

بررسی و بهبود خواص ضایعات پلی اتیلنی

Investigation in the Property Improvements of PE Solid Wastes

جلیل مرشدیان - مینا جلیلی مقدم
مرکز تحقیقات و توسعه علوم و تکنولوژی مواد پلیمری

واژه‌های کلیدی:

ضایعات پلی اتیلنی، خواص مکانیکی، پرکننده، آلیاژ، ضد اکسند

چکیده

در میان ضایعات پلاستیکی، پلی اتیلن سهم مهمی را در کشور ما داراست که در برخی موارد توسط صنایع داخلی برای تولیداتی با کیفیت نامرغوب مورد استفاده قرار می‌گیرد. در کار حاضر ابتدا بررسی از خواص مواد آسپایی حاصل از محصولات پلی اتیلنی مستعمل در مقایسه با مواد نو بررسی شده است. سپس تغییرات خواص مکانیکی این ضایعات در اثر امتزاج با تعدادی از پرکننده‌ها، پلیمرهای نو و دو نوع ضد اکسند انتخابی به‌طور جداگانه مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج به‌دست آمده حاکی از تخریب شدید این مواد و ضعف قابل ملاحظه خواص مکانیکی و مقاومت گرمایی آنها نسبت به مواد نو می‌باشد که در اثر فراروش مجدد این تخریب فتاب بیشتری می‌گیرد. خواص مکانیکی با افزایش پرکننده‌هایی نظیر سیلیس، تالک و میکا از یک طرف و آلیاژسازی با پلیمرهایی چون پلی اتیلن سنگین و لاستیک اتیلن-پروپیلن از طرف دیگر، به‌طور قابل ملاحظه‌ای تقویت می‌شود. با اضافه کردن ضد اکسند نوع اول پایداری دراز مدت در برابر تخریب به دست آمده و از تضعیف خواص پس از فرایند شکل‌دهی جلوگیری شده است. در اضماین عمل، زمان القای اکسایش به بیش از ۲۰ برابر مقدار اولیه افزایش پیدا می‌کند. خواص مکانیکی ایجاد شده و میزان پایداری به دست آمده در مواردی از مقادیر مشابه مربوط به پلیمر نو پیشی می‌گیرد.

مقدمه

در کشور ما ضایعات پلی اتیلنی حجم بالایی از پلاستیک‌های مصرف شده را به خود اختصاص داده‌اند. این ضایعات به‌طور عمده از دو بخش کشاورزی (فیلم‌های کشاورزی) و زباله‌های شهری سرچشمه می‌گیرند. اخیراً بازیابی و باز فراروش این ضایعات در سطح کشور توسعه چشمگیری یافته و واحدهای کوچک و بزرگی اقدام به جمع‌آوری و استفاده مجدد از این ضایعات در ساخت کالاهایی چون ظروف بادی و تزریقی، لوله و کیسه کرده‌اند. این تولیدات به دلیل برخورداری از مواد اولیه بازیابی شده از میان زباله‌های شهری و آلودگی‌هایی که به آسانی قابل برطرف کردن نمی‌باشند، از نظر بهداشتی مورد تأیید نیستند و از طرف دیگر در مقایسه با محصولات پلیمری نو استحکام کافی ندارند. عوامل مختلفی در پایین بودن استحکام ضایعات پلی اتیلنی مؤثرند. فرسودگی و تخریب پلی اتیلن بر اثر عوامل محیطی کاربرد مانند نور و گرما کم‌کم به کاهش استحکام، از دست دادن شفافیت و شکنندگی آن

می‌انجامند. علاوه بر این مشخصات وزن مولکولی، شکل‌شناسی و جرم مخصوص پلی اتیلن بر اثر عوامل فوق دچار تغییر می‌شوند. تخریب درشت مولکول‌ها، شکسته شدن، شبکه‌ای شدن یا ورود اکسیژن به ساختار آنها را در پی دارد. این دگرگونی‌ها باعث کاهش نظم در زنجیرها شده، بلورینگی و در پی آن نقطه ذوب را کاهش می‌دهند [1]. با ورود اکسیژن به ساختار پلی اتیلن جرم مخصوص آن نیز افزایش می‌یابد [2]. جذب ناخالصیهایی غیر پلیمری به‌هنگام مصرف و باقی ماندن آنها پس از بازیابی، نه تنها موجب تشدید واکنشهای تخریب پلی اتیلن طی باز فراروش می‌شود بلکه استحکام کششی و ازدیاد طول تا پارگی را به شدت کاهش می‌دهد [3,4]. عامل مهم دیگر بقایای رطوبت ناشی از سستشوی ضایعات آغشته به گردو خاک و ناخالصیهاست که علاوه بر تخریب پلیمر در مرحله فراروش سبب بروز حباب، جمع شدگی پیش‌بینی نشده، تنشهای داخلی و خطر شکست و نیز کاهش مقاومت ضربه‌ای، خواص عایقی و صافی سطح در قطعه تولید شده می‌گردد. استفاده از خشک‌کنهای مناسب جهت تقلیل رطوبت به حد متعادل و مطلوب، ضرورت دارد [5].

بدین ترتیب ضایعات پلی اتیلنی پیش گفته با ضایعات حاصل از تولید فرآورده‌های پلی اتیلنی در حین فراروش، که استفاده مجدد از آنها بسیار رایج است، تفاوت زیادی دارند، زیرا همان‌طور که اشاره شد ضایعات مزبور محصولات مصرف شده‌ای می‌باشند که علاوه بر کاهش استحکام آنها در جریان مصرف به دلایل یاد شده، چه بسا بسیاری از افزودنیهای خود را از دست داده و میکروپها و آلودگیهای گوناگونی را جذب کرده باشند که معمولاً بوی نامطبوعی را در آنها ایجاد می‌کنند. امکان استفاده مجدد از این ضایعات در مصارف بهداشتی و کالاهای لوکس و درجه یک بعید به نظر می‌رسد. اخیراً امکان استفاده از این قبیل ضایعات در لایه‌های داخلی ظروف چند لایه که به طریق کو اکستروژن (co-extrusion) ساخته می‌شوند [6]، یا کاربرد آنها به‌جای چوب و فلز در ساخت صفحات پهن (pallet)، لوله‌ها و پروفیل‌های مورد

Key Words: polyethylene wastes, mechanical properties, filler, blend, antioxidant

استفاده در ساخت قفسه‌ها و نیجکها و غیره [7] مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته است.

پژوهش حاضر با هدف بهبود خواص ضایعات پلی اتیلنی آسیاب شده که از جمع‌آوری ظروف بادی در زباله‌های شهری تهیه می‌شوند آغاز شده است. ابتدا موقعیت این ضایعات از نظر خواص فیزیکی و شیمیایی در مقایسه با پلی اتیلن نو با درجه‌ای مشابه مورد بررسی قرار گرفته است. سپس راه‌های مختلفی برای بهبود خواص در پیش گرفته شده که هر یک به‌طور جداگانه آزمایش شده‌اند. سه مسیر اصلی در این پژوهش عبارت‌اند از: افزودن پرکننده‌های معدنی و آلی با ترکیبات شیمیایی متفاوت نظیر سیلیس، میکا، تالک، کلسیم کربنات، کاتولن و پودر چوب به ضایعات پلی اتیلنی؛ آلیاژ کردن این ضایعات با پلیمرهای نو همچون پلی اتیلن سبک (LDPE)، پلی اتیلن سنگین (HDPE)، پلی پروپیلن (PP) و لاستیک اتیلن پروپیلن (EPDM) و سرانجام افزودن ضد اکسنده‌های انتخابی. در هر یک از مسیرهای فوق، میزان بهبود خواص مکانیکی شامل استحکام کششی، مقاومت در برابر ضربه و ازدیاد طول تا تسلیم بررسی شده است. در ضمن اثر فرایند اختلاط ضایعات پلی اتیلنی با پرکننده‌ها در بهبود خواص و اثر ضد اکسنده‌ها در بالا بردن مقاومت گرمایی این ضایعات نیز از موارد مهم مطالعات انجام شده می‌باشند.

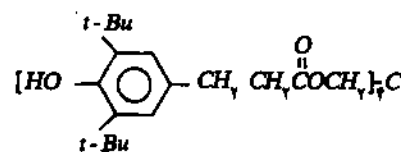
تجربی
مواد

موادی که برای انجام آزمایشها به کار رفته‌اند عبارت‌اند از: ضایعات پلی اتیلن سنگین آسیاب شده حاوی درصد نامشخصی از ناخالصیهای پلیمری و غیرپلیمری که از کارخانه صانع مشهد در اختیار قرار گرفت و پلیمرهای نو شامل پلی اتیلن سنگین و سبک و پلی پروپیلن از درجه فیلم.

— پرکننده‌ها به غیر از سیلیس از نوع ولکاسیل - اس، سایر (Valcasil-S, Bayer) و بقیه شامل میکا با ذرات ۲۰۰ مش، پودر چوب با ذرات ۱۰۰ مش، تالک، کاتولن و کلسیم کربنات همگی از منابع داخلی تأمین شدند.

