بازگردانی ضایعات پلی‌اتیلن ترفتالات (نوع بطری) و بررسی خواص بلورینگی، مکانیکی و رئولوژیکی آن

Recycling of PET Beverage Bottles and Studies on its Crystallinity, Mechanical and Rheological Properties

علیرضا ممی‌زاده کفال، عبدالرسول ارومیه‌ای*، اسماعیل قاسمی

تهران، پژوهشگاه پلیمر ایران، صندوق پستی ۱۴۹۶۵/۱۱۵

دریافت: ۸۰/۷/۱۷، پذیرش: ۸۰/۱۰/۲۹

چکیده

کاربرد مواد پلاستیکی در بسته‌بندی مواد غذایی و آشامیدنی در کشورمان رو به افزایش است. این موضوع باعث افزایش مداوم ضایعات پلاستیکی در زباله‌های شهری شده است و مشکلات متعددی از نظر آلودگی زیست محیطی، مسائل بوم‌شناختی و اقتصادی را به بار آورده است. ضایعات PET که از بسته‌بندی مواد و بطریهای نوشابه بدست می‌آید دارای مزایایی از جمله بازیافت مکرر و کاربرد مواد بازیافتی برای مصارف مختلف است.

در این پژوهش فراورش و اصلاح خواص مخلوط PET خالص و ضایعات آن و استفاده از PP-g-MA به عنوان یک پلیمر اصلاح کننده در مخلوط بررسی شده است. بدین ترتیب که ابتدا بطریها و قطعات پس شکل گرفته PET جمع‌آوری، آسیاب، شستشو و خشک شده است. پس از بهینه‌سازی شرایط فراورش نمونه‌ها با استفاده از سه دستگاه رورزان تک پیچه، دوپیچه همسوگرد و ناهمسوگرد فراورش شده و در مرحله بعدی خواص محصولات با روشهای مختلف بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که وزن مولکولی و خواص دیگر با افزایش میزان ضایعات تضعیف می‌شود، ولی با افزودن مقداری از PP-g-MA به مخلوطی از PET خالص و ضایعات آن خواص مکانیکی بهبود می‌یابد، درصد بلورینگی کاهش یافته و حجم مولکولی متوسط و گرانروی افزایش پیدا می‌کند.

واژه‌های کلیدی: پلی‌استر، ضایعات، بازگردانی، خواص مکانیکی و رئولوژیکی، بلورینگی

Key Words: polyester, waste, recycling, mechanical and rheological properties, crystallinity

مقدمه

دغدغه‌های زیست محیطی ناشی از عدم تجزیه مواد پلیمری به وسیله طبیعت و تولید و مصرف روزافزون این مواد انسان را مجبور کرده است تا برای بازیافت و استفاده مجدد از این مواد کارهای اساسی و بنیادی را مدنظر قرار دهد. در میان مواد پلیمری هرچند که پلاستیکها فقط حدود ۷ درصد وزنی ضایعات جامد را تشکیل می‌دهند، ولی به علت چگالی کم، حجمی بین ۳۰-۲۵ درصد کل ضایعات را دربرمی‌گیرند [۱].

در این میان با توجه به مصرف گسترده پلی‌استر در زندگی روزمره و صنعت از یک طرف و روند افزایشی تولید آن از طرف

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار: A.Oromiehie@proxy.ipi.ac.ir

جدول ۱ - ترکیب درصد نمونه‌های تهیه شده از مواد نو و ضایعاتی.

شماره نمونه / مواد	پلی‌استر (V-PET) (٪)	پلی‌استر ضایعاتی (R-PET) (٪)	PP-g-MA (٪)
۱	۱۰۰	۰	–
۲	۹۰	۱۰	–
۳	۷۵	۲۵	–
۴	۵۰	۵۰	–
۵	۰	۱۰۰	
۶	۷۰	۲۵	۵
۷	۶۵	۲۵	۱۰
۸ (E-PET)*	۱۰۰	–	–

*نمونه ۸ پلی‌استر نو فراورش شده است.

دیگر بازیافت این مواد همیشه مورد نظر کارشناسان و محققان صنعت بوده است. به عنوان نمونه تا سال ۱۳۸۲ تولید پلی‌استر در مرحله اول و دوم راه اندازی به وسیله شرکت پتروشیمی ایران (شامل نوع الیاف و بطری) بالغ بر ۸۰۸ هزار تن در سال در ایران خواهد رسید که این مقدار تولید مسلما بر مصرف و در نتیجه بر ضایعات این مواد در ایران خواهد افزود [۲]. آمارهای جهانی نشان می‌دهد که مصرف سرانه پلی‌استر نوع بطری در جهان حدود ۰/۶ kg، در کشورهای صنعتی حدود ۲/۴-۴ kg و در ایران حدود ۰/۳ kg است که قدر مسلم پس از راه‌اندازی واحدهای تولیدی پلی‌استر در کشور بر این مقدار افزوده خواهد شد [۲]. مصرف عمده پلی‌استر نوع بطری در صنایع روغن مایع ۵۰ درصد، آب معدنی ۱۵ درصد، نوشابه‌سازی ۲۰ درصد و سایر موارد ۱۵ درصد است [۳].

