / RT(x,y,z,t)] S^m(x,y,z,t) [1-S(x,y,z,t)]^n \quad (10)$$

$L \times H \times W$ فرض شود، شرایط اولیه و مرزی این دستگاه معادلات عبارتند از:

اگر قالب به شکل مکعب مستطیل به ابعاد

$$\left\{ \begin{array}{l} t = 0, \left\{ \begin{array}{l} 0 \leq x \leq L \\ 0 \leq y \leq H \\ 0 \leq z \leq W \end{array} \right. \Rightarrow T(x,y,z) = T_0, S(x,y,z) = 0 \\ t \leq 0, \left\{ \begin{array}{l} x < 0, x > L \\ y < 0, y > H \\ z < 0, z > W \end{array} \right. \Rightarrow T(x,y,z) = T_m \end{array} \right. \quad (11)$$

خواص فیزیکی لاستیک

موارد انتخاب شده برای بررسی فرآیند پخت براساس مرجع [۱] می باشد این مواد از نوع لاستیک SBR (Styrene Butadiene Rubber) بوده و نوع و میزان عناصر تشکیل دهنده هر آمیزه در جدول (۱) ارائه گردیده است.

$T(x,y,z,t)$ و $S(x,y,z,t)$ دما و درصد پخت لاستیک هستند که باید برای $t > 0$ و $0 \leq x \leq L$ و $0 \leq y \leq H$ و $0 \leq z \leq W$ با استفاده از معادلات (۹) و (۱۰) و شرایط اولیه و مرزی (۱۱) محاسبه گردند. این معادلات حاکم را می توان برای حالت‌های خاص دوبعدی و سه بعدی همراه با شرایط اولیه و مرزی بصورت ساده تر بیان نمود.

جدول ۱ - نوع و میزان عناصر تشکیل دهنده سه نوع آمیزه لاستیک مرجع [۱]

phr	SBR-N	SBR-C	SBR-S
SBR 1500	70.91	70.91	70.91
SBR 1712	40.00	40.00	40.00
Znic oxide	2.50	2.50	2.50
Paraffine	1.00	2.50	2.50
TMQ	1.00	1.00	1.00
Aromatic oil	0.00	10.00	10.00
Carbon black HAF	0.00	54.00	0.00
Silica	0.00	0.00	54.00
Sulfur	1.90	1.90	1.90
CBS	1.07	1.07	1.07
TMTD	0.31	0.31	0.31
Total	119.69	183.69	183.69

بهبود دهنده خواص فیزیکی، Silica، بعنوان تقویت کننده قوی، Sulfur بعنوان عامل پخت، CBS بعنوان شتاب دهنده متوسط و TMTD بعنوان شتاب دهنده سریع در

قابل ذکر است که Znic oxide بعنوان فعال کننده، Paraffine بعنوان روان کننده و محافظ سطح، TMQ بعنوان ضد اکسید و ضد ازن، Aromatic Oil بعنوان نرم کننده، Carbon Black HAF بعنوان

ساختار آمیزه لاستیکی بکار می روند. خواص فیزیکی و حرارتی این سه نوع آمیزه جدول ۲ - خواص فیزیکی و حرارتی سه نوع آمیزه لاستیک [مرجع ۱]

property	SBR-N	SBR-C	SBR-S
Q0 (KJ/m)	25840	43200	33235
Ea (KJ/mol)	94.1	68.1	102.3
m	0.9	0.67	0.44
n	1.3	1.09	1.02
A (1/sec.)	1.8E9	1.09	1.02
K (W/m.'c)	.116-.0000855T	.112-.0000825T	.114-.000084T
P (Kg/m)	966-.627T	1144-.743T	1169-.759T
CP (KJ/Kg.'c)	1.117+.00341T	1.024+.00296T	1.114+.00323T
C (m/Sec.)	(10.031-.02092T)E-8	(9.395-.01959T)E-8	(8.597-.017993T)E-8

دما منظور شده‌اند. برای یافتن این تابعیت خطی از دما از نرخ تغییرات هر یک از پارامترها نسبت به دما که بطور متوسط برای عموم شده لاستیکها ارائه شده استفاده گردیده است [۱۰]. این نرخ تغییرات عبارتند از:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} &= -6.6 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C} & \frac{1}{C_p} \frac{dC_p}{dt} &= +2.7 \times 10^{-3} / ^\circ\text{C} \\ \frac{1}{K} \frac{dK}{dT} &= -7.5 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C} & \frac{1}{\alpha} \frac{d\alpha}{dT} &= -2.2 \times 10^{-3} / ^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (12)$$

پارامترهای ρ , C_p , K و α بعنوان خواص حرارتی عمومی مواد بوده و برای تعیین آنها بصورت یک مقدار متوسط و ثابت روشهای استاندارد موجود است [۱۲]. ولی چنانکه گفته شد و در جدول (۲) نیز دیده می شود در اینجا این مقادیر بصورت تابعی از

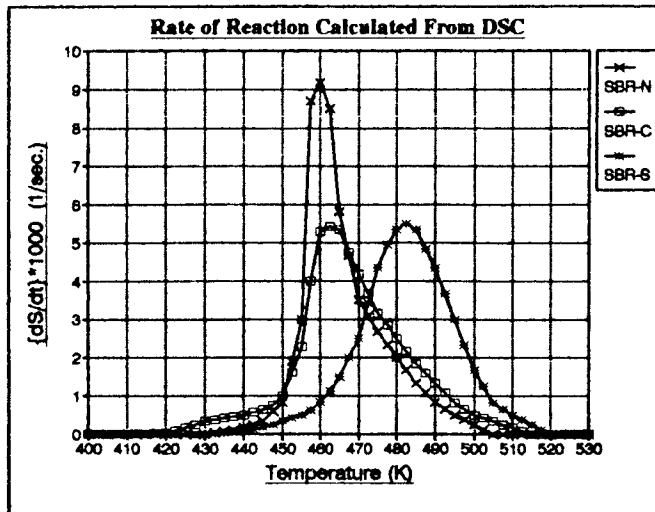
$$B = B_0(T_0) + \frac{1}{B} \frac{dB}{dT} B_0(T_0) [T - T_0] \quad (13)$$

T_0 دمای مرجعی است که در آن پارامتر B بدست آمده است. توابع خطی ارائه شده در جدول (۲) براساس این رابطه و مقادیر ارائه شده در مرجع [۱] بدست آمده‌اند. نکته قابل ذکر دیگر آن است که این خواص فیزیکی علاوه بر تابعیت از دما تابعی از درصد پخت لاستیک (در نتیجه تابعی از مکان) نیز می‌باشند. چرا که نقاط مختلف قطعه در هنگام پخت

این روابط نشان می دهد که ۱۰۰ درجه افزایش دمای لاستیک باعث ۶/۶ درصد کاهش ρ ، ۲۷ درصد افزایش C_p ، ۷/۰ درصد کاهش K و ۲۲ درصد کاهش α خواهد شد. حال اگر براساس روشهای موجود مقدار این خواص در یک دمای متوسط بصورت ثابت تعیین گردد با توجه به این نرخ تغییرات می توان برای هر یک از پارامترهای فوق یک رابطه خطی بدست آورد که مدل ریاضی تغییرات آن نسبت به دما را نشان دهد. این مدل را می توان برای پارامتر فرضی B بصورت زیر نوشت:

مدل سینتیک پخت یعنی n, m, E_a, Q_m و A تنها از نتایج حاصل از تست DSC استفاده می شود [۱]. شکل (۲) تغییرات سرعت واکنش پخت نسبت به دما را براساس این آزمایش برای هر سه آمیزه لاستیک نشان می دهد.

دارای درصد پخت متفاوت و لذا دارای ماهیتی متفاوت هستند. ولی بدلیل عدم توانائی در مدل کردن این تابعیت تاکنون هیچگاه خواص حرارتی لاستیک بعنوان تابعی از درصد پخت آن در نظر گرفته نشده اند. برای تعیین تمامی پارامترهای تنها مشخصه



شکل ۲ - تغییرات سرعت واکنش پخت برحسب دما [مرجع ۱]

لاستیک (T_c)، دمای قالب (T_m)، خواص حرارتی مشخصه مدل سینتیک پخت (A, n, m, E_a, Q_m)، خواص فیزیکی بصورت تابعی خطی از دما $[\alpha(T), C_p(T), \rho(T)]$ و مقدار پیشرفت زمانی (Δt). حل معادلات حاکم بروش عددی تفاضلات محدود (Finite Difference) صورت گرفته است.

الف) حالت یک بعدی

معادلات حالت یک بعدی براساس ورودیهای مختلفی که از ترکیب پارامترهای زیر حاصل شده اند حل گردیده است.