— ضد اکسنده‌های انتخاب شده از نوع اول و دوم به ترتیب با نامهای تجاری ایرگانوکس ۱۰۱۰ و ایرگانوکس ۱۶۸، سیبا - گایکی (Irganox 1010, Irgafos 168, Ciba-Geigy) با مساعدت نمایندگی شرکت سازنده تهیه شدند. فرمول شیمیایی این دو ماده عبارت است از:

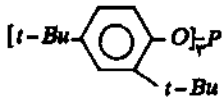
ایرگانوکس ۱۰۱۰



تتراکیس [متیلن - ۳ (۳ و ۵ - دی - ترشیو بوتیل فنیل) پروپیونات] متان
هیدروکسی فنیل) پروپیونات] متان

Tetraakis [methylene - 3 (3,5 - di - t - butyl - 4 - hydroxyphenyl) propionate] methane

ایرگانوکس ۱۶۸



تریس (۲ و ۴ - دی - ترشیو بوتیل فنیل) فسفیت

Tris (2, 4 - di - t - butylphenyl) phosphite

اختلاط و تهیه نمونه

اختلاط و آمیزه‌سازی توسط یک اکسترودر تک مارپیچ آزمایشگاهی (Brabender Plasticorder) انجام گرفت. دما در سه ناحیه تغذیه، انتقال، سنجش (metering) و حدیده به ترتیب ۱۶۰، ۱۸۰، ۲۰۰ و ۲۱۰ °C و سرعت مارپیچ ۲۰ دور بر دقیقه بود. در روش دیگر آمیزه‌سازی در یک آسیاب غلتکی آزمایشگاهی (Schwabenthan Lab. Rollmill) با دمای حدود ۱۶۰ °C و سرعت ۱۵ دور بر دقیقه انجام گرفت.

برای تهیه نمونه‌ها جهت آزمونهای مکانیکی، ابتدا آمیزه‌ها در یک پلاستیک خردکن (Weiser Granulator) به اندازه تقریبی دانه درآمدند. سپس توسط یک پرس آزمایشگاهی (Davenport 25 Ton Press) تحت فشار ۱۰۰ بار به شکل ورق قالبگیری شدند. دمای قالبگیری برای نمونه‌های حاوی پرکننده و پلی پروپیلن به ترتیب ۱۷۰ و ۱۸۰ °C و برای سایر نمونه‌ها ۱۶۰ °C بود. روش کار چنین بود که ابتدا مواد حدود ۴ دقیقه در قالب پیش گرم می‌شدند و سپس حدود ۴ دقیقه در همان دما زیر فشار قرار می‌گرفتند. پس از آن قالب توسط گردش آب سرد در داخل صفحات پرس، زیر همان فشار تا دمای محیط خنک می‌شد و دست کم ۲۰ ساعت پس از قالبگیری آزمونهای لازم بر روی نمونه‌ها انجام می‌گرفت.

آزمونها

آزمون کششی توسط دستگاه اینسترون (Instron 6025) با واحد بارگذاری (Load Cell) به ظرفیت ۱۰ کیلو نیوتن انجام گرفت. برای این آزمونها نمونه‌های دمبل شکل مطابق با استاندارد ASTM D638-MI از ورقهای قالبگیری شده با ضخامت ۱/۶ میلیمتر بریده شدند. طول اندازه‌نمای (gauge length) نمونه و فاصله بین دو فک دستگاه برابر ۶۰ میلیمتر در نظر گرفته شد و سرعت کشش نمونه‌ها در ۵۰ میلیمتر بر دقیقه تنظیم گردید. خواص کششی گزارش شده میانگین دست کم سه اندازه‌گیری در نقطه تسلیم است.

آزمون ضربه توسط دستگاه زوئیک (Zwick 5102) با حداکثر انرژی ۴ ژول و به روش ایزود (Izod) انجام گرفت. برای این آزمونها، ابتدا ورقهایی به ضخامت ۳/۲ میلیمتر توسط قالبگیری فشاری تهیه و

نمونه‌هایی با ابعاد $10 \text{ mm} \times 6.35 \text{ mm}$ از آنها بریده شدند. سپس شیاری با عمق $2/5$ میلیمتر و شعاعی مطابق با استاندارد *ASTM D257* در هر یک از نمونه‌ها ایجاد شد. نتایج گزارش شده میانگین مقاومت در برابر ضربه پنج اندازه‌گیری است.

اندازه‌گیری خواص رئولوژیکی توسط دستگاه رثومتر موین، اینسترون ۳۲۱۱ ($L/D=40$) در 190°C انجام گرفت. شاخص جریان مذاب یا دستگاه داونتست (*Daventest*) در 190°C زیر نیروی $2/16$ کیلوگرمی و مطابق با استاندارد *ASTM D1238* اندازه‌گیری شد. جرم مخصوص به روش *ASTM D1505* و در ستونی از آب/اتانول تعیین گردید. طیف‌سنجی زیر قرمز با یک دستگاه *IR (Phillips PU9712)* روی نمونه‌های فیلم شده و تجزیه گرمایی با دستگاه *STA-780* انجام گرفتند. تصاویر میکروسکوپی الکترونی توسط دستگاه کمبریج (*Cambridge S360*) تهیه شدند.

شکل ۱ - گرانروی ظاهری بر حسب سرعت برسی ظاهری برای HDPE و ضایعات پلی‌اتیلنی

نقاط ذوب ضایعات پلی‌اتیلنی و HDPE از منحنی گرماسنجی پورشی دیفرانسیلی، *DSC (differential scanning calorimetry)* آنها در شکل ۲ استخراج شده است. در این شکل به وضوح مشاهده می‌شود که ضایعات پلی‌اتیلنی مقاومت گرمایی کمتری نسبت به پلی‌اتیلن سنگین دارد و نقطه ذوب آن نیز پایینتر است. این تفاوتها می‌تواند به دلیل وجود اجزای تخریب شده در ساختار مولکولی ضایعات باشد. این اجزا که غالباً اکسیژن دربردارند، علاوه بر کاستن نظم شبکه بلوری پلی‌اتیلن، که به شکل کاهش نقطه ذوب بروز می‌کند، باعث بالا رفتن جرم مخصوص نیز می‌شوند. همان‌گونه که اندازه‌گیری جرم مخصوص نشان می‌دهد (جدول ۱)، این ضایعات نسبت به پلی‌اتیلن سنگین جرم مخصوص بالاتری دارند. گرچه بالا بودن جرم مخصوص ممکن است به دلیل حضور ناخالصیهای غیرپلیمری باشد، ولی وجود اجزای اکسیژن‌دار در ساختار مولکولی ضایعات موردنظر در طیف *IR* آنها به خوبی آشکار می‌شود. شکل ۳ طیف *IR* پلی‌اتیلن سنگین و ضایعات پلی‌اتیلنی مورد بررسی را در شرایط مختلفی از نظر تاریخچه گرمایی نشان می‌دهد. در چهار طیف ج تا و این شکل که مربوط به ضایعات موردنظرند، در ناحیه 1720 تا 1750 بر سانتیمتر جذب مربوط به گروههای کربونیل مشاهده می‌شود. علاوه بر این، افزایش میزان پیوندهای سیر نشده در جذب ناحیه 800 تا 1300 بر سانتیمتر به خوبی آشکار است.

طیف *IR*، منحنی *DSC* و اندازه‌گیری جرم مخصوص در مجموع مؤید تخریب ضایعات پلی‌اتیلنی از راه اکسایش می‌باشند. اما چنان که طیف *IR* نیز نشان می‌دهد، میزان اکسایش به شرایط فرآوری و تاریخچه گرمایی بستگی دارد. برای مثال ضایعات پلی‌اتیلنی که فرآوری آنها در شرایط اکستروژن غیر آزمایشگاهی صورت گرفته است (شکل ۳- و)،

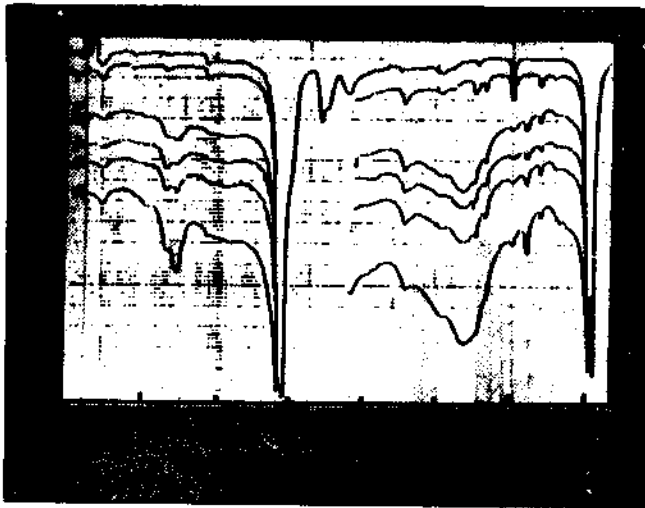
نتایج و بحث

بررسی خواص فیزیکی و شیمیایی ضایعات پلی‌اتیلنی

برای بررسی خواص ضایعات آسیایی مورد نظر، همگن کردن آنها توسط آسیاب غلتکی یا اکسترودر ضروری است زیرا اثرات موجود در هر نمونه ممکن است از نظر جرم مخصوص، شاخص جریان مذاب و نقطه ذوب اندک تفاوتی داشته باشند. در جدول ۱ خواص ضایعات پلی‌اتیلنی غلتک شده در مقایسه با پلی‌اولفینهای نوآمده است. همان‌گونه که ارقام این جدول نشان می‌دهد، ضایعات پلی‌اتیلنی مورد بررسی نسبت به پلی‌اتیلن سنگین از شاخص جریان مذاب بالاتری برخوردار است. همین نتیجه در اندازه‌گیری گرانروی توسط رثومتر موین به دست آمده است. همان‌طور که شکل ۱ نشان می‌دهد ضایعات پلی‌اتیلنی گرانروی ظاهری کمتری دارند و همچنین گرانروی این ضایعات قبل و بعد از غلتک کردن تغییر محسوسی نشان نمی‌دهد.

