



Analysis of Circular Hole and Thermal Cycle Effects on the Mechanical Properties in Multi-Layer Polymer Composite Reinforced with Nanoparticles

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Ghasemi A.R.*¹ PhD,
Khabaz Kashani H.¹ MSc

How to cite this article

Ghasemi A.R, Khabaz Kashani H. Analysis of Circular Hole and Thermal Cycle Effects on the Mechanical Properties in Multi-Layer Polymer Composite Reinforced with Nanoparticles. Modares Mechanical Engineering, 2019;19(1):229-236.

¹Solid Mechanics Department, Mechanical Engineering Faculty, University of Kashan, Kashan, Iran

*Correspondence

Address: Solid Mechanics Department, Mechanical Engineering Faculty, University of Kashan, Kashan, Iran. Postal Code: 8731753153
Phone: +98 (31) 55913430
Fax: +98 (31) 55913434
ghasemi@kashanu.ac.ir

Article History

Received: June 10, 2018
Accepted: October 08, 2018
ePublished: January 01, 2019

ABSTRACT

In this research, the analysis of the effects of circular hole and thermal cycle fatigue on the mechanical properties in multi-layer polymer composite reinforced with nanoparticles are investigated. First, multi-walled carbon nanotubes with 0.1% weight fraction of nanoparticles are added to the epoxy resin ML506. The. In order to homogenize particle in the resin, it is mixed with a magnetic stirrer for 30 minutes. The material is placed in an ultrasonic device for 40 minutes to homogenize the resin and nanoparticle completely. The resin reinforced with glass fibers constitute symmetric cross ply laminates stacking sequence $[0_2/90_2]_s$, and nanocomposite samples are made with hand layup method. In this study, open-hole specimens with diameter of 2 and 4mm are investigated. To study the thermal cycles, nanocomposite samples of 3 levels of thermal cycles including 0, 180, and 360 cycles were investigated. The samples are exposed to a temperature range of 0 to 100oC. After that, the specimens undergo tensile testing. Using the tensile test, the modulus of elasticity and tensile strength are compared for the different thermal cycles and the diameter of the holes. By increasing the number of thermal cycles, the tensile strengths of nanocomposite samples are not significantly changed. Also, with increasing the diameter of the hole, the tensile strength is decreased. The elasticity modulus with increasing thermal cycles for all specimens have been minimal changes. Also, a linear regression model was developed, using MINITAB software for strength and elastic modulus in terms of number of thermal cycles and diameter to width ratio.

Keywords Nanocomposite; Thermal Cycle; Stress Concentration; Point Stress

CITATION LINKS

[1] Cryogenic composite tanks: Structural analysis and manufacturing concepts. In: Society for the Advancement of Material and Process Engineering, contributor [2] First major X-33 component arrives [3] Effect of thermal cycling on microcracking and strength degradation of high-temperature polymer composite materials for use in next-generation SST structures [4] Measuring the notched compressive strength of composite laminates: Specimen size effects [5] Effects of thermal cycles on mechanical properties of an optimized polymer concrete [6] The influence of thermal fatigue on the properties of glass fiber/epoxy composites [7] Reduction of thermal residual stresses of laminated polymer composites by addition of carbon nanotubes [8] Investigation of mechanical and thermal properties of polymer composites reinforced by multi-walled carbon nanotube for reduction of residual stresses [9] Improving fatigue performance of GFRP composite using carbon nanotubes [10] Effect of thermal cycling and open-hole size on mechanical properties of polymer matrix composites [11] Surface degradation of polymer matrix composites under different low thermal cycling conditions [12] Natural nanobiocomposites, biomimetic nanocomposites, and biologically inspired nanocomposites [13] Effect of water absorption on the mechanical properties of halloysite nanotube crammed glass fiber reinforced epoxy hybrid nanocomposites [14] Residual stress measurement of fiber metal laminates using incremental hole-drilling technique in consideration of the integral method [15] ASTM D3039/D3039M-08: Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials [16] Thermal cycling effects on the durability of a pultruded GFRP material for off-shore civil engineering structures [17] Low thermal cycling effects on mechanical properties of laminated composite materials [18] Environmental considerations of plastic behaviors for automobile applications [19] Residual strength simulation of fibre reinforced metal laminates containing a circular hole

تحلیل اثرات سوراخ دایره‌ای و سیکل حرارتی روی خواص مکانیکی در چندلایه‌های کامپوزیتی پایه پلیمری تقویت‌شده با ذرات نانو

احمدرضا قاسمی * PhD

گروه طراحی جامدات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

حامد خبازکاشانی MSc

گروه طراحی جامدات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

چکیده

در این تحقیق، تحلیل اثرات سوراخ دایره‌ای و سیکل حرارتی روی خواص مکانیکی در چندلایه‌های کامپوزیتی پایه پلیمری تقویت‌شده با ذرات نانو مطالعه شده است. ابتدا نانولوله‌های کربنی چندجداره با درصد وزنی نانوذرات برابر با ۱/۱۰٪ وزنی نانوکامپوزیت به رزین اپوکسی ML506، اضافه می‌شود. برای همگن‌سازی نانوذرات در رزین اپوکسی، ابتدا به مدت ۳۰ دقیقه از همزن مغناطیسی استفاده می‌شود تا به‌صورت نسبی ذرات در رزین همگن شود. سپس محلول به‌دست‌آمده به مدت ۴۰ دقیقه در دستگاه آتراسونیک قرار داده می‌شود تا محلول رزین و نانوذرات کاملاً همگن شود. رزین حاصل با الیاف شیشه و چیدمان متقارن و متعامد $[0_2/90_2]$ ، تقویت شده و نمونه‌های نانوکامپوزیتی به روش چیدمان دستی ساخته می‌شوند. در این پژوهش، نمونه‌های سوراخ‌دار به قطرهای ۲ و ۴ میلی‌متر مطالعه و تحلیل شده است. برای مطالعه سیکل حرارتی روی نمونه‌های نانوکامپوزیتی سه‌سطح تعداد چرخه حرارتی شامل صفر، ۱۸۰ و ۳۶۰ سیکل چرخه حرارتی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نمونه‌ها در محدوده دمایی صفر تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد تحت تاثیر بار حرارتی نوسانی قرار گرفته و پس از پایان سیکل حرارتی، نمونه‌ها تحت آزمون کشش قرار گرفته‌اند. با استفاده از آزمون کشش مدول الاستیک و استحکام شکست برای سیکل‌های حرارتی متفاوت و قطر سوراخ‌های مختلف مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. استحکام شکست نمونه‌های نانوکامپوزیتی با افزایش تعداد چرخه سیکل حرارتی تغییر قابل توجهی نداشته است اما افزایش قطر سوراخ، استحکام شکست را کاهش داده است. مدول الاستیک نیز برای تمام نمونه‌ها با افزایش سیکل حرارتی دارای تغییرات اندک بوده است. همچنین یک مدل رگرسیون با استفاده از نرم‌افزار MINITAB برای استحکام و مدول الاستیک بر حسب تعداد سیکل و نسبت قطر به پهنا به دست آمده است.

