



# بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

## بررسی تخریب ناشی از تابش نوترون‌های سریع در حفاظ پلیمری PE/B<sub>4</sub>C

اسکندر، اسدی امیرآبادی : زهرا، سلطانی : غلامرضا، اطاعتی : نیما، قلعه: اسمعیل، بیات: امیر محمد، بیگ زاده

<sup>۱</sup>دانشگاه شهید بهشتی، پژوهشکده لیزر و پلاسما

<sup>۲</sup>دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک

<sup>۳</sup>دانشگاه دامغان، دانشکده فیزیک

<sup>۴</sup>سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم فنون هسته‌ای

### چکیده:

از کامپوزیت پلی‌اتیلن- کاربیدبور (PE/B<sub>4</sub>C) در کاربردهای متنوعی به عنوان حفاظ نوترون استفاده شده است. به منظور بررسی میزان مقاومت پرتوی این حفاظ، نمونه‌های ورقه‌ای از کامپوزیت پلی‌اتیلن با درصدهای وزنی (۱، ۵ و ۳۰ درصد کاربیدبور) ساخته شده و نمونه‌ها با شار بالایی از نوترون‌های سریع (با انرژی MeV ۲٫۵) و با شدت  $2 \times 10^{11}$  نوترون بر سانتی‌متر مربع بر ثانیه به مدت ۵، ۱۰ و ۲۰ ساعت پرتو دهی شدند. با استفاده از نظریه کشسانی نشان داده شد که پرتو دهی نمونه‌ها، باعث کوتاهتر شدن وزن مولکولی بین اتصالات عرضی شده و بر این اساس تنش‌های مکانیکی سریعتر به تمام نقاط گسترش یافته و در نتیجه باعث ایجاد افت قابل توجه در خواص مکانیکی نمونه‌های کامپوزیت شده است. کلید واژه: تخریب تابشی، نوترون‌های سریع، کامپوزیت، نظریه کشسانی، خواص فیزیکی.

### ۱- مقدمه

تأثیر عمده تابش با انرژی بالا بر روی پلیمرهای آلی، ایجاد حالت یونش و برانگیختگی است. متعاقب آن، گسیختگی پیوندهای شیمیایی متلاشی شدن زنجیره پلیمری را به همراه دارد که اجزاء آن ممکن است الکترون‌های جفت نشده حاصل از پیوندهای شکسته شده را داشته باشند. بنابراین، رادیکال‌های آزاد تولید شده ممکن است موجب تغییر ساختار شیمیایی پلیمر و خواص فیزیکی متفاوت پلیمر شوند. بر اساس نوع ساختار شیمیایی، ممکن است در پلیمر، تخریب زنجیره‌ها و یا برعکس تولید پیوندهای عرضی و شبکه سه بعدی بین زنجیره‌های اصلی اتفاق افتد [۱]. بنابراین با توجه به نکات ذکر شده در صورت به کارگیری حفاظ‌های پایه پلیمری به ویژه پلی‌اتیلن به عنوان کندکننده نوترون، بررسی میزان تخریب ناشی از تابش نوترون‌های سریع در مدت زمان طولانی استفاده از حفاظ، بسته به نوع کاربرد، حائز اهمیت باشد. در این پژوهش، ابتدا با استفاده از نظریه کشسانی به بررسی میزان چگالی اتصالات عرضی ایجاد شده در اثر تابش شار بالای نوترون‌ها و نیز تغییرات وزن مولکولی بین زنجیره‌ها پرداخته می‌شود. در ادامه، تغییرات ماکروسکوپیکی ایجاد شده نظیر تغییر خواص مکانیکی شامل استحکام کششی، ازدیاد طول تا پارگی، مدول کششی کامپوزیت که ترکیبی از ریزدانه پلی‌اتیلن سنگین ساخت داخل و درصدهای معینی از ذرات کاربید بور، پرداخته می‌شود.



# بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

## ۲- مواد و روش‌ها

### • ساخت صفحات

در این پژوهش از ذرات کاربیدبور به عنوان تقویت کننده استفاده شد و پلی اتیلن سنگین مورد استفاده نیز با شاخص جریان مذاب (g/10min) ۰.۳۵ و چگالی (g/cm<sup>3</sup>) ۰.۹۵۹، گرید HB۰۰۳۵ (محصول شرکت پتروشیمی بندرامام) به عنوان پایه پلیمر می باشد. به منظور بررسی تاثیر میزان ماده تقویت کننده در خواص نهایی کامپوزیت، نمونه‌های کامپوزیت با ترکیب‌های ۰، ۱، ۵ و ۳۰ درصد نیاز تقویت کننده به روش زیر ساخته شد. اختلاط مواد با استفاده از اکسترودر دو پیچه همسوگر انجام گردید. برای ساخت کامپوزیت پلی اتیلن کاربید بور از اکسترودر دو مارپیچ مدل ZSK25 ساخت آلمان استفاده شد. عملیات اختلاط مواد بصورت همزمان انجام شد و برای خشک شدن، مواد اختلاط با سرعت ۲۵۰ rpm در محدوده دمایی ۱۷۰-۱۸۵ انجام شد. صفحات با استفاده از دستگاه پرس داغ در دمای ۱۹۰°C و تحت فشار ۲۵ مگاپاسکال به طریق قالب گیری فشاری تهیه شدند. بعد از آن، نمونه‌ها در همان فشار تا دمای محیط سرد شدند.

