

مطالعه تحلیلی و تجربی رفتار غیرخطی و ضریب اطمینان شکست چندلایه‌های کامپوزیتی در اثر بارگذاری چرخه حرارتی سیکلی

قاسمی، احمدرضا*^۱ و باقرصاد، رسول^۲

- ۱- استاد یار، کاشان، دانشگاه کاشان، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک
۲- کارشناس ارشد، کاشان، دانشگاه کاشان، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک
(دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۰۵/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۳/۲۲)

چکیده

یک سازه هوافضا مانند بدنه هواپیما یا سازه کامپوزیتی یک ماهواره در معرض اختلاف درجه حرارت به شکل سیکلی بوده و چرخه حرارتی بر خواص سازه‌ای آن تاثیرگذار است. مدول الاستیسیته و خواص شکست در اثر بارگذاری چرخه حرارتی سیکلی ثابت نبوده و تغییرات آنها غیرخطی می‌باشد. این تغییرات در صفحات کامپوزیتی پایه پلیمری بیشتر از مواد ایزوتروپ بوده و از اهمیت زیادی برخوردار است. در این تحقیق، تغییرات استحکام شکست و مدول الاستیسیته صفحات کامپوزیتی پایه پلیمری در اثر بارگذاری چرخه حرارتی مورد مطالعه قرار گرفته است. تغییرات استحکام و مدول وابسته به تعداد سیکل حرارتی، اختلاف دمای سیکل‌های حرارتی اعمال شده و دمای مرجع دارد که مقادیر عددی آن با استفاده از روش آزمایشی بدست آمده‌اند. برای اعمال بارگذاری حرارتی سیکلی بر روی نمونه‌های کامپوزیتی پایه پلیمری، دستگاه آزمایشی مناسب با اختلاف دما و تعداد سیکل‌های مناسب طراحی و ساخته شده است. سپس چندلایه‌های متعادل با استفاده از لایه‌های بافته شده شیشه/اپوکسی به روش چیدمان دستی ساخته شده و تحت بارگذاری چرخه حرارتی قرار گرفته‌اند. با انجام آزمایش کشش بر روی نمونه‌ها قبل از اعمال بارگذاری و پس از اعمال بارگذاری چرخه حرارتی تغییرات مدول الاستیک و استحکام شکست در تعداد سیکل‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. آنگاه مدل ریاضی مناسب برای پیش‌بینی این تغییرات ارائه شده است که با نتایج تجربی تطابق قابل قبولی دارد. در پایان روابط بدست آمده در تحلیل رفتار ماده و مطالعه شکست صفحات استفاده شده است.

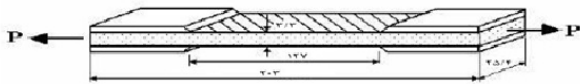
واژه‌های کلیدی: چرخه حرارتی، بارگذاری سیکلی، ضریب اطمینان شکست، چندلایه کامپوزیتی، ثوابت الاستیک.

مقدمه

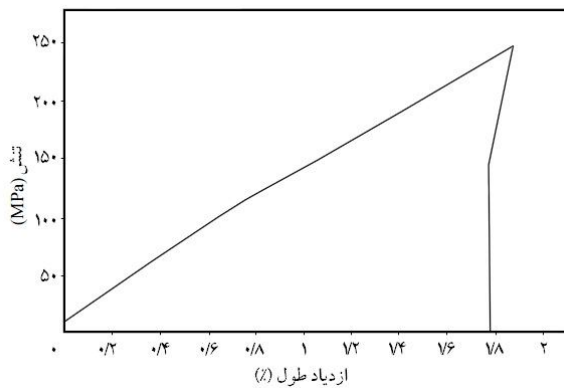
حرارتی در مواد همگن سبب تغییر در ثوابت الاستیک و خواص شکست ماده می‌شود. در مواد مرکب نیز تغییر درجه حرارت دمای پخت، تغییر شرایط محیطی و تغییر در چیدمان لایه‌ها در خواص ماده و ثوابت الاستیک تاثیر چشمگیری دارد [۱-۳]. در خستگی حرارتی ناشی از بارگذاری حرارتی سیکلی خواص الاستیک ماده از جمله مدول الاستیسیته و خواص شکست به صورت غیرخطی تغییر می‌کند. پی جی یو و همکارش [۴] تاثیر خواص غیر خطی مواد بر تغییرات گرمایی کامپوزیت‌های پایه پلیمری را مورد مطالعه قرار داده‌اند. آنها نشان دادند که، رفتار غیرخطی مواد تاثیر زیادی در تنش داخلی و کرنش