کلیدواژه‌ها: نانوکامپوزیت، سیکل حرارتی، تمرکز تنش، تنش نقطه‌ای

تاریخ دریافت: ۹۷/۱/۱۵

تاریخ پذیرش: ۹۷/۷/۲۶

* نویسنده مسئول: ghasemi@kashanu.ac.ir

۱- مقدمه

یکی از کاربردهای مهم کامپوزیت‌ها، استفاده در سازه‌ها با بارگذاری حرارتی تناوبی است. مخازن سوخت مانند مخازن هیدروژن مایع و اکسیژن مایع فضایی‌ها با استفاده از کامپوزیت‌های پلیمری ساخته می‌شود که کاهش وزن را به‌همراه دارد. سوخت این مخازن دمای پایینی دارد (مثلاً اکسیژن مایع دارای دمای -183°C و هیدروژن مایع دارای دمای -253°C است). علاوه بر این، دمای این سازه‌ها هنگام ورود مجدد به جو به‌علت اصطکاک جو به‌شدت بالا می‌رود [1, 2]. به‌علت نیاز به عملکرد کارای سازه، این مخازن باید در برابر تغییرات دمایی بسیار پایین تا دمای بالای 125°C مقاوم باشند. یکی از عوامل مهم و موثر بر طراحی مواد کامپوزیتی، قابلیت حمل بار اتصالات کامپوزیتی است. سوراخ‌ها ذاتاً برای کاهش وزن یا ایجاد اتصال بین سازه‌ها ایجاد می‌شوند. در هر حال، سوراخ‌ها تحت تمرکز تنش بالا در طول بارگذاری هستند و در نتیجه، آسیب اغلب از نواحی اطراف سوراخ آغاز می‌شود. آزمون چرخه حرارتی یکی از آزمون‌های محیطی مهم صنعت است که تغییرات خواص قطعات را بررسی می‌کند.

شیموکاو و همکاران [3] آزمون چرخه حرارتی بر نمونه‌های سوراخ‌دار فشاری (OHC) را بررسی کرده‌اند. نتایج نشان داد که استحکام نمونه‌های OHC قبل و بعد از چرخه حرارتی تغییر معنی‌داری نداشته است. گروهی از محققان به سرپرستی لی در سال ۲۰۰۷ مطالعه‌ای را با عنوان بررسی اثرات ابعاد نمونه بر استحکام فشاری چندلایه‌های سوراخ‌دار انجام دادند. در این بررسی نمونه‌هایی با چیدمان و نسبت قطر به پهنا متفاوت مطالعه شده است. نتایج نشان داد که ابعاد سوراخ و پهنا نمونه اثرگذارترین پارامترهای ابعادی نمونه بر استحکام کامپوزیت سوراخ‌دار است و با کاهش اندازه سوراخ، استحکام کششی و فشاری افزایش می‌یابد [4]. شکرپیه و همکاران در سال ۲۰۱۱ نتایج مطالعه‌ای پیرامون اثر بارگذاری حرارتی سیکلی بر خواص مکانیکی پلیمرهای تقویت‌شده را منتشر نمودند. در این بررسی به‌طور جداگانه اثر هر یک از بازه‌های دمایی چرخه حرارتی بر میزان و چگونگی تغییر خواص مکانیکی مشخص شده است [5]. وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۲، اثر چیدمان‌های مختلف و خستگی حرارتی بر خواص مکانیکی کامپوزیت شیشه/اپوکسی را بررسی کردند و مشخص شد که خواص مکانیکی چیدمان‌های مختلف با توجه به اثر جدایش بین لایه‌ای و افزایش حفره‌ها کاهش می‌یابد [6].

در حوزه نانوکامپوزیت‌های پایه پلیمری تقویت‌شده با نانوذرات نیز تحقیقاتی صورت گرفته است. شکرپیه و همکاران [7]، کاهش تنش‌های پسماند حرارتی کامپوزیت‌های پلیمری را در اثر اضافه‌نمودن نانولوله‌های کربنی بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزایش درصد نانولوله‌ها موجب کاهش ضریب انبساط حرارتی می‌شود. همچنین اضافه‌کردن نانولوله‌ها باعث کاهش تنش‌های پسماند شده است. قاسمی و همکاران [8] در سال ۲۰۱۴ به مطالعه میکرومکانیک خواص مکانیکی- گرمایی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با نانولوله کربنی چنددیواره و اثر آن بر کاهش تنش‌های پسماند پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از نانولوله کربنی چنددیواره برای تقویت ماتریس کامپوزیت پلیمری حداکثر تا مقدار ۱٪ وزنی سبب کاهش تنش‌های پسماند می‌شود که بیشترین کاهش در چیدمان متعامد نامتقارن $[0_2/90_2]$ است.

گندی و همکاران [9] در سال ۲۰۱۵، از نانولوله‌های کربنی برای بهبود عمر خستگی قطعات استفاده کردند. قطعات از ۶ لایه تک‌جهته با زاویه صفر ساخته شده و تحت بارگذاری سیکلی مکانیکی بین ۱۰ تا ۷۰٪ تنش تسلیم قرار گرفته‌اند. نتایج آزمایش نشان داد که ۱/۵ و ۱٪ وزنی نانولوله‌های کربنی عمر خستگی را در مقایسه با قطعات بدون نانوذرات به‌ترتیب تا ۱۱۴۳ و ۹۸۶٪ بهبود می‌دهد. قاسمی و مرادی [10] در سال ۲۰۱۷، اثر چرخه حرارتی را روی کاهش جرم و آسیب سطحی نمونه‌ها بررسی کردند. آنها در این تحقیق از چیدمان، نسبت حجمی الیاف، تعداد سیکل و اختلاف دماهای متفاوت استفاده کردند و نتایج تجربی حاصل از آزمایش را به‌صورت مدل‌های رگرسیون درآوردند و حساسیت هر یک از عوامل را بر کاهش جرم بررسی نمودند.

قاسمی و مرادی در سال ۲۰۱۷ به بررسی تاثیر سیکل حرارتی و قطر سوراخ روی خواص مکانیکی نمونه‌های کامپوزیتی پایه پلیمری پرداختند. آنها از چیدمان $[0_2/90_2]$ و درصد حجمی الیاف ۵۳٪ استفاده کرده‌اند. نتایج نشان داد که نمونه‌های دارای سوراخ کمترین استحکام شکست و نمونه‌های بدون سوراخ دارای حداکثر استحکام شکست هستند. همچنین افزایش تعداد چرخه حرارتی باعث کاهش استحکام شکست نمونه‌های بدون سوراخ و افزایش استحکام شکست نمونه‌های سوراخ‌دار شده است [11].

