



اثرات تابش پرتو الکترونی و ضایعات پلی پروپیلن به عنوان پلیمر بازیافتی بر خواص فیزیکی - مکانیکی و مورفولوژیکی مخلوط پلی پروپیلن / پلی پروپیلن بازیافتی

زهرا رفیعی سرمزده^{*}، میثم تراب مستعدی، مهدی اسداله زاده، رضوان ترکمان
پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۸۴۸۶، تهران- ایران
*Email: zrafiei@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۳/۲۴

چکیده

در سال‌های اخیر، بازیافت زباله‌های پلاستیکی به دلیل مسائل زیست محیطی، بهداشتی و اقتصادی رشد سریعی داشته و مخلوط/ کامپوزیت‌های مختلفی از مواد پلیمری بازیافتی در سال‌های اخیر مشخصه‌یابی شده‌اند. در این میان متأسفانه سهم پلی پروپیلن به عنوان یکی از پنج پلیمر اصلی تشکیل‌دهنده پسماندهای پلیمری، بسیار اندک است. هدف از این مطالعه بررسی استفاده از پلی پروپیلن بازیافتی (rPP) به همراه پلی پروپیلن بکر (PP) و افزایش خواص مخلوط آن با استفاده از تابش الکترونی برای کاربردهای احتمالی است. مخلوط‌های حاوی rPP با محتوای وزنی ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵٪ با استفاده از تابش الکترونی پرتو دهی شده و به منظور تعیین خواص محتوای ژل، شاخص جریان مذاب، خواص مکانیکی و ویژگی‌های ساختاری مورد بررسی قرار گرفتند. کاهش شاخص جریان مذاب مخلوط‌های پرتو دهی شده و محتوای ژل نشان می‌دهد که پرتو دهی سبب ایجاد اتصالات عرضی در مخلوط PP می‌گردد. افزایش محتوای rPP تغییر محسوس در استحکام کششی و درصد ازدیاد طول نمونه‌ها را باعث نمی‌شود اما تحت پرتو دهی، استحکام کششی در نمونه‌های حاوی ۰ تا ۱۰٪ rPP، کاهش ۱۰٪ و در نمونه ۱۵٪ وزنی کاهش ۱۵٪ را نشان می‌دهد. درصد ازدیاد طول نیز نسبت به نمونه‌های بدون پرتو دهی کم‌تر بوده که به نظر می‌رسد به دلیل تشکیل شبکه اتصالات عرضی در ساختار پلیمر باشد. با این حال میزان کاهش با توجه به استفاده از rPP و به دلیل استفاده از پرتو دهی میزان قابل قبولی بوده و همچنان مخلوط پلیمری رفتار چکش‌خواری مناسبی را نشان می‌دهد. آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی برای نمونه تحت پرتو دهی نیز بهبود برهم‌کنش بستر با rPP را نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد با در نظر گرفتن نتایج، مخلوط پرتو دهی شده حاوی ۱۰٪ وزنی از rPP، نمونه بهینه باشد که این مخلوط را برای بازیافت محیطی از ضایعات PP پس از مصرف، تحقق بخشیدن به کالاهای جدید با عملکرد بالا برای کاربردهای مختلف، کاهش هزینه و تولید پایدار توصیه می‌کند.

کلیدواژه‌ها: بازیافت تابشی، پلی پروپیلن، پسماند پلیمری، پرتو الکترونی، پلاستیک

Effects of electron beam irradiation and polypropylene waste as recycled polymer on physical, mechanical and morphological properties of recycled polypropylene/polypropylene blends

Z. Rafiei-Sarmazdeh*, M. Torab Mostaei, M. Asadollahzadeh, R. Torkaman

Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 11365-8486, Tehran - Iran

Research Article

Received 27.2.2023, Accepted 14.6.2023

Abstract

Due to environmental, health, and economic concerns, recycling plastic waste has increased significantly in recent years. Numerous mixes and composites of recycled polymer materials have been studied. Unfortunately, polypropylene makes up a very small portion of the five primary polymers that make up polymer waste. This study aims to research the usage of recycled polypropylene (rPP) in combination with virgin polypropylene (PP) and to use electron radiation to improve the mixture's characteristics for potential applications. After electron radiation exposure, mixtures containing rPP at 0, 5, 10, and 15 wt.% were examined to determine gel content, melt flow index, mechanical properties, and structural characteristics. The irradiation results in crosslinking in the PP mixture, as evidenced by the decrease in melt flow index and the increase in gel content of the irradiated mixes. The tensile strength and elongation at break are unaffected by increasing the amount of rPP, but after exposure to radiation, the tensile strength of samples containing 0 to 10 wt.% of rPP declines by 10% and that of samples with 15% by weight reduces by 15%. In comparison to samples not exposed to radiation, the elongation-at-break increase was also reduced, which appears to be a result of developing a crosslinking net in the polymer's structure. The polymer mixture still exhibits reasonable hammering behavior. The decrease caused by rPP and irradiation is of an appropriate magnitude. The irradiation sample's analysis using a scanning electron microscope also demonstrates improved interaction of PP with rPP. Based on the findings, it appears that the irradiation combination containing 10 wt.% rPP is the optimal sample to use for environmentally recycling post-consumer PP waste, creating new, high-performing products for a variety of applications, Cost reduction, and sustainable production.

Keywords: Radiation recycling, Polypropylene, Polymeric waste, Electron beam, Plastic

Journal of Nuclear Science and Technology

Vol. 45 (3), Serial Number 108, 2024, P 105-114

مجله علوم و فنون هسته‌ای

دوره ۴۵، شماره ۲، جلد ۱۰۸، تابستان ۱۴۰۳، ص ۱۰۵-۱۱۴



۱. مقدمه

با افزایش تقاضای جهانی برای کالاهای مصرفی، تولید مواد اولیه پلاستیکی بکر و فشار بر محیط زیست جهانی ناشی از مصرف منابع طبیعی و انباشت محیطی نیز افزایش می‌یابد. تخمین زده می‌شود که تا به امروز ۸۳۰۰۰ میلیون تن پلاستیک تولید شده است که تنها ۲۱ درصد آن بازیافت یا سوزانده شده است. از آنجایی که اکثر پلاستیک‌های رایج در محیط زیست تخریب نمی‌شوند، آلودگی گسترده زمین و اقیانوس‌ها، در حال افزایش است. در نتیجه، فوریت داخلی و بین‌المللی برای استفاده از مواد اولیه پایدار و بازیافت زباله‌های پلاستیکی وجود دارد [۱].

پلی پروپیلن^۱ (PP) یک پلیمر ترموپلاستیک است که به دلیل خواص سودمند آن با قیمت مناسب معمولاً در کاربردهای مختلف صنعتی استفاده می‌شود. PP به طور گسترده در صنایع مختلفی از جمله بسته‌بندی مواد غذایی، ضربه‌گیرها، جعبه‌های باتری خودرو، مسواک‌ها و مواد فرش استفاده می‌شود. به خاطر خواصی هم‌چون چگالی کم، پایداری حرارتی و شیمیایی خوب، سفتی و هزینه پایین تولید، PP مصرف زیاد و رو به رشدی داشته و مقدار قابل توجهی از این پلیمر در پسماندهای صنعتی و شهری یافت می‌شود. از دیدگاه اقتصادی و زیست محیطی، بازیافت پلی پروپیلن بازیافتی^۲ (rPP)، به دلیل مصرف کم‌تر PP بکر و کاهش پیامدهای زیست محیطی جذاب است. با این حال، نرخ بازیافت زباله‌های پلاستیکی تاکنون رضایت‌بخش نبوده است. به عنوان مثال، در سال ۲۰۱۵، تنها ۲۰ تا ۲۵ درصد از زباله‌های پلاستیکی جهانی بازیافت و مابقی برای دفع به محل‌های دفن زباله فرستاده شده است. نرخ بازیافت پلی پروپیلن بعد از پلی اتیلن ترفتالات^۳ و پلی اتیلن سنگین^۴ در رده سوم قرار دارد که با توجه به کاربرد گسترده این پلیمر نیاز به توجه بیش‌تری دارد [۱-۳].