حل معادلات برای شرایط مختلف و ارائه نتایج

برای یافتن اثر پارامترهای مهم در فرآیند پخت لاستیک یعنی اندازه قطعه، دمای اولیه لاستیک، دمای قالب و نوع آمیزه لاستیک، معادلات حاکم در حالت یک بعدی یا به عبارتی در ضخامت یک صفحه لاستیکی حل شده است. در حالتی دو و سه بعدی تنها اثر اندازه قطعه مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل از این سه حالت با یکدیگر مقایسه گردیده است. ورودیهای برنامه کامپیوتری نوشته شده برای حل عددی معادلات عبارتند از: هندسه قطعه، تعداد نقاط تشکیل دهنده شبکه در قطعه، دمای اولیه

$$\text{Mold} = 2,10,30 \text{ mm}$$

$$T_c = 100, 110, 120^\circ \text{ C}$$

$$\text{Rubber Compound} = \text{SBR-N}, \text{SBR-C}, \text{SBR-S}$$

$$T_m = 150, 160, 180^\circ \text{ C}$$

برای حل معادلات در حالت‌های یک بعدی و دوبعدی، پیش بینی شرایطی از حالت سه بعدی که بتوان آن را بصورت یک‌بعدی و یا دوبعدی حل نمود مورد بررسی قرار گرفته و نتایج برای نقطه مرکز هریک از قطعات در شکل‌های ۳۳ تا ۳۶ ارائه گردیده است.

و) مقایسه تأثیر خواص حرارتی متغیر و ثابت

در این بخش اختلاف حاصل از ثابت یا متغیر (تابعی از دما) فرض نمودن خواص حرارتی بررسی شده و نتایج برای نقطه مرکز قطعه $30 \times 30 \times 30$ mm در شکل‌های ۳۷ و ۳۸ نشان داده شده است.

ز) مقایسه محاسبات تئوریک و نتایج تجربی

برای حصول اطمینان از محاسبات تئوریک، در شکل‌های ۳۹ تا ۴۱ نمودار توزیع دمای بدست آمده از محاسبات همراه با روند تغییرات دمای اندازه گیری شده در قالب برای سه آمیزه موردنظر [۱] ارائه گردیده است.

بحث و بررسی نتایج

قبل از بحث در ارتباط با هر یک از گروه‌های نتایج و بررسی پارامترهای مؤثر بر فرآیند پخت، نگرشی مجرد به نحوه توزیع دما و توزیع درصد پخت که تقریباً در تمام شکلها با کمی اختلاف مشاهده می‌شود لازم به نظر می‌رسد.

چنانکه در منحنی های توزیع دما دیده می‌شود ابتدا به دلیل اختلاف دمای قالب و لاستیک، گرما از طریق هدایت حرارتی از قالب به لاستیک منتقل شده و باعث افزایش دمای آن میگردد. براساس شکل (۲) وقتی دمای لاستیک به مقدار لازم برسد واکنش گرمای داخلی شروع شده و از این پس افزایش دمای لاستیک در اثر دو عامل هدایت حرارتی از قالب و گرمای تولید شده در اثر واکنش شیمیایی پخت

نتایج حاصل عبارتند از:

- نمودار توزیع دما و درصد پخت برحسب زمان برای نقاط مختلف قطعه جهت بررسی اثر ضخامت آن (شکل‌های ۳-۸).

- نمودار توزیع دما و درصد پخت برحسب زمان برای نقطه میانی قطعه جهت بررسی اثرات دمای اولیه لاستیک، دمای قالب و نوع آمیزه لاستیک (شکل‌های ۹ تا ۱۴).

ب) حالت دوبعدی

در این حالت تنها اثر اندازه قطعه موردنظر بوده و ابعاد $10 \times 10 \times 10$ mm، $2 \times 2 \times 2$ mm و $30 \times 30 \times 30$ mm برای نقطه منظور شده است. نتایج بصورت نمودار توزیع دما و درصد پخت برحسب زمان برای نقطه مرکز و دو نقطه روی اضلاع مربع ارائه گردیده است. (شکل‌های ۱۵ تا ۲۰).

ج) حالت سه بعدی

در این حالت نیز تنها اثر اندازه قطعه مورد بررسی قرار گرفته و ابعاد $10 \times 10 \times 10$ mm، $2 \times 2 \times 2$ mm و $30 \times 30 \times 30$ mm برای نقطه منظور شده و نتایج بصورت نمودار توزیع دما و درصد پخت بر حسب زمان برای نقطه مرکز و سه نقطه روی وجوه مکعب ارائه گردیده است (شکل‌های ۲۱ تا ۲۶).

د) مقایسه حالات یک، دو و سه بعدی

این مقایسه برای سه اندازه ذکر شده در هر حالت برای نقطه مرکز قطعه در شکل‌های ۲۷ تا ۳۲ ارائه شده است.

ح) شرایط تبدیل حالت سه بعدی به یک بعدی یا دوبعدی

با توجه به سادگی مدلسازی و زمانبری کمتر

می‌باشد. این مرحله تا رسیدن دمای لاستیک به دمای قالب ادامه می‌یابد و پس از آن افزایش دمای لاستیک تنها در اثر تولید حرارت داخلی خواهد بود. البته بدلیل بالاتر بودن دمای لاستیک از دمای قالب بخشی از حرارت تولیدی، از طریق هدایت حرارتی به قالب پس داده می‌شود. در مرحله آخر، واکنش گرمای داخلی خاتمه یافته و دمای لاستیک کاهش می‌یابد تا به دمای قالب برسد. مشابه این بررسی را می‌توان در مورد منحنی توزیع درصد پخت نیز انجام داد. افزایش دمای لاستیک باعث شروع واکنش گرمای داخلی شده و درصد پخت را سریعاً افزایش می‌دهد و پس از خاتمه واکنش، درصد پخت بصورت خیلی کند سیر صعودی خود را ادامه می‌دهد تا فرآیند پخت تکمیل گردد. با این نگرش کلی حال میتوان خیلی کند سیر صعودی خود را ادامه می‌دهد تا فرآیند پخت تکمیل گردد. با این نگرش کلی حال میتوان جزئیات نتایج و نقش عوامل موثر بر آن را مورد بررسی قرار داد.

۱ - براساس شکل‌های ۳ تا ۸ وقتی ضخامت قطعه کم باشد (قطعه کوچک باشد) تمام توده لاستیک بطور یکنواخت پخت می‌شود در حالیکه در قطعات بزرگ عدم یکنواختی توزیع دما و درصد پخت کاملاً مشهود است. زمان لازم برای رسیدن به پخت نهائی تابع اندازه قطعه است و برای نقاط مختلف بویژه در قالب‌های ضخیم بسیار متفاوت است که باید مورد توجه قرار گیرد چرا که براین اساس سطوحی از لاستیک که در تماس با قالب هستند سریع پخت می‌شوند در حالیکه نقاط داخلی قطعه تنها درصدی از پخت را دارا می‌باشند. در این حالت باقی ماندن قطعه در قالب برای تکمیل پخت تمامی قطعه باعث تخریب سطوح آن میگردد. اختلاف موجود بین توزیع دما و درصد پخت در نقاط مختلف قطعه بویژه در قطعات بزرگ در اثر کم بودن هدایت حرارتی و ضریب پخش حرارتی لاستیک است.

۲ - براساس شکل‌های ۹ تا ۱۰ هرچه دمای اولیه لاستیک بیشتر باشد زمان لازم برای پخت نهائی کمتر

است چرا که دمای لاستیک به دمای لازم برای شروع واکنش پخت نزدیکتر میگردد. البته این اثر چندان قابل توجه نیست و با توجه به اهمیت کنترل دمای لاستیک قبل از ورود به قالب برای جلوگیری از سخت شدن آن، افزایش دمای اولیه لاستیک به میزان زیاد پیشنهاد نمی‌گردد.

۳ - براساس شکل‌های ۱۱ و ۱۲ فرآیند پخت بشدت تابع دمای قالب است. هرچه دمای قالب بیشتر باشد زمان لازم برای رسیدن به پخت نهائی کمتر خواهد بود. لذا تا آنجا که ماهیت قطعه اجازه می‌دهد باید برای کاهش زمان پخت دمای قالب را بالا برد به شرطی که این افزایش باعث تخریب سطح قطعه نگردد.

۴ - براساس شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نحوه توزیع دما و درصد پخت در قطعه به شدت تابع نوع آمیزه لاستیک است. این تأثیر علاوه بر خواص فیزیکی و حرارتی ناشی از انتالپی آزاد شده در واکنش پخت است که اختلاف آن را می‌توان برای سه آمیزه موردنظر در شکل (۲) مشاهده نمود. چنانکه برای آمیزه SBR - C دیده می‌شود افزودن عنصر تقویت کننده کربن به لاستیک علاوه بر بهبود خواص مکانیکی باعث بهبود فرآیند پخت آن نیز می‌گردد ولی در آمیزه SBR - S عنصر تقویت کننده سیلیکا اگرچه خواص مکانیکی را بسیار بهبود می‌بخشد ولی در فرآیند پخت نقش تخریبی دارد. این اختلاف تأثیر بدلیل خاصیت اسیدی کربن و خاصیت بازی سیلیکا می‌باشد چراکه سولفور بعنوان عامل پخت لاستیک دارای خاصیت اسیدی است.