### • پرتو دهی و ارزیابی خواص

نمونه‌ها در فاصله ۸ سانتیمتری از قلب راکتور تحت بمباران به شدت  $2 \times 10^{11}$  نوترون بر سانتیمتر مربع بر ثانیه به مدت ۵، ۱۰ و ۲۰ ساعت مورد پرتو دهی قرار گرفت.

به منظور ارزیابی خواص مکانیکی، آزمون کشش در دما یا تا نقطه انقباض استاندارد ASTM D638 با استفاده از دستگاه کشش HIWA200 و با سرعت کشش ۵۰ mm/min انجام شد. در ادامه استحکام مورد بررسی تغییر طول اندازه گیری شد که نتیجه نهایی به عنوان میانگین ۵ بار تکرار برای هر نمونه گزارش شده است.

تعداد اتصالات عرضی در واحد حجم، چگالی اتصالات عرضی نامیده می شود. چگالی اتصالات عرضی پلیمر،  $v$ ، با استفاده از نظریه کشسانی، که با رابطه  $(v = 20/3 \epsilon RT)$  بیان می شود، قابل محاسبه است. در این رابطه  $\epsilon$  کرنش خزشی یا همان درصد افزایش طول،  $T$  دما، در این آزمون برابر با  $25^\circ C$  و مقدار  $R$  ثابت گازها نیز  $J/mol K$  است [۲].

### ۳- نتایج حاصل از پرتو دهی

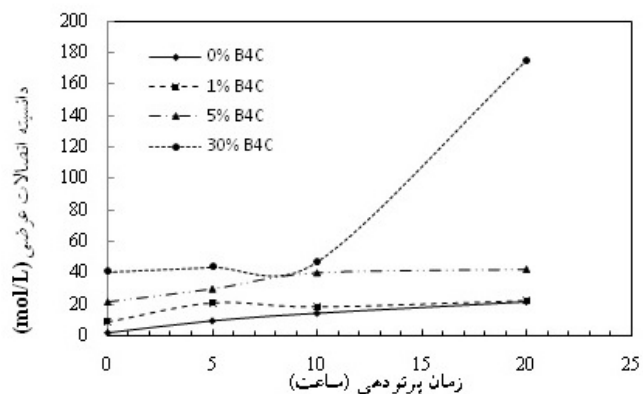
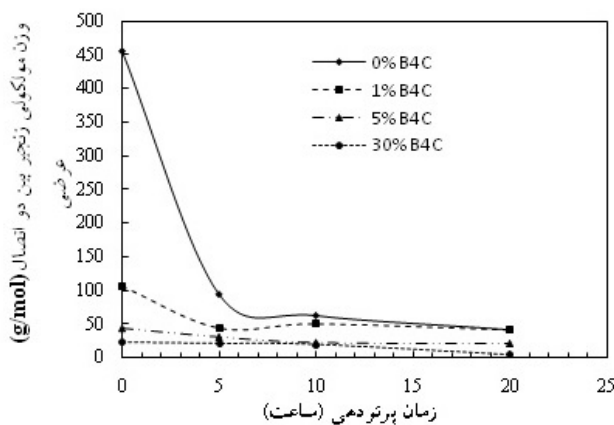
چگالی اتصالات عرضی بر حسب زمان پرتو دهی در شکل ۱ نشان داده شده است. همانطور که در نمودارها مشاهده می شود، در نمونه پلی اتیلن خالص و کامپوزیت‌های ۱ و ۵ درصد کاربید بور با افزایش زمان پرتو دهی، چگالی اتصالات روند افزایشی تقریباً آرامی را نشان می دهد و بعد از گذشت ۱۰ ساعت پرتو دهی افزایشی مشاهده نمی شود و تقریباً ثابت می شود. در واقع فرآیند شبکه‌ای شدن در این نمونه‌ها به حالت اشباع رسیده است. این در حالی است که در ترکیب ۳۰ درصد کاربید بور بعد از ۱۰ ساعت پرتو دهی افزایش قابل توجهی در چگالی اتصالات عرضی دیده می شود. از طرفی افزایش درصد ذرات نیز منجر به افزایش چگالی اتصالات عرضی شده است. در واقع ذرات در میان زنجیرهای پلیمر کامپوزیت موجب برقراری پیوند بیشتر و متراکم تر شدن شبکه می شود. در نتیجه زنجیرها به یکدیگر نزدیکتر شده و امکان تشکیل پیوندهای عرضی بیشتر را فراهم می کند. وزن مولکولی بین اتصالات عرضی بر حسب دز در شکل ۲ نشان داده شده است. وزن مولکولی بین اتصالات عرضی در اثر تابش کاهش پیدا کرده است که این کاهش در



# بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

نمونه‌ی حاوی ۳۰ درصد کاربید بور بیشتر نمود پیدا می‌کند. کوتاه شدن زنجیره‌های پلیمر باعث می‌شود که تنش‌های مکانیکی سریعتر به تمام نقاط گسترش یافته و در نتیجه موجب شکننده‌تر شدن نمونه خواهد شد. مقادیر استحکام تسلیم بر حسب زمان پرتوده‌ی در شکل ۳ رسم شده است. با افزایش زمان پرتودهی تا ۵ ساعت که معادل شار  $10^{15} \text{ n/cm}^2$  است استحکام در پلی‌اتیلن و کامپوزیت روند صعودی را نشان می‌دهد. بعد از آن، در پلی‌اتیلن و کامپوزیت حاوی ۱٪ مقدار استحکام به مقدار ثابتی رسیده ولی در نمونه‌های ۵ و ۳۰ درصد با افزایش زمان مقدار استحکام در نقطه شکست کاهش می‌یابد. ایجاد پیوندهای عرضی در پلی‌اتیلن باعث تغییرات، بی‌نظمی و کاهش بلورینگی می‌شود. ساختار پلی‌اتیلن به گونه‌ای است که زنجیرها به صورت درهم رفته‌اند و با اعمال نیروی کشش، زنجیرها از هم باز می‌شوند که نتیجه آن افزایش طول قطعه است. با ایجاد پیوندهای عرضی در پلی‌اتیلن، استحکام کششی نمونه‌ها با افزایش دز جذب شده افزایش چشمگیری می‌یابد. هنگامیکه در نمونه‌ها پیوند عرضی ایجاد می‌شود، این عمل باعث ایجاد پیوندهای شیمیایی و به تبع آن سبب پایدارتر شدن زنجیرهای پلی‌اتیلن می‌گردد. بنابراین نمونه می‌تواند هنگام اعمال کشش تا نقطه شکست نیروی بیشتری را تحمل کند. نمونه حاوی ۱٪ کاربید بور نیز به دلیل درصد پایین رفتاری مشابهی پلی‌اتیلن خالص دارد. در حالیکه با افزایش درصد ذرات در اطراف آن، زمینه پلیمری بیشتر کشیده شده و به دلیل عدم چسبندگی کافی و فصل مشترک ضعیف، حفره‌های کوچک تشکیل و در اثر استمرار تنش، این حفره‌ها بزرگتر و به یکدیگر پیوسته شده و باعث ایجاد حفره‌های بزرگتر می‌شوند. در نتیجه قطعه می‌شکند.



شکل ۱. Error! No text of specified style in document. دانسیته اتصالات عرضی بر حسب زمان پرتودهی

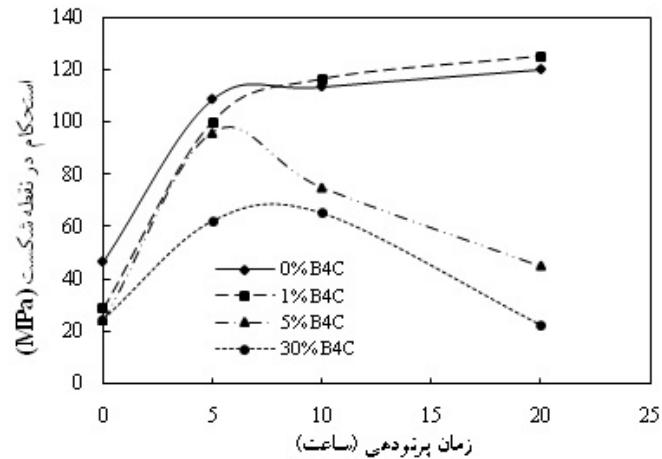
شکل ۲. Error! No text of specified style in document. وزن مولکولی بین دو اتصال عرضی بر حسب زمان