با کاهش خواص فیزیکی و مکانیکی مطلوب پلیمرهای بازیافتی، قابلیت استفاده مجدد از آن‌ها محدود می‌گردد. با توجه به اهمیت اقتصادی و زیست محیطی ضایعات پلی پروپیلن، اخیراً بسیاری از محققین سعی در ارائه راه حل‌های مناسب برای استفاده از این نوع پلاستیک در کاربردهای مختلف صنعتی نموده‌اند. افزودنی‌هایی مانند پرکننده‌های معدنی [۴-۶]، اصلاح‌کننده‌های ضربه [۷-۹] و برخی عوامل جفت‌کننده همراه با تقویت‌کننده [۱۰، ۱۱]، برای بازیافت ضایعات PP استفاده شده‌اند. به عنوان مثال محققان ساخت ضربه‌گیرهای ماشین را

گزارش کرده‌اند که در ساخت آن‌ها از rPP استفاده شده است [۱۲]. هم‌چنین در ساخت کامپوزیت‌های حاوی چوب از rPP استفاده می‌شود [۱۳]. استفاده از نانوذرات خاک رس، اکسید روی، سیلیکا و نانولوله‌های کربنی راه حل دیگری برای ارتقا خواص ضایعات این پلیمر است [۱۴]. علاوه بر این، استفاده هم‌زمان از PP بکر و بازیافتی [۱۵] و استفاده از پلی‌الفین‌های دیگر مانند پلی‌اتیلن به همراه ضایعات PP [۱۶، ۱۷] به عنوان روش‌های عملی برای کاهش استفاده از PP بکر معرفی شده است. با این حال استفاده از این روش‌ها ممکن است تأثیر منفی روی برخی خواص نهایی نیز داشته باشد که می‌تواند به دلیل عدم سازگاری تقویت‌کننده و بستر پلیمری و هم‌چنین تخریب حرارتی PP باشد [۱۳].

مشکل اصلی در بازیافت PP از تجزیه‌پذیری آسان این پلیمر هم در طول عمر آن (عمدتاً توسط اکسیداسیون نور) و هم در طی عملیات پردازش و بازیافت ناشی می‌شود. گرما، تنش مکانیکی و اشعه ماوراء بنفش به شدت ساختار و مورفولوژی و در نتیجه ویژگی‌های پلی پروپیلن را تغییر می‌دهند [۱۸]. مقدار و نوع محصولات تخریب غالب، به غلظت و ترکیب کاتالیزورهای پلیمریزاسیون باقی‌مانده و افزودنی‌های فلزی در پلی پروپیلن بازیافتی بستگی دارد [۱۹]. به دلیل وجود کربن سوم در ساختار مولکولی، اثرات تخریب فتو اکسیداتیو و حرارت مکانیکی بر تشکیل هیدروپراکسیدها در PP بسیار سریع‌تر از پلی اتیلن است [۳، ۱۸].

در سال‌های اخیر با توجه به کاربرد روزافزون پرتوفاوری، توجه زیادی به بازیافت تابشی پلیمرها جلب شده است [۲۰-۲۶]. پرتوهای یونیزه‌کننده به دلیل توانایی در ایجاد اتصالات عرضی یا بریدگی زنجیره، بدون وارد کردن آغازگرهای شیمیایی و بدون حل کردن نمونه، راه‌حل منحصر به فردی را برای مشکل بازیافت ارائه کرده و از جدایی فاز جلوگیری می‌کند [۱، ۲۷، ۲۸]. هم‌چنین پرتوفاوری روش جایگزین برای بهبود چسبندگی سطحی مواد است. به عنوان مثال سازگاری پایین بین بستر PP و تقویت‌کننده‌های فیبر طبیعی باعث محدودیت در ساخت و کاربرد کامپوزیت‌های حاوی این فیبرهای طبیعی می‌شود که استفاده از پرتوفاوری این مشکل را مرتفع خواهد کرد [۲۷]. علاوه بر مقرون به صرفه بودن، از پرتودهی می‌توان برای بازیافت پلیمر استفاده نمود، زیرا معایب برجسته اتصال عرضی شیمیایی هم‌چون تولید بخارات مضر و محصولات تخریب پراکسید وجود نداشته و بدون محدودیت در مورد استفاده از افزودنی‌های حساس به حرارت، تشکیل پیوند عرضی تابشی از نظر فنی و اقتصادی به عنوان یک فرایند کاملاً صنعتی

1. Polypropylene (PP)
2. Recycled Polypropylene (rPP)
3. Polyethylene Terephthalate (PET)
4. High Density Polyethylene (HDPE)



۲. بخش تجربی

۱.۲ مواد

در این تحقیق از پلی پروپیلن گرید ZR230 C تولید شرکت زرشیمی با نام تجاری Parslen PP استفاده شد. این گرید مقاومت حرارتی و خزشی خوبی داشته و در برابر ضربه مقاوم است. از ضایعات لوله‌های PP به عنوان پلی پروپیلن بازیافتی استفاده شد. همچنین از تری متیلول پروپان تری متاکریلات^۳ (TMPTMA) با فرمول شیمیایی $C_{18}H_{26}O_6$ ، جرم مولکولی 338.40 g/mol و چگالی 1.06 g/mL شرکت سیگما آلدریج به عنوان عامل القای تشکیل شبکه اتصال عرضی در بستر پلیمری، به مقدار معین دو درصد وزنی در همه نمونه‌ها استفاده شد.

۲.۲ تجهیزات

برای ساخت نمونه‌ها از مخلوط کن دو غلطکی مدل PM-3000 شرکت برابندر^۴ ساخت کشور آلمان استفاده شد. نمونه‌های مورد نیاز جهت آنالیز، با استفاده از دستگاه پرس Laboratory Platen Press مدل P200P ساخت شرکت دکتر کولین^۵ کشور آلمان تهیه شدند. از شتاب‌دهنده الکترونی رودوترون^۶ مدل TT200 با ولتاژ شتاب‌دهنده 10 MeV و جریان 10 mA ، مجتمع پژوهشی ایران مرکزی-یزد، برای پرتو دهی نمونه‌ها استفاده شد. محتوای ژل به روش سوکسله و طبق استاندارد ASTM D2765 اندازه‌گیری شد. جهت انجام آزمایش، نمونه‌های مخلوط پرتو دهی شده حاوی rPP، پس از توزین در کیسه‌های فیلتر بسیار ریز قرار داده شده و با زایلن به عنوان حلال به مدت ۱۲ ساعت در دمای 140°C با افزودن Irganox 1010 به عنوان آنتی اکسیدان استخراج شدند. سپس عصاره‌ها دور ریخته شده و باقی‌مانده به مدت ۲۴ ساعت در دمای 150°C در خلأ خشک شد تا وزن ثابت شود. کسر ژل نمونه‌ها با استفاده از معادله (۱) تعیین شود:

$$100 \times (W_a / W_b) = (\%) \text{ محتوای ژل} \quad (1)$$

که در آن W_a وزن نمونه‌ها بعد از استخراج و W_b وزن نمونه‌ها قبل از استخراج است.

