

طیف‌سنجی طول عمر نابودی پوزیترون ۲- آشنایی با روش و انواع کاربردهای آن در علم پلیمر

Positron Annihilation Life-time Spectroscopy (PALS) II. Introduction and Applications in Polymer Science

الناز اسمی زاده^۱، محمد رضوی نوری^{۱*}، علی کلاتی وحید^۲

۱- تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، پژوهشکده فرایند، صندوق پستی ۱۱۵-۱۴۹۶۵

۲- اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی شیمی، صندوق پستی ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱

در بخش اول مقاله، فن طیف‌سنجی طول عمر نابودی پوزیترون، اجزای آن و معادلات به‌کار رفته در تفسیر نتایج بیان شد. در این روش، طول عمر پوزیترون در جسم به وسیله از بین رفتن آن با واکنش پوزیترونیم اندازه‌گیری و به شکل یک طیف نشان داده می‌شود. از طیف طول عمر نابودی پوزیترون می‌توان برای شناسایی مواد پلیمری بهره جست. فن طیف‌سنجی طول عمر نابودی پوزیترون در بررسی حجم آزاد در مواد مختلف از جمله پلیمرها، اندازه‌گیری دمای انتقال شیشه‌ای-لاستیک پلیمرها و بررسی امتزاج‌پذیری آمیخته‌های پلیمری قابل استفاده است. در بخش دوم مقاله، کاربردهای طیف‌سنجی طول عمر نابودی پوزیترون به تفصیل ارائه شده است.

بسیار ش
فصلنامه پژوهشی-آموزشی
سال دوم، شماره ۱،
صفحه ۲۹-۲۲، ۱۳۹۱
ISSN: 2252-0449

چکیده



الناز اسمی زاده



محمد رضوی نوری



علی کلاتی وحید

واژگان کلیدی

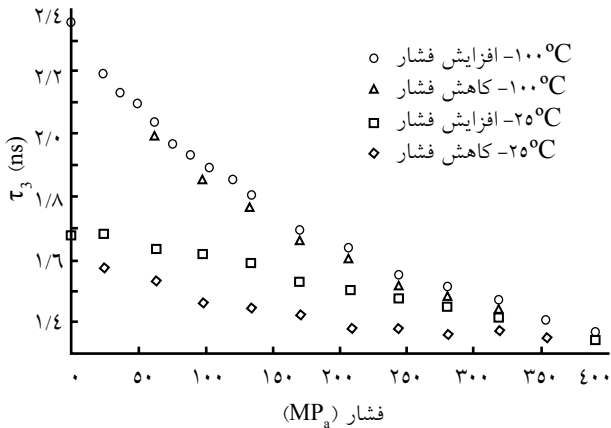
پوزیترون،
پوزیترونیم،
طول عمر،
دمای انتقال شیشه‌ای-لاستیک،
امتزاج‌پذیری

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

m.razavi@ippi.ac.ir

مقدمه

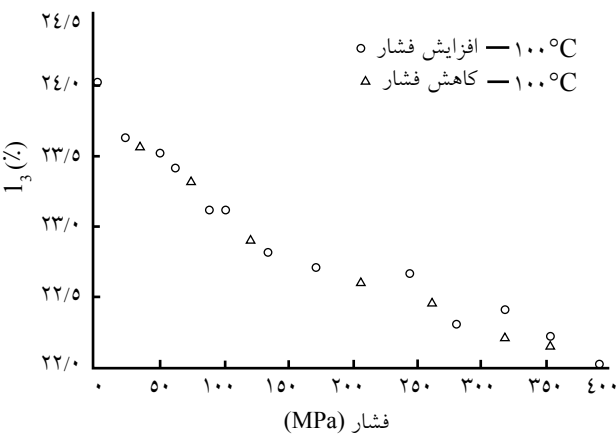
امروزه یکی از اهداف بسیار مهم در پژوهش، یافتن روش‌ها و آزمون‌های جدید برای تایید آزمون‌های قبلی یا به دست آوردن نتایج کمی دقیق‌تر است. از روش‌های بسیار نو که هنوز در دست مطالعه است، استفاده از آزمون طیف‌سنجی طول عمر پوزیترون یا PALS است. آزمون طیف‌سنجی طول عمر پوزیترون روشی غیرمخرب برای شناسایی تخریب مواد، اندازه‌گیری ابعاد فضاهای خالی و نواقص موجود در جامدات و خواص وابسته به حجم آزاد همچون دمای انتقال شیشه-لاستیک است. در این قسمت از مقاله، به نمونه‌هایی از کاربردهای این آزمون بسیار نو در علم پلیمر پرداخته شده است.



شکل ۱- تغییرات طول عمر ارتوپوزیترونیم در برابر فشار اعمالی برای اپوکسی پخت شده (اپوکسی پخت شده با فرمول بندی DAB/۲/۲:۲/۸:۵=DDH/DGEBA) [۳].