۵ - براساس شکل‌های ۱۵ تا ۲۰ در حالت دوبعدی افزایش سطح قطعه باعث افزایش زیاد زمان پخت آن میگردد. اختلاف بین نحوه توزیع دما و درصد پخت بین نقطه مرکز و نقاط سطحی قطعه در سطوح بزرگتر مشهود است.

۶ - براساس شکل‌های ۲۱ تا ۲۶ در حالت سه بعدی افزایش حجم قطعه باعث افزایش زیاد زمان پخت آن میگردد. اختلاف بین نحوه توزیع دما و درصد پخت

بین نقطه مرکز و نقاط سطحی قطعه در قطعات بزرگتر دیده می‌شود.

۷- بر اساس شکل‌های ۲۷ تا ۳۲ برای قطعه کوچک اختلافی بین حالات یک، دو و سه بعدی دیده نمی‌شود ولی هرچه قطعه بزرگتر می‌شود این اختلاف بوضوح مشاهده می‌گردد. برای قطعه بزرگتر زمان پخت در حالت سه بعدی کمتر از حالات دو و یک‌بعدی است و دلیل آن جریان حرارتی از قالب در سه جهت به قطعه می‌باشد. افزایش دمای ماکزیمم در حالت سه بعدی نیز بدلیل محبوس شدن گرمای داخلی در قطعه بر اثر کم بودن ضریب هدایت حرارتی و ضریب پخش حرارتی لاستیک می‌باشد. نکته مهم آن است که برای قطعات بزرگ شبیه‌سازی مسئله با حالت یک بعدی به هیچ وجه به واقعیت نزدیک نیست. بطور مثال در قالب ۲۰ mm زمان لازم برای پخت کامل قطعه در حالت یک بعدی حدود ۶۰ درصد بیش از زمانی است که در حالت سه بعدی بدست آمده است.

۸- اگر چه برای قطعات بزرگ لاستیکی مدلسازی فرآیند پخت حتماً باید در سیستم سه بعدی انجام پذیرد اما در عمل در شرایط خاص می‌توان از سیستم یک بعدی یا دوبعدی استفاده نمود بدون اینکه در واقعیت مسئله اختلالی ایجاد گردد. براساس شکل‌های ۲۳ و ۲۴ اگر دو بعد قطعه بیش از چهاربرابر بعد سوم آن باشد با خطای بسیار ناچیزی می‌توان حالت سه بعدی حل مسئله را به حالت یک بعدی تبدیل نمود. براین اساس می‌توان کلیه قطعات لاستیکی صفحه ای شکل و یا قطعات منشوری پیوسته ای با طول زیاد را در یک سیستم یک بعدی مدلسازی حل نمود. براساس شکل‌های ۲۵ و ۲۶ اگر یک‌بعد قطعه بیش از چهاربرابر دو بعد دیگر آن باشد تبدیل حالت سه بعدی حل مسئله به حالت دوبعدی با خطای بسیار ناچیزی همراه خواهد بود. با این نتیجه میتوان در کلیه واشرها با هر سطح مقطعی (از جمله ارینگ‌ها) از انتقال حرارت در جهت محیط واشر صرف‌نظر نمود و انتقال حرارت را تنها در سطح مقطع بررسی کرد. این توانایی تبدیل در ساده کردن مدلسازی مسئله و

کاهش زمان حل آن بسیار حائز اهمیت است.

۹- براساس شکل‌های ۲۷ و ۲۸ ثابت فرض نمودن خواص حرارتی، زمان لازم برای پخت کامل قطعه را کمتر از حالت واقعی پیش بینی می‌کند. اگر چه این اختلاف برای قطعات کوچکتر ناچیز می‌باشد ولی در قطعات بزرگتر این اختلاف بیشتر خود را نشان میدهد. براین‌اساس در یک طراحی صحیح برای قطعات بزرگ لاستیکی در نظر گرفتن تابعیت خواص حرارتی لاستیک از دما لازم به نظر می‌رسد.

۱۰- براساس شکل‌های ۲۹ تا ۴۱ می‌توان گفت محاسبات انجام شده برای پیش بینی توزیع دما و زمان پخت تا حد قابل قبولی منطبق بر نتایج تجربی است و این تصدیق‌کننده محاسبات تئوری انجام شده می‌باشد.

نتیجه گیری نهائی

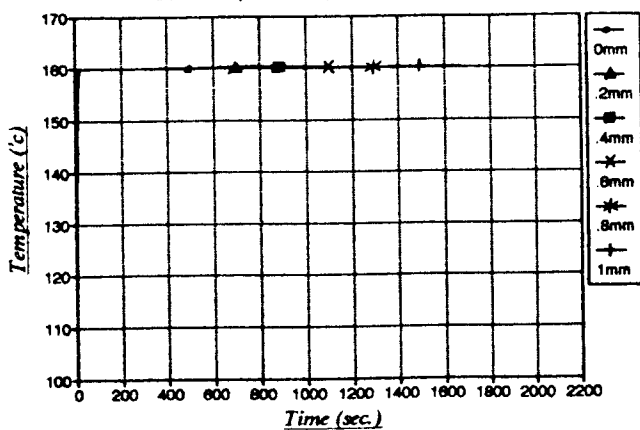
اهمیت پارامتر زمان در فرآیند پخت لاستیک را می‌توان از دو جنبه مطرح نمود که یکی ماندن لاستیک مذاب در مسیر تزریق و احتمال پخت زودرس آن قبل از ورود به قالب و دیگری تأثیر آن بر زمان کل قالبگیری قطعه است. لذا کاهش هرچه بیشتر زمان پخت هدفی است که حصول آن دارای اهمیت بسزایی است. براین‌اساس و با توجه به بررسی نتایج بدست آمده می‌توان گفت:

- پارامترهای اندازه قطعه، دمای اولیه لاستیک، دمای قالب و نوع آمیزه لاستیک چهار عامل مؤثر در فرآیند پخت لاستیک هستند.
- در قطعات کوچک لاستیکی علاوه بر کم بودن زمان پخت، مشکل عدم یکنواختی پخت ایجاد نمی‌گردد. در این حالت پارامترهای فوق‌الذکر تأثیر چندانی بر زمان پخت ندارند و اختلاف بین حالات یک، دو و سه بعدی نیز ناچیز است.
- برای کاهش زمان پخت یک قطعه بزرگ با ابعاد جنس مشخص باید تا حد امکان دمای اولیه لاستیک و دمای قالب را بالا برد. اثر افزایش دمای قالب خیلی

بیشتر از اثر افزایش دمای اولیه لاستیک است .
 - برای قطعات بزرگ حتماً باید از مدلسازی در سیستم سه بعدی استفاده کرد تا به واقعیت مسئله نزدیک باشد.
 - اگر یک بعد قطعه حدوداً ۱/۴ دو بعد دیگر آن باشد میتوان برای حل مسئله بجای سیستم سه بعدی از سیستم یک بعدی استفاده نمود.
 - اگر یک بعد قطعه حدوداً ۴ برابر دو بعد دیگر آن باشد میتوان برای حل مسئله بجای سیستم سه بعدی از سیستم بعدی استفاده نمود.
 - در قطعات بزرگ لاستیکی لازم است که تابعیت خواص فیزیکی لاستیک از دما در نظر گرفته شود.
 - مجانبت افقی انتهای منحنی درصد پخت باعث ایجاد اختلاف زیاد بین زمانهای لازم برای پخت می برد.

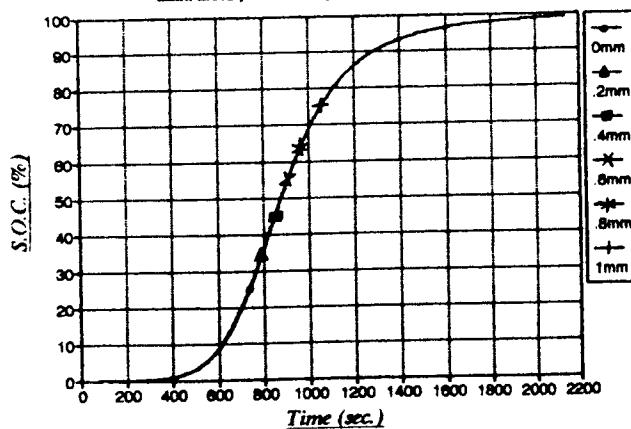
۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ درصد میگردد. لذا در برخی موارد براساس خصوصیت انتظاری از قطعه، فرآیند پخت کامل آن در داخل قالب صورت نمی گیرد بلکه مثلاً پس از ۹۰ درصد پخت، قطعه از قالب خارج میگردد که براساس شرایط حاکم بر قالبگیری ممکن است پخت قطعه در دمای محیط ادامه یابد و یا در صورت نیاز داخل آن انجام شود. این کار برای قطعات بزرگ که عدم یکنواختی پخت بین نقاط مختلف قطعه بسیار آشکار است امری لازم محسوب میگردد چرا که انتظار برای رسیدن نقاط داخلی قطعه به یک درصد قابل توجه از پخت علاوه بر افزایش بسیار زیاد زمان پخت، احتمال تخریب لایه های مجاور قالب را بالا

