

بررسی اثر پارامترهای فرایند قالبگیری تزریقی ABS و PP به کمک آب با استفاده از روش بهینه‌سازی تابع هدف با معیارهای چندگانه (OEC)

طاهر ازدست^۱، زهرا محمدیان^۲، امیر حسین بهروش^۳، احمدضیاء احمدزی^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۰/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۲/۸

چکیده:

در این تحقیق از بهینه‌سازی تابع هدف طراحی آزمایشی تاگوچی برای یافتن شرایط بهینه فرایند قالبگیری تزریقی به کمک آب برای دو پلیمر ABS و PP استفاده شده است. به منظور قالبگیری تزریقی نمونه‌ها، قالب لوله‌ی دو سر با حفره مواد اضافه و نازل تزریق آب طراحی و ساخته شد. با توجه به اینکه توابع هدف مختلفی در این فرایند مدنظر است، لذا از روش بهینه‌سازی تابع هدف با معیارهای چندگانه کلی^۱ (OEC) استفاده شد. نوع مشخصه کیفی بزرگتر- بهتر برای تابع هدف OEC مورد استفاده قرار گرفت. توابع هدف خروجی در این تحقیق برای قطعات تولید شده میزان نفوذ آب در داخل قطعه و اختلاف بیشترین و کمترین انقباض در طول قطعه انتخاب شدند. سه متغیر زمان نگهداری، دمای قالب و زمان تأخیر به عنوان متغیرهای کنترل در نظر گرفته شدند. آرایه ارتوگونال استاندارد M₉ تاگوچی برای طراحی استفاده گردید و از آنالیز واریانس^۲ (ANOVA) برای تجزیه و تحلیل آماری نتایج استفاده شد. نتایج OEC نشان داد که در بین متغیرها، برای پلیمر ABS پارامتر زمان تأخیر بیشترین تأثیر را روی مشخصه کیفی محصول تولیدی داشته است و پس از آن دمای قالب و زمان نگهداری به ترتیب بر روی فرایند قالبگیری تزریقی به کمک آب مؤثر بوده‌اند و در پلیمر PP فاکتور زمان نگهداری مؤثرترین فاکتور بر روی مشخصه کیفی محصول تولیدی بوده و پس از آن به ترتیب زمان تأخیر و دمای قالب بر مشخصه کیفی تأثیر داشته‌اند.

کلمات کلیدی: قالب‌گیری تزریقی به کمک آب، بهینه‌سازی، طراحی آزمایشات به روش تاگوچی، معیارهای چندگانه.

فهرست علائم اختصاری

تابع هدف	η	رابطه (۱)	مجموع مربعات	S	رابطه (۵)
مقدار پاسخ مشخصه کیفی	x	رابطه (۱)	درجه آزادی	f	رابطه (۸)
تعداد تکرار در هر آزمایش	n	رابطه (۱)	واریانس	V	رابطه (۹)
مجموع نتایج	T	رابطه (۳)	مجموع مربعات خالص	S'	رابطه (۱۰)
ضریب تصحیح	C.F	رابطه (۴)	درصد تأثیر عامل	P	رابطه (۱۱)
تعداد کل آزمایشات	N	رابطه (۴)	تابع هدف با معیار چندگانه	OEC	رابطه (۱۲)

۱- استادیار- گروه مهندسی مکانیک (ساخت و تولید)- دانشگاه ارومیه

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد- مهندسی مکانیک (ساخت و تولید)- دانشگاه ارومیه zahramoh1418@gmail.com

۳- دانشیار- گروه مهندسی مکانیک (ساخت و تولید)- دانشگاه تربیت مدرس

۴- دانشجوی دکتری- گروه مهندسی مکانیک (ساخت و تولید)- دانشگاه تربیت مدرس

۱- مقدمه

امروزه پلاستیک‌ها جایگزینی مناسب برای اکثر مواد به خصوص فلزات به حساب می‌آیند. برای شکل‌دهی پلاستیک‌ها فرایندهای زیادی به وجود آمده است مانند اکستروژن، قالبگیری چرخشی، قالبگیری تزریقی دمشی، قالبگیری تزریقی گاز و قالبگیری تزریقی به کمک سیال. فرآیند قالبگیری تزریقی به کمک سیال یکی از روش‌های نوین تولید قطعات پلاستیکی محسوب می‌شود و همواره مورد توجه محققان و تولیدکنندگان محصولات پلاستیکی بوده است. تزریق پلاستیک به کمک سیال دارای دو کاربرد مهم می‌باشد: نخست تولید قطعاتی با ضخامت کمتر مانند بدنه تلویزیون و چاپگر به طوریکه دارای حداقل انقباض و اعوجاج باشند و دوم تولید قطعات لوله‌ای با اشکال پیچیده و مجاری چندراجه که دارای زوایا و انحنا نسبتاً زیادی هستند [۱].

هنگامی که از یک گاز به عنوان سیال استفاده می‌شود، فرایند مربوطه قالبگیری تزریقی به کمک گاز^۳ (GAIM) نامیده شده و در صورت استفاده از آب، فرایند را قالبگیری تزریقی به کمک آب^۴ (WAIM) می‌نامند. تزریق به کمک آب به عنوان بخش تکمیل‌کننده تزریق به کمک گاز، در اواخر سال ۱۹۹۸ توسط انستیتو پلاستیک شهر آخن آلمان^۵ معرفی و توسعه یافت که در سالهای اخیر مورد توجه و مطالعه جدی قرار گرفته است. اصول فرآیند تزریق به کمک گاز و آب مشابه همدیگر است. در هر دو روش سیال با فشار بالا در درون مذاب با فاصله بسیار کوتاهی از زمان تزریق رزین در قالب که به زمان تأخیر معروف است، تزریق می‌شود. تفاوت مهم این دو روش در این است که تراکم ناپذیری آب قابلیت کنترل بهتری نسبت به گاز در شکل‌دهی حفره ایجاد می‌کند. از سوی دیگر آب ماده‌ای است ارزان و قابل دسترسی و قابل استفاده مجدد و دارای اثر خنک‌کنندگی خوبی است که می‌تواند باعث کاهش زمان خنک‌کاری تا حدود ۷۰٪ نسبت به تزریق به کمک گاز شود.

