



مطالعه رفتار سیکلیک، عمر و خرابی خستگی کم‌چرخه جابجایی - کنترل در کامپوزیت پایه پلیمری تقویت شده با الیاف کربن سوراخ‌دار تحت نرخ‌ها و دامنه‌های بارگذاری مختلف

محمد آزادی^{1*}، محمد درفکی²

1-دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان

2- کارشناس ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه سمنان، سمنان

*semnan.ac.ir.35131-19111@m_azadi

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت: 1399/11/17	در این مقاله، به بررسی اثرات نرخ بارگذاری بر رفتار خستگی کم‌چرخه در کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن پرداخته شده است. ابتدا، قطعات کامپوزیتی سوراخ‌دار، تحت بارگذاری کششی در دو فرکانس اعمال بار مختلف قرار گرفته شده تا دامنه مورد استفاده در آزمون خستگی کم‌چرخه بدست آید. سپس نمونه‌ها تحت بارگذاری خستگی در سه مقدار جابجایی و پنج فرکانس بارگذاری قرار گرفتند و تاثیر آن‌ها در مقدار بیشینه و کمینه تنش در هر سیکل، عمر خستگی و مقادیر تنش دامنه و میانگین محاسبه و در انتها، تصاویر سطح شکست و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ارائه شدند. نتایج نشان داد که با افزایش نرخ بارگذاری کششی مقدار بیشینه تنش، به دلیل تمایل بیشتر ماده به رفتار ترد، افزایش پیدا می‌کند. همچنین بیشینه تنش در جابجایی ثابت و فرکانس‌های بارگذاری مختلف مقدار کمی با افزایش همراه بوده ولی در فرکانس ثابت و جابجایی‌های متفاوت بسیار افزایش یافت. عمر خستگی نیز در جابجایی ثابت با افزایش فرکانس بارگذاری روندی افزایشی و در فرکانس بارگذاری ثابت با افزایش جابجایی روندی کاهشی داشت. به کمک تحلیل حساسیت مشخص شد که تغییر فرکانس بارگذاری در جابجایی ثابت همچنین تغییر جابجایی در فرکانس 1-5 هرتز تاثیری در مقدار تنش بیشینه نداشته ولی در فرکانس‌های 10-20 هرتز تاثیرگذار است. رفتار سیکلیک ماده نشان داد که تنش بیشینه در طول سیکل‌های بارگذاری، به دلیل تجمع آسیب، کاهش می‌یابد و سفتی کامپوزیت کاهش می‌یابد. مکانیزم‌های آسیب با تغییر فرکانس بارگذاری، تغییر کرده و درصد شکست الیاف با افزایش فرکانس بارگذاری، افزایش یافت.
پذیرش: 1400/03/30	
کلیدواژه‌ها: کامپوزیت پایه پلیمری الیاف کربن خستگی کم‌چرخه دامنه جابجایی نرخ جابجایی	

Study of Cyclic Behavior, Displacement-Controlled Low-Cycle Fatigue Lifetime and Failure in Open-Hole Polymer-Matrix Composite Reinforced by Carbon Fibers Under Various Loading Rates and Amplitudes

Mohammad Azadi*, Mohammad Dorfaki

Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

* P.O.B. 35131-19111, Semnan, Iran, m_azadi@semnan.ac.ir

Keywords

Polymer matrix composite
Carbon fibers
Low-cycle fatigue
Displacement rate
Displacement amplitude

Abstract

In this article, effects of the loading rate on low-cycle fatigue behaviors in carbon fiber reinforced composites have been investigated. Firstly, open-hole composite specimens were exposed to two different tensile loading rates to achieve displacements in low-cycle fatigue tests. Then, samples were subjected to cyclic loading, in three displacements and five loading frequencies. Fracture surfaces and scanning electron microscopy images were also shown. Obtained results indicated that increasing the rate enhanced the maximum stress due to the material tend to the brittle behavior. The maximum stress in different frequencies had a small enhancement; however, it enhanced at various displacements. The lifetime had a decreasing trend in a constant displacement, with increasing the frequency and increased in a constant frequency, with increasing the displacement. By analyzing the sensitivity, the change in the loading frequency (at constant displacements) and the displacement (frequencies: 1-5 Hz) were not effective on the maximum stress. However, under 10-20 Hz, it was effective on the maximum stress. The material cyclic behavior demonstrated that the maximum stress decreased during loading cycles due to the damage accumulation and the composite stiffness reduced. The failure mechanisms changed by changing the frequency and the percentage of the fiber breakage increased by increasing the loading frequency.

1- مقدمه

مقاومت و سختی برابر با آنها، ساخته شوند. از دیگر مزایای عالی مواد مرکب می‌توان به مقاوم کردن سازه‌ها اشاره کرد. همچنین کامپوزیت‌ها کاربرد

مواد مرکب یا کامپوزیت‌ها می‌توانند تا چندین برابر سبک‌تر از فولادها با

Please cite this article using:

Azadi, M., and Dorfaki, M., "Study of Cyclic Behavior, Displacement-Controlled Low-Cycle Fatigue Lifetime and Failure in Open-Hole Polymer-Matrix Composite Reinforced by Carbon Fibers Under Various Loading Rates and Amplitudes", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 1, pp. 1373-1386, 2021.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

شکره و طاهری [15]، به بررسی عمر خستگی کامپوزیت‌های تک‌جهتی، با استفاده از انرژی کرنش باقیمانده پرداختند. در مدل ارائه شده توسط آن‌ها، برخلاف مدل‌های تنش پایه، هر دو عامل کاهش سفتی و استحکام، به منظور پیش‌بینی عمر خستگی بکار گرفته شد. ذبیح‌پور و همکاران [16]، در پژوهشی، به بررسی رفتار خستگی سازه‌های ساندویچی با پوسته‌های هیبریدی نامتقارن و هسته فومی تحت بارگذاری کشش-کشش پرداختند. پوسته‌های مورد بررسی در پژوهش آن‌ها، دو نوع الیاف شیشه و یک نوع الیاف کربن بود. کوارسمین^۷ و همکاران [17]، تجزیه و تحلیل جامعی از خستگی چندلایه‌های کامپوزیتی، تحت بارگذاری چندمحوری ارائه کردند. نتایج بدست آمده از پژوهش آن‌ها نشان داد که نسبت دو محوری برشی سطح لایه که بصورت دامنه تنش برشی به حداکثر دامنه تنش نرمال تعریف می‌گردد، فاکتور حاکم بوده است. شکره و اسم خانی [18]، رفتار خستگی رزین اپوکسی، تحت کنترل بار و جابجایی را بصورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. در بررسی آن‌ها، مشخص شد که با افزایش فرکانس، عمر خستگی کاهش یافته است. بناریبا و همکاران^۹ [19]، به روش آزمایشگاهی، رفتار ترمومکانیکی کامپوزیت‌های پلی‌امید با الیاف شیشه را تحت بارگذاری خستگی کم‌چرخه، با در نظر گرفتن حالت‌های مختلف هیدرومتری و حالت‌های مختلف بارگذاری، مورد مطالعه قرار دادند.

علیزاده و همکاران [20]، تاثیر دامنه جابجایی بارگذاری در رژیم خستگی کم-چرخه، بر روی سازه‌های خرابی در کامپوزیت‌های چندلایه سوراخ‌دار را با استفاده از انتشار صوت بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که با کاهش دامنه جابجایی در آزمون خستگی کم‌چرخه، عمر قطعه، طبق انتظار افزایش یافته و تنش بیشینه نیز، کاهش می‌یابد. سپس، اثبات کردند که بازدهی روش انتشار صوت در تعیین نوع خرابی‌ها و مقدار درصد هریک از آن‌ها، در کامپوزیت‌های چندلایه، مطلوب است. در مقاله دیگری [21]، عمر خستگی کم‌چرخه کامپوزیت پایه پلیمری را بررسی کردند و نشان دادند، نرخ جابجایی پارامتر حساسی بر روی عمر و تنش بیشینه است اما فرکانس بارگذاری تاثیری بر عمر خستگی کامپوزیت ندارد. کوخ^{۱۰} و همکاران [22]، رفتار آسیب خستگی در کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف کربن، تحت بارهای کاملاً عکس‌شونده را مدلسازی و ارزیابی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که تنش‌های پسماند ناشی از فرایند ساخت و دامنه تنش کششی سیکلیک، تاثیر بسزایی روی رفتار آسیب دارد. وو و ژولوبکو^{۱۱} [3]، استحکام خستگی باقیمانده در کامپوزیت پایه پلیمری تقویت شده با الیاف کربن را مطالعه کردند. تحلیل‌های آماری داده‌های تجربی نشان داد که استحکام خستگی با تابع توزیع ویبال قابل تخمین است. با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری، میانگین استحکام خستگی کاهش یافته در حالی که محدوده پراکندگی آن، افزایش می‌یابد. عمر خستگی چندلایه‌های کامپوزیتی تحت بارهای چندجهته توسط محمدی و همکاران [24,23] و با استفاده از مدل مکانیک خرابی محیط‌های پیوسته توسعه یافته، پیش‌بینی گردید. نتایج آن‌ها نشان از توانایی مدل ارائه شده در وضعیت‌های مختلف تنش، با دقت مناسب داشت.

حساسیت رفتار شکست در کامپوزیت کربن-اپوکسی در نرخ‌های جابجایی مختلف تحت بارگذاری مود اول کششی با آنالیز رگرسیون توسط آزادی و همکاران [26-25] تحلیل شد. نتایج تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد که تغییرات نرخ

گسترده‌ای در صنایع مختلف دارند [1]. کامپوزیت‌های پایه پلیمری، با توجه به نسبت استحکام به وزن مناسب، کاربرد وسیعی در صنایع مختلف دارند. بسیاری از این سازه‌ها، تحت بارگذاری‌های تکرارشونده و در نتیجه، پدیده خستگی قرار دارند. لذا مطالعه رفتار خستگی این گونه کامپوزیت‌ها تحت بارهای تکرارشونده، امری ضروری برای مهندسان طراح است. در مباحث خواص مکانیکی، مکانیک شکست و مکانیزم‌های آن [2-9]، مقالات متعددی برای کامپوزیت‌ها یافت می‌شود. اما در حوزه پدیده خستگی برای کامپوزیت‌ها، مقالات محدودی ارائه شده است که در ادامه، به اختصار، به بررسی آن‌ها پرداخته شده است. عموماً پدیده خستگی در سازه‌ها، به دو ناحیه خستگی پرچرخه تنش-یا نیرو-کنترل^۱ و خستگی کم‌چرخه کرنش-یا جابجایی-کنترل^۲ [4] تقسیم‌بندی می‌گردد. اکثر قطعات مکانیکی، معمولاً تحت بارهای خستگی پرچرخه هستند. اما در سازه‌هایی که مقدار نیرو یا جابجایی، زیاد (بیشتر از تنش تسلیم) می‌شود، ماده تحت رژیم خستگی کم‌چرخه قرار می‌گیرد که لزوم بررسی رفتار پیچیده‌تر آن، تحت بارهای سیکلیک (همچون کاهش استحکام یا سفتی ماده در طول بارگذاری)، برای طراحی یک سازه کامپوزیتی، وجود دارد. جیمز و همکاران^۳ [10]، خستگی کم‌چرخه یک چندلایه پایه پلاستیکی تقویت شده با الیاف دو جهته شیشه را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل از آزمون نشان داد که نرخ بارگذاری، شدیداً در کامپوزیت‌های پارچه‌ای در ناحیه خستگی کم‌چرخه و کرنش زیاد، تأثیرگذار بوده اما با کاهش کرنش‌ها و افزایش عمر، این تأثیر کمتر بوده است. آگاروال و دالی^۴ [11]، رفتار خستگی کم‌چرخه کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه را بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. در بررسی آن‌ها نشان داده شد که آزمون خستگی در یک بازه تنش ثابت و یا در یک بازه کرنش ثابت، زمانی که تنش با مقاومت نهایی و کرنش با کرنش شکست بی‌بعد می‌شود، عمر یکسانی را می‌دهد. جینن^۵ [12]، انباشت کرنش در خستگی کم‌چرخه نایلون تقویت‌شده با الیاف کوتاه کربن را مورد مطالعه قرار داد. او در پژوهش خود، از یک سیستم بارگذاری کنترل‌شده تکرارشونده نیمه‌کششی بهره برد. نتایج بدست آمده نشان داد که رابطه تعداد تکرارها و کرنش کل یا انباشته، در حالت لگاریتمی، خطی بوده و دامنه تنش وابسته به گرادیان این نمودارها بوده است. بارون و همکاران^۶ [13]، اثرات فرکانسی بر رفتار خستگی چند لایه‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در این پژوهش، از آزمون خستگی کشش-کشش با سطح‌های مختلف تنش و در سه فرکانس (5، 10 و 20 هرتز)، برای سه نمونه آزمون با لایه‌چینی‌های مختلف، بهره بردند و در حین آزمون، مشخصات دینامیکی-مکانیکی نمونه‌ها، از جمله رفتار تنش-عمر، کرنش بیشینه، مدول خستگی بی‌بعدشده، مدول کاهش یافته دینامیکی، فاکتور میرایی و دمای نمونه‌ها را ثبت نموده و مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. هریک و همکاران^۷ [14]، رفتار خستگی کم‌چرخه کامپوزیت‌های تک‌جهته ماتریس پلیمری با الیاف شیشه (با زاویه الیاف صفر درجه) را تحت بارگذاری کششی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند که تحت بارگذاری کم‌چرخه زیاد، عمر خستگی کامپوزیت‌های فوق، به دلیل نرخ بالای کاهش خواص مواد، کمتر از 10⁴ سیکل و بطور قابل ملاحظه‌ای، بیشتر از خستگی پرچرخه بود.