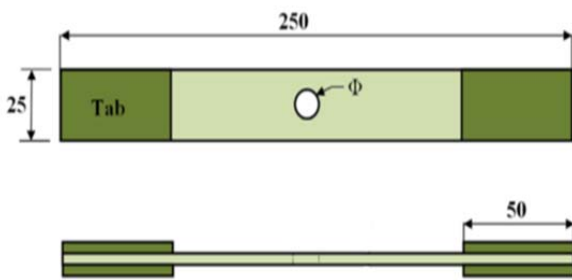
این امر توسط ظرف آب و یخ کنترل می‌شود. بعد از مخلوط شدن توسط دستگاه، محلول به صورت همگن و رقیق در می‌آید [7].

۲-۳- روش دستی ساخت نمونه‌ها

برای ساخت نمونه‌ها از روش دستی استفاده شده است. برای این کار یک لایه الیاف را به آرامی روی سطح میز، پهن و برای پخش محلول روی الیاف، از قلم موی نقاشی استفاده می‌شود و بنابراین محلول چسب و نانوذرات به صورت یکنواخت روی الیاف پخش می‌شوند. هم‌زمان با آغشته‌نمودن سطح الیاف با محلول به آرامی و با فشار و سرعت یکنواخت، غلتک روی الیاف حرکت داده می‌شود. این حرکت علاوه بر خارج‌نمودن حباب‌های هوا، تا حد زیادی به یکنواختی توزیع محلول در سطح الیاف کمک می‌کند. در مراحل بعد نیز به همین ترتیب یک لایه الیاف شیشه با رعایت زاویه روی لایه قبلی قرار داده می‌شود. تکرار لایه چینی تا قراردادن تمامی لایه‌ها و مصرف کل حجم رزین آماده‌شده ادامه می‌یابد. آنگاه عملیات خلأ برای گرفتن رزین اضافی و حذف کامل حباب‌های هوا انجام می‌شود. به این ترتیب لایه چینی برای هشت لایه متوالی صورت می‌پذیرد.

پس از پایان فرآیند لایه‌گذاری، نمونه‌های ساخته‌شده با توجه به این که از رزین سخت‌شونده در هوا استفاده شده است، در معرض محیط باز قرار می‌گیرند تا فرآیند خشک شدن انجام پذیرد. پس از ۷ روز قرارگیری در دمای اتاق، کامپوزیت به حداکثر مقاومت خود می‌رسد.

برای ساخت نمونه‌ها از استاندارد ASTM D3039 [15] استفاده شده است. ابعاد نمونه به صورت ۲۵×۲۵ سانتی‌متر است. شکل ۱ ابعاد نمونه‌ها در این تحقیق را نشان می‌دهد. نمونه‌ها دارای سوراخ به قطرهای ۲ و ۴ میلی‌متر هستند. برای سوراخ‌کاری نمونه‌ها، سرعت ماشین‌کاری و نرخ باردهی به ترتیب ۲۸۰۰ دور بر دقیقه و ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه است. در شکل ۲ تصویر قطعات پس از سوراخ‌کاری مشاهده می‌شود.



شکل ۱) استاندارد ابعاد نمونه‌ها برای آزمون کشش



شکل ۲) نمونه‌های سوراخ‌کاری شده با قطرهای ۲ و ۴ میلی‌متر

همان طور که گفته شد، تحقیقاتی در مورد سیکل حرارتی و اثر سوراخ در کامپوزیت‌ها صورت گرفته، در حالی که این اثر سیکل حرارتی و سوراخ دایره‌ای روی نانوکامپوزیت‌ها بررسی نشده است. مهم‌ترین دلیل توسعه نانوکامپوزیت‌های پایه پلیمری و افزایش تحقیقات در این زمینه، کشف نانولوله‌های کربنی است. نانولوله‌های کربنی به طور قابل ملاحظه‌ای با نانولوله‌های گرافیت و دیگر مواد تقویت‌کننده تفاوت دارد. خواص مکانیکی بی‌نظیر نانولوله‌های کربنی، چگالی کم آنها و نسبت طول به قطر زیاد آنها باعث می‌شود که بهترین تقویت‌کننده برای کامپوزیت‌های پلیمری باشند. افزودن درصد کمی از نانولوله‌ها به ماتریس می‌تواند باعث افزایش قابل ملاحظه مقاومت مکانیکی و سختی در برابر شکست شود [12, 13].

در این پژوهش نمونه‌های کامپوزیتی پایه پلیمری تقویت‌شده با نانوذرات، ساخته و اثرات چرخه حرارتی و سوراخ دایره‌ای روی آن بررسی شده است. ذرات نانوی مورد استفاده، نانولوله‌های کربنی چندجداره بوده و درصد وزنی ۱٪ مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه‌های آزمایشی با چیدمان متعامد و متقارن و به روش چیدمان دستی تهیه می‌شوند. سیکل حرارتی به وسیله دستگاه ساخته‌شده توسط محققان به نمونه‌ها اعمال شده است و با استفاده از آزمون کشش مشخصات مکانیکی نمونه‌های کامپوزیت و نانوکامپوزیت، قبل و بعد از سیکل حرارتی مطالعه و مقایسه شدند.

۲- ساخت نمونه‌ها

۲-۱- خواص مواد استفاده شده

در این تحقیق چیدمان لایه‌ها به صورت $[0_2/90_2]_s$ ، درصد الیاف ۴۵٪ و درصد نانولوله استفاده‌شده ۱٪ است. برای ساخت نمونه‌ها از رزین اپوکسی ML506 و هاردنر پلی‌آمین (HA-11) به عنوان ماتریس کامپوزیت استفاده شد. این رزین دارای خواص مکانیکی خوب و ویسکوزیته پایین است که آن را به یک ماده مناسب برای کاربردهای کامپوزیت تبدیل می‌کند. همچنین الیاف شیشه نوع E تک‌جهته (UT-E250) به عنوان تقویت‌کننده در این پژوهش استفاده شده است. از نانولوله‌های کربنی چنددیواره برای تقویت کامپوزیت و ساخت نانوکامپوزیت‌ها استفاده شده و خصوصیات این مواد در جدول ۱ آمده است [5, 14].

