

Non-linear Behavior of Polymer Based Composite Laminates under Cyclic Thermal Shock and Its Effects on Residual Stresses

A.R. Ghasemi*, R. Baghersad, and M.R. Vaziri Sereshk

Mechanical Engineering Group, Engineering Department, University of Kashan,
P.O. Box: 87317-51167, Kashan, Iran

Received 12 March 2011, accepted 6 July 2011

ABSTRACT

The residual stresses in composite laminates depend on several factors including the conditions of fabricating process, property of materials, direction and lay-ups of the layers. However the thermo-elastic behavior of composite is one of the most important parameters affecting the magnitude of residual stresses. The elastic properties and residual stresses do not remain constant under cyclic thermal loading and vary in a non-linear manner. The study of these non-linear variations of modulus and strength and their effects on residual stresses in laminates while experiencing thermal load cycles is the main goal of this paper. An experimental device is designed and manufactured conveniently to exert defined thermal load cycles with different temperatures and cycle time on composite laminates. Then orthotropic glass-epoxy composite laminates made by hand lay-up are tested under cyclic thermal loading. The elastic modulus and fracture strength of the samples are measured before and after experiencing defined number of thermal shocks. The residual stresses in composite laminates are calculated and compared based on the actual behavior of composite and by means of a modified classical laminate theory. The results of this study demonstrate that the non-linear behavior of composites influences the residual stresses significantly. In addition, if the sample becomes more brittle, the residual strains remain constant; while the elasticity modulus and residual stresses decrease.

Key Words:

thermal shock,
cyclic loading,
residual stress,
composite laminates,
elastic modulus

(*)To whom correspondence should be addressed.
E-mail: ghasemi@kashanu.ac.ir

رفتار غیرخطی چندلایه‌ای‌های کامپوزیتی پایه پلیمری در اثر شوک گرمایی چرخه‌ای و آثار آن بر تنش‌های پسماند

احمدرضا قاسمی*، رسول باقرصاد، محمدرضا وزیری سرشک

کاشان، دانشگاه کاشان، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، صندوق پستی ۸۷۳۱۷-۵۱۱۶۷

دریافت: ۸۹/۱۲/۲۱ پذیرش: ۹۰/۴/۱۵

چکیده

تنش‌های پسماند در چندلایه‌ای‌های کامپوزیتی به عوامل مختلفی هم‌چون شرایط پخت، خواص مواد، جهت و چیدمان لایه‌ها بستگی دارد. از مهم‌ترین عوامل اثرگذار بر مقادیر این تنش‌ها، رفتار گرماکشسانی کامپوزیت‌هاست. خواص کشسانی و تنش‌های پسماند در اثر بارگذاری گرمایی چرخه‌ای ثابت نیست و تغییرات آن غیرخطی است. بنابراین در پژوهش حاضر، اثر بارگذاری گرمایی چرخه‌ای بر تغییرات غیرخطی مدول، تنش شکست و تنش‌های پسماند چندلایه‌ای مطالعه شده است. برای اعمال شوک، دستگاه آزمایشی مناسب با اختلاف دما و تعداد چرخه‌های مناسب طراحی و ساخته شد. سپس، چندلایه‌ای‌های متعامد شیشه اپوکسی به روش چیدمان دستی تهیه و در اثر اعمال بارگذاری با تعداد چرخه‌های متفاوت قرار گرفتند. با انجام آزمایش کشش روی نمونه‌ها پیش و پس از اعمال شوک تغییرات مدول کشسانی، استحکام شکست، تنش و اثر آنها بر تنش‌های پسماند در تعداد چرخه‌های مختلف مطالعه شده است. با استفاده از رفتار واقعی کامپوزیت، تنش‌های پسماند در چندلایه‌ای‌های کامپوزیتی به روش بهینه شده کلاسیک ارزیابی و مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد، رفتار غیرخطی کامپوزیت، اثر زیادی بر مقادیر تنش‌های پسماند دارد و با ترد شدن نمونه کرنش‌های پسماند ثابت است، اما مدول کشسانی و تنش‌های پسماند کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی

شوک گرمایی،
بارگذاری چرخه‌ای،
تنش‌های پسماند،
چندلایه‌ای‌های کامپوزیتی،
مدول کشسانی

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

مقدمه

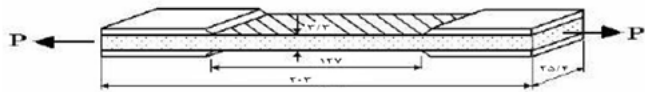
آثار محیطی روی رفتار و خواص سازه‌های کامپوزیتی اهمیت به سزایی دارد. از آن جا که دمای پخت کامپوزیت اغلب زیاد نیست، آثار بارگذاری گرمایی و رفتار غیرخطی ناشی از آن در مواد ناهمسانگرد و چندلایه‌ای‌های کامپوزیتی اهمیت زیادی دارد. هم چنین، تنش‌های پسماند ناشی از پخت در کامپوزیت‌ها مورد توجه پژوهشگران است و برای تعیین مقادیر و شدت آن در لایه‌های مختلف پژوهش‌های زیادی انجام شده است [۱،۲]. در خستگی ناشی از بارگذاری گرمایی چرخه‌ای خواص کشسانی ماده از جمله مدول کشسانی و خواص شکست به شکل غیرخطی تغییر می‌کند.

