



شبیه سازی فرایند قالب گیری فشاری مواد کامپوزیتی با فایبرهای ناپیوسته

امیرعباس محرابی^۱، جلیل رضایی پزند*^۲

۱- دانشجوی کارشناسی مکانیک، دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استاد، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، jrezaeep@um.ac.ir

چکیده

شبیه سازی فرآیندهای تولید پیچیده در ساخت قطعات باکیفیت و کاهش هزینه ها از اهمیت بالایی برخوردار است. با شبیه سازی فرآیند این امکان وجود دارد که شرایط مختلف تولید و هندسه قطعه قبل از ساخت قالب مورد بررسی قرار گیرد. در این پژوهش با کمک نرم افزار اجزاء محدود مراحل مختلف فرایند قالب گیری فشاری^۱ شبیه سازی شده است. در این فرآیند خمیر تولید شده از ماده مرکب پلیمری تقویت شده با الیاف کربن تحت فشار داخل یک قالب شکل می گیرد. پس از مراحل پخت که با انتقال گرما از خمیر به قالب همراه است قالب باز شده و قطعه خارج می شود. در این شبیه سازی جهت بردارهای جابجایی در کل قطعه بدست آمده که می تواند برای پیش بینی جهتگیری الیاف در قطعه و در نتیجه تعیین استحکام مورد نیاز در نقاط مختلف قطعه مورد استفاده قرار گیرد. در دو حالت متفاوت یکی با تزریق خمیر داخل نیمه ثابت توسط فشار نیمه متحرک قالب و حالت دوم که خمیر بصورت فورج اولیه در بین دو نیمه قالب قرار می گیرد شبیه سازی شده است. پارامترهای مورد نیاز از قبیل مقدار فشار لازم برای پر شدن کامل قالب، مقدار نیرو وارده به اجزای قالب و قطعه طی زمان قالب گیری و دمای اجزاء آن در فرآیند قالب گیری فشاری محاسبه شده است.

واژه‌های کلیدی: قالبگیری فشاری- پلیمر تقویت شده- فایبر ناپیوسته - شبیه سازی - روش اجزاء محدود.

۱- مقدمه

صنایع مدرن نیازمند مواد سبک و مستحکم بوده که علاوه بر مقاومت نسبت به خوردگی و تغییرات دما طراحی آسان و تجهیزات کم هزینه داشته باشند. راه حل مناسب استفاده از مواد پلیمری گرما سخت^۲ تقویت شده با الیاف ناپیوسته است که به دو صورت قالب گیری ورقه ای^۳ و قالب گیری فشاری^۴ مورد استفاده قرار می گیرد. در این فرآیند فرج اولیه که خمیری از پلیمر گرماسخت تقویت شده با الیاف های کوتاه می باشد در محفظه قالب قرار داده شده و تحت فشار حاصل از بسته شدن قالب حفره قالب (شکل قطعه) پر می شود. قالب و ماده داخل آن برای مدت زمان مشخص تحت فشار قرار می گیرد تا ماده پخت شده و شکل نهایی خود را بگیرد. این فشار معمولاً با حرکت نیمه بالایی قالب تامین می شود. قالب گیری فشاری مواد مرکب امروزه جایگاه خاصی در صنایع برای تولید انواع قطعات ماشین آلات حمل و نقل و کشاورزی، قطعات الکترونیکی، محفظه ها و فیوز ها و لوازم خانگی دارد. از این جهت بررسی و مطالعه روشی که در آن بتوان به بهترین نحوه این فرایند را شبیه سازی کند از اهمیت بالایی برخوردار است [۱] و [۲]. روش اجزاء محدود برای مطالعه فرآیندهای پیچیده صنعتی [۳] که حتی مشاهده جزئیات فرآیند (بعنوان مثال جریان ماده مذاب در هنگام پر شدن قالب) در آزمایش های تجربی غیرممکن می باشد ابزار بسیار ارزشمندی می باشد. در فرآیند قالب گیری فشاری کیفیت قطعه تولید شده تحت تاثیر پارامترهای هندسی و همچنین پارامترهای فرآیند تغییر خواهد کرد. پارامترهای هندسی شامل هندسه قطعه، نسبت سطح فرج اولیه به مساحت قالب، تعداد و محل قرار گیری فرج اولیه می باشند. پارامترهای فرآیند شامل دمای قالب و فرج اولیه، سرعت بسته شدن قالب، حداکثر نیروی نگه دارنده قالب در حالت بسته، زمان پر شدن قالب و تناسب آن با زمان ژل شدن پلیمر و زمان

