

## The Effects of Cooling Method on Final Mechanical and Thermal Properties of Polyethylene Tanks Manufactured by Rotational Molding

Alireza Abdoljavadi<sup>1</sup>, Hosein Teymoori Tafazol<sup>1</sup>,  
Ali Abbaszadeh<sup>1\*</sup>, Ali Foroozan<sup>2</sup>

1- Tehran Polymer Yara Co., P.O. Box 15869-31881, Karaj, Iran  
2- Polymer and Petrochemical Institute, Tehran, Iran

### Abstract

**Research subject:** Due to the drought and lack of water resources, many efforts have been made to store water properly recently. Using of multilayer polyethylene tanks is an efficient measure in order to solve this problem and it has received considerable attention. Proper manufacturing conditions will greatly improve the strength of these tanks and their applications.

**Research approach:** In this study, the effect of cooling process on the final properties of polyethylene tanks prepared by rotational molding method is investigated. Three different cooling methods comprised of cooling with water, cooling by air, and quiescent cooling is selected and their mechanical and thermal properties were investigated.

**Main results:** The results of the tensile test show that as the tank is cooled faster, the elongation at break will be higher. It is also demonstrated that the air cooling method results in the lower elongation at break. The results of the thermal properties show that higher cooling rate creates thicker crystals in the fragment which requires higher energy to overcome these thick crystals. According to the results of the thermal properties and using the softening temperature test it is found that by increasing the cooling rate, the softening temperature will be increased as well which will improve the application of the tank in high temperature conditions. Melt flow rate and density tests are also performed to confirm the results of mechanical and thermal properties, respectively. Charpy impact test is performed at ambient temperature to confirm mechanical behavior induced by crystal structure. All in all, cooling by water performs better than other methods in terms of mechanical and thermal properties.

### key words

Polyethylene Tank  
Rotational Molding  
Cooling Methods  
Thermal Properties  
Mechanical Properties

\*To whom correspondence should be addressed:  
abaszade.ali@gmail.com

## بررسی تأثیر نحوه سرد کردن مخازن پلی اتیلنی تولیدی به روش قالبگیری دورانی بر خواص مکانیکی و حرارتی نهایی

علیرضا عبدالجواد<sup>۱</sup>، حسین تیموری تفضل<sup>۱</sup>، علی عباس زاده<sup>۱\*</sup>، علی فروزان<sup>۲</sup>

۱- شرکت تهران پلیمر یارا، کرج، ایران، صندوق پستی: ۳۱۸۸۱-۱۵۸۶۹  
۲- پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران، ایران

فصلنامه علمی - پژوهشی بین رشته‌ای  
سال چهارم، شماره ۴، نسخه ۱  
زمستان ۱۳۹۹، صفحه ۲۱-۲۳

### چکیده

موضوع تحقیق: استفاده از مخازن پلی اتیلنی چند لایه از جمله اقداماتی است که در سال‌های اخیر برای مقابله با مشکل خشکسالی و کمبود منابع آبی به میزان بسیار زیادی مورد توجه قرار گرفته است. شرایط تولید صحیح تا حدود زیادی باعث استحکام بالای این مخازن و کاربری بیشتر آنها خواهد شد.

روش تحقیق: در این پژوهش به بررسی تأثیر فرایند سرد کردن بر خواص نهایی نمونه‌های مخازن پلی اتیلنی تهیه شده به روش قالبگیری دورانی پرداخته شده است. سه روش متفاوت سرد کردن با آب، سرد کردن با هوا و سرد کردن ساکن انتخاب شد و خواص مکانیکی و حرارتی آنها بررسی شد. نتایج اصلی: نتایج آزمون کشش نشان می‌دهد هرچه مخزن با سرعت بالاتری سرد شود، میزان کشیدگی در نقطه پارگی بالاتری خواهد داشت. همچنین این آزمون نشان داد که روش سرد کردن با هوا میزان کشیدگی در نقطه پارگی پایین‌تری نسبت به دو روش دیگر دارد. در بخش نتایج خواص حرارتی مشخص شد که سرعت بالاتر سرد کردن باعث ایجاد بلورهای ضخیم‌تر در قطعه می‌شود که انرژی بالاتری برای غلبه بر این بلورهای ضخیم مورد نیاز است. با توجه به نتایج خواص حرارتی و با استفاده از آزمون دمای نرم شدگی مشخص شد که هرچه سرعت سرد کردن بالاتر باشد، دمای نرم شدگی بالاتری خواهیم داشت که کاربری مخزن در شرایط دمایی بالا را بهتر خواهد کرد. همچنین آزمون‌های نرخ جریان مذاب و چگالی به منظور تأیید نتایج خواص مکانیکی و حرارتی انجام شدند. آزمون ضربه چارپی در دمای محیط برای تأیید رفتار مکانیکی حاصل از ساختار بلوری انجام شد. نتایج حاکی از آن است که بهترین روش برای سرد کردن، روش سرد کردن به وسیله آب است.