Hahn [۳] با فرض رفتار گرانروکشسان خطی مواد یک مدل برای محاسبه کرنش‌های شیمیایی و گرمایی ارائه کرد که در آن خواص مواد به شکل تابعی از دمای پخت تغییر می‌کند. Asaro و Pei Gu [۴] اثر خواص غیرخطی مواد بر تغییرات گرمایی کامپوزیت‌های پایه پلیمری را مطالعه کردند. آنها نشان دادند، خواص غیرخطی اثر زیادی بر تنش داخلی و کرنش صفحه‌ای داشته، اما در بیشینه تغییر مکان عرضی اثر ناچیزی دارند.

Ruyter و Mercic [۶،۵] اثر چرخه گرمایی را در کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف شیشه بررسی کردند. این پژوهشگران نشان دادند، با افزایش تعداد چرخه گرمایی مدول خمشی کاهش می‌یابد. هم چنین، آنها اثر بارگذاری گرمایی چرخه‌ای را بر خواص خمشی کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف تک جهتی سیلیکا مطالعه کردند و اختلاف قابل توجهی میان تنش نمونه‌ها پیش و پس از چرخه گرمایی مشاهده کردند.

Ruyter و Segerstrom [۷] اثر چرخه گرمایی بر خواص خمشی کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن را مطالعه کردند. در این پژوهش، آثار رفتار غیرخطی مواد ناهمسانگرد و چندلایه‌ای‌های کامپوزیتی در اثر شوک گرمایی و بارگذاری خستگی مطالعه شده است. آن گاه اثر این رفتار غیرخطی به مقادیر تنش و کرنش‌های پسماند در هر لایه از چندلایه‌ای‌های کامپوزیتی با روش‌های کلاسیک و جدول ۱- خواص الیاف و رزین مورد استفاده برای ساخت نمونه‌ها.

ماده	استحکام کششی (MPa)	وزن مخصوص (g/cm ³)	مدول کشسانی (GPa)
الیاف بافته شده شیشه	۳۴۰۰	۲/۶	۲۵
رزین اپوکسی	۵۲	۱/۹	۶



شکل ۱- ابعاد استاندارد نمونه‌های آزمایشی.

بهینه شده کلاسیک محاسبه شده و نتایج مقایسه و ارزیابی شده است.

تجربی

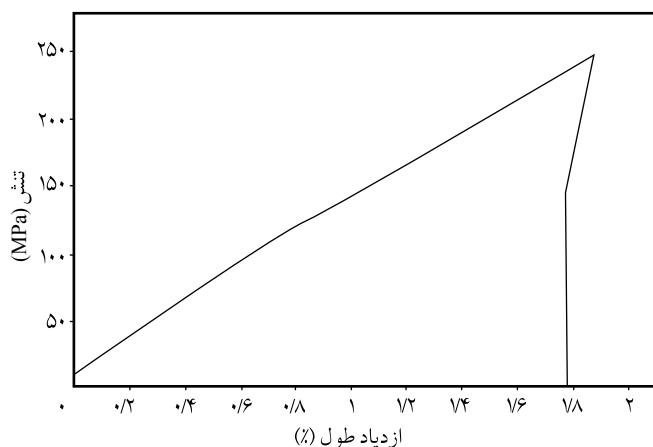
مواد

برای ساخت نمونه‌های آزمایشی از الیاف بافته شده شیشه و رزین اپوکسی (SW404) با سخت کننده (HY2404) استفاده شده است. خواص الیاف و رزین مورد استفاده در جدول ۱ نشان داده شده است.

روش‌ها

ساخت نمونه‌های آزمایشی

نمونه‌های آزمایشی مطابق با استاندارد ASTM D3039 [۸] و با استفاده از روش چیدمان دستی و درصد حجمی الیاف برابر با ۶۰٪ ساخته و مطالعه شدند. به دلیل استفاده از سخت کننده، نمونه‌ها پس از گذشت ۲۴ h در دمای محیط خشک شدند و به چرخه پخت نیازی نبود. ابعاد نمونه‌های آزمایشی مطابق با نمونه استاندارد بود که در شکل ۱ نشان داده شده است. رواداری ضخامت نمونه‌های آزمایشی ۰/۲ mm بود. پس از برش نمونه‌ها با استفاده از دستگاه کشش پنج نمونه در آزمون کشش قرار گرفته که مقادیر مدول کشسانی و تنش شکست



شکل ۲- نمودار تنش - تغییر طول نمونه پیش از بارگذاری گرمایی چرخه‌ای.

جدول ۲- نتایج آزمون کشش برای مدول کشسانی و تنش شکست.