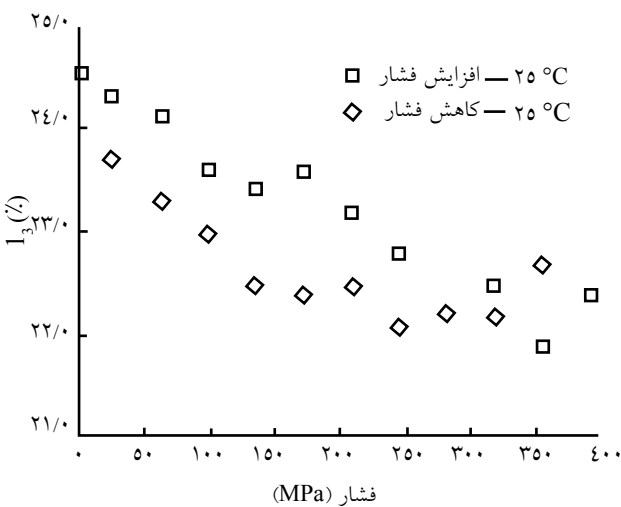
اندازه‌گیری حجم آزاد و بررسی تغییرات آن

حجم آزاد در مواد، ناشی از علل مختلفی همچون ساختار مولکولی، حرکت زنجیر و بی‌نظمی مولکولی است. حجم آزاد در خواص ماکروسکوپی بسیار زیادی همچون گرانروی، انتقال مولکولی، آسودگی و پیرسازی فیزیکی اثرگذار است [۱]. اصول استفاده از آزمون PALS برای به دست آوردن حجم آزاد، اولین بار توسط کوبایاشی و همکاران ارائه شد [۲]. معادلاتی که برای محاسبه حجم آزاد اجسام کاربرد دارند، در بخش اول این مقاله ارائه شد. برای بررسی اثر متغیرهای محیطی روی اندازه و کسر حجم آزاد می‌توان از آزمون طیف‌سنجی طول عمر نابودی پوزیترون استفاده کرد. برای مثال، در ادامه به بررسی اثر فشار خارجی روی تغییرات حجم آزاد پرداخته می‌شود.



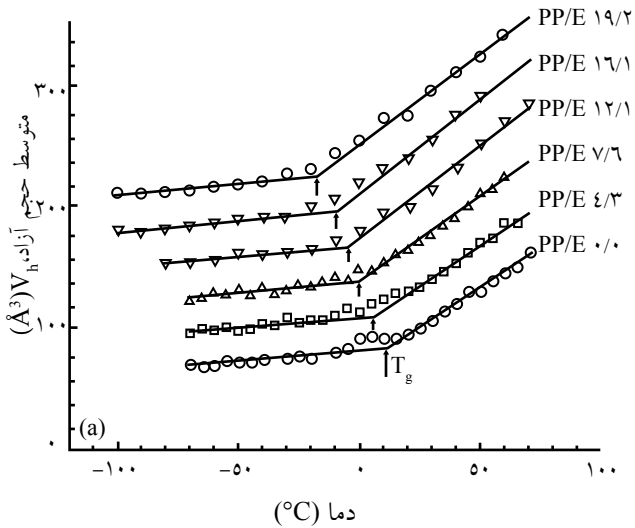
شکل ۲- تغییرات شدت ارتوپوزیترونیم در برابر فشار اعمالی برای اپوکسی پخت شده در دمای ۱۰۰°C [۳].

با افزایش فشار روی مواد انتظار می‌رود، اندازه و کسر حجم آزاد آنها کم شود. با کاهش اندازه حجم آزاد، احتمال برخورد الکترون و پوزیترون بیشتر می‌شود و طول عمر ارتوپوزیترونیم کاهش می‌یابد. همچنین، به دلیل کاهش کسر حجم آزاد بر اثر اعمال فشار، شدت ارتوپوزیترونیم در طیف حاصل از آزمون طیف‌سنجی طول عمر نابودی پوزیترون نیز کاهش می‌یابد. این آزمون برای اپوکسی‌های پخت شده با آمین با هدف بررسی اثر فشار روی اندازه و کسر حجم آزاد انجام شده است. تغییرات I_3 و τ_3 ، که به ترتیب طول عمر نابودی ارتوپوزیترونیم و شدت آن است، در برابر تغییر فشار اعمالی در دمای ۱۰۰°C و ۲۵°C در شکل‌های ۱ تا ۳ آمده است [۳].



شکل ۳- تغییرات شدت ارتوپوزیترونیم اپوکسی پخت شده نسبت فشار اعمالی در دمای ۲۵°C [۳].

همان‌طور که از شکل ۲ مشخص است، نقاط داده‌های به دست آمده در دمای ۱۰۰°C در حالت افزایش فشار از صفر تا ۴۰۰MPa با



شکل ۶- تغییرات متوسط حجم آزاد نسبت به دما در کوپلیمرهای پلی‌پروپیلن- پلی‌اتیلن و نحوه تعیین دمای انتقال شیشه‌ای [۴].

با به کارگیری یکی از مدل‌های بیان شده در قسمت اول مقاله، می‌توان با استفاده از داده‌های زمان طول عمر (T_3)، اندازه حجم فضاهای خالی را به دست آورد و تغییرات حجم فضاهای خالی را نسبت به فشار رسم کرد (شکل ۴). علاوه بر امکان به دست آوردن تابعیت اندازه فضاهای خالی حجم آزاد نسبت به فشار، می‌توان با استفاده از آزمون طیف‌سنجی طول عمر نابودی پوزیترون تابعیت کسر حجم آزاد را نیز نسبت به فشار به دست آورد. این کار با استفاده از معادله (۱) انجام می‌شود. این معادله رابطه بین کسر حجم آزاد (f_v)، حجم آزاد (V_f) و شدت نابودی پوزیترونیم (I) را بیان می‌کند. نتایج به دست آمده برای کسر حجم آزاد در شکل ۵ آورده شده است [۳].

