

# بررسی اثر عوامل هسته‌زا بر تبلور غیر همدمای و خواص مکانیکی پلی پروپیلن

## Studying the Effect of Nucleating Agents on Non-isothermal Crystallization and Mechanical Properties of Polypropylene

ملیحه خاکستانی<sup>۱</sup>، رضا باقری<sup>۲\*</sup>، مسعود فرونچی<sup>۱</sup>

تهران، دانشگاه صنعتی شریف، ۱- دانشکده مهندسی شیمی، صندوق پستی ۱۱۳۶۵/۸۶۳۹،

۲- دانشکده مهندسی مواد، صندوق پستی ۱۱۳۶۵/۹۴۶۶

دریافت: ۸۴/۱۱/۲۹، پذیرش: ۸۵/۵/۹

### چکیده

با توجه به توسعه روز افزون مصرف پلی پروپیلن در صنعت، بهینه‌سازی شرایط تولید و خواص مهندسی این پلیمر مورد نظر پژوهشگران و تولید کنندگان است. افزودن عامل هسته‌زا به عنوان روشی مناسب برای اقتصادی کردن فرایند تولید و بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی پلی پروپیلن پیشنهاد شده است. در این پژوهش، اثر افزودن عامل هسته‌زا بر خواص هم و کوپلی پروپیلن بررسی شده است. از سدیم بنزوات و بیس (پارا متیل دی بنزیدین) سوربیتول به عنوان عامل هسته‌زا  $\alpha$  استفاده شد. گرماسنج تفاضل پویایی و پراش پرتو X به ترتیب برای تعیین دمای تبلور و مقدار بلورینیگی و میکروسکوپ نوری قطبیده به منظور مطالعه ساختار گویچه‌ای نمونه‌ها بکار گرفته شد. اثر عامل هسته‌زا روی خواص مکانیکی از جمله تنش تسلیم، مدول کشسان و استحکام ضربه بررسی شد. اثر عوامل هسته‌زا روی افزایش دمای تبلور پلی پروپیلن در همه موارد مشاهده شد، افزودن مشتقات سوربیتول به پلی پروپیلن دمای تبلور را بیش از  $20^{\circ}\text{C}$  افزایش می‌دهد. با استفاده از عامل هسته‌زا مقدار بلورینیگی، تنش تسلیم و مدول کشسان نیز افزایش می‌یابد. اما، استحکام ضربه با افزایش مقدار عامل هسته‌زا از مقداری حداکثر عبور می‌کند.

### واژه‌های کلیدی

پلی پروپیلن، عامل هسته‌زا، بلورینیگی، خواص مکانیکی، ساختار گویچه‌ای

### مقدمه

است که به طور گسترده مطالعه شده است. این ساختار اولین شکل از PP است که در شرایط عادی فرایند بدست می‌آید. از بین ساختارهای بلوری مختلف PP، با استفاده از عامل هسته‌زا تنها می‌توان به دو نوع ساختار بلوری آن یعنی  $\alpha$  و  $\beta$  دست یافت [۱]. عامل هسته‌زا می‌تواند

بهینه‌سازی خواص پلی پروپیلن با توجه به استفاده روز افزون این پلیمر در صنعت اهمیت زیادی یافته است. بدین منظور، از انواع عوامل هسته‌زا به طور گسترده‌ای استفاده شده است. PP دارای چهار نوع ساختار بلوری  $\alpha$ ،  $\beta$ ،  $\gamma$  و  $\delta$  است. نوع  $\alpha$  رایج‌ترین ساختار بلوری PP

### Key Words

polypropylene, nucleating agent, crystallinity, mechanical properties, spherulit structure

\* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار : rezabagh@sharif.edu

نسبت طول به قطر به قطر (L/D) ۲۲/۶ و اکسترودر تک پیچ با نسبت طول به قطر ۱۸ بکار گرفته شد.

آزمون تبلور غیر همدما به وسیله دستگاه Perkin-Elmer-DSCV در محیط گاز خنثی هلیوم و آزمایش پراش پرتو X با زاویه باز به وسیله دستگاه زاویه سنج Philips مدل PWB۹۰ با صافی نیکلی و تابش لامپ مسی (Cu k $\alpha$ ) انجام شد. از میکروسکوپ نوری Olympus مدل BH۲ برای مشاهده ساختار گویچه‌ای استفاده شد.

آزمون کشش مطابق با استاندارد ASTM D۶۳۸ به وسیله دستگاه کشش Hounsfield مدل H۱۰KS انجام شد. مدول کشسان به کمک کرنش سنج اندازه گیری شد. آزمون ضربه مطابق با استاندارد ASTM D۲۵۶-۸۸ به وسیله دستگاه ضربه پاندولی Santam با ظرفیت J ۵ روی نمونه‌های شیاردار انجام شد.

### روشها

اختلاط عامل هسته‌زا با پلیمر به دو روش انجام شد:

اختلاط NaBz با همو و کوپلی پروپیلن در اکسترودر دو پیچ انجام شد. در این مرحله پیمانه اصلی به غلظت ۰/۵ درصد وزنی تهیه شد. MDBS با همو و کوپلی پروپیلن به وسیله اکسترودر تک پیچ مخلوط شد، دمای نواحی گرمایی آن به ترتیب ۲۰۰، ۱۹۰، ۲۱۰°C برای اختلاط PP با MDBS و ۱۹۰، ۱۸۰، ۲۰۰°C برای اختلاط R۴۰ با MDBS انتخاب شد. نمونه‌ها با درصد وزنی ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ تهیه شدند. سپس، به منظور رقیق سازی پیمانه اصلی حاوی NaBz تا درصدهای وزنی ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳۵ و ۰/۵ همچنین تهیه نمونه استاندارد برای آزمونهای کشش و ضربه برای هر دو عامل هسته‌زا از دستگاه تزریق استفاده شد. داده‌های گزارش شده متوسط حداقل سه اندازه گیری در هر مورد است.