جدول ۱) خواص مواد استفاده‌شده در این تحقیق [5, 14]

خواص مواد	اپوکسی ML506	الیاف شیشه E	نانولوله کربنی MWNT
مدول الاستیسیته (GPa)	۲.۵۹	۷۲	۱۰۰۰
ضریب پواسون	۰.۳۵	۰.۲	۰.۱
چگالی (gr/cm ³)	۱.۱۱	۲.۵	۲.۱
ضریب انبساط حرارتی (1/C°)	۶۲	$\alpha_L=5$ $\alpha_T=28$	-۱

۲-۲- روش همگن‌سازی نانورزین

همگن‌سازی نانولوله‌های کربنی در رزین اپوکسی به نحو مناسبی صورت گرفته است. ابتدا نانولوله‌های کربنی به رزین اپوکسی، اضافه و به صورت دستی مخلوط می‌شود. محلول به دست آمده، به وسیله همزن مغناطیسی به مدت ۳۰ دقیقه با سرعت ۲۰۰۰ دور بر دقیقه مخلوط می‌شود تا تقریباً همگن شود. در مرحله بعد، محلول در دستگاه آلتراسونیک به مدت ۴۰ دقیقه و توان ۲۰۰ وات قرار می‌گیرد. در این مرحله دمای ترکیب نباید بیشتر از ۴۵°C بشود که

۳- آزمون چرخه حرارتی و آزمون کشش

در این تحقیق تعداد چرخه حرارتی به عنوان پارامتر چرخه حرارتی و قطر سوراخ به عنوان پارامتر هندسی انتخاب شده‌اند. حداقل دمای چرخه‌ها صفر و حداکثر دمای آن ۱۰۰°C است. به این ترتیب این تحقیق شامل ۶ گروه آزمایش است و در هر گروه آزمایش، سه نمونه از آن ساخته می‌شود و مورد آزمون قرار می‌گیرد که گروه‌های آزمایش در جدول ۲ آورده شده است.

در این تحقیق نمونه‌ها ۰ و ۱۸۰ و ۳۶۰ سیکل را در بازه دمایی بین ۱۰۰°C- طی کرده‌اند. نمودار ۱ پروفیل تجربی چرخه حرارتی با نرخ تغییر دمای ۱۵°C/min را نشان می‌دهد. برای بررسی تغییرات خواص نمونه‌های نانوکامپوزیت از آزمون کشش استفاده شده است. در این تحقیق، دستگاه کشش ۲۰ تَن مورد استفاده قرار گرفت.

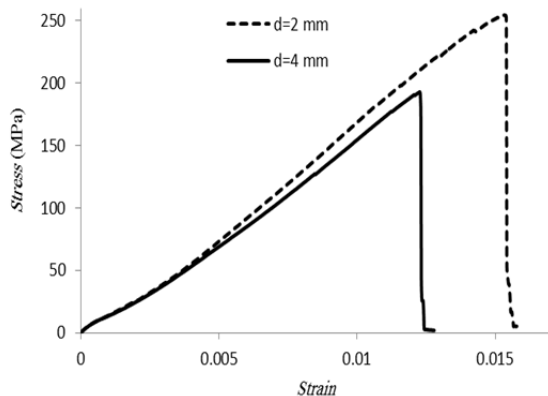
چرخه حرارتی، اندکی افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد که پخت نانوکامپوزیت شیشه/اپوکسی در طول چرخه حرارتی، یک دلیل برای افزایش استحکام کششی باشد. در پژوهش‌هایی مشابه در مورد چرخه حرارتی، گر/ماتیکوس و همکاران [16] در سال ۲۰۱۶ و همچنین قاسمی و مرادی [10] افزایش استحکام شکست را به ترتیب پس از طی ۳۰۰ و ۲۰۰ چرخه حرارتی گزارش کردند. نمودار ۴، استحکام شکست بر حسب نسبت قطر به پهنا را نشان می‌دهد. افزایش قطر سوراخ باعث کاهش استحکام شکست می‌شود. این نمودار نشان می‌دهد که سوراخ در نمونه‌ها باعث ایجاد تمرکز تنش قابل توجه و ناپایداری می‌شود. افزایش قطر سوراخ باعث کاهش ۲۰ تا ۲۷ درصدی استحکام شکست شده است.

جدول ۳) میانگین نتایج مدول الاستیسیته و استحکام شکست

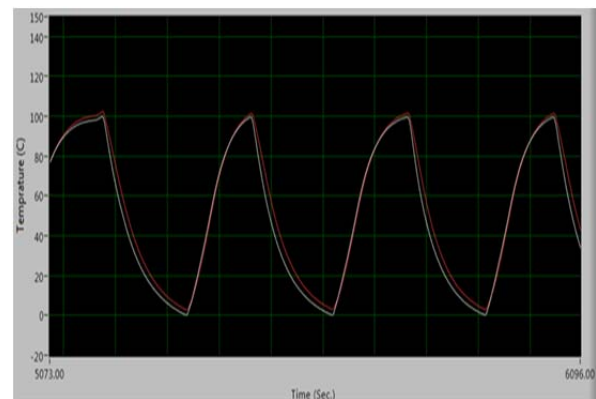
گروه آزمون	استحکام شکست (MPa)	درصد انحراف از مدول الاستیسیته معیار	درصد انحراف از معیار
گروه اول	۲۶۰.۶۷	۰.۰۶۱۹	۱۷.۷۴
گروه دوم	۲۶۷.۷۳	۰.۲۵۶۸	۱۸.۱۶
گروه سوم	۲۸۴.۴۸	۰.۰۷۶۵	۱۹.۱
گروه چهارم	۲۰۳.۸۴	۰.۱۱۲۱	۱۵.۶۴
گروه پنجم	۲۲۴.۸	۰.۱۱۹۸	۱۷.۴۷
گروه ششم	۲۵۵.۵	۰.۰۷۷۸	۱۸.۸

جدول ۲) گروه‌های طراحی شده برای آزمایش

گروه آزمون	تعداد چرخه حرارتی	قطر سوراخ (میلی‌متر)	تعداد نمونه‌های ساخته شده
گروه اول	۰	۲	۳
گروه دوم	۱۸۰	۲	۳
گروه سوم	۳۶۰	۲	۳
گروه چهارم	۰	۴	۳
گروه پنجم	۱۸۰	۴	۳
گروه ششم	۳۶۰	۴	۳