خواص مکانیکی	نمونه اول	نمونه دوم	نمونه سوم	نمونه چهارم	میانگین
مدول کشسانی (MPa)	۱۴۲۵۱/۶	۱۴۲۸۷/۲	۱۴۳۸۲/۶	۱۴۴۴۸/۳	۱۴۳۷۷/۷
تنش شکست (MPa)	۲۴۵/۲	۲۴۵/۹	۲۴۶/۸	۲۴۷/۲	۲۴۶/۶

عایق‌های گرمایی برودت‌تی است.

از مهم‌ترین مزایای دستگاه مزبور، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

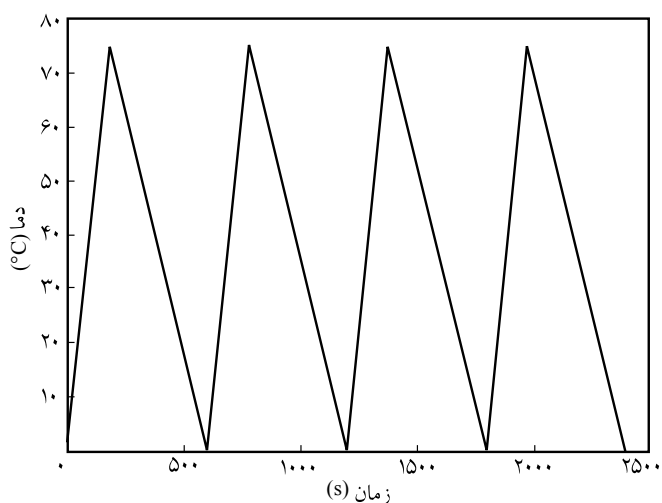
- ۱- متوالی بودن چرخه‌های سرمایش و گرمایش،
- ۲- کنترل دمای نمونه در هر لحظه،
- ۳- قابل تنظیم بودن تعداد چرخه‌ها، دمای محفظه گرمایش و دمای محفظه سرمایش،
- ۴- خودکار بودن دستگاه و کاهش خطاهای انسانی در زمان اعمال بارگذاری و

۵- اعمال بارهای گرمایی به طور دلخواه.

شکل ۳ نمای کلی دستگاه را نشان می‌دهد. با استفاده از دستگاه ساخته شده بارگذاری گرمایی چرخه‌ای اعمالی روی نمونه‌ها مطابق شکل ۴ در محدوده دمایی 0°C برای چرخه سرمایش و 75°C برای چرخه گرمایش تغییر می‌کند. مدت زمان اعمال هر چرخه 10 min است که چرخه سرمایش در حدود 7 min و چرخه گرمایش در حدود 3 min به طول می‌انجامد. معادله ریاضی خطی مناسب برای این بارگذاری به شکل زیر ارائه شده است که به کمک مدار کنترلی دستگاه ترسیم می‌شود:

$$T(t) = \begin{cases} 0.41667t & 0 \leq t \leq 180 \\ 10.71428 - 0.17857t & 180 < t \leq 600 \end{cases} \quad (1)$$

$$T(t+600T) = T(t) \quad 180 < t \leq 600$$



شکل ۴- نمودار بارگذاری گرمایی چرخه‌ای.

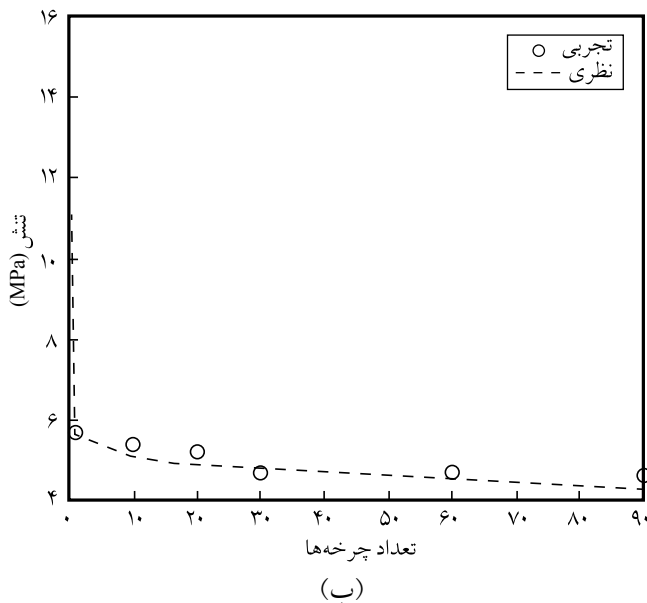
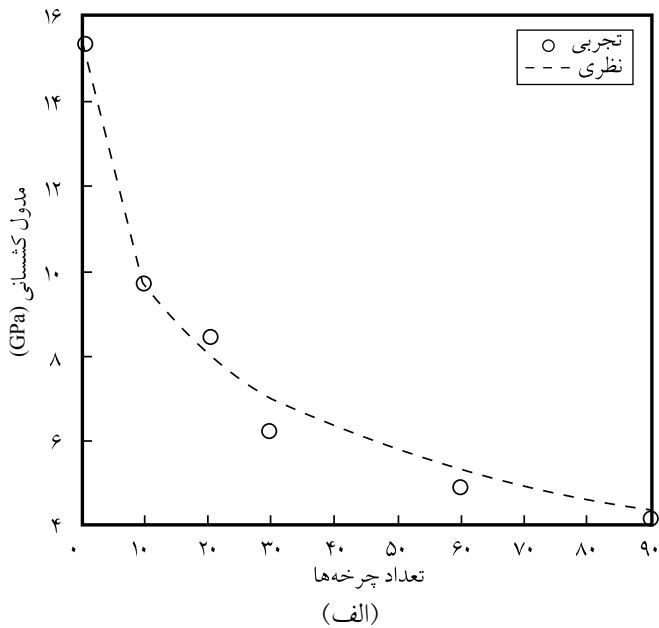
به دست آمده است. یکی از نمودارهای تنش - تغییر طول از انجام آزمون کشش در شکل ۲ نشان داده شده است. مقادیر تنش شکست و مدول کشسانی برای چند نمونه آزمایشی پیش از بارگذاری گرمایی چرخه‌ای در جدول ۲ بیان شده است.