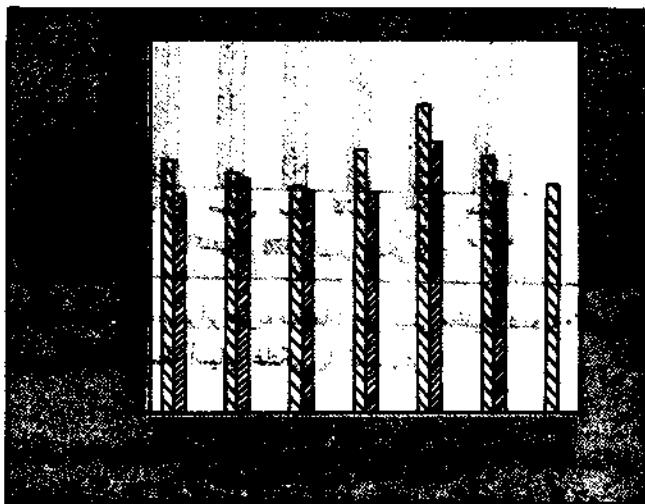
جدول ۱ - خواص ضایعات پلی‌اتیلنی و سایر پلی‌اولفینها

پلیمر	شاخص جریان مذاب ($g/10 \text{ min}$)	جرم مخصوص (g/cm^3)	نقطه ذوب ($^\circ\text{C}$)	مقاومت حرارتی هربره (KJ/m^2)	استحکام کششی (N/mm^2)	زده‌د طول تا تسلیم (mm)	زده‌د طول تا پارگی (mm)
پلی‌اتیلن سنگین	1.5	0.96	130	12	20	10	15
پلی‌اتیلن سنگین	1.5	0.96	130	12	20	10	15
پلی‌اتیلن سنگین	1.5	0.96	130	12	20	10	15
پلی‌اتیلن سنگین	1.5	0.96	130	12	20	10	15
پلی‌اتیلن سنگین	1.5	0.96	130	12	20	10	15
پلی‌اتیلن سنگین	1.5	0.96	130	12	20	10	15
پلی‌اتیلن سنگین	1.5	0.96	130	12	20	10	15
پلی‌اتیلن سنگین	1.5	0.96	130	12	20	10	15
پلی‌اتیلن سنگین	1.5	0.96	130	12	20	10	15
پلی‌اتیلن سنگین	1.5	0.96	130	12	20	10	15



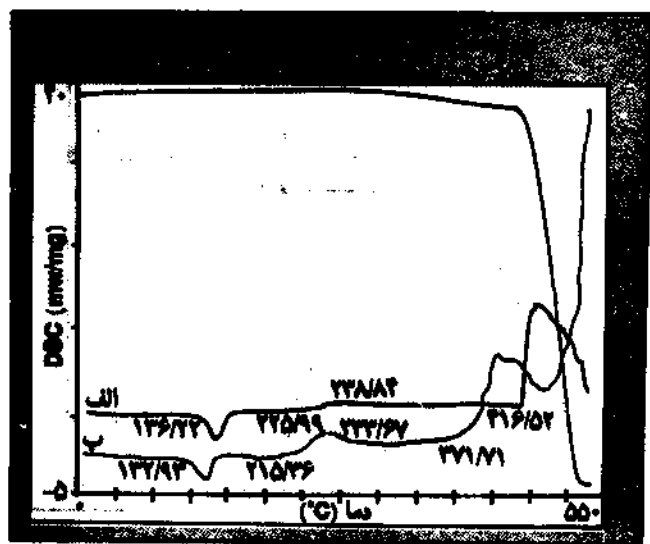
شکل ۳ - طیف IR: (الف) پلی اتیلن سنگین، (ب) پلی اتیلن سنگین اکستروود شده، (ج) ضایعات پلی اتیلنی غلتک شده، (د) ضایعات پلی اتیلنی اکستروود شده به همراه پایدار کننده، (ه) ضایعات پلی اتیلنی اکستروود شده بدون پایدار کننده و (و) ضایعات پلی اتیلنی اکستروود شده در کارخانه

و میکا به دست می آید. درحالی که مقدار ازدیاد طول تا تسلیم با افزایش غلظت پرکننده کاهش می یابد و مقدار آن همواره از مقدار متناظر برای ضایعات بدون پرکننده کمتر است. مقاومت در برابر ضربه فقط در مورد میکا افزایش نشان می دهد.



شکل ۴ - استحکام کششی ضایعات پلی اتیلنی مخلوط شده با ۳۰ درصد وزنی پرکننده توسط آسیاب غلتکی یا اکستروودر

در توضیح نتایج این قسمت یادآوری می شود که با افزودن پرکننده سخت به ماتریس سخت، همواره مدول کششی افزایش می یابد. در اینجا رابطه نیلسن (Nielsen) و همکارانش [8] در مورد ماتریس و پرکننده سخت کاربرد دارد. این رابطه با اندازه گیری تقریبی مدول کششی (سکانت * ۱٪) * مدول سکانت عبارت است از نسبت تنش به کرنش در نقطه معلومی از منحنی تنش - کرنش که این نقطه نیز به وسیله کرنش یا تنش معین خود مشخص می شود.

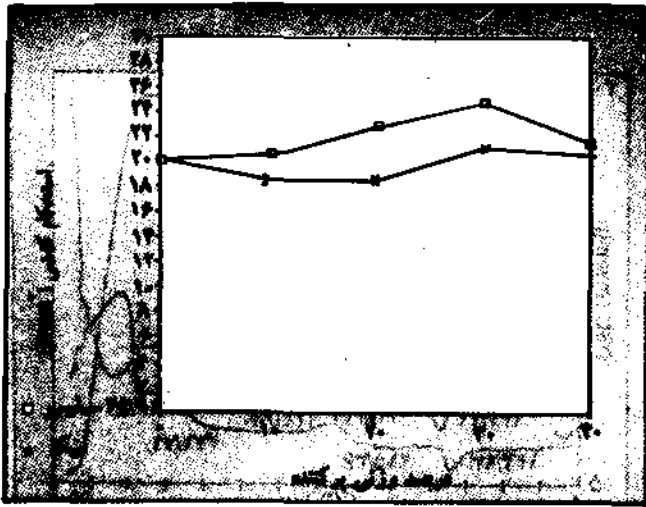


شکل ۵ - منحنی DSC در اتمسفر نیتروژن: (الف) HDPE و (ب) ضایعات پلی اتیلنی

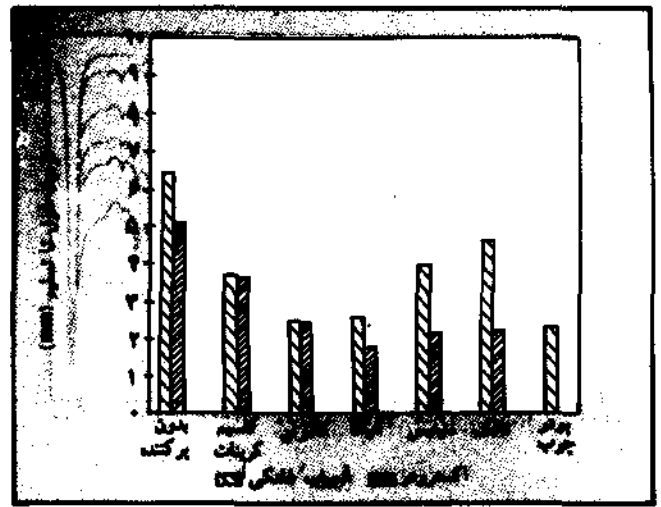
بیشترین تخریب را نشان می دهد. جدول ۱ پایین بودن استحکام کششی، مقاومت در برابر ضربه و ازدیاد طول تا پارگی ضایعات پلی اتیلنی را نسبت به پلیمرهای نو کاملاً نشان می دهد. با توجه به این نتایج معلوم می شود که در نتیجه تخریب پلی اتیلن، ازدیاد طول تا پارگی و مقاومت در برابر ضربه که از خواص نهایی پلیمرها به شمار می روند، بیش از خواص دیگر تضعیف می شوند.