Effect of Distance From Mold
2mm Mold, $T_o=100^\circ\text{C}$, $T_m=160^\circ\text{C}$, SBR-N

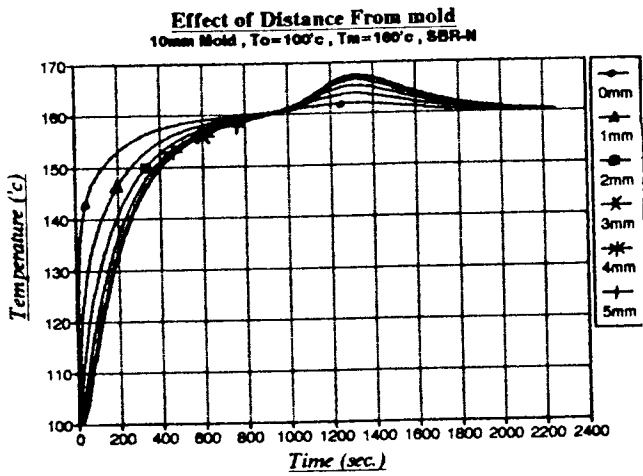


شکل ۳- بررسی اثر ضخامت بر توزیع دما در قالب یک بعدی ۲mm

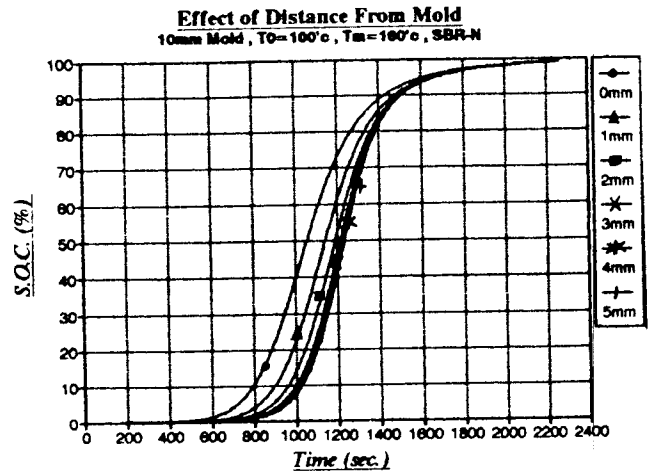
Effect of Distance From Mold
2mm Mold, $T_o=100^\circ\text{C}$, $T_m=160^\circ\text{C}$, SBR-N



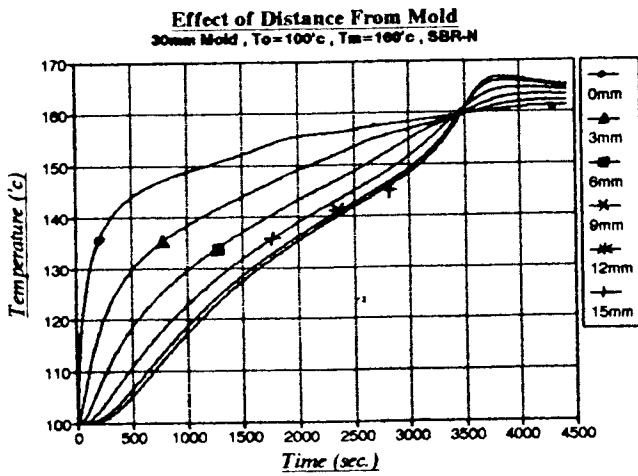
شکل ۴- بررسی اثر ضخامت بر توزیع درصد پخت در قالب یک بعدی ۲mm



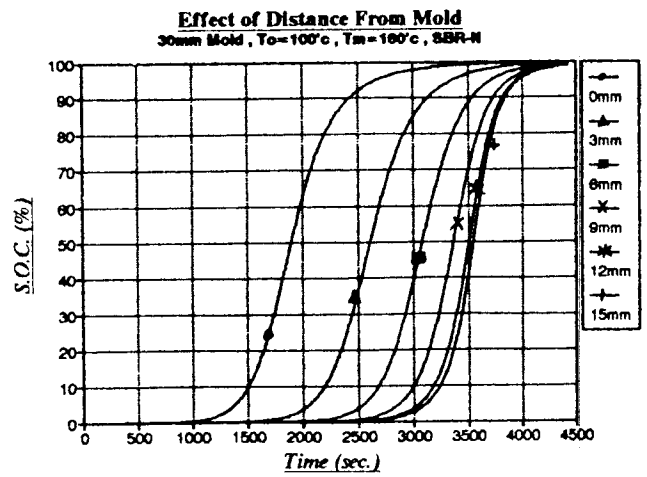
شکل ۵ - بررسی اثر ضخامت بر توزیع دما در قالب یک بعدی ۱۰ mm



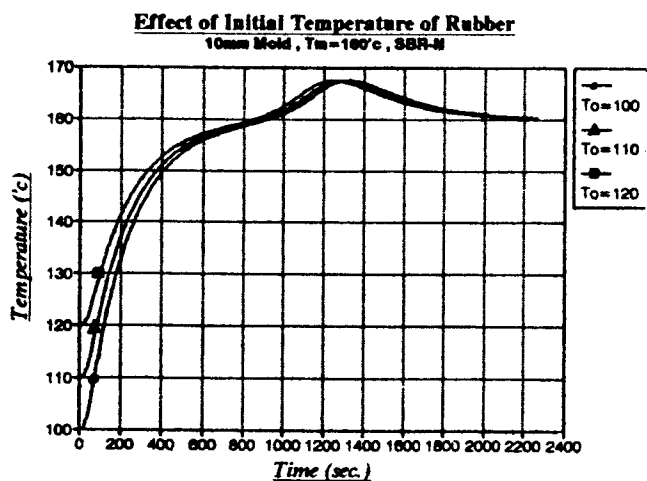
شکل ۶ - بررسی اثر ضخامت بر توزیع درصد پخت در قالب یک بعدی ۱۰ mm



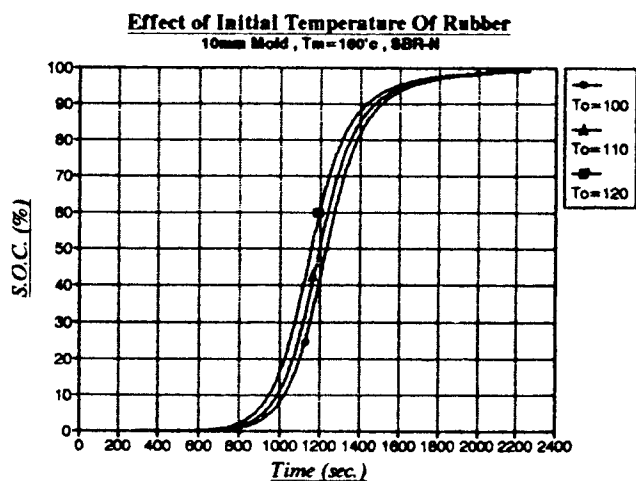
شکل ۷ - بررسی اثر ضخامت بر توزیع دما در قالب یک بعدی ۲۰ mm



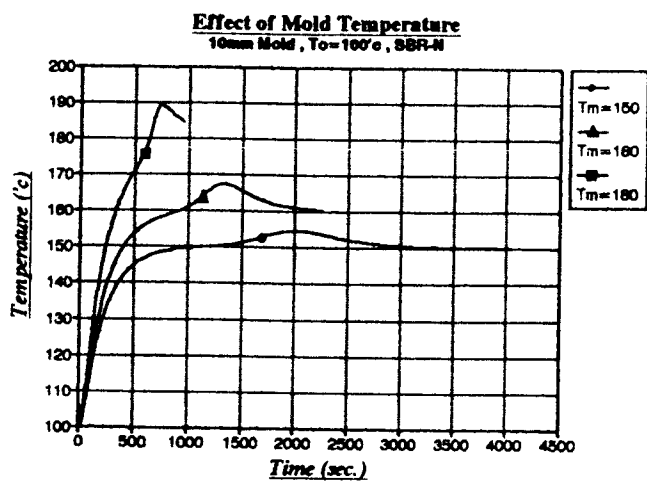
شکل ۸ - بررسی اثر ضخامت بر توزیع درصد پخت در قالب یک بعدی ۲۰ mm



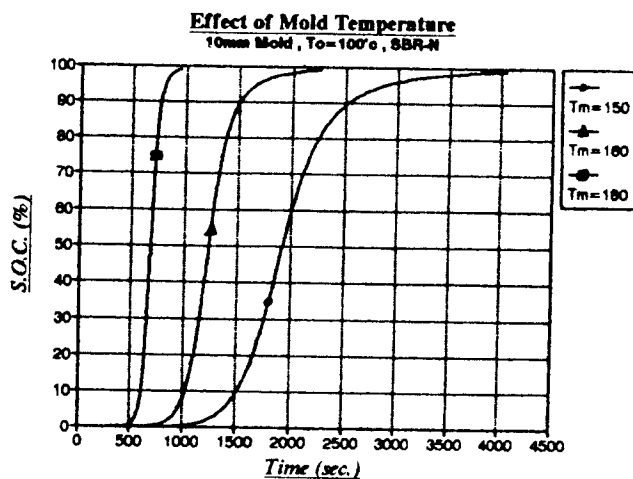
شکل ۹- بررسی اثر دمای اولیه لاستیک بر توزیع دما در قالب یک بعدی ۱۰ mm