اثرات محیطی بر روی رفتار و خواص سازه‌های کامپوزیتی اهمیت به‌سزایی دارد. از آنجا که دمای پخت کامپوزیت اغلب زیاد نیست، اثرات بارگذاری چرخه حرارتی و رفتار غیر خطی ناشی از آن در مواد ارتوتروپیک و صفحات کامپوزیتی اهمیت زیادی دارد. یک سازه هوافضا مانند بدنه هواپیما به دلیل اختلاف دمای ارتفاع پرواز و سطح زمین و یا سازه کامپوزیتی یک ماهواره به دلیل تغییرات شدید دما در فضا در معرض اختلاف درجه حرارت به شکل سیکلی بوده و چرخه حرارتی اعمال شده بر خواص سازه‌ای آن تاثیرگذار است. بارگذاری

نمونه‌های آزمایشی مطابق با استاندارد D3039 [۹] و با استفاده از روش چیدمان دستی ساخته شده و مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در مرحله ساخت نمونه‌ها با رعایت درصد وزنی ۶۰٪ الیاف، و ۴۰٪ رزین نمونه‌های آزمایشی ساخته شده‌اند. برای رسیدن به ضخامت مورد نیاز هفت لایه از الیاف مورد نظر را بر روی یکدیگر قرار داده و به دلیل استفاده از هاردنر نمونه‌ها پس از گذشت ۲۴ ساعت در دمای محیط خشک شده و نیازی هم به چرخه پخت ندارند. در این تحقیق نمونه‌ها پس از ساخت و قبل از آزمایش مورد بررسی قرار گرفته و درصد حباب آنها کمتر از ۱٪ بوده است. ابعاد نمونه‌های آزمایشی مطابق با استاندارد در شکل ۱ نشان داده شده است. پس از برش نمونه‌ها با استفاده از دستگاه تست کشش مناسب سه تا پنج نمونه در اثر آزمون کشش قرار گرفته و مقادیر مدول الاستیک و تنش به دست آمده است. یکی از نمودارهای تنش- تغییر طول به دست آمده برای نمونه‌ها بعد از انجام تست کشش در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱- ابعاد استاندارد نمونه‌های آزمایشی [۹]



شکل ۲- نمودار تنش- تغییر طول نمونه قبل از بارگذاری حرارتی چرخه‌ای

جدول ۲ مقادیر استحکام و مدول الاستیک را برای نمونه‌های آزمایشی قبل از بارگذاری حرارتی سیکلی بیان می‌کند.

صفحه‌ای داشته اما در ماکزیمم تغییر مکان عرضی تاثیر ناچیزی دارد. انصاری [۵] تاثیر آنالیز دینامیکی لوله‌های کامپوزیتی چندلایه تحت فشار داخلی سیکلی و درجه حرارت سیکلی را مطالعه نموده است. جوکسی مرک [۶-۷] تاثیر سیکل حرارتی در کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف شیشه را مورد مطالعه قرار داده و نشان داد که با افزایش سیکل حرارتی مدول خمشی کاهش می‌یابد. او همچنین تاثیر بارگذاری سیکلی حرارتی بر خواص خمشی کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف تک جهته سلیکا را مورد مطالعه قرار داده و نشان داد که اختلاف قابل توجهی میان استحکام شکست نمونه‌ها قبل از سیکل حرارتی و بعد از سیکل حرارتی وجود دارد. سوسانو سگرستروم [۸] نیز تاثیر سیکل حرارتی بر خواص خمشی کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن را مورد مطالعه قرار داده است.