### کلمات کلیدی

مخزن پلی اتیلنی  
قالبگیری دورانی  
روش‌های سرد کردن  
خواص مکانیکی  
خواص حرارتی

\*مسئول مکاتبات:

abaszade.ali@gmail.com

## ۱ مقدمه

قالبگیری دورانی (Rotational Molding) یکی از فرایندهای شکل دهی در صنعت پلاستیک است که کاربرد آن در این صنعت به علت سادگی، تولید قطعات بدون تنش و توزیع نسبتاً یکنواخت ضخامت، به سرعت در حال رشد و پیشرفت است [۱ و ۲]. استفاده از این روش قالبگیری در اواخر سال ۱۹۵۰ میلادی و با استفاده از پلیمر پلی وینیل کلراید (PVC) آغاز شد که رفته رفته این پلیمر جای خود را به پلی اتیلن (PE) داد [۳]. از کاربردهای اصلی این روش، همانند قالبگیری دمشی (Blow Molding) و شکل دهی گرمایی (Thermoforming)، می توان به تولید قطعات پلاستیکی بزرگ و توخالی اشاره کرد [۴]. انعطاف پذیری در طراحی و مقیاس محصولات، کاربرد این روش قالبگیری را بسیار گسترده کرده است، به طوری که از ظروف ذخیره و بسته بندی ساده گرفته تا محصولات پیشرفته خودرو، پزشکی و هوافضا از این روش برای تولید محصولات متنوع خود استفاده می کنند [۵]. این فرایند شامل ۴ مرحله است: (۱) قرار دادن پودر پلیمر داخل قالب، (۲) گرمایش همراه با دوران قالب و بازوی نگهدارنده قالب، (۳) سرد کردن قالب تا رسیدن به حالت جامد و شکل مطلوب و (۴) باز کردن قالب و خروج محصول از قالب [۲]. از انواع مختلف پلیمر، پلی اتیلن بیشترین کاربرد را در ساخت قطعات با این روش دارد. این فرایند با سایر فرایندهای شکل دهی پلاستیک نظیر تزریق پلاستیک تفاوت های زیادی دارد. از جمله تفاوت های این روش با سایر فرایندها می توان به تنش برشی صفر، گرمایش طولانی مدت، سیکل طولانی تولید، سرعت سرد کردن بسیار آهسته و حضور اکسیژن در تماس با سطح داخلی قالب در حین فرایند اشاره کرد. این شرایط تولید، ریختار و ریز ساختار منحصر به فردی ایجاد می کند که به طور مستقیم روی رفتار مکانیکی محصولات تولیدشده با این روش مؤثر هستند [۶].

همانطور که اشاره شد، یکی از ویژگی های این روش، گرمایش طولانی مدت است که میزان این گرمایش می تواند تأثیر زیادی در رفتار مکانیکی قطعات تولید شده با این روش داشته باشد. در این فرایند گرمایش ناکافی به علت پخت ناکامل ذرات پودری پلیمر، باعث ایجاد حفره و حباب در ساختار پلاستیک می شود که سطح ناصاف و زبر و همچنین وجود حفره های عمیق حبس شده داخل پلیمر را به همراه دارد. گرمایش بیش از حد در این فرایند به تخریب سطوح داخلی منجر می شود که این تخریب با حضور قله گروه های کربونیل، وینیل و هیدروپراکسید در آزمون طیف سنجی (FTIR) قابل شناسایی است. این تخریب همچنین از تغییرات گرانشی پلاستیک تخریب شده مشهود است.

در پلی اتیلن، تخریب باعث افزایش گرانشی می شود زیرا شاخه های جانبی پلی اتیلن پس از تخریب، تشکیل اتصالات عرضی می دهند. تخریب در پلی اتیلن باعث می شود ساختار بلوری به شدت تغییر کرده و ساختاری ناکارآمد ایجاد کند. در واقع این اصلاحات ریزساختاری با کاهش دمای ذوب انجام می گیرند که نشان دهنده افت کارایی ساختار بلوری است. بنابراین هم حباب های ناشی از گرمایش ناکافی و هم تخریب ناشی از گرمایش بیش از حد در شکنندگی و کاهش استحکام قطعات تولید شده به روش قالبگیری دورانی تعیین کننده هستند [۷].