برای تعیین دمای تبلور و مقدار بلورینگی با دستگاه DSC، نمونه‌ها با سرعت ۱۰°C/min تا دمای ۲۰۰°C گرم شدند، پس از آن به منظور حذف سابقه گرمایی به مدت ۵ min در این دمای نگه داشته شدند، مجدداً با سرعت ۱۰°C/min تا دمای محیط سرد شدند. درصد تبلور از نمودار DSC به کمک معادله (۱) محاسبه شد:

$$X_C = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0} \quad (1)$$

در این معادله  $\Delta H_m$  آنتالپی ذوب نمونه و  $\Delta H_m^0$  آنتالپی ذوب پلی پروپیلن ۱۰۰ درصد بلوری است.

به یکی از شکلهای ناخالصی مثلاً بقایای کاتالیزور، ترکیبات آلی، ترکیبات غیر آلی، بلورهای یک پلیمر دیگر یا حلال (در تبلور از محلول پلیمر) باشد [۲]. عوامل هسته‌زا به منظور کنترل فرایند تبلور استفاده می‌شوند. اولین اثر مهم افزودن هسته‌زا به پلیمرهای نیمه بلوری اثر آن روی عوامل تبلور است، به طوری که دما و سرعت کلی تبلور افزایش می‌یابد. در چند دهه اخیر اثر هسته‌زاهای مختلف روی PP بررسی شده است. در بررسی اثر سدیم بنزوات به عنوان عامل هسته‌زا افزایش دما و سرعت تبلور گزارش شده است [۳]. مشتقات سوربیتول نیز به عنوان هسته‌زا و شفاف کننده بخش گسترده‌ای از پژوهشها را پیرامون هسته‌زاهای PP شامل می‌شوند. افزایش دمای تبلور به مقدار قابل توجه ۱۷°C برای دو نمونه از مشتقات سوربیتول گزارش شده است [۴]. مشتقات فسفات از دیگر هسته‌زاهای مورد پژوهش اند که دمای تبلور را افزایش داده، اثر قابل توجهی روی سرعت تبلور دارند [۵، ۶]. دومین اثر مهم کاربرد عامل هسته‌زا در سامانه‌های پلیمرهای نیمه بلوری، کاهش اندازه متوسط گویچه است که روی خواص مکانیکی و نوری پلیمر اثر می‌گذارد [۷-۹، ۳، ۲]. بهبود خواص مکانیکی از جمله استحکام کششی، استحکام ضربه، سختی و مدول خمشی از نتایجی است که با افزودن عوامل هسته‌زا ممکن شده است [۷، ۶، ۳].

در این پژوهش، اثر افزودن مقادیر مختلف هسته‌زاهای سدیم بنزوات و یکی از مشتقات سوربیتول روی فرایند تبلور غیرهمدما، ساختار بلوری، اندازه گویچه، استحکام کششی و ضربه دو نوع پلی پروپیلن پرمصرف داخلی نوع تزریقی بررسی شده است.

### تجربی

#### مواد

پلی پروپیلن (iPP) با کد تجاری ۰۸۰ محصول شرکت پتروشیمی بندرامام با شاخص جریان مذاب ۱/۰ g/۱۰min (۱۹۰°C) و ۲/۱۶ kg و چگالی ۰/۸-۰/۹ g/cm<sup>۳</sup> و کوپلی پروپیلن با کد تجاری R۴۰ محصول شرکت پتروشیمی اراک با شاخص جریان مذاب ۱/۰ g/۱۰min (۱۹۰°C) و ۲/۱۶ kg و چگالی ۰/۹ g/cm<sup>۳</sup> استفاده شد. در این پژوهش، هموپلیمر با نام اختصاری PP و کوپلیمر با نام اختصاری R۴۰ معرفی شده‌اند. سدیم بنزوات (NaBz) از شرکت Merck آلمان و عامل هسته‌زا از مشتقات سوربیتول (MDBS) با نام بیس (پارامتیل دی بنزیدین) سوربیتول و نام تجاری GELL ALL MD از شرکت New Japan Chemical تهیه شدند.

#### دستگاهها

برای اختلاط هسته‌زا با پلی پروپیلن، اکسترودر دو پیچ ناهمسوگرد با

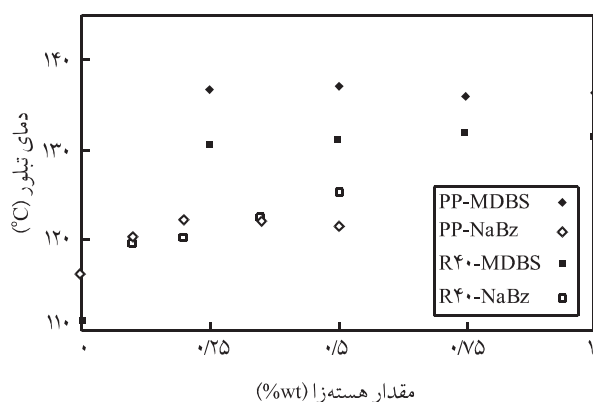
## نتایج و بحث

## اثر عوامل هسته‌زا بر دمای تبلور

مشاهده می‌شود، اثر سدیم بنزوات روی  $Rf_0$  بیش از PP است. کارایی NaBz به عنوان هسته‌زا در کوپلی پروپیلن بیش از هموپلی پروپیلن گزارش شده است. دلیل این امر به کنترل کنندگی ساز و کار هسته‌زایی ناهمگن در نمونه حاوی هسته‌زا نسبت داده شده است [۱۰]. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، افزایش دمای تبلور از نمونه بدون هسته‌زا تا نمونه حاوی  $0/25$  درصد هسته‌زا قابل توجه بوده در حالی که پس از آن با افزایش مقدار هسته‌زا تغییر چندانی حاصل نشده، دمای تبلور تقریباً ثابت باقی می‌ماند. کاهش اثر هسته‌زایی یا سرعت کلی تبلور در استفاده از مقادیر بیشتر عامل هسته‌زا در کارهای سایر پژوهشگران گزارش شده است [۳، ۶]. دلیل این امر را می‌توان به تشکیل توده‌های ذرات هسته‌زا نسبت داد.