⁷ Harik⁸ Quaresimin⁹ Benaarbia¹⁰ Koch¹¹ Wu and Zholobko¹ Stress- or force-controlled high-cycle fatigue² Strain- or displacement-controlled low-cycle fatigue³ James⁴ Agarwal and Dally⁵ Jinen⁶ Barron

شیشه‌ای از یک لایه داکرون¹ و سپس یک لایه بریدر، برای توزیع فشار یکنواخت روی چندلایه استفاده شد. در ادامه، چندلایه ساخته شده به مدت 10 ساعت تحت خلأ بوده و پس از 24 ساعت از قالب خارج گردید. پس از تولید صفحه کامپوزیتی اولیه، نمونه‌های استاندارد آزمون از پنل فوق، با استفاده از اره مخصوص و شابلون در اندازه استاندارد، برش داده شد. این اره در یک جهت حرکت کرده و باعث می‌شود تا لایه‌های کامپوزیت دچار عیب تورق نشوند.

در مرکز نمونه‌ها نیز، سوراخی به قطر 6 میلی‌متر مطابق با استاندارد ASTM-D5766 [27] و با استفاده از مته، ایجاد شد. برای فرآیند سوراخ‌کاری، تمام نمونه‌ها روی هم قرار گرفته و با استفاده از گیره، ثابت شده و با کمک دستگاه فرز NC، سوراخ در مرکز همه نمونه‌ها ایجاد شد. طول، عرض و ضخامت نمونه‌ها، طبق استاندارد ASTM-D5766 [27]، به ترتیب برابر 250، 30 و 2 میلی‌متر بود. مراحل ساخت نمونه‌های استاندارد شامل رزین و الیاف کربن اولیه، فرآیند لایه‌گذاری دستی، فرآیند ایجاد خلا (وکیوم)، پنل کامپوزیتی نهایی، برشکاری پنل کامپوزیتی و سوراخکاری نمونه کامپوزیتی، در شکل 1 آمده است.

برای بارگذاری نمونه‌های استاندارد آزمون کامپوزیتی سوراخ‌دار، از دستگاه آزمون خستگی SAF50 پنج تن (ساخت شرکت سنتام) و با قابلیت بارگذاری 0.01 تا 100 میلی‌متر بر ثانیه استفاده شد. شکل 2، نمایش دهنده دستگاه آزمون خستگی استفاده شده است.

در این پژوهش، برای بارگذاری بر روی نمونه‌های استاندارد آزمون، از بارگذاری سینوسی کشش-کشش و بصورت جابجایی-کنترل استفاده شده است. برای تعیین محدوده شکست نمونه‌ها نیز، ابتدا دو نمونه تحت بارگذاری کششی قرار گرفت تا دامنه شکست بدست آید.

بارگذاری کششی، با دو نرخ (فرکانس اعمال بار) 20 و 600 میلی‌متر بر دقیقه، با نمونه‌های شماره 201 و 202، انجام گرفت. سپس نمونه‌ها با توجه به دامنه شکست در آزمون‌های کشش، تحت بارگذاری تکرارشونده و پدیده خستگی کم‌چرخه قرار گرفت. شرایط بارگذاری خستگی اعمال شده با یک تکرار در هر شرط، بر روی نمونه‌های استاندارد کامپوزیتی از شماره 203 تا 217، در جدول 1، مطابق با استاندارد آزمون خستگی ASTM-D7615 [28]، برای کامپوزیت چندلایه سوراخ‌دار قابل مشاهده‌اند.

جابجایی، بر اساس تابع درجه سوم از نرخ جابجایی، بر ماکزیمم نیروی شکست و نرخ رهایی انرژی کرنشی، تاثیرگذار می‌باشد و این مقادیر به تغییرات نرخ جابجایی، حساس می‌باشند. اما مقدار جابجایی ماکزیمم دهانه ترک اولیه در کامپوزیت، به لگاریتم نرخ جابجایی در بارگذاری کششی، وابسته است. در نهایت، الگوی تغییراتی مشخصه‌های مکانیک شکست کامپوزیت، بصورت افزایشی با افزایش نرخ جابجایی بود [25,26].

با توجه به مطالب گفته شده، به‌عنوان نتیجه می‌توان به اهمیت استفاده روزافزون از مواد کامپوزیتی به خصوص کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن در صنایع مختلف پی برد. همچنین، مطالعه رفتار سیکلیک در رژیم خستگی کم‌چرخه این مواد، به دلیل قرار گرفتن در شرایط گوناگون کارکردی، اعم از محیط‌های مختلف، دماهای مختلف، بارهای کششی با دامنه و نرخ‌های مختلف، امری ضروری است که در مقابل بارهای کششی مونوتونیک، کمتر در تحقیقات، به آن پرداخته‌اند. در این تحقیق تجربی، به رفتار سیکلیک کامپوزیت پلیمری با الیاف کربن و تغییرات نیرو (بعبارتی کاهش استحکام یا سفتی ماده) در طول بارگذاری سیکلیک جابجایی-کنترل نیز، پرداخته شده است که به ندرت در پیشینه تحقیق یافت می‌شود. لذا در این مقاله، اثر نرخ و دامنه بارگذاری بر رفتار خستگی کم‌چرخه در کامپوزیت پایه پلیمری تقویت شده با الیاف کربن، تحت بارهای تکرارشونده جابجایی-کنترل، مطالعه شده است. سپس، تغییرات نیروهای پیشینه و کمینه در طول بارگذاری سیکلیک روی ماده، در نرخ‌ها و دامنه‌های بارگذاری مختلف ارائه گردیده است. در ادامه نیز، با استفاده از آنالیز رگرسیون، تحلیل حساسیت پارامترهای نرخ و دامنه جابجایی بر عمر و نیروی پیشینه در طول سیکل‌های بارگذاری، انجام پذیرفته است. بنابراین، از نوآوری‌های این پژوهش می‌توان به تحلیل حساسیت و مطالعه رفتار خستگی کم‌چرخه کامپوزیت‌ها در نرخ‌های مختلف بارگذاری و همچنین ارائه تاریخچه رفتار سیکلیک ماده، اشاره نمود.

2- روش تحقیق

در ابتدای امر، شرح روش ساخت نمونه‌های آزمون خستگی، ضروری است. نمونه‌های آزمون با الیاف کربن تک‌جهته و رزین اپوکسی ساخته شد. الیاف کربن استفاده شده ساخت شرکت سیکا با وزن مخصوص 230 گرم بر متر مربع و رزین اپوکسی LY-5052 نیز، ساخت شرکت سیکا بود. ضمناً نسبت وزنی اختلاط رزین با سخت‌کننده HY-5052 برابر با 100 به 38 بود.

در این پژوهش، به‌منظور ساخت نمونه‌های کامپوزیتی، از یک چیدمان انتخابی بصورت $[0,90,0]_s$ استفاده شده است. مشابه چنین ساختاری برای کامپوزیت چندلایه در استاندارد ASTM-D5766 [27] و بصورت $[0_i,90_j]_{ms}$ آمده است. ضخامت تقریبی هر لایه از الیاف کربن برابر با 0.13 میلی‌متر بود که پس از ترکیب با رزین، به ضخامت تقریبی 0.33 میلی‌متر رسید. نمونه‌ها با استفاده از روش کیسه خلأ و به روش دستی، تولید شد. برای آب‌بندی کیسه خلأ نیز از نوار آب‌بندی استفاده گردید. ابتدا الیاف کربن را در اندازه‌های مد نظر برش زده و سپس، بر روی یک صفحه فولادی که به واکس و فیلم جداکننده، آغشته شده بود، لایه‌گذاری دستی انجام شد. پس از تکمیل لایه‌چینی یک صفحه شیشه‌ای که به واکس و فیلم جداکننده، آغشته شده بود، روی چندلایه قرار گرفت. برای خارج نشدن از محدوده مجاز ضخامت استاندارد ASTM-D5766 [27]، شامل 2 تا 4 میلی‌متر، از چند فاصله دهنده که فاصله بین صفحه شیشه‌ای و صفحه فولادی را ثابت نگه می‌داشت، استفاده شد. روی صفحه

¹ Dacron

15	217	20	2.0
----	-----	----	-----

شایان ذکر است که همه آزمون‌های مونوتونیک و سیکلیک در دمای اتاق اجرا شده‌اند. طبق استاندارد آزمون خستگی ASTM-D7615 [28]، بارگذاری خستگی از نوع نیرو- کنترل است. اما در این پژوهش، برای دقت بیشتر در محاسبه عمر خستگی کم‌چرخه ماده، از بارگذاری جابجایی- کنترل استفاده شده است که در رژیم خستگی کم‌چرخه متداول تر می‌باشد. ضمناً مطابق با استاندارد آزمون کشش ASTM-D5766 [27] برای کامپوزیت چندلایه سوراخ‌دار، فرکانس بارگذاری برابر با 1.27 میلی‌متر بر دقیقه (معادل با 0.05 اینچ بر دقیقه) پیشنهاد شده است. در مقابل، فرکانس‌های 20 و 600 میلی‌متر بر دقیقه در این مقاله، صرفاً انتخاب شده‌اند. با توجه به اینکه هدف از اجرای آزمون کشش مونوتونیک، استخراج محدوده‌ای عددی برای دامنه جابجایی در آزمون‌های خستگی سیکلیک بوده است، لذا اعداد ذکر شده، مطابق با استاندارد آزمون کشش لحاظ نشده‌اند. البته باید به این نکته نیز، دقت نمود که فرکانس بارگذاری سیکلیک، بیشتر از بارگذاری مونوتونیک بوده است. مطابق با استاندارد آزمون خستگی ASTM-D7615 [28] برای کامپوزیت چندلایه سوراخ‌دار، فرکانس بارگذاری باید کمتر از 5 هرتز، در حالت نیرو- کنترل باشد تا از تولید گرما در نمونه جلوگیری نماید. لذا در این پژوهش، فرکانس بارگذاری سیکلیک از 20 هرتز در حالت جابجایی- کنترل، فراتر نرفته است هرچند افزایش دمای محسوس روی نمونه، اندازه‌گیری نشده است [18]. نکته حائز اهمیت دیگر این است که از نمونه‌های کامپوزیتی سوراخ‌دار استفاده شده است تا تاثیر ناپوستگی بر رفتار و عمر خستگی ماده بررسی گردد [28,27]. بر اساس این استانداردها، سوراخ باید به گونه‌ای در نمونه استاندارد ایجاد شود که تاثیری بر استحکام ماده نداشته باشد. برخی از خرابی‌ها همچون لایه لایه شدن، می‌توانند باعث افزایش ظرفیت نیرویی شوند اما بقیه انواع خرابی‌ها، استحکام را کاهش می‌دهند [27]. با توجه به اینکه، فرایند سوراخکاری همزمان باهم و با پارامترهای یکسان روی تمامی نمونه‌ها اجرا شده است، لذا تاثیرگذاری آن روی خواص مواد، بصورت یکسان فرض شده است. وجود سوراخ در نمونه کامپوزیتی باعث افزایش تمرکز تنش و نیروی بیشینه در ناحیه اطراف سوراخ، شده است [30,29] و شروع خرابی‌ها در طی بارگذاری را بدان سمت هدایت می‌کند. لذا احتمال رخداد چندین نوع خرابی و از محل‌های مختلف در کامپوزیت، برای مهیا کردن یک سری داده تجربی قابل اطمینان، کاهش می‌یابد. در همین راستا، داده‌هایی که مربوط به خرابی از نقاطی خارج از ناحیه اطراف سوراخ نمونه هستند، قابل قبول نمی‌باشند [27].