اثر پرکننده ها

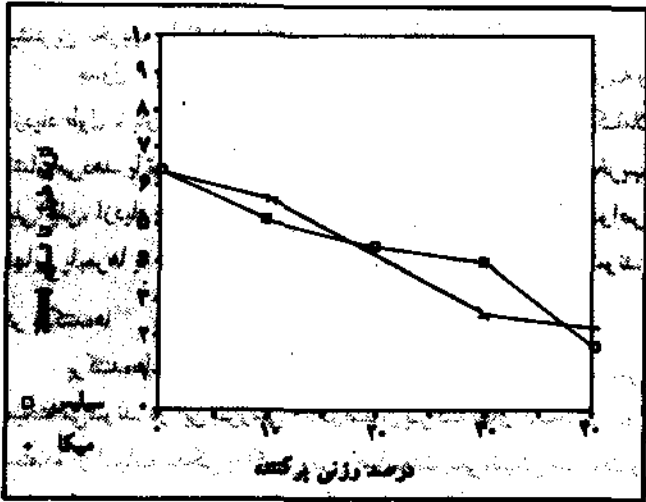
پرکننده ها معمولاً در نسبتهای ۲۰ تا ۴۰ درصد وزنی با پلیمر آمیخته می شوند. در این بررسی ۳۰ درصد از پرکننده های مختلف با استفاده از آسیاب غلتکی یا اکستروودر با ضایعات پلی اتیلنی مخلوط و خواص کششی و ضربه ای آنها اندازه گیری شد. برای مقایسه، ضایعات بدون پرکننده نیز عیناً در فرایندهای یاد شده شرکت کردند. در شکل های ۴ تا ۶ استحکام کششی، ازدیاد طول تا تسلیم و مقاومت در برابر ضربه ضایعات پر شده با ۳۰ درصد وزنی پرکننده با مقادیر متناظر برای ضایعات بدون پرکننده به صورت نمودار ستونی مقایسه شده است. از نتایج به دست آمده دو مطلب استنباط می شود: (۱) آمیزه سازی توسط آسیاب غلتکی بهتر انجام می گیرد و (۲) سیلیس، تالک و میکا به ترتیب بیشترین استحکام کششی، ازدیاد طول تا تسلیم و مقاومت در برابر ضربه را ایجاد می کنند. در مرحله بعد اثر غلظت سیلیس و میکا مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این کار آمیزه هایی با درصدهای وزنی ۱۰ تا ۴۰ از این دو پرکننده توسط آسیاب غلتکی تهیه شدند. شکل های ۷ تا ۹ خواص مکانیکی این آمیزه ها را در مقایسه با ضایعات پلی اتیلنی بدون پرکننده نشان می دهد. بیشترین مقدار برای استحکام کششی، در غلظت ۳۰ درصد وزنی سیلیس



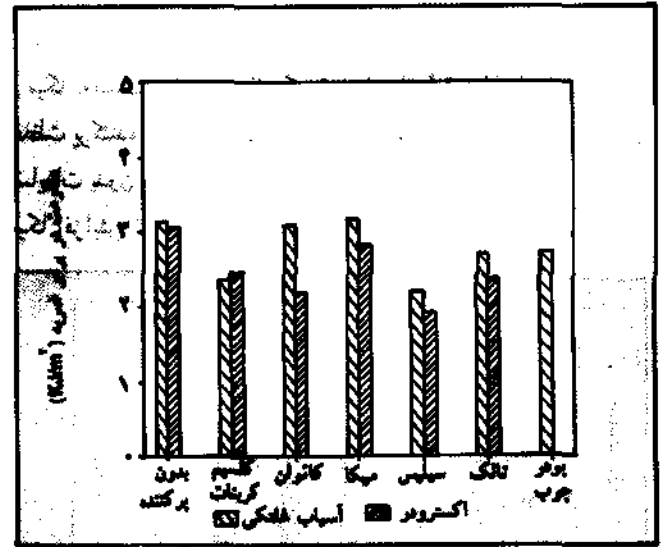
شکل ۷ - استحکام کششی ضایعات پلی اتیلنی مخلوط شده با سیلیس و میکا توسط آسیاب غلتکی



شکل ۵ - ازدهاد طول تا تسلیم ضایعات پلی اتیلنی مخلوط شده با ۳۰ درصد وزنی پرکننده توسط آسیاب غلتکی یا اکسترودر



شکل ۸ - ازدهاد طول تا تسلیم ضایعات پلی اتیلنی مخلوط شده با سیلیس و میکا توسط آسیاب غلتکی



شکل ۶ - مقاومت در برابر ضربه ضایعات پلی اتیلنی مخلوط شده با ۳۰ درصد وزنی پرکننده توسط آسیاب غلتکی یا اکسترودر

در سطح پلیمر و ذره پرکننده، اندازه و شکل هندسی ذره. بررسیهای انجام شده توسط پژوهشگران در مورد اثر پرکننده‌ها بر خواص مکانیکی پلی اتیلن نو (پلی اتیلن خالص و تخریب نشده) در سواردی که با آغشته‌سازی پرکننده‌ها به عوامل جفت‌کننده همراه بوده است [9-11]، حاکی از افزایش چشمگیر استحکام و مدول کششی می‌باشد. افزودن این عوامل نه تنها سازگاری و توزیع پرکننده را در ماتریس پلیمری بهبود می‌بخشد بلکه با ایجاد پل مولکولی میان پلیمر و پرکننده انتقال تنش را در کامپوزیت حاصل ممکن می‌سازد. در کار حاضر به دلیل عدم دسترسی به عوامل جفت‌کننده اثر این عوامل مورد بررسی قرار نگرفت. مشاهده بالاترین استحکام کششی برای پرکننده سیلیسی که در میان سایر

از روی منحنیهای تنش - کرنش برای نمونه‌های حاوی ۳۰ درصد وزنی پرکننده که توسط اکسترودر آمیخته شده بودند، مورد تأیید قرار گرفت. در شکل ۱۰ مدول کششی نمونه‌های یاد شده به صورت نمودار ستونی مقایسه شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار مدول کششی برای آمیزه‌های حاوی سیلیس و میکا حاصل می‌گردد. برخلاف مدول، استحکام کششی همیشه افزایش نمی‌یابد بلکه به دلیل افزایش تمرکز تنش و تشکیل ترکهای ریز در سطح مشترک در نتیجه افزودن پرکننده سخت به ماتریس سخت، معمولاً کاهش پیدا می‌کند. عواملی که در افزایش استحکام کششی مؤثرند عبارت‌اند از: برهم کنش

پرکننده‌ها از کمترین اندازه ذرات (تقریباً ۰/۰۲ میکرون) برخوردار است، با نتیجه بررسی آلتر (Alter) [12] در مورد اثر اندازه ذرات پرکننده بر استحکام پلی اتیلن مطابقت دارد. در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ تصاویر میکروسکوپی الکترونی از سطح شکست نمونه در آزمونهای کششی و چگونگی توزیع پرکننده در غلظت ۳۰ درصد در دوروش مخلوط کردن با آسیاب غلتکی و اکسترودر نشان داده شده است. استحکام بیشتری که برای سیلیس نسبت به سایر پرکننده‌ها به دست می‌آید به علت نوع و اندازه ذرات پرکننده و همچنین توزیع بهتر آن در پلیمر است که با مقایسه شکلها می‌توان به این نتیجه رسید.

اثر پلیمرنو

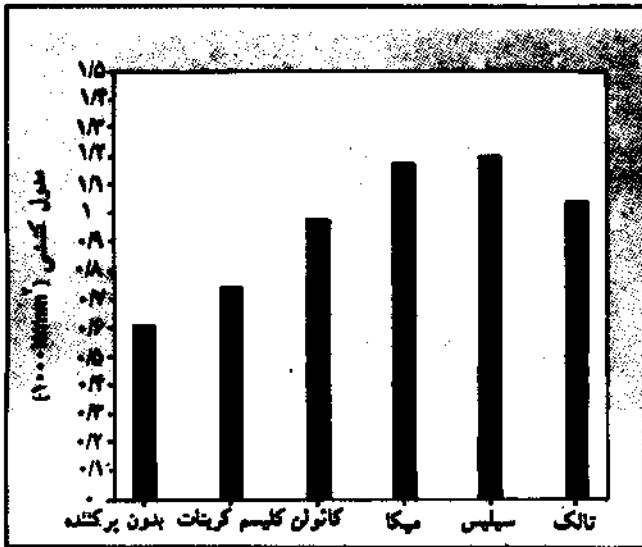
با توجه به خواص مکانیکی پلیمرهای LDPE, HDPE و PP که در جدول ۱ گزارش شده است، چنین به نظر می‌رسد که در صورت اختلاط و سازگاری خوب این پلیمرها با ضایعات پلی اتیلنی بیشترین استحکام کششی با آلیاژ PP و بیشترین مقاومت در برابر ضربه با آلیاژ LDPE به دست آید. بر این اساس آمیزه‌هایی حاوی ۳۰ درصد وزنی هریک از پلیمرهای پیش گفته با ضایعات پلی اتیلنی تهیه و خواص مکانیکی آنها بررسی شدند. اختلاط این آمیزه‌ها در اکسترودر انجام گرفت. شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ خواص مکانیکی این آمیزه‌ها را در مقایسه با ضایعات پلی اتیلنی نشان می‌دهند. نتایج بیانگر خواص بهتر آمیزه حاوی HDPE می‌باشد که علت آن اختلاط بهتر این پلیمر با ضایعات یاد شده است. کمترین سازگاری در مورد PP به چشم می‌خورد.