ریختار نهایی در محصولات پلیمری نقش حیاتی در تعیین ویژگی های مکانیکی این محصولات ایفا می کند. ارتباط میان اجزای آریخت و اجزای بلوری در پلیمرهای نیمه بلوری، ویژگی های فیزیکی پلیمر را کنترل می کند. ساختار پلیمر، به عنوان مثال میزان شاخه ای بودن، می تواند روی درجه بلورینگی نواحی بلوری تأثیرگذار باشد. علاوه بر ساختار پلیمر، شرایط فرایندی به میزان زیادی روی میزان بلورینگی تأثیرگذار است. در فرایند قالبگیری دورانی، شرایط فرایند بدون تنش و همچنین زمان فرایند طولانی این اجازه را به پلیمر می دهد که ساختارهای گویچه ای کلاسیک ایجاد کند. زمانی که گویچه هسته گذاری می کند، آنقدر رشد می کند که به گویچه کناری برسد. به طور کلی، بلورینگی قطعات قالبگیری شده به روش دورانی تحت تأثیر نرخ سرد کردن قرار دارند. آهسته سرد کردن منجر به محصولاتی با بلورینگی بالا و چگالی هسته گذاری پایین در دماهای بالاتر می شود که نتیجه آن گویچه های بزرگتر است [۸]. در محصولات تولید شده به روش قالبگیری دورانی این نکته کاملاً مشخص است که سطح داخلی این محصولات، گویچه های بزرگتر و بلورینگی بالاتری دارند زیرا آهسته تر از سطح خارجی سرد می شوند. علاوه بر این گویچه های سطح داخلی قادر هستند آزادانه رشد کنند و تماسی با دیواره قالب ندارند. این عوامل سبب می شود سطح داخلی محصولات قالبگیری شده به روش دورانی دارای بافت خشن باشند. در سطح خارجی، رشد گویچه ها به واسطه حضور دیواره قالب محصور شده است و برخی ساختارهای بلور تبادل (Trans Crystalline) می توانند توسعه پیدا کنند. در جایی که پلیمر روی دیواره قالب، بلورینه می شود، ساختار بلور پلیمر می تواند متأثر از تخریب در حین قالبگیری دورانی باشد. تخریب، تمایل دارد روی سطح داخل قالب رخ دهد و می توان با مشاهده ریزساختارها در سطح داخلی، آن را شناسایی کرد. در پلیمر بکر، گویچه ها اندازه مشابه و ساختار منظمی دارند. زمانی که پلیمر تخریب می شود، گویچه ها کوچکتر می

ارتباط مستقیم به میزان انعطاف پذیری محصول دارد و هرچه انعطاف پذیری بالاتر باشد این مقاومت بالاتر خواهد بود.

(۲) دمای نرمشدهگی بالا:

با توجه به کاربری مخازن در شرایط دمایی مختلف، هرچه دمای نرمشدهگی مخازن بالاتر باشد کاربری آنها نیز بالاتر خواهد بود [۱۲].

مقاله حاضر سعی در مطالعه و بررسی چگونگی اثرگذاری نحوه سرد کردن به عنوان یکی از مهمترین پارامترهای فرایندی تحت کنترل در تولید مخازن پلی اتیلنی به روش قالبگیری دورانی بر رفتار مکانیکی و حرارتی و اطمینان از انتخاب روش فرایندی مناسب با بالاترین خواص مکانیکی و حرارتی دارد. بنابراین در این پژوهش اثر روش‌های مختلف سرد شدن مخازن پلی اتیلنی بر ویژگی‌های حرارتی و مکانیکی بررسی شد و از چندین شیوه‌ی تخصصی مانند اندازه‌گیری نقطه نرم‌شدگی Vicat و آزمون حرارتی گرماسنجی پویشی تفاضلی (DSC) به منظور دستیابی به بهترین روش سرد کردن استفاده شد.

## ۲ تجربی

### ۲-۱ مواد

پلی اتیلن مورد استفاده در تولید مخازن از طریق قالبگیری دورانی، پلی اتیلن با جرم مولکولی متوسط (MDPE) گرید HD 3840 UA ساخت پتروشیمی تبریز است. چگالی این گرید از پلی اتیلن  $0.938 \text{ g/cm}^3$  و نرخ جریان مذاب آن تحت دمای  $190^\circ\text{C}$  و وزنه  $2/16$  کیلوگرم برابر  $4 \text{ g/10 min}$  است.

### ۲-۲ روش تهیه نمونه‌ها

مخازن از طریق قالبگیری دورانی در کوره کاروسل (Carousel) با سرعت چرخش قالب ۸ دور بر دقیقه و سرعت چرخش بازو ۳ دور بر دقیقه با دمای  $200^\circ\text{C}$  و در حجم ۵۰۰ لیتر به مدت ۳۵ دقیقه قالبگیری شدند. از پودر پلی اتیلن برای تولید مخزن به مقدار ۲۰ کیلوگرم استفاده شد. ضخامت نهایی محصول به دست آمده ۵ mm است.

سه روش مختلف سرد کردن در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفت:

۱- سرد کردن با آب، قالب با استفاده از دو واترجت سرد شد. (Water cooled)

۲- سرد کردن با هوا، قالب با استفاده از یک دمنده هوا سرد شد. (Air cooled)

۳- سرد کردن ساکن، هیچ‌خنک‌کننده‌ای استفاده نشد. (Quiescent cooled)

دما حین سرد شدن قالب در نقطه دیواره قالب ثبت شد تا نرخ سرد شدن به دست آید. این اندازه‌گیری

شوند و با افزایش تخریب، ساختار گویچه‌ها شکسته شده و پلیمر به سمت اریخت شدن پیش می‌رود [۹].