از آنجا که هیچ تحقیق تحلیلی و تجربی برای بررسی تاثیرات بارگذاری حرارتی سیکلی بر تغییرات غیرخطی مدول الاستیک و خواص شکست صفحات کامپوزیتی پایه پلیمری مشاهده نشده است، در این تحقیق اثرات بارگذاری چرخه حرارتی و بارگذاری خستگی حرارتی بر این تغییرات مورد مطالعه قرار گرفته است. ساخت نمونه‌های آزمایشی، مطالعه تجربی و تحلیلی استحکام شکست، ثوابت الاستیک و ارائه مدل ریاضی مناسب برای پیش بینی این تغییرات و اثرات آن بر روی ضریب اطمینان شکست از اهداف این تحقیق می‌باشد.

ساخت نمونه‌های آزمایشی

برای ساخت نمونه‌های آزمایشی از الیاف بافته شده شیشه و رزین اپوکسی (SW404) با هاردنر (HY2404) استفاده شده است. خصوصیات الیاف و رزین مورد استفاده در جدول زیر نشان داده شده است.

جدول ۱- خصوصیات الیاف و رزین برای ساخت نمونه‌ها

نام مواد	استحکام کششی GPa	وزن مخصوص gr/cm ³	مدول الاستیسیته GPa
الیاف وون شیشه	۳/۴۴	۲/۶	۷۲/۳
رزین اپوکسی	۰/۱	۱/۹	۹/۵
هاردنر	-	۱/۰۵	-

جدول ۲- نتایج آزمون کشش نمونه‌های کامپوزیتی (MPa)

مکانیکی	نمونه اول	نمونه دوم	نمونه سوم	نمونه چهارم	میانگین
مدول	۱۴۲۵۱/۶	۱۴۲۸۷/۲	۱۴۳۸۲/۶	۱۴۴۴۸/۳	۱۴۳۷۷/۷
استحکام	۲۴۵/۲	۲۴۵/۹	۲۴۶/۸	۲۴۷/۲	۲۴۶/۶

بارگذاری چرخه حرارتی سیکلی

برای مطالعه بارگذاری حرارتی سیکلی بر روی صفحات کامپوزیتی، دستگاه بارگذاری حرارتی سیکلی طراحی و ساخته شده است. این دستگاه قادر است که تعداد سیکل‌های متناوب را در یک پروسه کاملاً کنترل شده و خودکار به نمونه اعمال نماید. دستگاه دارای دو قسمت گرمایش و سرمایش جداگانه بوده و نمونه در هر سیکل تحت گرمایش و سرمایش متوالی قرار می‌گیرد. محدوده دمایی دستگاه بین ۱۸- تا ۱۵۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. دستگاه مورد نظر دارای پنج بخش مجزا شامل، سیکل سرمایش، سیکل گرمایش، سیستم کنترلی، سیستم بالابر و عایق‌های حرارتی- برودتی می‌باشد. از مهمترین مزایای دستگاه فوق، می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- متوالی بودن سیکل‌های سرمایش و گرمایش
- کنترل دمایی نمونه در هر لحظه
- قابل تنظیم بودن تعداد سیکل‌ها و دمایی محفظه‌ها
- گرمایش و دمایی محفظه سرمایش
- کاهش زمان اعمال بارگذاری با عایق کاری مناسب و افزایش توان دستگاه
- اتوماتیک بودن دستگاه و کاهش خطاهای انسانی در زمان اعمال بارگذاری حرارتی
- اعمال بارهای حرارتی به شکل دلخواه

شکل ۳ نمای کلی از دستگاه را نشان می‌دهد. با استفاده از دستگاه ساخته شده، بارگذاری حرارتی سیکلی بر روی نمونه‌ها مطابق شکل ۴ در محدوده دمایی صفر درجه سانتی‌گراد برای سیکل سرمایش و ۷۵+ درجه سانتیگراد برای سیکل گرمایش اعمال می‌شود. مدت زمان اعمال هر سیکل ۱۰ دقیقه می‌باشد که سیکل سرمایش در حدود ۷ دقیقه و سیکل گرمایش در حدود ۳ دقیقه به طول می‌انجامد. هر گاه شدت تغییرات دما