در حین بارگذاری تکرارشونده بر روی نمونه‌های استاندارد کامپوزیتی، سازوکارهای مختلف خرابی مانند ترک زمینه، شکست الیاف و سایر خرابی‌ها رخ می‌دهد. پس از شکست نهایی، برای تصویربرداری از این سازوکارها، از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل XL30 ساخت شرکت PHILIPS استفاده شد. به دلیل نارسا بودن کامپوزیت، سطح نمونه‌های استاندارد، در مقیاس نانومتری، با نقره پوشش‌دهی شد و سپس در دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی، تحت خلأ، قرار گرفته و تصویربرداری انجام شد.

به منظور تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی مسئله مطرح شده در این پژوهش (شامل نرخ و دامنه جابجایی در آزمون خستگی کم‌چرخه) بر فاکتورهای خروجی (شامل عمر خستگی کم‌چرخه و نیروی بیشینه)، از آنالیز رگرسیون¹ استفاده شده است که از تحلیل‌های آماری می‌باشد. برای این

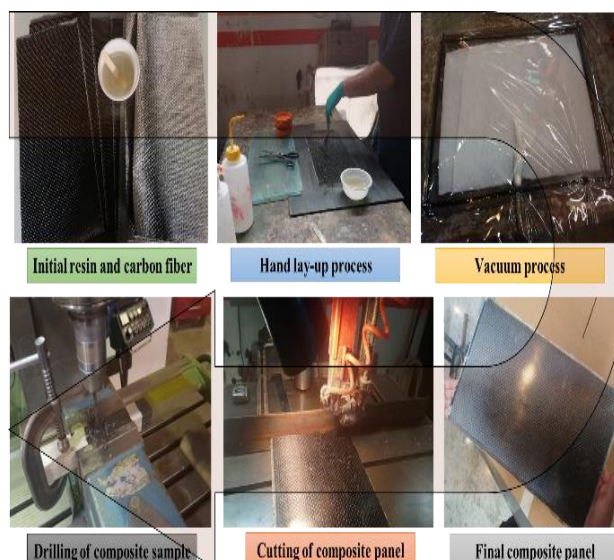


Figure 1 The fabrication process of standard samples

شکل 1 فرایند ساخت نمونه‌های استاندارد



Figure 2 The SAF50 fatigue testing machine, used in this research

شکل 2 دستگاه آزمون خستگی SAF50 مورد استفاده در این پژوهش

جدول 1 شرایط بارگذاری خستگی بر روی نمونه‌های استاندارد کامپوزیتی

Table 1 Fatigue loading conditions on composite standard samples

ردیف	شماره نمونه	فرکانس بارگذاری (Hz)	دامنه جابجایی (mm)
1	203	1	1.0
2	204	5	1.0
3	205	10	1.0
4	206	15	1.0
5	207	20	1.0
6	208	1	1.5
7	209	5	1.5
8	210	10	1.5
9	211	15	1.5
10	212	20	1.5
11	213	1	2.0
12	214	5	2.0
13	215	10	2.0
14	216	15	2.0

¹ Regression Analysis

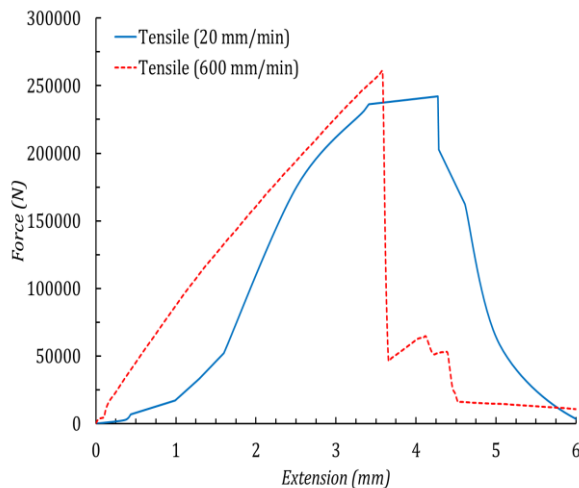


Figure 3 The force-displacement curve under tensile testing

شکل 3 نمودار نیرو-جابجایی تحت آزمون کشش

2-3- تحلیل حساسیت داده‌های آزمون خستگی

با توجه به جدول 2 و نتایج بدست آمده بیشینه تنش در جابجایی ثابت و فرکانس‌های بارگذاری مختلف مقدار کمی با افزایش همراه بوده ولی در فرکانس ثابت و جابجایی‌های متفاوت به وضوح با افزایش همراه بوده است که با نتایج سایر محققین هم‌خوانی دارد [25-26]. علیرزاده و همکاران [20]، نشان دادند که در فرکانس ثابت 200 میلی‌متر بر دقیقه، با افزایش دامنه جابجایی از 5.5 تا 7 میلی‌متر، عمر خستگی کامپوزیت به شدت کاهش می‌یابد. این کاهش عمر بصورت یک تابع لگاریتمی از دامنه جابجایی ارائه شد.

مقدار R^2 بیانگر این است که منحنی حاصل از معادله رگرسیونی تا چه اندازه با نقاط روی نمودار انطباق دارد. لذا هرچقدر مقدار R^2 نزدیک به یک باشد، مدل رگرسیونی بر نقاط نمودار منطبق‌تر خواهد بود [21,20]. مقدار R^2 برای نیروی بیشینه و عمر خستگی به ترتیب 99.02 و 99.17 درصد است که نشان دهنده این است که مدل تقریباً همه تغییرپذیری داده‌های پاسخ در اطراف میانگین آن را تبیین می‌کند (جدول 3). همان‌طور که در جدول 4، مشاهده می‌شود مقدار P-Value در آنالیز رگرسیون مدل اول برای نیروی بیشینه و عمر خستگی کمتر از 0.05 است، نشان دهنده حساس بودن پارامترهای مدنظر می‌باشد. همچنین، همان‌طور که در شکل‌های 4 و 5 قابل رویت است، با توجه به مقادیر F-Value بدست آمده برای نیروی بیشینه و عمر خستگی می‌توان نتیجه گرفت که عمر خستگی تاثیرگذاری بیشتری دارد. این نتایج با نتایج تحقیق پیشین مطابقت دارد [21,20].

جدول 2 بیشینه نیرو در آزمون خستگی در فرکانس‌ها و دامنه‌های بارگذاری مختلف
Table 2 The maximum force in fatigue testing at different loading frequencies and amplitudes

ردیف	شماره نمونه	دامنه جابجایی (mm)	فرکانس بارگذاری (Hz)	بیشینه نیرو (N)
1	203		1	183840
2	204		5	193920
3	205	1.0	10	198720
4	206		15	195840
5	207		20	192480
6	208		1	222720
7	209	1.5	5	226080
8	210		10	225600

منظور، در ابتدا با استفاده از آنالیز رگرسیون، تابعی بر اساس پارامترهای ورودی مسئله (S_1, S_2, \dots) برای یک خروجی، به عنوان تابع هدف (F_i) ارائه شده است [25].

$$F_i = C_0 + C_1 S_1 + C_2 S_2 + C_3 S_1 S_2 + \dots \quad (1)$$

در ادامه، پس از تطبیق رابطه (1) با داده‌های تجربی، ضرایب تابع هدف (C_0, C_1, \dots) محاسبه می‌شوند. سپس، با محاسبه میانگین مربعات (MS) پارامتر مدنظر و مقایسه آن با مقدار مرجع $(F_{\alpha, a-1, N-a})$ ، حساسیت پارامتر بدست می‌آید [25].

$$F_0 = \frac{MS_{treatment}}{MS_{error}} \quad (2)$$

$$F_0 > F_{\alpha, a-1, N-a} \quad (3)$$

شایان ذکر است که در رابطه (3)، مقدار $F_{\alpha, a-1, N-a}$ از جداول آماری ANOVA استخراج می‌شود. α مقدار سطح ریسک را مشخص می‌کند که معمولاً برابر با 0.05 بوده و ضریب اطمینان، 95% در نظر گرفته شده است. مقادیر $a-1$ و $N-a$ نیز درجات آزادی پارامتر و خطا را نشان می‌دهد. روابط (1) و (2) برای یک پارامتر قابل اجراست و می‌توان برای چند پارامتر نیز تعمیم داد [25].

علاوه بر مقدار F-Value ذکر شده، مقدار P-Value نیز برای هر پارامتر قابل گزارش است که اگر کمتر از مقدار 0.05 باشد، نشان دهنده حساس بودن پارامتر مدنظر می‌باشد [25]. ضمناً این‌گونه تحلیل‌های آماری در این تحقیق، با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب¹ انجام شد.

3- نتایج و تفسیر آن‌ها

3-1- نتایج آزمون کشش

به عنوان اولین نتیجه تجربی، شکل 3، نشان دهنده نمودار نیرو-جابجایی از دو آزمون کشش می‌باشد که برای بدست آوردن مقدار جابجایی بیشینه و تعیین دامنه جابجایی در آزمون خستگی است. همان‌گونه که از شکل 2 مشخص است، با افزایش نرخ بارگذاری، مقدار نیروی بیشینه افزایش یافته اما تغییر شکل در همان نقطه، کاهش پیدا کرده است که با نتایج سایر محققین، در این زمینه، هم‌خوانی دارد [25,35-31]. هر چند این تغییرات، زیاد نیستند و نیروی بیشینه در حدود 7 درصد تغییر کرده است. آزادی و همکاران [7]، نشان دادند که افزایش نیرو در فرکانس‌های زیاد بارگذاری مونوتونیک، می‌تواند ناشی از تمایل بیشتر کامپوزیت به رفتار ترد یا شکننده باشد.

شایان ذکر است که هدف اصلی از اجرای آزمون کشش، تعیین محدوده جابجایی در آزمون خستگی بوده است. این مقدار تغییر شکل در نیروی بیشینه در محدوده 3.5 تا 4.5 میلی‌متر است. لذا بر این اساس، مقادیر دامنه جابجایی در آزمون خستگی کم‌چرخه، برابر با 1.0، 1.5 و 2.0 میلی‌متر تعیین شد.

¹ Minitab

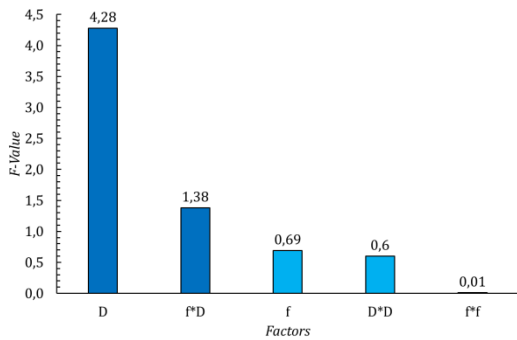


Figure 5 The maximum force objective function

شکل 5 تابع هدف نیروی بیشینه

3-3- تاثیر فرکانس بارگذاری بر عمر

شکل‌های 6 تا 8 به ترتیب مقادیر عمر خستگی با چهار فرکانس بارگذاری 1، 5، 10 و 15 هرتز در جابجایی‌های ثابت برابر با 1، 1.5 و 2 میلی‌متر را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل‌های 6 تا 8 مشخص است، بطور کلی، مقدار عمر خستگی در جابجایی ثابت با افزایش فرکانس بارگذاری روندی افزایشی و مستقیم در هر فرکانس بارگذاری دارد و در جابجایی 2 میلی‌متر، مقدار عمر خستگی، با افزایش فرکانس بارگذاری روندی رو به افزایش تقریباً برابر در هر فرکانس دارد همچنین رابطه افزایش عمر خستگی با افزایش فرکانس بارگذاری تقریباً خطی است. ولی در جابجایی 1.5 میلی‌متر، روند مقدار افزایش عمر خستگی با افزایش فرکانس بارگذاری از 1 هرتز به 5 هرتز بسیار کمتر از افزایش مقدار عمر خستگی در فرکانس بارگذاری از 5 هرتز به 10 هرتز است و غیرخطی است. همچنین بعد از فرکانس بارگذاری 10 هرتز افزایش عمر خستگی روندی تقریباً خطی را طی می‌کند. در جابجایی 2 میلی‌متر نیز روند افزایش عمر خستگی رابطه‌ای غیرخطی دارد و همچنان روندی افزایشی دارد. همچنین با افزایش مقدار جابجایی، عمر خستگی در هر فرکانس بارگذاری کاهش می‌یابد و رابطه‌ای معکوس دارد [25,24].