^۱ . compression molding

^۲ . thermosets

^۳ . SMC-sheet molding compound

^۴ . BMC-bulk molding compound



لازم برای پخت صحیح قطعه در قالب می باشند. به دلیل هزینه بر بودن روش آزمون و خطا و پیچیدگی فرایند، به کمک روش اجزاء محدود می توان با شبیه سازی فرایند محدود پارامترهای مناسب را برای هر طرح مشخص نمود. تعداد انگشت شماری نرم افزارهای تخصصی تجاری [۴] و [۵] وجود دارد که توانایی شبیه سازی فرایندهای تزریق پلاستیک و قالب گیری فشاری مواد مرکب تقویت شده با الیاف را دارا می باشند. در این نرم افزارها پر شدن قالب، انقباض، اعوجاج و توزیع الیاف در قطعه نهایی و توزیع دما در قطعه با استفاده از روش اجزاء محدود پیش بینی می شود. هدف اصلی از انجام این پروژه شبیه سازی فرآیند قالب گیری فشاری در یک نرم افزار اجزاء محدود عمومی می باشد.

۱-۱- قالب گیری فشاری مواد مرکب

در ابتدا قالب توسط شابلن بار ریز که روی دستگاه پرس قرار می گیرد، فرج اولیه در قالب قرار گرفته و قالب شروع به بسته شدن می کند، بطوریکه سنبه قسمت رویی قطعه را شکل داده و قسمت زیرین قطعه تا سطح جدایش قالب در داخل محفظه پائینی شکل می گیرد. در این قالبها دمائی در حدود ۱۳۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی گراد توسط دو المان گرم کننده حاصل میشود. عمدتاً دمای نیمه فوقانی قالب کمتر از نیمه تحتانی می باشد بطوری که معمولاً قسمت فوقانی تا دمای ۱۴۵ درجه سانتی گراد گرم شده و قسمت تحتانی تا دمای ۱۵۵ درجه سانتی گراد گرم میشود. فشار لازم در حدود ۱۰۰ تا ۵۰۰ تن می باشد که مقدار دقیق آن با توجه به سطح تماس قطعه با قالب تعیین می شود [۶].

از جمله مزایای این فرایند ضایعات کم می باشد چون در این قالبها لوله راهگاه و کانال هدایت مواد وجود ندارد. همچنین هزینه تجهیزات نسبتاً اندک و امکان انجام عملیات بصورت خودکار یا دستی برای تولید محصولی کامل، این روش را مناسب و مقرون به صرفه برای تولید قطعات فشرده، طویل و قطعاتی که دقت زیادی ندارند می کند. دیگر ویژگی مهم این روش تنش کم در قطعه و در نتیجه سائیدگی اندک در قالب است که علت آن ایجاد جریان مواد در زمان کوتاه می باشد. در این روش ماده نهایی انسجام و یک پارچگی ساختاری مطلوبی دارد.

این فرایند معایبی نیز دارد که از آن جمله می توان به پیچیدگی و دشواری قالبگیری و آسیب وارد شدن به قسمتهای داخلی قالب مثل پین های بیرون انداز اشاره کرد. در این روش برای تولید برخی قطعات سیکل زمانی از حد استاندارد (۲الی۴ دقیقه) به طور چشمگیری زیادتر شود و محصولات معیوب در این روش مجدداً قابل بازیابی نیستند.

۱-۲- خواص و فرآیند تولید فرج اولیه

فرج اولیه ۱ مورد استفاده در فرآیند قالب گیری فشاری معمولاً یک پلیمر گرما سخت است که ترکیبی از پرکننده های خنثی غیر آلی، الیاف تقویت کننده، کاتالیزور و رنگ می باشد که مخلوطی (خمیری شکل) لزج می باشد. در این مخلوط معمولاً بین ۱۰ تا ۳۰ درصد الیاف تقویت کننده (الیاف کربن) خرد شده به طول ۶ mm تا ۱۲ وجود دارد.

پلیمر گرماسخت به عنوان ماتریس با خواص شیمیایی خود باعث استحکام در قطعه می شوند و توانایی فراهم آوردن طیف وسیعی از خواص را دارا می باشند. پالی استر غیر اشباع^۲ و ونیل استر^۳ از معمول ترین پلیمرهای مورد استفاده می باشند که پس از فرایند پخت در دما و فشار معین توانایی خوبی در تحمل انواع بارهای اعمالی را دارا می باشند.

ونیل استر معمولاً زمانی استفاده میشود که نیاز به فناوری بالا می باشد مثلاً در جایی که نیاز به تحمل گرما و مقاومت در برابر خوردگی است. مقاومت خوب در برابر دما از جمله خصوصیات تمام مواد گرماسخت است که آنها را از مواد گرما نرم متمایز می کند در این مورد باعث بهبود خواص ماده صلب شده به نحوی که در دمای بالا نرم و در دمای پایین ترد و شکننده نمی شود.