بارگذاری گرمایی چرخه‌ای

برای مطالعه بارگذاری گرمایی روی صفحات کامپوزیتی، دستگاه بارگذاری چرخه‌ای طراحی و ساخته شده است. دستگاه ساخته شده این قابلیت را دارد که تعداد چرخه‌های متوالی را در یک فرایند کنترل شده به طور خودکار به نمونه اعمال کند. دستگاه دارای دو بخش گرمایش و سرمایش جداگانه است و نمونه در هر چرخه تحت گرمایش و سرمایش متوالی قرار می‌گیرد. محدوده دمایی دستگاه بین 18°C تا 150°C قابل تنظیم است. این دستگاه دارای پنج بخش مجزا شامل، چرخه سرمایش، چرخه گرمایش، سامانه کنترل، سامانه بالابر و



شکل ۳- نمای کلی از دستگاه بارگذاری گرمایی چرخه‌ای.



شکل ۶ تغییرات: (الف) مدول کشسانی و (ب) تنش شکست بر حسب تعداد چرخه گرمایی.

در معادلات بالا X_{0i} و E_{0i} به ترتیب تنش شکست و مدول کشسانی پیش از اعمال چرخه گرمایی و T_{ref} دمای مرجع است. دمای مرجع دمایی است که با انجام آزمون کشش در آن دما، هیچ پیوندی بین رزین و الیاف وجود ندارد و مقدار مدول برابر صفر می‌شود که با توجه به آزمایش‌های انجام شده Pei Gu و Asaro [۴] برای صفحه کامپوزیتی شیشه اپوکسی برابر با 120°C است. T_r دمای محیط و برابر با 20°C ، n تعداد چرخه گرمایی و ΔT اختلاف دما بین چرخه سرمایش و گرمایش و در این کار برابر با 75°C است. نمودار ارائه شده برای تنش و مدول همراه با نتایج تجربی در شکل ۶ نشان داده شده است.

جدول ۳- مقادیر میانگین مدول کشسانی و تنش شکست نمونه‌ها در چرخه‌های مختلف گرمایی.

خاصیت	تعداد چرخه					
	۹۰	۶۰	۳۰	۲۰	۱۰	۱
مدول کشسانی (MPa)	۵۰۱۲	۴۸۱۱	۴۷۳۷	۵۲۴۹	۵۴۴۱	۵۶۶۱
تنش شکست (MPa)	۲۴۵/۲	۲۴۶/۱	۲۴۷/۷	۲۵۰/۵	۲۵۲/۱	۲۵۹/۱

با نصب نمونه‌ها داخل دستگاه و راه‌اندازی آن، بارگذاری برای چرخه‌های متوالی ۱، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ چرخه انجام شده است. در هر چرخه پنج نمونه آزمایش شد و پس از اعمال بارگذاری، نمونه‌ها تحت آزمون کشش قرار گرفتند.

نتایج و بحث

مقادیر میانگین تنش و مدول کشسانی برای تعداد چرخه‌های مختلف در جدول ۳ بیان شده است.