در سال ۱۹۹۹، Rhee و همکارش [۲] از فرآیند تزریق به کمک گاز برای تولید قطعه رویی جارو برقی از جنس PP استفاده نمودند. ایشان فرایند را به کمک CAE تحلیل کرده و به دلیل عدم موفقیت در تحلیل پیچیدگی و مراحل اصلی فرایند، آنها

دوباره تحلیل خود را توسط روش تاگوچی بهینه نمودند. در همین سال بهروش و علاءالمحدثین [۳] برای اولین بار در ایران به طور عملی موفق به انجام فرآیند تزریق به کمک گاز شدند. در سال ۲۰۰۲، Jüntgen و همکارش [۴] در مورد تزریق به کمک آب به عنوان روش جذاب و تکمیل‌کننده تزریق به کمک گاز مقاله‌ای را ارائه نمودند که بیشتر به تاریخچه و مقایسه این روش پرداخته است. در سال ۲۰۰۳، Prortte و همکارانش [۵] در مقاله‌ای به مقایسه بین تزریق به کمک آب و گاز پرداخته‌اند و قابلیت این دو فرآیند را در تولید لوله با اشکال پیچیده مقایسه نموده‌اند. در همین سال بهروش و حبیب‌زاده [۶،۷] با ارائه دو طرح در ساخت نازل تزریق گاز با انجام آزمایشاتی به مقایسه طرحهای پیشنهادی پرداختند. ایشان در همان سال با انجام آزمایشها نشان دادند که با استفاده از فرآیند تزریق به کمک گاز میزان عیوب ظاهری نظیر پیچش، نسبت به روشهای متداول تزریق کاهش می‌یابند. در سال ۲۰۰۴، Liu و همکارش [۸] در مقاله‌ای به مقایسه تزریق به کمک آب، گاز و الکل پرداختند. همچنین در سال ۲۰۰۵، Lin و همکارش [۹] تحقیقی در مورد پدیده انگشتی‌شدن در کامپوزیت پلی‌پروپیلین با الیاف کوتاه شیشه به روش تزریق به کمک آب پرداختند و همچنین تأثیر اندازه ریب بر روی شکل و اندازه پدیده انگشتی‌شدن را بررسی نمودند. در سال ۲۰۰۶، Hwang و همکارانش [۱۰] در مورد مراحل تزریق به کمک آب بر روی دو ماده ABS و PP تحقیق نمودند. ایشان در تحقیق خود پارامترهای دمای قالب، زمان تأخیر، دمای مذاب، فشار آب و دمای آب را مورد مطالعه قرار دادند. در سال ۲۰۰۷، He و همکارش [۱۱] با استفاده از الگوریتم ژنتیک پیش‌بینی پارامترهای دمای قالب، فشار آب، زمان تأخیر و تزریق ناقص را در تزریق به کمک آب انجام دادند. در همین سال Huang و همکارانش [۱۲] طول نفوذ آب، ضخامت دیواره‌ها و رفتار کریستالی شدن در تزریق به کمک آب را مورد مطالعه قرار دادند. در سال ۲۰۰۹، Liu و همکارانش [۱۳] به بررسی مورفولوژی آلیاژهای HDPE/PA-6 در فرایند WAIM پرداختند. در همین سال Lin و همکارانش [۱۴] تغییرات پارامتر دمای قالب برای بهبود یکنواختی دیواره قالب در هر دو فرایند تزریق به کمک گاز و آب را مورد مطالعه و بررسی قرار داده و

متعدد و برای جلوگیری از پاره شدن پلیمر در اثر فشار بالای آب، فشار تزریق آب برای ABS، ثابت و برابر با ۴۵ بار و برای PP، ۲۵ بار انتخاب شد. همچنین دمای مذاب نیز برای ABS، ثابت و ۲۳۰ درجه سانتی گراد و برای PP، ۲۱۰ درجه سانتی گراد در نظر گرفته شد. برای هر دو پلیمر، دمای آب در مقدار ثابت ۲۰ درجه سانتی گراد تنظیم گشت.

ماده پلیمری مورد استفاده قبل از تزریق به مدت ۸ ساعت در دستگاه خشک کن قرار گرفت. قالب لوله‌ای دو سر دارای حفره مواد اضافی، برای قالبگیری نمونه‌ها طراحی و ساخته شد (شکل ۱). این امر برای اطمینان از پر شدن کامل قالب قبل از تزریق آب می‌باشد [۱۷]. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود نازل تزریق آب، به فاصله ۱۰ میلی‌متر از گیت تعبیه شده است. این نازل برای هدایت آسان آب به درون حفره قالب و جلوگیری از نفوذ پلیمر به درون آن انتخاب شد. با الهام گرفتن از طراحی و ساخت نازل گاز، سه نوع نازل تزریق آب طراحی و ساخته شد که پس از آزمایش‌های متعدد، بهترین آنها برای انجام آزمایشات مورد استفاده قرار گرفت.

واحد کنترل شامل یک سیلندر فشار بالا به عنوان مخزن آب، یک سیلندر فشار بالا حاوی گاز N₂ برای پمپاژ آب، رگلاتور تنظیم فشار آب و زمان‌سنج جهت تنظیم زمان تأخیر و زمان نگهداری در مقادیر مورد نظر به کار گرفته شد. تنظیم دمای قالب توسط دستگاه گرمکن روغنی و با تعبیه شیارهای روغن در داخل قالب انجام پذیرفت. شماتیکی از سیستم به کار رفته برای تزریق آب در شکل ۲ ارائه شده است.

توابع هدف خروجی در این تحقیق برای قطعات تولید شده عبارتند از: میزان نفوذ آب در داخل قطعه و اختلاف بیشترین و کمترین انقباض در طول قطعه. بدین منظور این قطعات تولید شده به فاصله‌های مساوی ۱۰ میلی‌متر در مسیر I₁ به طول ۱۴۰ میلی‌متر و مسیر I₂ به طول ۱۵۳ میلی‌متر مطابق شکل ۳ بریده شدند و طول نفوذ آب و اختلاف انقباض با دقت زیاد اندازه‌گیری و داده‌برداری شدند.