هسته‌زای MDBS از نظر قابلیت افزایش دمای تبلور کارایی بیشتر نسبت به NaBz دارد. این برتری به ویژه در مورد PP در شکل ۱ مشاهده می‌شود. همان‌طور که در مقدمه بیان شد، افزایش دمای تبلور یکی از نتایج مورد انتظار بکارگیری عوامل هسته‌زاست. عوامل هسته‌زا باعث کاهش انرژی سطحی لازم برای هسته‌زایی بلورها در مذاب می‌شوند. هسته‌زاهای نوع سوربیتول به دلیل ویژگی ساختاری که دارند (انحلال در مذاب پلیمر و تشکیل شبکه رشته‌مانند در ابعاد نانو) باعث کاهش بیشتر انرژی سطحی، در نتیجه افزایش قابل توجه دمای تبلور نسبت به هسته‌زای NaBz می‌شوند [۲، ۱۱].

پژوهشهای قبلی که در این زمینه با عوامل هسته‌زا از مشتقات سوربیتول و سدیم بنزوات انجام شده، این نتایج را تأیید کرده، افزایش دمای تبلور  $7$ ،  $14$ ،  $17$  و  $19^\circ C$  را به ترتیب برای پلی پروپیلن و دو هسته‌زا از مشتقات سوربیتول، سدیم بنزوات و بنزوئیک اسید نشان می‌دهد [۳، ۴، ۱۱، ۱۲].



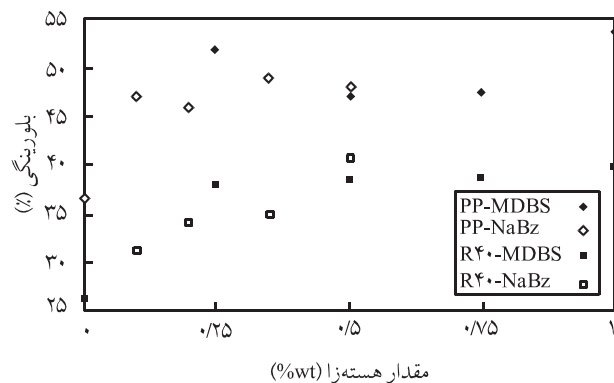
شکل ۱ مقایسه تغییر دمای تبلور پلی پروپیلن بر حسب مقادیر عوامل هسته‌زا.

افزودن عوامل هسته‌زا به پلی پروپیلن در فرایند تبلور غیر همدم باعث تغییر دمای تبلور آن می‌شود. تغییرات دمای تبلور و مقدار بلورینگی اندازه‌گیری شده با دستگاه DSC در جدول ۱ آمده است. روند افزایشی در دمای تبلور برای نمونه‌های دارای هسته‌زا نسبت به پلی پروپیلن بدون هسته‌زا مشاهده می‌شود، به طوری که با افزایش مقدار دو نوع هسته‌زا دمای تبلور افزایش می‌یابد. این افزایش در هسته‌زای MDBS به مقدار  $20/6^\circ C$  برای نمونه هموپلیمر و  $21^\circ C$  برای نمونه کوپلیمر است. به بیان دیگر، هسته‌زای MDBS باعث افزایش نسبتاً یکسان دمای تبلور PP و  $Rf_0$  شده است. شکل ۱ تغییر دمای تبلور PP و  $Rf_0$  را بر حسب مقدار دو نوع هسته‌زا نشان می‌دهد. افزایش دمای تبلور در مورد هسته‌زای NaBz حدود  $6^\circ C$  برای PP و  $14^\circ C$  برای  $Rf_0$  است. همان‌طور که

جدول ۱ نتایج اندازه‌گیری دمای تبلور و مقدار بلورینگی نمونه‌های پلی پروپیلن به وسیله DSC.

نوع پلیمر	نوع هسته‌زا	مقدار هسته‌زا (%wt)	$T_c$ ( $^\circ C$ )	$X_c$ (%)
هموپلیمر (PP)	MDBS	—	۱۱۶/۴	۳۶/۸
		۰/۲۵	۱۳۶/۷	۵۲
		۰/۵	۱۳۷	۴۷
		۰/۷۵	۱۳۵/۸	۴۷/۵
		۱	۱۳۶/۳	۵۳/۵
	NaBz	۰/۱	۱۲۰/۳	۴۷
		۰/۲	۱۲۲/۳	۴۶
		۰/۳۵	۱۲۲	۴۹
		۰/۵	۱۲۷/۶	۴۸
		—	۱۱۱	۲۶/۳
کوپلیمر ( $Rf_0$ )	MDBS	۰/۲۵	۱۳۰/۶	۳۸/۱
		۰/۵	۱۳۷/۲	۳۸/۳
		۰/۷۵	۱۳۲	۳۸/۷
		۱	۱۳۷/۵	۳۹/۷
		—	۱۱۹/۹	۳۱/۲
	NaBz	۰/۱	۱۲۰/۳	۳۳/۹
		۰/۲	۱۲۲/۵	۳۵
		۰/۳۵	۱۲۲/۵	۳۵
		۰/۵	۱۲۵/۱	۴۰/۶
		—	۱۲۵/۱	۴۰/۶

