

# بررسی رفتار کششی کامپوزیت‌های زمینه فنولیک تقویت شده با الیاف بازالت و کربن تحت اثر دوره شوک حرارتی

رضا اسلامی فارسانی<sup>۱\*</sup>؛ سید محمدرضا خلیلی<sup>۲</sup>؛ مسلم نجفی<sup>۳</sup>

## چکیده

هدف از این مقاله بررسی اثر دوره شوک حرارتی بر رفتار کششی دو نوع کامپوزیت پایه پلیمری تقویت شده با الیاف در محیط اکسیدکننده (هوا) است. کامپوزیت‌های مورد آزمایش شامل رزین فنولیک به عنوان ماتریس و تقویت‌کننده‌های الیاف بازالت و الیاف کربن با نسبت حجمی ۳۵٪ درصد است. در زمان اعمال دوره شوک حرارتی در محیط هوا، امکان بروز پدیده اکسیداسیون ماتریس در دمای بالا و ترک خوردگی آن به علت تنش‌های حرارتی ناشی از تفاوت ضرائب انبساط حرارتی ماتریس و الیاف وجود دارد. با افزایش تعداد دوره شوک حرارتی، خواص کششی کامپوزیت‌های دارای الیاف بازالت بطور جدی تحت اثر قرار نمی‌گیرد. در پایان دوره‌های شوک حرارتی، کاهش استحکام کششی و مدول الاستیک در کامپوزیت دارای الیاف بازالت به ترتیب کمتر از ۵ و ۸ درصد و در کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن به ترتیب بیش از ۱۱ و ۱۸/۵ درصد مقادیر اولیه خواهد بود.

**کلمات کلیدی:** دوره شوک حرارتی، رزین فنولیک، الیاف کربن، الیاف بازالت

## *Effect of Thermal Shock Cycling on the Tensile Behavior of Phenolic based Composites Reinforced with Basalt and Carbon Fibers*

R. Eslami Farsani; S.M.R. Khalili and M. Najafi

### ABSTRACT

The aim of the present work is to investigate the effect of thermal shock cycling on the tensile behavior of two types polymer-matrix composites (phenolic resin, reinforced with woven basalt and carbon fibers at a total volume fraction of approximately 35%) in oxidative atmospheres (air). During the thermal shock cycling test performed in air, there is a coupling effect between matrix oxidation, occurring at the high temperatures of the cycle, and matrix cracking due to thermo-mechanical ply stresses induced by the differences in the thermal expansion coefficients between the reinforcement and the matrix phase. The tensile properties of composites reinforced with woven basalt fibers were not significantly affected by thermal shock cycles. The reduction of tensile strength and elastic modulus after thermal cycling was less than 5% and 8% of initial values for composites reinforced with basalt fibers and more than 11% and 18.5% for composites reinforced with carbon fibers, respectively.

**KEYWORDS:** Thermal shock cycling, Phenolic resin, Carbon fibers, Basalt fibers

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۱۰/۶

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۹۰/۳/۱۶

۱ \* نویسنده مسئول و استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی؛ eslami@kntu.ac.ir

۲ استاد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی؛ smrkhalili2005@gmail.com

۳ کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، سازمان صنایع دریایی؛ moslem.najafi85@yahoo.com

است. در دماهای بالاتر از دمای شیشه‌ای شدن، پلیمرها نرم و انعطاف‌پذیر بوده و در دماهای پایین‌تر صلب و شیشه‌ای هستند [۱۴]. بسیاری از خواص فیزیکی در ناحیه دمای شیشه‌ای شدن در صورت وجود حرارت، به سرعت تغییر می‌یابد. بررسی‌ها نشان می‌دهند که اتصالات عرضی ناشی از دوره حرارتی، دمای شیشه‌ای شدن را با ایجاد مقاومت در حرکت مولکولی زنجیره‌ها افزایش می‌دهد [۱۵].

ری [۱۶] با مطالعه اثر شوک حرارتی (دمای بین  $80^{\circ}\text{C}$  و  $8^{\circ}\text{C}$ ) بر سطح مشترک کامپوزیت‌های ترموست تقویت‌شده با الیاف آرامید، دریافت که شرایط حرارتی ممکن است اتصال سطح مشترک را با یک فرایند مکانیکی یا شیمیایی سطحی بهبود بخشد. وی چنین نتیجه گرفت که پدیده بازپخت در اثر شوک حرارتی در کامپوزیت‌های اپوکسی/الیاف کولار منجر به افزایش استحکام گشته در صورتی که در پلی استر/الیاف کولار اثرات تضعیف‌کننده شوک حرارتی بر بازپخت غالب شده است.

کامپوزیت‌های پایه پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن به علت سفتی و استحکام ویژه بالا، به‌طور وسیع در سازه‌های سبک وزن مانند اجزای فضاپیماها، هواپیماها و ماشین‌های دوار که به‌طور عموم در معرض تغییرات دمایی هستند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این کامپوزیت‌ها به‌علت وجود اختلاف زیاد در ضریب انبساط حرارتی الیاف کربن ( $-6 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$ ) و ماتریس‌های پایه پلیمری ( $20 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$  تا  $120 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$ ) احتمال بروز تنش‌های حرارتی وجود دارد [۱۷]. طبق بررسی‌های انجام شده، این تنش‌ها در اکثر موارد منجر به کاهش قابل توجه خواص مکانیکی ماده در شرایط دوره حرارتی می‌شوند.

شین و کیم [۱۸] تغییرات خواص کششی کامپوزیت‌های اپوکسی/الیاف گرافیت را در ۸۰ دوره حرارتی (دمای بین  $70^{\circ}\text{C}$  و  $100^{\circ}\text{C}$ ) مورد ارزیابی قرار دادند که پس از اتمام دوره‌ها مقادیر استحکام کششی و مدول کششی به ترتیب ۱۲٪ و ۵٪ کاهش یافت.