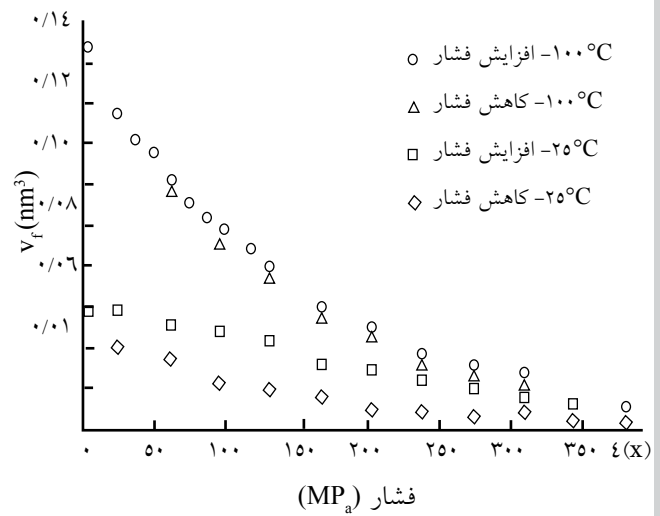
$$f_v = V_f(AI + B)$$

$$B = 0 \rightarrow f_v = 0.19 V_f I \quad (1)$$

$$A = 0 \rightarrow f_v = 0.39 V_f$$

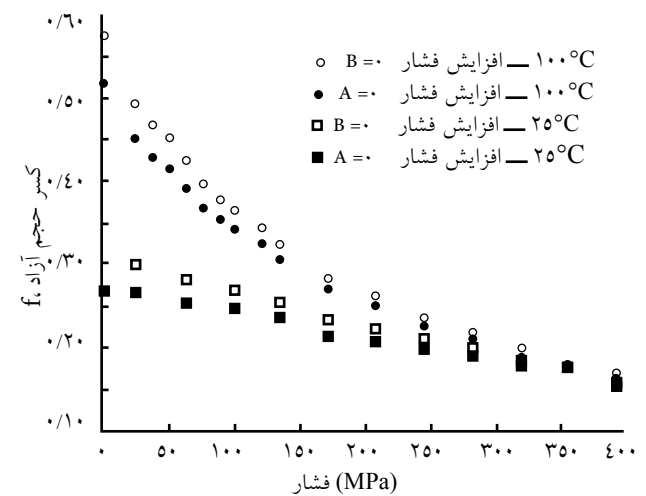
جدول ۱- مقایسه دمای انتقال شیشه‌ای حاصل برای هم‌پلیمرهای پلی‌پروپیلن- پلی‌اتیلن که به روش‌های مختلف [۴].

| دمای انتقال شیشه‌ای (°C) به روش | | | | PP/PE |
|---------------------------------|--------------|-----|------|-------|
| PALS | Tan δ | DSC | DMTA | |
| ۱۱ | ۱۰ | - | ۱۲ | ۰/۰ |
| ۶ | ۰ | -۱۱ | ۷ | ۴/۳ |
| ۰ | -۵ | -۱۷ | ۰ | ۷/۶ |
| -۵ | -۱۲ | -۲۳ | -۶ | ۱۲/۱ |
| -۱۰ | -۱۸ | -۲۵ | -۱۴ | ۱۶/۱ |
| -۱۷ | -۲۳ | -۳۱ | -۲۰ | ۱۹/۲ |



شکل ۴- نحوه تغییرات اندازه حفره حجم آزاد در برابر فشار اعمالی برای اپوکسی پخت شده (اپوکسی پخت شده با فرمول بندی DAB/DDH/DGEBA=۲/۲:۲/۸:۵) [۳].

حالت کاهش فشار تغییر چندانی نکرده‌اند و داده‌ها تقریباً روی هم منطبق است. اما در دمای ۲۵°C (شکل ۳)، نقاط حاصل از منحنی افزایش و کاهش فشار برهم منطبق نیست و منحنی رفت و برگشت دارای پسماند است. این تفاوت در رفتار را می‌توان به متفاوت بودن نحوه حرکت‌های مولکولی مواد در این دو دما مربوط دانست. در دمای ۱۰۰°C نمونه به حالت کشسان بوده و دارای حرکت‌های مولکولی زیاد است و به سرعت نسبت به مقیاس زمانی دوساعتی آزمون خود را هماهنگ می‌کند. اما در ۲۵°C نمونه به حالت شیشه‌ای است و تحرک مولکولی و آسودگی حجم و تنش آن کم است [۳].



شکل ۵- نحوه تغییرات کسر حجم آزاد در برابر فشار اعمالی برای اپوکسی پخت شده [۳].

جدول ۲- خواص فیزیکی پلیمرهای به کار رفته [۵].

| پلیمر | M_w | PDI | (g/cm ³) | Tg ¹ (°C) |
|-------|--------|------|----------------------|----------------------|
| PS | ۱۰۵۰۰۰ | ۱/۰۶ | ۱/۰۵۸ | ۱۰۲ |
| PC | ۷۹۰۰۰ | ۳/۹ | ۱/۲۰۰ | ۱۴۵ |
| TMPC | ۶۷۰۰۰ | ۲/۶ | ۱/۰۸۳ | ۱۹۶ |

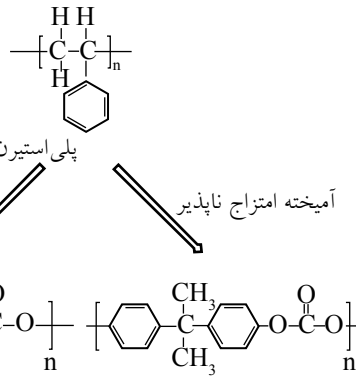
(۱) با استفاده از گرماسنجی پویایی تفاضلی (DSC).