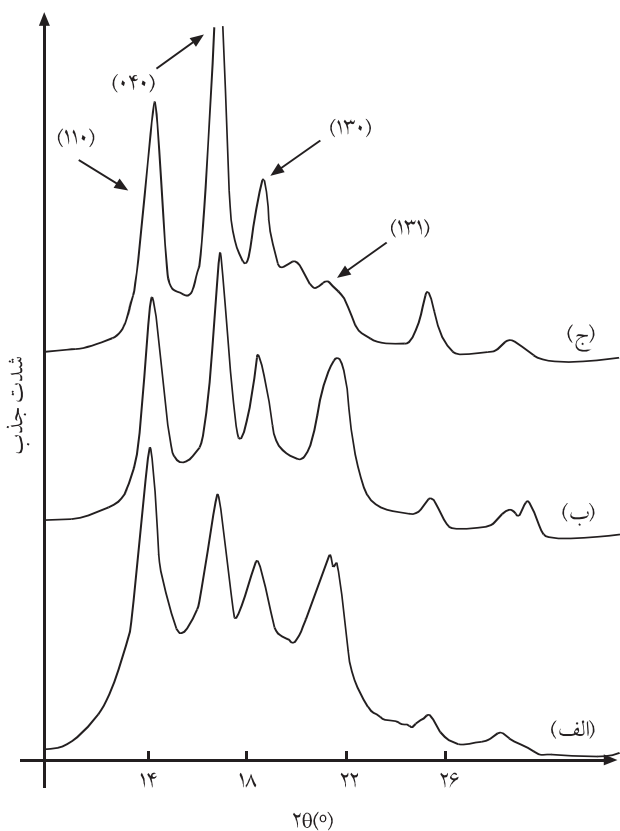
هسته‌زای MDBS معادل ۵۱ درصد مقدار اولیه است. در حالی که NaBz و MDBS در PP به ترتیب ۲۹ و ۳۷ درصد مقدار اولیه موجب افزایش مقدار بلورینگی می‌شوند. شکل ۲ مقدار بلورینگی محاسبه شده با DSC را برای PP و R۴۰ نشان می‌دهد. از نظر افزایش مقدار بلورینگی، NaBz برای R۴۰ بهتر از MDBS بوده در حالی که در PP خلاف این مسئله مشاهده می‌شود. نتایج بدست آمده در این بخش با مشاهدات سایر پژوهشگران در مورد هسته‌زاهای آلی به ویژه سدیم بنزوات و دیگر مشتقات سوربیتول مطابقت دارد [۳، ۵، ۷-۱۰]. هر چند همگی افزایش مقدار بلورینگی را گزارش کرده‌اند، اما دلیل واضحی برای آن ارائه نشده است و این افزایش به افزایش نقاط مناسب برای هسته‌زایی نسبت داده شده است [۳]. مقدار بلورینگی از روش پراش پرتو X نیز محاسبه شده است که نتایج آن اختلاف ناچیزی با مقادیری که از روش DSC بدست آمده دارد. شکل‌های ۳ و ۴ پراش پرتو X مربوط به R۴۰ و PP بدون هسته‌زا و با حداکثر مقدار MDBS و NaBz را نشان می‌دهد. با نگاه دقیق به موقعیت پیکها در دو شکل، ساختار بلوری در زوایای ۱۴، ۱۶/۸، ۱۷/۴، ۲۰/۸ و ۲۷/۶ درجه مشاهده می‌شود که با افزودن



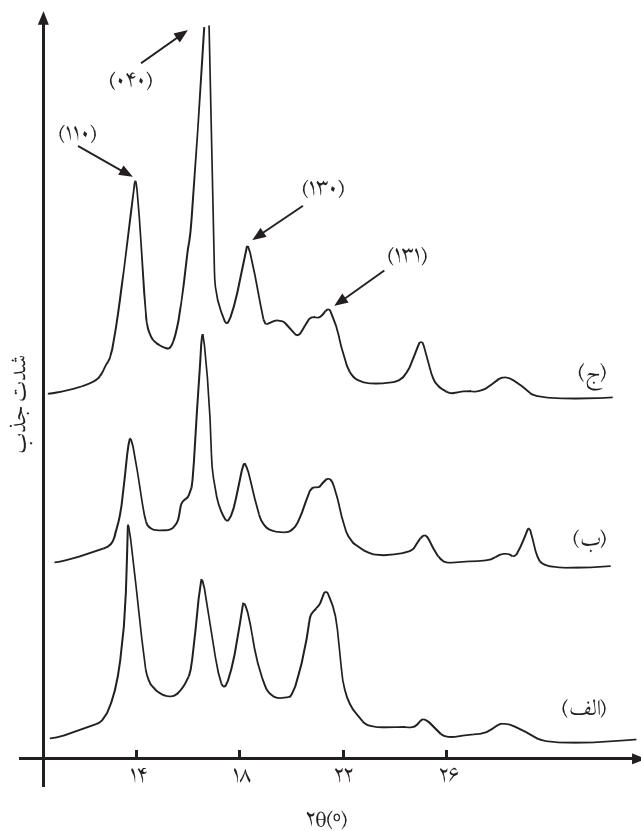
شکل ۲ مقایسه مقدار بلورینگی پلی‌پروپیلن بر حسب مقادیر عوامل هسته‌زا.