روشهای زیر برای بازیافت پلی‌استر مرسوم است:

- بازیافت مکانیکی [۴-۸]،
- بازیافت شیمیایی (تبدیل به مونومرهای اولیه) [۹،۱۰] و
- بازیافت انرژی (سوزاندن مواد برای بدست آوردن انرژی).

بازیافت مکانیکی که معمولترین این روشهاست شامل مراحل جمع آوری و تفکیک ضایعات، آسیاب کردن، شستشوی ضایعات خرد شده و در نهایت روزن‌زنی و دانه‌سازی است. در طی این عملیات که مستلزم اعمال گرما و تنش به ماده است، خصوصیات ماده تغییر می‌کند و شاهد تضعیف خواص فیزیکی و مکانیکی و کاهش جرم مولکولی متوسط ماده خواهیم بود[۱۱،۱۲]. برای کاهش این آثار تخریبی دو راه وجود دارد که یکی مخلوط کردن این مواد با مواد نو و دیگری استفاده از مواد افزودنی یا آلیاژ کردن با سایر پلیمرهاست [۶،۷].

در این پژوهش از هر دو روش استفاده شده است. یعنی مواد ضایعاتی با مواد نو ترکیب شده و همچنین با پلی‌پروپیلن پیوند خورده بامالئیک انیدرید (PP-g-MA) در یک ترکیب درصد خاص آلیاژسازی شده و در هر دو روش خواص بلورینگی، مکانیکی و رئولوژیکی بررسی شده است.

تجربی

مواد

مواد مورد استفاده در این پژوهش عبارتند از: پلی‌استر نو از نوع بطری با نام تجاری Eastalon CB-۶۰۲، چگالی $1/4\ g/cm^3$ و وزن مولکولی متوسط وزنی $\bar{M}_W = 52000\ g/mL$ ساخت کشور تایوان، مواد ضایعاتی از بطریهای نوشابه که در معرض مصرف عمومی قرار داشته است و پلی‌پروپیلن پیوند خورده با مالئیک انیدرید با نام تجاری Exallor PO۱۰۱۵ و چگالی $0/95\ g/cm^3$ محصول شرکت اکسون.

دستگاهها

برای اختلاط مواد ضایعاتی با مواد نو و پلی‌پروپیلن پیوند خورده با مالئیک انیدرید از سه نوع روزن‌زن به شرح زیر استفاده شده است:

روزن‌زن تک پیچه با نام تجارتی Haake Rheometer System۹۰ ساخت کشور آلمان با نسبت طول به قطر (L/D) برابر ۲۴ و قطر ۱۹mm. روزن‌زن دوپیچه نا همسوگرد ساخت شرکت کولین نوع Nr۵۵۰۰ از کشور آلمان با نسبت طول به قطر ۱۵ و قطر ۵۰mm، که پیچهای این روزن‌زن به اجزای مخصوص اختلاط مجهز است. روزن‌زن دوپیچه همسوگرد ساخت شرکت کولین نوع Nr۵۵۰۰ از کشور آلمان با نسبت طول به قطر ۲۴ و قطر ۵۰mm که فاقد اجزای مخصوص اختلاط است.

دستگاههای آزمون مکانیکی: آزمایشهای کششی روی نمونه‌ها بر حسب استاندارد ASTM D۶۳۸ به کمک دستگاه کشش ساخت شرکت اینسترون مدل ۶۰۲۵ انجام شد و آزمایش ضربه بر اساس استاندارد ASTM D۲۵۶ به وسیله دستگاه ضربه ساخت شرکت زوئیک مدل ۵۱۰۲/۱۰۰/۰۰ انجام گرفت.

آزمایشهای تجزیه گرمایی و بلورینگی به وسیله دستگاه DSC ساخت شرکت پلیمرلاب مدل DSC-PL/STA-۷۸۰ انجام گرفت. برای بررسی خواص رئولوژیکی از دو دستگاه رئومتر مویین ساخت شرکت اینسترون مدل ۳۲۱۱ و گرانروی‌سنج آبلهود استفاده شد.

جدول ۲ - شرایط فرایند روزن‌زانی.