معادله مربوط به عمر خستگی و فرکانس بارگذاری در رابطه‌های (12) تا (14) به ترتیب برای جابجایی‌های 2، 1.5 و 1 میلی‌متر برای فرکانس‌های مختلف آورده شده است.

$$\text{Fatigue lifetime (cycle)} = 177 + 1812.6 f \text{ (Hz)} \quad (12)$$

$$\text{Fatigue lifetime (cycle)} = -1019 + 693.1 f \text{ (Hz)} \quad (13)$$

$$\text{Fatigue lifetime (cycle)} = -5.7 + 5.422 f \text{ (Hz)} \quad (14)$$

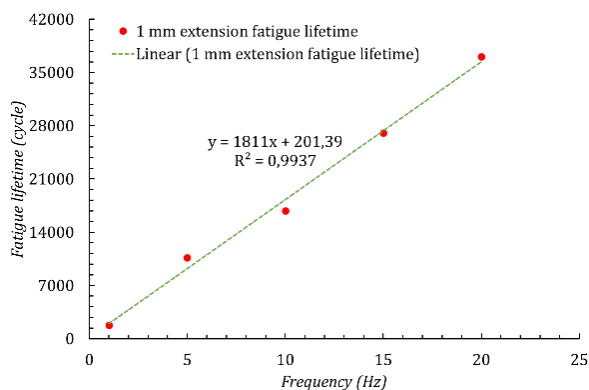


Figure 6 The loading frequency-fatigue lifetime diagram at 1 mm

شکل 6 نمودار فرکانس بارگذاری-عمر خستگی با دامنه 1 میلی‌متر

227040	15	211	9
220800	20	212	10
266240	1	213	11
238080	5	214	12
245280	10	215	13
249600	15	216	14
248640	20	217	15

جدول 3 دقت تحلیل رگرسیون

Table 3 The accuracy of the regression analysis

R ² (Pred)	R ² (Adj)	R ²	P-Value	تابع هدف
76.69	90.93	99.17	0.000	نیروی بیشینه
96.59	98.47	99.02	0.000	عمر خستگی

جدول 4 تحلیل حساسیت و پارامتر P-Value

Table 4 The sensitivity analysis and the P-Value parameter

F*D	D*D	D	f*f	f	تابع هدف
0.270	0.457	0.069	0.936	0.429	نیروی بیشینه
0.000	0.002	0.002	0.881	0.000	عمر خستگی

معادله مربوط به تنش بیشینه و فرکانس بارگذاری (f) در روابط (4) تا (6) به ترتیب برای جابجایی‌های 2، 1.5 و 1 میلی‌متر برای فرکانس‌های مختلف آورده شده است.

$$\text{Max. Stress (MPa)} = 394 + 0.784 f \text{ (Hz)} \quad (4)$$

$$\text{Max. Stress (MPa)} = 469.08 - 0.146 f \text{ (Hz)} \quad (5)$$

$$\text{Max. Stress (MPa)} = 504.03 + 0.743 f \text{ (Hz)} \quad (6)$$

معادله مربوط به تنش بیشینه و جابجایی (D) در رابطه (7) تا رابطه (9) به ترتیب برای فرکانس‌های 1، 5، 10، 15 و 20 هرتز آورده شده است.

$$\text{Max. Stress (MPa)} = 258.3 + 130 D \text{ (mm)} \quad (7)$$

$$\text{Max. Stress (MPa)} = 319 + 92 D \text{ (mm)} \quad (8)$$

$$\text{Max. Stress (MPa)} = 319.5 + 97 D \text{ (mm)} \quad (9)$$

$$\text{Max. Stress (MPa)} = 299 + 112 D \text{ (mm)} \quad (10)$$

$$\text{Max. Stress (MPa)} = 284.167 + 117 D \text{ (mm)} \quad (11)$$

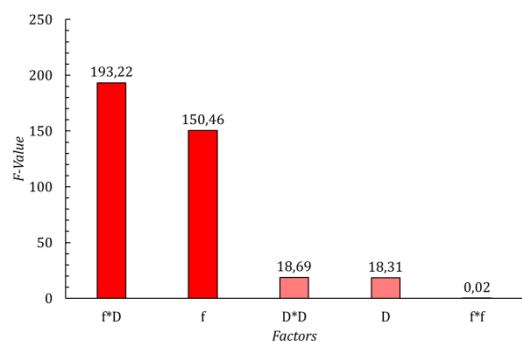


Figure 4 The fatigue lifetime objective function

شکل 4 تابع هدف عمر خستگی

محدوده 0.5 تا 15 هرتز تحت خستگی پرچرخه برای کامپوزیت چندلایه ترموپلاستیک، عمر کاهش می‌یابد که علت آن، افزایش بیش از حد دما، به دلیل اصطکاک و لغزش بین لایه‌های کامپوزیت، طی سیکل‌های بارگذاری اعلام شده است. این افزایش شدید دما، حتی تا 110 درجه سانتیگراد نیز گزارش شده است [34]. در حالی که نتایج این پژوهش، نشان از افزایش عمر خستگی با افزایش فرکانس دارد و لذا، بحث عدم افزایش دما در کامپوزیت چندلایه، طی بارگذاری را تایید می‌کند.

4-3- تاثیر دامنه جابجایی بر عمر

جدول 5 و شکل‌های 9 تا 13 به‌ترتیب مقادیر عمر خستگی با سه جابجایی 1، 1.5 و 2 میلی‌متر در چهار فرکانس بارگذاری ثابت 1، 5، 10، 15 و 20 هرتز را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از جدول 5 و شکل‌های 9 تا 13 مشخص است به‌طور کلی مقدار عمر خستگی در فرکانس بارگذاری ثابت با افزایش جابجایی روندی کاهشی و معکوس در هر جابجایی دارد و در فرکانس‌های 1 و 5 هرتز، کاهش عمر خستگی از 1 به 1.5 میلی‌متر بسیار بیشتر از کاهش عمر خستگی از 1.5 به 2 میلی‌متر است. ولی در فرکانس‌های 10، 15 و 20 هرتز، کاهش عمر خستگی از 1 به 1.5 میلی‌متر کمی بیشتر از کاهش عمر خستگی از 1.5 به 2 میلی‌متر است و بطور کلی، رابطه کاهش عمر خستگی با افزایش جابجایی غیر خطی است. همچنین با افزایش مقدار فرکانس بارگذاری مقدار عمر خستگی در هر جابجایی افزایش می‌یابد و رابطه‌ای مستقیم دارد [20-21].

همان‌گونه که گفته شد، یکی از راهکارهای بررسی تکرارپذیری داده‌های تجربی، مقدار ضریب تعیین است. در این بخش که تاثیر دامنه جابجایی بر عمر خستگی مطالعه شده است، کمترین مقدار ضریب تعیین، حدود 80 درصد است. هر چند محدوده پراکنده در این بخش، نسبت به بخش قبلی (تاثیر فرکانس بارگذاری بر عمر)، بیشتر است اما همچنان برای کامپوزیت چندلایه سوراخ‌دار، مناسب به نظر می‌رسد.

نتایج تحلیل حساسیت مربوط به عمر خستگی در فرکانس‌های ثابت و جابجایی مختلف به کمک نرم‌افزار مینی‌تیب نیز در جدول 6 ارائه شده است. همان‌گونه که از جدول 6 مشخص است، در فرکانس‌های 1، 5، 10، 15 و 20 هرتز تغییر جابجایی تاثیری در مقدار عمر خستگی ندارد. ولی در فرکانس 10 هرتز تغییر جابجایی در مقدار عمر خستگی تاثیرگذار خواهد بود. البته باید دقت نمود که مقدار P-Value در این فرکانس، 0.049 است که بسیار به مقدار بحرانی آن یعنی 0.05 نزدیک است و می‌توان بطور کلی ادعا نمود که در تمام فرکانس‌های بارگذاری، دامنه جابجایی، تاثیری زیادی بر عمر خستگی کم‌چرخه کامپوزیت چندلایه سوراخ‌دار ندارد و عملاً از نقطه نظر تحلیل کمی، در یک فرکانس بارگذاری ثابت، پارامتر موثری نخواهد بود.

جدول 5 نتایج آزمون خستگی در فرکانس‌های بارگذاری ثابت و دامنه مختلف

Table 5 Fatigue test results at constant loading frequencies and different amplitudes

عمر (cycle)	دامنه جابجایی (mm)	فرکانس بارگذاری (Hz)
1733	1.0	1
234	1.5	
11	2.0	
10660	1.0	
709	1.5	5

² Ruzek

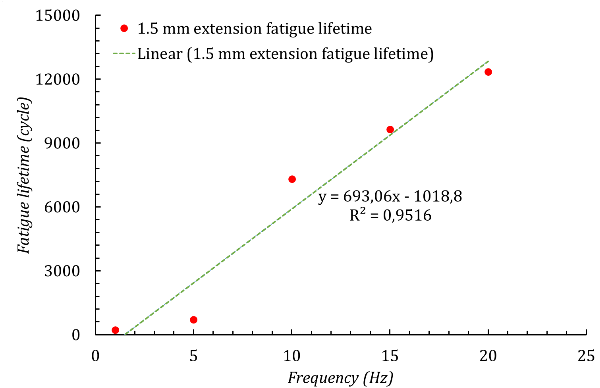


Figure 7 The loading frequency-fatigue lifetime diagram at 1.5 mm

شکل 7 نمودار فرکانس بارگذاری- عمر خستگی با دامنه 1.5 میلی‌متر

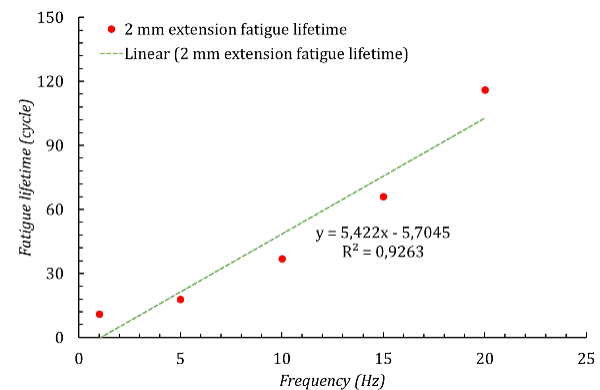


Figure 8 The loading frequency-fatigue lifetime diagram at 2 mm

شکل 8 نمودار فرکانس بارگذاری- عمر خستگی با دامنه 2 میلی‌متر

نکته حائز اهمیت دیگر در مورد تکرارپذیری آزمون‌های خستگی، این است که با توجه به شکل‌های 6 تا 8، مقدار ضریب تعیین (R^2)¹، بیشتر از 93 درصد محاسبه شده است که نشان دهنده قابلیت اطمینان به داده‌های تجربی بدست آمده، در این مقاله، در هر یک از شرایط بارگذاری، فقط یک آزمون خستگی اجرا شده است که نیازمند اجرای آزمون‌های بیشتری برای دقت بیشتری نتایج بود. اما تحلیل داده‌ها نشان داد که این محدوده پراکندگی برای کامپوزیت، در رژیم خستگی کم‌چرخه کوچک بوده و نتایج را تحت تاثیر خود قرار نداده است. ضمناً انتخاب سطوح مختلف نزدیک بهم برای دامنه جابجایی (1، 1.5 و 2 میلی‌متر) و فرکانس بارگذاری (1، 5، 10، 15 و 20 هرتز)، دقت به همین نکته بوده است تا از پراکندگی بیش از حد داده‌های تجربی، جلوگیری شود. همچنین، ذکر این نکته قابل توجه است که بطور کلی، محدوده پراکندگی در رژیم خستگی کم‌چرخه بسیار کوچکتر از رژیم خستگی پرچرخه است. لذا لزوم بررسی تکرارپذیری در رژیم خستگی پرچرخه اهمیت بیشتری دارد که این مورد در سایر تحقیقات [21,20,4] نیز مشاهده می‌شود.