لوئیس ترزا پیک و همکارانش تغییرات ریختار را در اثر تغییر نرخ خنک کردن پلی اتیلن سبک خطی قالبگیری-شده به روش دورانی بررسی کردند. تغییر در ریختار به تغییر در ویژگی‌های دینامیکی-مکانیکی منجر می‌شود. سرعت پایین سرد کردن به افزایش بلورینگی منجر می‌شود و گویچه‌های بزرگ (Large Spherulites) ایجاد می‌کند که در ضربه پذیری مواد به ویژه در دمای پایین تأثیرگذار است. تغییر در سرعت سرد کردن، تأثیر قابل-توجهی روی ضربه پذیری این محصولات دارد؛ به طوری که سرعت سرد کردن آهسته‌تر، بلورینگی بالاتر را نتیجه می‌دهد که اثرات مضر روی رشد ترک دارد و روی شروع ترک خوردگی تأثیری ندارد که همه این موارد از بلورینگی بالاتر، گویچه‌های بزرگتر و کاهش انعطاف پذیری و چقرمگی ناشی می‌شود [۸].

در اثر سرد کردن سریع، گویچه‌های کوچکتر با میزان بلورینگی پایین‌تر ایجاد می‌شود. گویچه‌ها و نواحی بلوری کوچکتر، افزایش مولکول‌های چسبنده درون بلور را نتیجه می‌دهد که باعث بهبود خواص چقرمگی مواد می‌شود. به طور کلی درک بهتر رفتار شکست به همراه آزمون استحکام، برای تأمین اطلاعات لازم از فرایند رشد ترک در مواد، امری ضروری است که می‌تواند به طور مستقیم روی کارایی محصول در شرایط کاربری واقعی اثر گذار باشد [۱۰].

وزن مولکولی بالاتر، توزیع جرم مولکولی پهن‌تر، نواحی اریخت و بلور ضخیم‌تر، از دیگر عواملی هستند که در بالاتر بودن میزان چقرمگی شکست در پلی اتیلن قالبگیری شده به روش دورانی مؤثر هستند.

وزن مولکولی بالاتر و توزیع جرم مولکولی پهن‌تر به دلیل افزایش گره خوردگی‌ها، چقرمگی شکست را بهبود می‌دهند. ناحیه اریخت ضخیم‌تر تشکیل ریزحفره‌ها (Micro voids) را آسان‌تر می‌کند که جذب انرژی بالاتر می‌رود و در نتیجه چقرمگی شکست افزایش می‌یابد. کارایی بیشتر بلور در بلورهای ضخیم‌تر و همچنین مشارکت در ایجاد ریزحفره‌های نواحی اریخت، چقرمگی شکست را بالا می‌برد [۱۱].

به طور کلی مخازن نگهداری آب و مایعات تولید شده به روش قالبگیری دورانی می‌بایست از لحاظ ویژگی‌های زیر دارای حد مطلوب باشند:

(۱) میزان کشیدگی در نقطه پارگی بالا: با توجه به اینکه این مخازن به طور متناوب و مکرر در حال پر و خالی شدن هستند، انعطاف پذیری بالا به حفظ طول عمر بالای این محصولات در برابر تنش‌های ناشی از این پر و خالی شدن کمک فراوانی خواهد کرد. همچنین مقاومت در برابر رشد ترک‌های محیطی نیز

صفر مجهز به کیت چگالی سنج ساخت شرکت AND کشور ژاپن و با استفاده از آب دوبار تقطیر به عنوان مایع غوطه وری و در دمای  $23^{\circ}\text{C}$  اندازه گیری شد. این آزمون مطابق استاندارد ISIRI 7090-1 انجام شد. مقدار گزارش شده به عنوان چگالی نمونه ها، میانگین ۱۰ اندازه گیری است. آزمون ضربه چارپی با استفاده از دستگاه آزمون ضربه چارپی ۱۷ ژول ساخت شرکت بن افزار کشور ایران مطابق روش ۱eA استاندارد ملی شماره ۱-۹۲۷۷ در دمای  $23^{\circ}\text{C}$  انجام شد. از هر مخزن ۱۰ نمونه اندازه گیری شد. عدد گزارش شده میانگین ۱۰ اندازه گیری است.