نوع روزن‌زن	دور دستگاه (rpm)	نواحی دما (°C)					
		اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم	ششم
تک پیچه	۷۰	۲۶۰	۲۷۰	۲۵۸	۲۴۵	–	–
دوپیچه همسوگرد	۵۰	۲۷۵	۲۸۵	۲۶۰	۲۴۸	۲۴۵	۲۴۱
دوپیچه ناهمسوگرد	۷۰	۲۴۰	۲۴۵	۲۴۵	۲۵۰	۲۵۰	۲۴۵

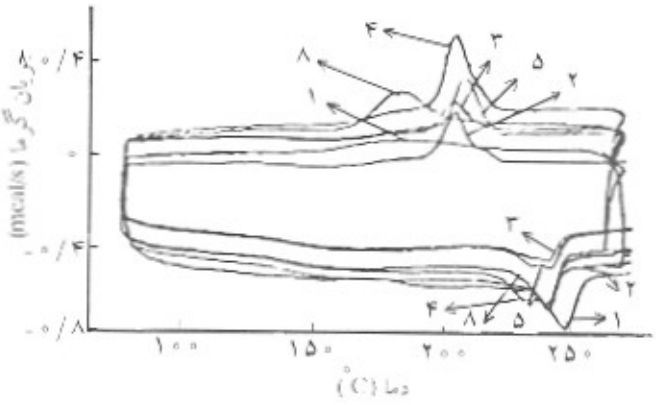
دستگاه فالیگیری تزریقی جهت تهیه نمونه‌ها برای آزمون کشش و ضربه که ساخت شرکت ایمن ماشین به ظرفیت ۱۲۵ g بوده است.

روشها

نمونه‌های مختلف با درصدهای متفاوت از پلی‌استر نو (V-PET) و ضایعاتی (R-PET) مطابق جدول ۱ تهیه شد. علاوه بر این نمونه‌ها برای اصلاح خواص ضربه‌ای پلی‌استر در ترکیب درصد پلی‌استر ضایعاتی /پلی‌استر نو برابر ۷۵/۲۵ مقدار ۵ و ۱۰ درصد پلی‌پروپیلن پیوند خورده با مالئیک انیدرید اضافه شد.

همه این نمونه‌ها به وسیله سه روزن‌زان تک‌پیچه، دوپیچه همسوگرد و ناهمسوگرد مطابق شرایط فرایند روزن‌زانی جدول ۲ در محیط هوا صورت گرفت.

مذاب پلیمری نمونه‌ها پس از گذشتن از حمام آب سرد، به وسیله دستگاه دانه‌ساز به دانه تبدیل شده و پس از خشک کردن در آون ۱۱۰°C به مدت ۴ ساعت به وسیله دستگاه تزریق نمونه‌های مختلف از آن تهیه شد یا برای سایر آزمایشها بطور مستقیم از آنها استفاده گردید. برای مقایسه نمونه‌های تهیه شده با پلی‌استر نو و فراورش شده (E-PET)، یک نمونه از پلی‌استر خالص فراورش نشده (V-PET) نیز با شرایط یاد شده فراورش شد.



شکل ۱ - گرمانگاشتهای DSC برای نمونه‌های تهیه شده به وسیله روزن‌زان تک‌پیچه.

نتایج و بحث

بررسی رفتار گرمایی و بلورینگی

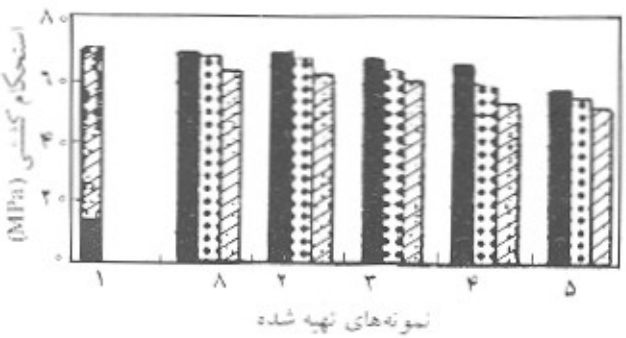
شکل ۱ گرمانگاشتهای DSC را برای نمونه‌های تهیه شده با روزن‌زان تک پیچه نشان می‌دهد. ابتدا نمونه تا ۲۷۰°C گرم شده و بعد از ۵min به آهستگی سرد می‌شود. مراحل گرم و سرد کردن منجر به ایجاد دو پیک گرماگیر و گرمازا در این گرمانگاشتها می‌شود که به ترتیب مبین پدیده ذوب و بلورینگی نمونه است.

مشخصه‌های دمای ذوب (T_m)، دمای بلورینگی (T_c)، سطح‌زیر منحنی ذوب و بلورینگی (ΔH_m،ΔH_c) و درصد بلورینگی برای نمونه‌ها در جدول ۳ آمده است [۱۳].

محاسبه درصد بلورینگی

شرایط آزمایش DSC بدین صورت بود که ابتدا با سرعت گرمادهی ۱۰°C/min از دمای محیط تا دمای ۲۸۰°C پلیمر گرم شده و مدتی در این حالت باقی مانده است تا تمام پیشینه گرمایی و مکانیکی آن حذف شود. سپس، با سرد کردن کند دمای پلیمر تا دمای محیط یابین آورده شده است. در این چرخه گرمایی دو پیک که یکی مربوط به پدیده ذوب (گرم کردن) و دیگری مربوط به پدیده بلورینگی (سرد کردن) است مشاهده می‌شود.