جورج و دورچ [۱۹] نشان دادند که دوره‌های حرارتی می‌توانند موجب ایجاد میکروترک‌هایی در کامپوزیت‌های آلی غیر تک جهته شوند. پایلوس و پایلر [۲۰] کاهش خواص مکانیکی ناشی از تغییرات محیطی را بر روی کامپوزیت‌های پایه پلیمری چندلایه بررسی نمودند. آنها نمونه‌های مختلف کامپوزیت‌های اپوکسی/الیاف گرافیت را در معرض تشعشع الکترونی و دوره حرارتی قرار داده و نشان دادند که اثرات الکترون‌ها به‌همراه دوره حرارتی منجر به کاهش خواص ماتریس شامل جدایش زنجیره‌ها، پیوندهای عرضی و تخریب از نوع میکروترک شده است.

کامپوزیت‌های پایه پلیمری موادی هستند که به‌طور وسیع در صنایع هوافضا، زیرسازه‌ها، بدنه قایق‌ها و پره‌های توربین بادی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. مطالعه رفتار این مواد در اثر شرایط محیطی مانند تغییرات دما، رطوبت، تشعشعات ماوراء بنفش و غیره اهمیت بالایی دارد. در هوانوردی، تجهیزات سازه‌ای باید قابلیت تحمل بارگذاری‌های مکانیکی و تغییرات دمایی را داشته باشند. در پرواز با تغییر حالت از مادون صوت به مافوق صوت، دمای سازه هواپیما از  $50^{\circ}\text{C}$  تا  $130^{\circ}\text{C}$  تغییر می‌یابد که این تغییر دما می‌تواند به ایجاد تنش‌های حرارتی و در نهایت وقوع پدیده خستگی حرارتی منجر شود [۲].

خستگی حرارتی می‌تواند به سازه‌های مقید خارجی به‌شدت آسیب وارد نماید. این مساله در مواد کامپوزیتی به‌علت وجود قيود داخلی ناشی از تفاوت ضرایب انبساط حرارتی و خواص مکانیکی حادث می‌گردد [۳]. طراحی‌های مهندسی بدون در نظرگرفتن کاهش خواص ماده در خستگی حرارتی، ممکن است به عواقب وخیمی بیانجامد. به علت ناهمگنی ساختاری کامپوزیت‌ها، توصیف فرایند تخریب خستگی حرارتی در این مواد مشکل بوده و شامل تعداد زیادی از حالت‌های تخریب مانند ترک خوردگی ماتریس، جدایش بین الیاف و ماتریس، شکست الیاف و پدیده جدایش بین لایه‌ها است [۴].

در زمان اعمال بارگذاری‌های حرارتی، به‌علت ناهم‌جواری ضرایب انبساط حرارتی الیاف و ماتریس، امکان بروز تنش‌های بزرگ در کامپوزیت‌های پایه پلیمری وجود دارد. یکی از مهم‌ترین مشکلات محتمل در مورد کامپوزیت‌های پایه پلیمری، ایجاد میکروترک‌های جدید یا اشاعه ترک‌های پیشین در وجه مشترک الیاف و ماتریس است. میکروترک‌ها نه فقط خواص حرارتی و مکانیکی کامپوزیت‌ها را تغییر می‌دهند بلکه می‌توانند عوامل بروز تخریب‌های دیگر مانند شروع جدایش و شکاف‌های طولی شوند [۴].

تغییرات دمایی می‌تواند اثرات منفی بر پیوندهای شیمیایی ماتریس‌های پلیمری (زنجیره‌های کربن-کربن) داشته باشد و موجب اکسیداسیون و ترک خوردن سطح ماتریس شوند [۵]-[۹]. همچنین افزایش دما می‌تواند در اثری متفاوت منجر به پدیده بازپخت به شکل ایجاد واکنش‌های شیمیایی جدید مثل بوجود آمدن پیوندهای عرضی میان گروه‌های واکنش نداده، شود که منجر به افزایش سفتی، بهبود اتصال سطح مشترک الیاف-ماتریس و ویسکوزیته کامپوزیت می‌شود [۱۰]-[۱۳]. از مهم‌ترین خصوصیات یک پلیمر، دمای انتقال شیشه‌ای شدن آن

ناچیز گاز و حفظ استحکام ویژه در دماهای بالا است. چنین موادی در صورت ترکیب با الیاف مناسب می‌توانند در کاربردهای حیاتی مانند حفظ ایمنی مسافران در آتش‌سوزی بکار روند.

تا به حال تحقیقات کمی در رابطه با دوره حرارتی و به طور خاص دوره شوک حرارتی در حوزه مواد کامپوزیت انجام شده است. تحقیقات انجام شده نیز بیشتر در مورد کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف تک جهته است که تا حد زیادی در ارتباط با کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن است. در زمینه کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف دو جهته تاکنون بررسی قابل توجهی در این رابطه انجام نشده است. در این مقاله برای اولین بار اثر دوره شوک حرارتی بر خواص کششی کامپوزیت‌های با زمینه فنولیک تقویت شده با الیاف بازالت در مقایسه با کامپوزیت‌های الیاف کربن مورد توجه قرار گرفته است.