شکرپه و اسم‌خانی [18] نشان دادند که با تغییر فرکانس بارگذاری بین 2، 3 و 5 هرتز برای رزین اپوکسی، عمر خستگی خمشی سه‌نقطه، به شدت افزایش یافته است. چنین رفتاری در کامپوزیت رزین اپوکسی با الیاف کربن این پژوهش، تحت بارگذاری سیکلیک کشش-کشش نیز، مشاهده گردید. اما در مقابل، روزک² و همکاران [34]، نشان دادند با افزایش فرکانس بارگذاری در

¹ Coefficient of determination

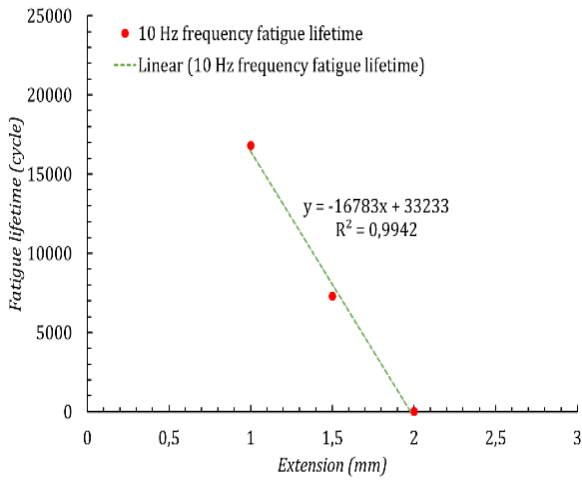


Figure 11 The displacement-fatigue lifetime under 10 Hz
 شکل 11 نمودار جابجایی- عمر خستگی با فرکانس 10 هرتز

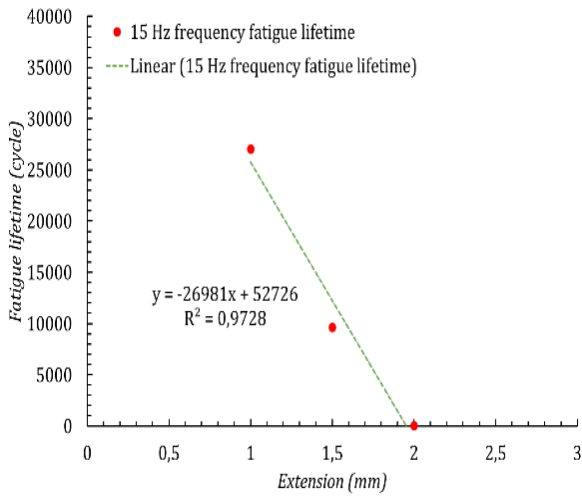


Figure 12 The displacement-fatigue lifetime under 15 Hz
 شکل 12 نمودار جابجایی- عمر خستگی با فرکانس 15 هرتز

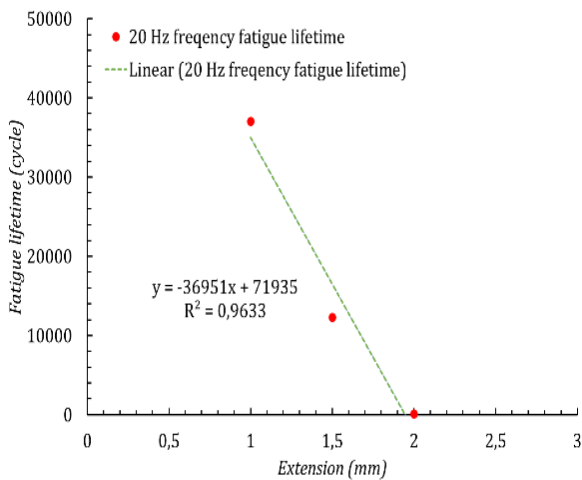


Figure 13 The displacement-fatigue lifetime under 20 Hz
 شکل 13 نمودار جابجایی- عمر خستگی با فرکانس 20 هرتز

18	2.0	
16820	1.0	
7318	1.5	10
37	2.0	
27047	1.0	
9650	1.5	15
66	2.0	
37067	1.0	
12341	1.5	20
116	2.0	

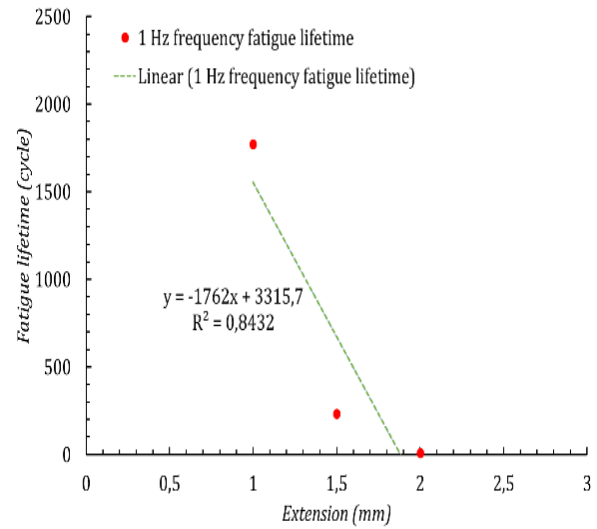


Figure 9 The displacement-fatigue lifetime diagram under 1 Hz
 شکل 9 نمودار جابجایی- عمر خستگی با فرکانس 1 هرتز

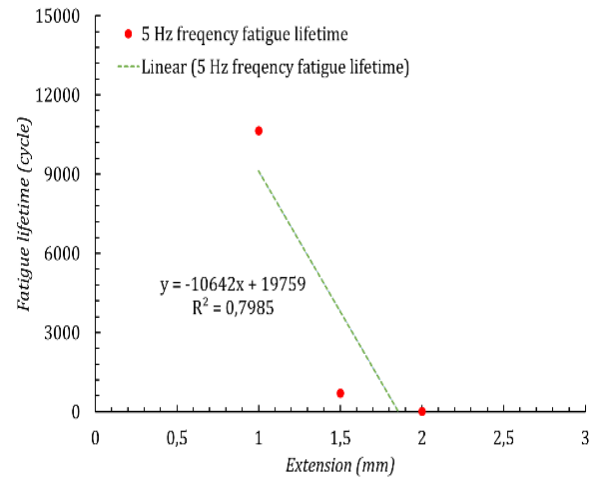


Figure 10 The displacement-fatigue lifetime diagram under 5 Hz
 شکل 10 نمودار جابجایی- عمر خستگی با فرکانس 5 هرتز

می‌کند. در کامپوزیت‌ها، کمترین مقاومت یا نیرو یا تنش شکست یا سفتی را رزین یا همان ماتریس دارد که با شروع ترک‌ها در آن و به هم پیوستن آنها، پدیده جدایش الیاف از ماتریس و جدایش بین لایه‌ای (لایه لایه شدن) اتفاق می‌افتد که در مجموع باعث از هم گسیختگی جسم و کمتر شدن نیروی بیشینه و استحکام یا سفتی آن، با افزایش تعداد سیکل‌ها می‌شود [35,34].

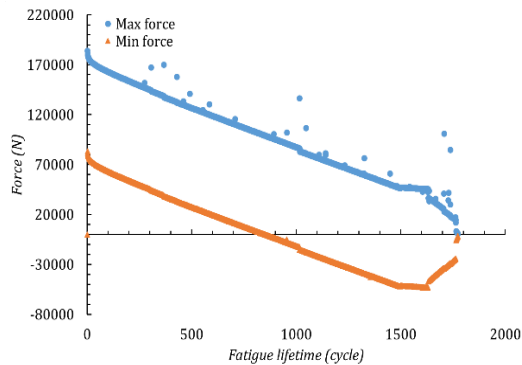


Figure 14 The diagram of maximum and minimum force-fatigue lifetime at 1 mm and under 1 Hz

شکل 14 نمودار نیروی بیشینه و کمینه- عمر خستگی با دامنه 1 میلی‌متر و فرکانس 1 هرتز

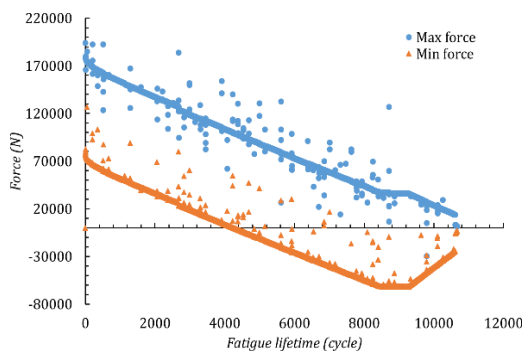


Figure 15 The diagram of maximum and minimum force-fatigue lifetime at 1 mm and under 5 Hz

شکل 15 نمودار نیروی بیشینه و کمینه- عمر خستگی با دامنه 1 میلی‌متر و فرکانس 5 هرتز

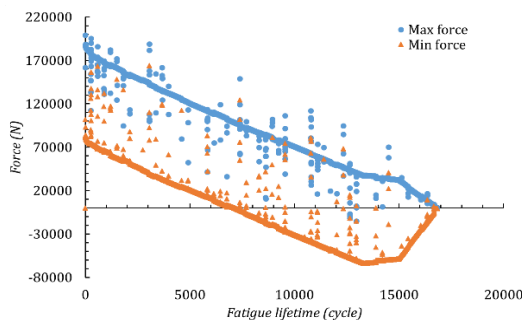


Figure 16 The diagram of maximum and minimum force-fatigue lifetime at 1 mm and under 10 Hz

شکل 16 نمودار نیروی بیشینه و کمینه- عمر خستگی با دامنه 1 میلی‌متر و فرکانس 10 هرتز

جدول 6 نتایج تحلیل حساسیت مربوط به عمر خستگی در فرکانس‌های ثابت و جابجایی مختلف

Table 6 Results of the sensitivity analysis related to the fatigue lifetime at constant frequencies and different displacement

Frequency (Hz)	1	5	10	15	20
F-Value	5.46	3.96	171.30	35.78	26.21
P-Value	0.257	0.296	0.049	0.105	0.123

معادله مربوط به عمر خستگی و جابجایی در رابطه‌های (15) تا (19) به ترتیب برای فرکانس‌های 1، 5، 10، 15 و 20 هرتز، آورده شده است.

$$\text{Fatigue lifetime (cycle)} = 3242 - 1722 D \text{ (mm)} \quad (15)$$

$$\text{Fatigue lifetime (cycle)} = 19759 - 10642 D \text{ (mm)} \quad (16)$$

$$\text{Fatigue lifetime (cycle)} = 33233 - 16783 D \text{ (mm)} \quad (17)$$

$$\text{Fatigue lifetime (cycle)} = 52726 - 26981 D \text{ (mm)} \quad (18)$$

$$\text{Fatigue lifetime (cycle)} = 71935 - 36951 D \text{ (mm)} \quad (19)$$

5-3- تاثیر هم‌زمان دامنه و فرکانس بارگذاری بر بیشینه تنش و عمر

بر اساس نتایج تحلیل رگرسیون بر روی داده‌های تجربی، معادله مربوط به تنش بیشینه و عمر خستگی در رابطه‌های 20 و 21 نشان داده شده است.

$$\begin{aligned} \text{Max. Stress (MPa)} &= 194.5 + 239.6 \times D \text{ (mm)} \\ &+ 2.55 \times f \text{ (Hz)} \\ &- 43.2 \times D \text{ (mm)} \times D \text{ (mm)} \\ &- 0.0967 \times f \text{ (Hz)} \times f \text{ (Hz)} \\ &- 0.042 \times D \text{ (mm)} \times f \text{ (Hz)} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \text{Fatigue lifetime (cycle)} &= 27646 - 39868 \times D \text{ (mm)} \\ &+ 3516 \times f \text{ (Hz)} \\ &+ 13228 \times D \text{ (mm)} \\ &\times D \text{ (mm)} \\ &+ 1.50 \times f \text{ (Hz)} \times f \text{ (Hz)} \\ &- 1807 \times D \text{ (mm)} \times f \text{ (Hz)} \end{aligned} \quad (21)$$

ضریب بیشتر ترم جابجایی (D) نسبت به ضریب فرکانس (f) در روابط فوق، نشان دهنده آن است که اثر دامنه جابجایی بر عمر خستگی و تنش بیشینه، بیشتر از فرکانس است. ضمناً با توجه به نتایج تجربی می‌توان این‌گونه به نتیجه رسید، در مواقعی که مشخصه‌های یاد شده در مقدار عمر و بیشینه نیرو تاثیرگذار هستند، رفتار ماده شکننده‌تر می‌شود که در سایر نتایج محققین نیز گزارش شده است [31-33].