بررسیهای انجام شده توسط پژوهشگران نیز مؤید این مطلب است که آلیاژ پلی اتیلن سنگین و پلی پروپیلن به دلیل سازگار نبودن ساختار نیمه بلوری دو پلیمر، در دمای محیط خواص مکانیکی نسبتاً ضعیفی نشان

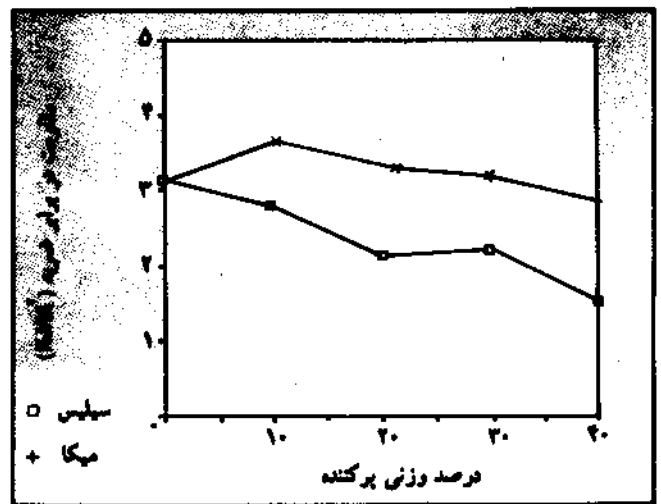
می‌دهد. افزودن درصدی از کوپلیمر اتیلن - پروپیلن که خواص حد واسط دو پلیمر را دارد و مانند یک عامل سازگارکننده عمل می‌کند، خواص مکانیکی نهایی را تا حدودی بهبود می‌بخشد [13]. از این رو، به آلیاژ ضایعات پلی اتیلنی و ۳۰ درصد وزنی PP، درصدهای مختلفی از EPDM اضافه شد. اختلاط این سه ماده در اکسترودر انجام گرفت و خواص مکانیکی آلیاژهای به دست آمده بررسی شدند. در جدول ۲ خواص مکانیکی آلیاژهای حاوی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی EPDM با آلیاژ دو جزئی ضایعات پلی اتیلنی و پلی پروپیلن مقایسه شده است. نتایج به دست آمده با نتایج پژوهشهای دورازیسو (D'orazio) و همکارانش [14] مطابقت می‌کند و نشان‌دهنده افزایش قابل ملاحظه مقاومت در برابر ضربه با افزایش درصد EPDM است.

اثر فرایند اختلاط بر خواص مکانیکی آلیاژها به دلیل محدودیت دمای مجاز غلتک و بالا بودن دمای ذوب PP فقط در مورد HDPE بررسی شد. خواص مکانیکی آلیاژ ۳۰ درصد HDPE در ضایعات پلی اتیلنی به دوروش اختلاط توسط آسیاب غلتکی و اکسترودر در جدول ۳ مقایسه شده است که نشان می‌دهد با استفاده از اکسترودر برای اختلاط، خواص نسبتاً بهتری به دست می‌آید.

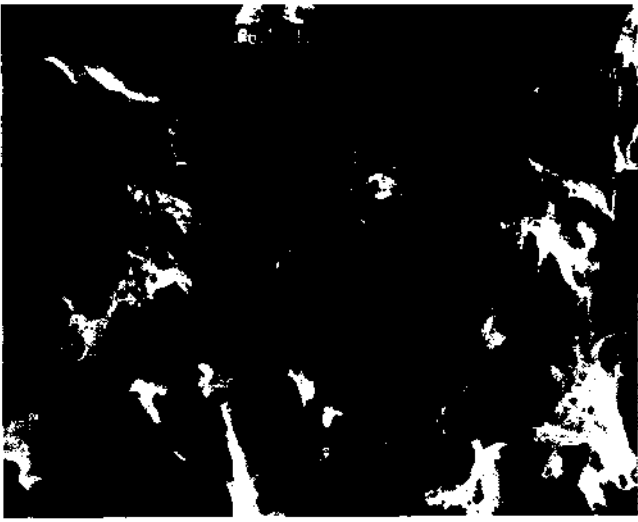
در حالی که برای ضایعات پلی اتیلنی که به تنهایی در اکسترودر مخلوط شده‌اند، کاهش قابل ملاحظه استحکام کششی نسبت به اختلاط در آسیاب غلتکی مشاهده می‌شود. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که اختلاط دو پلیمر در دمای بالا (در اینجا اکسترودر دمای بالاتری داشته است) بهتر صورت می‌گیرد. اما از طرف دیگر خطر تخریب ضایعات پلی اتیلنی با افزایش دما بیشتر می‌شود و برای حفظ خواص مکانیکی، استفاده از پایدارکننده‌های مناسب ضروری به نظر می‌رسد.



شکل ۱۰ - مدول کششی (سکانت ۱٪ ضایعات پلی اتیلنی مخلوط شده با ۳۰ درصد وزنی پرکننده توسط اکسترودر)



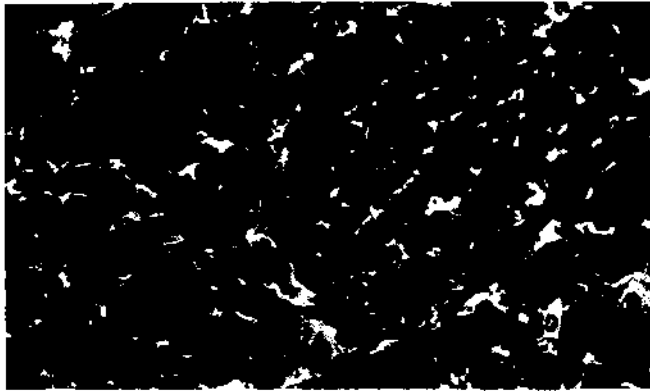
شکل ۹ - مقاومت در برابر ضربه ضایعات پلی اتیلنی مخلوط شده با سیلیس و میکا توسط آسیاب غلتکی



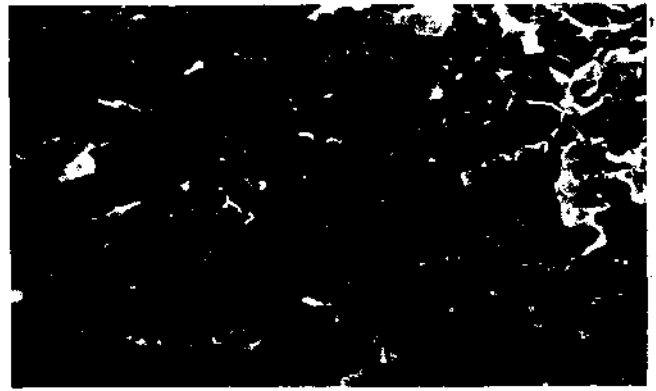
ب - کائولن



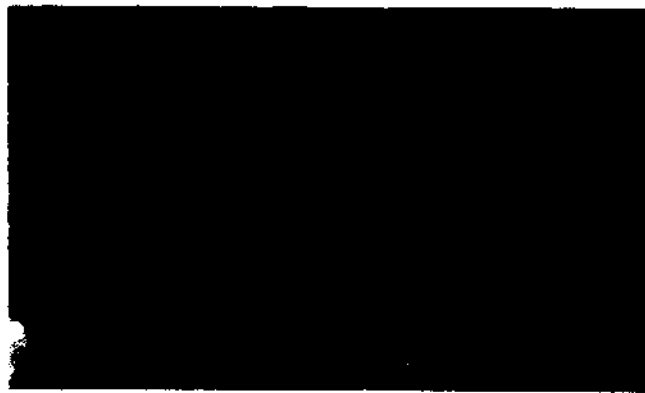
الف - کلسیم کربنات



د - سیلیس



ج - میکا



و - پودر چوب



ه - تالک

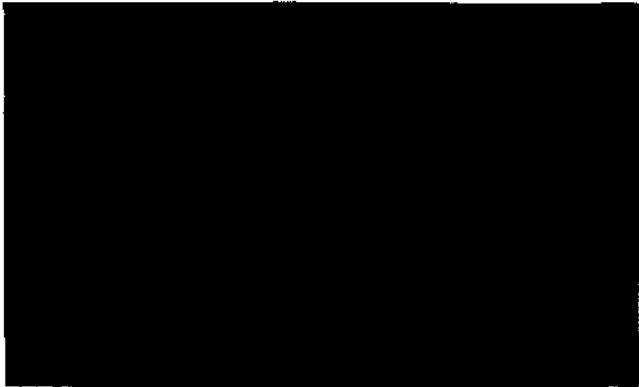
شکل ۱۱ - تصاویر میکروسکوپی الکترونی از سطح شکست نمونه‌های ضایعات پلی اتیلنی مخلوط شده با ۳۰ درصد وزنی پرکننده توسط آسیاب غلتکی