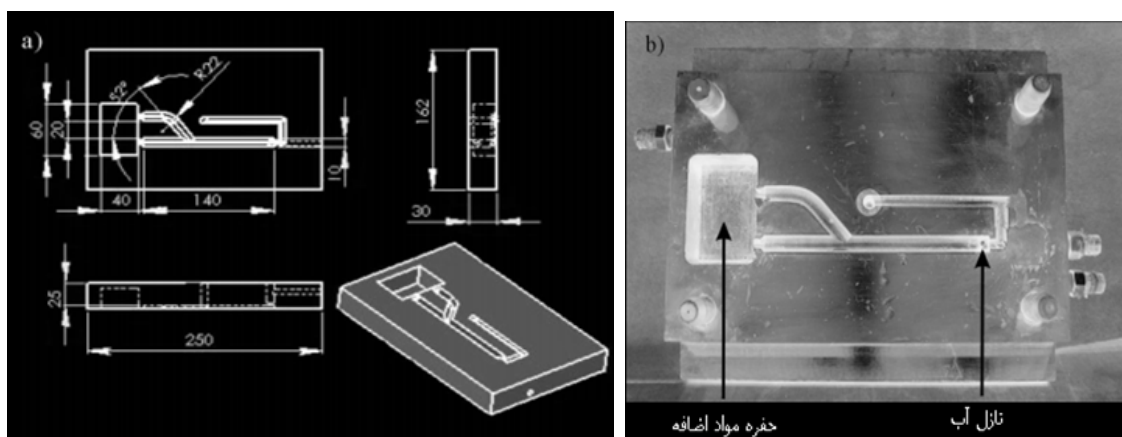
اعلام نمودند که قطعات تولیدی در فرایند تزریق با آب دارای ضخامت دیواره یکنواخت‌تری در مقایسه با تزریق به کمک گاز می‌باشند.

از آنجا که عوامل متعددی در فرایند WAIM تاثیرگذار هستند و مطالعه اثر تک تک این عوامل مستلزم انجام آزمایش‌های بسیار زیاد و صرف هزینه و وقت زیادی است، لذا انتخاب یک روش طراحی آزمایشی مناسب و بهینه‌سازی تابع هدف مورد نظر می‌تواند در حصول به این نتیجه بسیار مؤثر باشد. یکی از روش‌های طراحی آزمایشی، روش تاگوچی است. روش تاگوچی در طراحی آزمایش را می‌توان همان روش فاکتوریل جزئی دانست. تاگوچی برای استفاده آسانتر این روش آرایه‌های متعامد را پیشنهاد نموده است [۱۵، ۱۶]. در این تحقیق نیز از بهینه‌سازی تابع هدف طراحی آزمایشی تاگوچی برای یافتن شرایط بهینه فرایند WAIM برای دو ماده ABS و PP استفاده شده است. به منظور قالبگیری تزریقی نمونه‌ها، قالب لوله‌ای دو سر با حفره مواد اضافه و نازل تزریق آب طراحی و ساخته شد. با توجه به اینکه توابع هدف مختلفی در یک طراحی ممکن است مدنظر باشد، لذا در این حالت از روش بهینه‌سازی تابع هدف با معیارهای چندگانه کلی (OEC) استفاده می‌شود که در ادامه توضیح داده خواهد شد. در این تحقیق پارامترهای فرآیندی زمان فشار نگهداری، زمان تأخیر و دمای قالب به عنوان پارامترهای متغیر و فشار تزریق، دمای مذاب، دمای آب و فشار آب به عنوان پارامترهای ثابت انتخاب شده‌اند.

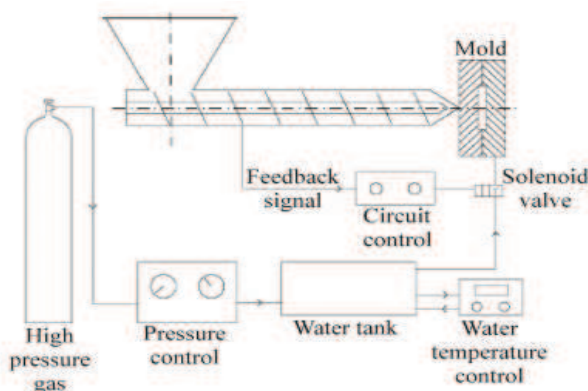
۲- مواد و روشها:

۲-۱ آزمایشات تجربی

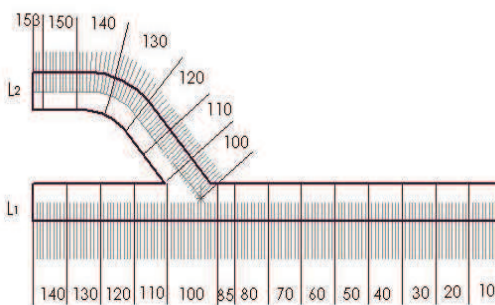
۲-۲ در این آزمایشها از ماده پلیمری ABS^۱ ساخت شرکت Chemical Kumho کشور کره جنوبی، گرید SW 750 به عنوان نماینده مواد پلیمری بی‌شکل و PP^۲ ساخت شرکت نوید زرشمی ایران به عنوان نماینده مواد نیمه کریستالی مورد استفاده قرار گرفته است. برای تهیه نمونه‌های آزمایشی از یک دستگاه تزریق آزمایشگاهی با تناژ ۷۰ بار استفاده شد. پس از انجام آزمایش‌های



شکل (۱): قالب مورد استفاده در آزمایشات: (a) نقشه قالب، (b) قالب ساخته شده



شکل (۳): مقاطع تعیین شده برای اندازه‌گیری



شکل (۲): شماتیک سیستم تزریق

دو نوع مشخصه کیفی معمولاً بررسی می‌شود که عبارتند از: بزرگتر- بهتر^۱ و کوچکتر- بهتر^۲. در مسایل نوع بزرگتر- بهتر مشخصه کیفی پیوسته و مثبت است و بیشترین مقدار ممکن را می‌گیرد. در این گونه مسایل هیچ‌گونه عامل تنظیم‌کننده مشخصه کیفی وجود ندارد و به سادگی با مینیمم سازی تابع اتلاف^۱ (یا ماکزیمم سازی تابع هدف η) بهینه‌سازی انجام می‌گیرد. تابع هدف (η) در این حالت به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta = -10 \log_{10}(\text{میانگین مربعات پاسخها}) = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i^2} \right] \quad (1)$$

که در آن x_i مقدار پاسخ مشخصه کیفی مورد نظر و n تعداد تکرارها است. مسایل نوع کوچکتر- بهتر عکس حالت مسایل نوع بزرگتر- بهتر هستند. در آنها نیز مشخصه کیفی پیوسته و مثبت بوده و مقادیر صفر تا بی‌نهایت را می‌گیرد که صفر