روش های زیادی برای تولید موجود است معروف ترین آن استفاده از مخلوط کن با تیغه های Z شکل برای تولید فایبرهای با طول ۶-۱۲ mm و اضافه کردن غلیظ کننده^۴ با الیاف شیشه به طول ۶-۴ میلی متر و مخلوط کردن این دو می باشد. خمیر حاصل درون فیلم پلی اتیلنی بسته بندی می شود و پس از حدود سه الی پنج روز، محصول آماده عملیات قالب گیری است. تکه های آماده درون قالب گرم فولادی قرار می گیرند و پرس طی دو مرحله بسته و دو مرحله فشار اعمال می شود. در نهایت ضمن عملیات پخت درون قالب قطعه انجام می شود [۷].

1. BMC

2. UP-unsaturated polyester

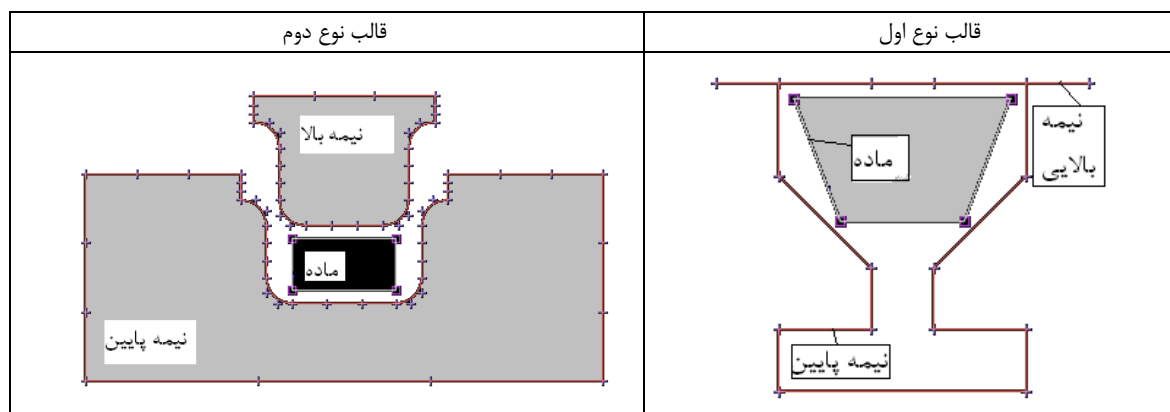
3. VE-vinyl ester

4. Thickener

۲- روش تحقیق

به دلیل هزینه بر بودن روش آزمون و خطا و پیچیدگی فرایند قالب گیری فشاری مواد مرکب، مراحل مختلف فرایند به کمک روش اجزاء محدود شبیه سازی شده است. برای این منظور از نرم افزار مارک منتات^۱ کمک گرفته شده است. این نرم افزار قابلیت تحلیل المان محدود غیر خطی و امکان تحلیل حرارتی مواد پلیمری را دارا می باشد. با ایجاد هندسه قالب مورد نظر و اعمال شرایط مرزی مدل اجزاء محدود قالب و فرج اولیه ایجاد می گردد. این نرم افزار با داشتن قابلیت های مش بندی هوشمند با رسیدن به تغییراتی بیش از حد مجاز در تعداد المان ها به صورت خودکار تجدید نظر کرده و بطور همزمان چندین تحلیل را انجام می دهد [۸].

شکل و هندسه ی مورد نظر را توسط نرم افزار ایجاد کرده سپس با انتخاب مواد و اعمال شرایط مرزی فرایند شبیه سازی آغاز می گردد. در این تحقیق دو حالت متفاوت قالبگیری در نظر گرفته شده است. در قالب نوع اول (شکل ۱) فضای خالی داخل قالب با تزریق فرج اولیه داخل نیمه ثابت توسط فشار نیمه متحرک قالب پر می گردد در حالی که قالب نوع دوم بصورت فورج اولیه در بین دو نیمه قالب قرار صورت می گیرد (شکل ۱). در هر دو حالت سعی بر آن است تا کلیه مراحل قالبگیری فشاری به واقعیت نزدیک باشد تا بتوان قطعه ای با مشخص تولید کرد. در هر یک از این حالات شرایط مرزی وماده اولیه ثابت فرض شده است.



