

پیش بینی خواص ویسکوالاستیک کامپوزیت اپوکسی تقویت شده با الیاف تک جهتی شیشه

Prediction of Viscoelastic Properties of Reinforced Epoxy/Unidirectional Glass Fiber Composite

علی حق طلب، سیدحسین میرزاسیدی

دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی شیمی (گروه پلیمر)

دریافت: ۷۶/۴/۱۱، پذیرش: ۷۷/۳/۱۹

چکیده

خواص ویسکوالاستیک غیرخطی کامپوزیت اپوکسی تقویت شده با الیاف موازی شیشه (R-glass) بررسی شد. با استفاده از آزمایشهای کوتاه مدت خزش و بکارگیری اصل برهمنش دما-زمان و تنش و استفاده از مدل ویسکوالاستیک غیر خطی، عناصر ماتریس نرمی کامپوزیت ارتوتروپ در زمان طولانی پیش بینی شد. آزمایشهای کشش روی قطعات نواری شکل با زاویه الیاف صفر درجه و مجهز به کرنش سنجهای مقاومت الکتریکی و آزمایشهای کوتاه مدت خزش روی قطعات نواری شکل با زاویه الیاف ۳۰° و ۹۰° در تنشهای ثابت و دماهای مختلف انجام شد. منحنیهای مادر برای کامپلیانس خزش در جهات ۳۰° و ۹۰° به روش نموداری و با استفاده از اصل برهمنش دما و زمان بدست آمد. همچنین، مقادیر ضریبهای انتقال افقی محاسبه و منحنیهای مربوط به آن مدل شد. با انجام آزمایشهای جداگانه خزش در دماهای ثابت و تحت تنشهای مختلف، اثر مقدار تنش بر رفتار ویسکوالاستیک کامپوزیت بررسی شد. نشان داده شد که رفتار کامپوزیت در جهت الیاف الاستیک و در جهات عرضی و برش ویسکوالاستیک است. در پایان، با استفاده از مدل ویسکوالاستیک غیرخطی رفتار خزشی کامپوزیت در جهات مختلف و در زمانهای طولانی پیش بینی شد.

واژه‌های کلیدی: کامپوزیت، خزش، ویسکوالاستیسته، برهمنش دما و زمان، اپوکسی/شیشه

Key Words: composite, creep, viscoelasticity, time-temperature superposition, epoxy / glass

مقدمه

وزن، پایداری خوب در شرایط سخت، ظرفیت گرمایی زیاد، نارسایی الکتریکی و گرمایی خوب، قابلیت طراحی بسیار خوب، آسانی ساخت و هزینه کم اشاره کرد. کامپوزیتهای پلیمری تقویت شده با الیاف بلند و تک جهتی شامل گروهی از کامپوزیتهاست که استفاده از آنها بسیار متداول و در حال افزایش است. در طراحی این کامپوزیتهای معمولاً با توجه به رفتار این مواد، آنها را به عنوان مواد الاستیک در نظر می‌گیرند. اگرچه این فرض در بسیاری از موارد کاربردی مناسب و کافی است، ولی

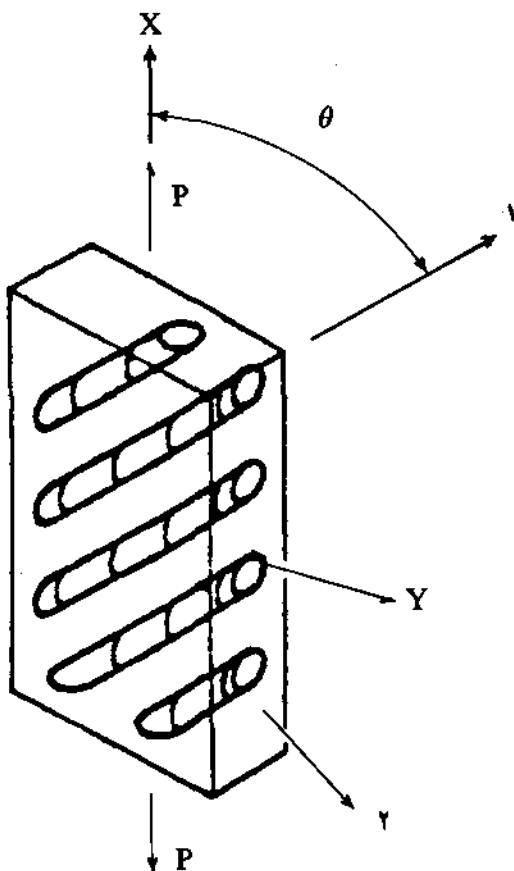
کامپوزیتهای پلیمری از مواد مهم مهندسی‌اند که کاربرد وسیعی در دنیای امروز دارند. صنایع مختلف نظیر صنایع دریایی، هوایی و فضایی، اتومبیل‌سازی، ذخیره‌سازی، لوازم خانگی و ورزشی شدیداً به این نوع کامپوزیتهای وابسته‌اند، بطوری که طراحی، ساخت و کاربرد این مواد بسیار متداول شده است. از جمله دلایلی که موجب رشد فزاینده این مواد شده است می‌توان به چگالی کم، نسبت زیاد استحکام به وزن و مدول به

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22}(t,T,\sigma) & 0 \\ 0 & 0 & S_{66}(t,T,\sigma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (1)$$

ε_2 تنش و کرنش در جهت عمود بر الیاف و γ_{12} و τ_{12} تنش و کرنش در جهت برش اند. S_{11} و S_{12} به ترتیب کامپلیانس در جهت الیاف (جهت طولی) و کامپلیانس جفت کننده جهات عرضی و طولی بوده و در اثر رفتار الاستیک الیاف شیشه مقادیر ثابتی خواهند داشت. S_{66} و S_{22} به ترتیب کامپلیانس عرضی و کامپلیانس برشی اند و تحت تأثیر رفتار ویسکوالاستیک اپوکسی، مقادیری وابسته به زمان (t) ، دما (T) و تنش (σ) و غیره دارند. عموماً رفتار ویسکوالاستیک یک ماده پلیمری ممکن است به صورتهای مختلفی نمایان شود، مثلاً پدیده خزش یک رفتار ویسکوالاستیک است و کامپلیانس آن به صورت زیر تعریف می شود [۱،۲]:

$$S(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0} \quad (2)$$

که σ_0 تنش ثابت اعمال شده روی پلیمر و $\varepsilon(t)$ کرنش آن است.



شکل ۱ - آزمایش کشش روی قطعات با زاویه الیاف $0^\circ < \theta < 90^\circ$.

در بعضی مواقع برای ساخت و طراحی قطعات کافی نیست. در کامپوزیت اپوکسی تقویت شده با الیاف موازی شیشه، گرچه الیاف شیشه رفتاری الاستیک نشان می دهند، اما جزء پلیمری آن یعنی اپوکسی ماده ای ویسکوالاستیک است [۳-۱]. و کامپوزیت تحت تأثیر رفتار این جزء در جهات عرضی و برش رفتاری کاملاً ویسکوالاستیک خواهد داشت. در جهت طولی الیاف، به دلیل اینکه قسمت عمده بار روی الیاف اعمال می شود، کامپوزیت در این جهت رفتاری الاستیک دارد.