جریان‌پذیری کامپوزیت‌ها در حالت مذاب با آزمایش MFI مشخص شد. اندازه‌گیری‌های MFI بر اساس استاندارد

امکان‌پذیر است [۲۸]. با پرتو فرآوری می‌توان خواص مکانیکی، حرارتی و ساختاری پلیمرهای بازیافتی را با ایجاد پیوند متقابل یا بریدگی زنجیره‌ای در شرایط تابش مناسب اصلاح نمود [۲۹]. سمات^۱ و همکاران اثر سازگاری پلی پروپیلن بازیافتی تابش‌دهی شده را روی خواص مکانیکی و ترشوندگی کامپوزیت سلولز/rPP مورد بررسی قرار دادند [۲۷]. در کار دیگر انجام شده توسط همین نویسنده از نسبت ۹۰ به ۱۰ پلی پروپیلن بازیافتی بدون تابش/تابش‌دهی شده برای کامپوزیت‌سازی با سلولز استفاده شده است [۲۹]. در این پژوهش از rPP تابش‌دهی شده به عنوان سازگارکننده برای بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت استفاده شده است. به خوبی مشخص شده است که استفاده از پرتو فرآوری به جای استفاده از واکنش شیمیایی، روش سریع‌تری برای تغییر ساختار پلیمری است و پرتو فرآوری در پلیمرها منجر به تخریب یا تشکیل پیوندهای بین مولکولی و تغییر میانگین جرم مولکولی و ویسکوزیته ذاتی آن‌ها می‌گردد [۳۰-۳۲]. تابش الکترونی بسته به دز تابش، شرایط پرتو دهی، نوع، مرفولوژی و محتوای پلیمر، تخریب (بریدگی زنجیره‌ای)، انشعاب، و اتصال عرضی را به ساختار پلیمری وارد می‌کند. بنابراین، انتخاب شرایط بهینه و تعیین مقادیر مناسب محتوای پلیمر در معرض تابش پارامترهای مهمی است که باید به منظور افزایش خواص محصول نهایی از پلی پروپیلن بازیافتی در نظر گرفته شود.

هدف اصلی این مطالعه ارزیابی سازگاری rPP در مخلوط‌های تابش‌دهی شده rPP/PP با لحاظ نمودن مسائل اقتصادی و زیست محیطی کاهش مصرف PP است. به دلیل خواص سطحی مختلف rPP و PP، اختلاط rPP و ماتریس PP آب‌گریز نیاز به یک سازگارکننده خوب برای ایجاد چسبندگی خوب بین آن‌ها دارد. لذا از پرتو الکترونی برای بهبود ساختار استفاده شد. اثر تابش الکترونی و مقدار rPP بر محتوای ژل، شاخص جریان مذاب^۲، خواص مکانیکی و مورفولوژی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. و در نهایت مقدار بهینه rPP که می‌تواند با حداقل کاهش در خواص مخلوط، با PP بکر ترکیب شود، یافت شد. اهمیت چنین مطالعه‌ای زمانی برجسته می‌شود که در نظر گرفته شود استفاده از PP بازیافتی یک راه حل زیست محیطی و اقتصادی است که می‌تواند تا حدودی به حذف مؤثر مواد زائد از بیوسفر و کاهش مصرف پلی پروپیلن بکر کمک کند.

3. Trimethylolpropane Trimethacrylate (TMPTMA)

4. Brabender

5. Dr. Collin

6. Rodotron

Journal of Nuclear Science and Technology

Vol. 45 (3), Serial Number 108, 2024, P 105-114

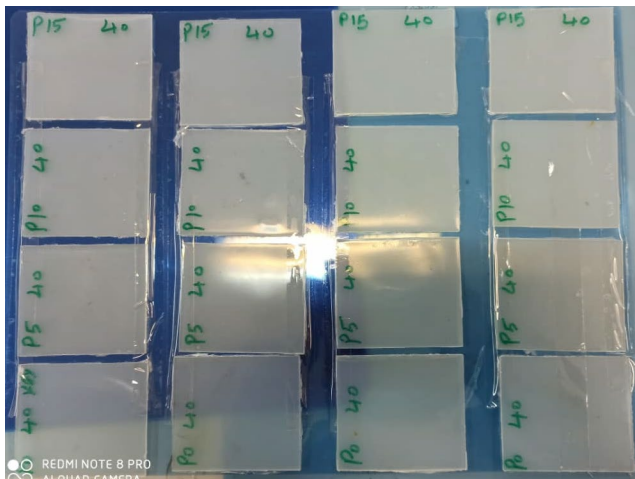
1. Samat

2. Melt Flow Index (MFI)



جدول ۱. فرمولاسیون مخلوط‌های تهیه شده بر پایه PP حاوی مقادیر مختلف rPP

شماره ترکیب	محتوای وزنی PP (%)	محتوای وزنی rPP (%)	محتوای وزنی TMPTMA (%)	دوز دریافتی (kGy)
P ₀	۹۸	۰	۲	۴۰
P _۵	۹۳	۵	۲	۴۰
P _{۱۰}	۸۸	۱۰	۲	۴۰
P _{۱۵}	۸۳	۱۵	۲	۴۰



شکل ۱. تصویر نمونه‌های تهیه شده بعد از پرتودهی.

ASTM D1238 در پلاستومتر Zwick مدل ۴۱۰۰ (ساخت کشور آلمان) انجام شد. مقدار MFI نشان‌دهنده مقدار کامپوزیت ذوب و تحویل شده به مدت ۱۰ min در دمای ثابت °C ۲۳۰ و بار ۲/۱۶ Kg است.

آزمون مکانیکی بر اساس استاندارد ASTM D638، جهت تعیین خواص مکانیکی توسط دستگاه کشش چندکاره HiWA/Material Testing مدل Hiwa-200 ساخت ایران با سرعت ۵۰ mm/min و اندازه طول سنج ۲/۵ cm انجام گردید. از نمونه‌های دمبلی شکل برای انجام آزمون با عرض ۵ mm و ضخامت ۲/۸ mm استفاده شد. کشش نمونه‌ها تا زمان گسیختگی کامل آن‌ها و با سه تکرار اندازه‌گیری شد. تعیین ساختار نمونه‌ها، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی^۲ (SEM) مدل Ziess Evo18 ساخت آلمان انجام شد. تصاویر از سطح شکست نمونه‌ها در فشار خلأ ۱۰^{-۵} torr، بیشینه ولتاژ دستگاه ۳۰ kV و با استفاده از تفنگ الکترونی تنگستن ثبت شد. به منظور شکست ترد، نمونه‌های کامپوزیتی به مدت چند دقیقه در نیتروژن مایع نگه داشته و سپس شکسته شدند. سطح نمونه‌ها برای جلوگیری از تجمع بار الکتریکی در طی آزمایش، توسط طلا و به ضخامت ۱۰ nm روکش‌دهی شدند.

۳.۲ روش ساخت کامپوزیت

تمامی نمونه‌ها با استفاده از مخلوط‌کن غلطک در دمای °C ۱۷۵ و با سرعت ۳۰ rpm مخلوط و ۶ min فرصت داده شد تا به خوبی با هم مخلوط گردند. در ابتدا بعد از مذاب کردن پلی پروپیلن، rPP در چهار ترکیب وزنی ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵٪ و TMPTMA به مقدار ۲٪ وزنی به PP مذاب افزوده و به مدت ۶ min با هم مخلوط شدند. TMPTMA به عنوان یک عامل تشکیل‌دهنده پیوندهای عرضی باعث تشکیل شبکه‌های اتصال عرضی از طریق آزادسازی رادیکال‌های آزاد مونومر در هنگام تابش‌دهی می‌گردد. استفاده از عامل تشکیل‌دهنده پیوندهای عرضی در ساختار کامپوزیت باعث کاهش میزان دز دریافتی و لذا کاهش تخریب پلیمر زمینه می‌گردد [۳۳-۳۵]. صفحات کامپوزیتی با ابعاد ۸×۷ cm^۲ در دمای °C ۱۷۵ و فشار ۲/۵ MPa قالب‌گیری و ساخته شدند. سپس نمونه‌های کامپوزیت تهیه شده تحت تابش الکترونی با دز ۴۰ kGy در اتمسفر هوا قرار گرفتند. جدول ۱، فرمولاسیون نمونه‌های ساخته شده را به صورت خلاصه نشان می‌دهد. هم‌چنین شکل ۱ تصویری از نمونه‌های تهیه شده را بعد از پرتودهی نشان می‌دهد.