شکل ۱ - دو نوع قالب در نظر گرفته شده در این شبیه سازی

شبیه سازی این فرایند از سه قسمت تشکیل شده است: ۱- ماده شکل پذیر ۲- نیمه بالایی قالب ۳- نیمه پایین قالب. ماده شکل پذیر همان ماده مرکب کربن اپوکسی است که با دمای اولیه ۲۶۰ درجه سلسیوس (۶۰۰ درجه فارنهایت) وارد قالب شده و پس از بسته شدن قالب در زمانی حدود ۵-۱۰ دقیقه در همان حالت می ماند تا پخت آن کامل گردد. در شبیه سازی حاضر زمان ۶ دقیقه در نظر گرفته شده است. نیمه بالایی قالب از جنس فولاد زنگ نزن با دمای ابتدایی ۲۱/۱۱ درجه سلسیوس (۷۰ درجه فارنهایت) می باشد که در با سرعت 10 mm/s بطرف پایین حرکت می کند. نیمه پایین قالب نیز از جنس فولاد زنگ نزن با دمای ابتدایی ثابت ۹۳/۳ درجه سلسیوس (۲۰۰ درجه فارنهایت) بدون حرکت فرض می شود. خرج اولیه ماده شکل پذیر الاستیک-پلاستیک از جنس اپوکسی با ۵۵٪ الیاف کربن به طول ۲۵/۴mm می باشد که خواص ماده مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است.

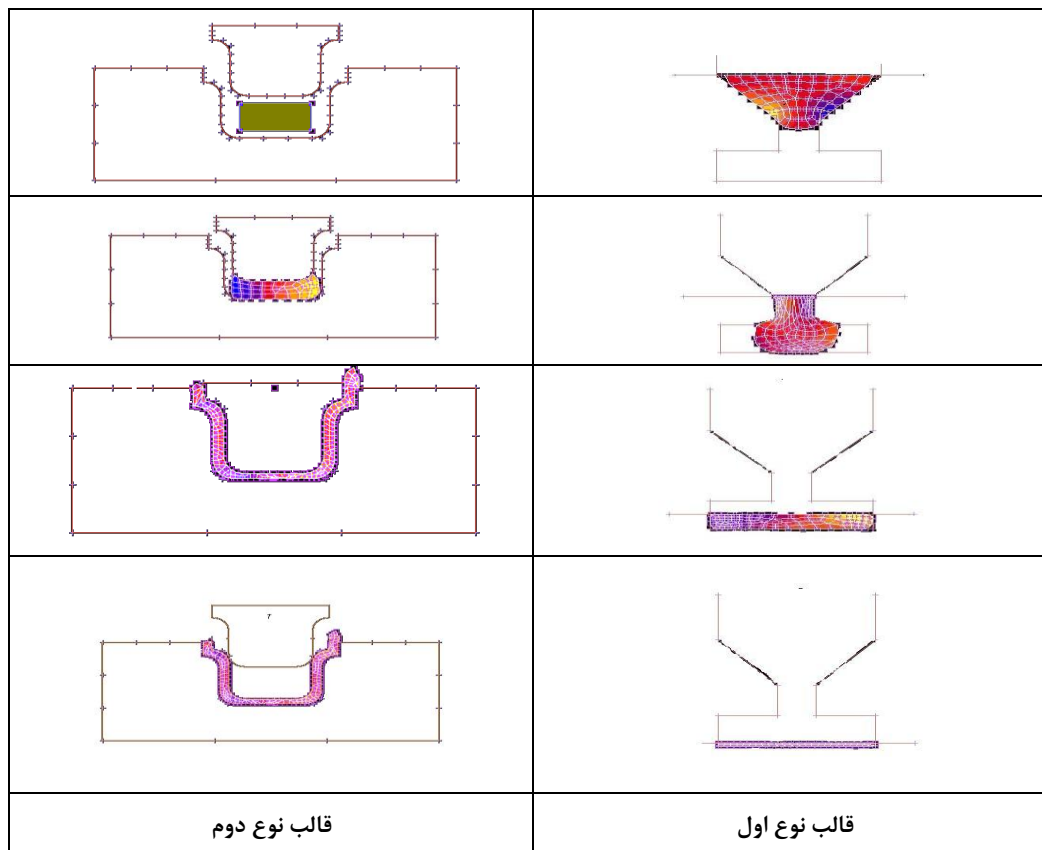
¹. MScMarc Mentat



جدول ۱- خواص ماده مورد استفاده [۷]