با استفاده از اطلاعات نمودار تغییرات کسر حجم آزاد نسبت به فشار، می‌توان تراکم‌پذیری حجم آزاد (β_f) را با استفاده از معادله (۲) محاسبه کرد:

$$\beta_f = - \left(\frac{\partial f}{\partial p} \right)_T \quad (2)$$

اختلاف عددی زیادی بین مقادیر به دست آمده برای β_f در دو دمای ۱۰۰ و ۲۵۰°C وجود دارد.

در دمای ۲۵۰°C مقدار β_f ثابت و برابر با $0.35 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$ است. در دمای ۱۰۰°C مقدار β_f از $2/6 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$ در ۰ MPa تا $0.45 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$ در ۳۰۰ MPa متغیر است. این تفاوت به علت دمای آزمایش است. در حالت اول، نمونه در زیر T_g و در حالت دوم نمونه در بالای T_g یا دمای انتقال شیشه‌ای خود قرار دارد. باید توجه داشت، تراکم‌پذیری بیان‌شده فقط مربوط به حجم آزاد است و شامل حجم اشغال‌شده نمی‌شود [۳].



بیس فنول A پلی کربنات (PC) تترامیل-بیس فنول A پلی کربنات (TMPC)

طرح ۱- ساختار شیمیایی پلیمرهای اولیه مصرف شده [۵].

است. برای سهولت تشخیص، منحنی حجم آزاد برای هر نمونه به اندازه 30 \AA^3 در راستای محور عمودی به بالا انتقال داده شده است [۴].

دمای انتقال شیشه‌ای نمونه‌های مزبور به روش‌های مختلف محاسبه شده است. همان‌طور که در **جدول ۱** مشخص است، نتایج به دست آمده برای دمای انتقال شیشه‌ای با استفاده از روش طیف‌سنجی طول عمر نابودی پوزیترون مشابه نتایج حاصل از آزمون تجزیه دینامیکی گرمامکانیکی (DMTA) است [۴].

بررسی امتزاج‌پذیری

از نتایج آزمون طیف‌سنجی طول عمر نابودی پوزیترون، می‌توان با بررسی ویژگی‌های حفره حجم آزاد به مطالعه انحلال‌پذیری آمیخته‌های پلیمری پرداخت. دو آمیخته زیر را فرض می‌کنیم:
- آمیخته تترامیل بیس فنول A پلی کربنات- پلی استیرن (TMPC/PS) به عنوان یک آمیخته امتزاج‌پذیر و
- آمیخته بیس فنول A پلی کربنات- پلی استیرن (PC/PS) به عنوان

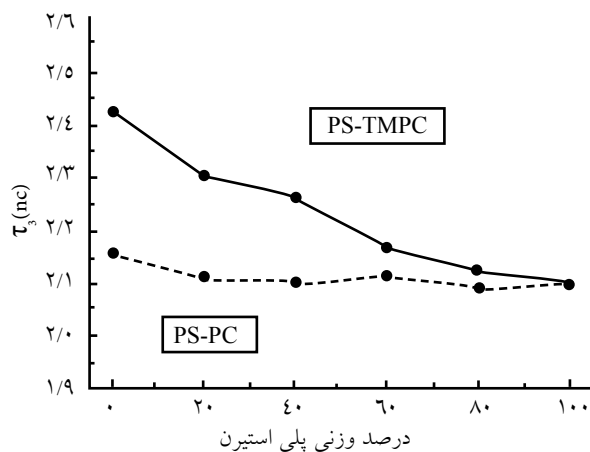
اندازه‌گیری دمای انتقال شیشه‌ای

با دنبال کردن نحوه تغییرات متوسط حجم آزاد در دماهای مختلف، نقطه شکستی در منحنی دیده می‌شود. به این نقطه دمای انتقال از حالت شیشه‌ای به لاستیکی یا دمای انتقال شیشه‌ای (T_g) گفته می‌شود. به عنوان مثال، نمودار تغییرات متوسط حجم آزاد نسبت به دما در نمونه‌های کوپلیمر پروپیلن-اتیلن در **شکل ۶** آورده شده

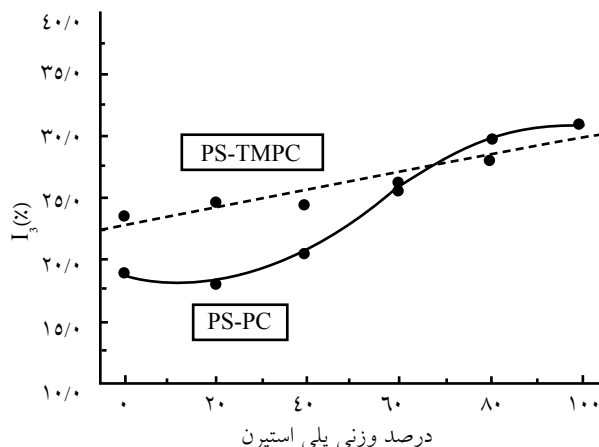
جدول ۳- نتایج طول عمر پوزیترونیم در پلیمرهای اولیه [۵]