## ۲- مواد، تجهیزات و روش‌های آزمایش

### ۲-۱- مواد اولیه

مواد مورد استفاده در این تحقیق شامل رزین فنولیک فنلام ساخت شرکت هانسمن از کشور استرالیا، پارچه الیاف بازالت BAS 630 از شرکت بازالتکس کشور بلژیک و پارچه الیاف کربن AC220 از شرکت کولان استرالیا است. مشخصات و خواص فیزیکی و مکانیکی مواد مورد استفاده برای ساخت کامپوزیت در جدول (۱) آمده است. در شکل (۱) نوع بافت پارچه‌های الیاف بازالت و کربن مورد استفاده نشان داده شده است.

جدول (۱): مشخصات و خواص رزین فنولیک، الیاف کربن و الیاف بازالت

رژین فنولیک	الیاف بازالت	الیاف کربن	خصوصیات
...	۰/۵۶	۰/۲۵	ضخامت (mm)
...	۶۳۰	۱۹۸	چگالی سطحی (g/m <sup>2</sup> )
۱/۲	۲/۷۰	۱/۷۵	چگالی (g/m <sup>3</sup> )
۴۵	۳۰۰۰	۴۲۱۰	استحکام کششی (MPa)
۴	۸۹	۲۳۰	مدول کششی (GPa)
۱-۲	۳/۱۵	۱/۵	کرنش تا شکست (%)
۲۰-۳۱	۸	-۶	ضریب انبساط (10 <sup>-6</sup> /°C)
			حرارتی
۲۵	...	...	زمان ژل شدن (min)

فرنات و روکی [۲] به مقایسه تخریب ناشی از دوره حرارتی محیط اکسیدکننده (هوا) و نیتروژن پرداختند و نشان دادند که پدیده ترک خوردگی ماتریس در محیط اکسیدکننده به نسبت نیتروژن با سرعت بیش‌تری اتفاق می‌افتد که با کاهش جرم و افزایش چگالی کامپوزیت همراه خواهد بود.

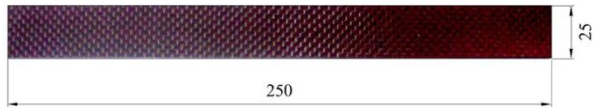
در کامپوزیت‌ها، فرایند اکسیداسیون تا حد زیادی مربوط به فشار اکسیژن و دما [۲۱]، هندسه نمونه، ناهمسانگردی [۲۲]- [۲۴] و اتصال الیاف به ماتریس است [۲۵]. در محیط اکسیدکننده، ترکیب بین اکسیداسیون در دمای بالا و تنش‌های حرارتی به سبب اختلاف دما، فرایند تخریب را سرعت می‌دهد [۲۶].

بررسی اثرات ماتریس و الیاف بر ایجاد میکروترک‌های برودتی (در دمای °C ۱۹۵- و °C ۲۵) در کامپوزیت‌های اپوکسی/الیاف کربن توسط سفیریس و هایز [۲۷] نشان داد که این کامپوزیت فقط طی چند دوره در پاسخ به دوره حرارتی (برودتی) دچار ترک خوردگی می‌شود. این حالت پس از سه تا چهار دوره، به یک مقدار ثابت می‌رسد. این بررسی‌ها نشان می‌دهند که احتمال و شدت ترک خوردگی در مواد می‌تواند پس از فقط چند دوره مشخص شود. از دیگر نتایج این بررسی پی بردن به این نکته است که در کامپوزیت‌های دارای الیاف با مدول الاستیک بالاتر، میزان دانسیته ترک بالاتر خواهد بود.

در بررسی‌های چانگ و یوشیوکا [۲۸] در زمینه دوره حرارتی/رطوبتی بر دوام کامپوزیت‌های پایه فنولیک و اپوکسی دارای الیاف کربن، پس از طی ۵۰۰ دوره حرارتی (در دمای °C ۵۵- تا °C ۸۲)، نتیجه آزمایش خستگی، مقاوم‌تر بودن کامپوزیت‌های پایه فنولیک را در مقایسه با کامپوزیت‌های پایه اپوکسی نشان می‌دهد.

رزین‌های فنولیک به علت مقاومت عالی در برابر حرارت و خواص مکانیکی خوب، از مواد مهم مهندسی محسوب می‌شوند. این رزین‌ها بطور وسیع در ساخت مصنوعات چوبی، کامپوزیت‌های کربن-کربن، اجزای صنایع فضایی مانند پوسته موتور راکت، نازل‌های راکت و غیره استفاده می‌شوند. از مقایسه بررسی‌های انجام شده در رابطه با رزین‌های ترموست تقویت شده با الیاف چنین برمی‌آید که فنول‌ها در مقایسه با اپوکسی، وینیل استر و پلی استر در مواجهه با دماهای بالا و حریق رفتار مناسب‌تری از خود نشان می‌دهند. در ساخت اجزای فضایی، مهم‌ترین کاربرد رزین فنولیک، تولید کامپوزیت‌های مقاوم به اشتعال است. از قابلیت‌های رزین‌های فنولیک در حرارت‌های بالا، رفتار تاخیری در مقابل احتراق، نرخ پایین آزادسازی گرما، متصاعد شدن دود به میزان کم، انتشار مقادیر

برش داده شدند. سپس از هر نوع کامپوزیت، تعداد ۱۸ عدد نمونه تهیه شد.



شکل (۳): نمونه کامپوزیت برش خورده

## ۲-۴- اعمال دوره‌های حرارتی به نمونه‌های کامپوزیتی

یک ثابت‌کننده آلومینیومی برای اعمال دوره‌های شوک حرارتی به نمونه‌های کامپوزیتی طراحی و ساخته شد تا نمونه‌ها به صورت یکنواخت و بدون تماس با یکدیگر در معرض دوره‌های حرارتی قرار گیرند. دوره‌های شوک حرارتی توسط دستگاه شوک حرارتی TS130 (ساخت شرکت ویز آمول تکنیک کشور آلمان) طبق شکل (۴) به نمونه‌ها اعمال شد.