Test	Value
Specific gravity	1.45
shrinkage ,inch/inch(mm/mm)	0.000(0.000)
Tensile strength, psi(Mpa)	42000(289)
Tensile Modulus, psi(Gpa)	8000000,(55.1)
Compression strength psi,(Mpa)	40,000(275)
Compression Modulus psi,(Mpa)	4600000,(31.7)
Shear strength, psi,(Mpa)	30,000(206)
Shear Modulus, psi(Gpa)	9.5(65.5)
Coefficient thermal expansion	0.000002
Heat deflection temperature	330 c
Thermal conductivity	0.474
Poisson's ratio	0.22

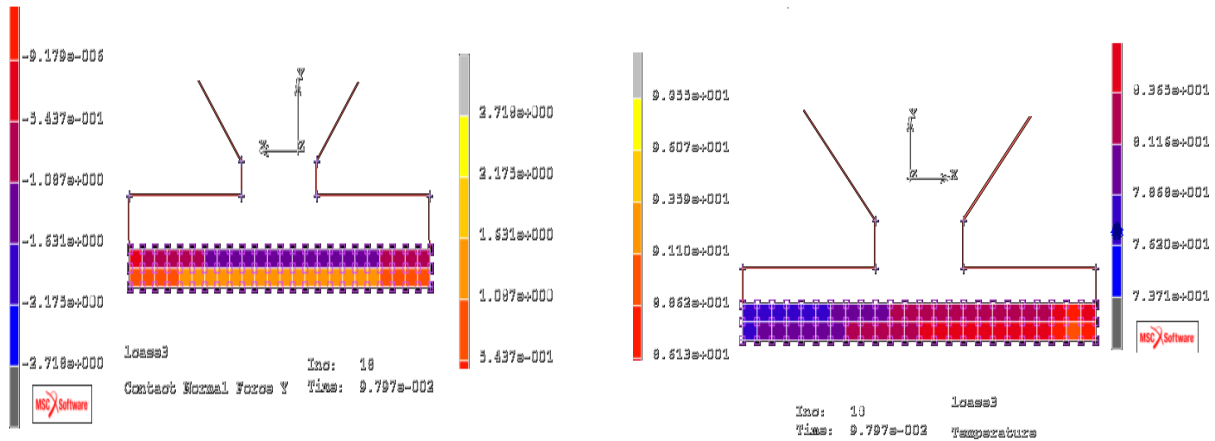
شکل ۲- مراحل پر شدن قالب نوع اول و دوم





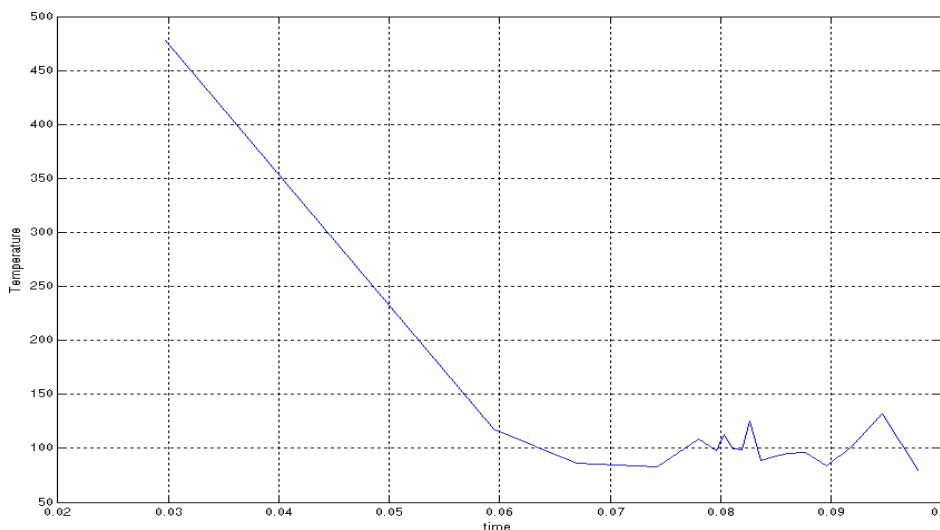
۳- نتایج و بحث

همانگونه که قبلاً ذکر گردید برای پیش بینی کیفیت قطعه (عدم وجود نقص و جهت گیری مناسب الیاف تقویت کننده) و همچنین طراحی مناسب قالب و نیروها و زمان بندی مراحل فرآیند قالبگیری، محاسبه نیروی های حرارتی و مکانیکی وارد بر قطعه و اجزاء قالب ضروری می باشد. بدین منظور اطلاعات مورد نیاز از شبیه سازی فرآیند استخراج گردیده است که نمونه هایی از آن برای فرآیند قالب گیری دو نوع قالب ذکر شده در این بخش ارائه شده است. شکل های ۳، ۴ و ۵ به