۳.۳ بحث و نتایج

۳.۳.۱ آزمون شاخص جریان مذاب

آزمون MFI برای تعیین اثر پرتو بر میزان جریان‌پذیری نمونه‌ها انجام شد. شکل ۲ اثرات تابش الکترونی را بر شاخص MFI نمونه‌های مخلوط حاوی rPP نشان می‌دهد. شاخص مذاب برای PP مقدار ۰/۳۵g/۱۰min می‌باشد. بدون پرتودهی، با افزودن rPP به بستر PP و افزایش محتوای آن، مقدار MFI افزایش می‌یابد. نمونه P₀ بدون افزودن rPP و به دلیل یک‌بار فراوری حرارتی افزایش بیش از ۷۰٪ را در مقدار MFI نشان می‌دهد. تنها نمونه حاوی ۵٪ وزنی rPP، کاهش اندکی در MFI را نسبت به نمونه P₀ دارد. علت این امر را می‌توان به حضور rPP نسبت داد. پلی پروپیلن باز یافتی به دلیل واکنش‌های اکسیداتیو که در طول زمان به دلیل مجاورت در معرض هوا و گرما در آن رخ داده است، علاوه بر تخریب زنجیره و کم شدن وزن ملکولی آن، می‌تواند دارای پیوندهای متقاطع عرضی گردد [۳۶، ۳۷]. حضور این ساختار باعث کاهش شاخص جریان مذاب آن نسبت به P₀ می‌شود. با افزایش محتوای rPP، کوتاه شدن زنجیره‌ها در ساختار rPP تأثیر بیشتری را در رقابت با ساختارهای دارای پیوند عرضی نشان داده و MFI افزایش می‌یابد.

1. Extensometer
2. Scanning Electron Microscope (SEM)

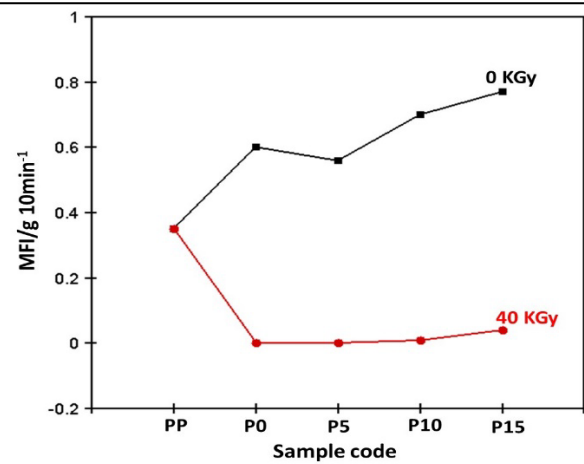


تخریب است. برای مشخص کردن تأثیر پرتو در القای پیوندهای متقابل عرضی، تست محتوای ژل روی نمونه‌های حاوی rPP صورت گرفت که نتایج آن در جدول ۲ آمده است. بدون تابش‌دهی میزان محتوای ژل rPP، PP و مخلوط‌های rPP/PP بسیار اندک است [۲۱]. بررسی نتایج نشان می‌دهد که مخلوط PP در حضور عامل القاکننده پیوند عرضی TMPTMA می‌تواند به طور مؤثر در دز ۴۰ kGy ژل شود. مشاهده مشابهی توسط سوارزا^۱ و همکاران نیز گزارش شده است که نشان می‌دهد تابش یونیزه‌کننده بر خاصیت اتصال عرضی PP و rPP تأثیر می‌گذارد. یک توضیح احتمالی ممکن است این باشد که انرژی تابشی جذب شده توسط پلی‌پروپیلن، برهم‌کنش‌های اولیه بین پرتوهای یونیزان و مولکول‌های پلی‌پروپیلن (یونیزاسیون و تحریک) را تسریع می‌کند و باعث واکنش‌های اتصال عرضی می‌شود [۳۸].

نمونه P0 در این دز حداکثر محتوای ژل ۳۸٪ را نشان می‌دهد. در حضور ۵٪ وزنی rPP، درصد ژل به حدود ۳۳٪ کاهش می‌یابد. در واقع حضور rPP منجر به کاهش اندک در محتوای ژل نسبت به نمونه P0 شده که به وقوع بریدگی زنجیره در نتیجه حضور rPP نسبت داده می‌شود. در حضور ۱۰٪ وزنی از rPP، محتوای ژل افزایش اندکی یافته و به ۳۴٪ می‌رسد. بر اساس نظر چارلزبی^۲ و پینر^۳، تشکیل پیوند عرضی ترجیحاً در مناطق آمورف رخ می‌دهد. بنابراین چگالی بالای اتصال عرضی در حوزه‌های آمورف rPP باعث تشکیل پیوندهای شیمیایی بین ماتریکس PP و rPP می‌شود. وجود این پیوندها باعث افزایش چسبندگی سطحی شده که می‌تواند بر خواص مکانیکی نیز مؤثر باشد [۳۹]. در حضور ۱۵٪ وزنی این مقدار به حدود ۳۲٪ می‌رسد. نتایج به دست آمده تأییدکننده نتایج آزمون MFI می‌باشد.

جدول ۲. محتوای ژل مخلوط‌های rPP/PP پرتودهی شده در دز ۴۰ kGy

شماره ترکیب	دوز دریافتی (kGy)	محتوای ژل (%)
P ₀	۴۰	۳۷٫۹۲ ± ۱٫۶۱
P _۵	۴۰	۳۲٫۶۶ ± ۳٫۴۹
P _{۱۰}	۴۰	۳۴٫۴۰ ± ۲٫۷۹
P _{۱۵}	۴۰	۳۱٫۹۷ ± ۶٫۴۹



شکل ۲. شاخص جریان مذاب به عنوان تابعی از نوع مخلوط پلی‌پروپیلن حاوی rPP در دزهای مختلف تابش‌دهی.

با پرتودهی نمونه‌ها، مقدار MFI در دز ۴۰ kGy برای همه نمونه‌ها که ژل تشکیل داده‌اند، نسبت به پلی‌پروپیلن خالص به شدت کاهش یافته، به نحوی که مقدار آن برای نمونه P0 و P5 قابل اندازه‌گیری نبود. با افزایش محتوای وزنی rPP، نمونه‌های مخلوط پلیمری مذاب جریان یافته و مقدار MFI به ترتیب برای نمونه‌های حاوی ۱۰ و ۱۵٪ وزنی از rPP به ۱۰ min / ۰٫۱ g و ۰٫۴ می‌رسد.

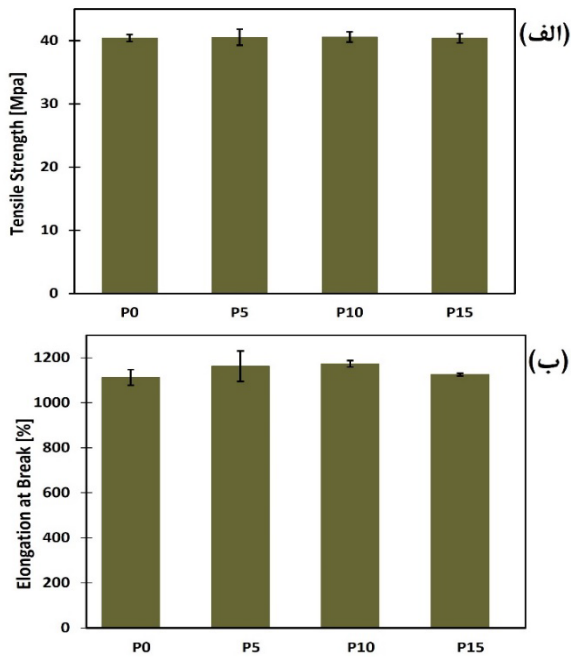
می‌توان نتیجه گرفت در غیاب تابش‌دهی، فراوری حرارتی PP و افزودن rPP به دلیل تخریب زنجیره‌ها و کاهش طول زنجیره‌های پلیمری، منجر به افزایش MFI می‌گردد. اما از سوی دیگر، پرتوفراوری باعث ایجاد اتصالات عرضی در سراسر مخلوط پلیمری شده و اثر منفی افزایش rPP و فراوری حرارتی کامپوزیت را تا حد زیادی کاهش داده و سرعت افزایش MFI را با افزایش محتوای rPP نیز کاهش می‌دهد. همچنین بررسی نتایج نشان می‌دهد که برای نمونه‌های P0 و P5، میزان پیوندهای عرضی تشکیل شده، در دز ۴۰ kGy به دلیل محتوای بالای PP بکر، زیاد بوده و پیوندهای متقابل مانع جاری شدن پلیمر در دمای ۲۳۰ °C شده‌اند، اما برای P10 و P15 با وجود دارا بودن مقدار ژل قابل قبول اما بریدگی زنجیره‌های اصلی به طور اجتناب‌ناپذیری به موازات اتصال عرضی پیش رفته است. این احتمالاً به دلیل حضور محتوای بالاتر از rPP و امکان تخریب بالاتر نمونه بازیافتی در ساختار مخلوط است.