تاکنون فعالیتهای گسترده ای در زمینه اندازه گیری خواص ویسکوالاستیک کامپوزیتهای پلیمری انجام شده است. قسمت اعظم این فعالیتهای مربوط به اندازه گیری خزش کامپوزیتهای پلیمری تقویت شده با الیاف موازی و پیوسته بوده است. شاپری و لو نشان داده اند [۴] که کامپوزیت اپوکسی و شیشه در جهت الیاف کاملاً الاستیک است و در جهات عرضی و برش رفتاری ویسکوالاستیک دارند. همچنین، نتایج تحقیقات برینسون [۵] و دیگران روی کامپوزیت گرافیت و اپوکسی نشان می دهد که این کامپوزیت رفتاری مشابه با کامپوزیت شیشه و اپوکسی دارد [۶-۱۰]. تحقیقات همین گروه روی کامپوزیت کولار و اپوکسی نیز حاکی از آن است که این نوع کامپوزیت در تمام جهات رفتاری ویسکوالاستیک دارد [۱۱]. در این مطالعات معلوم شده است که اگرچه فرایند خزش سازه های کامپوزیتی مزبور در دمای محیط بسیار آرام اتفاق می افتد، اما با بالا رفتن دما و تنش سرعت خزش شتاب پیدا می کند. در این مطالعه، با استفاده از روش برینسون و همکاران آزمایشهای کوتاه مدت خزش در شرایط تشدید یافته روی یک لایه کامپوزیت ارتوتروپ اپوکسی (آرالدیت LY ۵۵۹) و شیشه (R-glass) انجام شده و با بکارگیری اصل برهنهش زمان - دما رفتار خزش این نوع کامپوزیت در زمانهای طولانی پیش بینی شده است.

اساس نظری

در یک لایه ارتوتروپ کامپوزیت تقویت شده با الیاف مانند کامپوزیت اپوکسی با شیشه، که پیوسته و الاستیک است و تحت یک سیستم تنش صفحه ای قرار دارد، معادله تنش - کرنش به صورت معادله ۱ خلاصه می شود [۱۴-۹،۱۱-۴].

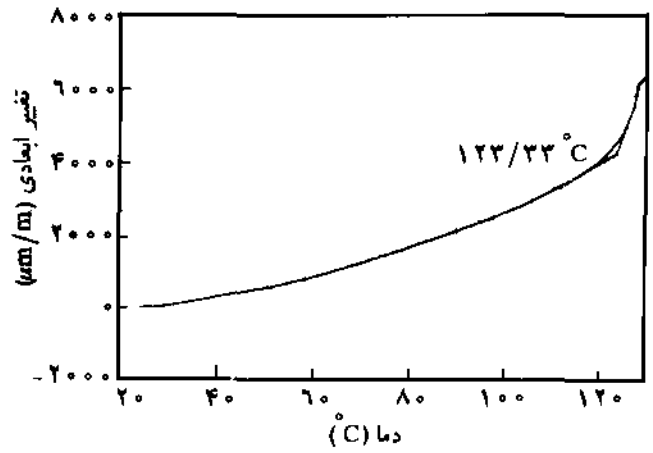
در این معادله، که ماتریس تنش دو بعدی خوانده می شود، مقادیر ε_{11} ، ε_{22} و ε_{33} صفر بوده و در نتیجه مقادیر S_{33} ، S_{44} و S_{55} قابل چشم پوشی است. σ_1 و σ_2 به ترتیب تنش و کرنش در جهت الیاف، σ_3

در این معادله m ، n و S_0 پارامترهای مدلند و با استفاده از داده‌های آزمایش خزش حساب می‌شوند. در سطوح بسیار زیاد تنشها، رفتار کامپوزیت ویسکوالاستیک غیرخطی بوده و کامپلیانس خزش نیز تابعی از مقدار تنش است. در این حالت، معادله عمومی ارائه شده توسط بریسون [۱۱] با تقریب خوبی می‌تواند بیان‌کننده تغییرات کامپلیانس خزش (S) بر حسب زمان و تنش باشد:

$$S = S_0 f(\sigma) + mg(\sigma)t^n \quad (۴)$$

پارامترهای m و S_0 مستقل از مقدار تنش‌اند و مقادیر آنها با انجام آزمایشهای خزش در تنشهای پایتتر و با استفاده از تجزیه و تحلیل ویسکوالاستیک خطی حساب می‌شود. برای بدست آوردن توابع تنش $f(\sigma)$ و $g(\sigma)$ از نتایج آزمایشهای کوتاه‌مدت خزش در تنشهای بسیار زیاد استفاده شده است.

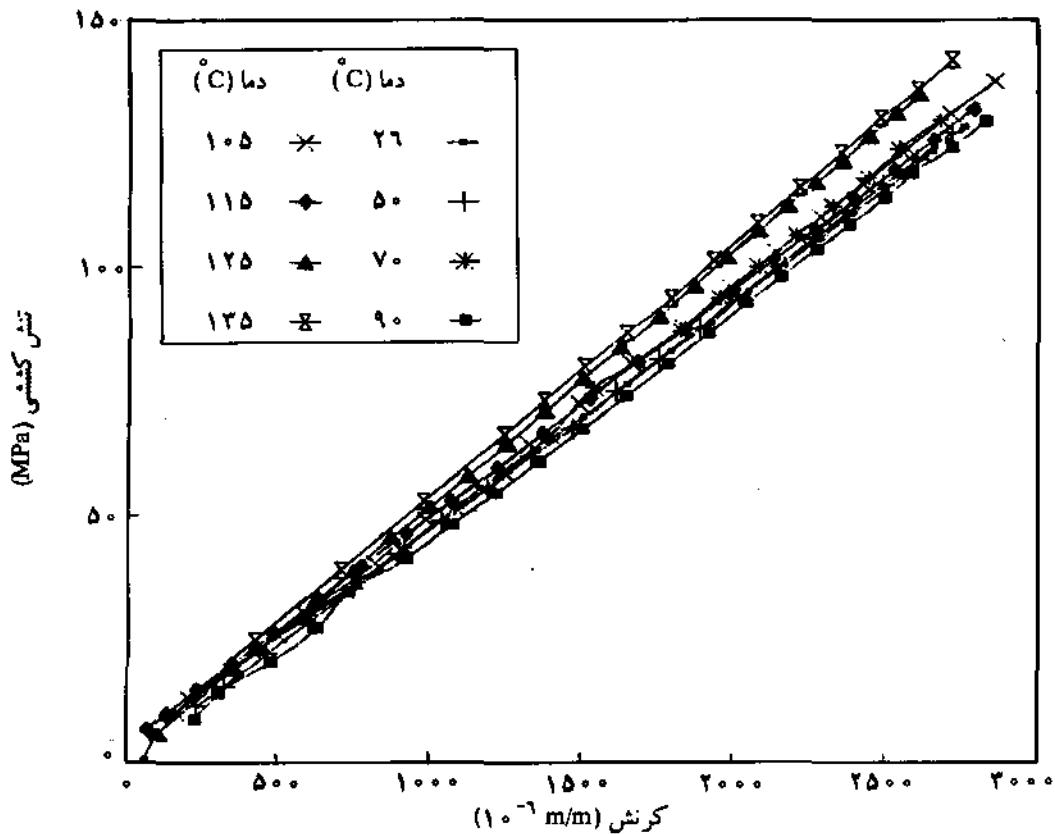
برای محاسبه مقادیر S_{11} ، S_{12} ، S_{22} و S_{21} از آزمایشهای استاندارد کشش قطعات نواری شکل با زاویه الیاف 0° ، 30° و 90° استفاده شده است. برای محاسبه S_{11} و S_{12} قطعات صفر درجه تحت آزمایش کشش قرار گرفته و با اندازه‌گیری کرنش قطعات در دو جهت