### اثر عوامل هسته‌زا بر بلورینگی

همان‌طور که نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد با افزایش مقدار عامل هسته‌زا مقدار بلورینگی پلی‌پروپیلن افزایش می‌یابد. این افزایش برای دو نوع پلی‌پروپیلن یکسان نیست. به طوری که حداکثر افزایش مقدار بلورینگی R۴۰ حاوی هسته‌زای NaBz برابر ۵۴ درصد و برای R۴۰ دارای

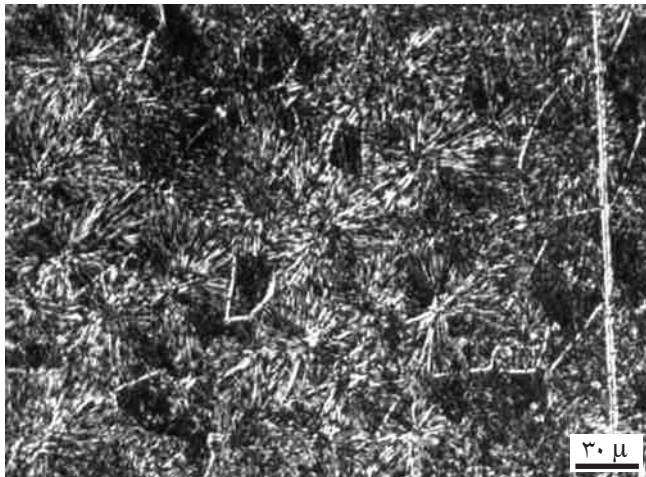


شکل ۳ پیکهای پراش پرتو X: (الف) R۴۰، (ب) NaBz ۰/۵٪ + R۴۰ و (ج) MDBS ۱٪ + R۴۰.

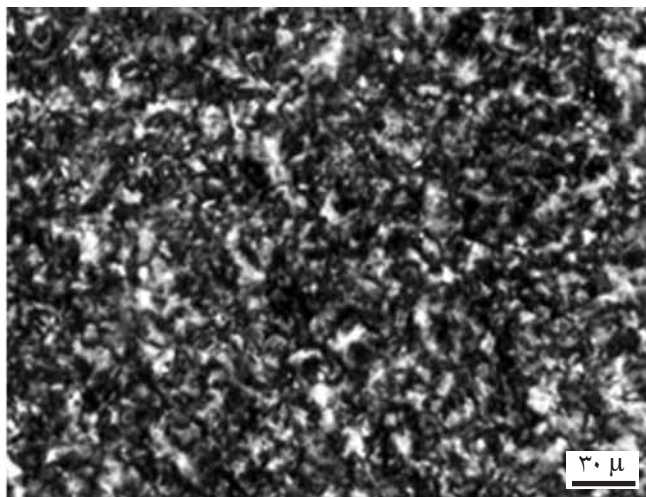


شکل ۴ پیکهای پراش پرتو X: (الف) PP، (ب) NaBz ۰/۵٪ + PP و (ج) MDBS ۱٪ + PP.

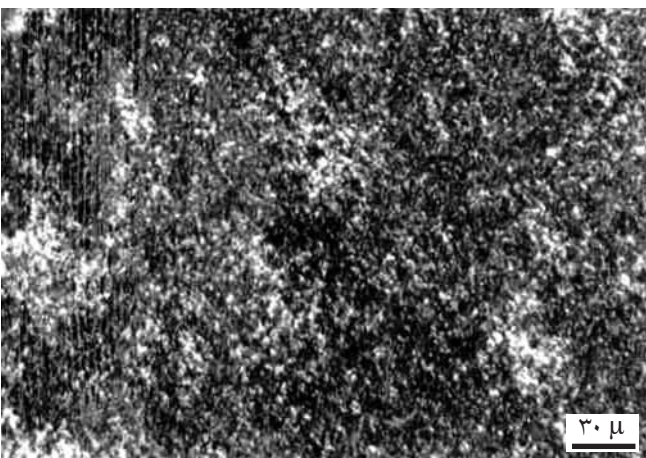




(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۵ تصاویر SEM ساختار گویچه‌ای نمونه‌ها: (الف) PP، (ب) PP+NaBz ۰/۵٪ و (ج) PP+MDBS ۲۵٪.

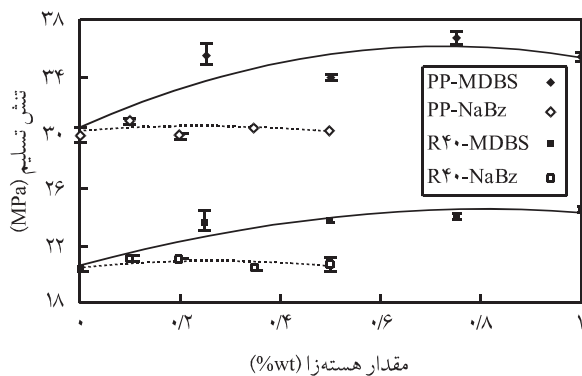
دو نوع هسته‌زا تغییر در محل پیکها رخ نمی‌دهد و ساختار بلوری همچنان  $\alpha$  باقی می‌ماند. افزایش شدت پیکها که نشان از افزایش مقدار بلورینگی دارد در شکل‌های ۳ و ۴ کاملاً مشهود است.