نمونه‌های کامپوزیتی پس از اعمال بارگذاری و آزمون کشش در شکل ۵ مشاهده می‌شود. با توجه به مقادیر به دست آمده برای تنش و مدول کشسانی معادله‌های ریاضی زیر برای تغییرات تنش و مدول، به روش میان‌یابی محاسبه شده است:

$$X_i = X_{0i} * e^{(n * (1 - \frac{\Delta T}{T_{ref} - T_r}))^{0.001}} * e^{-\left(\frac{n}{50}\right)^{0.0133}} \quad (2)$$

$$E_i = E_{0i} * e^{-\left(n * \left(1 - \frac{\Delta T}{T_{ref} - T_r}\right)\right)^{0.04}} * e^{-\left(\frac{n}{1000}\right)^{1.111}}$$



شکل ۵- نمونه‌ها پس از اعمال شوک گرمایی و آزمون کشش.

$$[A] = \sum_{k=1}^m [\bar{Q}]_k \int_{Z_{k-1}}^{Z_k} dz = \sum_{k=1}^m [\bar{Q}]_k (Z_k - Z_{k-1}) = \sum_{k=1}^m [\bar{Q}]_k h_k \quad (5)$$

$$[B] = \sum_{k=1}^m [\bar{Q}]_k \int_{Z_{k-1}}^{Z_k} Z dz = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m [\bar{Q}]_k (Z_k^2 - Z_{k-1}^2) = \sum_{k=1}^m [\bar{Q}]_k h_k \bar{Z}_k$$

$$[D] = \sum_{k=1}^m [\bar{Q}]_k \int_{Z_{k-1}}^{Z_k} Z^2 dz = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^m [\bar{Q}]_k (Z_k^3 - Z_{k-1}^3) = \sum_{k=1}^m [\bar{Q}]_k (h_k \bar{Z}_k^2 + \frac{h_k^3}{12})$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، ماتریس‌های $[B]$ ، $[A]$ و $[D]$ به خواص ماده بستگی دارد. با توجه به غیرخطی بودن این خواص در اثر بارگذاری خستگی گرمایی مقادیر این ماتریس‌ها نیز تغییر می‌کند و در نتیجه سبب تغییر مقادیر تنش‌های پسماند می‌شود. معادله (۴) را می‌توان به شکل زیر بازنویسی کرد:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon \\ k \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A' & B' \\ B' & D' \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} N^T \\ M^T \end{Bmatrix} \quad (6)$$

که در آن $[D']$ ، $[B']$ ، $[A']$ و $[D^*]$ ماتریس‌هایی هستند که با استفاده از ماتریس‌های $[B]$ ، $[A]$ و $[D]$ به ترتیب زیر محاسبه می‌شوند:

$$[A'] = [A]^{-1} + [A]^{-1} [B] [D]^{-1} [B] [A]^{-1}$$

$$[B'] = -[A]^{-1} [B] [D^*]^{-1} \quad (7)$$

$$[D'] = [D^*]^{-1}$$

$$[D^*] = [D] - [B] [A]^{-1} [B]$$

بنابراین کرنش‌ها و تنش‌های پسماند در هر یک از لایه‌ها و در مختصات غیراصولی با استفاده از کرنش‌ها و انحناهای لایه میانی به دست می‌آیند:

تعیین تنش‌های پسماند در کامپوزیت‌ها به روش‌های نظری

بارهای گرمایی باعث ایجاد تنش‌های پسماند در قطعه می‌شوند که برای محاسبه این تنش‌ها نخست باید مقادیر این بارها (نیروها و ممان‌های گرمایی) معین شوند. سه روش کلاسیک، بهینه شده کلاسیک و روش انرژی برای تعیین تنش‌های پسماند در چندلایه‌ای‌های کامپوزیتی ارائه شده‌اند [۹، ۱۰]. نیروها و ممان‌های گرمایی که در صفحات غیراصولی (axis-off) به چند لایه اعمال می‌شوند را می‌توان به شکل زیر بیان کرد:

$$(N_1^T, M_1^T) = \sum_{k=1}^m (\bar{Q}_{11}^{(k)} \alpha_1^{(k)} + \bar{Q}_{12}^{(k)} \alpha_2^{(k)} + \bar{Q}_{16}^{(k)} \alpha_{12}^{(k)}) \Delta T^{(k)} \cdot (h_k, h_k \bar{Z}_k)$$