۳-۲- بهینه‌سازی

پاسخی که به‌منظور بهینه‌سازی در یک روش طراحی آزمایشی در نظر گرفته می‌شود، مشخصه کیفی نامیده می‌شود. متغیرهای مختلفی می‌توانند مشخصه کیفی یا پاسخ یک فرایند یا یک محصول را تحت تأثیر قرار دهند. این متغیرها به سه دسته عوامل سیگنال، نویز و کنترل‌کننده تقسیم‌بندی می‌شوند. عوامل سیگنال، متغیرهایی هستند که توسط کاربر یا اپراتور فرایند برای رسیدن به یک پاسخ مشخص، به سیستم داده می‌شوند. عوامل نویز متغیرهایی هستند که توسط کاربر قابل کنترل نیستند و کیفیت محصول را تحت تأثیر قرار می‌دهند. عوامل کنترل‌کننده عواملی هستند که کاربر باید با تغییر آنها به یک میزان بهینه از پاسخ دست یابد [۱۵]. برای تعیین بهترین مقدار عوامل کنترل‌کننده باید از بهینه‌سازی تابع هدف استفاده شود.

مجموع درصدهای تأثیر تمامی توابع در تابع هدف کلی برابر ۱۰۰ خواهد بود. با انتخاب درصد وزنی ۵۰٪ برای هر یک از توابع هدف، نتایج آزمونهای مختلف در تابع هدف کلی قرار داده شده و بهینه‌سازی تابع هدف جدید صورت گرفته و پس از ارزیابی و تجزیه و تحلیل نتایج، شرایط بهینه انتخاب می‌گردد. انتخاب درصد وزنی برای هر کدام از مشخصه‌های کیفی به داشتن تجربه در زمینه مورد مطالعه بستگی دارد و تغییر این درصد وزنی، باعث تغییرات در تابع هدف موردنظر و نهایتاً در شرایط بهینه حاصله می‌گردد. برای تجزیه و تحلیل آماری نتایج از آنالیز واریانس (ANOVA) استفاده شده است. مراحل مختلف این آنالیز که در نهایت منجر به محاسبه درصد تأثیر هر متغیر روی مشخصه کیفی می‌گردد، در زیر توضیح داده می‌شود [۱۵، ۱۶].

مطلوب‌ترین حالت آن است. تابع هدف (η) در این حالت به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\eta = -10 \log_{10}(\text{میانگین مربعات پاسخها}) = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 \right] \quad (2)$$

در این تحقیق شرط بزرگتر - بهتر برای تابع هدف با معیاری چندگانه انتخاب شده است.

متغیرها و سطوح انتخابی در این تحقیق برای طراحی آزمایش تاگوچی در جدول ۱ ارائه شده‌اند. با توجه به متغیرها و سطوح مربوطه آرایه ارتوگونال M_9 برای این طراحی پیشنهاد شده است که آرایه مربوطه در جدول ۲ آورده شده است.

مشخصه کیفی مورد مطالعه در این تحقیق، تابع هدف با معیاری چندگانه است. در روش ارزیابی معیارهای چندگانه به هر تابع هدف یک وزن (بین ۰ تا ۱۰۰٪) داده می‌شود، به طوری که

جدول (۱): متغیرها و سطوح مورد استفاده در طراحی آزمایشی تاگوچی برای فرایند قالبگیری تزریقی به کمک آب

متغیر	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
۱ زمان نگهداری فشار (s)	۵	۱۰	۱۵
۲ دمای قالب (°C)	۳۰	۴۰	۵۰
۳ زمان تاخیر (s)	۲/۵	۵	۱۰

جدول (۲): آرایه ارتوگونال M_9

شماره آزمایش	زمان نگهداری فشار (s)	دمای قالب (°C)	زمان تاخیر (s)
۱	۱	۱	۱
۲	۱	۲	۲
۳	۱	۳	۳
۴	۲	۱	۲
۵	۲	۲	۳
۶	۲	۳	۱
۷	۳	۱	۳
۸	۳	۲	۱
۹	۳	۳	۲

- محاسبه مجموع نتایج (T)

$$T = (y_1 + y'_1 + \dots) + (y_2 + y'_2 + \dots) + \dots \quad (3)$$

که در آن y و y' تکرار نتایج هر نمونه است و زیرنویس ۱ و ۲ و ... مربوط به تعداد نمونه‌ها است.

- محاسبه ضریب تصحیح (C.F)

$$C.F = T^2 / N$$

(۴)

که در آن N تعداد کل آزمایشها است.

- محاسبه مجموع مربعات کل (ST)

۳- نتایج و بحث:

میانگین نتایج مربوط به طول نفوذ آب و اختلاف انقباض سه بار تکرار نمونه‌های مربوطه و همچنین نتایج معیارهای چندگانه برای پلیمر ABS در جداول ۳ ارائه شده‌اند. محاسبه مقادیر OEC بر اساس مشخصه کیفی و درصد وزنی هر یک از پارامترها که در جدول ۴ ارائه گشته‌اند، انجام یافته است. همچنین میانگین نتایج مربوطه و نتایج OEC و مقادیر مورد استفاده برای به دست آوردن این نتایج برای پلیمر PP در جداول ۵ و ۶ ارائه شده‌اند. مقادیر بدست آمده از آزمایشها نشان می‌دهد مقدار طول نفوذ آب در نمونه‌های ABS نسبت به نمونه‌های PP کمتر است که دلیل آن می‌تواند بالا بودن ویسکوزیته مذاب ABS نسبت به PP باشد. در مورد اختلاف انقباض نیز برای ABS این مقدار نسبت به نمونه‌های PP کمتر است. علت این امر را می‌توان در اختلاف بین خواص ویسکوالاستیکی مواد بی‌شکل و نیمه- کریستالی و به دنبال آن در اختلاف بین تغییرات حجم مخصوص بر حسب دما (دیگرام PVT) برای مواد بی‌شکل و نیمه کریستالی جستجو کرد. در مواد نیمه کریستالی تغییر ناگهانی حجم مخصوص در لحظه تغییر حالت مذاب به جامد مشاهده می‌شود. اما برای مواد بی‌شکل تغییرات حجم مخصوص بر حسب دما از دمای مذاب به دمای محیط به آرامی صورت می‌گیرد. این تغییر تدریجی باعث می‌شود تنش‌های ایجاد شده در قطعه در اثر سرد کردن، به راحتی آزاد شده^{۱۱} و لذا انقباض ناشی از این تنش‌ها پایین می‌باشد. اما تغییر ناگهانی حجم مخصوص به تنش‌های ایجاد شده اجازه آزاد شدن نداده و همین امر انقباض ناشی از این تنش‌ها را افزایش می‌دهد. در بحث خواص ویسکوالاستیکی پلیمرها این خصوصیت را به ثابت زمانی استراحت تعبیر می‌کنند که مقدار آن برای مواد بی‌شکل به مراتب پایین تر از مواد نیمه کریستالی است [۱۹].