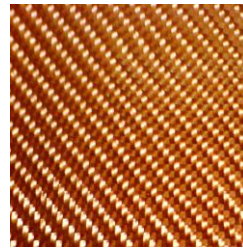


(الف)



(ب)

شکل (۴): (الف) دستگاه شوک حرارتی (ب) نمایی از استقرار نمونه‌های کامپوزیتی مهار شده در ثابت‌کننده



(ب)

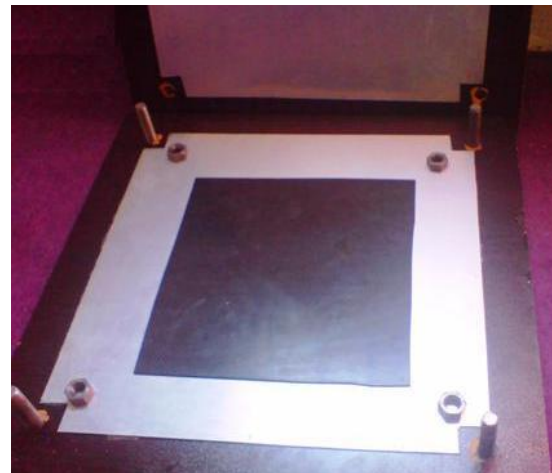


(الف)

شکل (۱): بافت الیاف مورد استفاده، الف- الیاف کربن (بافت ساده)، ب- الیاف بازالت (بافت جناغی ۱/۳)

## ۲-۲- ساخت صفحات کامپوزیتی

از روش "لایه‌گذاری دستی" برای ایجاد صفحات کامپوزیتی استفاده شده است. قالب مورد استفاده در این روش (که برای ایجاد صافی سطح با ورق ۴ mm آلومینیوم پوشانده شده است)، به شکل مربع و دارای ابعاد ۵۰۰×۵۰۰ mm است (شکل ۲).



شکل (۲): قالب مورد استفاده در ساخت کامپوزیت‌ها به همراه صفحه کامپوزیتی رزین فنولیک/الیاف کربن

در روش لایه‌گذاری دستی، رزین فنولیک و سفت کننده به نسبت ۸۰-۲۰ مخلوط شده و سطح بافت‌ها را آغشته می‌سازد. عملیات غلتک‌زنی برای خروج رزین اضافی از نمونه‌ها، پس از اضافه نمودن هر لایه انجام می‌شود. گفتنی است، برای رسیدن به نسبت حجمی تقریباً یکسان (۳۵٪) در هر دو نوع کامپوزیت، با توجه به استاندارد ASTM D 1505، در ساخت کامپوزیت‌های با الیاف بازالت از چهار لایه بافت بازالت و در ساخت کامپوزیت‌های با الیاف کربن از هشت لایه بافت کربن استفاده شده است.

## ۲-۳- برش صفحات کامپوزیتی

نمونه‌های کامپوزیتی پس از خروج از قالب توسط دستگاه برش واترجت و بر اساس استاندارد آزمایش کشش D3039 ASTM طبق شکل (۳) با ابعاد  $mm (3) \pm 3\% \times 250 \times 250$

آزمایش قرار گرفتند. آزمایش‌های کشش استاتیکی با توجه الزامات استاندارد ASTM D3039 با سرعت بارگذاری 2 mm/min انجام شدند.

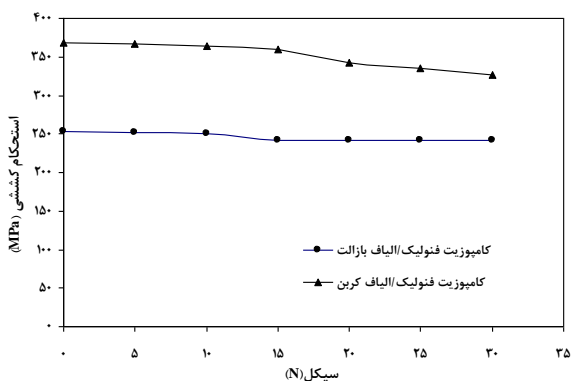


شکل (۷): نمونه کامپوزیتی در آزمایش کشش

### ۳- نتایج و بحث

برای بررسی اثر دوره شوک حرارتی در کامپوزیت‌های پلیمری پایه فنولیک، دو نوع کامپوزیت با ماده زمینه فنولیک و تقویت‌کننده الیاف بازالت و کربن با کسر حجمی الیاف یکسان ساخته شد و پس از اعمال دوره شوک حرارتی در دمای 30 °C و 220 °C، تغییرات خواص کششی کامپوزیت‌ها توسط آزمون کشش استاتیکی مورد ارزیابی قرار گرفت.

تغییرات استحکام کششی و مدول الاستیک کششی دو نوع کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن و بازالت به عنوان تابعی از تعداد دوره‌های حرارتی در شکل‌های (۸) تا (۱۱) نشان داده شده است.



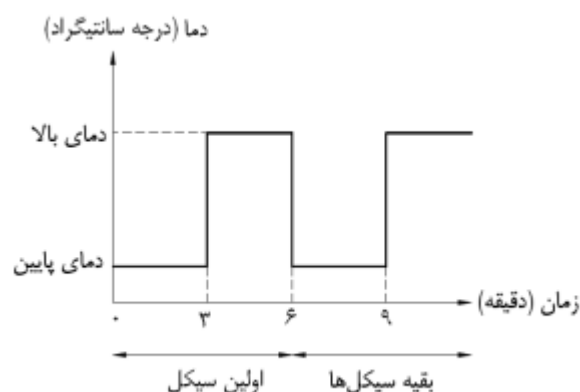
شکل (۸): نمودار مقایسه تغییرات استحکام کششی کامپوزیت‌ها برحسب تعداد دوره

دوره‌های شوک حرارتی طبق به ترتیب عبارتند از:  
 (۱) نمونه‌ها در دمای 30 °C به مدت ۳ دقیقه قرار گرفتند.  
 (۲) نمونه‌ها بلافاصله در دمای 220 °C به مدت ۳ دقیقه قرار گرفتند.