ترتیب توزیع دما و نیروهای تماسی ایجاد شده را در انتهای فرآیند قالب گیری قالب نوع اول نشان می دهد. شکل ۶ بردار جابجایی یا جهت جریان ماده را در قالب نوع اول نشان می دهد. منحنی تغییرات دما یک گره دلخواه ماده در قالب نوع اول طی زمان تزریق نمودار ۱ و نیرو وارده به نیمه بالایی قالب بر حسب زمان (در طول فرآیند قالب گیری) در نمودار ۲ ارائه شده است. به طور مشابه شکل های ۷ و ۸ به ترتیب توزیع نیروی قائم و جهت جریان (تغییر شکل) را در انتهای فرآیند قالب گیری قالب نوع دوم نشان می دهد. نمودار های ۳ و ۴ نیز نیروهای وارده به بدنه قالب نوع دوم را بر حسب زمان نشان می دهد. لازم به ذکر است که با تغییر پارامترهای شبیه سازی می توان نمودارهای مشابه ای برای نقاط مختلف بدست آورد که در بهینه سازی طراحی فرآیند و قالب ضروری می باشد.

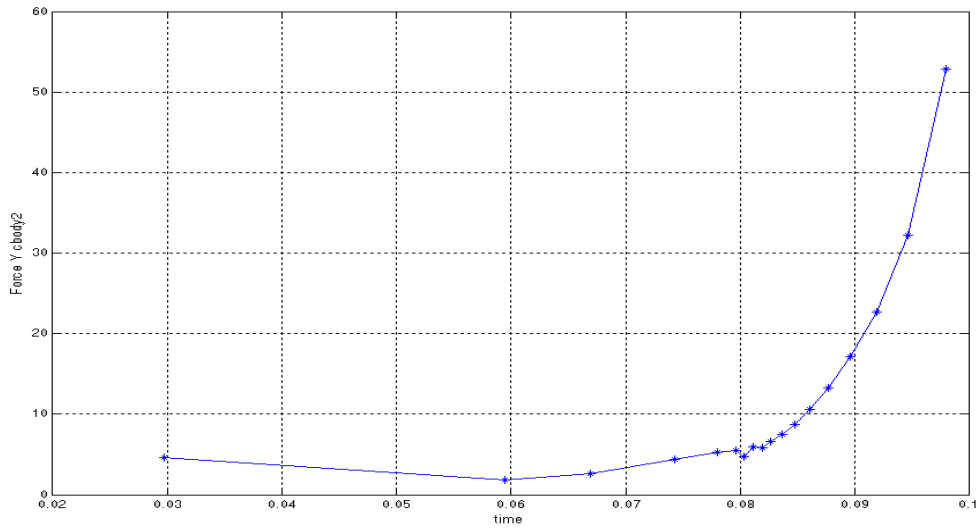


شکل ۳- توزیع دما در قالب نوع اول در انتهای شبیه سازی

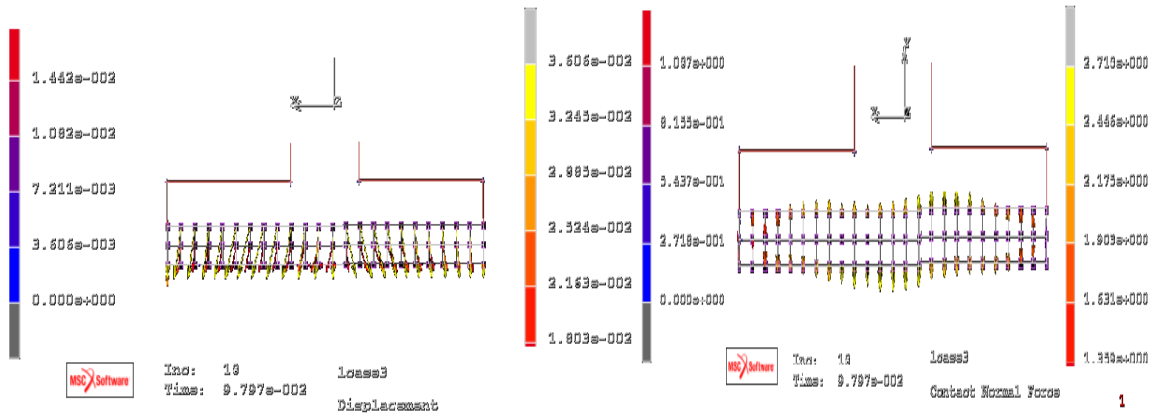
شکل ۴- توزیع نیروی تماسی در جهت محور y در قالب نوع اول



نمودار ۱- تغییرات دمای (فارنهایت) یک گره دلخواه از ماده قالب نوع اول بر حسب زمان (دقیقه)