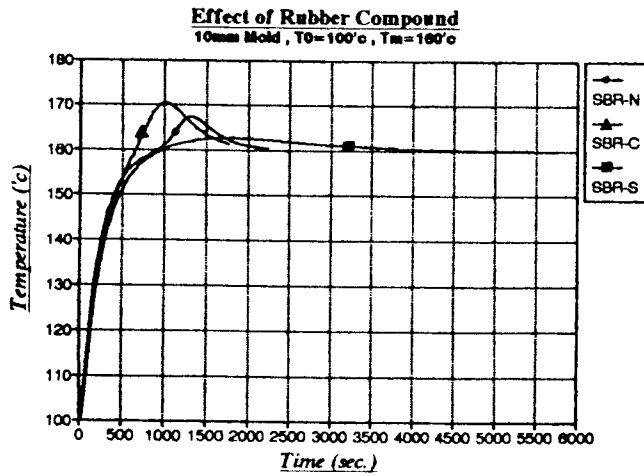
شکل ۱۰- بررسی اثر دمای اولیه لاستیک بر توزیع درصد پخت در قالب یک بعدی ۱۰ mm



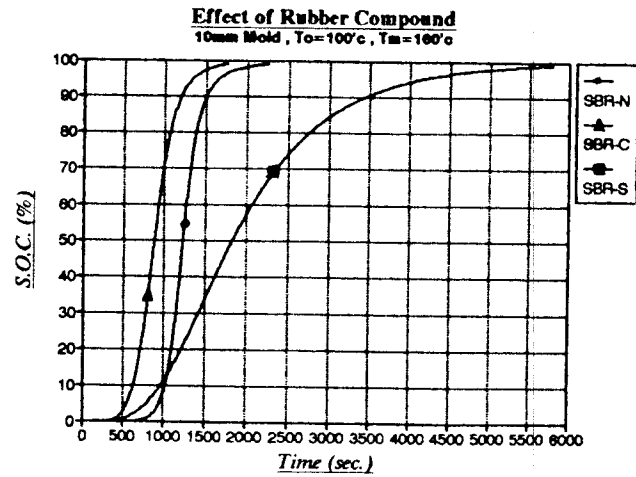
شکل ۱۱- بررسی اثر دمای قالب بر توزیع دما در قالب یک بعدی ۱۰ mm



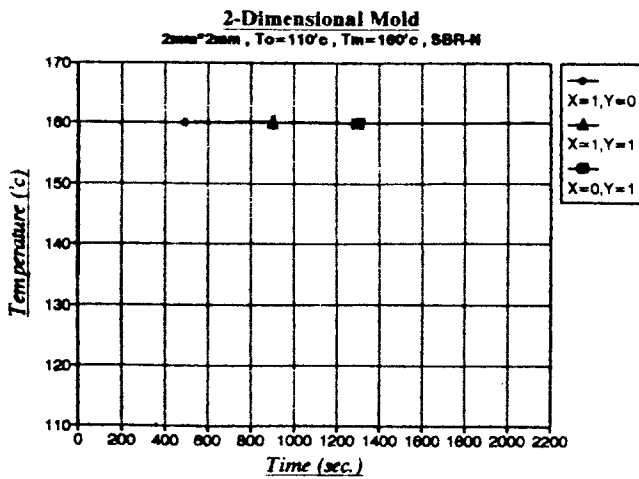
شکل ۱۲- بررسی اثر دمای قالب بر توزیع درصد پخت در قالب یک بعدی ۱۰ mm



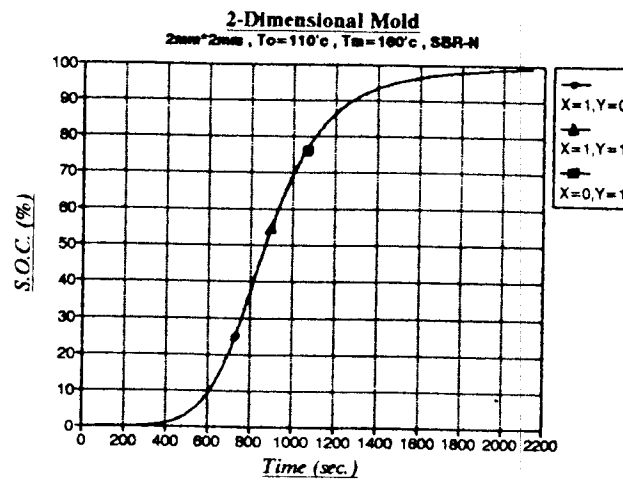
شکل ۱۳- بررسی اثر نوع لاستیک بر توزیع دما در قالب یک بعدی ۱۰ mm



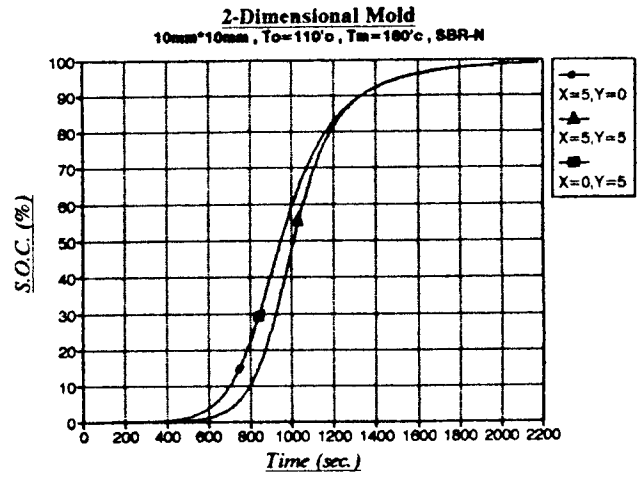
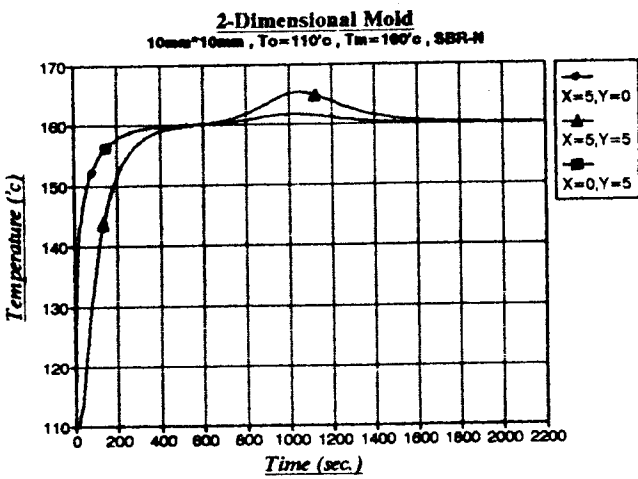
شکل ۱۴- بررسی اثر نوع لاستیک بر توزیع درصد پخت در قالب یک بعدی ۱۰ mm



شکل ۱۵- بررسی اثر اندازه قطعه بر توزیع دما در قالب دو بعدی ۲×۲ mm

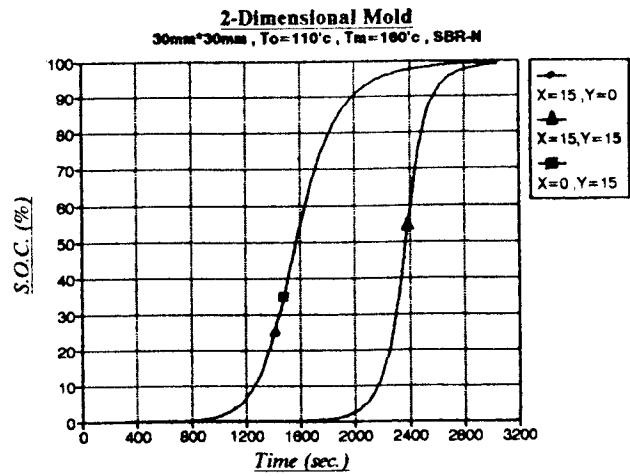
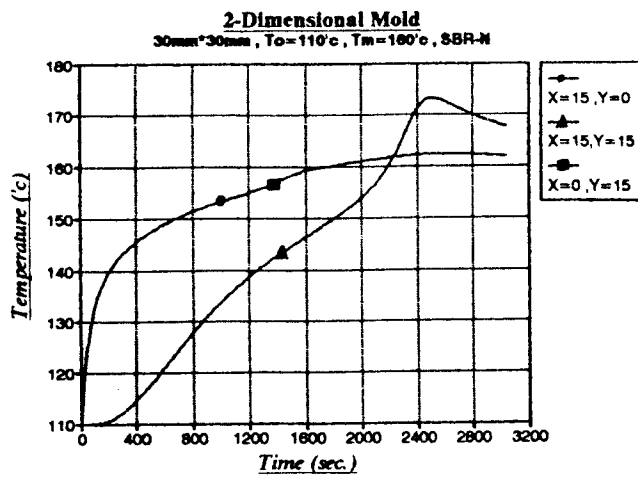