(۳) بعد از گذشت هر ۵ دوره خستگی حرارتی، سه نمونه از دستگاه خارج شد.

(۴) مرحله بالا تکرار شده تا همه نمونه‌ها در معرض دوره حرارتی قرار گرفتند.

دوره شوک حرارتی به تعداد ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ دوره انجام شده و سپس آزمایش استحکام کششی در دمای اتاق بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. دوره شوک حرارتی اعمالی به نمونه‌های کامپوزیتی در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل (۵): دوره شوک حرارتی اعمالی روی نمونه‌های کامپوزیتی

### ۲-۵- آزمایش کشش

پس از اعمال دوره شوک حرارتی به نمونه‌های کامپوزیتی و پیش از آزمایش کشش، تعداد ۱۴۴ عدد TAB توسط الیاف شیشه نوع E با چگالی سطحی 600 gr/m<sup>2</sup> و رزین پلی استر ساخته شد. TABهای گفته‌شده (که برای اطمینان از لغزش نکردن نمونه‌ها در فک‌های نگهدارنده دستگاه کشش ساخته شدند)، بر روی ۳۶ نمونه آزمایش کشش (از هر کامپوزیت ۱۸ نمونه) طبق استاندارد ASTM D3039 نصب و نمونه‌های نهایی آماده آزمایش کشش شدند (شکل ۶). TABها نیز مانند نمونه‌های کامپوزیتی توسط دستگاه واترجت برش داده شده و توسط سمپاده آماده‌سازی شدند.



شکل (۶): آماده‌سازی نمونه‌های آزمایش کشش

همه نمونه‌های کامپوزیتی توسط دستگاه کشش سنتام مدل STM-150 ساخت ایران طبق شکل (۷) در دمای 25 °C مورد

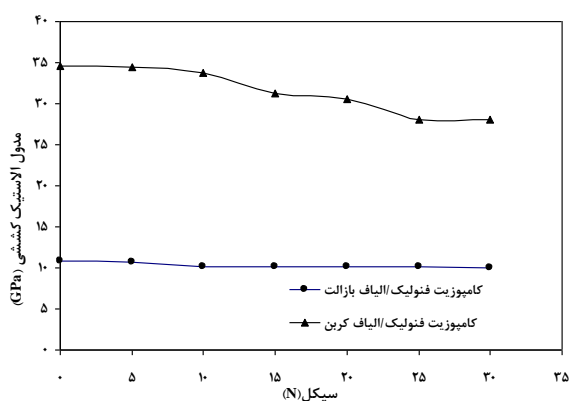
حالیست که کامپوزیت‌های فنولیک/الیاف بازالت پس از طی تعداد مشخصی دوره، نوعی عدم حساسیت به دوره شوک حرارتی از خود نشان می‌دهند. ثابت ماندن تقریبی مدول الاستیک کششی بر نوعی سفت‌شدگی تدریجی در ماده متأثر از دوره حرارتی دلالت دارد.

با توجه به شکل‌های (۱۰) و (۱۱)، در پایان دوره‌های شوک حرارتی، کاهش استحکام کششی و مدول الاستیک در کامپوزیت با الیاف بازالت به ترتیب کمتر از ۵ و ۸ درصد و در کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن به ترتیب بیش از ۱۱ و ۱۸/۵ درصد مقادیر قبل از اعمال دوره حرارتی خواهد بود.

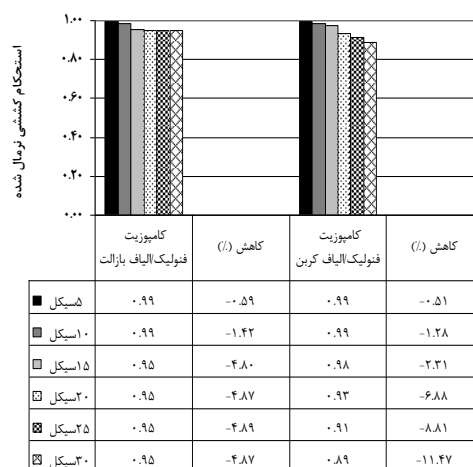
بطور کلی در کامپوزیت‌های پایه پلیمری، الیاف تقویت‌کننده نسبت به ماتریس، مدول الاستیک بالاتر و ضریب انبساط حرارتی پایین‌تری دارند که این عامل منجر به ایجاد نوعی ناهمجواری منفی یا تولید تنش در تغییرات دمایی می‌شود. به علت پایین بودن ضریب انبساط حرارتی الیاف کربن به نسبت الیاف بازالت، این ناهمجواری در کامپوزیت‌های کربن بصورت بالقوه بالاتر است. مدول کششی بالا منجر به افزایش بلورینگی و جهت‌گیری کریستالوگرافی صفحات اساسی موازی محور الیاف می‌شود. وقتی دما کاهش می‌یابد، الیاف در جهت شعاعی منقبض و در جهت طولی انبساط می‌یابند، این درحالی است که ماتریس در همه جهات منقبض می‌شود. این اثر در کامپوزیت‌های فنولیک/الیاف کربن که دارای مدول الاستیک بالایی هستند، باعث افزایش دانسیته ترک و در نتیجه کاهش بیش‌تر خواص کششی شده است.