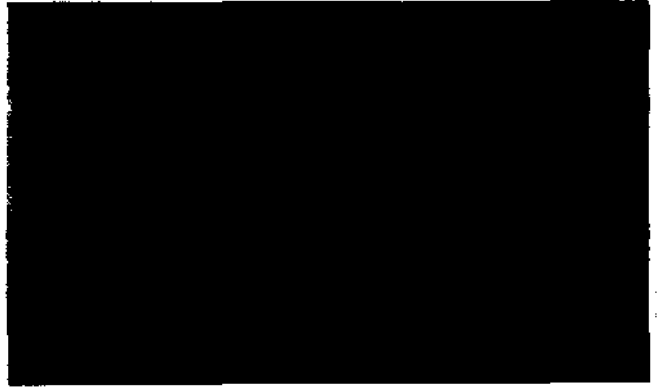
ب - کاتون



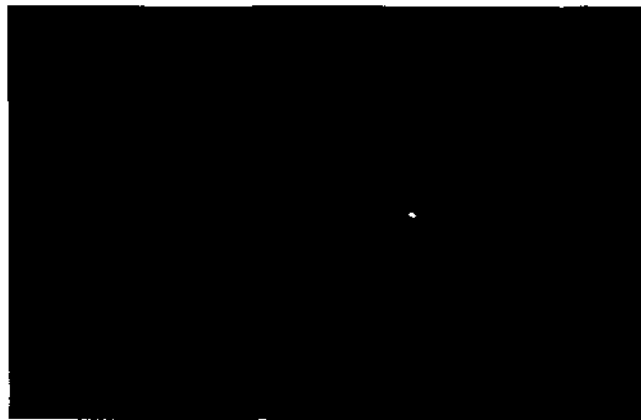
الف - کلسیم کرنات



د - سیلیس

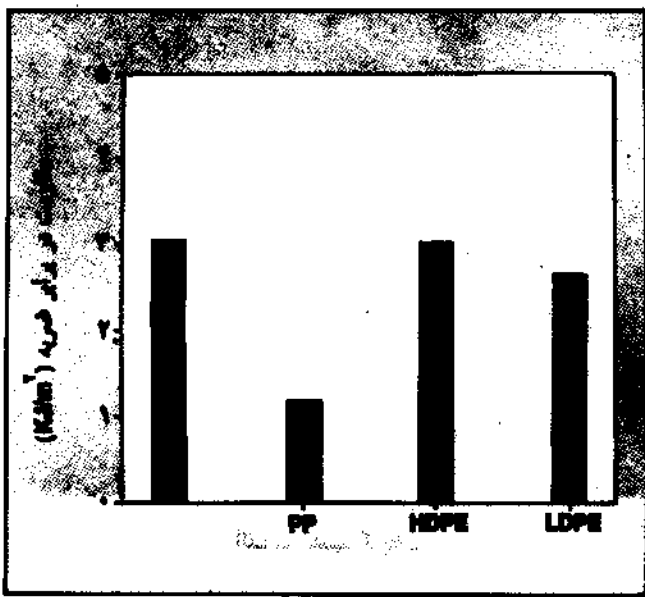


ج - میکا

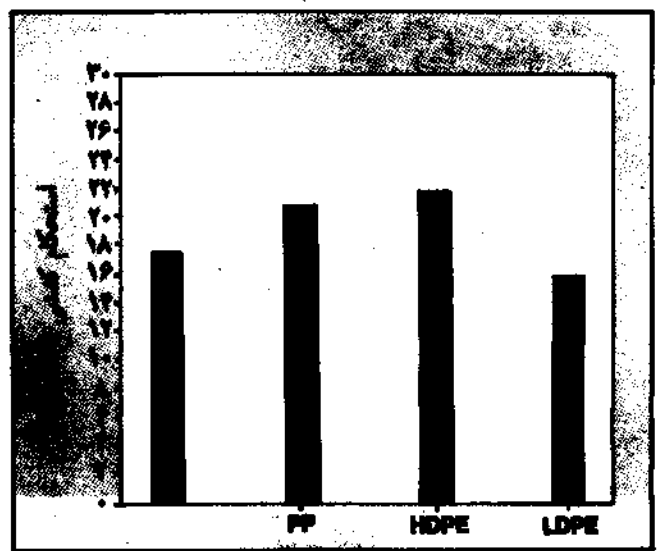


ه - تالک

شکل ۱۲ - تصاویر میکروسکوپی الکترونی از سطح شکست نمونه‌های ضایعات پلی اتیلنی مخلوط شده با ۳۰ درصد وزنی پرکننده توسط اکسترودر



شکل ۱۵ - مقاومت در برابر ضربه ضایعات پلی اتیلنی آلیاژ شده با ۳۰ درصد وزنی پلیمر نو در اکسترودر



شکل ۱۳ - استحکام کششی ضایعات پلی اتیلنی آلیاژ شده با ۳۰ درصد وزنی پلیمر نو در اکسترودر

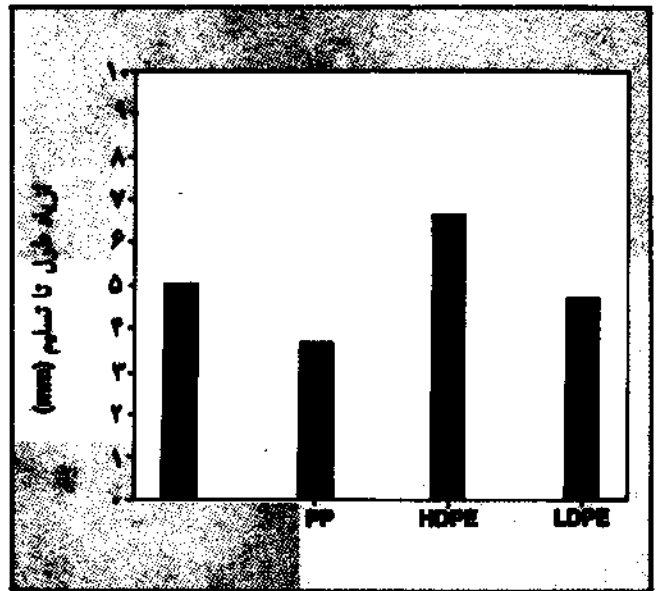
جدول ۲ - خواص مکانیکی ضایعات پلی اتیلنی آلیاژ شده با EPDM و PP

خواص مکانیکی	PP	EPDM	آلیاژ شده	تفاوت
استحکام کششی (mm)	۱/۸۸	۲/۶۹	۲۰/۸۷	۰
مقاومت در برابر ضربه (Mdn)	۲/۱۲	۲/۵۸	۱۷/۸۶	۵
کشش در نقطه تسلیم (%)	۸۰۰	۲/۸۱	۱۵/۲۵	۱۰
کشش در نقطه پاره شدن (%)	۱۲/۳۹	۲/۸۹	۱۲/۱۳	۱۵

الف) نسبت PP به ضایعات پلی اتیلنی در آلیاژهای مزبور ۳ به ۷ است.

برای ضایعات قبل از فراروش قابل اطمینان نیست.

در هر حال، نتایج بالا نشان دهنده کاهش شاخص جریان مذاب پس از اختلاط در آسیاب غلتکی و افزایش آن پس از اختلاط در اکسترودر است. این رفتار با توجه به واکنشهای تخریب گرمایی - اکسایشی پلی اولفینها قابل توجیه است. جدول ۵ مراحل آغازی، انتشار و پایانی این واکنشها را نشان می دهد. شرایط فراروش با آسیاب غلتکی و اکسترودر در بررسیهای فوق تا حدی با یکدیگر متضادند. در فراروش با آسیاب غلتکی میزان تنشهای برشی زیاد و دما کم می باشد، در حالی که در اکسترودر تنشهای برشی کم و دما زیاد است. مرحله آغاز تخریب در فراروش با آسیاب غلتکی بیشتر با تولید رادیکالهای آلکیل (R[•]) همراه است. در مرحله انتشار این رادیکالها شبکهها و پیوندهای عرضی تولید می کنند و این مسئله به پایین آمدن شاخص جریان مذاب یا بالا رفتن



شکل ۱۴ - از پید طول تا تسلیم ضایعات پلی اتیلنی آلیاژ شده با ۳۰ درصد وزنی پلیمر نو در اکسترودر

افر فرایند اختلاط

در این قسمت از بررسیها، شاخص جریان مذاب، *MFI* (melt flow index) ضایعات پلی اتیلنی و *HDPE* قبل و بعد از قرار گرفتن در فرایند اختلاط با آسیاب غلتکی یا اکسترودر اندازه گیری شد. در جدول ۲ نتایج *MFI* برای این دو ماده پیش از قرار گرفتن در فرایند و پس از آن داده شده است. همان طور که قبلاً اشاره شد به دلیل عدم یکنواختی ضایعات آسیاب شده، ممکن است نتایج تکرار پذیری حاصل نشود. بنابراین نتیجه به دست آمده