### ۳ نتایج و بحث

#### ۳-۱-۳ خواص مکانیکی

##### ۳-۱-۱-۳ آزمون کشش

مطابق نتایج نشان داده شده در نمودار ۱ و داده های جدول ۱، در هر سه روش سرد کردن، محصولات دارای استحکام کششی یکسانی بودند. در حالیکه در میزان کشیدگی در نقطه شکست، اختلاف قابل ملاحظه ای متأثر از نحوه سرد کردن ایجاد می شود. میزان کشیدگی در نقطه پارگی، ارتباط مستقیم با ساختار بلور در پلی اتیلن دارد. سرعت سرد کردن آهسته تر، بلورینگی بالاتر را نتیجه می دهد که اثرات مضر روی رشد ترک دارد. در واقع بلورینگی بالاتر، گویچه های بزرگتر و کاهش انعطاف پذیری را نتیجه می دهد [۸ و ۱۰]. با توجه به یکسان بودن ماهیت پلی اتیلن در سه نمونه بالا و همچنین شرایط یکسان تولید برای هر سه نمونه (تنها تفاوت در نحوه سرد کردن وجود دارد)، می توان نتیجه گرفت که ساختار بلور در نمونه سرد شده با هوا، ساختاری ناکارآمدتر نسبت به ساختارهای بلور در دو نمونه دیگر دارد. ساختار بلور پلیمر می تواند متأثر از تخریب در حین فرایند قالبگیری دورانی باشد. تخریب تمایل دارد روی سطح داخل قالب رخ دهد و می توان با مشاهده ریزساختارها در سطح داخلی آن را شناسایی کرد [۹]. در واقع در نمونه سرد شده با هوا، ساختار بلور در اثر تخریب سطحی به ساختاری ناکارآمد تبدیل شده است. با نگاهی به نحوه سرد کردن محصول متوجه علت این تخریب سطحی خواهیم شد. محصول پس از خروج از کوره دارای دمایی در حدود  $200^{\circ}\text{C}$  است که در این دما پلی اتیلن مستعد تخریب است. زمانی که محصول در معرض هوای ساکن و در دمای محیط سرد می شود، مدت زمان بیشتری در مقایسه با روش سرد کردن به وسیله هوا، محصول در معرض اکسیژن قرار دارد ولی چون در روش سرد کردن با هوا، اکسیژن با سرعت بالا به محصول مستعد تخریب دمیده می شود، تخریب

ها سرعت  $38^{\circ}\text{C}/\text{min}$  برای سرد کردن با آب،  $18^{\circ}\text{C}/\text{min}$  برای سرد کردن با هوا و  $13^{\circ}\text{C}/\text{min}$  برای سرد کردن ساکن را به دست دادند. پس از تولید، نمونه های آزمون کشش با استفاده از دستگاه پرس هیدرولیک و تیغه دمبل کاتر نوع ۱BA مطابق استاندارد ISIRI 6621-1 از روی مخازن پانچ شدند. جهت آزمون های Vicat، DSC و چگالی نیز نمونه گیری از روی مخازن تولیدی انجام گرفت. جهت آزمون MFI، نمونه گیری از سطح خارجی محصول انجام شد. جهت انجام آزمون ضربه چارپی، نمونه ها با استفاده از دستگاه پرس هیدرولیک به صورت نوع ۱ مطابق استاندارد ملی شماره ۱-۹۲۷۷ از روی مخزن پانچ شد و با استفاده از دستگاه ناچ زن، شکاف نوع A مطابق استاندارد ملی شماره ۱-۹۲۷۷ روی آن ایجاد شد.

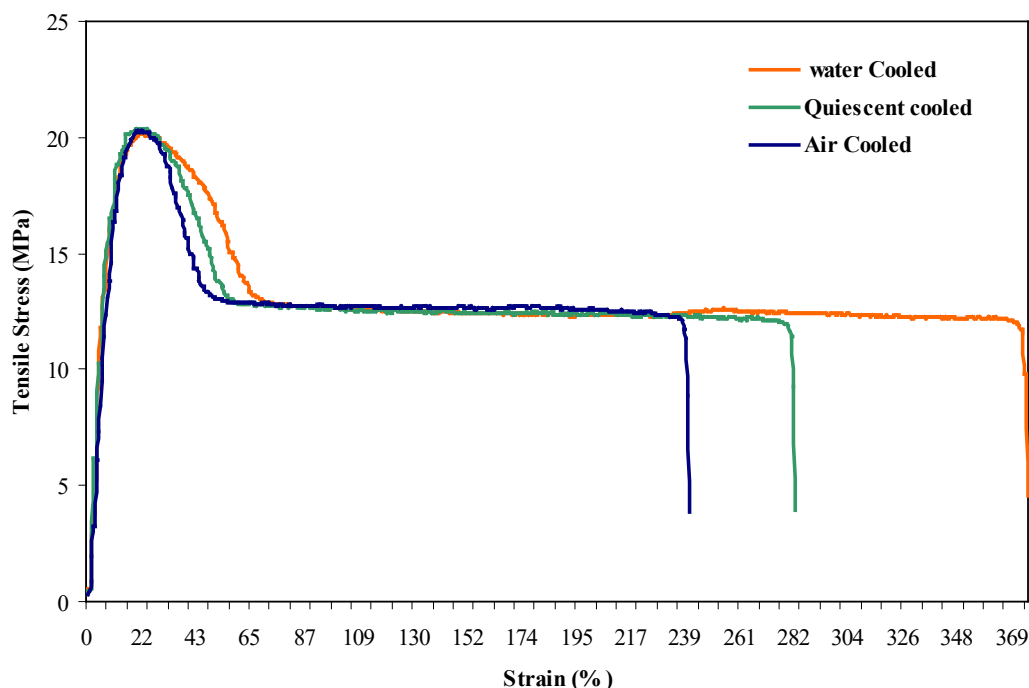
#### ۳-۲ روش های آزمون

برای انجام آزمون کشش از دستگاه کشش یونیورسال ساخت شرکت اسپیکو کشور ایران استفاده شد. این آزمون در دمای اتاق با سرعت فک متحرک  $\text{mm}/\text{min}$  ۵۰، فاصله اولیه بین دو فک  $25\text{ mm}$  و تعداد ۵ تکرار از هر مخزن انجام شد. کشش نمونه تا زمان گسیختگی کامل آن ادامه پیدا می کرد. نتیجه نهایی حاصل از آزمون کشش برای هر مخزن از میانگین ۵ عدد ناشی از ۵ تکرار به دست آمد. این آزمون مطابق استاندارد ISIRI 6621-1 انجام شد.