ماتریس پلیمری در این تحقیق ماده‌ای با ضریب انبساط حرارتی بالاتر از الیاف بوده و تفاوت بین ضریب انبساط حرارتی الیاف و پلیمر منجر به بروز کرنش‌هایی با مقادیر بالا در ناحیه سطح مشترک حین دوره حرارتی می‌شود. تنش‌های ناشی از این کرنش‌ها می‌تواند به شکست سطح مشترک الیاف و ماتریس منجر شود که در پایان به کاهش خواص کششی کامپوزیت می‌انجامد.

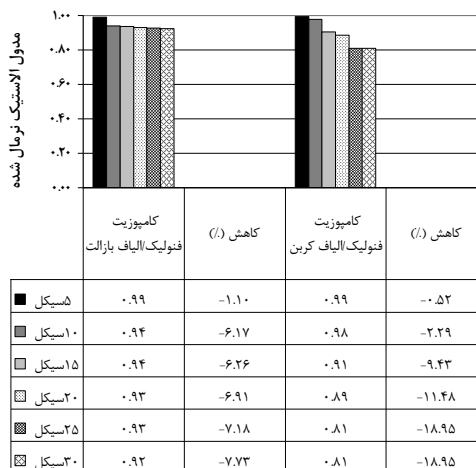
از دیگر عوامل مهم موثر بر رفتار کامپوزیت‌ها حین اعمال دوره حرارتی، پدیده اکسیداسیون است. اعمال دمای  $220^{\circ}\text{C}$  در هوا تحت دوره حرارتی، احتمالاً منجر به اکسیداسیون حرارتی ماتریس می‌شود. پدیده اکسیداسیون ناشی از افزایش تعداد دوره‌ها موجب از بین رفتن ماتریس در سطح کامپوزیت، ترک خوردگی‌های سطحی و افزایش کسر حجمی الیاف می‌شود و چون الیاف نسبت به ماتریس ضریب انبساط حرارتی پایین‌تری دارند افزایش در کسر حجمی الیاف به کاهش ضریب انبساط حرارتی کامپوزیت در دوره‌های پایانی می‌انجامد.



شکل (۹): نمودار مقایسه تغییرات سفتی کششی کامپوزیت‌ها برحسب تعداد دوره



شکل (۱۰): کاهش استحکام کششی نمونه‌های کامپوزیتی پس از اعمال دوره حرارتی



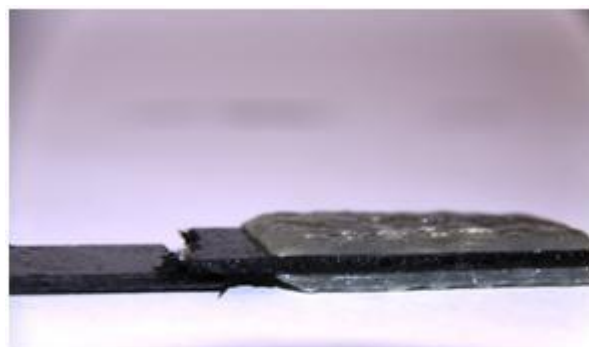
شکل (۱۱): کاهش سفتی کششی نمونه‌های کامپوزیتی پس از اعمال دوره حرارتی

همان‌طور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود، مقادیر استحکام کششی و مدول الاستیک کششی کامپوزیت فنولیک/الیاف کربن با افزایش تعداد دوره شوک حرارتی کاهش می‌یابد. این در

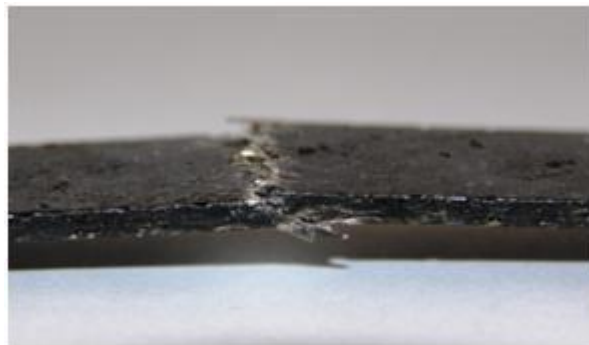
نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود کامپوزیت‌های فنولیک/الیاف کربن در کلیه حالات اعمال دوره حرارتی رفتار شکست ترد از خود نشان داده و جدایش در این کامپوزیت‌ها بسیار محدود است (شکل‌های ۱۲ و ۱۳). در کامپوزیت‌های فنولیک/الیاف بازالت در دوره‌های پایین، شکست ترد (شکل ۱۴) و در دوره‌های بالا، جدایش شدید دیده می‌شود (شکل ۱۵). حال می‌توان ترک خوردگی سطح کامپوزیت‌های دارای الیاف بازالت را چنین توجیه کرد که سطح کامپوزیت به علت اعمال دوره حرارتی ترک خورده اما طول ترک‌ها آنقدر بزرگ نیست که بتوانند رشد نمایند و در نتیجه بر خواص کششی کامپوزیت اثر منفی زیادی ایجاد نماید.



شکل (۱۲): فرایند شکست کششی در کامپوزیت فنولیک/الیاف کربن پس از اعمال ۵ دوره شوک حرارتی



شکل (۱۳): فرایند شکست کششی در کامپوزیت فنولیک/الیاف کربن پس از اعمال ۳۰ دوره شوک حرارتی



شکل (۱۴): فرایند شکست کششی در کامپوزیت فنولیک/الیاف بازالت پس از اعمال ۵ دوره شوک حرارتی

تفاوت در مقدار مدول الاستیک الیاف و ماتریس، اختلاف در میزان ضریب انبساط حرارتی الیاف و ماتریس و اکسیداسیون در دمای بالا، از عوامل کاهش خواص کششی در مواد کامپوزیتی بوده و احتمالاً تنها پدیده بازپخت ناشی از دمای بالا می‌تواند اثرات مثبت بارزی در افزایش استحکام یا مدول الاستیک کامپوزیت داشته باشد. در بازپخت کامپوزیت، پیوندهای عرضی جدیدی میان گروه‌های واکنش ندادنه پلیمر ایجاد شده که منجر به افزایش سفتی و ویسکوزیته کامپوزیت می‌شود.