برای محاسبه درصد بلورینگی کافی است مساحت زیر منحنی



شکل ۲ - نمودار تغییرات استحکام کششی نمونه‌های تهیه شده به وسیله روزن‌زان : (■) تک پیچه، (▪) دوپیچه همسوگرد و (▨) ناهمسوگرد.

جدول ۳- خواص گرمایی و بلورینگی نمونه‌های تهیه شده به وسیله روزن‌ران تک‌پیچه.

شماره نمونه / خواص	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)	T_c (°C)	ΔH_c (J/g)	درصد بلورینگی
۱	۲۴۸/۰۴	۱۶/۲۶	۱۸۷/۵۶	-۸/۳۱	۱۷
۲	۲۴۷/۹۱	۱۵/۱۳	۱۹۶/۴۲	-۲۱/۹۴	۲۶
۳	۲۴۷/۹۵	۱۵/۸۰	۱۹۵/۵۶	-۲۴/۴۵	۲۷
۴	۲۴۷/۹۳	۱۵/۱۷	۱۹۶/۷۲	-۲۵/۱۶	۲۸
۵	۲۴۹/۱۸	۱۷/۱۴	۲۰۰/۶۵	-۲۸/۲۲	۳۱
۸	۲۴۷/۰۵	۱۵/۲۱	۱۷۴/۲۴	-۲۰/۸۵	۲۵

پیکهای گرماگیر (مربوط به ذوب) و گرمازا (مربوط به بلورینگی) مشخص شود.سپس با استفاده از معادله زیر درصد بلورینگی قابل محاسبه است [۱۳]:

$$\%X=(\Delta H_f-\Delta H_c)/\ x\Delta H^*_{f(PET)} \qquad (۱)$$

که در آن X درصد بلورینگی، ΔH_f آنتالپی مذاب، ΔH_c آنتالپی بلورینگی، $\Delta H^*_{f(PET)}$ آنتالپی استاندارد که مطابق استاندارد ASTM D ۳۴۱۸ برابر ۳۲/۵ cal/g یا ۴۵ J/g است و x کسر وزنی مواد که برای صددرصد بلورینگی PET برابر عدد یک است.

$$X=\frac{\Delta H_f-\Delta H_c}{\Delta H^*_f}\times 100 \qquad (۲)$$

همان طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، مقدار درصد بلورینگی و دمای تبلور برای نمونه‌های تهیه شده در روزن‌ران تک‌پیچه افزایش می‌یابد. در مورد این دو مشخصه باید این مطلب را درنظر داشت که تبلور پلی‌استر آهسته صورت می‌گیرد [۱۳]. پس برای تشکیل و رشد بلورها در هنگام سردکردن مذاب باید فرصت کافی به این ماده داده شود و اگر ماده بسرعت سرد شود درصد بلورینگی در آن کم خواهد بود. از سوی دیگر، با افزایش مواد ضایعاتی به علت کوتاه بودن زنجیرهای مولکولی، کم بودن وزن مولکولی متوسط آن (جنبش مولکولی بیشتر) و پایین بودن سرعت سردکردن (زمان کافی)، بلورها سریعتر، راحت‌تر و در دماهای (T_c) بالاتر تشکیل می‌شود و در نتیجه دما و درصد بلورینگی افزایش می‌یابد. این روند افزایش برای نمونه‌های تهیه شده از هر سه روش مشاهده گردید که نتایج آن در جدولهای ۴ و ۵ آورده شده است.

درصد بلورینگی در نمونه‌های دارای PP-g-MA نسبت به همان ترکیب درصد مواد ضایعاتی (R-PET ۲۵ درصد) مقداری کاهش نشان می‌دهد که در جدول ۶ برای روزن‌ران تک پیچه آورده شده است. دلیل این کاهش شاید به علت مزاحمت ذرات PP-g-MA در تشکیل بلورهای پلی‌استر است، در دمایی که بلورهای پلی‌استر تشکیل می‌شود (۱۵۰-۲۳۰°C) ذرات PP-g-MA هنوز به صورت مذاب بوده و امکان تشکیل ساختار بلوری ندارند و به صورت ذرات مزاحم در تشکیل ساختار بلوری پلی‌استر عمل می‌کنند و میزان بلورینگی آن را کاهش می‌دهند.

خواص مکانیکی

شکلهای ۲ تا ۴ استحکام کششی، ازدیاد طول تا پارگی و استحکام

جدول ۴- خواص گرمایی و بلورینگی نمونه‌های تهیه شده به وسیله روزن‌ران دوپیچه همسوگرد.

شماره نمونه / خواص	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)	T_c (°C)	ΔH_c (J/g)	درصد بلورینگی
۱	۲۴۸/۰۴	۱۶/۲۶	۱۸۷/۵۶	-۸/۳۱	۱۷
۲	۲۵۱/۳۱	۲۱/۷۴	۱۹۱/۱۷	-۱۷/۰۹	۲۷
۳	۲۵۱/۵۸	۲۳/۷۴	۱۹۷/۰۵	-۱۷/۵۶	۲۸
۴	۲۵۰/۶۹	۲۷/۰۴	۱۹۹/۳۷	-۱۷/۸۹	۳۱
۵	۲۵۱/۶۲	۲۷/۸۳	۱۹۹/۵۳	-۱۷/۸۵	۳۲
۸	۲۴۹/۴۵	۲۲/۶۵	۱۸۹/۱۵	-۱۶/۸۹	۲۷

جدول ۵ خواص گرمایی و بلورینگی نمونه‌های تهیه شده به وسیله روزن‌ران دوپیچه ناهمسوگرد.

خواص / شماره نمونه	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)	T_c (°C)	ΔH_c (J/g)	درصد بلورینگی
۱	۲۴۸/۰۴	۱۶/۲۶	۱۸۷/۵۶	-۸/۳۱	۱۷
۲	۲۴۸/۵۴	۱۸/۳۵	۱۹۸/۲۹	-۲۲/۰۳	۲۷
۳	۲۴۸/۶۸	۱۸/۳۹	۲۰۰/۶۹	-۲۲/۶۵	۲۸
۴	۲۴۸/۶۲	۱۹/۳۵	۱۹۸/۵۵	-۲۲/۶۱	۲۹
۵	۲۴۳/۵۰	۲۰/۲۳	۲۰۳/۸۲	-۲۲/۴۰	۳۰
۸	۲۴۸/۷۴	۱۶/۸۰	۲۰۱/۴۰	-۱۹/۳۱	۲۵

ضربه‌ای نمونه‌ها را درمقابل درصد مواد ضایعاتی نشان می‌دهد. در تمام نمونه‌ها، همان‌طور که اشاره شد، به علت پاره شدن زنجیرها و کاهش جرم مولکولی متوسط زنجیرها در مواد ضایعاتی، با افزایش مقدار این مواد خواص یاد شده تضعیف می‌شود. اما مدول نمونه‌ها (شکل ۵) افزایش می‌یابد که این تغییربه افزایش درصد بلورینگی در نمونه‌ها برمی‌گردد که درباره علت افزایش بلورینگی در قسمت قبل توضیح داده شد. روند تضعیف خواص در روزن‌ران دوپیچه ناهمسوگرد به علت داشتن اجزای مخصوص اختلاط و در نتیجه اعمال تنش بیشتر و کاهش زیادتر وزن مولکولی است.

در شکل ۶ نمودار تغییرات استحکام ضربه‌ای نمونه‌های دارای PP-g-MA نشان داده شده است که در این حالت یک روند افزایشی مشاهده می‌شود. این امر با توجه به سازگاری نسبتا خوب PP-g-MA با پلی‌استر و تغییر شکل‌شناسی سیستم به حالت پراکنده می‌تواند قابل توجیه باشد.

خواص رئولوژیکی

منحنی جریان برای نمونه‌های مختلف به کمک رئومتر لوله مویین در دمای ۲۵۵°C تهیه گردید که یک نمونه آن برای روزن‌ران تک پیچه در شکل ۷ آورده شده است. همان‌طور که ازشکل مشخص است، تمام نمونه‌ها دارای رفتار شبه پلاستیکی بوده و از قانون توانی پیروی می‌کنند.

در بررسی رفتار رئولوژیکی پلی‌استرها مشاهده شده است که این مواد شاخص قانون توانی بالا ($n=0/6$) دارند و به رفتار نیوتنی نزدیک‌اند [۱۴]. با اضافه کردن مواد ضایعاتی در همه حالتها مشاهده شد که منحنی‌ها شیب کمتری دارند و به سمت رفتار نیوتنی سوق پیدا می‌کنند. علت این روند می‌تواند مربوط به این واقعیت باشد که مواد ضایعاتی با جرم مولکولی کمتر دارای گره خوردگیهای کمتر بوده و در حین اعمال تنش راحت‌تر عکس‌العمل نشان می‌دهند.

با مقایسه سه روش نمونه‌سازی مشاهده شد که افت گرانروی در روزن‌ران تک‌پیچه در یک سرعت برش ثابت از بقیه روشها کمتر است و در روزن‌ران دوپیچه ناهمسوگرد به علت وجود اجزای مخصوص اختلاط افت گرانروی بیشتر از همه است.

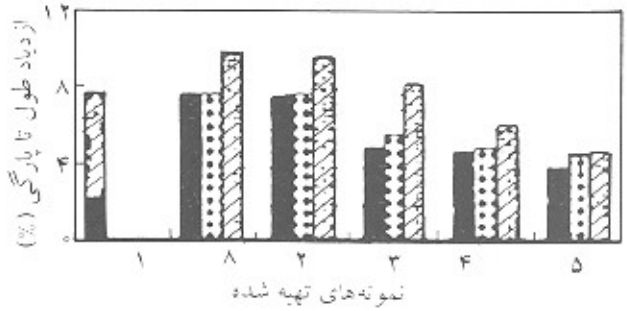
شکل ۸ منحنی جریان نمونه دارای ۵ درصد PP-g-MA را برای روش تهیه با روزن‌ران تک پیچه نشان می‌دهد. با افزایش این مواد به آمیزه مشاهده شد که رفتار شبه پلاستیکی افزایش می‌یابد که دلیل آن می‌تواند به رفتار شبه پلاستیکی شدید پلی‌پروپیلن مربوط باشد ($n=0/35$) [۱۵].

وزن مولکولی

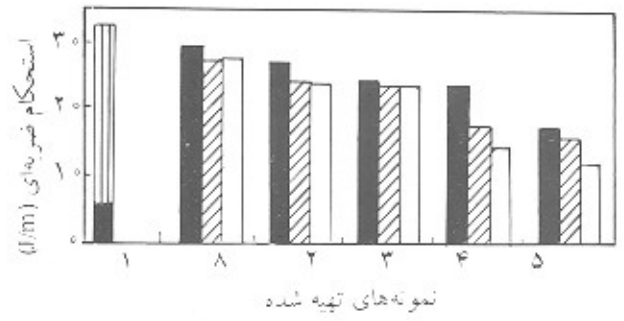
محاسبه وزن مولکولی با استفاده از معادلات گرانروی ذاتی [۱۶]: برای محاسبه گرانروی ذاتی و سپس وزن مولکولی متوسط وزنی ابتدا زمان سقوط محلول و حلال اندازه‌گیری شد که با محاسبه نسبت این دو گرانروی نسبی (η_{rel}) بدست آمد:

جدول ۶ - خواص گرمایی و بلورینگی نمونه‌های تهیه شده به وسیله روزن‌ران تک‌پیچه.

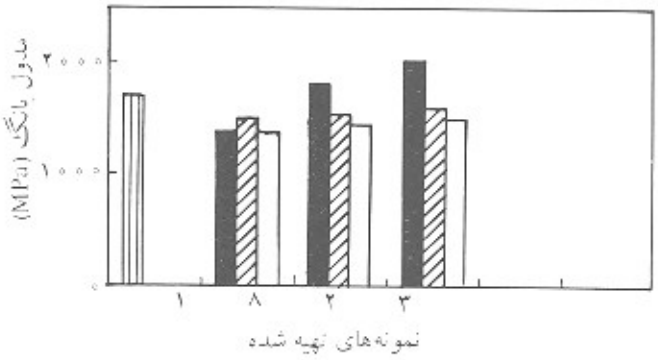
خواص / شماره نمونه	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)	T_c (°C)	ΔH_c (J/g)	درصد بلورینگی
۱	۲۴۸/۰۴	۱۶/۲۶	۱۸۷/۵۶	-۸/۳۱	۱۷
۳	۲۴۷/۹۵	۱۵/۸۰	۱۹۵/۵۶	-۲۴/۴۵	۲۷
۶	۲۴۱/۳۹	۱۶/۷۶	۱۹۹/۶۴	-۲۱/۸۶	۲۶
۷	۲۴۳/۶۰	۱۶/۸۴	۲۰۲/۲۵	-۱۶/۱۷	۲۵



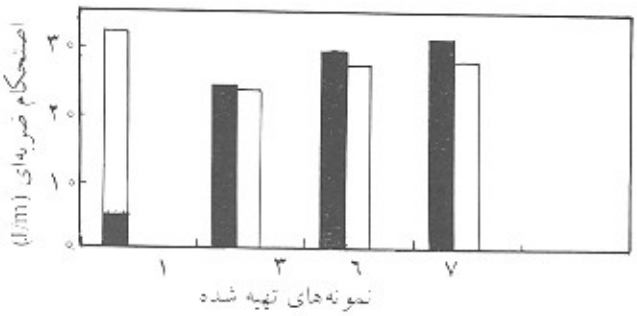
شکل ۳- نمودار تغییرات ازدیاد طول تا پارگی نمونه‌های تهیه شده به وسیله روزن‌ران : (■) تک پیچه، (▨) دوپیچه همسوگرد و (▧) ناهمسوگرد.



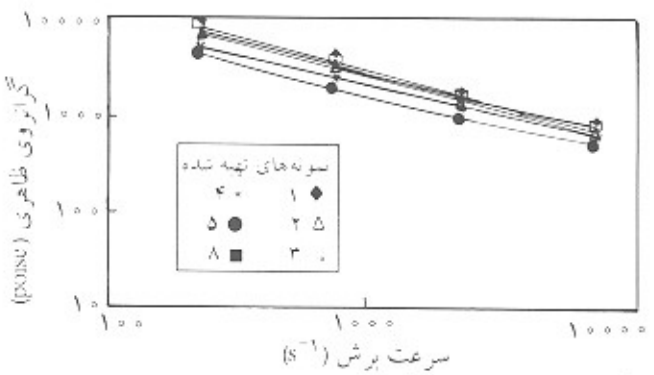
شکل ۴- نمودار تغییرات استحکام ضربه‌ای نمونه‌های تهیه شده به وسیله روزن‌ران : (■) تک پیچه، (▨) دوپیچه همسوگرد و (□) ناهمسوگرد.



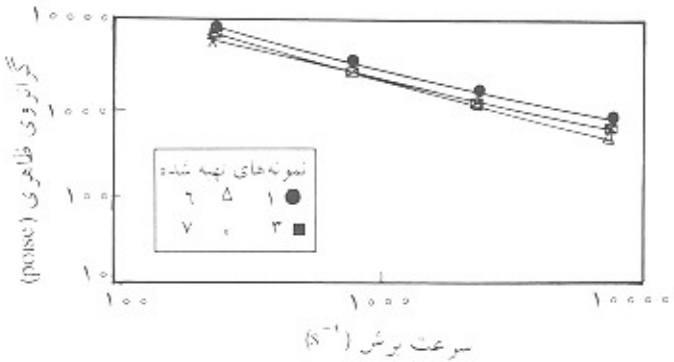
شکل ۵- نمودار تغییرات مدول یانگ نمونه‌های تهیه شده به وسیله روزن‌ران : (■) تک‌پیچه، (□) دوپیچه همسوگرد و (▨) ناهمسوگرد.



شکل ۶- نمودار تغییرات استحکام ضربه‌ای نمونه‌های دارای PP-g-MA تهیه شده به وسیله روزن‌ران : (■) تک‌پیچه و (□) دوپیچه ناهمسوگرد.



شکل ۷- نمودار تغییرات گرانروی ظاهری برحسب سرعت برش برای نمونه‌های مختلف تهیه شده به وسیله روزن‌ران تک پیچه.



شکل ۸- نمودار تغییرات گرانروی ظاهری برحسب سرعت برش برای نمونه‌های دارای PP-g-MA تهیه شده به وسیله روزن‌ران تک پیچه.

جدول ۷- گرانروی ذاتی نمونه‌های تهیه شده به وسیله روزن‌ران تک پیچه، دو پیچه همسوگرد و ناهمسوگرد.

خواص / شماره نمونه	گرانروی ذاتی (dL/g)			
	بدون روزن‌ران	تک پیچه	دوپیچه همسوگرد	دوپیچه ناهمسوگرد
۱	۰/۸۱	–	–	–
۲	–	۰/۷۴	۰/۶۹	۰/۶۸
۳	–	۰/۷۱	۰/۶۶	۰/۶۵
۴	–	۰/۷۰	۰/۶۱	۰/۵۸
۵	–	۰/۶۴	۰/۵۷	۰/۴۹
۸	–	۰/۷۷	۰/۷۵	۰/۷۲

$$\eta_{rel} = \frac{t_1}{t_2} \qquad (۳)$$

در این معادله t_1 و t_2 به ترتیب زمان سقوط محلول و حلال است. سپس با استفاده از معادله کوتا- سولمون (Ciuta-Solomon) و با روش اندازه‌گیری تک نقطه‌ای مقدار گرانروی ذاتی بدست می‌آید:

$$\eta_{in} = [2(\eta_{sp} - \mathrm{Ln}\ \eta_{rel})]^{1/2}/C \qquad (۴)$$

در این معادله η_{sp} گرانروی ویژه و C غلظت مولی است.

$$\eta_{sp} = \eta_{rel} - 1 \qquad (۵)$$

معادلات مختلفی برای تعیین وزن مولکولی ارائه شده است که اکثر آنها اشکال تصحیح شده معادله مارک هاونیک بوده که اصلی‌ترین معادله برای تعیین وزن مولکولی PET است و در آنها مقادیر ضرایب جایگزین شده و به شکل ساده‌تری درآمده‌اند. بنابراین، معادله برکوویتز (Berkowitz) شکل تصحیح شده معادله مارک هاونیک است و درصد خطای کمتری دارد، پس داریم:

$$[\eta] = ۷/۴۴ \times ۱۰^{-۴}\ M_w^{۰/۶۴۸} \qquad (۶)$$

جدول ۷ و ۸ گرانروی ذاتی و وزن مولکولی متوسط وزنی نمونه‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان طور که مشخص است وزن مولکولی متوسط وزنی و گرانروی ذاتی نمونه‌ها با افزایش درصد مواد ضایعاتی کاهش یافته است و موید تحلیل روند تغییرات آزمونهای مکانیکی و رئولوژیکی است که بر اساس کاهش وزن مولکولی متوسط نمونه‌هاست.

نتیجه‌گیری

با اضافه کردن مواد ضایعاتی به پلی‌استر نو، خواص بلورینگی پلی‌استر تغییر می‌کند و این تغییر به نحوی است که با اضافه شدن مواد ضایعاتی دمای بلورینگی (T_c) به سمت دماهای بالاتر انتقال می‌یابد و

جدول ۸- وزن مولکولی متوسط وزنی نمونه‌های تهیه شده به وسیله روزن‌ران تک پیچه، دو پیچه همسوگرد و ناهمسوگرد.

خواص / شماره نمونه	وزن مولکولی متوسط وزنی			
	بدون روزن‌ران	تک پیچه	دوپیچه همسوگرد	دوپیچه ناهمسوگرد
۱	۴۸۵۹۵	–	–	–
۲	–	۴۲۲۶۸	۳۷۹۴۳	۳۷۰۹۸
۳	–	۳۹۶۵۳	۳۵۴۲۷	۳۴۶۰۲
۴	–	۳۸۷۹۵	۳۱۳۷۲	۲۹۰۲۳
۵	–	۳۳۷۸۴	۲۸۲۵۴	۲۲۳۷۳
۸	–	۴۴۹۴۵	۴۳۱۵۴	۴۰۵۱۸

درصدبلورینگی با افزایش درصد این مواد افزایش می‌یابد. استحکام کششی،وزن مولکولی و شکست زنجیرهای پلیمری کاهش پیدا می‌کند، ولی مدول نمونه‌ها به علت افزایش درصد بلورینگی افزایش نشان می‌دهد.

رفتار رئولوژیکی نمونه‌ها با افزایش درصد مواد ضایعاتی به سمت رفتار نیوتنی نزدیک می‌شود. با افزایش ۵ و ۱۰ درصد پلی‌پروپیلن پیوند خورده با مالئیک انیدرید به نمونه دارای ۲۵ درصد مواد ضایعاتی استحکام ضربه‌ای به میزان زیادی (نسبت به نمونه فاقد PP-g-MA) افزایش می‌یابد.

مراجع

1. Sabourin D., Recycling Plastic III, Conference, 83, Washington DC, May 1998.

۲- آشنایی با پلیمرهای مهندسی، امور بررسی بازار- شرکت بازرگانی پتروشیمی (شبپ)، همایش پلیمرهای مهندسی، اسفند ۱۳۷۹.

۳- فاضلی فواد، بسته‌بندی خانواده پلی‌اتیلن ترفتالات، مجله صنایع پلاستیک، جلد ۱۱، شماره ٦، صفحه ۹۳-۴۰۲، مرداد ۱۳۷۵.

۴- ارومیه‌ای عبدالرسول، بازیافت ضایعات پلاستیکی، مجله شیمی و توسعه (۱)، شماره اول، صفحه ۸-۵٦، اردیبهشت ۷۹.

5. Gebaner M., "Polyethylene Terephthalate (PET)", *Kunststoffe*.; **85**, 10, 1995.

6. Groh M., Boun-Holzar, "Extrusion Blow Moulding of PET", *Kunststoffe*.; **82**, 39, 1992.

7. Allen N. S., Edye M. and Mohammadian M., "Physico Chemical Aspects of the Environmental Degradation of PET"; *Polym. Deg. Stab.*; **43**, 229-37, 1994.

8. Tran V. H., Guyot A., Nguyan T. P., and Moline P., "Thermal Degradation Studies of Terephthalate Polyesters"; *Polym. Deg. Stab.*; **49**, 331-447, 1995.

۹- غیاثی رضا، بازیابی پلاستیک‌های پرمصرف، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه شریف، پروژه کارشناسی ارشد، صفحه ۹-۳٦، تابستان ۱۳۷٦.

10. Kaminsky W., " Chemical Recycling of Mixed Plastics by Pyrolysis": *Adv. Polym. Tech.*; **14**, 4, 337, 1995.

11. Shroff R. N., "Single Point Determinatin of Intrinsic Viscosity", *J. Appl. Polym. Sci.*; **9**, 1547, 1963.

12. Lin C. C., "The Rate of Crystallization of PET by Differential Scanning Calorimetry", *Polym. Eng. Sci.*; **23**, 113-6, 1983.

13. Fann D. M., Huang S. K. and Yih lee J., "Kinetics and Thermal Crystallinity of Recycled PET (II)", *J. Appl. Polym. Sci.*; **61**, 261-71, 1996.

14. La Mantia F. P. and Vinci M.; *Thermoplastic Polyesters (PET) in Handbook of Plastic Materials and Technology*; Rabin I.I (Ed.), John Wiley, New York, 1990.

15. Oromiehie A. R. and Mamezadeh A., "Recycling Polyethyelne Terephthalate (PET)", Proceeding of the Fifth Seminar on Iran Polymer Science and Technology, Tehran I. R. Iran, 308-11, 12-14 September 2000.

16. Zimmer Mann H. and Kolbig C., "Faser Forsch", *Textil. Tech.*; **18**, 536, 1967.