۲.۳ محتوای ژل

در طول فرایند تابش‌دهی سه واکنش هم‌زمان در ساختار PP رخ می‌دهد که شامل اتصال عرضی، انشعاب زنجیره بلند و

1. Suarez
2. Charlesby
3. Pinner





شکل ۴. تغییرات (الف) استحکام کششی و (ب) درصد تغییر ازدیاد طول در نقطه شکست مخلوط‌های rPP/PP بدون تابش‌دهی.

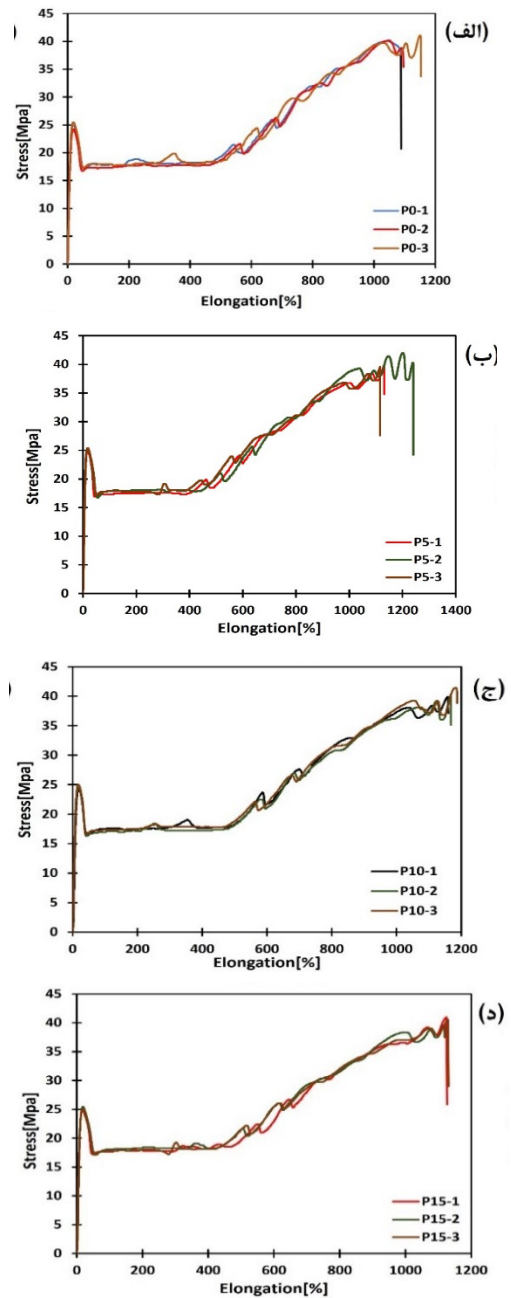
بررسی نتایج به دست آمده از نمونه‌های غیر پرتو دهی شده نشان می‌دهد که افزودن rPP تأثیری بر استحکام کششی مخلوط نهایی ندارد و تغییرات این پارامتر اندک است. همچنین تغییرات کرنش شکست هم اندکی افزایشی است، به نحوی که شکست نهایی آن‌ها در کرنش بالاتری نسبت به P0 روی می‌دهد. تنها در حضور ۱۵٪ وزنی از rPP کرنش شکست کاهش می‌یابد، اما همچنان کرنش شکست آن از نمونه P0 بیش‌تر است. سطح زیر نمودار تنش-کرنش، نشان‌دهنده تغییر شکل پلاستیک و رفتار نیمه-چکش‌خوار پلیمر است. در واقع پلی پروپیلن در حضور rPP، همچنان رفتار چکش‌خواری مناسبی را همانند نمونه بدون rPP از خود نشان می‌دهد [۲].

شکل ۵ (الف-د) نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌های مخلوط پرتو دهی شده PP را در محتوای ۰ تا ۱۵٪ وزنی از rPP نشان می‌دهد. همچنین شکل ۶ (الف و ب) تغییرات استحکام کششی و درصد ازدیاد طول در نقطه شکست را با تغییر محتوای rPP در نمونه تحت تابش‌دهی نشان می‌دهد.

بررسی نتایج نمونه‌های تحت تابش‌دهی نشان می‌دهد که حضور rPP و پرتو دهی نمونه‌ها، باعث تغییری در استحکام کششی تا محتوای وزنی ۱۰٪ نشده است. در محتوای بالاتر (۱۵٪ وزنی) این پارامتر کاهش می‌یابد که می‌تواند به دلیل می‌تواند به دلیل شکست زنجیره‌ها و به دنبال بالا بودن محتوای وزنی rPP، در اثر پرتو دهی باشد. نکته قابل توجه آن است که نتایج به دست آمده به طور کامل با نتایج به دست آمده از تست MFI و محتوای ژل هم‌خوانی دارد.

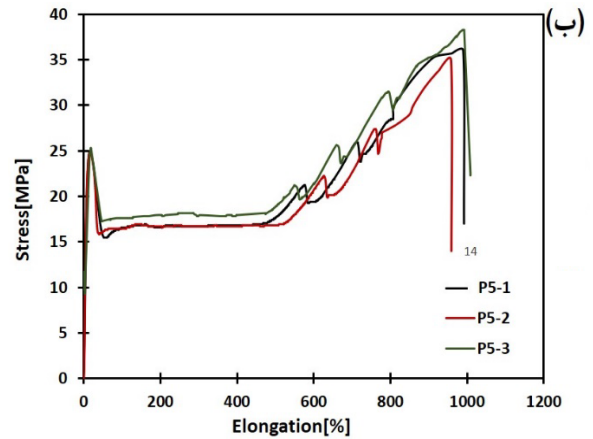
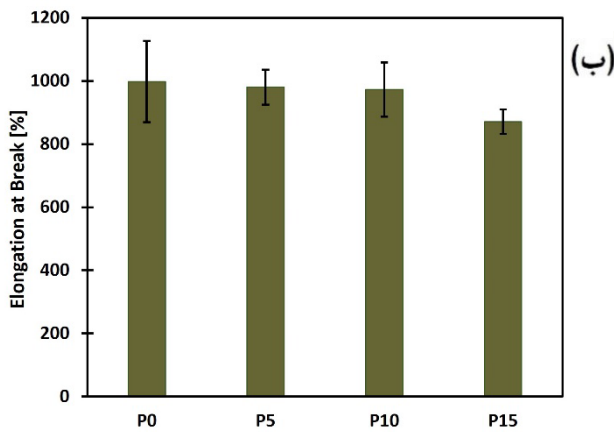
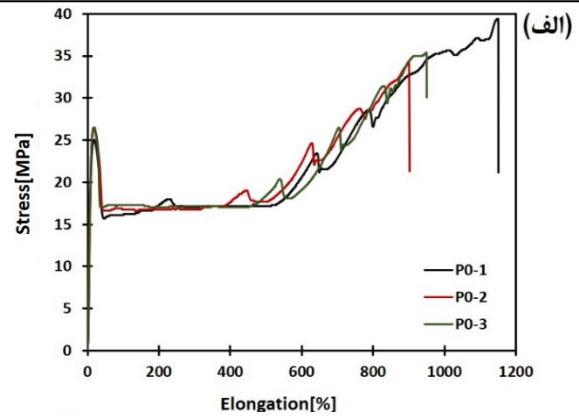
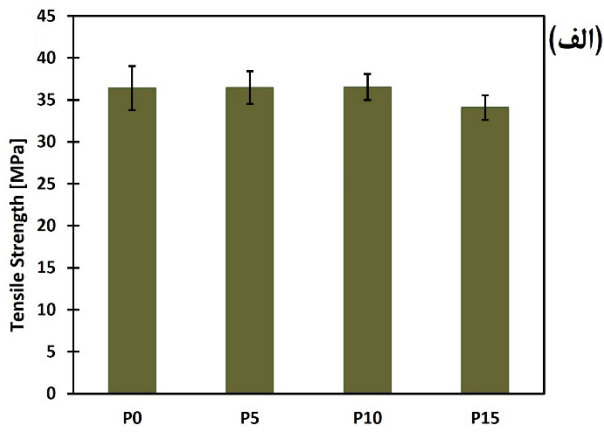
۳.۳ خواص مکانیکی