به احتمال بسیار زیاد، ثابت ماندن مقدار مدول ناشی از نوعی اشباع‌شدگی از ریزترک‌ها در کامپوزیت فنولیک/الیاف بازالت یا اثرات مثبت پدیده بازپخت بوده که حین فرایند دوره حرارتی صورت گرفته است. دمای بالای دوره حرارتی ( $220^{\circ}\text{C}$ ) احتمالاً به اندازه کافی برای شکستن اتصالات شیمیایی پلیمر کافی نبوده ولی منجر به ایجاد رادیکال‌هایی به سمت مولکول‌های رزین شده که هنوز واکنش ندادنه‌اند و این واکنش‌ها به ایجاد پیوندهای عرضی بیش‌تری در پلیمر منتج شده است. پیوندهای عرضی جدید میان گروه‌های واکنش ندادنه می‌تواند منجر به افزایش استحکام اتصال بین الیاف و ماتریس در ناحیه وجه مشترک، مدول الاستیک و استحکام کششی کامپوزیت شود. همچنین توجه به این نکته ضروری است که سرد شدن کامپوزیت در دمای  $30^{\circ}\text{C}$  - برای دفعات متعدد ممکن است درجات مختلفی از استحکام فشاری در سطح مشترک الیاف و ماتریس ایجاد نماید که می‌تواند منجر به استحکام اتصال شود. در جایی که خواص مکانیکی بعد از اعمال دوره حرارتی ثابت مانده است، امکان تقویت سطح مشترک الیاف و ماتریس وجود دارد.

پدیده بازپخت در اثر دوره شوک حرارتی می‌تواند در کامپوزیت‌های فنولیک/الیاف بازالت بر اثرات ضعیف شدن کامپوزیت بر اثر اعمال دوره حرارتی غالب بوده و منجر به ثابت ماندن مدول کششی شود، در صورتی که در کامپوزیت‌های فنولیک/الیاف کربن اثرات تضعیف‌کننده ناشی از جدایش سطح مشترک الیاف و ماتریس بر بازپخت غالب گردیده است.

بررسی نتایج، کاهش چشمگیر خواص کششی را در کامپوزیت‌های فنولیک/الیاف کربن پس از اعمال دوره شوک حرارتی نشان می‌دهد. این در حالی است که در کامپوزیت‌های دارای الیاف بازالت در شرایط مشابه اثرات کمی بر مقدار خواص کششی داشته است.

فرایند و تنوع شکست کششی نیز در شکل‌های (۱۲) تا (۱۵)



شکل (۱۵): فرایند شکست کششی در کامپوزیت فنولیک/الیاف بازالت پس از اعمال ۳۰ دوره شوک حرارتی

## ۴- نتیجه گیری

در این مقاله اثر دوره شوک حرارتی بر خواص کششی دو نوع کامپوزیت پایه پلیمری (فنولیک) تقویت شده با الیاف کربن و بازالت بررسی شد و نتایج زیر حاصل شد:

- (۱) دوره شوک حرارتی خواص کششی دو نوع کامپوزیت را با درجات و رفتارهای متفاوت کاهش می‌دهد.
- (۲) دوره شوک حرارتی، کاهش چشمگیر خواص کششی را در کامپوزیت‌های فنولیک/الیاف کربن در پی دارد؛ این در حالی است که در کامپوزیت‌های با الیاف بازالت در شرایط مشابه دوره شوک حرارتی اثرات کمی بر

## ۶- مراجع

- مقدار خواص کششی داشته است.
- (۳) اختلاف بالای مقدار مدول الاستیک و ضریب انبساط حرارتی بین الیاف کربن و رزین فنولیک کامپوزیت‌های فنولیک/الیاف کربن را بیش از کامپوزیت‌های فنولیک/الیاف بازالت به افت خواص کششی پس از اعمال دوره شوک حرارتی مستعد ساخته است.
  - (۴) کاهش استحکام کششی در کامپوزیت‌های فنولیک/الیاف کربن و فنولیک/الیاف بازالت پس از تمام کلیه دوره‌ها به ترتیب بیش از ۱۱٪ و کمتر از ۵٪ بوده است.
  - (۵) کاهش مدول الاستیک کششی در کامپوزیت‌های فنولیک/الیاف کربن و فنولیک/الیاف بازالت پس از تمام کلیه دوره‌ها به ترتیب بیش از ۱۸/۵٪ و کمتر از ۸٪ بوده است.
- ### ۵- تقدیر و تشکر
- نویسندگان این مقاله وظیفه می‌دانند که از خانم مهندس فراهانی (پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران)، آقایان مهندس ارونقی، مهندس صدقی‌پور و مهندس خاکپور به دلیل هم‌فکری‌ها و راهنمایی‌هایی که داشته‌اند، تشکر نمایند.
- composites”, Polym Degrad Stabil, No. 71, pp. 79–84, 2001.
- Halim S, Amin MB, Maadhah AG.; Handbook of polymer degradation Research Institute”, King Fahd of Petroleum and Minerals, Dhahran, Saudi Arabia, New York/Hong Kong: Marcel Dekker, 1992. [۸]
- Golder, Michael D, Bruce, Mulholland, “Improved UV stabilization expands uses for polyester elastomers”, Plast Eng, No. 46(6), pp. 43–44, 1990. [۹]
- Signor, Vanlandingham M, Chin J, “Effects of ultraviolet radiation exposure on vinyl ester resins: characterization of chemical, physical and mechanical damage”, Polym Degrad Stabil, No 79, pp. 359–368, 2003. [۱۰]
- Sakai W, Sadakane T, Nishimoto W, Nagata M, Tsutsumi N, “Photosensitized degradation and crosslinking of linear aliphatic polyesters by GPC and ESR”, Polymers, No. 43, pp. 6231–8, 2002. [۱۱]
- Li G, Pourmohamadian N, Cygan A, Peck J, “Fast repair of laminated beams using UV curing composites”, Compos Struct, No. 60, 73–81, 2003. [۱۲]
- Grossman E, Gouzman I, “Space environment effects on polymers in low earth orbit”, Nucl Instrum Methods, No. 208, pp. 48–57, 2003. [۱۳]
- Nielsen LE; Mechanical properties of polymers and composites, vol. 1. New York: Marcel Dekker, 1974. [۱۴]