شکل ۱۶- بررسی اثر اندازه قطعه بر توزیع درصد پخت در قالب دو بعدی ۲×۲ mm



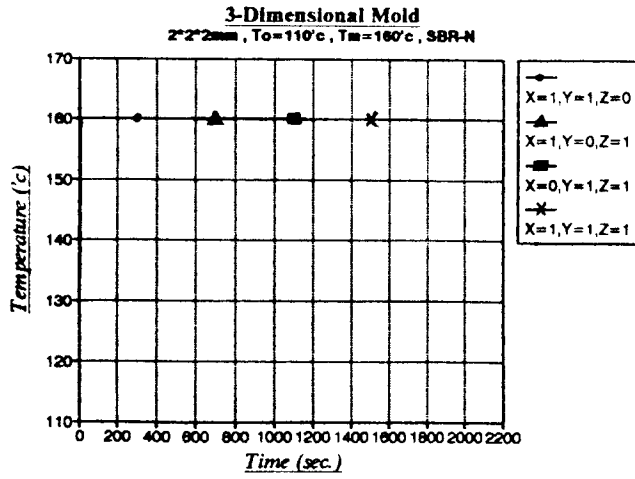
شکل ۱۷ - بررسی اثر اندازه قطعه بر توزیع دما در قالب دو بعدی ۱۰×۱۰ mm

شکل ۱۸ - بررسی اثر اندازه قطعه بر توزیع درصد پخت در قالب دو بعدی ۱۰×۱۰ mm



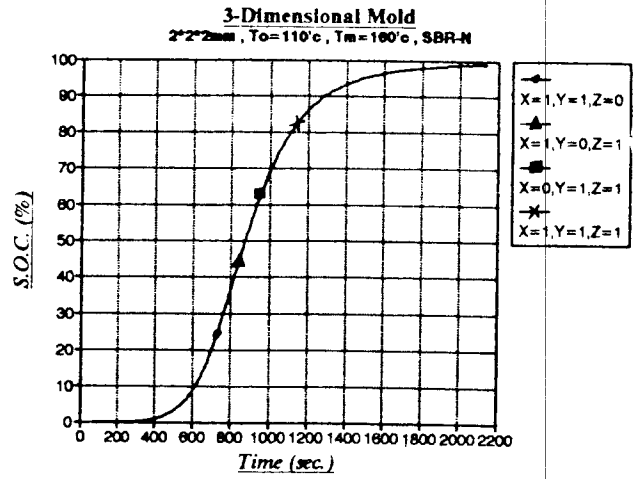
شکل ۱۹ - بررسی اثر اندازه قطعه بر توزیع دما در قالب یک بعدی ۲۰×۲۰ mm

شکل ۲۰ - بررسی اثر اندازه قطعه بر توزیع درصد پخت در قالب دو بعدی ۲۰×۲۰ mm



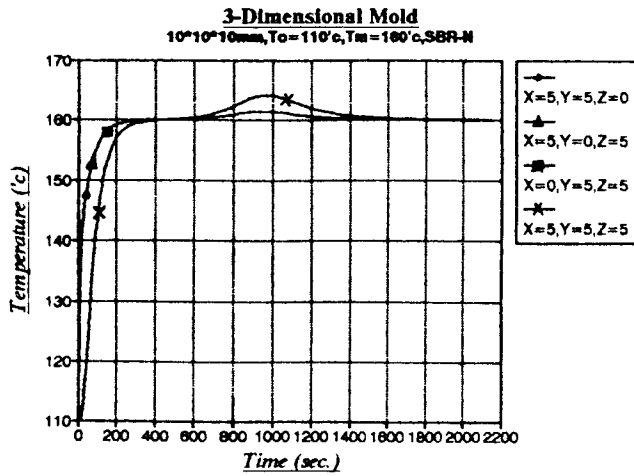
شکل ۲۱- بررسی اثر اندازه قطعه بر توزیع دما در قالب

سه بعدی ۲×۲×۲mm



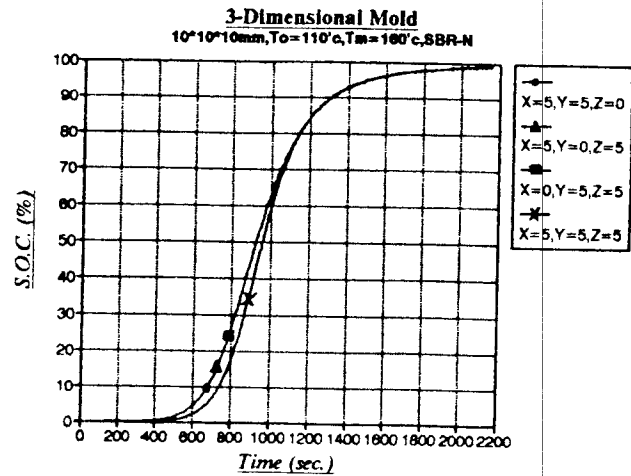
شکل ۲۲- بررسی اثر اندازه قطعه بر توزیع درصد پخت

در قالب سه بعدی ۲×۲×۲mm



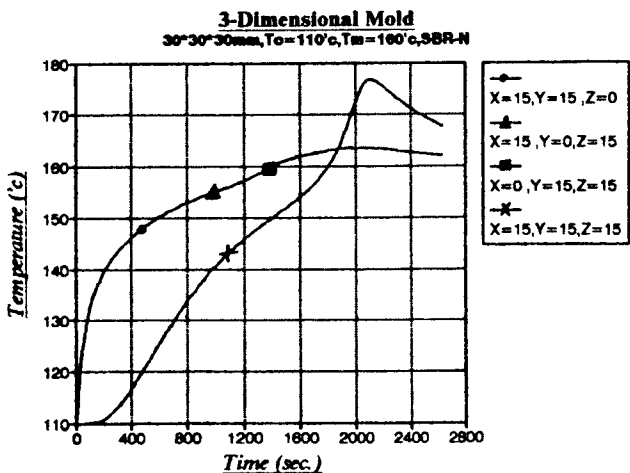
شکل ۲۳- بررسی اثر اندازه قطعه بر توزیع دما در قالب

سه بعدی ۱۰×۱۰×۱۰mm



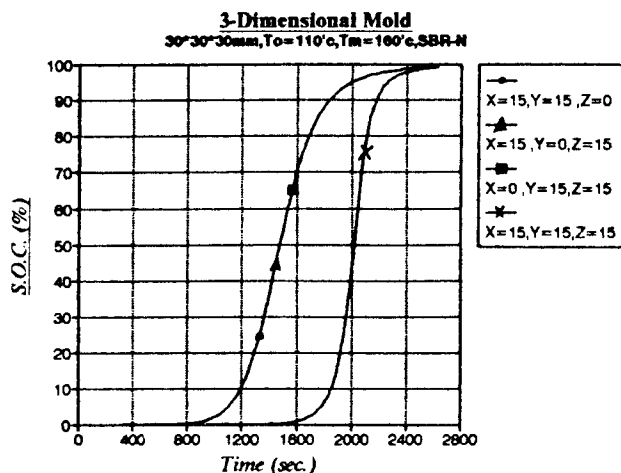
شکل ۲۴- بررسی اثر اندازه قطعه بر توزیع درصد پخت

در قالب سه بعدی ۱۰×۱۰×۱۰mm



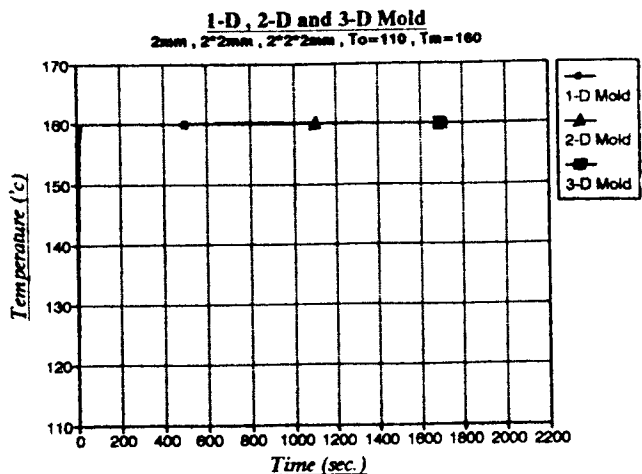
شکل ۲۵- بررسی اثر اندازه قطعه بر توزیع دما در قالب

سه بعدی ۲۰x۲۰x۲۰mm



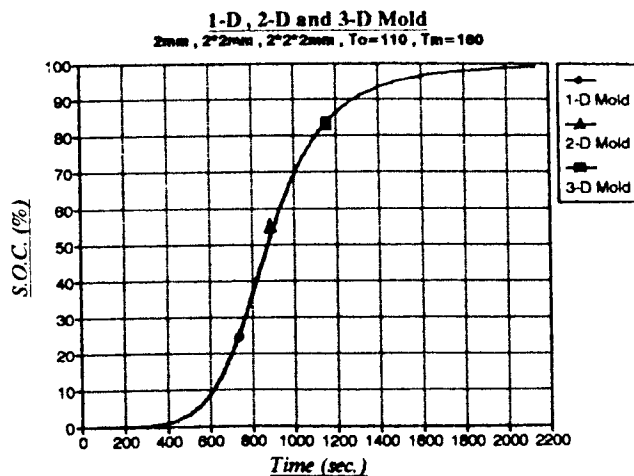
شکل ۲۶- بررسی اثر اندازه قطعه بر توزیع درصد پخت