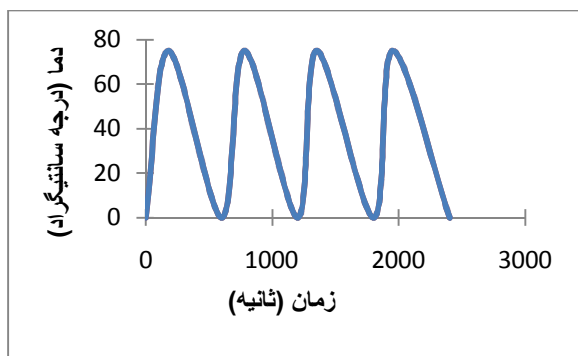
زیاد باشد به آن شوک حرارتی گفته شده و هر گاه شدت تغییرات اندک باشد به آن چرخه حرارتی گویند که ممکن است در تحقیقات مختلف میزان آن اندکی متفاوت باشد. در این تحقیق با توجه به مرجع مختلف تغییرات دما بین ۵ تا ۱۰ درجه بر ثانیه به عنوان چرخه حرارتی در نظر گرفته شده است [۱۱]. رابطه ریاضی مناسب برای این بارگذاری را می‌توان بصورت زیر ارائه نمود که زمان t بر حسب ثانیه و دمایی T بر حسب درجه سانتیگراد است:

$$T(t) = \begin{cases} 0.41667 t & 0 \leq t \leq 180 \\ 107.1428 - 0.17857 t & \end{cases} \quad (1)$$

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

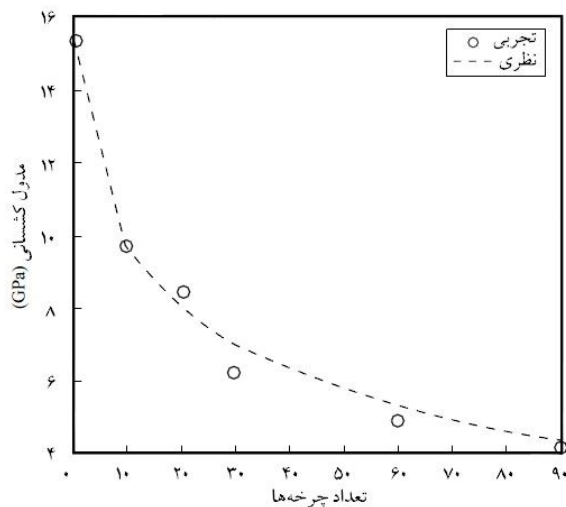


شکل ۳ - نمای کلی از دستگاه بارگذاری حرارتی سیکلی

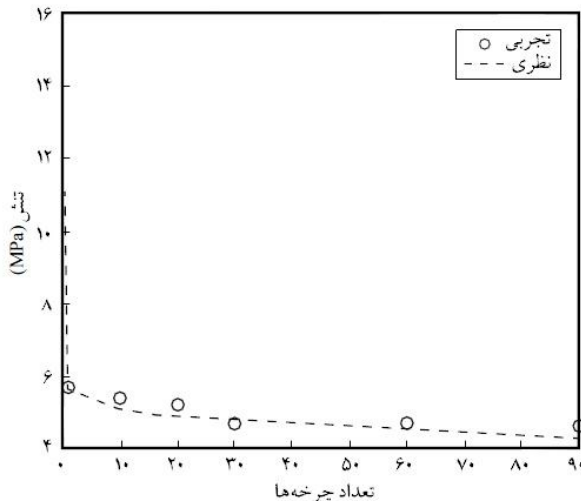


شکل ۴ - نمودار بارگذاری حرارتی سیکلی

استحکام شکست و مدول الاستیک برای تعداد سیکل‌های مختلف همراه با نتایج تجربی در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. اعمال اولین سیکل حرارتی بر روی نمونه‌ها باعث افزایش استحکام در حدود ۵٪ می‌شود که این افزایش به دلیل ترد شدن رزین در اثر حرارت ناشی از اولین سیکل حرارتی می‌باشد. با افزایش بیشتر تعداد سیکل‌های حرارتی، استحکام کاهش می‌یابد که این کاهش در سیکل‌های اولیه با شیب بیشتری اتفاق افتاده و به مرور این شیب کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۵ - تغییرات: مدول الاستیک بر حسب تعداد سیکل



شکل ۶ - تغییرات استحکام بر حسب تعداد سیکل

با افزایش تعداد سیکل‌های حرارتی مدول الاستیک نیز کاهش یافته و با افزایش تعداد سیکل با شیب کمتر این کاهش ادامه پیدا می‌کند. علت این کاهش آن است که با اعمال بارگذاری حرارتی چرخه ای و افزایش تعداد چرخه‌های حرارتی،

سپس بارگذاری حرارتی سیکلی برای سیکل‌های متوالی ۱، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ سیکل انجام شده است. در هر سیکل سه تا پنج نمونه مورد آزمایش قرار گرفته و پس از اعمال بارگذاری حرارتی بر روی نمونه‌ها در سیکل‌های متفاوت، نمونه‌ها تحت آزمایش کشش قرار گرفته‌اند.