| پلیمر | τ_1 (ps) | τ_2 (ps) | τ_3 (ps) | I_r (%) | I_r (%) | R (Å) | V_f (Å ³) | f_v (%) |
|-------|---------------|---------------|---------------|------------|------------|-----------|-------------------------|-----------|
| PS | ۱۲۰±۰ | ۳۹۸±۵ | ۲۱۰±۹ | ۴۸/۱۱±۰/۳۱ | ۳۰/۸۹±۰/۲۴ | ۲/۹۴±۰/۰۹ | ۱۰۶±۲ | ۵/۹±۰/۱ |
| PC | ۱۲۰±۰ | ۳۹۵±۵ | ۲۱۵±۹ | ۶۲/۵۳±۰/۳۵ | ۱۸/۷۰±۰/۲۲ | ۲/۹۸±۰/۰۸ | ۱۱۰±۲ | ۳/۷±۰/۲ |
| TMPC | ۱۲۰±۰ | ۳۸۸±۵ | ۲۴۲±۹ | ۵۶/۹۸±۰/۳۶ | ۲۳/۵۰±۰/۲۲ | ۳/۲۰±۰/۰۸ | ۱۳۷±۲ | ۵/۹±۰/۱ |

(الف) $\tau_1=120$ مربوط به طول عمر پاراپوزیترونیم است، (ب) R برابر با متوسط شعاع حفره حجم آزاد است که با معادله TE به دست می‌آید، (ج) V_f متوسط حجم آزاد و (د) F_v کسر حجم آزاد است.



(ب)



(الف)

شکل ۷- تغییرات: (الف) طول عمر ارتوپوزیترونیم و (ب) برهم‌کنش آمیخته‌های PS-PC و PS-TMPC برحسب درصد وزنی پلی‌استیرین [۵].

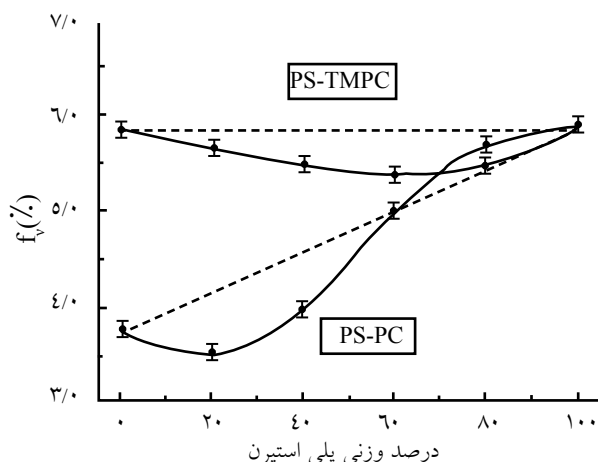
الدراب) با استفاده از نتایج آزمون طیف‌سنجی طول عمر ناپودی پوزیترون به دست آمده و همچنین حجم حفره و کسر حاصل از معادله (۱) در **جدول ۳** آمده است. اندازه فضاهای خالی به دست آمده در این جدول نشان می‌دهد، اندازه حفره حجم آزاد در پلی‌استیرین و بیس فنول A پلی‌کربنات تقریباً برابر است. در حالی که فضاهای خالی در تترامتیل- بیس فنول A پلی‌کربنات دارای ابعاد بزرگ‌تری است. همان‌طور که قبلاً بیان شد، اختلاف مقادیر τ_3 پلیمرهای مختلف با ساختار مولکولی و تراکم مولکول‌های آن ارتباط دارد. بنابراین، مقادیر بزرگ‌تر V_f و f_v در تترامتیل بیس فنول A پلی‌کربنات نسبت به بیس فنول A پلی‌کربنات به علت اثر استخلافی است.

ساختار مولکولی پلیمرهای استفاده شده در **طرح ۱** آمده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، در تترامتیل بیس فنول A پلی‌کربنات چهار گروه متیل به گروه فنیل متصل است که باعث

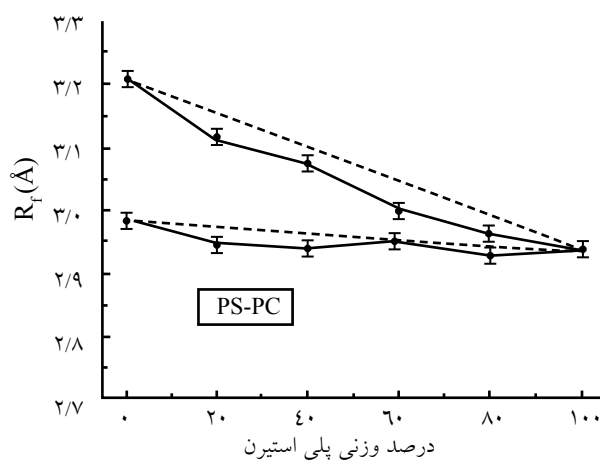
یک آمیخته امتزاج‌ناپذیر.

داده‌های مربوط به هر یک از اجزای تشکیل‌دهنده آمیخته‌ها از قبیل متوسط جرم مولکولی وزنی (M_w) و شاخص چند توزیعی (PDI) در **جدول ۲** ارائه شده است. آمیخته‌های امتزاج‌پذیر کسر حجم حفره بزرگ‌تری را نشان می‌دهند. همچنین در آمیخته‌های امتزاج‌پذیر در اثر آمیختن، انحراف منفی در حجم آزاد مشاهده می‌شود که به علت تغییر شکل‌های صورت‌بندی قطعه‌ای و فشردگی در پلیمرهای غیرمتشابه است. اما در آمیخته‌های امتزاج‌ناپذیر، رابطه بین حجم آزاد و جزء حجمی به دلیل وجود سطح‌های مشترک بسیار پیچیده‌تر است. چون حجم‌های آزاد در ماده پراکنده هستند، نحوه توزیع آنها با یک تابع توزیع بیان می‌شود [۵].