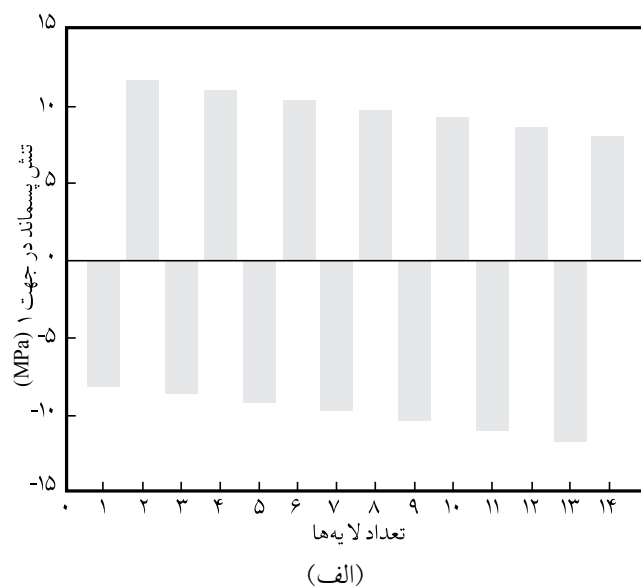
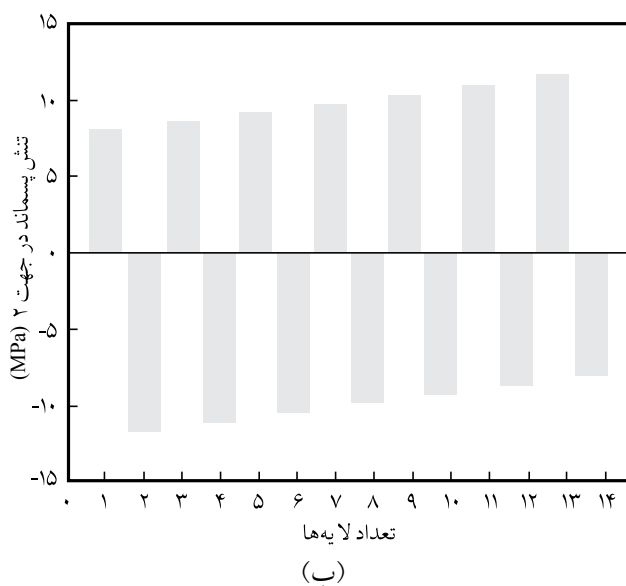
$$(N_2^T, M_2^T) = \sum_{k=1}^m (\bar{Q}_{12}^{(k)} \alpha_1^{(k)} + \bar{Q}_{22}^{(k)} \alpha_2^{(k)} + \bar{Q}_{26}^{(k)} \alpha_{12}^{(k)}) \Delta T^{(k)} \cdot (h_k, h_k \bar{Z}_k) \quad (3)$$

$$(N_{12}^T, M_{12}^T) = \sum_{k=1}^m (\bar{Q}_{16}^{(k)} \alpha_1^{(k)} + \bar{Q}_{26}^{(k)} \alpha_2^{(k)} + \bar{Q}_{66}^{(k)} \alpha_{12}^{(k)}) \Delta T^{(k)} \cdot (h_k, h_k \bar{Z}_k)$$

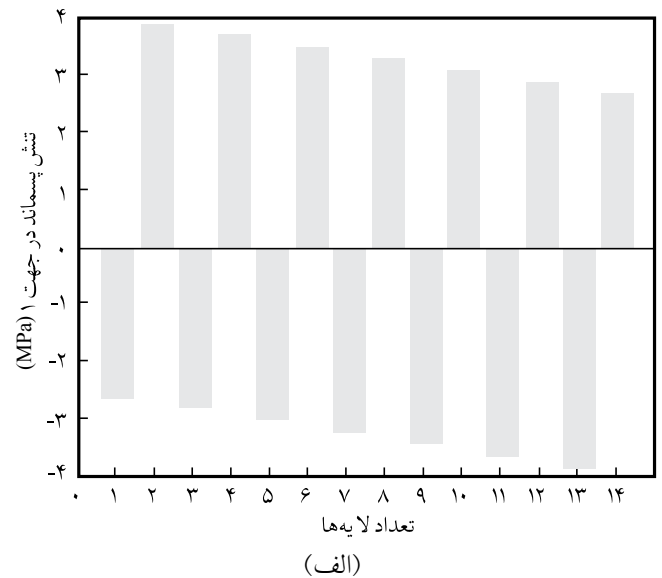
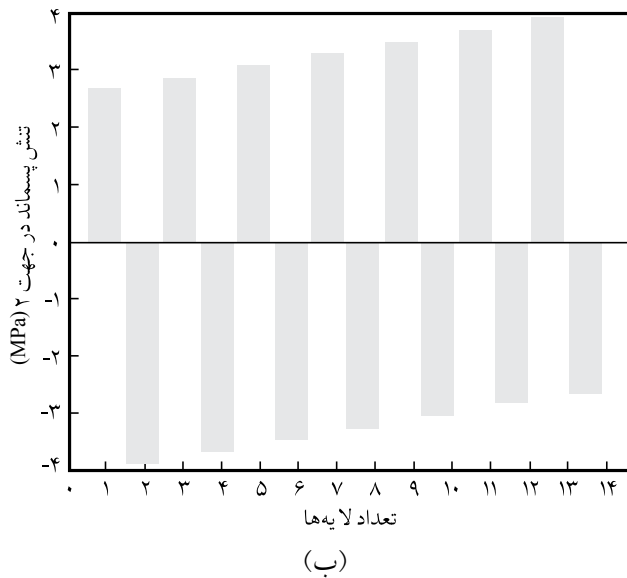
در معادلات گفته شده $\alpha^{(k)}$ و $\bar{Q}^{(k)}$ به ترتیب ضرایب انبساط گرمایی و ماتریس سفتی کاهش یافته هر لایه در جهت‌های غیراصولی (axis-off) است. h_k ضخامت هر لایه، \bar{Z}_k فاصله متوسط لایه k ام تا تار خنثی و ΔT نیز اختلاف دمای محیط و دمای عاری از تنش است. با استفاده از مقادیر به دست آمده برای بارهای گرمایی، کرنش‌ها و انحناهای لایه میانی به شکل زیر محاسبه می‌شوند:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon \\ k \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} N^T \\ M^T \end{Bmatrix} \quad (4)$$

که در آن $[B]$ ، $[A]$ و $[D]$ به ترتیب ماتریس‌های سفتی کششی، جفت شدن و خمش هستند و با معادلات زیر تعریف می‌شوند:



شکل ۷- مقادیر تنش‌های پسماند پیش از بارگذاری چرخه‌ای: (الف) جهت ۱ و (ب) جهت ۲.