آزمون حرارتی نمونه ها به وسیله دستگاه تحلیل حرارتی مدل ۱۰۵۲B ساخت شرکت SKZ کشور چین طی فرایند رفت از دمای محیط تا دمای  $200^{\circ}\text{C}$  با سرعت  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  تحت جو نیتروژن انجام شد. نمونه ها به منظور اندازه گیری DSC در پن آلومینیومی قرار داده شد. این آزمون مطابق استاندارد ISIRI 7186-6 انجام شد.

دمای نرمشدگی وایکات با استفاده از دستگاه Vicat ساخت شرکت اسپیکو کشور ایران تحت بار ۵۰ نیوتن و با سرعت گرمادهی  $120^{\circ}\text{C}/\text{h}$  به دست آمد. این آزمون مطابق استاندارد ISIRI 6982 انجام شد. از هر مخزن دو نمونه اندازه گیری شد. عدد گزارش شده میانگین دو اندازه گیری است.

نرخ جریان مذاب با استفاده از دستگاه MFR ساخت شرکت بن افزار کشور ایران تحت دمای  $190^{\circ}\text{C}$  و وزنه  $2/16$  کیلوگرم اندازه گیری شد. این آزمون مطابق استاندارد ISIRI 6980-1 انجام شد. مقدار ۸ گرم از هر نمونه مورد اندازه گیری قرار گرفت. اندازه گیری ها بعد از ۵ دقیقه پیش گرم و با فاصله زمانی هر ۲۰ ثانیه انجام شد. مقدار گزارش شده به عنوان نرخ جریان مذاب، میانگین ۱۰ اندازه گیری است. چگالی نمونه ها با استفاده از دستگاه ترازوی چهار



شکل ۱ منحنی های تنش-کرنش برای سه روش مختلف سرد کردن مخزن  
Figure 1 Stress-Strain curves for three different ways of cooling

جدول ۱ نتایج آزمون کشش  
Table 1 Results of tensile test

Cooling method	Properties	Value	Unit
Water Cooled	Tensile Strength	20	MPa
	Elongation @ Break	371	%
Quiescent cooled	Tensile Strength	20	MPa
	Elongation @ Break	301	%
Air Cooled	Tensile Strength	20	MPa
	Elongation @ Break	232	%

شده با هوا شاهد تخریب هستیم که این تخریب خود را با کاهش نرخ جریان مذاب نشان داده است. در واقع نتایج آزمون نرخ جریان مذاب تأییدی بر نتایج آزمون کشش است. به منظور مقایسه بهتر، نرخ جریان مذاب مواد اولیه (پلی اتیلن گرید ۳۸۴۰ پتروشیمی تبریز) نیز اندازه گیری شد.

در پلی اتیلن، تخریب باعث افزایش گرانش می شود زیرا شاخه های جانبی پلی اتیلن پس از تخریب، تشکیل اتصالات عرضی می دهند. تخریب در پلی اتیلن باعث می شود ساختار بلوری به شدت تغییر کرده و ساختاری ناکارآمد ایجاد کند. در واقع این اصلاحات ریزساختاری با کاهش دمای ذوب انجام می گیرند که نشان دهنده افت کارایی ساختار بلوری است [۱۷].

بیشتری را در نمونه سرد شده با هوا شاهد هستیم. در واقع این تخریب روی سطح خارجی مخزن ایجاد شده که منجر به ایجاد ریزساختار در این سطح و ناکارآمدی ساختار بلوری در این سطح می شود. این ناکارآمدی ساختار بلوری منجر به کاهش چقرمگی در کل محصول می شود. بنابراین پایین ترین میزان کشیدگی در نقطه پارگی مربوط به این روش خواهد بود.