6-3- نمودارهای نیرو- عمر

در این بخش و در شکل 14 تا شکل 28، نمودارهای نیروی بیشینه و کمینه در طول سیکل‌های بارگذاری، در شرایط آزمون متفاوت آورده شده است. همان‌گونه که از این اشکال مشخص است رفتار ماده مورد استفاده در آزمون خستگی کم‌چرخه و در همه حالات گفته شده نرم‌شدگی¹ بوده که بیانگر کمتر شدن نیروهای بیشینه و کمینه با افزایش مقدار عمر خستگی می‌باشد. چنین رفتار مشابهی توسط علیزاده و همکاران [20]، در فرکانس ثابت 200 میلی‌متر بر دقیقه، برای کامپوزیت چند لایه تحت بارگذاری خستگی نیز، گزارش گردید. همچنین در مقطعی قبل از شکست نهایی مقدار نیروهای بیشینه و کمینه ثابت شده و در انتها شکست اتفاق می‌افتد. شایان ذکر است که تفاوت نرم‌شدگی سیکلی در فلزات و کامپوزیت‌ها در این است که در فلزات علت کاهش نیرو یا تنش بیشینه با افزایش عمر این است که جسم شروع به ترک کرده و رشد می‌کند، در نتیجه مقاومت جسم کمتر شده و نیرو یا تنش بیشینه کاهش پیدا

¹ Softening

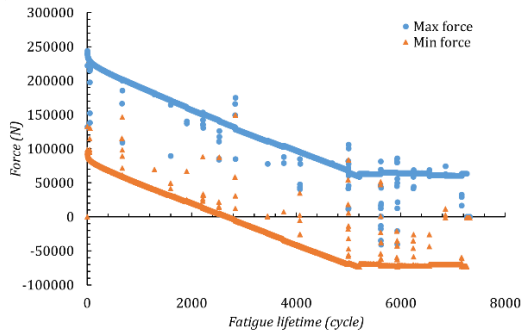


Figure 21 The diagram of maximum and minimum force-fatigue lifetime at 1.5 mm and under 10 Hz

شکل 21 نمودار نیروی بیشینه و کمینه- عمر خستگی با دامنه 1.5 میلی‌متر و فرکانس 10 هرتز

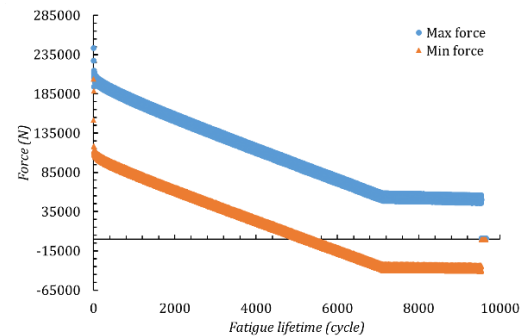


Figure 22 The diagram of maximum and minimum force-fatigue lifetime at 1.5 mm and under 15 Hz

شکل 22 نمودار نیروی بیشینه و کمینه- عمر خستگی با دامنه 1.5 میلی‌متر و فرکانس 15 هرتز

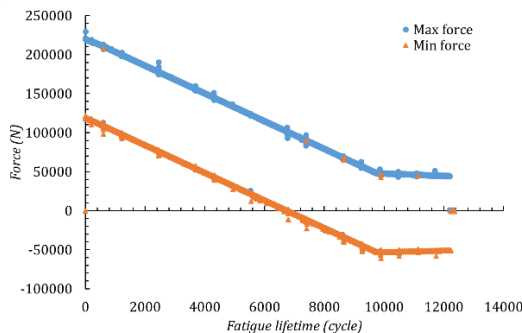


Figure 23 The diagram of maximum and minimum force-fatigue lifetime at 1.5 mm and under 20 Hz

شکل 23 نمودار نیروی بیشینه و کمینه- عمر خستگی با دامنه 1.5 میلی‌متر و فرکانس 20 هرتز

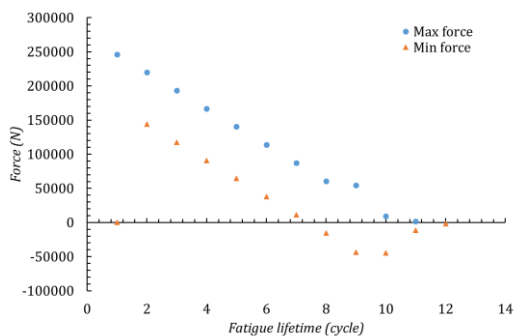


Figure 24 The diagram of maximum and minimum force-fatigue lifetime at 2 mm and under 1 Hz

شکل 24 نمودار نیروی بیشینه و کمینه- عمر خستگی با دامنه 2 میلی‌متر و فرکانس 1 هرتز

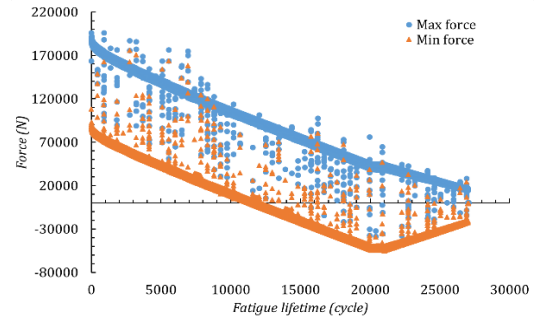


Figure 17 The diagram of maximum and minimum force-fatigue lifetime at 1 mm and under 15 Hz

شکل 17 نمودار نیروی بیشینه و کمینه- عمر خستگی با دامنه 1 میلی‌متر و فرکانس 15 هرتز

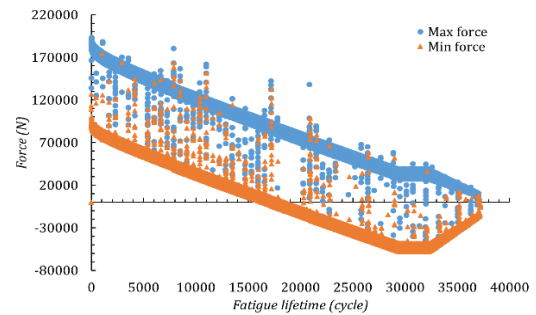


Figure 18 The diagram of maximum and minimum force-fatigue lifetime at 1 mm and under 20 Hz

شکل 18 نمودار نیروی بیشینه و کمینه- عمر خستگی با دامنه 1 میلی‌متر و فرکانس 20 هرتز

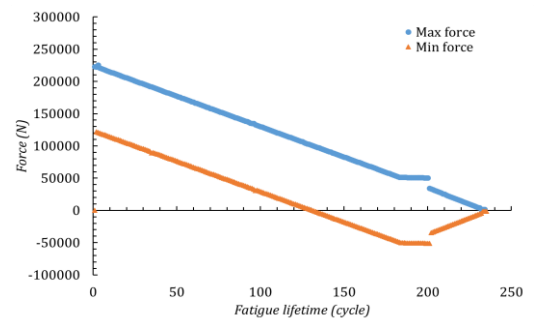


Figure 19 The diagram of maximum and minimum force-fatigue lifetime at 1.5 mm and under 1 Hz

شکل 19 نمودار نیروی بیشینه و کمینه- عمر خستگی با دامنه 1.5 میلی‌متر و فرکانس 1 هرتز

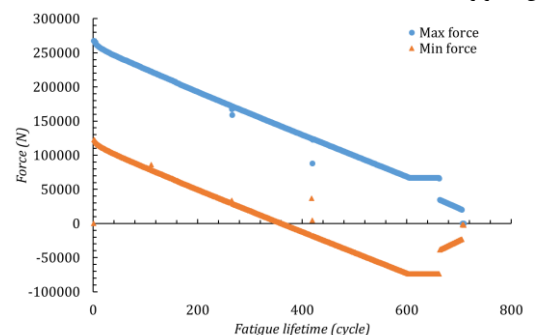


Figure 20 The diagram of maximum and minimum force-fatigue lifetime at 1.5 mm and under 5 Hz

شکل 20 نمودار نیروی بیشینه و کمینه- عمر خستگی با دامنه 1.5 میلی‌متر و فرکانس 5 هرتز

شکل 28 نمودار نیروی بیشینه و کمینه- عمر خستگی با دامنه 2 میلی‌متر و فرکانس 20 هرتز

وو و ژولوبکو [3]. نشان دادند که با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری خستگی در یک کامپوزیت چندلایه، مدول کششی معادل ماده، به دلیل تجمع آسیب، کاهش می‌یابد. این گونه آسیب‌ها شامل ایجاد میکروترک‌ها و رشد آنها در رزین، لایه لایه شدن کامپوزیت، جدایش الیاف و شکست آنها می‌باشد. در این تحقیق نیز، در تمامی شکل‌های فوق، کاهش در نیرو طی اعمال سیکل‌های بیشتر مشاهده می‌گردد.

در شکل 29، نمودار دامنه و میانگین تنش برحسب عمر برای تغییرات دامنه در فرکانس بارگذاری 1 هرتز و در شکل 30، نمودار دامنه و میانگین تنش بر حسب عمر برای تغییرات فرکانس در دامنه جابجایی 2 میلی‌متر نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل‌های 29 و 30 مشاهده می‌شود، مقدار تنش میانگین در هر آزمون برای تغییرات دامنه در فرکانس ثابت دارای تفاوت در مقدار آن در هر جابجایی است ولی مقدار تنش میانگین در هر آزمون برای تغییرات فرکانس در جابجایی ثابت دارای مقدار ثابتی است. همچنین دامنه تنش در هر آزمون و در شرایط تغییرات دامنه در فرکانس ثابت و در شرایط تغییرات فرکانس در جابجایی ثابت، مقداری ثابت است.