I_3 و τ_3 پارامترهایی هستند که تابع ساختار شیمیایی و ترکیب درصد آمیخته‌اند. شعاع حفره مربوط که با معادله TE (مدل تنو-



(ب)



(الف)

شکل ۸- (الف) شعاع حفره و (ب) کسر حجم آزاد در آمیخته‌های PS-PC و PS-TMPC برحسب درصد وزنی پلی‌استیرین. (-) نقاط مربوط به داده‌ها و (- -) رابطه خطی افزایشی (linear additive relationship) است [۵].

- شعاع حفره حجم آزاد (R_f) در آمیخته‌های امتزاج‌پذیر TMPC/PS دارای انحراف منفی بزرگ‌تری نسبت به آمیخته‌های امتزاج‌ناپذیر PC/PS است.

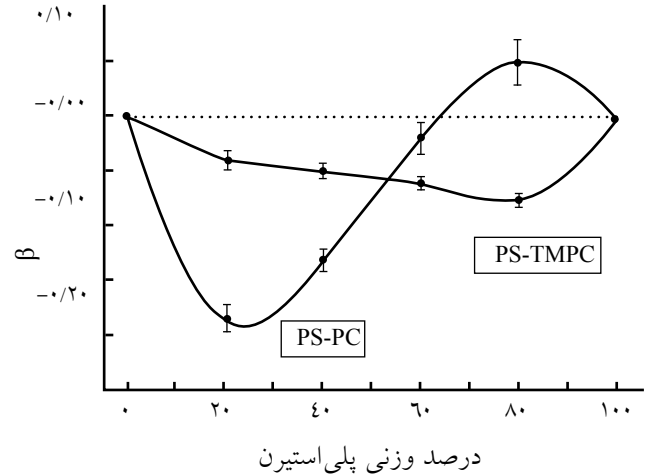
- کسر حجم آزاد (f_v) در آمیخته‌های امتزاج‌پذیر TMPC/PS نسبت به منحنی خطی انحراف منفی دارد. اما در آمیخته‌های امتزاج‌ناپذیر PC/PS، در درصد وزنی کم پلی‌استیرن انحراف منفی دارد و در درصد وزنی زیاد این روند برعکس شده و نسبت به نمودار خطی انحراف مثبت مشاهده می‌شود.

مدل نظری که برای تغییرات کسر حجم آزاد در آمیخته‌های امتزاج‌پذیر به کار می‌رود، با معادله (۳) بیان می‌شود. در این معادله، تغییرات حجم آزاد ناشی از برهم‌کنش بین زنجیرهای نامتشابه و تغییرشکل‌های صورت‌بندی قطعه‌ای و فشردگی پلیمرهای تشکیل‌دهنده آمیخته است [۷]:

$$f_v = f_{v1}\phi_1 + f_{v2}\phi_2 + \beta f_{v1}f_{v2}\phi_1\phi_2 \quad (3)$$

در این معادله، f_v متوسط کسر حفره حجم آزاد، f_{v1} و f_{v2} کسر حفره حجم آزاد در پلیمر خالص ۱ و ۲ و ϕ_1 و ϕ_2 کسر حجمی ویژه آنهاست. β پارامتری است که به برهم‌کنش زنجیرهای غیرمتشابه بستگی دارد و به آن پارامتر برهم‌کنش گفته می‌شود. با استفاده از داده‌های مربوط به آزمون طیف‌سنجی طول عمر نابودی پوزیترون می‌توان پارامتر β را به دست آورد که مستقیماً با امتزاج‌پذیری رابطه دارد. نتایج حاصل برای β در آمیخته‌های امتزاج‌پذیر و امتزاج‌ناپذیر در شکل ۹ نشان داده شده است [۷].

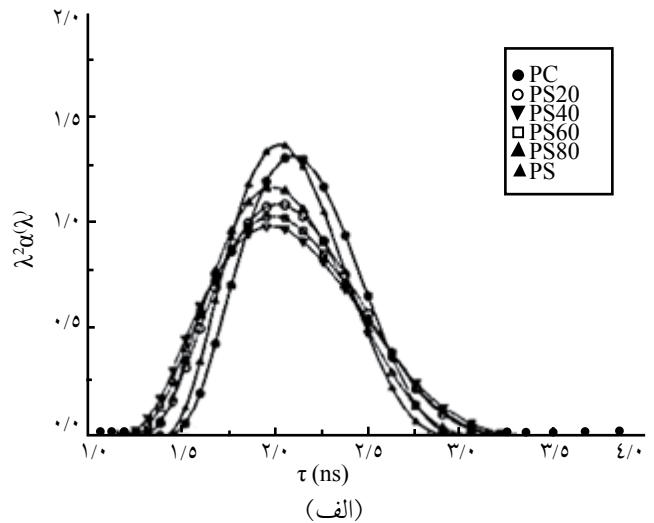
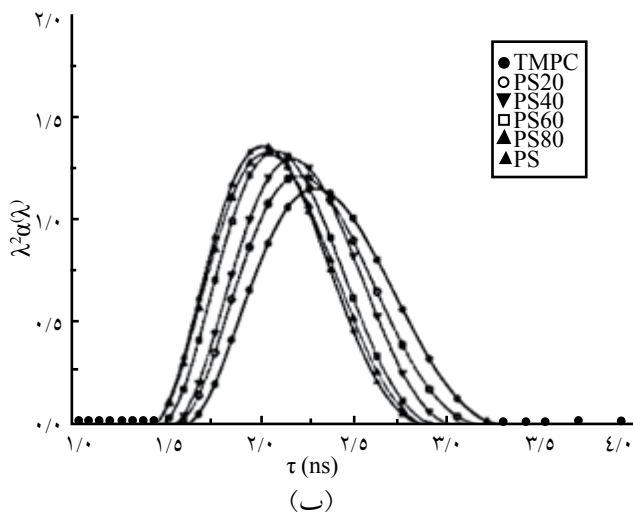
همان‌طور که در شکل ۹ مشخص است، در آمیخته امتزاج‌پذیر