نمودار ۲) منحنی تنش- کرنش برای نمونه‌های بدون سیکل حرارتی



نمودار ۱) پروفیل تجربی چرخه حرارتی

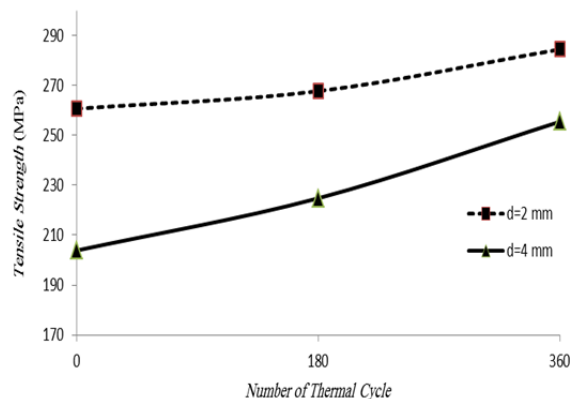
۴- نتایج حاصل از آزمایش

۴-۱-۴ منحنی تنش- کرنش

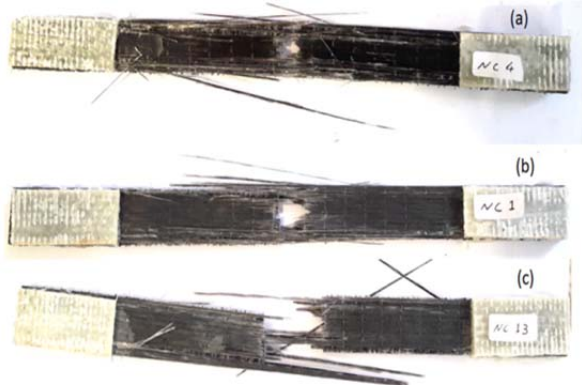
منحنی تنش- کرنش مهندسی تمامی نمونه‌ها پس از انجام آزمون کشش به دست آمد و مورد تحلیل قرار گرفت. این منحنی‌ها در جهت طولی تا شکست نمونه به صورت الاستیسیته خطی است. در نمودار ۲، منحنی تنش- کرنش برای نمونه‌های بدون سیکل حرارتی نمایش داده شده است. با استفاده از نمودارهای تنش- کرنش حاصل از آزمایش، مقادیر مدول الاستیسیته و استحکام شکست محاسبه شده است. در جدول ۳ میانگین مدول الاستیسیته و استحکام شکست برای هر گروه از آزمایش‌ها گزارش و همچنین مقادیر درصد انحراف از معیار (SDV) برای گروه‌های آزمایش مختلف محاسبه شده است.

۴-۲-۴ تحلیل پارامترها بر استحکام شکست

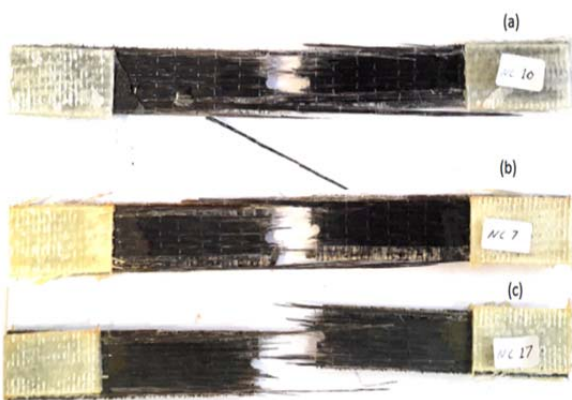
رفتار استحکام شکست کششی نمونه‌ها تحت شرایط مختلف چرخه حرارتی و قطر سوراخ، پس از انجام آزمون کشش به دست آمد. در نمودار ۳، استحکام شکست بر حسب تعداد سیکل نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که استحکام شکست حین



نمودار ۳) نمودار تغییرات استحکام شکست بر حسب تعداد سیکل حرارتی



شکل ۳) شکست نمونه‌های با قطر سوراخ ۲ میلی‌متر



شکل ۴) شکست نمونه‌های با قطر سوراخ ۴ میلی‌متر

۴-۵- مدل رگرسیون نتایج

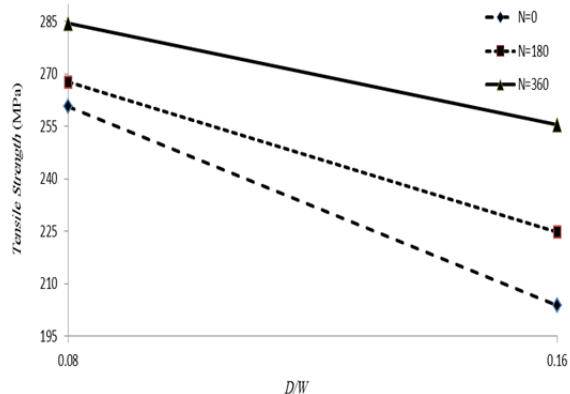
با استفاده از نتایج آزمایش، معادله ریاضی رگرسیون برای استحکام شکست و مدول الاستیسیته به دست آمده است. با این معادلات، پیش‌بینی و تجزیه و تحلیل حالت‌های مختلف از نسبت قطر به پهنا و تعداد سیکل امکان‌پذیر می‌شود. یک مدل رگرسیون چندجمله‌ای با نرم‌افزار MINITAB به دست آمده است. این مدل، ارتباط بین استحکام شکست کششی و مدول الاستیسیته را با دو عامل تعداد سیکل و نسبت قطر به پهنا مشخص می‌کند. مدل رگرسیون به صورت زیر به دست آمده است:

(۱)

$$Q(W, N) = A + BW + CN + DN^2 + ENW + FWN^2$$

که در آن Q ، استحکام شکست و مدول الاستیسیته است و W و N به ترتیب نسبت قطر به پهنا و تعداد سیکل چرخه حرارتی است. مقادیر A ، B ، C ، D ، E و F برای استحکام شکست و مدول الاستیسیته در جدول ۴ آمده است.

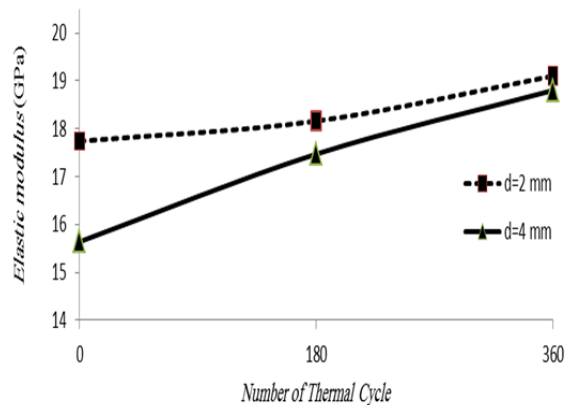
در نمودار ۶، هر دو نتایج تجربی و مدل ریاضی رگرسیون برای مقایسه نشان داده شده است. این نمودار استحکام شکست را بر حسب تعداد سیکل نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش تعداد سیکل چرخه حرارتی، افزایش استحکام شکست را به دنبال دارد. همچنین نمودار استحکام شکست بر حسب نسبت قطر به پهنا، با استفاده از مدل رگرسیون و نتایج تجربی ترسیم شده است (نمودار ۷). نمودار نشان می‌دهد که افزایش قطر سوراخ باعث کاهش استحکام شکست می‌شود. این اتفاق به این دلیل رخ می‌دهد که سوراخ در نمونه‌ها باعث ایجاد تمرکز تنش قابل توجه و ناپایداری خواص مکانیکی می‌شود.