نتایج آنالیز واریانس (ANOVA) و اثر متغیرهای مختلف دو طول L_1 و L_2 به ترتیب در جداول ۷ و ۸ و برای ماده PP در دو طول L_1 و L_2 به ترتیب در جداول ۹ و ۱۰ ارائه شده است. نتایج این جداول نشان می‌دهد که در پلیمر ABS فاکتور زمان تأخیر بیشترین تأثیر را روی مشخصه کیفی محصول تولیدی داشته است و پس از آن به ترتیب دمای قالب و زمان نگهداری مؤثر

$$S_T = \sum_{i=1}^n y_i^2 - C.F \quad (5)$$

- محاسبه مجموع مربعات مربوط به هر عامل (S)

$$S_A = S_{A1}/N_{A1} + S_{A2}/N_{A2} + \dots - C.F \quad (6)$$

که در آن به عنوان مثال S_{A1} مجموع نتایج است که در آن عامل A در سطح یک قرار داشته و N_{A1} تعداد نتایج است که در آنها عامل A در سطح یک قرار داشته است.

- محاسبه مجموع مربعات خطا (S_{Error})

$$S_{Error} = S_T - (S_A + S_B + \dots) \quad (7)$$

- محاسبه درجه آزادی (f)

$$f_T = N - 1$$

$$f_A = k - 1$$

$$f_{Error} = f_T - f_A - f_B - \dots \quad (8)$$

که در آن f_T درجه آزادی کل، N تعداد کل آزمایش‌ها، f_A و f_B و ... درجه آزادی عوامل A و B و ... و k تعداد سطوح هر عامل و f_{Error} درجه آزادی خطا می‌باشد.

- محاسبه واریانس (V)

$$V_A = S_A / f_A$$

$$V_{Error} = S_{Error} / f_{Error} \quad (9)$$

- محاسبه مجموع مربعات خالص (S')

$$S'_A = S_A - (V_{Error} \times f_A) \quad (10)$$

- محاسبه درصد تأثیر هر یک از عاملها (P)

$$P_A = S'_A / S_T \quad (11)$$

در این پژوهش از میانگین نتایج برای محاسبات آماری استفاده شده است. هدف از مطالعه، بهینه‌سازی تابع هدف با معیار چندگانه مورد نظر است که این تابع با استفاده از نتایج توابع هدف اولیه و درصد وزنی مربوط به هر کدام از آنها از طریق رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

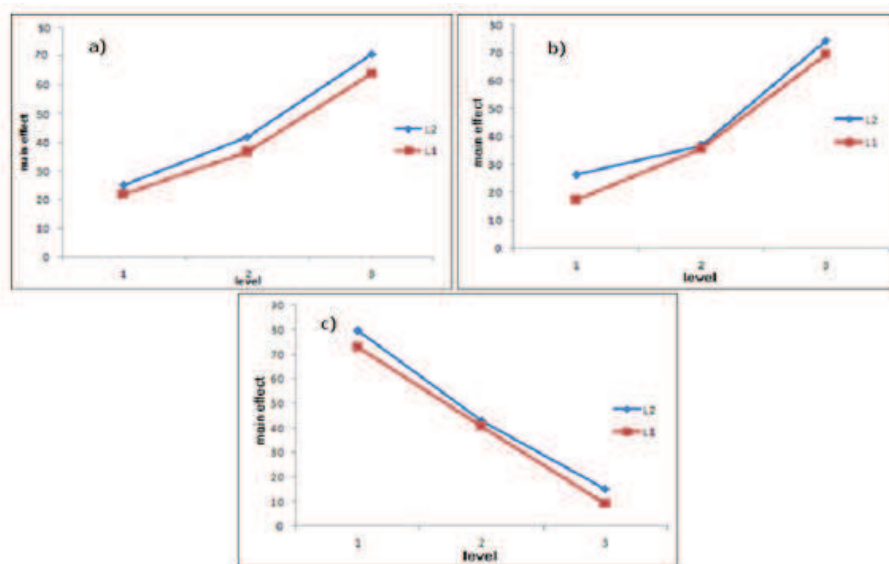
$$OEC = \left(\frac{X_1 - W_1}{B_1 - W_1} \right) \times wt_1 + \left(\frac{X_2 - W_2}{B_2 - W_2} \right) \times wt_2 + \dots \quad (12)$$

که در رابطه فوق، X_1, X_2, \dots نشان دهنده مقدار توابع هدف، W_1, W_2, \dots مقادیر بدست آمده نامطلوب، B_1, B_2, \dots مقادیر بدست آمده مطلوب و wt_1, wt_2, \dots درصد وزنی مربوط به هر یک از عوامل می‌باشند [۱۸].