شکل ۳ (الف-د) نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌های مخلوط PP را در محتوای ۰ تا ۱۵٪ وزنی از rPP نشان می‌دهد. همچنین شکل ۴ (الف و ب) تغییرات استحکام کششی و درصد ازدیاد طول در نقطه شکست را با تغییر محتوای rPP در نمونه بدون تابش‌دهی نشان می‌دهد. بر اساس منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های حاوی rPP رفتار مکانیکی چکش‌خواری را نشان می‌دهند، بنابراین عملکردهای مکانیکی از جمله کشش، تسلیم، نرم شدن کرنش، کشش سرد و سخت شدن کرنش در منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌ها مشاهده می‌شود.



شکل ۳. منحنی رفتار تنش-کرنش مخلوط‌های بر پایه پلی پروپیلن حاوی rPP (الف) نمونه P0، (ب) نمونه P5، (ج) نمونه P10 و (د) نمونه P15 بدون پرتو دهی.

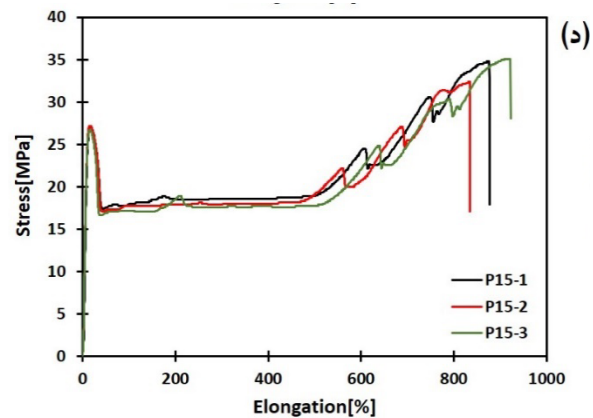
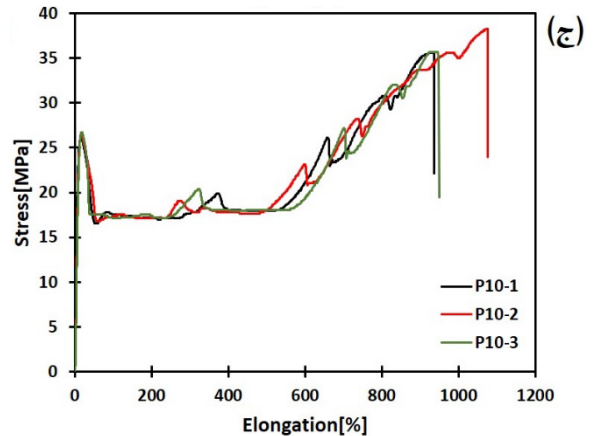




شکل ۶. تغییرات (الف) استحکام کششی و (ب) درصد تغییر ازدیاد طول در نقطه شکست مخلوط‌های تابش‌دهی شده rPP/PP در دز ۴۰ KGy.

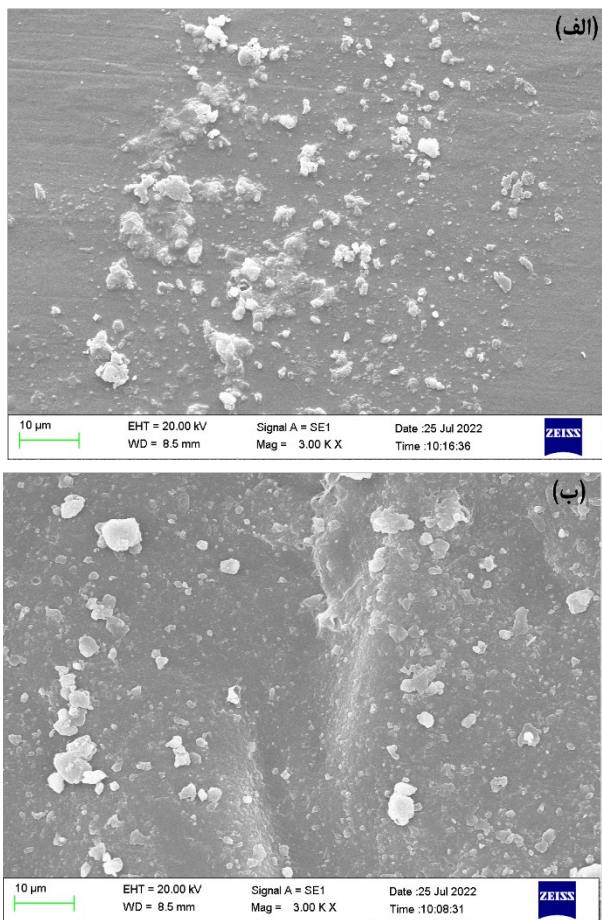
بررسی نتایج برای درصد ازدیاد طول در نقطه شکست نشان می‌دهد که در غیاب rPP و با تابش‌دهی نمونه P0، مقدار ازدیاد طول ۱۰٪ نسبت به نمونه P0 بدون تابش‌دهی کاهش یافته است. این کاهش را می‌توان به شبکه‌ای شدن PP تحت تأثیر تابش الکترونی نسبت داد که باعث کاهش چقرمگی مخلوط پلیمری می‌گردد. زمانی که چگالی پیوندهای عرضی افزایش یابد، حجم آزاد و ازدیاد طول در نقطه شکست نیز کاهش یافته، پلیمر سفت‌تر شده و خاصیت ارتجاعی آن کاهش می‌یابد.

در حضور ۱۰٪ وزنی از rPP، میزان کاهش کرنش شکست P1۰ تابش‌دهی شده نسبت به نمونه P1۰ (بدون تابش‌دهی) به ۱۷٪ می‌رسد. در این درصد وزنی نسبت به P0 تابش‌دهی شده، محتوای ژل کاهش یافته و در حضور rPP نیز انتظار می‌رود P1۰ بدون تابش‌دهی کرنش شکست بالاتری را نشان دهد. علت را می‌توان به تخریب بیشتر زمینه به علت حضور کربن نوع سوم در ساختار نسبت داد. با این حال نمونه‌های حاوی rPP همچنان چقرمه بوده، رفتار مکانیکی چکش‌خواری را حفظ کرده و در بدترین حالت P1۵ تابش‌دهی شده تنها کاهش ۲۰٪ در میزان ازدیاد طول را نشان داده است که قابل قبول می‌باشد.



شکل ۵. منحنی رفتار تنش-کرنش مخلوط‌های تابش‌دهی شده بر پایه پلی‌پروپیلن حاوی rPP (الف) نمونه P0، (ب) نمونه P5، (ج) نمونه P1۰ و (د) نمونه P1۵ در دز ۴۰ KGy.