جدول ۳ - مقادیر میانگین مدول الاستیسیته و استحکام نمونه‌ها

تحت سیکل‌های مختلف حرارتی (MPa)		۹۰	۶۰	۳۰	۲۰	۱۰	۱	بدون بارگذاری	خصوصیات مکانیکی
مدول	سیکل	۵۰۱۲	۴۸۱۱	۴۷۳۷	۵۲۴۹	۵۴۴۱	۵۶۶۱	۱۴۳۷۸	مدول
استحکام	سیکل	۲۴۵/۲	۲۴۶/۱	۲۴۷/۷	۲۵۰/۵	۲۵۲/۱	۲۵۹/۱	۲۴۶/۶	استحکام

مقادیر میانگین استحکام و مدول الاستیک برای تعداد سیکل‌های مختلف در جدول ۳ بیان شده است.

با توجه به اینکه تغییرات مدول و استحکام متأثر از چندین پارامتر بوده و برای اعمال تاثیر هر کدام از این متغیرها نیاز به رابطه‌ای است که علاوه بر نمایش این تغییرات، تاثیر مورد نظر را نیز نمایش دهد. رابطه ریاضی مناسب برای بیان تغییرات سفتی و مدول را می‌توان به شکل یک تابع نمایی بین تغییر خواص و تغییرات دما و تعداد سیکل حرارتی بیان نمود [۱۰]. روابط ریاضی زیر برای تغییرات استحکام و مدول، در اثر بارگذاری حرارتی سیکلی با استفاده از روش حداقل مربعات و به کمک نرم‌افزار مطلب^۱ محاسبه و ارایه شده است:

$$X_n = X_0 \times e^{-\left(n \times \left(1 - \frac{\Delta T}{T_{ref} - T_r}\right)\right)^{0.001}} \times e^{-\left(\frac{n}{50}\right)^{0.0133}} \quad (2)$$

$$E_n = E_0 \times e^{-\left(n \times \left(1 - \frac{\Delta T}{T_{ref} - T_r}\right)\right)^{0.04}} \times e^{-\left(\frac{n}{1000}\right)^{1.111}} \quad (3)$$

در روابط بالا X_0 و E_0 به ترتیب استحکام و مدول الاستیسیته قبل از اعمال چرخه حرارتی و T_{ref} دمای مرجع می‌باشد. دمای مرجع دمایی است که در آن دما مدول الاستیک نمونه برابر صفر می‌شود، که با توجه به آزمایش‌های صورت گرفته توسط پی جی یو [۴] برای کامپوزیت شیشه/ اپوکسی برابر با ۱۲۰ درجه سانتیگراد است. T_r دمای محیط و برابر با ۲۰ درجه سانتیگراد، n تعداد چرخه حرارتی و ΔT اختلاف دما بین سیکل سرمایش و گرمایش است، که در این تحقیق برابر با ۷۵ درجه سانتیگراد می‌باشد.

مقادیر مدول و استحکام شکست برای تعداد سیکل‌های مختلف نیز با X_n و E_n بیان شده است. نمودار نمایی ارایه شده برای

و ضریب اطمینان کاهش می‌یابد. کاهش ضریب اطمینان در بارگذاری تک‌محوره برابر ۱۵ درصد بوده و در بارگذاری دوماحوره برابر ۱۰ درصد می‌باشد.