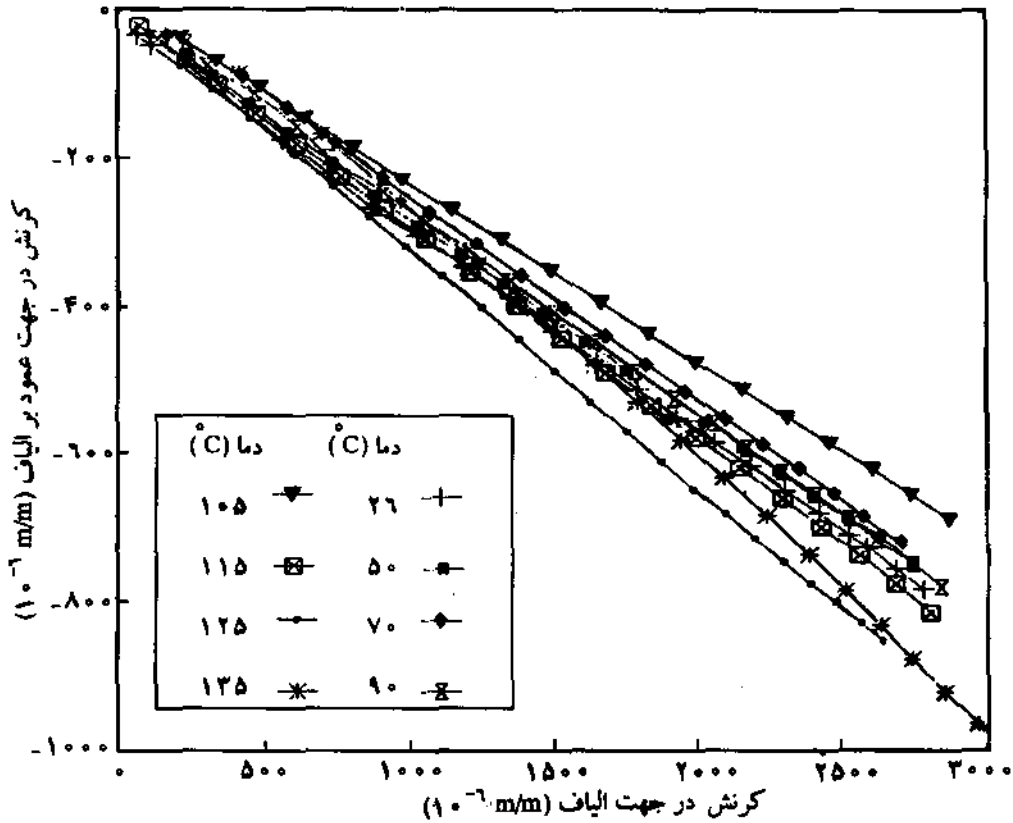
شکل ۲- تجزیه گرما مکانیکی نمونه در جهت عمود بر الیاف.

برای کامپوزیتهای پلیمری نشان داده شده است که در محدوده ویسکوالاستیک خطی تغییرات کامپلیانس خزش با زمان در تنش و دمای ثابت به صورت معادله قانون توانی زیر نوشته می‌شود [۱۵]:

$$S = S_0 + mt^n \quad (۳)$$



شکل ۳- منحنیهای تنش-کرنش قطعات با زاویه 0° در آزمون کشش در دماهای مختلف.



شکل ۴- منحنیهای کرنش عرضی- کرنش طولی قطعات با زاویه ۰° در آزمون کشش در دماهای مختلف.

$$S_x = S_{11} \cos^2 \theta + (2S_{12} + S_{11}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{22} \sin^2 \theta \quad (8)$$

عرضی و طولی مقادیر طبق معادله‌های زیر حساب می‌شود:

زاویه بین راستای کشش و جهت الیاف است. معادله ۸ برای زاویه $\theta = 30^\circ$ به صورت زیر حاصل می‌شود [۴]:

$$S_{11} = \frac{1}{E_1} = \frac{\epsilon_1}{\sigma_1} \quad (5)$$

$$S_{12} = \frac{\nu_{12}}{E_1} = \frac{\epsilon_2}{\sigma_1} \quad (6)$$

$$S_{11} = \frac{1}{3} S_{30} - 2S_{12} - \frac{1}{3} S_{22} \quad (9)$$

مقدار S_{22} از آزمایشهای کشش- خزش روی قطعات با زاویه 90° در جهت الیاف و با استفاده از معادله زیر حساب شده است:

که در آن S_{30} کامپلیانس در جهت 30° است. با اندازه‌گیری S_{30} و داشتن پارامترهای S_{11} و S_{12} از آزمایش کشش قطعات با زاویه 0° و پارامتر S_{22} از آزمایش کشش- خزش قطعات با زاویه 90° می‌توان مقادیر S_{11} را طبق معادله ۹ حساب کرد.

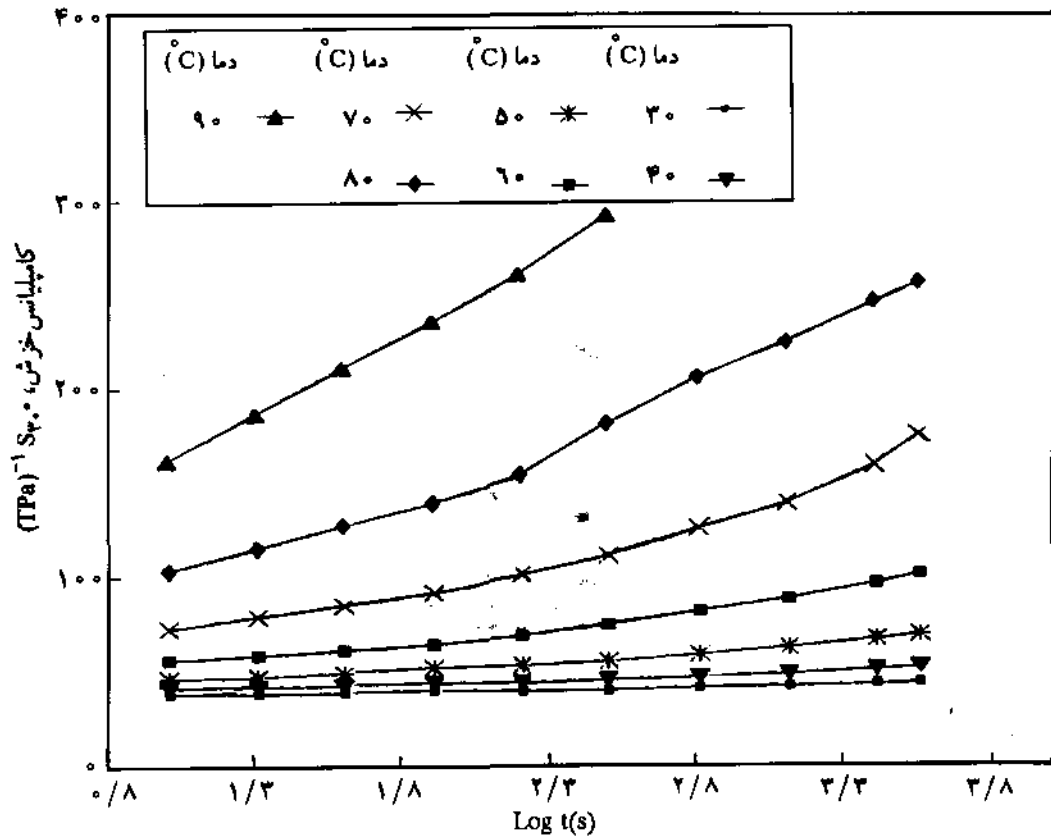
$$S_{22} = \frac{1}{E_2} = \frac{\epsilon_2}{\sigma_2} \quad (7)$$