شکل ۷. میکروگرافهای SEM از سطح شکست ترد مخلوط پلی پروپیلن در محتوای وزنی ۵٪ از rPP، (الف) بدون تابش دهی، (ب) تابش دهی شده در دز ۴۰ kGy.

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش، پلی پروپیلن بازیافتی با پلی پروپیلن بکر و عامل اتصال دهنده عرضی ترکیب و پس از پرتو دهی با دز ۴۰ kGy توسط تابش الکترونی، از نظر خواص فیزیکی-مکانیکی و ویژگی‌های ساختاری بررسی شد تا بهترین ترکیب درصد مشخص شود. به طور کلی تمام ترکیبات، خواص فیزیکی-مکانیکی مناسبی را نشان دادند، که ثابت می‌کند بازیافت تابشی مخلوط حاوی ضایعات پلی پروپیلن نیز استراتژی خوبی برای مدیریت پسماندهای پلیمری و کاهش مصرف پلیمر بکر PP از نظر اقتصادی و زیست محیطی است. نتایج MFI نشان داد که پرتو دهی پلی پروپیلن علاوه بر تخریب ساختار می‌تواند باعث ایجاد پیوندهای عرضی در مخلوط حاوی rPP شود به طوری که مقدار MFI مخلوطها بعد از پرتو دهی کاهش چشمگیری داشت. نتایج آزمون ژل نیز تأییدکننده این موضوع است. تغییرات اندکی در خصوص استحکام کششی و ازدیاد طول در نقطه شکست برای نمونه‌های بدون تابش دهی ثبت گردید. با

۴.۳ ساختار کامپوزیت

برای شناسایی ریزساختار مخلوط پلیمری، میکروگرافهای SEM در شکل ۷ نشان داده شده است که مربوط به (الف) کامپوزیت P۵ بدون تابش دهی و (ب) کامپوزیت P۵ تابش دهی شده در دز ۴۰ kGy می‌باشد.

تابش دهی مواد پلیمری روی برهم کنش ذرات با بستر پلیمری اثرگذار است. بررسی تصاویر نشان می‌دهد که rPP به طور کامل و به صورت همگن در بستر PP ذوب نشده است که می‌تواند به علت حضور افزودنی‌های موجود در rPP و یا قسمت‌های دارای پیوند عرضی در ساختار rPP باشد. بر اساس شکل ۷ (الف) به نظر می‌رسد ذرات به بستر پلیمری نچسبیده‌اند و با شکست ترد نمونه‌ها در نیتروژن مایع، سطح شکستی به دست آمده است که ذرات چسبندگی مناسبی به بستر نداشته و می‌تواند به دلیل ماهیت متفاوت سطح ذرات rPP با بستر PP می‌تواند باشد. در این سطح شکست، چسبندگی ضعیفی بین rPP و PP به دلیل تفاوت در آب‌گریزی بین PP و rPP مشاهده می‌شود. با این حال، به نظر می‌رسد با تابش دهی نمونه پیوند فصل مشترک آن‌ها بهبود یافته و ذرات rPP برهم کنش مناسب‌تری با بستر PP پیدا نموده‌اند. این نتایج نشان می‌دهد که پرتو دهی اثر مثبت بر چسبندگی سطحی بین PP و rPP دارد. در واقع استفاده از تابش الکترونی به طور قابل توجهی کیفیت ساخت مخلوط نهایی را ارتقا داده است، به این معنی که مخلوط تهیه شده با استفاده از rPP افزایش واضح‌تری از نیروهای بین مولکولی با بستر PP را نشان می‌دهد و ذرات چسبندگی بهتری با سطح دارند. واسمیرنوف و دیون^۱ [۴۰-۴۴] نشان دادند که سطح نمونه‌های تحت تابش دهی بهبود جزئی را نسبت به نمونه‌های بدون تابش نشان می‌دهد که احتمالاً به دلیل سازمان دهی مجدد^۲ زنجیره‌های ماتریس در طول تابش دهی است و در واقع با پرتو دهی نمونه‌ها چگالی اتصال عرضی بین زنجیره‌های پلیمری افزایش یافته و چسبندگی بین ذرات و بستر افزایش می‌یابد. بر اساس افزایش برهم کنش بعد از پرتو دهی می‌توان نتیجه گرفت به دلیل افزایش بهبود چسبندگی در نتیجه افزایش چگالی عرضی، نتیجه حاصل از کاهش کرنش شکست در نتیجه پرتو دهی، با نتایج آزمون SEM در توافق است.

1. Smirnov and Deyun
2. Reorganization



11. Al-Mulla A, Alfadhel K, Qambar G, Shaban H. Rheological study of recycled polypropylene–starch blends. *Polym. Bull.* 2013;70:2599.
 12. Clough R.L. Polymer Recycling; Potential Application of Radiation Technology, UNT Digital Library, *University of North Texas Libraries*. 2000.
 13. Jubinville D, Esmizadeh E, Tzoganakis C, Mekonnen T. Thermo-mechanical recycling of polypropylene for the facile and scalable fabrication of highly loaded wood plastic composites. *Compos. B. Eng.* 2021;219:108873.
 14. Zdiri K, Elamri A, Hamdaoui M, Harzallah O, Khenoussi N, Brendlé J. Reinforcement of recycled PP polymers by nanoparticles incorporation. *Green Chem. Lett. Rev.* 2018;11:296.
 15. Khademi F, Ma Y, Ayranci C, Choi K, Duke K. Effects of Recycling on the Mechanical Behavior of Polypropylene at Room Temperature Through Statistical Analysis Method. *Polym. Eng. Sci.* 2016;56:1283.
 16. Rizvi S.H, Masood S.H, Sbarski I. An Investigation of Mechanical, Thermal and Creep Behaviour of Recycled Industrial Polyolefins. *Prog. Rubber Plast. Recycl. Technol.* 2007;23:97.
 17. Bertin S, Robin J.-J. Study and characterization of virgin and recycled LDPE/PP blends. *Eur. Polym. J.* 2002;38:2255.
 18. Wypych G. Handbook of Material Weathering. *Elsevier Science*. 2008.
 19. Goss B.G.S, Nakatani H, George G.A, Terano M. Catalyst residue effects on the heterogeneous oxidation of polypropylene. *Polym. Degrad. Stab.* 2003;82:119.
 20. Samat N, Lazim N.H.M, Motsidi S.N.R, Hassan N.A. Performance Properties of Irradiated Recycled Polypropylene as a Compatibilizer in Recycled Polypropylene/Microcrystalline Cellulose Composites. *Mater. Sci. Forum.* 2017;894:62.
 21. Lazim N.H, Samat N. The influence of irradiated recycled polypropylene compatibilizer on the impact fracture behavior of recycled polypropylene/microcrystalline cellulose composites. *Polym. Compos.* 2019;40:E24.
 22. Burillo G, Clough R.L, Czikovszky T, Guven O, Le Moel A, Liu W, Singh A, Yang J, Zaharescu T. Polymer recycling: potential application of radiation technology. *Radiat. Phys. Chem.* 2002;64:41.
 23. Zaaba N.F, Ismail H. Comparative study of irradiated and non-irradiated recycled polypropylene/peanut shell powder composites under the effects of natural weathering degradation. *Bioresour.* 2018;13:487.
 24. Liu T, Nafees A, Khan Sh, Javed M.F, Aslam F, Alabduljabbar H, Xiong J.J, Ijaz Khan M, Malik M.Y. Comparative study of mechanical properties between irradiated and regular plastic waste as a replacement of cement and fine aggregate for manufacturing of green concrete. *Ain Shams Eng. J.* 2022;13:101563.
- این حال برای نمونه‌های تحت تابش‌دهی، نمونه حاوی ۱۰ درصد وزنی استحکام کششی مشابه نمونه بدون rPP را نشان و ازدیاد طول در شکست برای نمونه‌های تابش‌دهی شده حداکثر کاهش ۲۰٪ را دارد. به نظر می‌رسد که تابش‌دهی الکترونی توانسته خواص سطح مشترک rPP و PP را ارتقا دهد و برهم‌کنش مناسبی به وجود آمده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، می‌توان نتیجه گرفت که نمونه حاوی ۱۰٪ وزنی از rPP بهترین محتوای وزنی برای ساخت مخلوط‌های حاوی rPP دارای خواص بهبود یافته و قابل قبول به منظور کاهش اثرات زیست محیطی و اقتصادی پسماندهای پلیمری است.