جدول ۵ - ضریب اطمینان شکست نمونه‌های آزمایشی در اثر

بدون بار حرارتی (Mpa)	بارگذاری استاتیکی و چرخه حرارتی					
	1 Cycle	10 Cycle	20 Cycle	30 Cycle	60 Cycle	90 Cycle
۲۴۶/۶	۲۵۹/۱	۲۵۲/۲	۲۵۰/۵	۲۴۷/۷	۲۴۶/۱	۲۴۵/۲
۱۴۷/۹۶	۱۵۵/۴۶	۱۵۱/۳۲	۱۵۰/۳	۱۴۸/۶۲	۱۴۷/۶۶	۱۴۷/۱۲
۲۴۶/۶	۲۵۹/۱	۲۵۲/۲	۲۵۰/۵	۲۴۷/۷	۲۴۶/۱	۲۴۵/۲
۱۴۷/۹۶	۱۵۵/۴۶	۱۵۱/۳۲	۱۵۰/۳	۱۴۸/۶۲	۱۴۷/۶۶	۱۴۷/۱۲
۱۷/۲۶	۱۸/۱۴	۱۷/۶۵	۱۷/۵۴	۱۷/۳۴	۱۷/۲۳	۱۷/۱۶
n(A)	۱/۱۳۹	۱/۳۰۵	۱/۲۱۱	۱/۱۸۹	۱/۱۵۳	۱/۱۳۲
n(B)	۱/۶۲۷	۱/۷۷۶	۱/۶۹۳	۱/۶۷۳	۱/۶۴۰	۱/۶۱۰

نتیجه‌گیری

رفتار واقعی کامپوزیت‌ها در اثر اعمال چرخه حرارتی به شکل خستگی غیرخطی می‌باشد. این رفتار غیرخطی وابسته به تعداد سیکل و اختلاف دمای هر سیکل حرارتی است. در بارگذاری حرارتی سیکلی ثوابت الاستیک ماده متغیر بوده و تنها از طریق آزمایش می‌توان به تغییرات آن پی برد. اعمال اولین سیکل حرارتی بر روی نمونه‌ها باعث افزایش استحکام در حدود ۵٪ می‌شود که این افزایش به دلیل ترد شدن رزین در اثر حرارت ناشی از اولین سیکل حرارتی می‌باشد. با توجه به اینکه نمونه‌ها در دمای محیط خشک شده‌اند، با اعمال اولین سیکل حرارتی پیوندهای بین ملکولی برای نمونه‌ها اتفاق افتاده که باعث ترد شدن آنها شده است. با افزایش بیشتر تعداد سیکل‌های حرارتی، استحکام کاهش می‌یابد که این کاهش در سیکل‌های اولیه با شیب بیشتری اتفاق افتاده و به مرور این شیب کاهش پیدا می‌کند. اولین سیکل حرارتی بر روی نمونه باعث کاهش ۵۷٪ مدول به دلیل ترد شدن نمونه می‌شود. با افزایش تعداد سیکل‌های حرارتی تا ۳۰ سیکل، کاهش مدول با شیب کمتر ادامه پیدا می‌کند. تغییر ثوابت الاستیک سبب تغییر رفتار ماده در بارگذاری‌های مختلف و همچنین تغییر تانسورهای معادله

نابجایی‌ها در ماتریس افزایش می‌یابد و این امر سبب کاهش مدول و استحکام در کامپوزیت می‌گردد. این تغییرات و کاهش برای دیگر مواد از جمله کامپوزیت‌های زمینه فلزی نیز مشاهده شده است [۱۲].

مطالعه ضریب اطمینان شکست نمونه‌ها کامپوزیتی

پس از به‌دست آوردن تنش‌های حرارتی در هر لایه با استفاده از معیار تسای - وو^۲ ضریب اطمینان را برای هر لایه می‌توان به‌دست آورد. معیار تسای - وو به صورت زیر بیان می‌شود:

$$F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_6\tau_{12} + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 = R \quad (4)$$

در رابطه بالا R برابر با معکوس ضریب اطمینان می‌باشد و تانسورهای مقاومت برابر است با:

$$F_1 = \frac{1}{X_t} + \frac{1}{X_c} \quad F_2 = \frac{1}{Y_t} + \frac{1}{Y_c}$$

$$F_{11} = -\frac{1}{X_t \times X_c} \quad F_{22} = -\frac{1}{Y_t \times Y_c} \quad (5)$$

$$F_6 = 0 \quad F_{66} = -\frac{1}{S^2} \quad F_{12} = -\frac{1}{2} \sqrt{F_{11} \times F_{22}}$$

ضریب اطمینان شکست نمونه‌های ساخته شده تحت بارگذاری حرارتی سیکلی با استفاده از رابطه (۴) و با فرض اینکه نمونه‌ها در اثر بارگذاری دلخواه تک‌محوره و دوماحوره استاتیکی مطابق با جدول ۴ باشد، در جدول ۵ بیان شده است.