شکل ۸- مقادیر تنش‌های پسماند پس از ۳۰ چرخه اعمال شوک: (الف) جهت ۱ و (ب) جهت ۲.

از بارگذاری مطالعه شده است. هر چند با افزایش تعداد چرخه‌های گرمایی تغییرات ادامه می‌یابد، اما درصد تغییرات پس از ۳۰ چرخه اندک است. بنابراین، با توجه به شکل ۶ کاهش مدول پس از اعمال ۳۰ چرخه گرمایی و اثر آن بر مقادیر تنش‌های پسماند محاسبه و نتایج مقایسه شده است.

با توجه به این که نمونه‌های آزمایشی چندلایه‌ای‌های متعامد هستند، مقادیر تنش‌های پسماند در جهت‌های غیراصولی ۱ و ۲ در لایه‌های مشابه یکسان است و تنها از نظر کششی یا فشاری بودن فرق می‌کنند. تنش برشی نیز برابر با صفر است. به دلیل کاهش ثابت‌های کشسان نمونه‌ها در اثر بارگذاری چرخه‌ای مقادیر تنش‌های پسماند نمونه‌ها نیز در اثر بارگذاری کاهش یافته است.

مقایسه نتایج

در این بخش تنش‌های پسماند نمونه‌ها پیش و پس از اعمال

$$\{\varepsilon\}_{off}^{(k)} = \{\varepsilon\} + \bar{Z}_k \{k\} - \Delta T \{\alpha\}_{off}^{(k)} \quad (8)$$

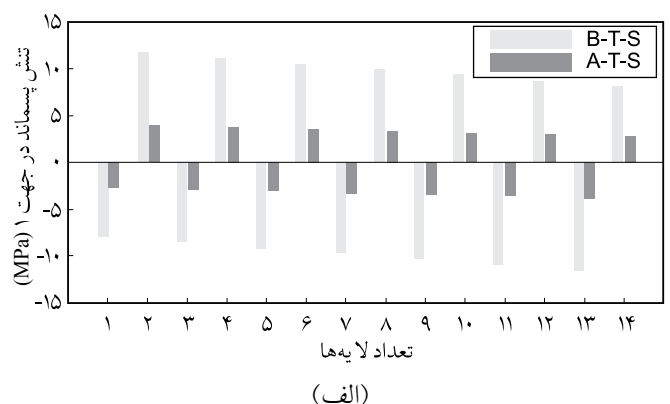
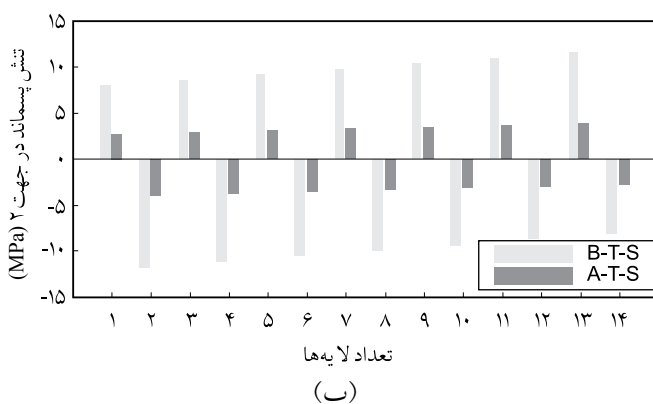
$$\{\sigma^r\}_{off}^{(k)} = [\bar{Q}]^{(k)} \{\varepsilon^r\}_{off}^{(k)} \quad (9)$$

مقادیر تنش‌های پسماند پیش از اعمال بارگذاری گرمایی

با استفاده از یک برنامه رایانه‌ای مقادیر کرنش‌ها و تنش‌های پسماند نمونه‌های آزمایشی پیش از بارگذاری گرمایی و در مختصات غیراصولی به دست آمده است. در شکل ۷ مقادیر تنش‌های پسماند نمونه‌های آزمایشی پیش از بارگذاری چرخه‌ای نشان داده شده است.

مقادیر تنش‌های پسماند پس از شوک گرمایی

با در نظر گرفتن خواص غیرخطی برای نمونه‌های شیشه اپوکسی مقادیر تنش‌های پسماند برای هر چرخه با مقادیر به دست آمده پیش



شکل ۹- مقایسه بین تنش‌های پسماند پیش و پس از اعمال بارگذاری گرمایی چرخه‌ای: (الف) جهت ۱ و (ب) جهت ۲.