۲/۰۸	۲/۸۲	۵/۰۶	۶/۳۷	۱۷/۵۲	۲۰/۸۵	.
۲/۰۲	۲/۸۶	۶/۳۱	۶/۵۲	۲۱/۱۷	۲۰/۰۶	۳۰

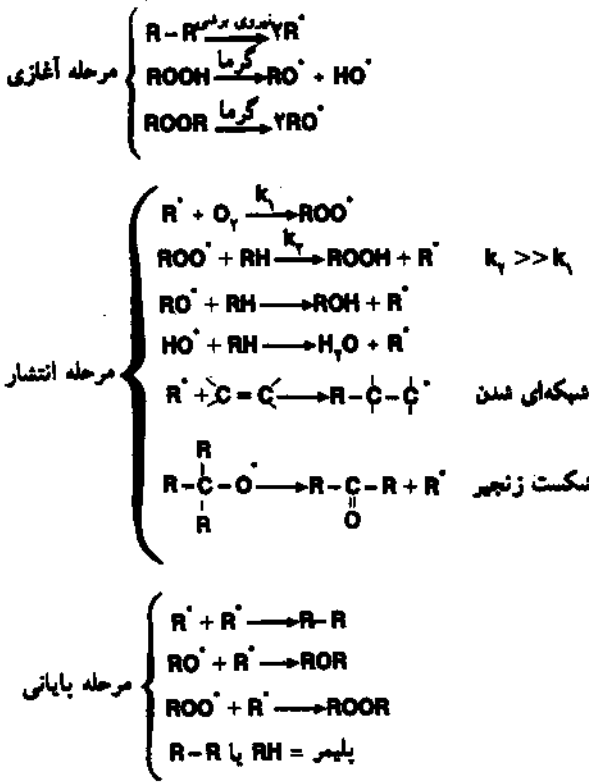
گرانروی کمک می کند. ولی، در اکسترودر عکس این حالت صادق است؛ رادیکالهای تولید شده به دلیل بالا بودن دما بیشتر از نوع آلکوکسی (RO) و پروکسی (ROO) می باشند و این رادیکالها در واکنشهای شکست شرکت می کنند که به کاهش طول زنجیرهای درشت مولکولی می انجامند. این امر موجب کاهش گرانروی یا افزایش شاخص جریان مذاب می شود. اثر فرایند اختلاط بر خواص مکانیکی ضایعات پلی اتیلنی در قسمتهای قبل بررسی شد که تضعیف این خواص در فرآورش با اکسترودر نسبت به آسیاب غلتکی مشهود بود. در این قسمت تغییرات خواص مکانیکی سایر پلیمرها (PP و HDPE) در اثر اختلاط با اکسترودر بررسی می شود. جدول ۶ نتایج به دست آمده را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، روند تغییرات خواص مکانیکی در مورد این دو پلیمر نیز نزولی است و نشان دهنده تخریب پلیمر نو حین فرایند اکستروژن می باشد.

جدول ۴ - اثر فرایند اختلاط بر شاخص جریان مذاب

ضایعات پلی اتیلنی	۰/۳۶۶۰	۰/۳۵۱۱
HDPE	-	۰/۳۶۰۶

اثر ضداکسندها

برای حفظ خواص جریانی و مکانیکی پلی اتیلن در فرایندهای گرمایی و مکانیکی، افزودن ضداکسندهای نوع اول (راینده رادیکالها) و نوع دوم (تجزیه کننده هیدروپروکسیدها) بسیار مؤثر است [16]. در مورد ضایعات پلی اتیلنی که قبلاً چندین بار فرآورش شده یا به شکلی در شرایط تخریب کننده مختلف قرار گرفته اند، این مسئله اهمیت بیشتری پیدا می کند. زیرا همان گونه که طیف IR آنها نشان می دهد، گروههای کربونیل متعددی



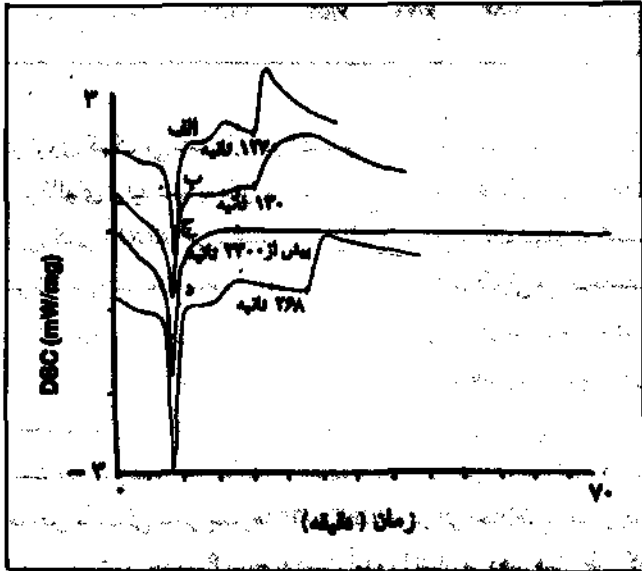
در آنها به وجود می آید که قادرند اکسایش پلیمر را شتاب بخشند. اشاره می شود که وجود ضداکسندهای نوع دوم که همواره در کنار ضد اکسندهای نوع اول فعالیت خود را نشان می دهند، ضروری به نظر می رسد زیرا احتمال وجود هیدروپروکسیدها در ضایعات پلی اتیلنی نسبت به پلی اتیلن نو بیشتر است. در این بخش از پژوهش درصدهای مختلفی از ضد اکسندهای نوع اول و دوم به ضایعات پلی اتیلنی اضافه شد و خواص جریانی و مکانیکی نمونهها مورد بررسی قرار گرفت. این امر صرفاً از جهت مطالعه اثر ضد اکسندهای مختلف انجام شد و هدف بهینه سازی درصد ضد اکسندها برای ضایعات یاد شده نبود. جدول ۷ نتایج خواص مکانیکی و جریانی نمونههای پیش گفته را که توسط اکسترودر فرآورش شده اند، نشان می دهند.

جدول ۶ - اثر فرایند اختلاط بر خواص مکانیکی پلی اولفینها

ضایعات پلی اتیلنی	۲/۰۹	۱۷/۵۲	۱۷/۸۵
HDPE	۵/۹۵	۲۵/۱۶	۲۶/۶۵
PP	۷/۳۹	۲۷/۰۰	۳۶/۶۲

۰/۱۵۷۰۸	۲/۰۸	۵/۱۵۰۰	۲/۱۵۰۰	۰
۰/۱۶۸۶۵	۲/۸۸	۵/۱۶۸۰	۲/۱۶۸۰	۰/۱
-	۲/۳۶	۵/۰۹	۲/۱۵۷۰	۰/۱۵
۰/۱۶۳۰۹	۲/۱۵۲	۵/۱۶۳	۲/۱۶۳۰	۰/۲۵

جمع آوری شده از زباله‌های شهری انجام شده است، نشان می‌دهد که این مواد بیشتر از نوع HDPE می‌باشند و به علت تخریب ساختار در مقایسه با مواد نو از خواص مکانیکی و مقاومت گرمایی به مراتب ضعیفتری برخوردارند. فرایندهای شکل‌دهی باعث تخریب بیشتر ضایعات و در نتیجه تضعیف مجدد خواص آنها می‌شود. این تخریب در فرایندی با دمای نسبتاً بالا (در اکسترودر) شدیدتر از فرایندی با دمای پایین (در آسیاب غلتکی) به وقوع می‌پیوندد. نتایج آزمون MFT دلالت بر تخریبی مرکب از شکست زنجیر و شبکه‌ای شدن دارد.



شکل ۱۶ - منحنی DSC برای اندازه‌گیری OIT: (الف) ضایعات پلی اتیلنی بدون ضد اکسنده، (ب) ضایعات پلی اتیلنی همراه با ۲ درصد وزنی ضد اکسنده نوع دوم، (ج) ضایعات پلی اتیلنی همراه با ۲ درصد وزنی ضد اکسنده نوع اول و (د) پلی اتیلن سنگین نو

از میان پرکننده‌های افزوده شده به ضایعات جهت بهبود خواص مکانیکی، سیلیس بیشترین استحکام کششی، تالک بالاترین ازدیاد طول تا تسلیم و میکا بیشترین مقاومت در برابر ضربه را ایجاد می‌کند. اختلاط و تقویت ضایعات با پرکننده در آسیاب غلتکی نسبت به اکسترودر، علی‌رغم صرف وقت بیشتر، نتایج بهتری به دست می‌دهد.