نمودار ۴) نمودار تغییرات استحکام شکست بر حسب نسبت قطر به پهنا

۴-۳- تحلیل پارامترها بر مدول الاستیسیته

رفتار مدول الاستیسیته تحت شرایط مختلف چرخه حرارتی، پس از انجام آزمون کشش به دست آمد. در نمودار ۵، مدول الاستیسیته بر حسب تعداد سیکل نمایش داده شده است. طبق نتایج، مدول الاستیسیته حین چرخه حرارتی و پس از طی ۳۶۰ چرخه حرارتی بین ۷ تا ۲۰٪ افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد که رفتار ویسکوالاستیک اپوکسی در طول چرخه حرارتی یکی از دلایل این افزایش است. در کاری مشابه، قاسمی و مرادی^[۱۷] افزایش ۱۵ درصدی مدول الاستیسیته برای نمونه‌های کامپوزیتی با چیدمان [۰/۹۰]s را پس از چرخه حرارتی گزارش کردند. همچنین کیم و همکاران^[۱۸] در سال ۲۰۱۱، افزایش مدول الاستیسیته را برای نمونه‌های پلی‌پروپیلین ترکیب شده با ذرات PPF پس از چرخه حرارتی نتیجه گرفتند.



نمودار ۵) نمودار تغییرات مدول الاستیسیته بر حسب تعداد سیکل حرارتی

۴-۴- تحلیل حالت شکست

در بررسی حالت شکست برای نمونه‌های با قطر سوراخ ۲ میلی‌متر، شکست جانبی و شکست بلند الیاف در امتداد لبه‌های سوراخ، دو مود شکست غالب هستند. زمانی که قطر سوراخ نمونه‌ها برابر با ۴ میلی‌متر بوده، شکست جانبی، مود شکست غالب است. نتایج نشان داد که سطوح شکست (شامل نواحی شکست الیاف و جدایش الیاف از ماتریس) با افزایش قطر کاهش می‌یابد. در نمونه‌های سوراخ‌دار، قطر سوراخ، مود شکست را تغییر می‌دهد، ولی چرخه حرارتی تقریباً تأثیری در مود شکست ندارد. نتایج فوق در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده که در آن a ، b و c به ترتیب برای نمونه‌های بدون سیکل حرارتی، ۱۸۰ سیکل حرارتی و ۳۶۰ سیکل حرارتی است.

است. در این بخش تمرکز تنش با استفاده از روش تنش نقطه‌ای انجام شده است. براساس این معیار رابطه زیر را داریم:

$$K_T^\infty = 1 + \left[2 \left[\sqrt{\frac{E_{xx}}{E_{yy}}} - \nu_{xy} \right] + \frac{E_{xx}}{G_{xy}} \right]^{0.5} \quad (2)$$

که K_T^∞ فاکتور تمرکز تنش برای یک صفحه ارتوتروپیک نامحدود و با یک سوراخ دایره‌ای بوده و E_{xx} ، E_{yy} و G_{xy} به ترتیب مدول طولی، عرضی و برشی معادل در چندلایه کامپوزیتی است. ν_{xy} نسبت پواسون معادل چندلایه است. معیار تنش نقطه‌ای تعریف شده در بالا توانایی پیش‌بینی استحکام چندلایه‌های کامپوزیتی سوراخ‌دار دایره‌ای شکل را دارد. فرض بر این بوده است که صفحه‌ها پهنای نامحدود دارند. اطلاعات آزمایشی روی نمونه‌های با پهنای محدود به دست آمده است. برای مقایسه مناسب بین نتایج آزمایشی و پیش‌بینی‌ها، اطلاعات آزمون با استفاده از یک ضریب تصحیح پهنای محدود، بدون بعد شده است [19].

(۳)

$$\frac{K_T^\infty}{K_T} = \frac{3 \left(1 - \frac{2r}{W}\right)}{2 + \left(1 - \frac{2r}{W}\right)^3} + \frac{1}{2} \left(\frac{2r}{W} M\right)^6 (K_T^\infty - 3) \times \left[1 - \left(\frac{2r}{W} M\right)^2 \right]$$

که در رابطه فوق M برابر است با:

$$M^2 = \frac{-1 + \sqrt{1 - 8 \left[\frac{3 \left(1 - \frac{2r}{W}\right)}{2 + \left(1 - \frac{2r}{W}\right)^3} - 1 \right]}}{2 \left(\frac{2r}{W}\right)^2} \quad (4)$$

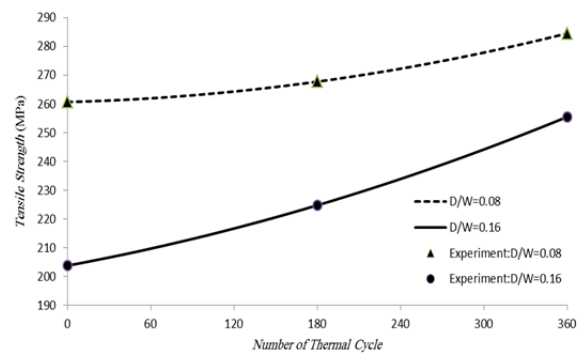
با استفاده از روابط فوق، ضریب تمرکز تنش برای این تحقیق محاسبه و مقادیر آن در جدول ۵ آورده شده است. این مقادیر برای قطرهای مختلف و در سیکل‌های مختلف محاسبه شده و اعداد مورد نیاز با استفاده از روابط میکرومکانیک مربوطه به دست آمده است [8]. تغییرات ضریب تمرکز تنش بر حسب تعداد سیکل، با توجه به روند تغییرات مدول در طول آزمایش و تحت چرخه حرارتی مختلف محاسبه شده است.

در نمودار ۹، مقادیر ضریب تمرکز تنش بر حسب نسبت قطر به پهنای رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود هر چه نسبت قطر به پهنای افزایش می‌یابد، ضریب تمرکز تنش نیز زیاد می‌شود. در نمودار ۱۰، ضریب تمرکز تنش بر حسب تعداد سیکل نشان داده شده است. ضریب تمرکز تنش با افزایش تعداد سیکل افزایش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود شیب افزایش ضریب تمرکز تنش در سیکل‌های ابتدایی زیاد است و از سیکل ۱۸۰ به بعد ضریب تمرکز تنش تغییرات کمتری دارد. برای تحلیل این پدیده باید در نظر داشت که بعد از ۱۸۰ سیکل، درصد زیادی از رطوبت موجود در قطعه بخار می‌شود و لبه‌های قطعه و دیواره سوراخ به مرز سوختگی می‌رسند و تغییر رنگ می‌دهند، بنابراین اثرات نسبت قطر سوراخ به پهنای قطعه به قوت خود باقی می‌ماند و لیکن اثرات سیکل حرارتی روی تمرکز تنش از بین خواهد رفت. بنابراین شیب تغییرات ابتدا افزایش سریع داشته و سپس کاهش یافته است.