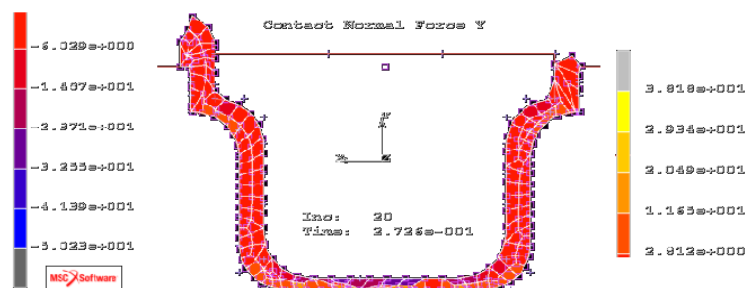


نمودار ۲- تغییرات نیروی نیمه بالایی قالب نسبت به زمان در قالب نوع اول

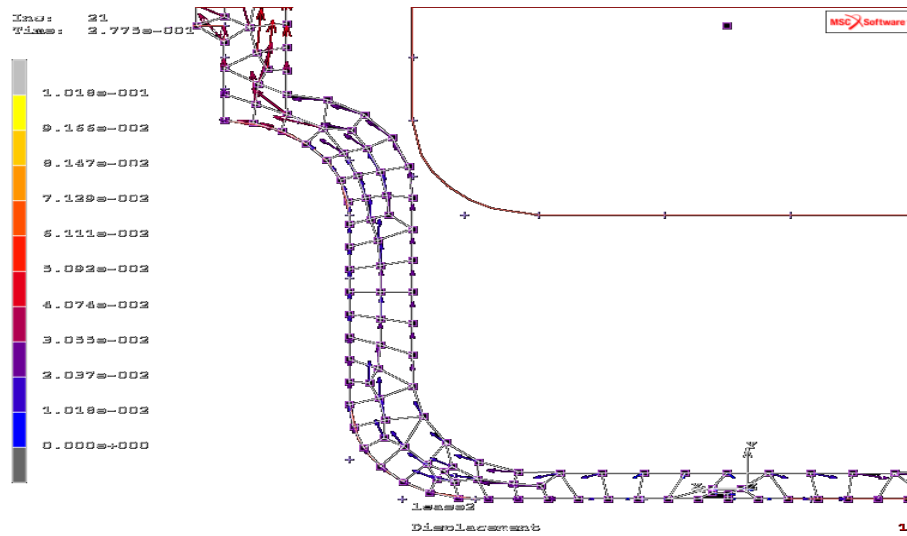


شکل ۶- بردار جابجایی خرج اولیه (جهت جریان) در قالب نوع اول

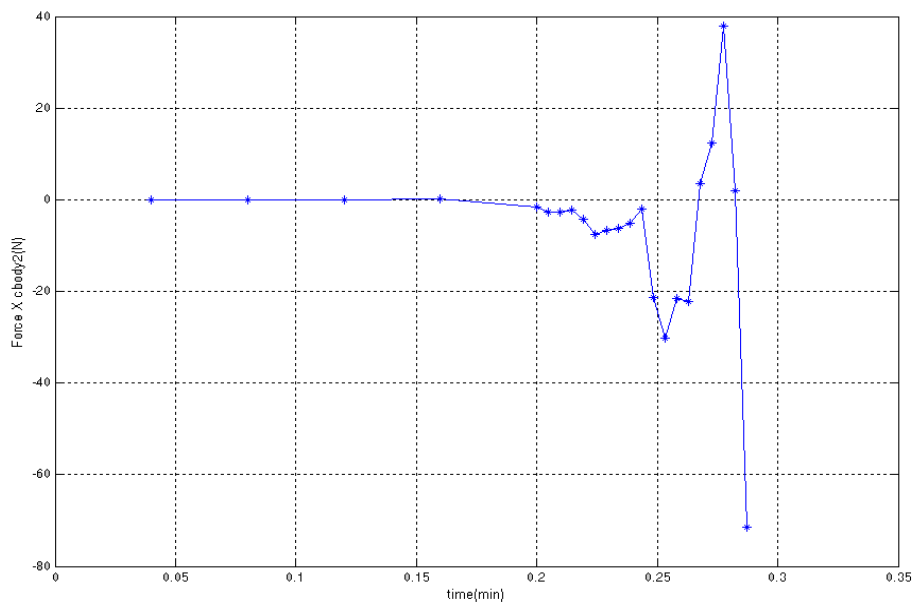
شکل ۵- نیروی وارد به نیمه پایینی قالب نوع اول