از میان پلیمرهای آلیاژ شده با ضایعات، HDPE بیشترین سازگاری و توانایی در تقویت خواص (به طور کلی) و PP کمترین سازگاری را نشان می‌دهد. EPDM نیز بیشترین مقاومت در برابر ضربه را ایجاد می‌کند. دو نوع ضد اکسنده انتخابی، تا حدودی از تضعیف خواص در اثر باز فراورش جلوگیری می‌کنند. ولی، نتیجه قابل توجه در اثر افزودن ضد اکسنده نوع اول (ایرگانوکس ۱۰۱۰) به دست می‌آید که نشان دهنده افزایش مقاومت در برابر تخریب گرمایی در مجاورت اکسیژن (OIT) تا

نتایج به دست آمده اثر مثبت ضد اکسنده‌ها را بر استحکام کششی به خوبی نشان می‌دهد. شاخص جریان مذاب در حضور ضد اکسنده‌ها افزایش می‌یابد که این نشانه کاهش وزن مولکولی به دلیل وقوع واکنشهای شکست زنجیر است. اشاره می‌شود که میزان افزایش شاخص جریان مذاب در حضور ضد اکسنده نوع دوم کمتر است. با توجه به وقوع همزمان واکنشهای شبکه‌ای شدن و شکست زنجیر می‌توان گفت که در حضور ضد اکسنده نوع اول واکنشهای شبکه‌ای شدن و در حضور ضد اکسنده نوع دوم واکنشهای شکست زنجیر کاهش می‌یابد که مطابق با عملکرد حقیقی آنهاست. با توجه به این نتایج پیشنهاد می‌شود که برای پایداری بیشتر خواص، مقدار بیشتری از ضد اکسنده نوع دوم نسبت به ضد اکسنده نوع اول اضافه گردد.

اثر ضد اکسنده‌ها بر پایداری گرمایی ضایعات پلی اتیلنی نیز با اندازه‌گیری زمان القای اکسایش، OIT (oxidation induction time)، توسط دستگاه تجزیه گرمایی مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۱۶ دمانگاشت‌های مربوط به پلی اتیلن سنگین، ضایعات پلی اتیلنی با ۲ درصد وزنی ضد اکسنده نوع اول و نوع دوم و بدون آن را نشان می‌دهد. علامتهای مشاهده شده روی هر دمانگاشت به ترتیب نشان دهنده تغییر اتمسفر نیتروژن به اکسیژن و شروع اکسایش می‌باشند که در دمای ثابت حدود ۲۰۰ °C انجام شده است. OIT به دست آمده در مقابل هر دمانگاشت ملاحظه می‌شود. با توجه به شکل می‌توان نتیجه گرفت که ضد اکسنده نوع اول در ۲ درصد وزنی به تنهایی می‌تواند پایداری درازمدت به ضایعات پلی اتیلنی ببخشد، در حالی که ضد اکسنده نوع دوم در همان درصد اثر چندانی بر پایداری ندارد.

آزمایشهایی که بر روی مواد آسیابی حاصل از ضایعات پلی اتیلنی

- [14] D'orazio, L.; Greco, R.; Mancarella, E.; Martuscelli, G.; Rogosta, G. and Silvestre, C. "Effect of the Addition of Ethylene - Propylene Random Copolymers on the Properties of High - Density Polyethylene/Isotactic Propylene Blends: Part 1 - Morphology and Impact Behavior of Molded Samples," Polym. Eng. Sci., Vol. 22, No. 9, P. 536 - (1982).
- [15] Capolupo, J. D. and Chucta, T. M., in Modern Plastic Encyclopedia, P. 127 (1988).
- [16] Ciba - Geigy Brochure "Processing and Long - Term Heat Stabilization of Polyolefins", April (1988).

بیش از ۲۰ برابر است و این به معنای پایداری خواص پس از یاز فراورش در دراز مدت می باشد.

در پایان اشاره می شود که پایداری ایجاد شده در برابر تخریب اکسایشی ضایعات و همچنین خواص مکانیکی اصلاح شده (در چند مورد) بهتر از مواد نو به تنهایی است.



REFERENCES

- [1] Moore, L. M.; Marshall, G. P. and Allen, N. S. Thermal Analysis of MDPE Pipe: A Critical View, Polym. Deg. and Stab., Vol. 25, P. 161 - (1989).
- [2] Komitov, P. and Kostov, G. "Ageing of LDPE: Structural Changes", Polym. Deg. and Stab., Vol. 24, P. 302 - (1989).
- [3] Sikora, R. and Bielinski, M. "Strength Properties of Contaminated, Reprocessed Polyethylene, Kunstst. German Plast., Vol. 78, No. 4, P. 27 - (1988).
- [4] Bielinski, M. "Influence of Impurities Incorporated During Use on the Processing and Mechanical Properties of Low - Density Polyethylene," Int. Polym. Sci. Tech., Vol. 16, No. 1, P. 86 - (1988).
- [5] Owerfeldt, G. and Kurz, M. "Drying of Polymer Granules with Dehumidified Air", Kunstst. German Plast., Vol. 78, No. 4, P. 19 - (1988).
- [6] "Making Use of Multi - Layers", Europ. Plast. News, April (1990).
- [7] Salas, M.; Johnson, M.; Malloy, R. and Chen, S. "A Study on the Effect of Fillers and Reinforcements on the Properties of Post Consumer Plastic Waste Profiles," SPE 48rd Antec, Dallas, May 7 - 11, P. 1430 - (1990).
- [8] Sheldon, R. P. "Composite Polymeric Materials," Applied Science Publishers Ltd. (1982).
- [9] Raj, R. G.; Kokta, B. V.; Groleau, G. and Deneault, C. Use of Wood Fiber as a Filler in Polyethylene: Studies on Mechanical Properties," Plast. Rubber Process. Appl., No. 11, P. 215 - (1989).
- [10] Yam, K. L.; Gogoi, B. K.; Lai, C. C. and Selke, S. E. "Composites from Compounding Wood Fibers With Recycled High - Density Polyethylene", Polym. Eng. Sci., Vol. 30, No. 11, P. 693 - (1990).
- [11] Schreiber, H. P.; Viau, J. M.; Fetoui, A. and Deng, Z. "Some Properties of Polyethylene Compounds with Surface Modified Fillers," Polym. Eng. Sci., Vol. 30, No. 5, P. 263 - (1990).
- [12] Alter, H. "Filler Particle Size and Mechanical Properties of Polymers." J. Appl. Polym. Sci., Vol. 19, P. 1525 - 1965).
- [13] Kryszewski, A.; Gleski, A. and Martuscelli, E. Eds. "Polymer Blends: Processing, Morphology and Properties", Vol. 2, Plenum Press, New York, P. 127 - (1984).

هرمان مارک Herman Mark

این دانشمند در سوم ماه مه ۱۸۹۵ در شهر وین اتریش به دنیا آمد و در طی هفتاد سال گذشته سهم بزرگی را در توسعه جوامع علمی به عهده داشته است. وی نقش بیشتر را در رشته علوم پلیمر ایفا کرد و اغلب از او به عنوان «پدر علوم پلیمر در آمریکا» یاد می شود.

دکتر مارک بیش از ۵۰۰ مقاله تحقیقی و مروری، بیش از ۲۰۰ کتاب در موضوعهای گوناگون علوم پلیمر منتشر کرده است. وی عامل آغاز انتشارات در زمینه علوم پلیمر در شرکت انتشاراتی اینترساینسی (Interscience) و بنیان گزار مجله علوم پلیمر (Journal of Polymer Science) بود که در حال حاضر به صورت چهار نشریه ادواری مجزا چاپ می شود. وی همچنین داتر المعارف علوم و تکنولوژی پلیمر و یک مجموعه کتاب در زمینه پلیمرهای با وزن مولکولی بالا را تنظیم کرد.

مارک نه تنها به عنوان یک دانشمند، ویراستار و ناشر بلکه به علت شخصیت ممتازش مشهور است. در مؤسسه پلی تکنیک بروکلین (Brooklyn)، وی مؤسسه مشهور بین المللی و بی مانند پژوهشهای پلیمر را بنیان نهاد و همچنین اولین دوره تحصیلی که منجر به اخذ درجه علمی در زمینه علوم پلیمر می شد را پراهم انداخت. وی عاملی مؤثر در تأسیس مؤسسه علوم و ایزمن (Weizman) بود که در آغاز در مؤسسه پلی تکنیک بروکلین سازماندهی شد.

هرمان مارک دکترای خود را در سال ۱۹۲۱ در رشته شیمی آلی از دانشگاه وین دریافت کرد. سپس به مؤسسه شیمی الیاف در برلین رفت. در این دوره، بخشی از مهمترین کارهای خود را در زمینه تعیین ساختار سلولز به وسیله مطالعات پراش اشعه ایکس به انجام رساند. در سال ۱۹۲۷ وی به عنوان یک نیمیدان پژوهشگر محقق BASF ملحق شد و تارتیه معلون مدیر پژوهشی ارتقا یافت. در سال ۱۹۳۲ وی سمت استادی و مدیریت مؤسسه شیمی فیزیک دانشگاه وین را به دست آورد. مارک در سال ۱۹۳۸ به شرکت اینترنشنال پلیمر و در سال ۱۹۴۰ به مؤسسه پلی تکنیک بروکلین ملحق شد. وی تا سال ۱۹۶۵ به عنوان عضو هیئت علمی و سرانجام رئیس دانشکده علوم در این مؤسسه فعالیت کرد. دریافت ۲۰ دکترای افتخاری، داشتن ۴۵ عضویت علمی و افتخاری در انجمنهای علمی و حرفه ای و به دست آوردن ۴۰ مدال و جایزه از جمله مدال بین المللی علوم و... نشانگر فعالیتهای مهم و نقش بزرگ هرمان مارک در جامعه علمی است.

منبع:

Polymer Science in the Next Decade (1987)

An International Symposium Honoring Herman F. Mark on his 90th Birthday