در قالب سه بعدی ۲۰x۲۰x۲۰mm



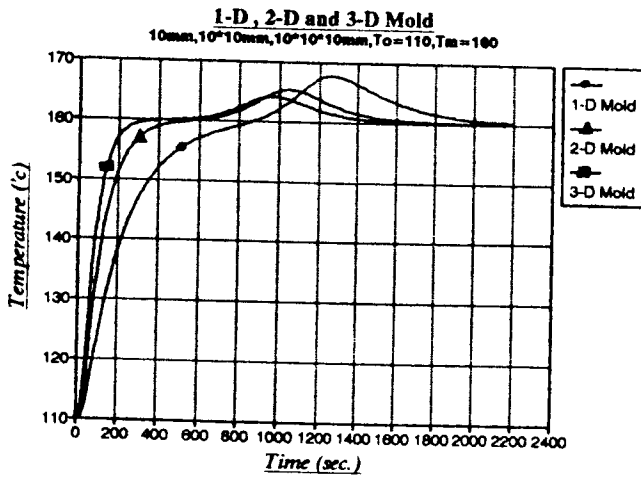
شکل ۲۷- مقایسه توزیع دما در قالبهای یک، دو و

سه بعدی برای اندازه ۲mm

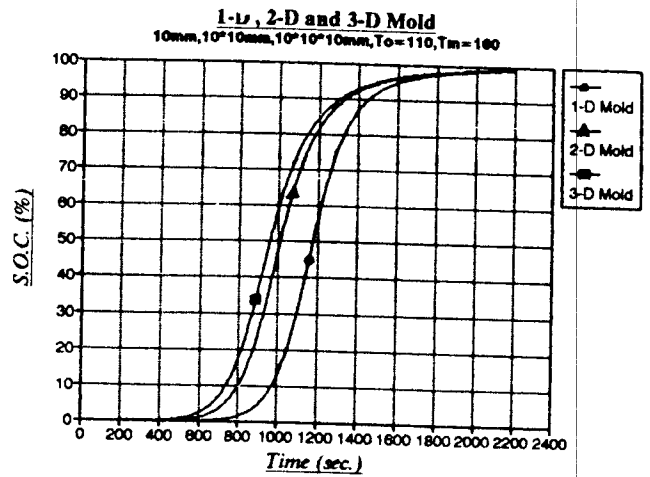


شکل ۲۸- مقایسه توزیع درصد پخت در قالبهای

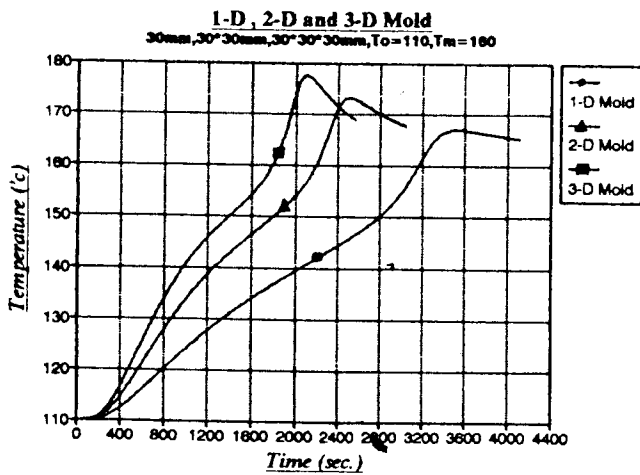
یک، دو و سه بعدی برای اندازه ۲mm



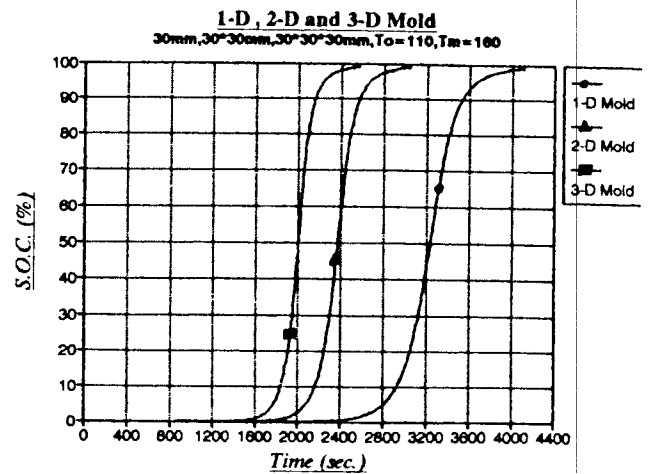
شکل ۲۹ - مقایسه توزیع دما در قالبهای یک، دو و سه بعدی برای اندازه ۱۰mm



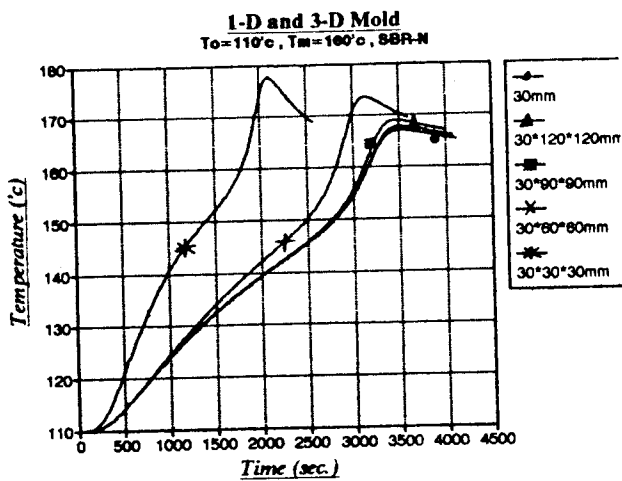
شکل ۳۰ - مقایسه توزیع درصد پخت در قالبهای یک، دو و سه بعدی برای اندازه ۱۰mm



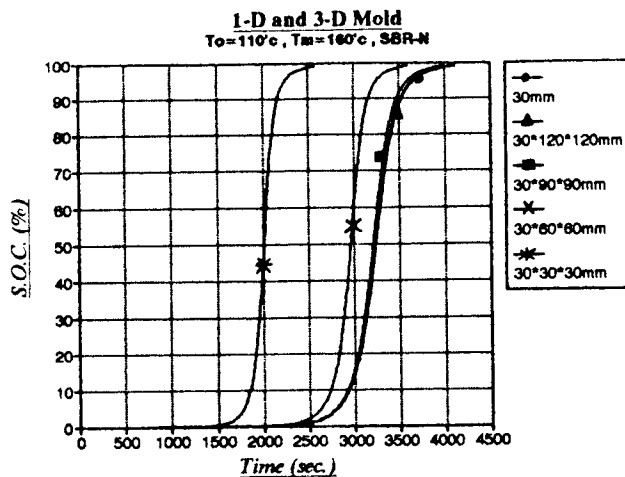
شکل ۳۱ - مقایسه توزیع دما در قالبهای یک، دو و سه بعدی برای اندازه ۳۰mm



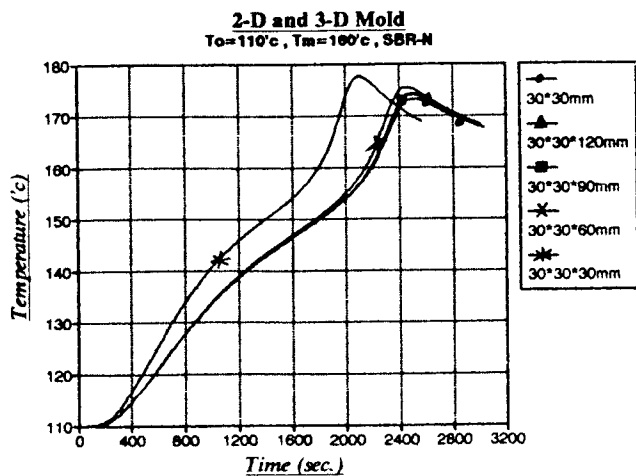
شکل ۳۲ - مقایسه توزیع درصد پخت در قالبهای یک، دو و سه بعدی برای اندازه ۳۰mm