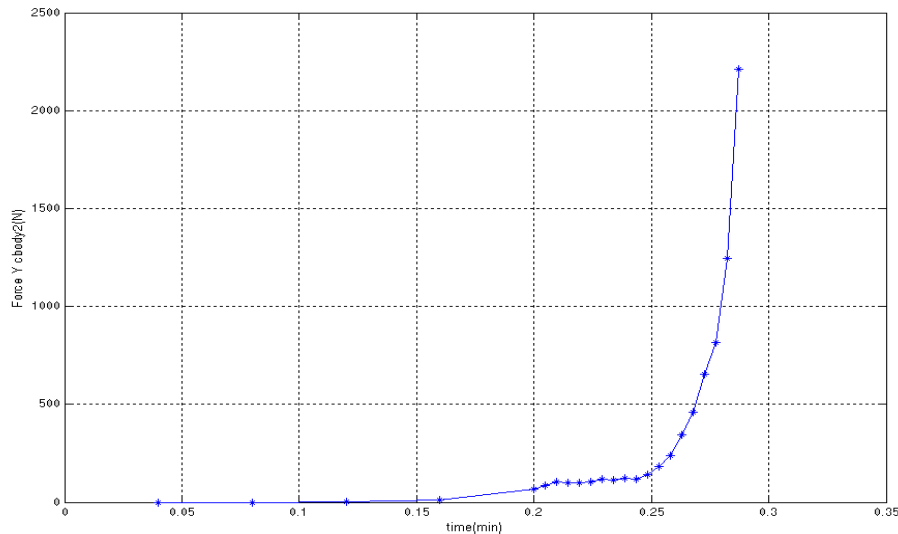
شکل ۷- توزیع نیروی قائم (درجهت Y) در قالب نوع دوم



شکل ۸- نمودار جهت جریان در قالب نوع دوم



نمودار ۳- تغییرات نیروی وارد به بدنه قالب نوع دوم در جهت افقی (x) بر حسب زمان



نمودار ۴- تغییرات نیروی وارد به نیمه بالایی قالب نوع دوم در جهت عمودی (Y)

۴- بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به شکل‌های ۵ و ۶ که جهت جریان ماده را مشخص می‌کنند، می‌توان به راحتی جهت گیری فایبرها را مشاهده کرد و در صورت نیاز تغییرات لازم در راستای تصحیح جهت فایبرها انجام داد. نمودار ۱ تغییرات دمای ماده را نسبت به زمان معین می‌کند که جهت شبیه سازی فرایند پخت ماده گرماسخت تقویت شده با الیاف و تعیین زمان مناسب جدا کردن دو نیمه قالب از هم و خروج قطعه مناسب می‌باشد. نمودارهای ۲ و ۴ مقدار نیروی لازم برای پرشدن کامل قالب را نسبت به زمان معین می‌کند که با کمک آن می‌توان برنامه حرکت نیمه بالایی قالب را بهینه کرد شکل‌های ۴ و ۸ نیروی وارد به قالب را محاسبه می‌کند که دانستن آن برای طراحی قالب و انتخاب جنس آن لازم و ضروری می‌باشد. نتایج بدست آمده از شبیه سازی اجزاء محدود نشان می‌دهد که روش فوق توانایی پیش بینی وضعیت هندسی قطعه تولید شده، بارهای حرارتی و مکانیکی اعمال شده به قالب و قطعه در هنگام قالب گیری را دارا می‌باشند که برای تصحیح و بدست آوردن محدوده بهینه پارامترهای فرآیند در راستای کاهش ضایعات و بهبود کیفیت قطعه تولیدی می‌توانند مورد استفاده طراح قرار گیرند.

مراجع

- 1- Osswald, TA and Tucker CL, Compression molding filling simulation for non-planar parts, Polymer Processing V , pp78-79, 1990.
- 2- Chen, SC, Chen, YC and Peng HS, Simulation of injection-compression molding process, Part 2: Influence of process characteristics in part shrinkage, Applied Polymer Sciences, Vol 75, pp 1640-1654, 2000.
- 3- Rios, A, Davis, B and Gramann, P, Computer Aided Engineering in Compression Molding, The Madison Group, Madison, WI 2001.
- 4- CADPRESS®, The Madison Group: Polymer Processing Research Corporation, Madison, WI.
- 5- MOLDFLOW®, Moldflow Pty. Ltd., Melbourne Australia.
- 6- Robert A. Malloy, Plastic Part Design for Injection Molding, 1998.
- 7- <http://quantumcomposites.com/>.
- 8- <http://www.mscsoftware.com/products/cae-tools/marc-and-mentat.aspx>.