پرتودهی



# بیست و یکمین کنفرانس هفتای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ و دانشگاه اصفهان



شکل ۳. استحکام تسلیم بر حسب زمان پرتو دهی

در جدول ۱ مقادیر ازدیاد طول تا پارگی در نقطه شکست را نشان می‌دهد. ازدیاد طول در شکست در پلی اتیلن خالص با افزایش دز جذبی کاهش نشان می‌دهد. آزادی حرکت زنجیرها در اثر ایجاد پیوندهای عرضی کاسته می‌شود و نمونه‌ها نمی‌توانند ازدیاد طول زیادی داشته باشند. بنابراین ازدیاد طول نمونه‌های شبکه‌ای شده نسبت به پلی اتیلن خالص کمتر می‌گردد. ایجاد پیوندهای عرضی بیشتر در نمونه‌ها باعث افزایش نسبی پایداری زنجیرهای در هم رفته پلی اتیلن می‌شود که در نتیجه، نمونه‌ها کرنش بیشتری را تحمل می‌کنند. اما زمانیکه تعداد پیوندهای عرضی از یک حدی بیشتر شود لغزش زنجیرها روی یکدیگر کاهش می‌یابد و در نتیجه نمونه در کرنش‌های کمتری پاره می‌شود. به همین دلیل در نمونه پلی اتیلن خالص با افزایش دز ازدیاد طول در شکست کاهش می‌یابد. ولی در مورد کامپوزیت‌ها بنظر می‌رسد تابش تغییر چشمگیری را در ازدیاد طول کامپوزیت‌ها ایجاد نکرده است. از طرفی افزودن ذرات، ازدیاد طول در شکست را در تمام دزها به شدت کاهش داده است و مقادیر آن با افزایش دز روند نسبتاً ثابتی داشته است. مقادیر ازدیاد طول در شکست در پلی اتیلن خالص تفاوت قابل ملاحظه‌ای با کامپوزیت‌ها دارد که رفتار پلاستیکی در آن را تایید می‌کند در حالیکه در کامپوزیت مقادیر ازدیاد طول در شکست به گونه‌ای است که نشان‌دهنده شکنندگی در کامپوزیت، بدلیل وجود درصد بالای بور ذرات در آن است.

جدول ۱. درصد ازدیاد طول در نقطه شکست پلی اتیلن و کامپوزیت بر حسب زمان پرتو دهی

ازدیاد طول در نقطه شکست (%)				زمان پرتو دهی (ساعت)
کامپوزیت پلی اتیلن / ۳۰٪ کاربید بور	کامپوزیت پلی اتیلن / ۵٪ کاربید بور	کامپوزیت پلی اتیلن / ۱٪ کاربید بور	پلی اتیلن	
۳	۷	۱۹	۱۴۷	۰
۲٫۸	۵	۸	۱۸	۵
۲٫۶	۳٫۷	۹٫۱	۱۲	۱۰
۰٫۷	۳٫۵	۷٫۵	۸	۲۰



# بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

## ۴- بحث و نتیجه گیری

به منظور بررسی میزان مقاوت پرتوی کامپوزیت پلی اتیلن با درصد های ۱، ۵ و ۳۰ درصد کاربرد بور در برابر تابش شار بالایی از نوترونهای با انرژی  $2.5\text{MeV}$  تغییر خواص مکانیکی نمونه های تابش دهی شده و مرجع مورد بررسی قرار گرفت. افت چشمگیری در استحکام مکانیکی نمونه های کامپوزیت اتیلن نسبت به نمونه خالص پلی اتیلن با افزایش شار نوترون ها، اندازه گیری شد. با استفاده از نظریه کشسانی نشان داده شد که پرتو دهی نمونه ها، باعث کوتاهتر شدن وزن مولکولی بین اتصالات عرضی شده است. لذا تنش های مکانیکی سریعتر به تمام نقاط گسترش یافته و در نتیجه موجب شکننده تر شدن نمونه خواهد شد. حضور درصد بالای ذرات کاربرد بور در زمینه پلیمری، به دلیل عدم چسبندگی کافی و فصل مشترک ضعیف، باعث می شود در اطراف ذرات، زمینه پلیمری بیشتر کشیده شده و حفره های کوچک تشکیل شده و در اثر استمرار تنش، به هم پیوستن حفره ها منشأ ایجاد ترک در زمینه و در نهایت شکست نمونه است. با توجه به اینکه در کامپوزیت های پلیمری، استحکام کششی تابعی از درصد ذرات تقویت کننده و نیز درصد پیوندهای عرضی و درصد پارگی زنجیرهای پلیمری است می توان این گونه نتیجه گرفت که برآیند فعل و انفعالات یاد شده تعیین کننده است.

## ۵- مراجع

- [1] A. G. Chmielewski, M. Haji-Saeid, S. Ahmed, "Progress in radiation processing of polymers", Nucl. Instrum. Meth., B236 (2005) 44.
- [2] C. Harrison, E. Burgett, N. Hertel, E. Gmlke, Polyethylene/Boron Composites for Radiation Shielding Applications, AIP Conf. Proc. 969 (2008) 484.