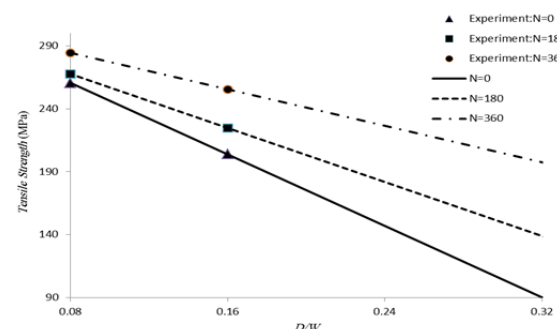
در نمودار ۸، مدول الاستیسیته بر حسب تعداد سیکل چرخه حرارتی با استفاده از مدل رگرسیون مربوطه و نتایج تجربی ترسیم شده است. نمودارها نشان می‌دهند که افزایش تعداد سیکل چرخه حرارتی باعث افزایش مدول الاستیسیته نمونه‌ها شده است.

جدول ۴) مقادیر ضرایب معادله رگرسیون استحکام شکست

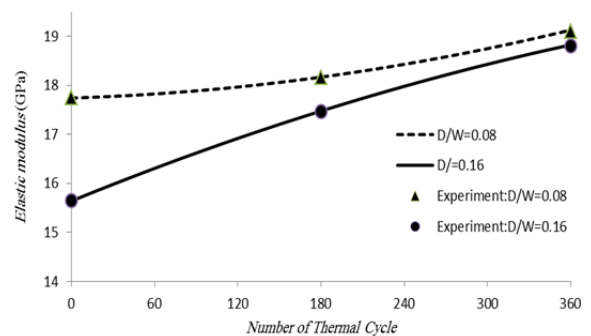
نام ثابت	مقدار برای استحکام	مقدار برای مدول الاستیسیته
A	۳۱۷.۵	۱۹.۸۴
B	-۷۱۰.۴	-۲۶.۲۵
C	-۰.۰۰۶۴۷۸	-۰.۰۰۹۷۷۸
D	۰.۰۰۰۱۴۹	۰.۰۰۰۰۲۴
E	۰.۹۶۳۵	۰.۱۳۳۳
F	۰.۰۰۰۰۱	-۰.۰۰۰۰۱۹۷



نمودار ۶) نمودار تغییرات استحکام شکست بر حسب تعداد سیکل حرارتی با استفاده از معادله رگرسیون و نتایج تجربی



نمودار ۷) نمودار تغییرات استحکام شکست بر حسب نسبت قطر به پهنای با استفاده از معادله رگرسیون و نتایج تجربی



نمودار ۸) نمودار تغییرات مدول الاستیسیته بر حسب تعداد سیکل حرارتی با استفاده از معادله رگرسیون و نتایج تجربی

۶- تحلیل تمرکز تنش

تمرکز تنش در قطعات سوراخ‌دار مهم‌ترین عامل هنگام طراحی آنها

مدول الاستیسیته حین چرخه حرارتی افزایش می‌یابد. مدول الاستیسیته پس از طی ۳۶۰ چرخه حرارتی بین ۷ تا ۲۰٪ افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد که رفتار ویسکوالاستیک اپوکسی در طول چرخه حرارتی یکی از دلایل این افزایش است. برای نمونه‌های با قطر سوراخ ۲ میلی‌متر، شکست جانبی و شکست بلند الیاف در امتداد لبه‌های سوراخ، دو مود شکست غالب هستند. زمانی که قطر سوراخ نمونه‌ها برابر با ۴ میلی‌متر بوده، شکست جانبی، مود شکست غالب است. نتایج نشان داد که سطوح شکست (شامل نواحی شکست الیاف و جدایش الیاف از ماتریس) با افزایش قطر کاهش می‌یابد. در نمونه‌ها، قطر سوراخ، مود شکست را تغییر می‌دهد، ولی چرخه حرارتی تقریباً تأثیری در مود شکست ندارد. برای بررسی تمرکز تنش از روش تنش نقطه‌ای استفاده شده است. طبق یافته‌ها با افزایش نسبت قطر به پهنا، ضریب تمرکز تنش نیز افزایش می‌یابد. همچنین ضریب تمرکز تنش با افزایش تعداد سیکل زیاد می‌شود. شیب افزایش ضریب تمرکز تنش در سیکل‌های ابتدایی زیاد است و از سیکل ۱۸۰ به بعد شیب افزایش ضریب تمرکز تنش کاهش می‌یابد.

تشکر و قدردانی: نویسندگان مقاله از دانشگاه کاشان برای حمایت

مادی و معنوی این تحقیق تشکر می‌نمایند.

تأییدیه اخلاقی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

تعارض منافع: نویسندگان هیچ گونه تعارض منافع برای این اثر ندارند.

سهم نویسندگان: احمدرضا قاسمی (نویسنده اول)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ حامد خبازکاشانی (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری (۵۰٪)

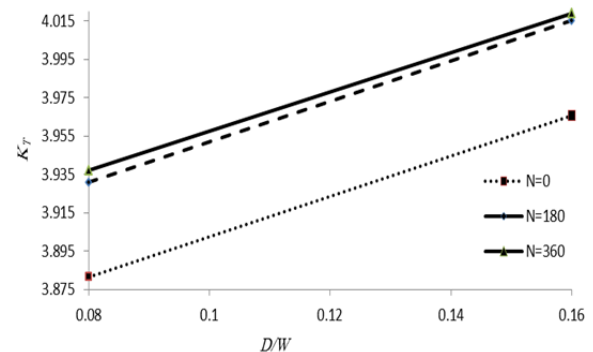
منابع مالی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