### اثر عوامل هسته‌زا بر ساختار گویچه‌ای

شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب ساختار گویچه‌ای را در نمونه‌های پایه PP و R۴۰ نشان می‌دهند. ساختار گویچه‌ای نمونه‌های PP و R۴۰ بدون هسته‌زا در شکل‌های ۵ (الف) و ۶ (الف) نشان داده شده است. با بررسی تصاویر میکروسکوپی نمونه‌های PP و R۴۰ دارای هسته‌زای سدیم بنزوات، کاهش قطر گویچه‌ها به وضوح قابل مشاهده است. در مطالعات میکروسکوپی انجام شده روی نمونه‌های PP و R۴۰ حاوی MDBS همان‌طور که در شکل‌های ۵ (ج) و ۶ (ج) نشان داده شده ساختار گویچه‌ای به شدت ریز شده به طوری که میکروسکوپ نوری قابلیت تأمین وضوح تصویر را در بزرگنمایی بیشتر ندارد. در مورد سدیم بنزوات متوسط قطر گویچه‌ها در نمونه‌های PP و R۴۰ بدون هسته‌زا و حاوی ۰/۵ درصد وزنی به ترتیب از ۶۰ به ۲۰ و از ۴۵ به ۲۵  $\mu$  کاهش می‌یابد. همان‌طور که در تصاویر میکروسکوپی قابل مشاهده است، هسته‌زای MDBS اندازه گویچه را به مراتب، بیشتر از NaBz کاهش می‌دهد. چون ریز شدن گویچه‌ها نشان از تعداد بیشتر آنها دارد، این موضوع حاکی از کثرت مکانهای هسته‌زایی است. توزیع و پخش مناسب ذرات هسته‌زای MDBS به دلیل ساختار شیمیایی و فیزیکی ویژه آن (تشکیل شبکه‌ای از رشته‌های بسیار ظریف به عنوان مرکز هسته‌زایی گویچه‌ها هنگام تبلور) نسبت به سدیم بنزوات می‌تواند علت ریز شدن بسیار زیاد گویچه‌ها در نمونه حاوی MDBS باشد. مطالعات میکروسکوپی سایر پژوهشگران که همگی کاهش اندازه گویچه را گزارش کرده‌اند، مؤید این نتایج است [۱۰، ۵-۳]. در پژوهش‌های که به لحاظ کمی در مورد سینتیک تبلور غیرهمدمای پلی‌پروپیلن دارای عوامل هسته‌زای نوع سوربیتول انجام شده، افزایش تعداد هسته‌های مؤثر تا ۱۰۳ برابر گزارش شده است که از علل بسیار زیاد اندازه گویچه محسوب می‌شود [۴].

### اثر عوامل هسته‌زا بر خواص کششی

به منظور بررسی اثر عامل هسته‌زا روی خواص کششی مقادیر تنش تسلیم و مدول کشسان نمونه‌ها اندازه‌گیری شد، نتایج در جدول ۲ خلاصه شده است. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود هر دو عامل هسته‌زا تنش تسلیم و مدول را افزایش می‌دهند. افزایش تنش تسلیم و مدول با بکارگیری هسته‌زای MDBS به مراتب بیش از NaBz



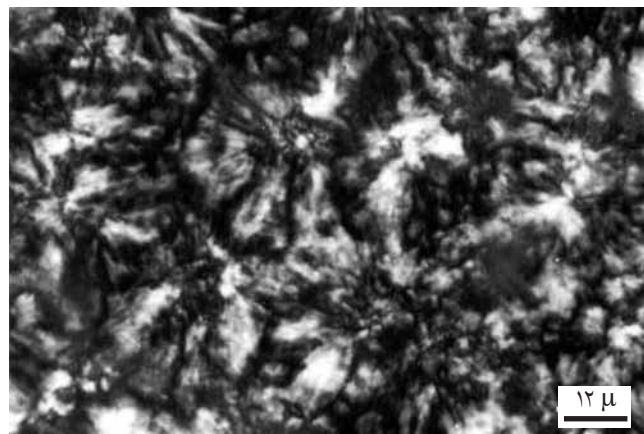
شکل ۷ مقایسه تغییر تنش تسلیم پلی‌پروپیلن بر حسب مقادیر دو نوع عامل هسته‌زا.

است. تحلیل کمی داده‌های جدول نشان می‌دهد هسته‌زای MDBS تنش تسلیم و مدول PP را به ترتیب ۲۲/۵ و ۴۳ درصد و برای R40 مقادیر ۲۷۴ و ۴۸۷ درصد افزایش داده است. مقدار افزایش این خواص در مورد هسته‌زای NaBz برای PP به ترتیب ۳ و ۱۷/۸ و برای R40 مقادیر ۴ و ۱۱ درصد است.

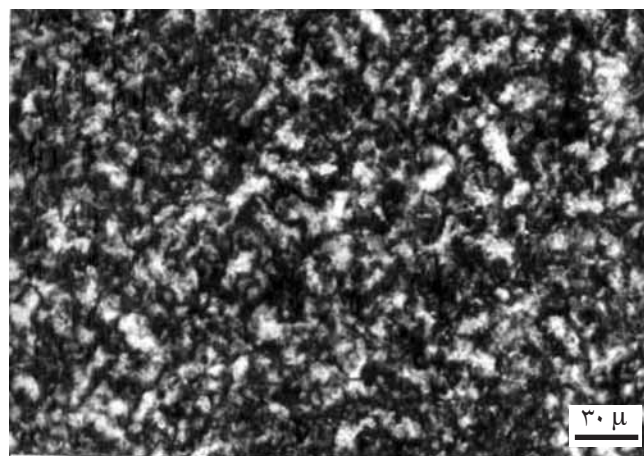
تغییرات تنش تسلیم و مدول PP و R40 حاوی هسته‌زا به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ رسم شده است. در مورد MDBS افزایش قابل ملاحظه تنش تسلیم با افزایش ۲۵ درصد وزنی مشاهده می‌شود. در مورد دیگر عوامل، نظیر دمای تبلور و اندازه گویچه نیز چنین سرعت افزایشی مشاهده می‌شود. اما، سدیم بنزوات افزایش قابل ملاحظه‌ای را در مقادیر تنش تسلیم و مدول ایجاد نمی‌کند، هر چند کارایی آن در بهبود مدول کشسان بیشتر است. به دلیل مدول بیشتر فاز بلوری نسبت به فاز بی‌شکل، قطعاً با افزایش مقدار بلورینگی، مدول کشسان نیز افزایش می‌یابد. در مورد اثر اندازه گویچه روی رفتار کششی به ویژه مدول، نظرات متفاوتی مطرح شده است [۱۳]. گروهی از پژوهشگران کوچک شدن اندازه گویچه را علت کاهش مدول دانسته‌اند [۱۳]. اما، ارتباط مستقیم بین اندازه گویچه و مدول کشسان منتفی فرض شده است.