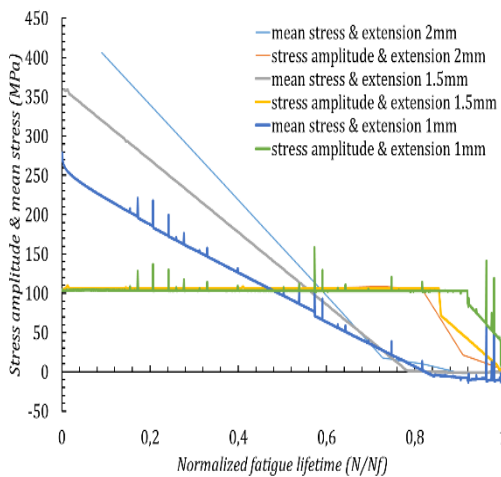


Figure 29 The diagram of stress amplitude and mean stress-lifetime under 1 Hz of the loading frequency for displacement changes

شکل 29 نمودار دامنه و میانگین تنش - عمر برای تغییرات دامنه در فرکانس بارگذاری 1 هرتز

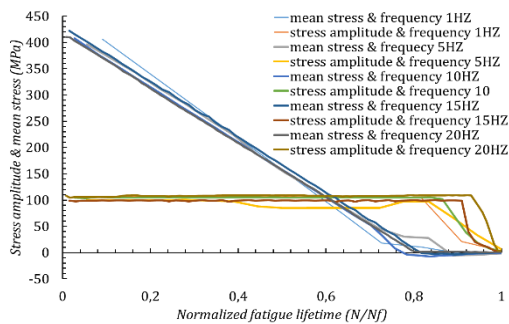


Figure 30 The diagram of stress amplitude and mean stress-lifetime at 2 mm of the displacement amplitude for frequency changes

شکل 30 نمودار دامنه و میانگین تنش - عمر برای تغییرات فرکانس در دامنه جابجایی 2 میلی‌متر

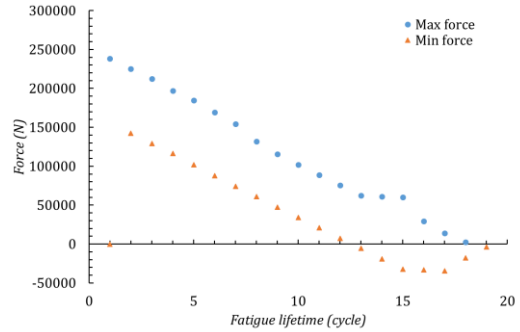


Figure 25 The diagram of maximum and minimum force-fatigue lifetime at 2 mm and under 5 Hz

شکل 25 نمودار نیروی بیشینه و کمینه- عمر خستگی با دامنه 2 میلی‌متر و فرکانس 5 هرتز

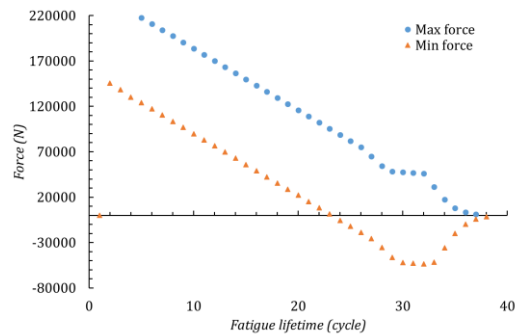


Figure 26 The diagram of maximum and minimum force-fatigue lifetime at 2 mm and under 10 Hz

شکل 26 نمودار نیروی بیشینه و کمینه- عمر خستگی با دامنه 2 میلی‌متر و فرکانس 10 هرتز

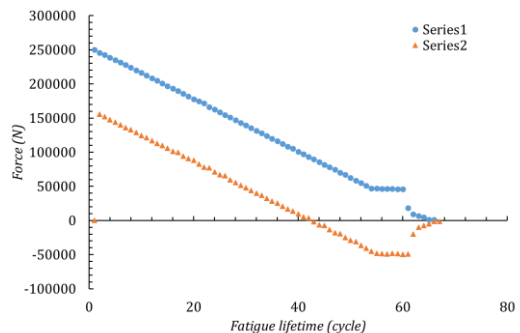


Figure 27 The diagram of maximum and minimum force-fatigue lifetime at 2 mm and under 15 Hz

شکل 27 نمودار نیروی بیشینه و کمینه- عمر خستگی با دامنه 2 میلی‌متر و فرکانس 15 هرتز

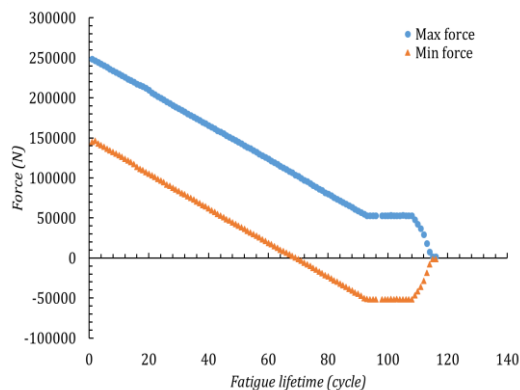


Figure 28 The diagram of maximum and minimum force-fatigue lifetime at 2 mm and under 20 Hz

Figure 34 The failure surface of samples at 1.5 mm and under 1, 5, 10, 15 and 20 Hz

شکل 34 سطح شکست نمونه‌های با دامنه جابجایی 1.5 میلی‌متر و فرکانس‌های 1، 5، 10، 15 و 20 هرتز

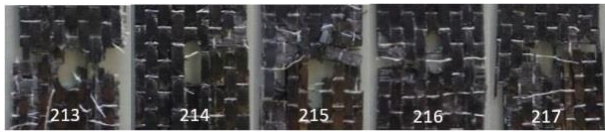


Figure 35 The failure surface of samples at 2 mm and under 1, 5, 10, 15 and 20 Hz

شکل 35 سطح شکست نمونه‌های با دامنه جابجایی 2 میلی‌متر و فرکانس‌های 1، 5، 10، 15 و 20 هرتز

در شکل 35 هر سه مکانیزم خرابی ترک ماتریسی، شکست الیاف (یا فیبر) و جدایش الیاف از ماتریس قابل مشاهده است. همان طور که مشاهده می‌شود ابتدا ماتریس ترک برداشته و سپس الیاف کربن، به تنهایی، قادر به تحمل بار نبوده و آنها نیز دچار شکست شده‌اند.

در شکل‌های 36 تا 40 شکست ماتریس¹، جدا شدن الیاف از ماتریس² و شکست الیاف³ به خوبی قابل مشاهده است. این گونه آسیب‌ها در تحقیقات پیشین نیز گزارش شده است [2,37-36]. همان گونه که در شکل‌های 36 تا 40 مشخص است در الیاف با زاویه 90 درجه بیشترین سازوکار خرابی شامل ترک ماتریسی و جدایش الیاف از ماتریس است، در حالی که در الیاف با زاویه 0 درجه سازوکار شکست الیاف هم به خوبی قابل مشاهده است. به دلیل اینکه بارگذاری در جهت زاویه 0 درجه انجام شده الیاف نیروی بیشتری از حالت 90 درجه تحمل کرده و درصد شکست آنها بیشتر است. زمانی که نمونه کامپوزیتی تحت بارهای سیکلیک قرار گرفته است، آسیب از لبه‌ها و اطراف سوراخ شروع به پیشرفت به سمت یکدیگر کرده است. در فصل مشترک بین لایه‌های 0 و 90 درجه، ترک ماتریسی و جدایش الیاف از ماتریس در اثر جدایش این دو لایه قابل تشخیص است. نتایج این تحقیق با تحقیقات پیشین نیز، مطابقت دارد [21-20]. همچنین از مقایسه این شکل‌های 36 تا 40 مشخص می‌گردد که با افزایش فرکانس بارگذاری، درصد شکست الیاف بیشتر می‌گردد.

روزک و همکاران [34]، ادعا کردند که سطوح شکست در کامپوزیت ترموپلاستیک تحت بارگذاری مونوتونیک و سیکلیک (حتی در فرکانس‌های مختلف اعمال بار)، مشابه است. بر اساس تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، مکانیزم شکست غالب شامل جدایش الیاف کربن از ماتریس بود. البته نکته حائز اهمیت تحقیق فوق، افزایش بیش از حد دما ماده در طی بارگذاری سیکلیک است [34]. آزادی و همکاران [7]، عدم تغییر کیفی مکانیزم‌های آسیب در کامپوزیت چندلایه، طی بارگذاری مونوتونیک با فرکانس‌های مختلف را گزارش کردند. این در حالی است که بصورت کیفی، می‌توان ادعا نمود که درصد شکست الیاف با فرکانس بارگذاری، در این پژوهش افزایش یافته است. یا به عبارت دیگر، مکانیزم آسیب با تغییر فرکانس بارگذاری، تغییر کرده است. این تغییرات کم (افزایش درصد شکست الیاف با افزایش فرکانس بارگذاری مونوتونیک)، در مرجع [7] نیز، با استفاده از تحلیل کمی داده‌های انتشار صوت گزارش شده است.

شایان ذکر است که شاید لفظ تنش در این بخش، برای کامپوزیت چندلایه، چندان صحیح نباشد اما مقدار تنش کلی سازه کامپوزیتی، با تقسیم نیرو بر سطح مقطع نمونه آزمون (با لحاظ کردن سوراخ) و مطابق با استاندارد آزمون خستگی برای کامپوزیت چندلایه سوراخ‌دار، محاسبه شده است [28]. با توجه به اینکه اندازه سطح مقطع تمامی نمونه‌های آزمون خستگی یکسان بوده و لذا نتایج شکل‌های 29 و 30 در حالت کلی، قابل مقایسه هستند.

7-3 تصاویر سطح شکست و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی

شکل 31، نشان دهنده همه نمونه‌های شکسته شده پس از انجام آزمون خستگی و شکل 32 نشان دهنده شکست نمونه‌های تحت بارگذاری کششی است. در ادامه، از هر دامنه جابجایی یک تصویر برای نمونه آورده شده است. در شکل‌های 33 تا 35 تصاویر سطح شکست مربوط به شرایط آزمون مختلف در قطعات ملاحظه می‌شود. در شکل‌های 36 تا 40 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در هر فرکانس بارگذاری به‌عنوان نمونه سطح شکست در سوراخ نشان داده شده است.



Figure 31 Broken specimens of tensile and fatigue after testing

شکل 31 نمونه‌های شکسته شده کشش و خستگی پس از آزمون



Figure 32 The failure image of tensile samples after testing

شکل 32 تصویر شکست نمونه‌های کشش پس از آزمون

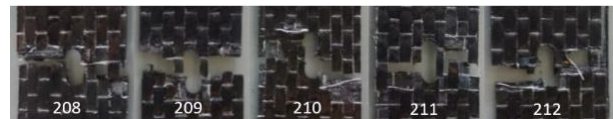
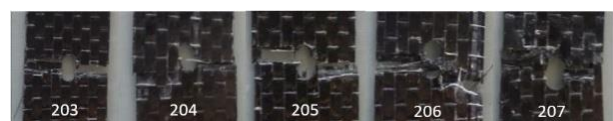


Figure 33 The failure surface of samples at 1 mm and under 1, 5, 10, 15 and 20 Hz

شکل 33 سطح شکست نمونه‌های با دامنه جابجایی 1 میلی‌متر و فرکانس‌های 1، 5، 10، 15 و 20 هرتز



³ Fiber breakage

¹ Matrix cracking

² Debonding

Figure 39 The scanning electron microscopy image under 15 Hz of loading frequency

شکل 39 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به فرکانس بارگذاری 15 هرتز

شایان ذکر است که همه تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، از نزدیکی سوراخ و روی سطح نمونه، گرفته شده است. همچنین، در این تصاویر، اثری از برخی از آسیب‌های متداول همچون پدیده پل زدن¹ الیاف کربن در ناحیه چسبنده² آسب، قابل مشاهده نیست.

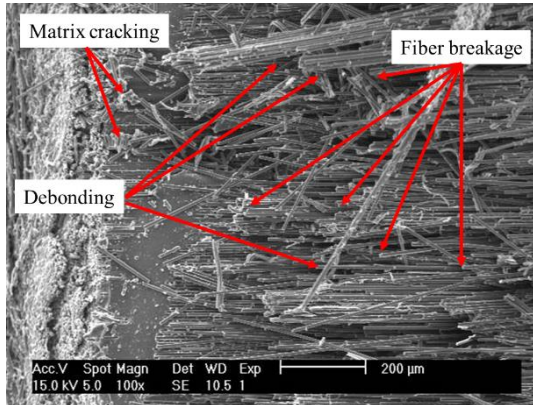


Figure 40 The scanning electron microscopy image under 20 Hz of loading frequency

شکل 40 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به فرکانس بارگذاری 20 هرتز

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به بررسی اثر نرخ بارگذاری بر رفتار خستگی کم‌چرخه در کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن پرداخته شده است. از نوآوری‌های این پژوهش می‌توان به تحلیل حساسیت و مطالعه رفتار خستگی کم‌چرخه کامپوزیت‌ها در نرخ‌های مختلف بارگذاری، اشاره نمود. ابتدا، قطعات کامپوزیتی سوراخ‌دار، تحت بارگذاری کششی مونوتونیک در دو نرخ (فرکانس اعمال بار) مختلف قرار گرفته شده تا دامنه مورد استفاده در آزمون خستگی کم‌چرخه بدست آید. سپس نمونه‌ها تحت بارگذاری خستگی در سه مقدار جابجایی و پنج فرکانس بارگذاری قرار گرفتند و تاثیر آن‌ها در مقدار بیشینه و کمینه تنش در هر سیکل، عمر خستگی و مقادیر تنش دامنه و میانگین محاسبه و در انتها، تصاویر سطح شکست و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ارائه شدند.