مراجع

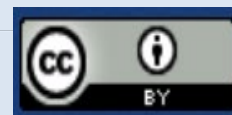
1. Curtzwiler G.W, Schweitzer M, Li Y, Jiang S, Vorst K.L. Mixed post-consumer recycled polyolefins as a property tuning material for virgin polypropylene. *J. Clean. Prod.* 2019;239:117978.
2. Ajorloo M, Ghodrat M, Kang W.-H. Incorporation of Recycled Polypropylene and Fly Ash in Polypropylene-Based Composites for Automotive Applications. *J. Polym Environ.* 2021;29:1298.
3. Xanthos M. Recycling of the #5 Polymer. *Science.* 2012;337:700.
4. Wang K, Bahlouli N, Addiego F, Ahzi S, Rémond Y, Ruch D, Muller R. Effect of talc content on the degradation of re-extruded polypropylene/talc composites. *Polym. Degrad. Stab.* 2013;98:1275.
5. Zulkifli N.I, Samat N, Anuar H, Zainuddin Z. Mechanical properties and failure modes of recycled polypropylene/microcrystalline cellulose composites. *Mater. Des.* 2015;69:114.
6. Yao Z.T, Chen T, Li H.Y, Xia M.S, Ye Y, Zheng H. Mechanical and thermal properties of polypropylene (PP) composites filled with modified shell waste. *J. Hazard. Mater.* 2013;262:212.
7. Wang K, Addiego F, Bahlouli N, Ahzi S, Rémond Y, Toniazio V, Impact response of recycled polypropylene-based composites under a wide range of temperature: Effect of filler content and recycling. *Compos. Sci. Technol.* 2014;95:89.
8. Borovanska I, Krastev R, Benavente R, Pradas M.M, Lluch A.V, Samichkov V, Iliev M. Ageing effect on morphology, thermal and mechanical properties of impact modified LDPE/PP blends from virgin and recycled materials. *J. Elastomers Plast.* 2013;46:427.
9. Brachet P, Høydal L.T, Hinrichsen E.L, Melum F. Modification of mechanical properties of recycled polypropylene from post-consumer containers. *J. Waste Manag.* 2008;28:2456.
10. Al-Mulla A, Shaban H. Study on compatibility of recycled polypropylene/high-density polyethylene blends using rheology. *Polym. Bull.* 2014;71:2335.



25. Khan M.I, Huat H.Y, Dun M.H.M, Sutanto M.H, Jarghouyeh E.N, Zoorob S.E. Effect of Irradiated and Non-Irradiated Waste PET Based Cementitious Grouts on Flexural Strength of Semi-Flexible Pavement. *Materials (Basel)*. 2019;12:4133.
26. Zaaba N.N.F, Ismail H. Property Comparison Before and After Electron Beam Irradiation of Recycled Polypropylene/Peanut Shell Powder (Rpp/Psp) Composites. *J. Phys. Conf. Ser.* 2018;1082:012017.
27. Samat N, Yahya M.S, Lazim N.H.M. The compatibility effects of irradiated recycled PP on the mechanical and water properties of recycled PP/microcrystalline cellulose composites. *AIP Conf. Proc.* 2016;1774:020008.
28. Sayed E.S.F.E. Recycling of some polymeric wastes using ionizing radiation, Master Degree in Sciences (M.Sc.). *Chemistry Department, Suez Canal University*. 2010.
29. Lazim N.H, Samat N. Effects of Irradiated Recycled Polypropylene Compatibilizer on the Mechanical Properties of Microcrystalline Cellulose Reinforced Recycled Polypropylene Composites. *Procedia Eng.* 2017;184:538.
30. Agency I.A.E. Radiation synthesis and modification of polymers for biomedical applications. in *Industrial Applications and Chemistry Section*. 2002.
31. Albano C, Perera R, Silva P. Effects of gamma radiation in polymer blends, in composites with micro and nano fillers and in functionalized polyolefins. *Rev. Latinoam. de Metal. y Mater.* 2010;30:3.
32. Naikwadi A.T, Sharma B.K, Bhatt K.D, Mahanwar P.A. Gamma Radiation Processed Polymeric Materials for High Performance Applications: A Review. *Front. Chem.* 2022;10.
33. Bee S.T, Sin L.T, Ratnam C.T, Chew W.S, Rahmat A.R. Enhancement effect of trimethylpropane trimethacrylate on electron beam irradiated acrylonitrile butadiene styrene (ABS). *Polym. Bull.* 2018;75:5015.
34. Ng H.M, Bee S.T, Ratnam C.T, Sin L.T, Phang Y.Y, Tee T.T, Rahmat A.R. Effectiveness of trimethylpropane trimethacrylate for the electron-beam-irradiation-induced cross-linking of polylactic acid. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B Nucl Instrum Meth B*. 2014;319:62.
35. Wen Z, Jianying L, Yuexiang W, Wei L, Huaji Z. Effect of TMPTMA and TAIC on the [properties of expanded polypropylene](#). 2010;27(4):5.
36. Dimassi S.N, Hahladakis J.N, Yahia M.N.D, Ahmad M.I, Sayadi S, Al-Ghouti M.A. Degradation-fragmentation of marine plastic waste and their environmental implications: A critical review. *Arab. J. Chem.* 2022;15:104262.
37. Bracco P, Costa L, Luda M.P, Billingham N. A review of experimental studies of the role of free-radicals in polyethylene oxidation. *Arab. J. Chem.* 2018;155:67.
38. Suarez J.C.M, Mano E.B, Pereira R.A. Thermal behavior of gamma-irradiated recycled polyethylene blends. *Arab. J. Chem.* 2000;69:217.
39. Charlesby A, Pinner S.H, Bowden F.P. Analysis of the solubility behaviour of irradiated polyethylene and other polymers. *Proc. Math. Phys. Eng. Sci. P ROY SOC A-MATH PHY.* 1997;249:367.
40. Smirnov L, Deyun E. Evolution of the molecular mass distribution parameters during γ -radiolysis. *Polym. Sci.* 1999;41:506.
41. Ndiaye D, Tidjani A. Physical changes associated with gamma doses on Wood/ Polypropylene Composites. *OP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2014;62:012025.
42. Shujaei M.H, Homsy A.H, Talaipour M, Ghasemi A. Effect of gamma rays on the physical, mechanical, morphological and biological properties of several wood-plastic structures. *Iranian Wood and Paper Science Research*. 2014;37:86 [In Persian].
43. Albano C, Perera R, Silva P. Effects of gamma radiation in polymer blends, in composites with micro and nano fillers and in functionalized polyolefins. *Rev. Latinoam. de Metal. y Mater.* 2010;30:3.
44. Niang B, Ndiaye D, Khol M, Babacar L, Diallo A. Gamma-radiation-induced HDPE/Wood Composite: Studies of Morphological, Mechanical and Thermal Properties of the Composites. *Chem. Sci. Int. J.* 2017;20:1.

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

**استناد به این مقاله**

رفیعی سرمزده، زهرا، تراب مستعدی، میثم، اسداله زاده، مهدی، ترکمان، رضوان. (۱۴۰۳)، اثرات تابش پرتو الکترونی و ضایعات پلی‌پروپیلین به عنوان پلیمر بازیافتی بر خواص فیزیکی- مکانیکی و مورفولوژیکی مخلوط پلی‌پروپیلین/پلی‌پروپیلین بازیافتی. *مجله علوم و فنون هسته‌ای*. ۱۰۸(۲)، ۱۰۵-۱۱۴. DOI: <https://doi.org/10.24200/nst.2024.1575> Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1575.html