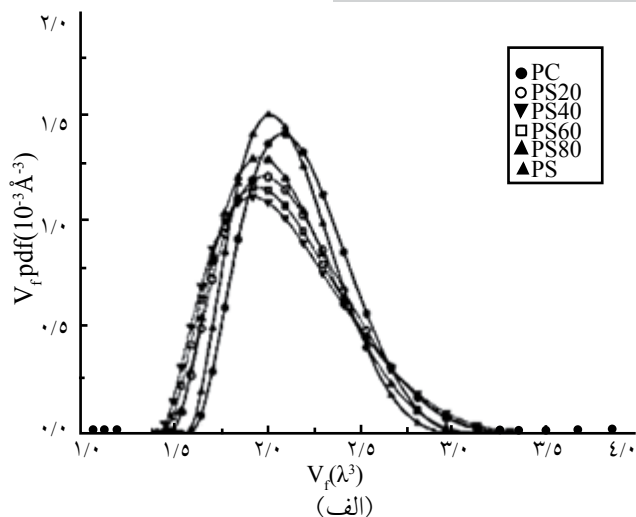
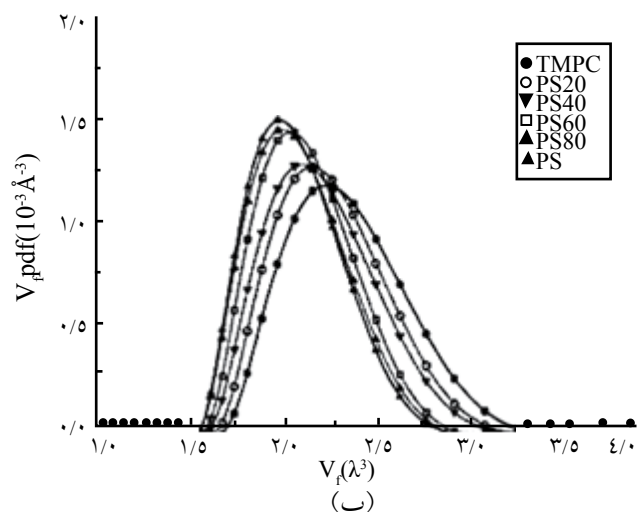
شکل ۹- پارامتر برهم‌کنش (β) محاسبه شده در آمیخته‌های PS-TMPC و PS-PC بر حسب درصد وزنی پلی‌استیرن [۵].

ایجاد فضای آزاد بیشتری می‌شود. گروه‌های جانبی، شکل صفحه‌ای تترامتیل بیس فنول A پلی‌کربنات را از بین می‌برد. حجم آزاد بزرگ‌تر تترامتیل بیس فنول A پلی‌کربنات باعث می‌شود تا حلقه فنیل پلی‌استیرن بتواند در آن جا گیرد. این مسئله موجب ایجاد برهم‌کنش مناسبی بین پلی‌استیرن و تترامتیل بیس فنول A پلی‌کربنات می‌شود که به تولید آمیخته امتزاج‌پذیر بیانجامد. از سوی دیگر، بیس فنول A پلی‌کربنات حجم کافی برای گروه فنیل پلی‌استیرن ندارد و تولید ساختار امتزاج‌ناپذیر می‌کند [۵].

نتایج طول عمر و شدت ارتوپوزیترونیم بر حسب درصد وزنی پلی‌استیرن در آمیخته‌های PS/PC و TMPC/PS در شکل ۷ نشان داده شده است. شعاع حفره حجم آزاد و کسر آن نیز در شکل ۸ آمده است [۵]. نکات قابل استنباط از این شکل به شرح زیر است:



شکل ۱۰- پخش طول عمر ارتوپوزیترونیم در آمیخته‌های: (الف) PS-PC و (ب) PS-TMPC در درصدهای وزنی مختلف از پلی‌استیرن [۵].



شکل ۱۱- پخش حفره حجم آزاد V_f (pdf) V_f در آمیخته‌های: (الف) PS-PC و (ب) PS-TMPC در درصد وزنی مختلف پلی استیرن. توزیع با استفاده از معادله (۴) و داده‌های شکل ۱۰ به دست آمده است [۵].

از معادله (۴) توزیع ارتوپوزیترونیم را به تابع چگالی احتمال حجم آزاد V_f (pdf) تبدیل کرد:

$$v_f(\text{pdf}) = -3.32 \left\{ \cos \left[\frac{2\pi R}{R+1.66} \right] - 1 \right\} \alpha(\lambda) / \left\{ (R+1.66)^2 K(R) 4\pi R^2 \right\} \quad (۴)$$

در این معادله، λ سرعت نابودی پوزیترون، $\alpha(\lambda)$ تابع چگالی احتمال نابودی، R شعاع حفره حجم آزاد و $K(R)=1+8R$ است. اثر امتزاج پذیری آمیخته را می‌توان با منحنی تابع چگالی احتمال حجم آزاد بررسی کرد. شکل ۱۱، نشان‌دهنده منحنی تابع چگالی احتمال حجم آزاد در دو آمیخته امتزاج‌پذیر TMPC/PS و امتزاج‌ناپذیر PC/PS است. از این شکل می‌توان استنباط کرد که اختلاف توزیع فضاهای خالی حجم آزاد بین آمیخته‌ها و پلیمرهای خالص در آمیخته‌های امتزاج‌ناپذیر بسیار بزرگ‌تر است.