#### اثر هسته‌زا بر استحکام ضربه

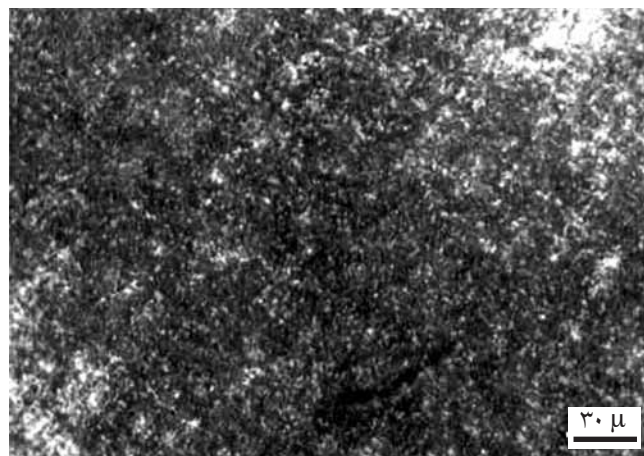
نتایج استحکام ضربه نمونه‌ها در جدول ۲ آورده شده است. مقایسه تغییرات استحکام ضربه بر حسب مقدار دو نوع هسته‌زا در شکل ۹ رسم شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، تغییر مقدار انرژی جذب شده با افزایش مقدار هسته‌زا تا مقدار معینی (۷/۵ و ۳/۵ درصد وزنی به ترتیب برای هسته‌زای MDBS و NaBz با پایه PP و R40) افزایش یافته، پس از آن کاهش می‌یابد. افزایش بلورینگی سبب کاهش



(الف)



(ب)



(ج)

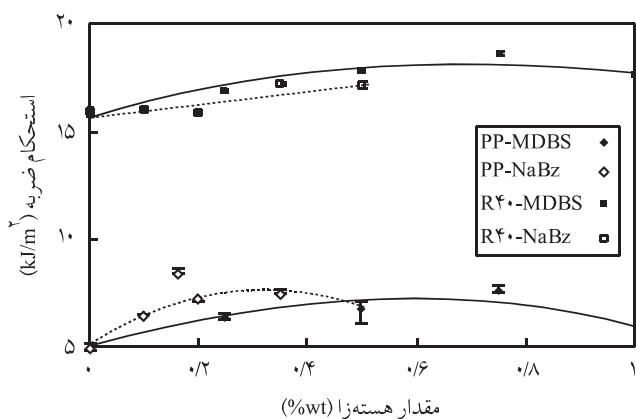
شکل ۶ تصاویر SEM ساختار گویچه‌ای نمونه‌ها: (الف) R40، (ب) R40+NaBz ۰/۵٪ و (ج) R40+MDBS ۰/۲۵٪.

جدول ۲ نتایج اندازه‌گیری خواص مکانیکی ترکیبات استفاده شده.

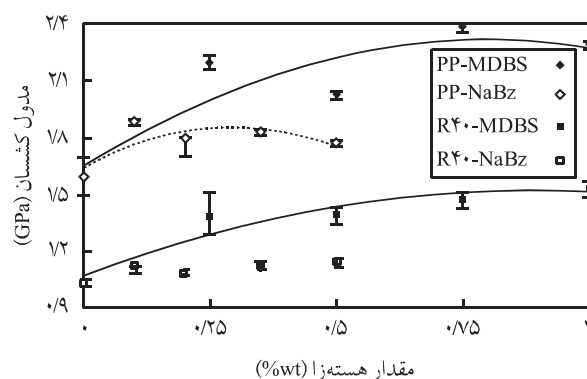
نوع پلیمر	نوع هسته‌زا	مقدار هسته‌زا (%wt)	تنش تسلیم (MPa)	مدول کشسان (GPa)	استحکام ضربه (kJ/m <sup>2</sup> )	
هموپلیمر (PP)	MDBS	—	۲۹/۹۸	۱/۵۹	۵	
		۰/۲۵	۳۵/۵۴	۲/۱۹	۶/۳۳	
		۰/۵	۳۳/۹۴	۲/۰۲	۶/۸۳	
		۰/۷۵	۳۶/۷۳	۲/۳۸	۷/۶۶	
	NaBz	۱	۳۵/۳۷	۲/۲۸	۵/۶۶	
		۰/۱	۳۰/۹۳	۱/۸۸	۶/۵	
		۰/۲	۲۹/۹۲	۱/۷۹	۷/۲۶	
		۰/۳۵	۳۰/۴۴	۱/۸۱	۷/۵	
	کوپلیمر (R۴۰)	MDBS	—	۲۰/۳۳	۱/۰۳	۱۵/۸۳
			۰/۲۵	۲۳/۷	۱/۳۸	۱۶/۸۳
۰/۵			۲۳/۷۵	۱/۳۹	۱۷/۱۸	
۰/۷۵			۲۴/۱۸	۱/۴۶	۱۸/۶۶	
NaBz		۱	۲۶/۶۹	۱/۷۵	۱۷/۵	
		۰/۱	۲۷/۲۳	۱/۱۱	۱۶	
		۰/۲	۲۷/۰۶	۱/۰۷	۱۵/۸۳	
		۰/۳۵	۲۰/۵	۱/۱۲	۱۷/۲۱	
NaBz		۰/۵	۲۰/۷۸	۱/۱۵	۱۷/۱	