- D. E. Mouzakis, H. Zoga, C. Galiotis, “Accelerated environmental ageing study of polyester/glassfiber reinforced composites (GFRPCs)”, Composites: Part B, No. 39, pp. 467–475, 2008. [۱]
- M.C. Lafarie-Frenot, S. Rouquie, N.Q. Hoa, V. Bellenger, “Comparison of damage development in C/epoxy laminates during isothermal ageing or thermal cycling”, Composites: Part A, No. 37, pp. 662–671, 2006. [۲]
- K. Biernacki, W. Szyszkowski, S. Yannacopoulos, “An experimental study of large scale model composite materials under thermal fatigue”, Composites: Part A, No. 30, pp. 1027–1034, 1999. [۳]
- G.C. Papanicolaou, A.G. Xepapadaki, G.D. Tagaris, “Effect of thermal shock cycling on the creep behavior of glass-epoxy composites”, Composite Structures, No. 88, pp. 436–442, 2009. [۴]
- Lopez F.S, Ferrer C, Salvador M.D, Amigo V, “Flexural characteristics of sunlight-aged polyester composites: influence of processing variables”, J Test Eval, No. 30, pp. 1–6, 2002. [۵]
- Griffiths R, Ball A, “An assessment of the properties and degradation behaviour of glass-fibre-reinforced polyester polymer concrete”, Compos Sci Technol, No. 60, pp. 2747–53, 2000. [۶]
- Segovia F, Ferrer C, Salvador M.D, Amigo V, “Influence of processing variables on mechanical characteristics of sunlight aged polyester–glass fibre [۷]



- Bowles KJ, Meyers A. "Specimen geometry effects on graphite/PMR 15 composites during thermo-oxidative ageing", 31st International SAMPE Symposium, pp. 1285-1299, 1986. [۲۲]
- Nam JD, Seferis JC, "Anisotropic thermo-oxidative stability of carbon fibre reinforced polymeric composites", SAMPE Q, No. 24, pp. 10-18, 1992. [۲۳]
- Salin IM, Seferis JC. "Anisotropic effects in thermogravimetry of polymeric composites", J Polym Sci B Polym Phys, No. 31, pp. 1019-27, 1993. [۲۴]
- Bowles KJ, Madhukar MS, Papadopoulos DS, Inghram L, McCorkle L, "The effects of fiber surface modification and thermal aging on composite toughness and its measurement", J Comp Mater, No. 31(6), pp. 552-79, 1997. [۲۵]
- Lafarie-Frenot MC, Rouquie' S, "Influence of oxidative environments on damage in C/Epoxy laminates subjected to thermal cycling", Comp Sci Technol, No. 64, pp. 1725-35, 2004. [۲۶]
- John F. Timmerman, Matthew S, Brian S. Hayes, James C. Seferis, "Matrix and fiber influences on the cryogenic microcracking of carbon fiber/epoxy composites", Composites: Part A, No. 33, pp. 323-329, 2002. [۲۷]
- Chung K, Yoshioka K, seferis JC, "Hygrothermal cycling effect on the durability of phenolic base composites", Polymer Composites, Vol. 23, No. 2, 2002. [۲۸]
- Struik LCE; Physical aging in amorphous polymers and other materials, New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1978. [۲۹]
- B. C. Ray, "Study of the influence of thermal shock on interfacial damage in thermosetting matrix aramid fiber composites", JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE LETTERS, No. 22, pp. 201-202, 2003. [۳۰]
- Shoukai Wang, D.D.L. Chung, "Thermal Fatigue in Carbon Fibre Polymer-Matrix Composites", Polymers & Polymer Composites, Vol.9, No. 2, 2001. [۳۱]
- Kwang-Bok Shin, Chun-Gon Kim, Chang-Sun Hong, Ho-Hyung Lee, "Prediction of failure thermal cycles in graphite/epoxy composite materials under simulated low earth orbit environments", Composites: Part B, No. 31, pp. 223-235, 2001. [۳۲]
- George PE, Dursch HW, "Low earth orbit effects on organic composites flown on the long duration exposure facility", Journal of Advanced Materials, No. 25, pp. 9-10, 1994. [۳۳]
- Paillous A, Pailler C, "Degradation of multiply polymer composites induced by space environment", Composites, No. 25, pp. 287-295, 1994. [۳۴]
- Tsotis TK, Keller K, Lee K, Bardis J, Bish J, "Aging of polymeric composite specimens for 5000 hours at elevated pressure and temperature", Comp Sci Tech, No. 61, pp. 75-86, 2001. [۳۵]