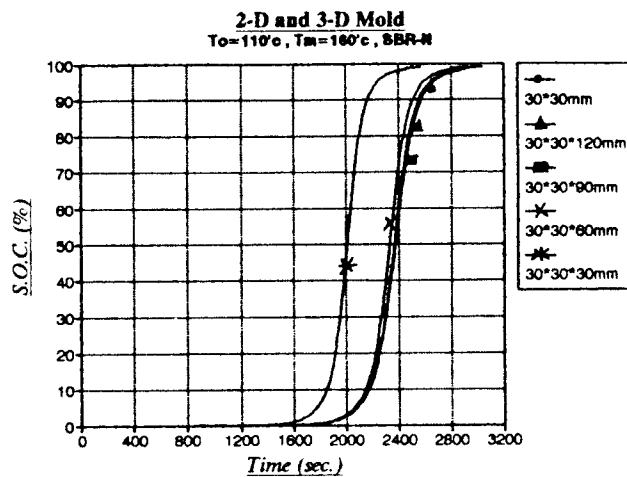
شکل ۲۲- تعیین شرایط تبدیل حالت سه بعدی به یک بعدی در توزیع دما



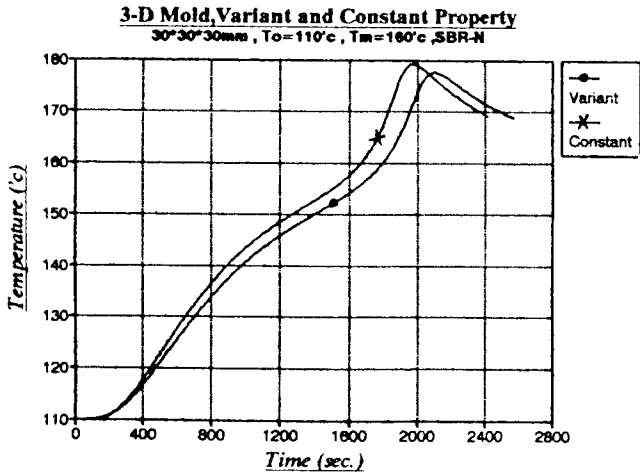
شکل ۲۳- تعیین شرایط تبدیل حالت سه بعدی به یک بعدی در توزیع درصد پخت



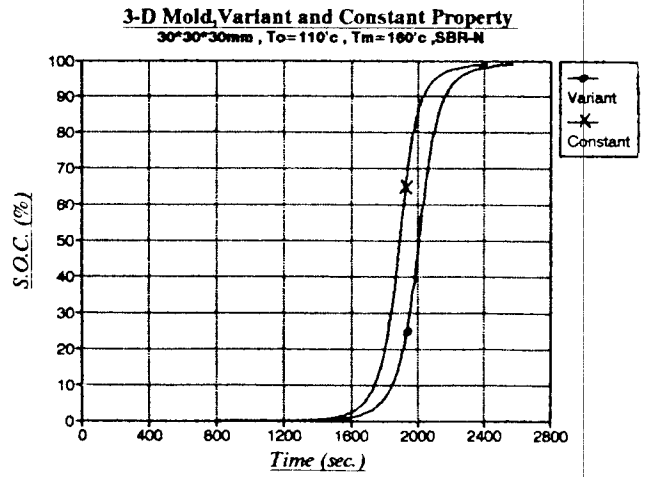
شکل ۲۵- تعیین شرایط تبدیل حالت سه بعدی به دوبعدی در توزیع دما



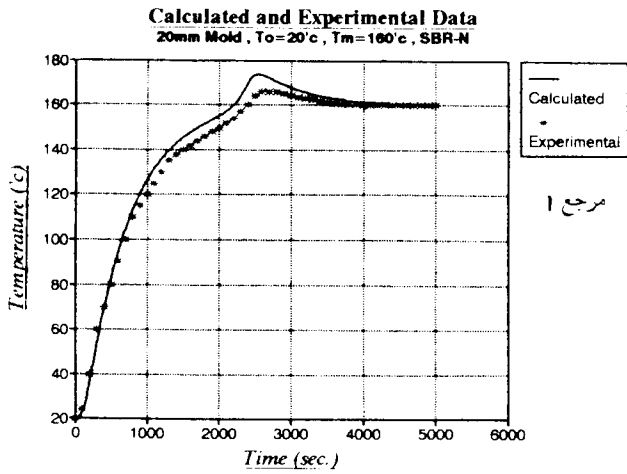
شکل ۲۶- تعیین شرایط تبدیل حالت سه بعدی به دوبعدی در توزیع درصد پخت



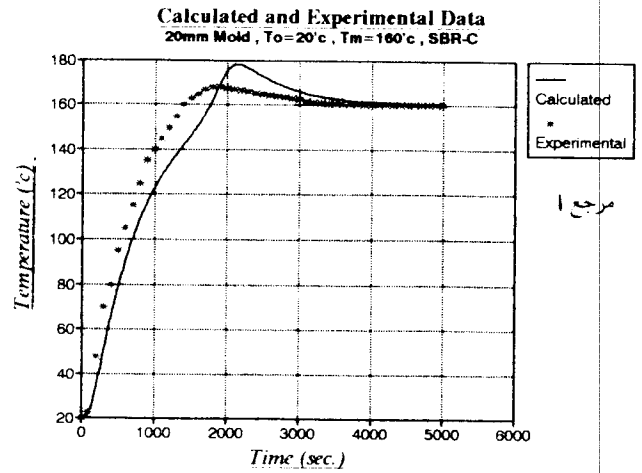
شکل ۲۷- اختلاف حاصل در توزیع دما ناشی از ثابت یا متغییر انگاشتن خواص فیزیکی در قالب سه بعدی ۲۰×۲۰×۲۰



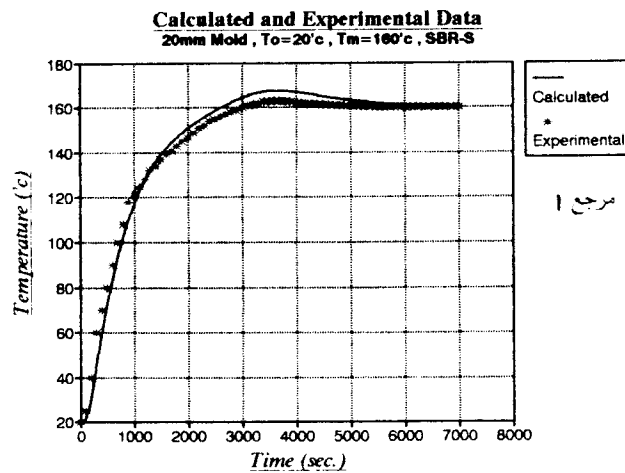
شکل ۲۸- اختلاف حاصل در توزیع درصد پخت ناشی از ثابت یا متغییر انگاشتن خواص فیزیکی در قالب سه بعدی ۲۰×۲۰×۲۰



شکل ۲۹- مقایسه نتایج حاصل از محاسبات با نتایج تجربی [مرجع] برای قالب یک بعدی ۲۰ mm و جنس SBR-N



شکل ۴۰- مقایسه نتایج حاصل از محاسبات با نتایج تجربی [مرجع] برای قالب یک بعدی ۲۰ mm و جنس SBR-C



شکل ۴۱- مقایسه نتایج حاصل از محاسبات با نتایج تجربی [مرجع] برای قالب یک بعدی ۲۰ mm و جنس SBR-S

فهرست منابع

- 1 - Jonsson and Flodin, Journal of Applied Polymer Science, VOL. 43, P. 1777 (1991).
Vulcanization of Rubber. Kinetic Parameters for SBR and Simulations of Vulcanization in a Mold.
- 2 - Isayev, Sobhani and Deng, Rubber Chemistry and Technology, VOL. 61, P. 906 (1988).
Two - Dimensional Simulation of Injection Molding of Rubber Compounds.
- 3 - Deng and Isayev, Rubber Chemistry and Technology, VOL. 64, P. 296 (1991).
Injection Molding of Rubber Compounds...Experimentation and Simulation.
- 4 - Isayev and Deng, Rubber Chemistry and Technology, VOL. 61, P. 340 (1988).
Nonisothermal Vulcanization of Rubber Compounds.
- 5 - Kong, White, Weissert and Nakajima, Rubber Chemistry and Technology, VOL. 60, P. 140 (1987).
An Experimental and Theoretical Study of Heat Conduction and Vulcanization of Rubber Compounds in Molds.
- 6 - Sadr - Bazaz, Gronger and Vergnaud, Journal of Applied Polymer Science, VOL. 29, P. 955 (1984).
Calculation of Profiles of Temperature and State of Cure Developed Within the Rubber Mass in Injection Molding Process.

- 7 - Prentice and Williams , Rubber Chemistry and Technology , VOL. 53, P. 1023 (1980).
Numerical Evaluation of the State of Cure in a Vulcanizing Rubber Article.
- 8 - Gehman, Rubber Chemistry and Technology, VOL. 40, P. 36 (1967).
Heat Tansfer in Processing and Use of Rubber.
- 9 - Anderson , Tannehill and Pletcher, Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer (1984).
- 10 - Isayev, Unit Operation of Polymer Processing (1991).
- 11 - Brown , Physical Testing of Rubbers (1979).

۱۲- ره انجام ، ریاض ، بررسی انتقال حرارت و توزیع دما در فرایند پخت لاستیک با خواص فیزیکی متغیر در حالت سه بعدی ، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مکانیک دانشکده فنی دانشگاه تهران ، ۱۳۷۴.