### ۳-۱-۲ آزمون نرخ جریان مذاب

به منظور بررسی تخریب سطحی در نمونه ها، از آزمون نرخ جریان مذاب استفاده شد. برای این کار از سطح خارجی محصولات نمونه گیری انجام شد. همانطور که از نتایج مشخص است در سطح خارجی نمونه سرد



جدول ۲ نرخ جریان مذاب ماده اولیه و نمونه ها  
Table 2 Melt flow index of raw material and samples

Name	Properties	Value	Unit
Raw Material	Melt Flow Index (2.16 Kg & °190C)	4.03	g/10min
Water Cooled	Melt Flow Index (2.16 Kg & °190C)	3.97	g/10min
Quiescent cooled	Melt Flow Index (2.16 Kg & °190C)	3.88	g/10min
Air Cooled	Melt Flow Index (2.16 Kg & °190C)	3.53	g/10min

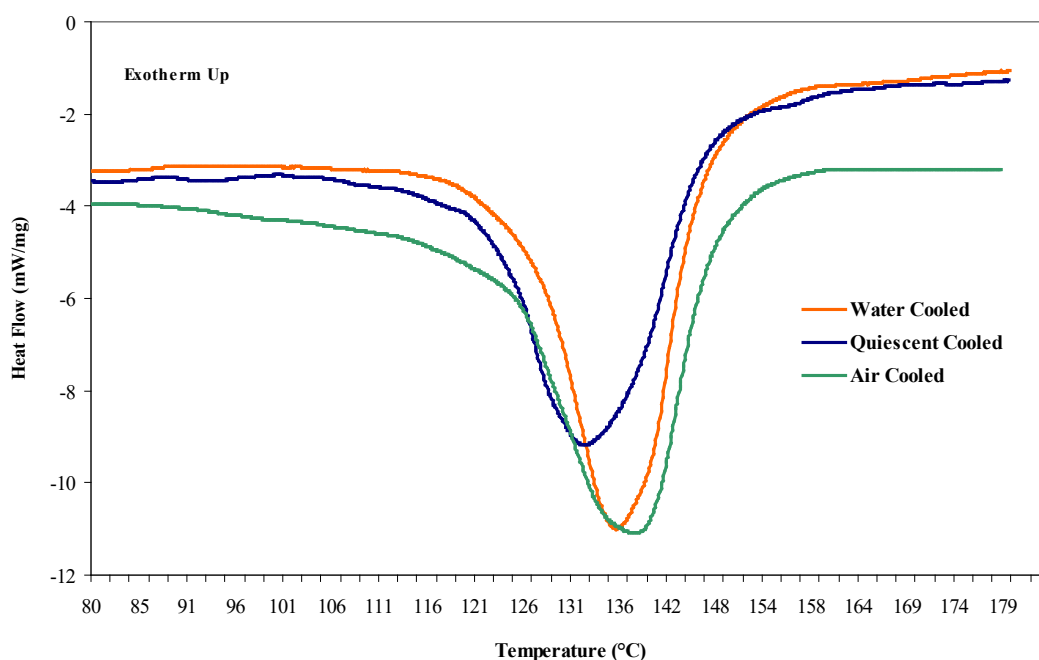
جدول ۳ نتایج آزمون استحکام ضربه  
Table 3 Results of Impact strength test

Cooling method	Properties	Value	Unit
Water Cooled	Charpy Impact Strength (notched , @ 23°C)	22	Kj/m <sup>2</sup>
Quiescent cooled		20	Kj/m <sup>2</sup>
Air Cooled		19	Kj/m <sup>2</sup>

### ۳-۱-۳ آزمون استحکام ضربه

اندازه گیری آزمون استحکام ضربه نیز می تواند رفتار بلورینگی در روش های مختلف سرد کردن را تصدیق کند. سرعت سرد کردن آهسته تر، بلورینگی بالاتر، گویچه های بزرگتر و کاهش انعطاف پذیری و

چقرمگی را نتیجه می دهد [۸]. در اثر سرد کردن سریع، گویچه های کوچکتر با میزان بلورینگی پایین تر ایجاد می شود. گویچه ها و نواحی بلوری کوچکتر، افزایش مولکول های چسبنده درون بلور را نتیجه می دهد که باعث بهبود خواص چقرمگی مواد می شود



شکل ۲ منحنی جریان گرما بر حسب دما در محدوده دمایی ۸۰ تا ۱۸۰ درجه سانتیگراد  
Figure 2 Heat Flow-Temperature curve in the temperature range of 80 to 180°C

جدول ۴ نتایج آزمون DSC  
Table 4 Results of DSC test

Cooling method	Properties	Value	Unit
Water Cooled	Melt Temperature	135	°C
	Enthalpy	50.9	J/g
Quiescent cooled	Melt Temperature	138	°C
	Enthalpy	34.2	J/g
Air Cooled	Melt Temperature	133	°C
	Enthalpy	37.8	J/g

است. هرچه سرعت سرد کردن پلی اتیلن بیشتر باشد، ضخامت بلورها بیشتر است. این روند در جدول ۴ به وضوح قابل مشاهده است.

۲-۲-۳ آزمون دمای نرمشده  
در اندازه گیری نقطه نرم شدگی به روش وایکات نیز

[۱۰]. همچنین کارایی بیشتر بلور در بلورهای ضخیم تر و همچنین مشارکت در ایجاد ریزحفره های نواحی آریخت، چقرمگی شکست را بالا می برد [۱۱]. همانطور که نتایج DSC در بخش بعد نشان می دهد، هرچه سرعت سرد کردن سریع تر باشد، بلورهای ضخیم تر تشکیل می شود که دارای آنتالپی ذوب بالاتر است.