TMPC/PS انقباض کسر حجم آزاد دیده می‌شود (حداقل مقدار آن $\beta = -0.07$ است). اما، تغییرات β در آمیخته‌های امتزاج‌ناپذیر پیچیده است و از -0.21 تا $+0.04$ تغییر می‌کند. انحراف منفی در مقدار β به علت برهم‌کنش به وجود آمده میان اجزای پلیمری آمیخته TMPC/PS است [V]. جای دیگری که می‌توان اثر امتزاج‌پذیری آمیخته را مشاهده کرد، نمودارهای توزیع طول عمر ارتوپوزیترونیم ساده‌شده (deconvoluted) است. شکل ۱۰، نمودارهای پخش طول عمر ارتوپوزیترونیم ساده‌شده را در آمیخته‌های امتزاج‌پذیر و امتزاج‌ناپذیر در ترکیب درصدهای مختلف نشان می‌دهد.

همان‌طور که دیده می‌شود، در آمیخته‌های امتزاج‌پذیر TMPC/PS نحوه افزایش شدت و کاهش مقدار τ که مقدار بیشینه شدت در آن اتفاق می‌افتد، دارای نظم مشخصی است. اما، چنین نظمی در آمیخته‌های امتزاج‌ناپذیر PC/PS مشاهده نمی‌شود [V]. همچنین، همان‌طور که در بخش اول این مقاله بیان شد، می‌توان با استفاده

جدول ۴- نرم‌افزارهای تحلیل نتایج آزمون طول عمر نابودی پوزیترون [۶].

| نکات مربوط | نویسنده | نام برنامه |
|--|----------------|---------------|
| برنامه‌ای کم حجم برای تحلیل طیف طول عمر است. این برنامه تحت DOS نوشته شده و طیف ورودی آن باید دارای ۴۰۰ کانال باشد. | Puska | Lifepcfit |
| | Kansy | LT |
| در زبان برنامه‌نویسی DELPHI نوشته شده است. از اصلی‌ترین ویژگی‌های آن می‌توان به عدم محدودیت تعداد کانال‌ها در طیف اشاره کرد. | Shukla | CONTIN و MELT |
| | Gregory | CONTIN- PALS2 |
| این برنامه بیشتر در بررسی طیف طول عمر پوزیترون در پلیمرها و مواد متخلخل کاربرد دارد. | Kirkegaard | PALSfit |
| | Pascual-Izarra | PAScual |

<http://palsfit.dk/>

نرم افزارهای آزمون طول عمر نابودی پوزیترون

اصلی ترین برنامه های رایانه ای که برای تحلیل نتایج آزمون طول عمر نابودی پوزیترون به کار می رود، به طور خلاصه در **جدول ۴** ارائه شده است.

نتیجه گیری

از آنچه گفته شد می توان نتیجه گرفت، روش طیف سنجی طول عمر نابودی پوزیترون به عنوان روشی نوین و غیرمخرب برای شناسایی تخریل مواد و فضاهای خالی و نواقص پلیمرها قابل استفاده است.

در این مقاله، کاربردهای متفاوتی از آزمون طیف سنجی طول عمر نابودی پوزیترون در علم پلیمر بررسی شد. قابلیت این فن برای اندازه گیری ابعاد فضاهای خالی، کسر حجم آزاد و بررسی تغییرات حجم آزاد در برابر تغییراتی همچون فشار مطالعه شد. در ادامه نحوه تغییرات دمای انتقال شیشه ای - لاستیکی پلیمرها با استفاده از آزمون طیف سنجی طول عمر نابودی پوزیترون بررسی و برای تایید نتایج حاصل از آن با نتایج آزمون های دیگری همچون گرماسنجی پویسی تفاضلی (DSC) و DMTA مقایسه شد. همچنین، با استفاده از تغییرات حجم آزاد در ترکیب درصد های متفاوت آمیخته های پلیمری، امتزاج پذیری آنها مطالعه شد. نتایج همگی نشان دهنده این بود که روش PALS روشی نو و در عین حال کارا برای مطالعه خواص فیزیکی مواد پلیمری است.

مراجع

1. Shaikh M.Q., *Investigation of Free Volume in Polymers by Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy (PALS)*, Martin-Luther-Univ. Halle, Wittenberg, 2006.
2. Sperling L.H., *Introduction to Physical Polymer Science*, Wiley-Interscience, 2006.
3. Wang Y.Y., Positron Annihilation in Amine-cured Epoxy Polymers-Pressure Dependence, *J. Polym. Sci., B: Polym. Phys.*, **28**, 1431-1441, 1990.
4. Wang H.P., Amorphous Phase of Propylene/Ethylene Copolymers Characterized by Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy, *Macromolecules*, **39**, 1488-1495, 2006.
5. Liu J., Jean Y.C., and Yang H., Free-Volume Hole Properties of Polymer Blends Probed by Positron Annihilation Spectroscopy: Miscibility, *Macromolecules*, **28**, 5774-5779, 1995.
6. <http://positronannihilation.net>, available in 17 June 2012.