باریز کردن گویچه‌ها باعث ایجاد ساختاری با مولکولهای رابط درون و بین گویچه‌ها شده که درگیری مولکولی بین دانه‌های بلور را بهبود می‌بخشد [۹]. بنابراین، استحکام مرز بین گویچه‌ها افزایش یافته که این

انعطاف‌پذیری زنجیرهای مولکولی شده، در نهایت باعث کاهش استحکام ضربه می‌شود. از طرف دیگر، کوچک شدن اندازه گویچه‌ها یا ریز شدن دانه‌های بلور برای استحکام ضربه مفید است. عوامل هسته‌زا



شکل ۹ مقایسه تغییر استحکام ضربه پلی‌پروپیلن بر حسب مقادیر دو نوع عامل هسته‌زا.



شکل ۸ مقایسه تغییر مدول کشسان پلی‌پروپیلن بر حسب مقادیر دو نوع عامل هسته‌زا.



تقریباً مشابه است. افزودن هسته‌زای MDBS به PP و R۴۰ به شدت باعث ریز شدن گویچه‌ها می‌شود. این در حالی است که هسته‌زای NaBz در بیشترین مقدار (۵٪ درصد وزنی) قطر متوسط گویچه PP را از ۶۰ به ۲۰  $\mu$  و قطر متوسط گویچه R۴۰ را از ۴۵ به ۲۵  $\mu$  کاهش می‌دهد. افزودن عوامل هسته‌زا به PP و R۴۰ باعث افزایش تنش تسلیم و مدول کشسان، نسبت به نمونه‌های بدون هسته‌زا می‌شود. ضمن اینکه مقدار افزایش برای نمونه‌های دارای هسته‌زای MDBS قابل توجه بوده، اما برای نمونه‌های دارای هسته‌زای NaBz قابل ملاحظه نیست. افزودن عوامل هسته‌زا تا درصد معینی باعث افزایش استحکام ضربه شده، پس از آن سبب کاهش استحکام ضربه می‌شود. با توجه به نتایج آزمون‌های انجام شده به نظر می‌رسد ۲۵٪ درصد وزنی مقدار بهینه عامل هسته‌زای MDBS باشد.

## مراجع

1. Karger-Kocsis J., *Polypropylene, Structure, Blends and Composite*, 1st ed., Chapman & Hall, UK, 56-58, 1995.
2. Zweifel H., *Plastic Additives Handbook*, 5th ed., Hanser, Germany, 958-960, 2000.
3. Jang G., Cho W. and Ha C., Crystallization Behavior of Polypropylene with and without Sodium Benzoate as a Nucleating Agent, *J. Polym. Sci., Part B: Polym. Phys.*, **39**, 1001-1016, 2001.
4. Kim Y.C. and Kim C.Y., Crystallization Characteristics of Isotactic Polypropylene with and without Nucleating Agents, *Polym. Eng. Sci.*, **31**, 1009-1014, 1991.
5. Wang K., Mai K. and Zeng H., Isothermal Crystallization Behavior and Melting Characteristics of Injection Sample of Nucleated Polypropylene, *J. Appl. Polym. Sci.*, **78**, 2547-2553, 2001.
6. Gue Q., Xin Z., Zhu W. and Dai G., Effect of an Organic Phosphorus Nucleating Agent on Crystallization Behaviors and Mechanical Properties of Polypropylene, *J. Appl. Polym. Sci.*, **88**, 297-301, 2003.
7. Xu T., Lei H. and Xie C.S., The Research on Aggregation Structure of PP Materials under Different Condition and the Influence on Mechanical Properties, *Mater. Design*, **23**, 709-715, 2002.
8. Xu T., Lei H. and Xie C.S., The Effect of Nucleating Agent on the Crystalline Morphology of Polypropylene, *Mater. Design*, **24**, 227-230, 2003.
9. Xu T., Yu J. and Jin Z., Effects of Crystalline Morphology on the Impact Behavior of Polypropylene, *Mater. Design*, **22**, 27-31, 2001.
10. Zhang R., Zhang H., Lou X. and Ma D., Crystallization Characteristics of Polypropylene and Low Ethylene Content Polypropylene Copolymer with and without Nucleating Agents, *J. Appl. Polym. Sci.*, **51**, 51-56, 1994.
11. Feng Y., Jin X. and Hay N., Effect of Nucleating Agent on Crystallization of Isotactic Polypropylene, *J. Appl. Polym. Sci.*, **69**, 2089-2095, 1998.
12. Ahmed S. and Basfar A., Influence of Benzoic Acid on Thermal, Crystallization and Mechanical Properties of Isotactic Polypropylene under Irradiation, *Nuclear Instruments & Method in Physics Research, Section B*, **151**, 169-173, 1999.
13. Chan C.M., Wu J., Li J.X. and Cheung Y.K., Polypropylene/Calcium Carbonate Nanocomposites, *Polymer*, **43**, 2981-2992, 2002.

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر دو هسته‌زای آلی روی خواص PP و R۴۰ بررسی شده است. افزایش دمای تبلور مشاهده شده برای نمونه‌های حاوی هسته‌زای MDBS قابل ملاحظه بوده، این افزایش در PP و R۴۰ تقریباً یکسان است. درحالی‌که این افزایش در هسته‌زای NaBz کمتر است. همچنین، کارایی سدیم بنزوات برای R۴۰ بیشتر از PP مشاهده شد. افزایش مقدار بلورینگی حاصل از افزودن هر دو هسته‌زا به PP و R۴۰