جدول ۵ دمای نرمشده Vicat نمونه ها  
Table 5 Softening temperature Vicat of samples

Cooling method	Properties	Value	Unit
Water Cooled	Density	0.944	g/cm <sup>3</sup>
Quiescent cooled	Density	0.932	g/cm <sup>3</sup>
Air Cooled	Density	0.939	g/cm <sup>3</sup>

اختلاف در دمای نرم شدگی سه نمونه کاملاً منطبق با اختلاف در آنتالپی ذوب سه نمونه و وجود بلور های ضخیم تر و در نتیجه سختی بالاتر نمونه سرد شده با آب نسبت به نمونه سرد شده با هوا و با هوای ساکن است.

#### ۴ نتیجه گیری

با توجه به نتایج به دست آمده، معلوم شد که سرعت سرد کردن تأثیر بسزایی بر خواص مکانیکی و حرارتی محصولات تولید شده به روش قالبگیری دورانی دارد. نتایج نشان داد که روش سرد کردن با آب مطلوبترین روش برای دستیابی به محصولاتی با کیفیت بالا است. روش سرد کردن با هوا دارای محصولاتی با خواص مکانیکی پایین و روش سرد کردن ساکن دارای محصولات با دمای نرم شدگی پایین است.

این بلورهای ضخیم افزایش چقرمگی و ضربه پذیری را نتیجه می دهد که در نتایج حاصل از آزمون ضربه کاملاً مشخص است. در نتایج این آزمون، اثر تخریب سطحی مشاهده شده در نتایج آزمون کشش نیز مجدداً مشاهده می شود و نمونه سرد شده با هوا دارای کمترین استحکام ضربه است. البته تغییر در ساختار بلور، تأثیر قابل ملاحظه ای در میزان کشیدگی در نقطه پارگی دارد، در حالیکه این تأثیر در میزان ضربه پذیری بسیار کمتر است.

#### ۲-۳ خواص حرارتی

#### ۱-۲-۳ آزمون DSC

در ارتباط با نتایج آزمون DSC نیز که در نمودار ۲ و جدول ۴ آمده است، اختلاف قابل ملاحظه ای در آنتالپی ذوب سه نمونه مشاهده می شود. این اختلاف متأثر از ضخامت بلور ها در ساختار بلوری پلی اتیلن



## مراجع

- [1] R.J. Crawford and M.P. Kearns, Introduction to the Rotational Molding Process, in Practical Guide to Rotary Molding, Rapra Technology Limited, UK, 2003 ,26-1.
- [2] F. Torres and C. Aragon, Final Product testing of Rotational Molded Natural Fiber-Reinforced Polyethylene, *Polymer Testing*, ,577-568 ,(4)25 2006.
- [3] Paul Nugent, Applied Plastics Engineering Handbook, Part 18: Rotational Molding, William Andrew, Elsevier, 2011 ,332-311.
- [4] Dominick V. Rosato, Matthew V. Rosato, Donald V. Rosato, Plastic Product Material and Process Selection Handbook, Elsevier, ,438-428 2004.
- [5] K. O. Ogila, M. Shao, W. Yang, J. Tan, Rotational molding: A review of the models and materials, *Express Polymer Letters*, ,798-778 ,(10)11 2017.
- [6] M. Oliveira and M. Cramez, Rotational Molding of Polyolefins: Processing, Morphology, and Properties *J. Macromol. Sci. B*, ,471-457 ,40 2001.
- [7] M. Oliveira, M. Cramez, and R.J. Crawford, Structure-Properties Relationships in Rotationally Molded Polyethylene, *J. Mater. Sci.*, 1996 ,2240-2227 ,31.
- [8] L. T. Pick, E. H. Jones, M. J. Oliveira, M. C. Cramez, The Effect of Cooling Rate on the Impact Performance and Dynamic Mechanical Properties of Rotationally Molded Metallocene Catalyzed Linear Low Density Polyethylene, *Journal of Applied Polymer Science*, -1963 ,101 2006 ,1971.
- [9] J. S. Godinho, Property Variations in Polyethylene Articles Produced by a Variety of Molding Methods, Doctoral Thesis, Queen's University of Belfast, 1997.
- [10] A. Salazar, P. Frontini, and J. Rodriguez, Determination of Fracture Toughness of Propylene Polymers at Different Operating Temperatures, *Engineering Fracture Mechanics*, 2014 ,107-87 ,126.
- [11] A. Saifullah, B. Thomas, R. Cripps, K. Tabeshfar, L. Wang, C. Muryn, Fracture Toughness of Rotationally Molded Polyethylene and Polypropylene, *Polymer Engineering and Science*, 2018 ,73-63 ,(1) 58.
- [12] Standard Requirements and Test Methods for Static Thermoplastic Tanks for the Above
- [13] D. Hansen, G. A. Bernier, Thermal Conductivity of Polyethylene: The Effects of Crystal Size, Density and Orientation on the Thermal Conductivity, *Polymer Engineering and Science*, 1972 ,208-204 ,(3) 12.