که در آن E_1 و ν_{12} به ترتیب مدول یانگ و ضریب پویسان در جهت الیاف و E_2 مدول یانگ در جهت عمود برالیاف است. برای محاسبه S_{12} روشهای مختلفی ارائه شده است. مناسبترین روش، همان‌گونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، آزمایش کشش روی قطعات با زاویه الیاف $0^\circ < \theta < 90^\circ$ است [۱۶، ۱۷]. با استفاده از تجزیه و تحلیل تنش- کرنش لایه‌های ارتوتروپ معادله ۸ بین کامپلیانس در جهت θ (یعنی S_x) و پارامترهای ماتریس کامپلیانس حاصل می‌شود [۱۴-۱۲]:

تجربی

مواد، دستگاهها و روشها

برای تهیه قطعات نمونه‌ها، ابتدا صفحه‌های بزرگ کامپوزیتی به روش رشته‌پیچی با استفاده از یک مندرل تخت و با زاویه پیچش 90° تهیه



شکل ۵- منحنی کامپلیانس خزش در دماهای مختلف برای زاویه ۳۰° در سطح تنش ۲۰ MPa.

$$\frac{\rho(T)}{\rho(30^\circ\text{C})} = (1 + \alpha_{22} \Delta T)^2 (1 + \alpha_{11} \Delta T) \quad (10)$$

$$\Delta T = T - 30.2/16 \quad (11)$$

مقادیر محاسبه شده $\rho(T)$ در دماهای مختلف برای بدست آوردن منحنی مادر کامپلیانس خزش با استفاده از اصل برهمنش دما- زمان لازم است. درصد حجمی الیاف درون کامپوزیت در حدود ۶۰ درصد اندازه گیری شده است. تمام قطعات در شرایط یکسان و با رطوبت بسیار کم نگهداری و آزمایش شده‌اند.

آزمایشهای کشش روی قطعات با زاویه ۰° به وسیله دستگاه کشش ساخت زوئیک مدل ۱۴۲۸ (۲۰ ton) انجام شده است و همزمان برای اندازه گیری کرنشها در جهات طولی و عرضی از دستگاه اندازه گیری چند نقطه‌ای ساخت شرکت HBM مدل ۶۰ UPM استفاده شده است.

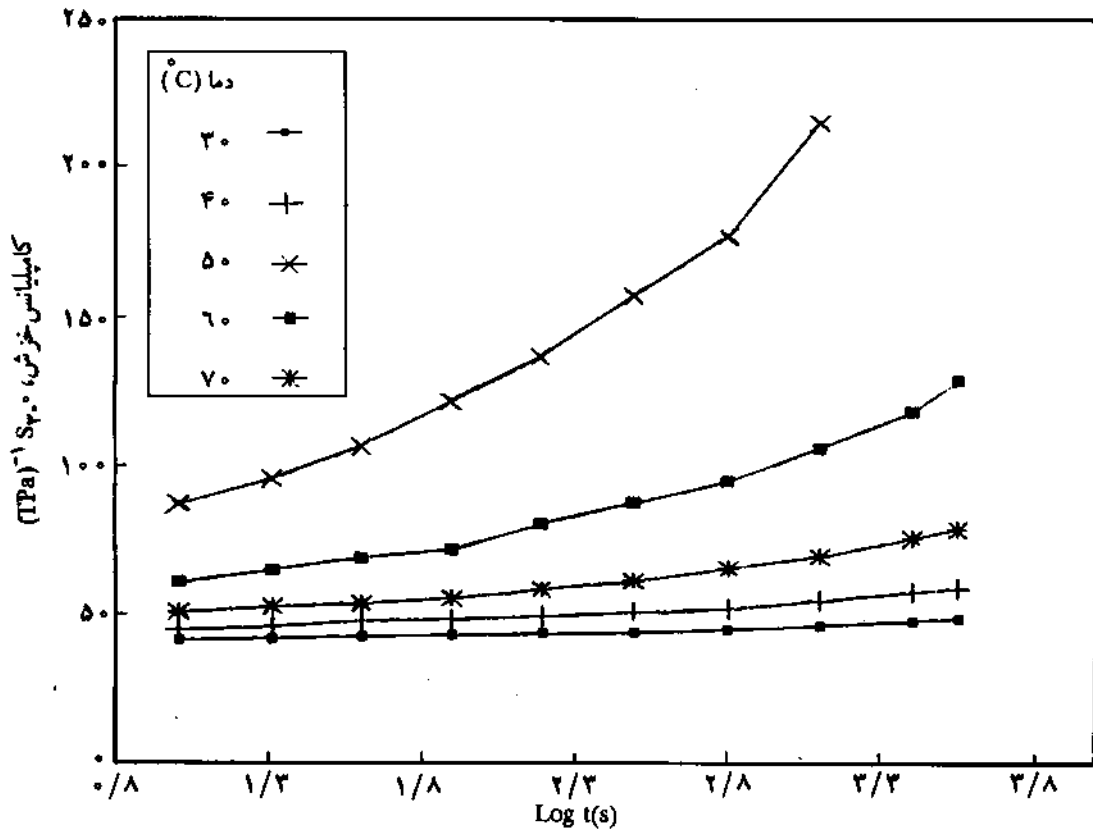
نتایج و بحث

آزمایشهای کشش روی قطعات با زاویه ۰° در جهت الیاف در دماهای متوالی تا دمای ۱۳۵°C انجام شد. شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب منحنیهای

شده است. هر صفحه دارای شش لایه بوده و مواد مصرف شده برای تهیه این صفحه‌های کامپوزیتی الیاف شیشه از نوع R و اپوکسی از نوع آرال دیت (LY ۵۵۶) است که در دمای ۱۲۰°C پخت شده‌اند. بعد از تهیه صفحه‌های کامپوزیتی، به وسیله تیغچه مخصوص برش کامپوزیت، قطعاتی به ابعاد ۲۵۰mm x ۲۵mm در جهت ۰° و ۹۰° و قطعاتی به ابعاد ۲۵۰mm x ۱۳mm در جهت ۳۰° بریده شد [۱۸].

روی قطعات با زاویه ۰° کرنش‌سنج‌های رزت از نوع RY ۳۱-۶/۱۲۰ ساخت شرکت HBM نصب شد. قبل از انجام آزمایشهای کشش- خزش، آزمایش تجزیه گرماتکیکی (TMA) روی نمونه‌های کوچک کامپوزیتی در دو جهت موازی و عمود بر الیاف به وسیله دستگاه TMA ساخت دوپانت مدل TMA ۷۵.۱A ۲۰۰۰ انجام شد.