نتایج مهم زیر، از این پژوهش بدست آمد:

- در نمونه‌های کامپوزیتی سوراخ‌دار با افزایش نرخ بارگذاری کششی، مقدار بیشینه نیرو افزایش پیدا می‌کند.
- به عنوان بررسی رفتار سیکلیک ماده، بیشینه نیرو در جابجایی ثابت و فرکانس‌های بارگذاری مختلف مقدار کمی با افزایش همراه بوده ولی در فرکانس ثابت و جابجایی‌های متفاوت بسیار افزایش می‌یابد.
- مقدار عمر خستگی در جابجایی ثابت با افزایش فرکانس بارگذاری روندی افزایشی و مستقیم در هر فرکانس بارگذاری دارد.
- مقدار عمر خستگی در فرکانس بارگذاری ثابت با افزایش جابجایی روندی کاهشی و معکوس در هر جابجایی دارد.
- تغییر فرکانس بارگذاری در جابجایی ثابت همچنین تغییر جابجایی در فرکانس ثابت 1 و 2 هرتز تاثیری در مقدار نیروی بیشینه ندارد ولی در فرکانس‌های ثابت 10، 15 و 20 هرتز تاثیرگذار است.

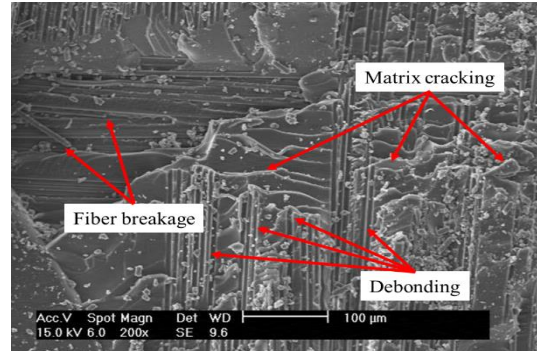


Figure 36 The scanning electron microscopy image under 1 Hz of loading frequency

شکل 36 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به فرکانس بارگذاری 1 هرتز

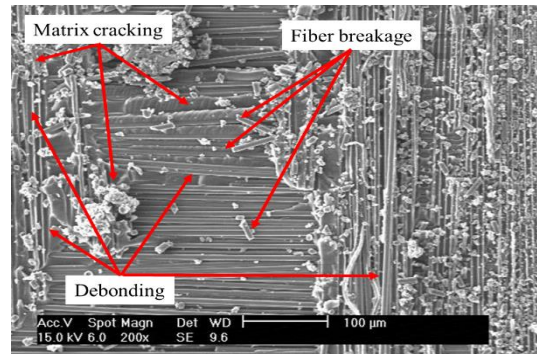


Figure 37 The scanning electron microscopy image under 5 Hz of loading frequency

شکل 37 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به فرکانس بارگذاری 5 هرتز

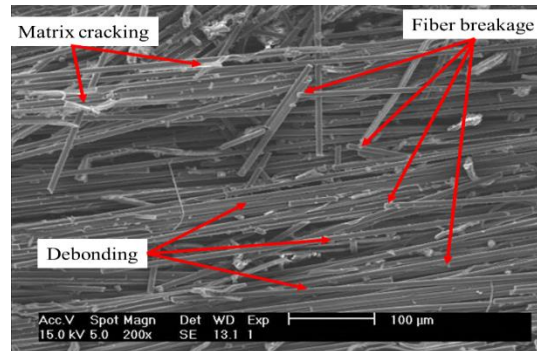
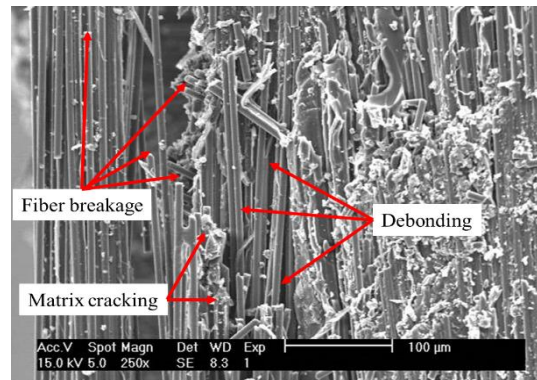


Figure 38 The scanning electron microscopy image under 10 Hz of loading frequency

شکل 38 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به فرکانس بارگذاری 10 هرتز



¹ Bridging

² Cohesive zone

- Under Tension-Tension Loading,” *Sharif Mech. Eng.*, Vol. 24, No. 42, pp. 67-73, 2008.
- [17] Quaresimin, M., Susmel, L., and Talreja, R., “Fatigue Behavior and Life Assessment of Composite Laminates Under Multiaxial Loadings,” *Int. J. Fatigue*, Vol. 32, No. 1, pp. 2-16, 2010.
- [18] Shokrieh, M. M., and Esmkhani, M., “Experimental Investigation on Fatigue Behavior of Epoxy Resin under Load and Displacement Controls,” *Iranian J. Polym. Sci. Technol.*, Vol. 27, No. 5, pp. 373-382, 2015.
- [19] Benaarbia, A., Chrysochoos, A., and Robert, G., “Thermo-Mechanical Behavior of PA6.6 Composites Subjected to Low-Cycle Fatigue,” *Compos. Part B*, Vol. 76, pp. 52-64, 2015.
- [20] Alizadeh, M., Azadi, M., Farrokhabadi, A., and Jafari, S.M., “Investigation of Displacement Amplitude Effect on Failure Mechanisms in Open-Hole Laminated Composites under Low-Cycle Fatigue Loading Using Acoustic Emission,” *Modares Mech. Eng.*, Vol. 17, No. 12, pp. 435-445, 2018.
- [21] Azadi, M., Alizadeh, M., and Sayar, H., “Sensitivity Analysis for Effects of Displacement Amplitude and Loading Frequency on Low-Cycle Fatigue Lifetime in Carbon/Epoxy Laminated Composites,” *MATEC Web Conf.*, Vol. 165, Article No. 22021, 2018.
- [22] Koch, I., Just, G., Brod, M., Chen, J., Doblies, A., Dean, A., Gude, M., Rolfes, R., Hopmann, C., and Fiedler, B., “Evaluation and Modeling of the Fatigue Damage Behavior of Polymer Composites at Reversed Cyclic Loading,” *Mater.*, Vol. 12, Article No. 1727, 2019.
- [23] Mohammadi, B., Fazlali, B., and Madoliat, R., “Fatigue Life Prediction of Symmetric Cross Ply Laminated Composite Using a Developed Continuum Damage Mechanics-Based Model,” *J. Sci. Technol. Compos.*, Vol. 2, No. 1, pp. 13-22, 2015.
- [24] Mohammadi, B., and Fazlali, B., “Fatigue Life Prediction of Laminated Composites under Multiaxial Fatigue Loading Condition by Using Developed Continuum Damage Mechanics Model,” *J. Sci. Technol. Compos.*, Vol. 3, No. 3, pp. 215-224, 2016.
- [25] Azadi, M., Saeedi, M., Mokhtarishirazabad, M., Lopez-Crespod, P., “Sensitivity Analysis of Fracture Behavior in Carbon-Epoxy Composite at Different Displacement Rates under Mode I tensile Loading by Regression Analysis,” *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 2021.
- [26] Saeedi, M., Azadi, M., Mokhtarishirazabad, M., and Lopez-Crespod, P., “Numerical Simulations of Carbon/Epoxy Laminated Composites under Various Loading Rates, Comparing Extended Finite Element Method and Cohesive Zone Modeling,” *Mater. Des. Process. Commun.*, 2020.
- [27] Standard Test Method for Open-Hole Tensile Strength of Polymer Matrix Composite Laminates, *Annual Book of ASTM Standard*, D5766, 2011.
- [28] Standard practice for Open-Hole Fatigue Response of Polymer Matrix Composite Laminates, *Annual Book of ASTM Standard*, D7615, 2011.
- [29] Sayar, H., Alizadeh, M., Azadi, M., Ghasemi Ghalebahman, A., Jafari, S.M., and Mafi, A., “Investigation of Crack Growth Behavior in Aluminum Alloy Used in Engine Components, by Acoustic Emission Method,” *J. Engine Res.*, Vol. 48, pp. 03-12, 2017.
- [30] Sayar, H., Azadi, M., and Alizadeh, M., “Detection of Crack Initiation and Propagation in Aluminum Alloy under Tensile Loading, Comparing Signals Acquired by Acoustic Emission and Vibration Sensors,” *J. Nondestr. Eval.*, Vol. 38, Article No. 100, 2019.
- [31] Naresh, K., Shankar, K., Rao, B. S., and Velmurugan, R., “Effect of High Strain Rate on Glass/Carbon/Hybrid Fiber Reinforced Epoxy Laminated Composites,” *Compos. Part B*, Vol. 100, pp. 125-135, 2016.
- [32] Naresh, K., Shankar, K., and Velmurugan, R., “Reliability analysis of tensile strengths using Weibull distribution in glass/epoxy and carbon/epoxy composites,” *Compos. Part B*, Vol. 133, pp. 129-144, 2018.
- [33] Ou, Y., Zhu, D., Zhang, H., Yao, Y., Mobasher, B., and Huang, L., “Mechanical Properties and Failure Characteristics of CFRP under Intermediate Strain Rates and Varying Temperatures,” *Compos. Part B*, Vol. 95, pp. 123-136, 2016.
- [34] Ruzek, R., Kadlec, M., and Petrusova, L., “Effect of Fatigue Loading Rate on Lifespan and Temperature of Tailored Blank C/PPS Thermoplastic Composite,” *Int. J. Fatigue*, Vol. 113, pp. 253-263, 2018.
- [35] Eftekhari M., and Fatemi, A., “On the Strengthening Effect of Increasing Cycling Frequency on Fatigue Behavior of Some Polymers and Their Composites: Experiments and Modeling,” *Int. J. Fatigue*, Vol. 87, pp. 153-166, 2016.
- [36] Beheshtizadeh, N., and Mostafapour, A., “Comparison of Flexural Loading Frequency Analysis Methods of Carbon Fiber/Epoxy Composite by Acoustic,” *Aerospace Mech. J.*, Vol. 14, No. 1, pp. 1-10, 2018.
- [37] Mohammadi, R., Ahmadi Najafabadi, M., Saghafi, H., and Zarouchas, D., “Fracture and Fatigue Behavior of Carbon/Epoxy Laminates Modified by Nanofibers,” *Compos. Part A*, Vol. 137, (2020).
- تغییر فرکانس بارگذاری در جابجایی ثابت همچنین تغییر جابجایی در فرکانس ثابت 10 هرتز در مقدار عمر خستگی تاثیرگذار بوده ولی تغییر جابجایی در فرکانس‌های ثابت دیگر تاثیری ندارد.
- مقدار نیروی میانگین در هر آزمون برای تغییرات دامنه در فرکانس ثابت دارای تفاوت در مقدار آن در هر جابجایی است ولی مقدار نیروی میانگین در هر آزمون برای تغییرات فرکانس در جابجایی ثابت دارای مقدار ثابتی است. همچنین مقدار دامنه نیرو در هر آزمون چه در شرایط تغییرات دامنه در فرکانس ثابت و چه در شرایط تغییرات فرکانس در جابجایی ثابت، مقداری ثابت است.
- رفتار ماده مورد استفاده در آزمون خستگی کم‌چرخه و در همه حالات گفته شده، شامل یک نرم‌شدگی سیکلیک در کامپوزیت چندلایه بوده که بیانگر کمتر شدن نیروهای بیشینه و کمینه، با افزایش مقدار عمر خستگی می‌باشد.

5- مراجع

- [1] Mohammadi Esfarjani, S., “Structural Damage Detection Using Modal Flexibility Method in Honeycomb Composite Sandwich Beam,” *Romanian J. Acoustics Vib.*, Vol. 17, No. 1, pp. 51-56, 2020.
- [2] Ghasemi-Ghalebahman, A., Sayyar, H., