

# بازگردانی ضایعات پلی اتیلن ترفتالات (نوع بطری)

Archive of SID

## و بررسی خواص بلورینگی، مکانیکی و رئولوژیکی آن

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

علیرضا مسمی زاده کفالت، عبدالرسول ارومیه‌ای\*، اسماعیل قاسمی

تهران، پژوهشگاه پلیمر ایران، صندوق پستی ۱۴۹۶۵/۱۱۵

دریافت: ۱۳۸۰/۷/۱۷، پذیرش: ۱۳۸۰/۱۰/۲۹

### چکیده

کاربرد مواد پلاستیکی در سته‌بندی 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 نوساختی و اقتصادی را به بار آورده است. ضایعات PET که از سته‌بندی مواد و بطریهای نوشانه 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 نکت پلیمر اصلاح کننده در مخلوط بررسی شده است. بدین ترتیب که ابتدا بطریها و قطعات پتین شکل گرفته PET جمع آوری، آسیاب، شستو و خشک شده است. پس از تهیه‌سازی شرایط فراورش نمونه‌ها با استفاده از سه دستگاه روزن‌ران تک پیچه، دو پیچه 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 حرم مولکولی متوسط و گرانشی افزایش پیدا می‌کند.

واژه‌های کلیدی: پلی استر، ضایعات، بازگردانی، خواص مکانیکی و رئولوژیکی، بلورینگی

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

### مقدمه

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 پلی استر در زندگی روزمره و صنعت از یک طرف و روند افزایشی تولید آن از طرف

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

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

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

| مواد | پلی استر (V-PET) (%) | پلی استر 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    | ۱۰۰                  | -                            | -           |

نمونه ۸ پلی استر نو فراورش شده است.

دیگر بازیافت این مواد همیشه مورد نظر کارشناسان و محققان صنعت بوده است. به عنوان نمونه تا سال ۱۳۸۲ تولید پلی استر در مرحله اول و دوم زاد 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 مسلماً بر مصرف و در نتیجه بر ضایعات این مواد در ایران خواهد افزود [۲]. آمارهای جهانی نشان می‌دهد که مصرف سرانه پلی استر نوع بطری در جهان حدود ۰/۶ kg در کشورهای صنعتی حدود ۴-۲/۴ و در ایران حدود ۰/۳ kg است که قدر مسلم پس از رانداندازی واحدهای تولیدی پلی استر در کشور بر این مقدار افزوده خواهد شد [۲]. مصرف عمده پلی استر 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 پلی استر 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 روزن‌رانی و دانه‌سازی است. در طی این عملیات که مسلم 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 دوز 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 پلی پروپیلن پیوند خورده با مالئیک انیدرید (PP-g-MA) در یک ترکیب درصد خاص آلیاژسازی شده و در هر دو روش خواص بلورینگی، مکانیکی و رئولوژیکی بررسی شده است.

## Archive of SID

### تجربی

#### مواد

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

#### دستگاهها

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

روزن‌ران تک پیچه با نام تجاری Haase Rheometer System ۹۰ ساخت کشور آلمان با نسبت طول به قطر برابر ۲۴ و قطر ۱۹mm. روزن‌ران دویچه با همسوگرد ساخت شرکت کولین نوع ۰۰۵۵۰۰ از کشور آلمان با نسبت طول به قطر ۱۵ و قطر ۵mm. که پیچهای این روزن‌ران به اجزای مخصوص اختلاط مجهز است. روزن‌ران دویچه همسوگرد ساخت شرکت کولین نوع ۰۰۵۵۰۰ از کشور آلمان با نسبت طول به قطر ۲۴ و قطر ۵mm که فایده اجزای مخصوص اختلاط است.

دستگاههای آزمون مکانیکی: آزمایشهای کششی روی نمونه‌ها بر صن استاندارد ASTM D۹۳۶ به کمک دستگاه کشش ساخت شرکت ایسترون مدل ۶۰۲۵ انجام شد و آزمایش ضربه بر اساس استاندارد ASTM D۲۵۶ به وسیله دستگاه ضربه ساخت شرکت زوئیکت مدل ۰۰/۱۰۰/۲/۵۱ انجام گرفت.

آزمایشهای تجزیه گرمایی و بلورینگی به وسیله دستگاه DSC ساخت شرکت پیمیرلاب مدل DSC-PL-STA-۷۸۰ انجام گرفت. برای بررسی خواص رئولوژیکی از دو دستگاه رئومتر بویین ساخت شرکت ایسترون مدل ۳۲۱۱ و گرانروی سح آبلهوه استفاده شد.

جدول ۲ - شرایط فرایند روزنرانی.

| نواحی دما (°C) |      |       |     |     |     | دور دستگاه<br>(rpm) | نوع روزنران       |
|----------------|------|-------|-----|-----|-----|---------------------|-------------------|
| ششم            | پنجم | چهارم | سوم | دوم | اول |                     |                   |
| -              | -    | ۲۴۵   | ۲۵۸ | ۲۷۰ | ۲۶۰ | ۷۰                  | تک پیچه           |
| ۲۴۱            | ۲۴۵  | ۲۴۸   | ۲۶۰ | ۲۸۵ | ۲۷۵ | ۵۰                  | دو پیچه همسوگرد   |
| ۲۴۰            | ۲۵۰  | ۲۵۰   | ۲۴۵ | ۲۴۵ | ۲۴۰ | ۷۰                  | دو پیچه ناهمسوگرد |

Archive of SID

### نتایج و بحث

#### بررسی رفتار گرمایی و بلورینگی

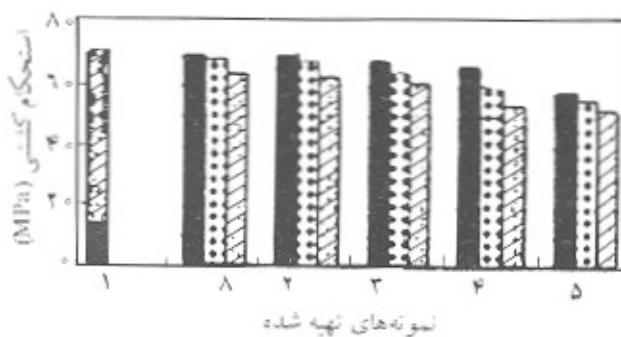
شکل ۱ گرمانگاشتهای DSC را برای نمونه‌های تهیه شده با روزنران تک پیچه نشان می‌دهد. ابتدا نمونه تا  $270^{\circ}\text{C}$  گرم شده و بعد از ۵min به آهستگی سرد می‌شود. مراحل گرم و سرد کردن منجر به ایجاد دو پیک گرم‌گیر و گرماده در این گرمانگاشتهای می‌شود که به ترتیب سین پدیده ذوب و بلورینگی نمونه است.

مشخصه‌های دمای ذوب ( $T_m$ )، دمای بلورینگی ( $T_c$ )، سطح زیر منحنی ذوب و بلورینگی ( $\Delta H_m, \Delta H_c$ ) 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  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  از دمای محیط تا دمای  $280^{\circ}\text{C}$  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 پایین 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 روزنران: (■) تک پیچه، (□) دو پیچه همسوگرد و (○) ناهمسوگرد.

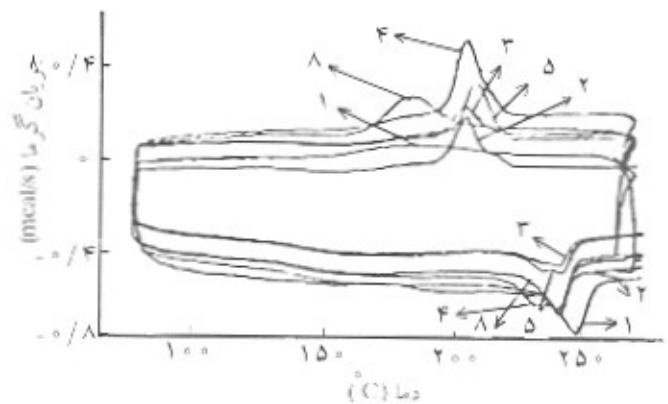
دستگاه فالنگیری تزریقی جهت تهیه نمونه‌ها برای آزمون کشش و ضربه که ساخت شرکت ایس ماشین به ظرفیت ۱۲۵ بوده است.

#### روشها

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

همه این نمونه‌ها به وسیله سه روزنران تک پیچه، دو پیچه همسوگرد و ناهمسوگرد مطابق شرایط فرایند روزنرانی 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  $110^{\circ}\text{C}$  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 پلی استر نو و فراورش شده (R-PET)، یک نمونه از پلی استر خالص فراورش نشده (V-PET) نیز با شرایط یاد شده فراورش شد.



شکل ۱ - گرمانگاشتهای DSC برای نمونه‌های تهیه شده به وسیله روزنران تک پیچه.

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

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

Archive of SID

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 سرد کردن (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 ( $230^{\circ}\text{C}$  -  $150^{\circ}\text{C}$ ) 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

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

$$\%X = (\Delta H_f - \Delta H_c) / \Delta H^*_f(\text{PET}) \quad (1)$$

که در آن X درصد بلورینگی،  $\Delta H_f$  آنتالپی مذاب،  $\Delta H_c$  آنتالپی بلورینگی،  $\Delta H^*_f(\text{PET})$  آنتالپی استاندارد که مطابق استاندارد ASTM D ۳۴۱۸ برابر  $32/5 \text{ cal/g}$  یا  $45 \text{ J/g}$  است و x کسر وزنی مواد که برای صددرصد بلورینگی PET برابر عدد یک است.

$$X = \frac{\Delta H_f - \Delta H_c}{\Delta H^*_f} \times 100 \quad (2)$$

همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، مقدار درصد بلورینگی و دمای تبلور برای نمونه‌های تهیه شده در روزن‌ران تک پیچه افزایش می‌یابد. در مورد این دو مشخصه باید این مطلب را در نظر داشت که تبلور پلی‌استر آهسته صورت می‌گیرد [۱۳]. پس برای تشکیل و رشد بلورها در هنگام سرد کردن مذاب باید فرصت کافی به این ماده داده شود و اگر ماده به سرعت سرد شود درصد بلورینگی در آن کم خواهد بود. از

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

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

جدول ۵ - خواص گرمایی و بلورینگی نمونه‌های تهیه شده به وسیله روزن‌ران دویچه ناهسوگرو.

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

Archive of SID

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 تک پیچه در یک سرعت برش ثابت از بقیه روشها کمتر است و در روزن‌ران دویچه ناهسوگرو 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 پلی پروپیلن 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 ( $\eta_{rel}$ ) بدست آمد:

ضربه‌ای نمونه‌ها را در مقابل 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 جدول نمونه‌ها (شکل ۵) افزایش می‌یابد که این تغییر به افزایش درصد بلورینگی در نمونه‌ها برمی‌گردد که درباره علت افزایش بلورینگی در قسمت قبل توضیح داده شد. روند تضعیف خواص در روزن‌ران دویچه ناهسوگرو به علت داشتن اجزای مخصوص اختلاط و در نتیجه اعمال تنش بیشتر و کاهش زیادتر وزن مولکولی است.

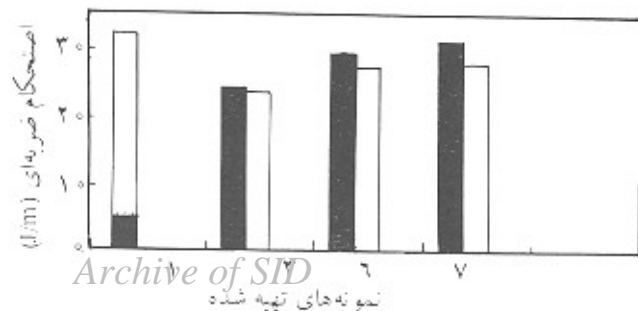
در شکل ۶ نمودار تغییرات استحکام ضربه‌ای نمونه‌های دارای PP-g-MA نشان داده شده است که در این حالت یک روند افزایشی مشاهده می‌شود. این امر با توجه به سازگاری نسبتاً خوب PP-g-MA با پلی استر و تغییر شکل‌شناسی سیستم به حالت پراکنده می‌تواند قابل توجیه باشد.

#### خواص رئولوژیکی

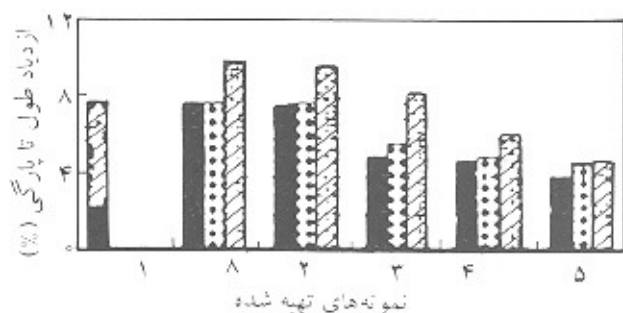
منحنی جریان برای نمونه‌های مختلف به کمک رئومتر لوله موین در دمای  $255^{\circ}\text{C}$  تهیه گردید که یک نمونه آن برای روزن‌ران تک پیچه در شکل ۷ آورده شده است. همان‌طور که از شکل مشخص است، تمام نمونه‌ها دارای رفتار شبه پلاستیکی بوده و از قانون توانی پیروی می‌کنند. در بررسی رفتار رئولوژیکی پلی استرها مشاهده شده است که

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

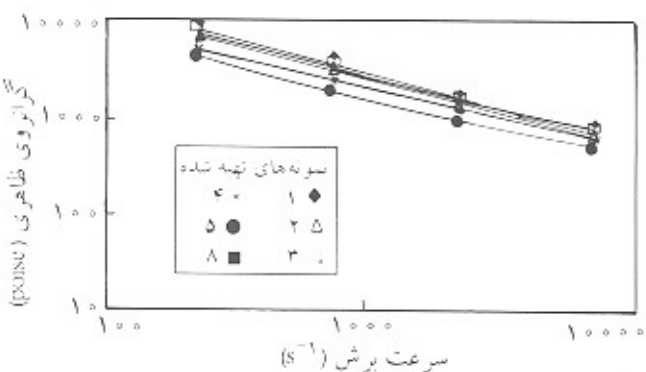
| درصد بلورینگی | $\Delta H_c$ (J/g) | $T_c$ (°C) | $\Delta H_m$ (J/g) | $T_m$ (°C) | خواص شماره نمونه |
|---------------|--------------------|------------|--------------------|------------|------------------|
| ۱۷            | -۸/۳۱              | ۱۸۷/۵۶     | ۱۶/۲۶              | ۲۴۸/۰۴     | ۱   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



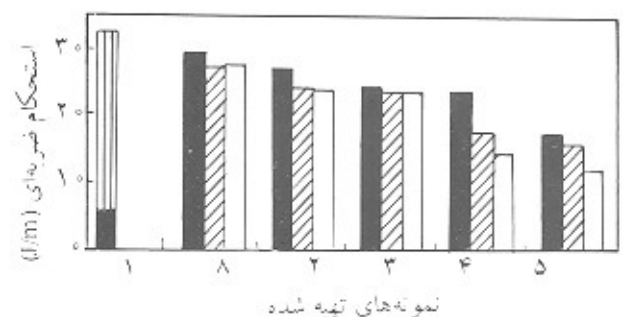
شکل ۶- نمودار تغییرات استحکام ضربه‌ای نمونه‌های دارای PP-g-MA تهیه شده به وسیله روزن‌ران (■) تک پیچه و (□) دو پیچه ناهموگرد.



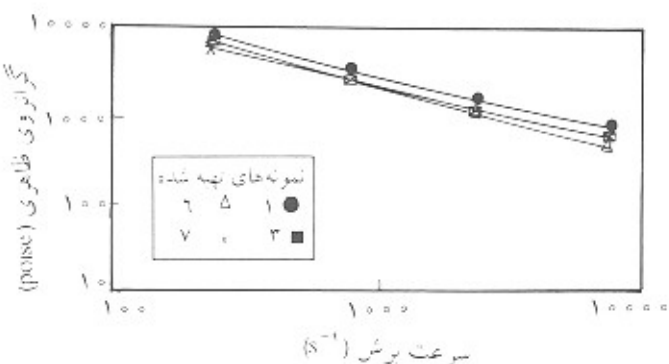
شکل ۳- نمودار تغییرات ازدیاد طول تا پارگی نمونه‌های تهیه شده به وسیله روزن‌ران (■) تک پیچه، (▨) دو پیچه همسوگرد و (□) ناهموگرد.



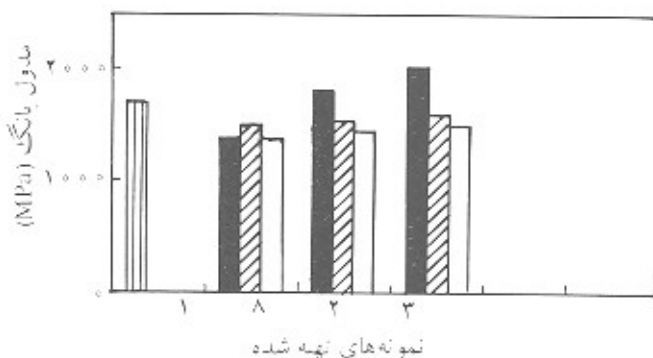
شکل ۷- نمودار تغییرات گرانروی ظاهری بر حسب سرعت برش برای نمونه‌های مختلف تهیه شده به وسیله روزن‌ران تک پیچه.



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



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



شکل ۵- نمودار تغییرات مدول بانگ نمونه‌های تهیه شده به وسیله روزن‌ران (■) تک پیچه، (□) دو پیچه همسوگرد و (▨) ناهموگرد.

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

| گرانروی ذاتی (dl/g) |         |                 |                   | خواص |
|---------------------|---------|-----------------|-------------------|------|
| بدون روزن‌ران       | تک بیچه | دو بیچه همسوگرد | دو بیچه ناهمسوگرد |      |
| ۰/۸۱                | -       | -               | -                 | ۱    |
| -                   | ۰/۷۴    | ۰/۶۹            | ۰/۶۸              | ۲    |
| -                   | ۰/۷۱    | ۰/۶۶            | ۰/۶۵              | ۳    |
| -                   | ۰/۷۰    | ۰/۶۱            | ۰/۵۸              | ۴    |
| -                   | ۰/۶۴    | ۰/۵۷            | ۰/۴۹              | ۵    |
| -                   | ۰/۷۷    | ۰/۷۵            | ۰/۷۲              | ۸    |

Archive of SID

خطای کمتری دارد، پس داریم:

$$\eta_{rel} = \frac{\eta_1}{\eta_2} \quad (3)$$

$$|\eta| = 7/44 \times 10^{-4} M_w^{0/648} \quad (6)$$

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.

در این معادله ۱ و ۲ به ترتیب زمان سقوط محلول و حلال است. سپس با استفاده از معادله کوتا- سولمون (Cuta-Solomon) و با روش اندازه‌گیری تک نقطه‌ای مقدار گرانروی ذاتی بدست می‌آید:

$$\eta_{in} = [2(\eta_{sp} - L\eta_{rel})]^{1/2}/C \quad (4)$$

در این معادله  $\eta_{sp}$  گرانروی ویژه و C غلظت مولی است.

$$\eta_{sp} = \eta_{rel} - 1 \quad (5)$$

### 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

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 PBT است و در آنها نقادیر ضرایب جایگزین شده و به شکل ساده‌تری درآمده‌اند. بنابراین، معادله برکوویتز (Berkowitz) شکل تصحیح شده معادله مارک هاونیک است و درصد

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

| وزن مولکولی متوسط وزنی |         |                 |                   | خواص |
|------------------------|---------|-----------------|-------------------|------|
| بدون روزن‌ران          | تک بیچه | دو بیچه همسوگرد | دو بیچه ناهمسوگرد |      |
| ۴۸۵۹۵                  | -       | -               | -                 | ۱    |
| -                      | ۴۲۲۶۸   | ۳۷۹۴۳           | ۳۷۰۹۸             | ۲    |
| -                      | ۳۹۶۵۳   | ۳۵۴۲۷           | ۳۴۶۰۲             | ۳    |
| -                      | ۳۸۷۹۵   | ۳۱۳۷۲           | ۲۹۰۲۳             | ۴    |
| -                      | ۳۳۷۸۴   | ۲۸۲۵۴           | ۲۲۳۷۳             | ۵    |
| -                      | ۴۴۹۴۵   | ۴۳۱۵۴           | ۴۰۵۱۸             | ۸    |

PET"; *Polym. Deg. Stab.*; **43**, 229-37, 1994.

8. Tran V. H., Guyot A., Nguyen 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 ۹-۳۶، تابستان ۱۳۷۶.

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 Polyethylene 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.

درصد بلورینگی 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 (شپ)، همایش پلیمرهای مهندسی، اسفند ۱۳۷۹.

۳- فاضلی فواد، بسته‌بندی خانواده پلی‌اتیلن ترفتالات، مجله صنایع پلاستیک، جلد ۱۱، شماره ۶، صفحه ۹۳-۱۰۲، مرداد ۱۳۷۵.

۴- ارومیه‌ای عبدالرسول، بازیافت ضایعات پلاستیکی، مجله شیمی و توسعه (۱)، شماره اول، صفحه ۸-۵۶، 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., Edey M. and Mohammadian M., "Physico Chemical Aspects of the Environmental Degradation of