منابع

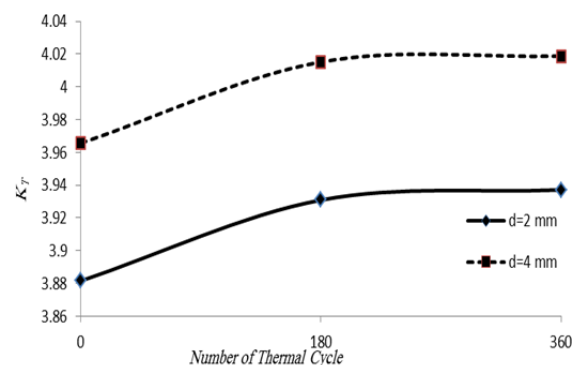
- Vendroux G, Auberon M, Dessaut J. Cryogenic composite tanks: Structural analysis and manufacturing concepts. In: Society for the Advancement of Material and Process Engineering, contributor. SAMPE symposium and exhibition. Diamond Bar CA: Society for the Advancement of Material and Process Engineering; 1997. pp. 828-838.
- Amatore D. First major X-33 component arrives. *Aerospace Technology Innovation*. 1998;6(2):13-14.
- Shimokawa T, Katoh H, Hamaguchi Y, Sanbongi S, Mizuno H, Nakamura H, et al. Effect of thermal cycling on microcracking and strength degradation of high-temperature polymer composite materials for use in next-generation SST structures. *Journal of Composite Materials*. 2002;36(7):885-895.
- Lee J, Soutis C. Measuring the notched compressive strength of composite laminates: Specimen size effects. *Composites Science and Technology*. 2008;68(12):2359-2366.
- Shokrieh MM, Heidari Rarani M, Shakouri M, Kashizadeh E. Effects of thermal cycles on mechanical properties of an optimized polymer concrete. *Construction and Building Materials*. 2011;25(8):3540-3549.
- Wang D, Zhou X, Ge H, Liu Z, Liu H, Sun K. The influence of thermal fatigue on the properties of glass fiber/epoxy composites. *Polymers & Polymer Composites*. 2012;20(1-2):129-132.

جدول ۵) نتایج مربوط به تمرکز تنش

ضریب تمرکز تنش	K_T^{∞}/KT	ضریب تصحیح پهنای محدود	نسبت قطر سوراخ به پهنا (mm)	قطر سوراخ (mm)	تعداد سیکل چرخه حرارتی
۳.۸۸۱۵	۱.۰۰۶۷۴۳	۱.۴۳۶۸	۰.۰۸	۲	۰
۳.۹۳۰۹	۱.۰۰۶۷۳۵	۱.۴۳۶۸	۰.۰۸	۲	۱۸۰
۳.۹۳۷۱	۱.۰۰۶۷۵۰	۱.۴۳۶۸	۰.۰۸	۲	۳۶۰
۳.۹۶۵۶	۱.۰۲۸۵۵۶	۱.۴۴۲۲	۰.۱۶	۴	۰
۴.۰۱۵۲	۱.۰۲۸۵۸۸	۱.۴۴۲۲	۰.۱۶	۴	۱۸۰
۴.۰۱۸۸	۱.۰۲۸۶۹۴	۱.۴۴۲۲	۰.۱۶	۴	۳۶۰



نمودار ۹) تغییرات ضریب تمرکز تنش بر حسب نسبت قطر به پهنا



نمودار ۱۰) تغییرات ضریب تمرکز تنش بر حسب تعداد سیکل حرارتی

۶- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این تحقیق رفتار نمونه‌های نانوکامپوزیت سوراخ‌دار با قطر سوراخ‌های ۲ و ۴ میلی‌متر تحت چرخه‌های حرارتی بررسی شد. با انجام آزمون کشش روی نمونه‌ها، استحکام شکست و مدول الاستیسیته در اثر تعداد چرخه‌های حرارتی متفاوت و برای نسبت قطر سوراخ به پهنا برای نمونه‌های مختلف بررسی و مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که استحکام شکست حین چرخه حرارتی افزایش می‌یابد. استحکام شکست پس از طی ۳۶۰ چرخه حرارتی بین ۹ تا ۲۵٪ افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد که یک دلیل برای این افزایش استحکام کششی، پخت نانوکامپوزیت شیشه/اپوکسی در طول چرخه حرارتی باشد.

افزایش قطر سوراخ، میزان این تغییرات را افزایش می‌دهد و بیشترین افزایش استحکام که حدود ۲۵٪ بوده، مربوط به نمونه‌هایی با قطر سوراخ ۴ میلی‌متر است. در نتیجه، افزایش قطر سوراخ، ناپایداری رفتار نمونه را افزایش می‌دهد. همچنین افزایش قطر سوراخ باعث کاهش استحکام شکست می‌شود. سوراخ در نمونه‌ها باعث ایجاد تمرکز تنش قابل توجه و ناپایداری می‌شود. افزایش قطر سوراخ باعث کاهش ۲۰ تا ۲۷ درصدی استحکام شکست شده است.

- nanocomposites. *International Journal of ChemTech Research*. 2015;8(1):52-57.
- 14- Ghasemi AR, Mohammadi MM. Residual stress measurement of fiber metal laminates using incremental hole-drilling technique in consideration of the integral method. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2016;114:246-256.
- 15- ASTM. ASTM D3039/D3039M-08: Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials [Internet]. West Conshohocken PA: International; 2008 [cited 2018 April 1]. Available from: <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D3039D3039M-08.htm>
- 16- Grammatikos SA, Jones RG, Evernden M, Correia JR. Thermal cycling effects on the durability of a pultruded GFRP material for off-shore civil engineering structures. *Composite Structures*. 2016;153:297-310.
- 17- Ghasemi AR, Moradi M. Low thermal cycling effects on mechanical properties of laminated composite materials. *Mechanics of Materials*. 2016;96:126-137.
- 18- Kim YK, Kwon H, Choi WJ, Woo CS, Park HS. Environmental considerations of plastic behaviors for automobile applications. *Procedia Engineering*. 2011;10:1029-1034.
- 19- Afaghi Khatibi A, Ye L. Residual strength simulation of fibre reinforced metal laminates containing a circular hole. *Journal of Composite Materials*. 1997;31(19):1884-1904.
- 7- Shokrieh MM, Daneshvar A, Akbari S. Reduction of thermal residual stresses of laminated polymer composites by addition of carbon nanotubes. *Materials & Design*. 2014;53:209-216.
- 8- Ghasemi AR, Mohammadi MM, Moradi M. Investigation of mechanical and thermal properties of polymer composites reinforced by multi-walled carbon nanotube for reduction of residual stresses. *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*. 2014;27(3):213-230. [Persian]
- 9- Genedy M, Daghsh S, Soliman E, Reda Taha MM. Improving fatigue performance of GFRP composite using carbon nanotubes. *Fibers*. 2015;3(1):13-29.
- 10- Ghasemi AR, Moradi M. Effect of thermal cycling and open-hole size on mechanical properties of polymer matrix composites. *Polymer Testing*. 2017;59:20-28.
- 11- Ghasemi AR, Moradi M. Surface degradation of polymer matrix composites under different low thermal cycling conditions. *Journal of Solid Mechanics*. 2017;9(1):54-62.
- 12- Braun PV. Natural nanobiocomposites, biomimetic nanocomposites, and biologically inspired nanocomposites. In: Ajayan PM, Schadler LS, Braun PV. *Nanocomposite science and technology*. Weinheim: Wiley-VCH; 2003. pp. 155-214.
- 13- Ramamoorthi R, Sampath PS. Effect of water absorption on the mechanical properties of halloysite nanotube crammed glass fiber reinforced epoxy hybrid