همان‌گونه که در شکل ۲ نشان داده شده است، دمای انتقال شیشه‌ای (T_g) کامپوزیت در حدود ۱۲۳°C است. همچنین، ضرایب انبساط خطی کامپوزیت در دو جهت طولی و عرضی با استفاده از یک کرنش‌سنج در دماهای مختلف اندازه گیری شد. با تعیین ضرایب انبساط خطی کامپوزیت می‌توان نسبت چگالی کامپوزیت را در دمای آزمایش به دمای مرجع (۳۰°C) از معادله ۱۰ حساب کرد:



شکل ۶- منحنی کامپلیانس خزش در دماهای مختلف برای زاویه ۳۰° در سطح تنش ۴۰ MPa.

افقی طوری روی منحنی مرجع کامپلیانس خزش در دمای ۳۰°C برآزش یافته‌اند که بهترین همپوشانی حاصل شود. با استفاده از برنامه بسته نرم‌افزاری TSPV مناسبترین منحنی به صورت معادله قانون توانی (معادله ۲) روی منحنی مادر برآزش یافته است.

شکل ۷ منحنیهای مادر $S_{p,0}$ حاصل از آزمایشها را در دمای ۳۰°C در دو سطح تنش ۲۰ و ۴۰ MPa و همچنین معادله برآزش یافته روی آنها را نشان می‌دهد. تمام نتایج برای زاویه‌های ۹۰ و ۳۰° در مرجع ۱۹ داده شده است.

با محاسبه S_{11} ، S_{12} ، S_{13} ، S_{22} و $S_{p,0}$ و با استفاده از معادله ۹ مقادیر S_{99} محاسبه شده است. مقادیر محاسبه شده S_{11} و S_{12} عبارتند از:

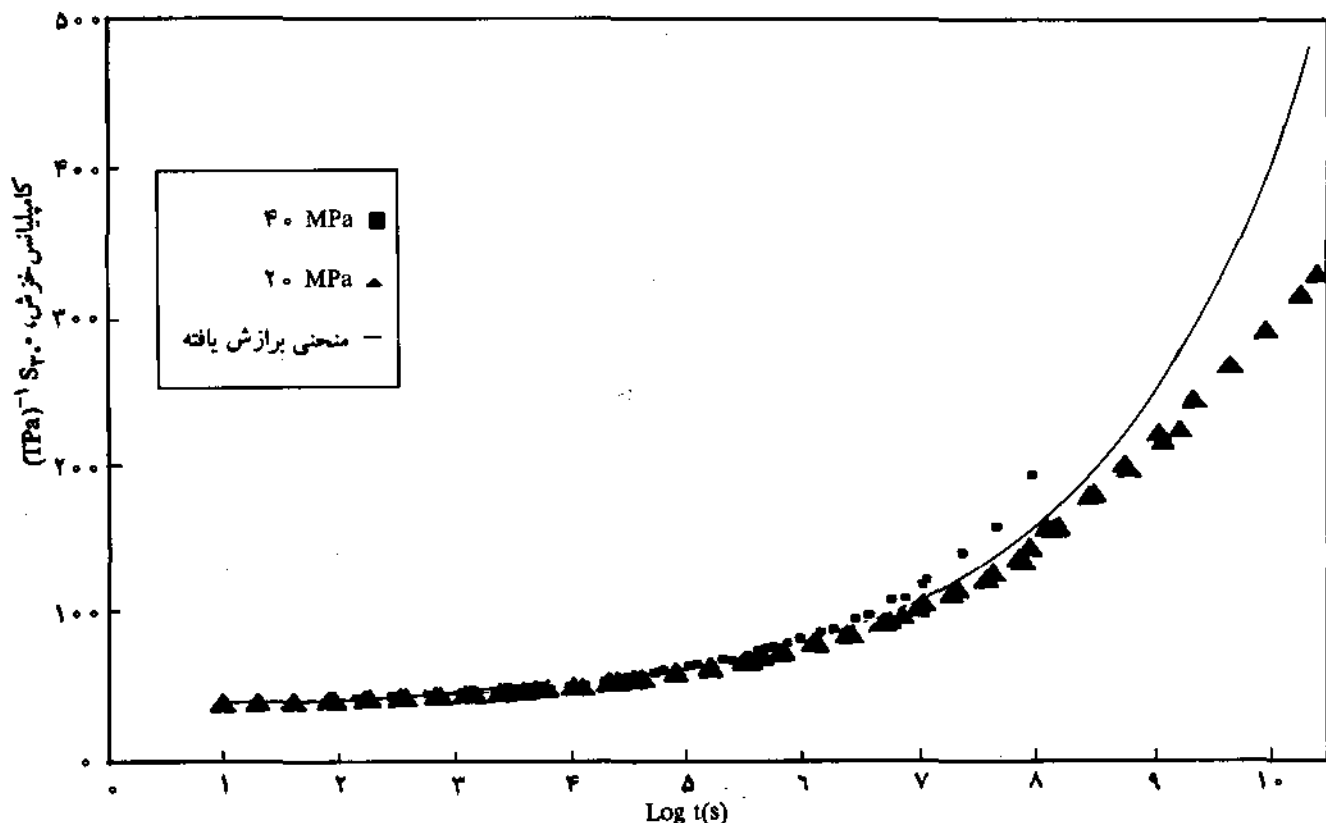
$$S_{11} = 21/44 \text{ (TPa)}^{-1}$$

$$S_{12} = -5/81 \text{ (TPa)}^{-1}$$

همچنین با استفاده از نرم‌افزار TSPV معادله‌های ۱۲ و ۱۳ برای S_{22} و S_{99} حاصل شده‌اند:

تنش - کرنش را در جهت الیاف و منحنیهای کرنش عرضی- کرنش طولی را نشان می‌دهند. شیب منحنیهای تنش - کرنش در جهت الیاف، مقادیر مدول یا معکوس کامپلیانس در جهت الیاف را و شیب منحنیهای کرنش عرضی - کرنش طولی مقادیر ضرایب پویسان را در دماهای مختلف ارائه می‌دهند. مقادیر کامپلیانس و ضریب پویسان در جهت الیاف (S_{۱۱}، S_{۱۲}) تقریباً مستقل از مقدار دما و تنش‌اند و مقادیر آنها با متوسط‌گیری از نتایج بدست آمده در دماهای مختلف حساب شده است.

برای بدست آوردن منحنی مادر کامپلیانس خزش، آزمایشهای کوتاه‌مدت خزش (یک‌ساعت) به وسیله دستگاه اندازه‌گیری روی قطعات با زاویه الیاف ۹۰ و ۳۰° در دماهای مختلف انجام شد. این آزمایشها برای هر زاویه پیچش در دو سطح تنش مختلف انجام گرفته و هر آزمایش برای ۳ تا ۴ مرتبه تکرار شده است. در شکل‌های ۵ و ۶ منحنیهای کوتاه مدت کامپلیانس خزش در دماهای مختلف برای زاویه ۳۰° در دو سطح تنش ۲۰ و ۴۰ MPa نشان داده شده است. مشاهده شد که در دمای بالا قبل از رسیدن به زمان یک ساعت نمونه‌های کامپوزیتی شکسته می‌شوند. به روش نموداری و با استفاده از اصل برهمنش دما-زمان، منحنیهای کوتاه مدت خزش با انتقال عمودی و



شکل ۷- منحنی S_p حاصل از آزمایشها در دمای 30°C در دو سطح تنش ۲۰ و ۴۰ MPa.