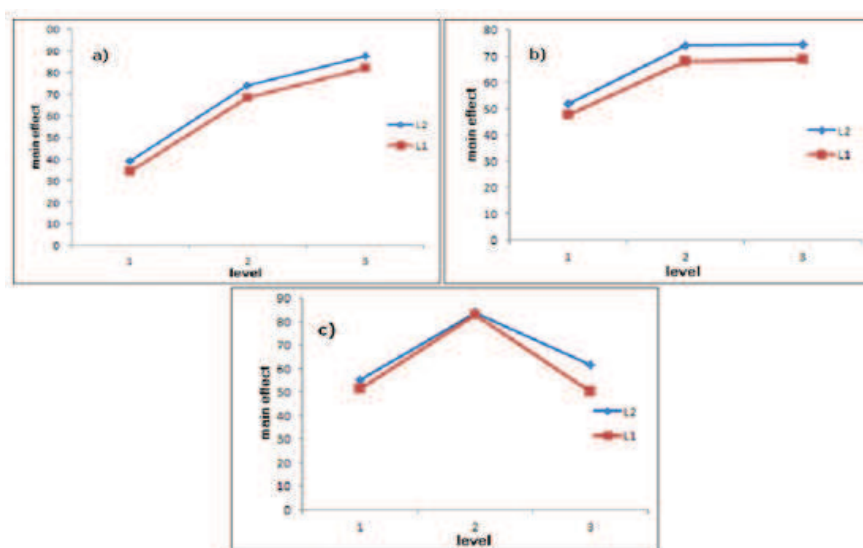
هر دو طول L_1 و L_2 در ماده ABS به ترتیب ۱۵، ۵۰ و ۲/۵ انتخاب شد که به دلیل عدم حضور این سطوح در آرایه متعامد، با انجام آزمایش‌های تأییدی در سطوح انتخابی، مقادیر نفوذ آب و انقباض میانگین برای سه بار تکرار در این سطوح به ترتیب ۱۴۰ و ۰/۰۴ برای طول L_1 و ۱۵۳ و ۰/۰۵ برای طول L_2 بدست آمدند که با توجه به مقادیر آزمایش‌های پیشین مقادیری مطلوب می‌باشند. شکل ۵ نمایانگر اثر پارامترهای مورد آزمایش در ماده PP برای طولهای L_1 و L_2 می‌باشد. با در نظر گرفتن تحلیل‌های بیان شده سطوح بهینه برای سه متغیر زمان نگهداری، دمای قالب و زمان تأخیر برای هر دو طول L_1 و L_2 در پلیمر PP به ترتیب ۱۵، ۵۰ و ۵ انتخاب گشت که نتایج آزمایش‌های پیشین نیز مؤید این مطلب بوده است. همانطور که مشاهده می‌شود تغییرات دو پارامتر زمان نگهداری و دمای قالب، برای هر دو پلیمر مشابه بوده در حالیکه بهترین شرایط برای ماده ABS در زمان تأخیر ۲/۵ ثانیه و برای ماده PP در زمان تأخیر ۵ ثانیه است. بنابراین سیکل تولید در ماده ABS نصف سیکل تولید ماده PP می‌باشد، ضمن اینکه میزان انقباض ماده ABS به مراتب کمتر از ماده PP است. لذا به نظر می‌رسد با لحاظ نمودن قیمت مواد اولیه از ماده ABS می‌توان برای تولید انبوه استفاده نمود.

بوده‌اند. همچنین نتایج این جداول حاکی از این مطلب است که در پلیمر PP فاکتور زمان نگهداری مؤثرترین فاکتور بر روی مشخصه کیفی محصول تولیدی بوده و پس از آن به ترتیب زمان تأخیر و دمای قالب بر مشخصه کیفی تأثیر داشته‌اند. از مقایسه این جداول این نتیجه حاصل می‌شود که ماده ABS دارای حساسیت بیشتری نسبت به زمان تأخیر و دمای قالب است، در حالیکه ماده PP دارای حساسیت کمتری نسبت به زمان تأخیر و دمای قالب می‌باشد. دلیل این موضوع می‌تواند تفاوت شیب تغییرات مدول بر حسب دما برای مواد بی‌شکل و مواد نیمه- کریستالی باشد. بطوریکه حساسیت تغییر مدول اتلاف نسبت به درجه حرارت در ماده بی‌شکل ABS تدریجی بوده در حالیکه برای ماده نیمه-کریستالی PP جهشی (در اطراف نقطه ذوب) می‌باشد [۱۹].

در شکل ۴ اثر پارامترهای مورد آزمایش تحقیق (زمان نگهداری، دمای قالب و زمان تأخیر) برای طولهای L_1 و L_2 در ماده ABS به روش ارزیابی معیارهای چندگانه نشان داده شده است. با توجه به رفتار تغییرات این منحنی‌ها و همچنین با انتخاب شرط بزرگتر- بهتر، شرایط بهینه متغیرها محاسبه گردید. سطوح بهینه برای متغیرهای زمان نگهداری، دمای قالب و زمان تأخیر برای



شکل (۴): نمودار اثرات اصلی متغیرهای آزمایشی برای ماده ABS (زمان نگهداری، (b) دمای قالب و (c) زمان تأخیر



شکل (۵): نمودار اثرات اصلی متغیرهای آزمایشی برای ماده PPa (زمان نگهداری، (b) دمای قالب و (c) زمان تاخیر

جدول (۳): آزمایشهای طراحی شده بر اساس آرایه استاندارد M_9 تاگوچی و نتایج آزمونهای مختلف و روش معیارهای چندگانه برای ماده ABS

نتایج متوسط در طول L_2			نتایج متوسط در طول L_1			سطوح مورد استفاده برای متغیرها			شماره آزمایش
						زمان تاخیر	دمای قالب	زمان نگهداری	
نتایج معیارهای چندگانه	اختلاف انقباض	نفوذ آب	نتایج معیارهای چندگانه	اختلاف انقباض	نفوذ آب				
۴۲/۳۹	۰/۲۶	۱۲۶/۶۷	۳۲/۱۵	۰/۲۵	۱۱۵	۲/۵	۳۰	۵	۱
۹/۱۴	۰/۴	۱۱۴/۳۳	۱۳/۸۲	۰/۳۴	۱۱۲/۶۷	۵	۴۰	۵	۲
۲۲/۹۲	۰/۳۳	۱۱۷/۳۳	۱۹/۲۷	۰/۳۲	۱۱۴/۳۳	۱۰	۵۰	۵	۳
۱۹/۴	۰/۳۳	۱۱۴	۱۳/۴۱	۰/۳۴	۱۱۲/۳۳	۵	۳۰	۱۰	۴
۶/۰۶	۰/۳۶	۱۰۵/۶۷	۱/۷۲	۰/۳۴	۱۰۲/۶۷	۱۰	۴۰	۱۰	۵
۱۰۰	۰/۰۷	۱۵۳	۹۵/۱۶	۰/۰۶	۱۴۰	۲/۵	۵۰	۱۰	۶
۱۶/۶۹	۰/۳۲	۱۱۰	۶/۴۴	۰/۳۵	۱۰۸	۱۰	۳۰	۱۵	۷
۹۵/۴۵	۰/۱	۱۵۳	۹۱/۳۷	۰/۱۱	۱۴۴	۲/۵	۴۰	۱۵	۸
۱۰۰	۰/۰۷	۱۵۳	۹۳/۹۵	۰/۰۶	۱۳۹	۵	۵۰	۱۵	۹