جدول ۴ - بارگذاری دلخواه تک‌محوره و دوماحوره استاتیکی

	σ_1 (Mpa)	σ_2 (Mpa)	τ_{12} (Mpa)	L
A	۲۳۵	۰	۰	۷۵
B	-۱۰۰	۵۰	۰	۷۵

در جدول ۵، n(A) برابر با ضریب اطمینان تحت بارگذاری تک‌محوره A و n(B) ضریب اطمینان بارگذاری دوماحوره B می‌باشد. نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد که با افزایش تعداد سیکل‌های حرارتی اعمال شده به نمونه‌ها ضریب اطمینان شکست کاهش می‌یابد. علت این امر را می‌توان در کاهش سریع مقاومت شکست نمونه‌های کامپوزیتی در اثر بارگذاری چرخه حرارتی سیکلی جستجو نمود، که در شکل ۵ نشان داده شده است. با کاهش مقاومت نمونه‌ها در اثر بارهای حرارتی سیکلی تانسورهای معادله تسای - وو در رابطه (۴) افزایش یافته

- [9] "Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials", Designation, ASTM D3039, 2003.
- [10] Shin K.B., Kim C.G., Hong, C.S., Lee H.H., "Prediction of failure thermal cycles in graphite/epoxy composite materials under simulated low earth orbit environments" Composites: Part B, 31, 223-235, 2000.
- [11] Mei H., Cheng L., Zhang L., Xu Y., "Modeling the effects of thermal and mechanical load cycling on a C/SiC composite in oxygen/argon mixtures" Carbon 45, 2195-2204, 2007.
- [12] Chawla k.k., "Thermal cycling of Copper matrix Tungsten fiber composites: A methodology study", Metallography 6, 155-169, 1973.

تسای- وو می‌شود. از آنجا که این تانسورها ارتباط مستقیمی به استحکام شکست ماده دارد، در این تحقیق تغییرات استحکام و تاثیر آن بر روی ضریب اطمینان در صفحات شیشه / اپوکسی تحلیل شده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که بارگذاری حرارتی سیکلی سبب کاهش غیرخطی ضریب اطمینان شکست صفحات کامپوزیتی می‌شود. کاهش ضریب اطمینان در سیکل‌های اولیه با نرخ بیشتری روی داده و سپس نرخ آن کمتر می‌شود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله مراتب تشکر و قدردانی خود را از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه کاشان بابت حمایت از نویسندگان این مقاله با ابلاغ پژوهانه ۰۳/۱۵۸۴۹۵ اعلام می‌دارند.

پی‌نوشت‌ها

- 1 Matlab Software
- 2 Tsai-wu Criteria

منابع و مراجع

- [1] Jones R.M., "Mechanics of composite materials", Published by Taylor and Francis, Second Edition, 1999.
- [2] Kollar L.P., Springer G.S., "Mechanics of composite structure", Cambridge University Press, 2003.
- [3] Tsai S.W., "Composites design", 4th Edition, Think Composites, 1988
- [4] Gu P., Asaro R.J., "Influence of material nonlinearity on thermal distortion of polymer matrix composite panels", Composites: Part B, 41, 58-66, 2010.
- [5] Ansari R., Alisafari F., Ghaedi P., "Dynamic analysis of multi-layered filament-wound composite pipes subjected to cyclic internal pressure and cyclic temperature", Composite Structures, 92, 1100-1109, 2010.
- [6] Mercic G., Ruyter I. E., "Effect of thermal cycling on composites reinforced with two differently sized Silica- glass fibers", J. Dent. Mater. 23, 1157-1163, 2007.
- [7] Mercic G., 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.
- [8] Segerstrom S., Ruyter I.E., "Effect of thermal cycling on flexural properties of carbon-graphite fiber-reinforced polymers", J. Dent. Mater. 25, 845-851, 2009.