ثابت عمومی گازهاست و A و B پارامترهای معادله خطی‌اند. هر دو معادله خطی و آرنیوس روی مقادیر آزمایش $\text{Log } a_T$ برحسب دما برازش یافته‌اند. اگرچه هر دو معادله بخوبی تغییرات $\text{Log } a_T$ نسبت به دما را بیان می‌کنند، اما معادله خطی دارای دقت بیشتری است. در شکل ۸ نقاط آزمایشی و معادله‌های آرنیوس و خط برازش یافته روی نقاط آزمایشی ملاحظه می‌شود.

معادله‌های ۱۶ و ۱۷ برای معادله‌های خطی و آرنیوس حاصل شده‌اند:

$$\text{Log } a_T = 24/822 - 0/115T \quad (16)$$

$$\text{Log } a_T = 11759 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{303/16} \right) \quad (17)$$

که T دما برحسب درجه کلوین است.

برای تعیین اثر مقدار تنش روی خزش کامپوزیت در جهات عرضی و برش آزمایشهای جداگانه‌ای در دمای ثابت 30°C در تنشهای مختلف انجام شده است. شکل ۹ منحنیهای کوتاه‌مدت خزش را در جهت 30° نشان می‌دهد. هر آزمایش برای ۳ تا ۴ مرتبه تکرار شده است. در این حالت با داشتن مقادیر m و n از معادله ویسکوالاستیک

$$S_{p2} = 74/655 + 1/188t^{-0/232} (\text{TPa})^{-1} \quad (12)$$

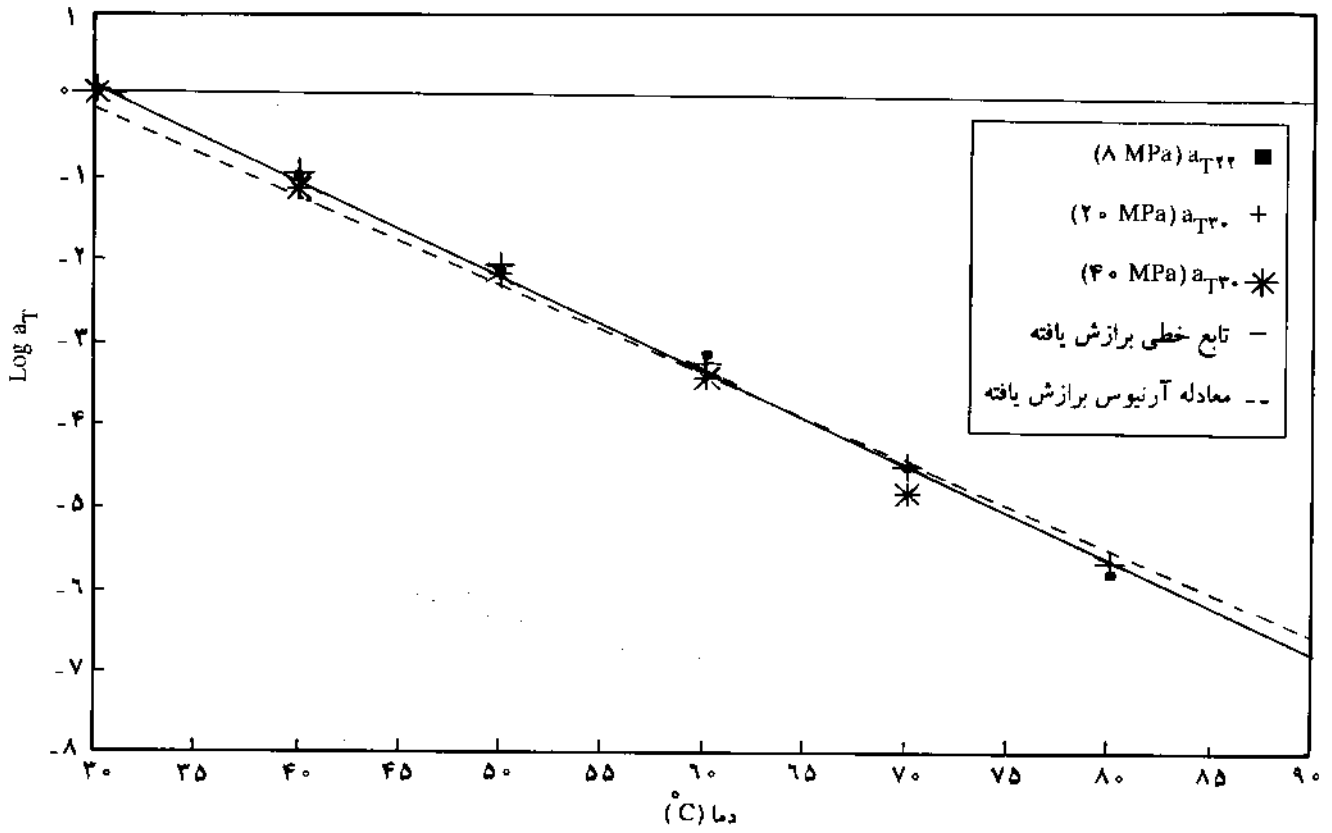
$$S_{p1} = 120/070 + 7/596t^{-0/238} (\text{TPa})^{-1} \quad (13)$$

که TPa به معنی 10^{12} Pa است. برای بدست آوردن توابع ضرایب انتقال افقی a_T مقادیر انتقال افقی منحنیهای کوتاه‌مدت خزش در دماهای مختلف برای زاویه‌های 30° و 90° در تنشهای مختلف به صورت لگاریتم a_T برحسب T رسم شده است. برای مواد پلیمری مشابه بسیار متداول است که برای دمای زیر T_g از معادله آرنیوس برای بیان تغییرات $\text{Log } a_T$ نسبت به دما استفاده شود [۱، ۲]. همچنین، گزارش شده است که برای کامپوزیتهای پلیمری تقویت شده با الیاف تک‌جهتی و پیوسته، معادله خطی زیر برای بیان تغییرات $\text{Log } a_T$ نسبت به دما مناسب است [۱۱]:

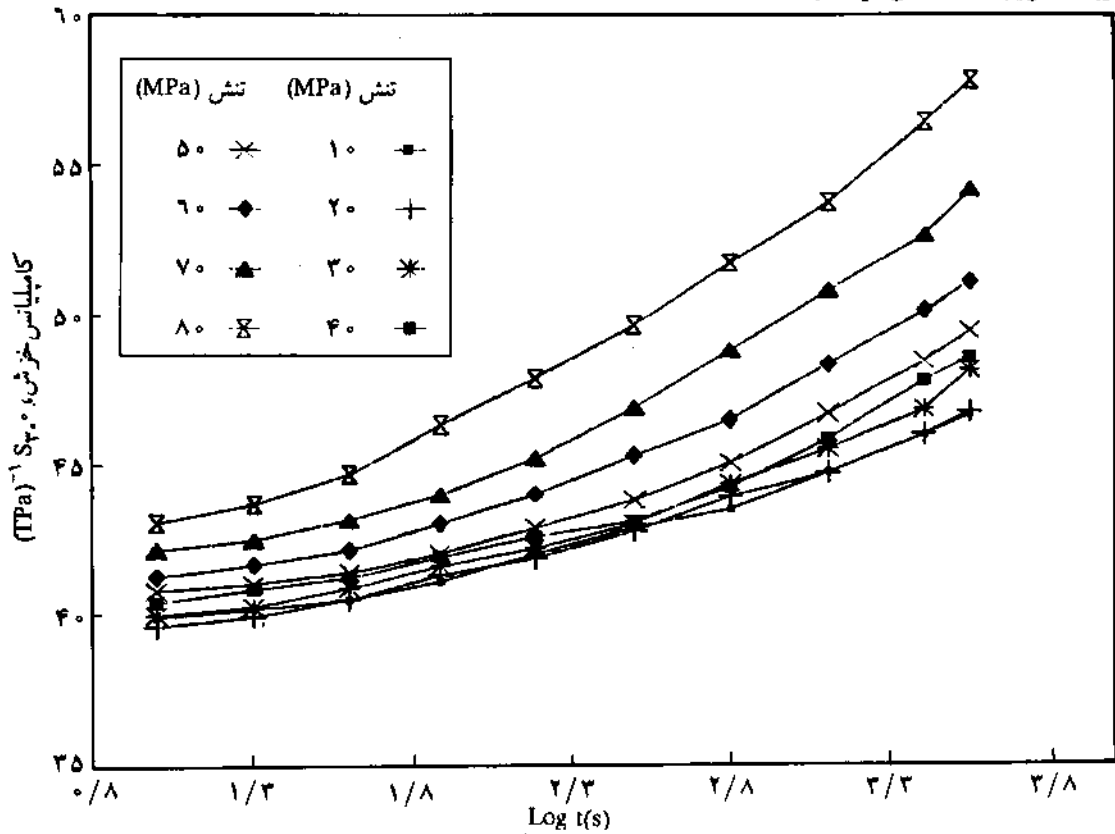
$$\text{Log } a_T = \frac{\Delta H}{\gamma/303R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (14)$$

$$\text{Log } a_T = AT + B \quad (15)$$

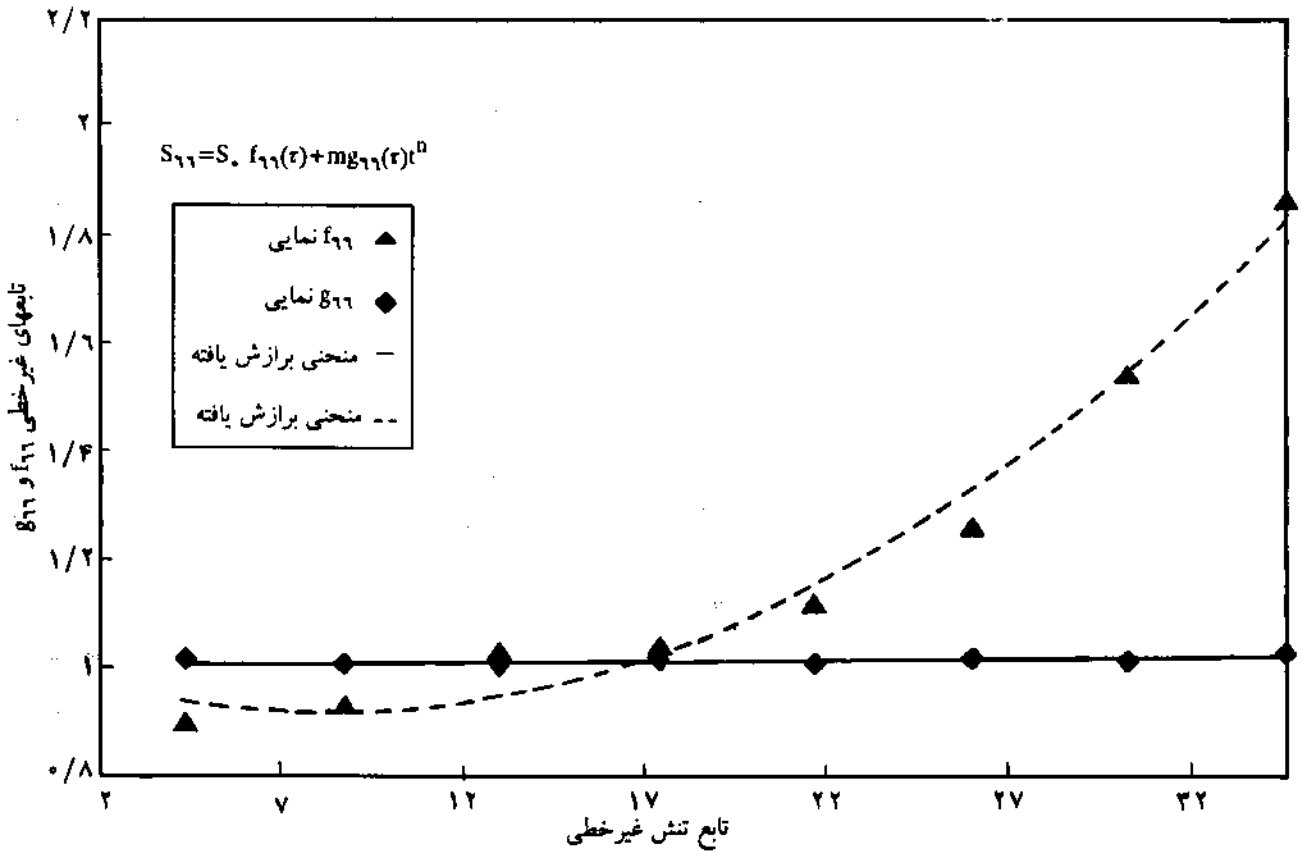
در معادله‌های بالا ΔH ، T_0 و R به ترتیب دمای مبنا، انرژی فعالسازی و



شکل ۸- منحنیهای ضرایب انتقال افقی (a_T) بر حسب دما.



شکل ۹- منحنیهای کوتاه مدت کامپلیانس خزش در زاویه 30° ، دمای ثابت 30°C و تنشهای مختلف.



شکل ۱۰- توابع تنش برای مدل ویسکوالاستیک غیر خطی کامپلیانس خزش در جهت برش.

$$\times 10^{-2} \epsilon_{11}^2) + (1/295 \times 10^{-3} \epsilon_{11}^2) \{t^{0.238} (\text{TPa})^{-1} \quad (19)$$

نتیجه‌گیری

کامپوزیت اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه تحت تأثیر پایه پلیمری خود ویسکوالاستیک بوده و در اثر اعمال بار روی آن در دو جهت عرضی و برش بین لایه‌ای رفتار خزش نشان می‌دهد. اما، در جهت طولی الاستیک عمل می‌کند و خزش محسوسی ندارد.