جدول (۴): مقادیر مورد استفاده برای محاسبه OEC در نمونه‌های ABS

پارامتر	مقادیر نامطلوب	مقادیر مطلوب	مشخصه کیفی	درصد وزنی (%)
نفوذ آب	۱۰۲/۶۷	۱۴۴	بزرگتر- بهتر	۵۰
اختلاف انقباض	۰/۳۵	۰/۰۶	کوچکتر- بهتر	۵۰
نفوذ آب	۱۰۵/۶۷	۱۵۳	بزرگتر- بهتر	۵۰
اختلاف انقباض	۰/۴	۰/۰۷	کوچکتر- بهتر	۵۰

جدول (۵): آزمایشهای طراحی شده بر اساس آرایه استاندارد M₉ تاگوچی و نتایج آزمونهای مختلف و روش معیارهای چندگانه برای ماده PP

شماره آزمایش	سطوح مورد استفاده برای متغیرها			L ₁ نتایج متوسطر طول			L ₂ نتایج متوسط در طول		
	زمان نگهداری	دمای قالب	زمان تأخیر	نفوذ آب	اختلاف انقباض	نتایج معیارهای چندگانه	نفوذ آب	اختلاف انقباض	نتایج معیارهای چندگانه
۱	۵	۳۰	۲/۵	۱۰۵	۰/۴۱	۰	۱۰۸	۰/۴۹	۰/۰۱
۲	۵	۴۰	۵	۱۴۰	۰/۳۱	۶۶/۱۲	۱۵۱	۰/۳	۷۲/۷۷
۳	۵	۵۰	۱۰	۱۲۵	۰/۳۶	۳۶/۶۳	۱۳۷/۵	۰/۴	۴۴/۶۱
۴	۱۰	۳۰	۵	۱۴۰	۰/۲۱	۸۲/۲۵	۱۵۳	۰/۲۷	۷۸/۹۴
۵	۱۰	۴۰	۱۰	۱۴۰	۰/۳۹	۵۳/۲۲	۱۵۱	۰/۳۷	۶۳/۵۶
۶	۱۰	۵۰	۲/۵	۱۳۱/۳	۰/۲۱	۶۹/۸۲	۱۴۵	۰/۲	۷۹/۲۶
۷	۱۵	۳۰	۱۰	۱۳۴	۰/۲۹	۶۰/۷۸	۱۴۷	۰/۲۴	۷۶/۲۲
۸	۱۵	۴۰	۲/۵	۱۳۶	۰/۱۶	۸۴/۶	۱۴۹	۰/۱۸	۸۶/۳۴
۹	۱۵	۵۰	۵	۱۴۰	۰/۱	۱۰۰	۱۵۳	۰/۱۱	۱۰۰

جدول (۶): مقادیر مورد استفاده برای محاسبه OEC در نمونه‌های PP

پارامتر	بدترین مقدار خوانده شده	بهترین مقدار خوانده شده	مشخصه کیفی	درصد وزنی (%)
L ₁ طول	۱۰۵	۱۴۰	بزرگتر- بهتر	۵۰
L ₁ طول	۰/۴۱	۰/۱	کوچکتر- بهتر	۵۰
L ₂ طول	۱۰۸	۱۵۳	بزرگتر- بهتر	۵۰
L ₂ طول	۰/۴۹	۰/۱۱	کوچکتر- بهتر	۵۰

جدول (۷): آنالیز واریانس نتایج حاصل از روش ارزیابی معیارهای چندگانه تزریق ABS به کمک آب برای طول L₁

متغیر	درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	مجموع خالص	درصد تاثیر
زمان نگهداری	۲	۲۷۴۱/۵۷۵	۱۳۷۰/۷۸۷	۲۷۱۴/۶۳۴	۲۰/۷۸۳
دمای قالب	۲	۴۱۹۶/۲۱۹	۲۰۹۸/۱۰۹	۴۱۶۹/۲۷۸	۳۱/۹۲۰
زمان تأخیر	۲	۶۰۹۶/۸۷۳	۳۰۴۸/۴۳۹	۶۰۶۹/۹۳۳	۴۶/۴۷۱
خطا	۲	۲۶/۹۴۰	۱۳/۴۷۰		۰/۸۲۶
کل	۸	۱۳۰۶۱/۶۰۸			٪۱۰۰

جدول (۸): آنالیز واریانس نتایج حاصل از روش ارزیابی معیارهای چندگانه تزریق ABS به کمک آب برای طول L₂

متغیر	درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	مجموع خالص	درصد تاثیر
زمان نگهداری	۲	۳۱۸۸/۷۳۱	۱۵۹۴/۳۶۵	۳۰۹۵/۷۴۳	۲۳/۲۱۱
دمای قالب	۲	۳۷۹۴/۵۷۱	۱۸۹۷/۲۸۵	۳۷۰۱/۵۸۳	۲۷/۷۵۳
زمان تأخیر	۲	۶۲۶۰/۹۰۹	۳۱۳۰/۴۵۴	۶۱۶۷/۹۲۱	۴۶/۲۴۶
خطا	۲	۹۲/۹۸۶	۴۶/۴۹۳		۲/۷۹۰
کل	۸	۱۳۳۳۷/۱۹۹			٪۱۰۰

جدول (۹): آنالیز واریانس نتایج حاصل از روش ارزیابی معیارهای چندگانه تزریق PP به کمک آب برای طول L₁

متغیر	درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	مجموع خالص	درصد تاثیر
زمان نگهداری	۲	۳۶۰۷/۲۲۰	۱۸۰۳/۶۱۰	۳۱۱۱/۲۲۰	۴۴/۴۰۲
دمای قالب	۲	۸۵۹/۸۲۵	۴۲۹/۹۱۲	۳۶۳/۸۲۵	۵/۱۹۲
زمان تأخیر	۲	۲۰۴۳/۷۸۶	۱۰۲۱/۸۹۳	۱۵۴۷/۷۸۶	۲۲/۰۸۹
خطا	۲	۴۹۵/۹۹۹	۲۴۷/۹۹۹		۲۸/۳۱۷
کل	۸	۷۰۰۶/۸۳۲			٪۱۰۰

جدول (۱۰): آنالیز واریانس نتایج حاصل از روش ارزیابی معیارهای چندگانه تزریق PP به کمک آب برای طول L₂

متغیر	درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	مجموع خالص	درصد تاثیر
زمان نگهداری	۲	۳۷۳۸/۰۰۵	۱۸۶۹/۰۰۲	۲۹۹۶/۸۲۶	۴۳/۵۷۴
دمای قالب	۲	۱۰۳۱/۴۲۳	۵۱۵/۷۱۱	۲۹۰/۲۴۳	۴/۲۲۰
زمان تأخیر	۲	۱۳۶۶/۸۹۴	۶۸۳/۴۴۷	۶۲۵/۷۱۵	۹/۰۹۷
خطا	۲	۷۴۱/۱۷۹	۳۷۰/۵۸۹		۴۳/۱۰۹
کل	۸	۶۸۷۷/۵۰۳			٪۱۰۰

۴- نتیجه گیری:

مؤثرترین فاکتور بر روی مشخصه کیفی محصول تولیدی بوده و پس از آن به ترتیب زمان تأخیر و دمای قالب بر مشخصه کیفی تأثیر داشته‌اند. همچنین سطوح بهینه برای سه متغیر زمان نگهداری، دمای قالب و زمان تأخیر برای هر دو طول L₁ و L₂ در پلیمر PP به ترتیب ۱۵، ۵۰ و ۵ انتخاب گشت که نتایج آزمایش‌های پیشین نیز مؤید این مطلب بوده‌است.