ناشی از اولین چرخه است. با توجه به ساخت نمونه‌های آزمون در دمای محیط، اعمال اولین چرخه سبب ایجاد یا تکمیل پیوندهای بین مولکولی شده و افزایش استحکام مشاهده می‌شود. اما با افزایش بیشتر تعداد چرخه‌های گرمایی کاهش استحکام مشاهده شده است. این کاهش در تعداد چرخه‌های کم با شیب بیشتری اتفاق می‌افتد و به مرور این شیب کاهش می‌یابد. اعمال اولین چرخه باعث کاهش ۵۷٪ مدول کشسانی به دلیل ترشدن نمونه می‌شود که اهمیت زیادی دارد. با افزایش تعداد چرخه‌ها کاهش مدول ادامه پیدا می‌کند.

تغییر ثابت‌های کشسان سبب تغییر رفتار ماده در بارگذاری‌های مختلف و هم چنین تغییر تنش‌های پسماند گرمایی ناشی از پخت می‌شود. از آن جا که تنش‌های پسماند ارتباط مستقیمی با مدول کشسانی ماده دارد، در این پژوهش تغییرات مدول و اثر آن بر تنش‌های پسماند در چندلایه‌ای‌های شیشه اپوکسی تحلیل شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد، بارگذاری گرمایی اثری بر کرنش‌های پسماند ندارد، اما اثر آن وابسته به تعداد چرخه و دمای هر چرخه روی تنش‌های پسماند قابل ملاحظه خواهد بود. علت امر این است که کرنش‌های پسماند تابعی از اختلاف دما و ضرایب انبساط ماده دارد، اما تنش‌های پسماند با مدول کشسانی ماده ارتباط مستقیم داشته و با تغییرات آن تغییر می‌کند.

بارگذاری مقایسه شده است تا اثر آن روی تنش و کرنش‌های پسماند مشخص شود. شکل ۹ مقایسه نتایج را به طور کمی نشان می‌دهد. در این شکل (BTH (before thermal shock نمایانگر تنش‌های پسماند نمونه‌ها پیش از بارگذاری و ATH (after thermal shock نیز بیانگر تنش‌های پسماند نمونه‌ها پس از اعمال ۳۰ چرخه بارگذاری گرمایی است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پس از ۳۰ چرخه بارگذاری مقادیر تنش‌های پسماند نمونه در حدود ۶۶٪ کاهش یافته است. با کاهش مدول کشسانی در اثر بارگذاری گرمایی چرخه‌ای و ثابت بودن کرنش‌های پسماند، مقادیر تنش‌های پسماند کاهش یافته است.

نتیجه گیری

رفتار واقعی کامپوزیت‌ها در اثر اعمال شوک گرمایی به شکل خستگی غیرخطی است. این رفتار غیرخطی وابسته به تعداد چرخه و اختلاف دمای هر چرخه گرمایی است. در بارگذاری چرخه‌ای ثوابت کشسان ماده متغیر است و تنها از راه آزمایش می‌توان به تغییرات آن پی برد. اعمال اولین چرخه روی نمونه‌ها سبب افزایش استحکام در حدود ۵٪ می‌شود که این افزایش به دلیل ترد شدن نمونه در اثر گرمای

مراجع

- Ghasemi A.R. and Shokrieh M.M., Development of Integral Method for Measurement of Non-Uniform Residual Stresses in Composite Laminates, *J. Int. Polym. Sci. Technol.*, **21**, 347-355, 2008.
- Ghasemi A.R. and Shokrieh M.M., Residual Strains Measurement and Calculating Residual Stresses in Composite Laminates Using Integral Method, *J. Esteghlal*, **28**, 81-93, 2010.
- Hahn H.T., Residual Stresses in Polymer Matrix Composite Laminates, *J. Compos. Mater.*, **10**, 266-278, 1976.
- Gu P. and Asaro R.J., Influence of Material Nonlinearity on Thermal Distortion of Polymer Matrix Composite Panels, *Composites, Part B*, **41**, 58-66, 2010.
- Mercic G. and Ruyter I.E., Effect of Thermal Cycling on Composites Reinforced with Two Differently Sized Silica-Glass Fibers, *J. Dent. Mater.*, **23**, 1157-1163, 2007.
- Mercic G. and Ruyter I.E., Influence of Thermal Cycling on Flexural Properties of Composite Reinforced with Unidirectional Silica-Glass Fibers, *J. Dent. Mater.*, **24**, 1050-1057, 2008.
- Segerstrom S. and Ruyter I.E., Effect of Thermal Cycling on Flexural Properties of Carbon-Graphite Fiber-Reinforced Polymers, *J. Dent. Mater.*, **25**, 845-851, 2009.
- Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, Designation, ASTM D 3039, 2003.
- Tsai S.W., *Composites Design*, 4th ed., Think Composites, 1988.
- Hyer M.W., Calculation of the Room-Temperature Shapes of Unsymmetric Laminates, *J. Compos. Mater.*, **15**, 296-310, 1981.