تغییر شکل کامپوزیت یادشده در جهات عرضی و برش شامل دو قسمت تغییر شکل فوری و تغییر شکل برحسب زمان است. بنابراین، کامپلیانس در جهت عرضی و برش شامل دو قسمت الاستیک و وابسته به زمان است و هر دو قسمت به دما، تنش و زمان بستگی داشته و کامپوزیت رفتار ویسکوالاستیک غیرخطی دارد. اما در جهت طولی تغییر شکل کامپوزیت فوری و الاستیک بوده و بنابراین کامپلیانس فقط شامل یک قسمت الاستیک و مستقل از زمان، دما و تنش است. نسبت تغییر شکل خزشی وابسته به زمان به تغییر شکل فوری و الاستیک در دماهای پایین و زمان محدود بسیار کوچک است. لیکن این نسبت با بالا رفتن دما یا

خطی (معادله ۱۲) مقادیر $f(\sigma)$ و $g(\sigma)$ در تنشهای مختلف برای هر کدام از توابع S_{11} و S_{22} محاسبه شده است. سپس مقادیر $f(\sigma)$ و $g(\sigma)$ برحسب تنش مدلسازی شده و بهترین معادله‌ها روی آنها برازش یافته است. برای معادله S_{22} از تنش σ_2 برای معادله S_{11} از تنش ϵ_{11} استفاده شده است.

شکل ۱۰ مقادیر $f(\epsilon)$ و $g(\epsilon)$ برای معادله S_{11} و توابع درجه دوم برازش یافته روی آنها را نشان می‌دهد.

در پایان با استفاده از تجزیه و تحلیل‌های یاد شده و مقادیر S_{11} و S_{22} (به ترتیب ۲۱/۴۴ و $10^{-5}/81 (\text{TPa})^{-1}$) معادله‌های ویسکوالاستیک غیرخطی برای عناصر ماتریس نرمی (کامپلیانس) بصورت زیر حاصل شده‌اند:

$$S_{22} = 74/655 [1 + (2/0.9 \times 10^{-3} \sigma_2^2)] + 1/188 [1 + 3/89 \times 10^{-3} \sigma_2^2] \{t^{0.232} (\text{TPa})^{-1} \quad (18)$$

$$S_{11} = 120/0.70 [1 + (1/3.9 \times 10^{-5} \epsilon_{11}^2)] + 7/596 [1 - (2/127$$

جزء ثابت در معادله قانون توانی

S

زمان یا هر دو افزایش چشمگیری می‌یابد. معادله‌های بدست آمده نشان می‌دهد که ثابت n (توان متغیر زمان) برای معادله‌های عناصر ماتریس کامپلیانس درجات عرضی و برش ($S_{۱۱}$ و $S_{۲۲}$) تقریباً مقادیر یکسانی بوده است. همچنین، سرعت تغییر شکل و خزش درجهت برش بیشتر از سرعت خزش درجهت عرضی است. مقادیر ضرایب انتقال افقی برای کامپوزیت درجات عرضی و برش مستقل از زاویه الیاف و مقدار تنش بوده و فقط تابع دماست.

مراجع

- 1 Ferry J.D.; *Viscoelastic Properties of Polymers*; John Wiley & Sons, New York, 1970.
- 2 Ward I.M.; *Mechanical Properties of Solid Polymers*; John Wiley & Sons, 2nd ed., New York, 1979.
- 3 Halpin J.C.; *Introduction to Viscoelasticity*; Composite Materials Workshop, Tsai S.W., Halpin J.C. and Pagano N.J.(Eds.), Technomic, 1967.
- 4 Lou Y.C. and Schapery R.A.; *J. Compos. Mater.*; **5**, 208-234, April 1971.
- 5 Brinson H.F.; *Viscoelastic Behavior and Lifetime (Durability) Predictions, Mechanical Characterization of Load Bearing Fiber Composite Laminates*; Cardo A.H. & Verchery G. (Eds.), 1984.
- 6 Brinson H.F. & Dillard D.A.; *Progress in Science and Engineering of Composites*; Hayashi T., Kawata K. and Umekawa S. (Eds.), Iccm-Iv, 795-802, Tokyo, 1982.
- 7 Dillard D.A., Morris D.H. & Brinson H.F.; *Composite Materials: Testing and Design*, **6**, ASTM, 357-70, 1982.
- 8 Dillard D.A.; *Creep Rupture of Laminated Graphite/Epoxy Composite*; Ph.D. Dissertation, VPI and SU, Blacksburg, VA, also VPI Report VPI-E-81-3, 1981.
- 9 Morris D.H., Brinson H.F. and Yeow Y.T.; *Polym. Compos.*, **1**, 1, 32-6, Sept. 1980.
- 10 Yeow Y.T., Morris D.H. and Brinson H.F.; *Composite Materials: Testing and Design (Fifth Conference)*; ASTMSTP 674, ASTM, 263-81, 1979.
- 11 Gramoll K.C., Dillard D.A. and Brinson H.F.; *Composite Materials: Testing and Design*; **9**, ASTMSTP 1059, ASTM, Philadelphia, 477-93, 1990.
- 12 Agarwal B.D. and Broutman L.J.; *Analysis and Performance of Fiber Composite*; John Wiley and Sons, 1980.
- 13 Jones R.M.; *Mechanics of Composite Materials*; Mc Graw-Hill, 1975.
- 14 Mallik P.K.; *Fiber Reinforced Composites, Materials*,

قدردانی

از پژوهشگاه علوم و تکنولوژی دفاعی و پژوهشگاه پلیمر ایران برای همکاری و حمایت از این طرح تشکر و قدردانی می‌شود.

علامه و نشانه‌ها

S	کامپلیانس
t	زمان
T	دما
T _c	دمای مینا
ϵ_1	کرنش درجهت الیاف
ϵ_2	کرنش درجهت عمود برالیاف
$\gamma_{۱۲}$	کرنش برشی
σ_1	تنش درجهت الیاف
σ_2	تنش درجهت عمود برالیاف
$\tau_{۱۲}$	تنش برشی
$\nu_{۱۲}$	ضریب پویسان
θ	زاویه الیاف بامحور طولی قطعات
$\alpha_{۱۱}, \alpha_{۲۲}$	ضرایب انبساط طولی و عرضی
A, B	ضرایب معادله خطی
a_T	ضرایب انتقال افقی
E_1	مدول یانگ درجهت الیاف
E_2	مدول یانگ درجهت عمود بر الیاف
$f(\sigma), g(\sigma)$	توابع تنش
$G_{۱۲}$	مدول برشی
ΔH	انرژی فعالساز
m	ضریب متغیر زمان در معادله قانون توانی
n	توان متغیر زمان در معادله قانون توانی
R	ثابت عمومی گازها
$S_{۱۱}$ و $S_{۲۲}$ ، $S_{۱۲}$ ، $S_{۱۱}$	عناصر ماتریس نرمی

پیش‌بینی خواص ویسکوالاستیک کامپوزیت اپوکسی تقویت شده با ...

Composites; ASTM, D 3039-76, 1989.

۱۹- سیدحسین میرزاسیدی؛ پیش‌بینی خواص ویسکوالاستیک
پلاستیکهای تقویت شده با الیافت تک جهت شیشه؛ پایان‌نامه کارشناسی
ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی،
۱۳۷۴.

Manufacturing and Design; Marcel Dekker, 1988.

15 Schapery R.A.; *Polym. Eng. Sci;* 9, 4, 295-310, July 1969.

16 Chamis C.C. and Sinclair J.H; *Experimental Mechanics*
339-46, Sept. 1977.

17 Yeow Y.T. and Brinson H.F.; *Composites;* 49-55 January.

18 *Standard Test Method For Tensile Properties of Fiber Resin*