در این تحقیق از بهینه‌سازی تابع هدف طراحی آزمایشی و آرایه ارتوگونال استاندارد M₉ تاگوچی برای یافتن شرایط بهینه فرایند قالبگیری تزریقی ABS و PP به کمک آب استفاده شده است. با توجه به اینکه توابع هدف مختلفی در این طراحی مدنظر است، لذا از روش بهینه‌سازی تابع هدف با معیارهای چندگانه کلی (OEC) استفاده شد. نوع مشخصه کیفی بزرگتر- بهتر برای تابع هدف OEC مورد استفاده قرار گرفت. نتایج آنالیز واریانس نشان داد که در پلیمر ABS، فاکتور زمان تأخیر بیشترین تأثیر را روی مشخصه کیفی محصول تولیدی داشته‌است و پس از آن دمای قالب و زمان نگهداری تأثیرگذار بوده‌است. سطوح بهینه برای متغیرهای زمان نگهداری، دمای قالب و زمان تأخیر برای هر دو طول L₁ و L₂ به ترتیب ۱۵، ۵۰ و ۲/۵ انتخاب شد که پس از انجام آزمایشات تأییدی صحت نتایج بدست آمده مورد تأیید قرار گرفت. همچنین در پلیمر PP، فاکتور زمان نگهداری

پی‌نوشت:

1. Overall Evaluation Criteria
2. Analysis of Variance
3. Gas Assisted Injection Molding
4. Water Assisted Injection Molding
5. Institute of Plastics Processing
- 6- Acrylic Butadiene Styrene
- 7- Polypropylene
8. Larger-the Better
9. Smaller- the Better
10. Loss Function
11. Stress Relaxation

مراجع

- 1- Avery, J., "Hand Book of Gas Assisted Injection Molding: Principles and Applications", HanserPublication, Munich, 2001.
- 2- ByungOhk Rhee, Hung-KyuAhn "Gas Assisted Injection Molding of a Vacuum Cleaner Body" SPE ANTEC Tech Paper, 1999.
- 3- A. H. Behraves, F. AlaolMohaddesin, "Experimental Investigation of Gas Assisted Injection Molding Process" Iranian Fifth Seminar on Polymer Science and Technology, 2000.

- 4- Tim Jüntgon, Walter, "The Water Injection Technique (WIM) as an Attractive Alternative and Supplement to Gas-Assisted Injection Molding (GAIM)", SPE ANTEC Tech Paper, 2002.
- 5- R.Protte, "Water-Assisted Injection Molding with Bayer Polymers", Injection Molding Technical Information, Bayer Polymer Co, 2003.
- 6- A.H.Behravesh, A.H.Habibzadeh, "Design and manufacture of Gas Nozzle in GasAssisted Injection Molding Process", Proceeding of Fifth Conference of Manufacturing and Production Engineering of Iran, 2003.
- 7- A. H. Behravesh, AlaolMohaddesin, N.Habibzadeh, "Experimental Studies on Filling Process and Warpage Elimination in Gas Assisted Injection Molding Process", Proceeding of 19th Canadian Congress of Applied Mechanics, Calgary, Canada, 2003.
- 8- Shih-Jung Liu, Yen-Show Chen, "Water Assisted Injection Molding of Thermoplastic Materials" SPE ANTEC Tech Paper, 2004.
- 9- Shih-Jung Liu, Shih-Po Lin, "Study of 'fingering' in Water Assisted Injection Molded Composites" SPE ANTEC Tech Paper, 2005.
- 10- Shin Hwang, Pei-Min Hsu, And Zhong-Min Pan, "The Study of Thewater Assisted Injection Molding Process" SPE ANTEC Tech Paper, 2006.
- 11- Jian-Min He, Han-XiongHuang, "Predicting Processing Parameters for Water-Assisted Injection Molding Based on Inverse Ga-Lmbp Neural Network" SPE ANTEC Tech Paper 676, 2007.
- 12- Han-Xiong Huang, Zhi-Wu Deng AndXu-Hui Liu, "Penetration Length, Thickness And Crystallization Behavior of Water-Assisted Injection Molded Part" SPE ANTEC Tech Paper 2543, 2007.
- 13- Sh.J. Liu, W.R. Lin, K.Y. Lin, "Morphological Development in Water Assisted Injection Molded Polyethylene/ Polyamide-6 Blends", Polym. Adv. Technol, 2009.
- 14- K. Lin, F. Chang, Sh. Liu "Using Different Mold Temperatures to Improve the Residual Wall Thickness Uniformity Around Curved Sections of Fluid Assisted Injection Molded Tubes", International Communications in Heat and Mass Transfer, 2009.
- 15- M. S. Phadke, "Quality Engineering Using Robust Design", Prentice-Hall International, Inc, 1989.
- 16- K. R. Roy, "A Primer on the Taguchi Method", Competitive Manufacturing Series, Van Nostrand Reinhold International Company, 1990.
- 17- A. Z. Ahmadzai, A. H. Behravesh "An Experimental Investigation on Water Penetration in the Process of Water Assisted Injection Molding of Polypropylene", Polimery, 2009
- 18- K. Majidzadeh-Ardakani, B. Nazari, "Improving the Mechanical Properties of Thermoplastic Strach/Poly(Vinyl Alcohol)/Clay Nanocomposites", Composite Sci. and Tech, 2010.
- 19- A. Ahmadzai, "Experimentally Investigates the Effect of Processing Parameters on Water Assisted Injection Molding", M.Sc thesis, TarbiatModares University, 2008.

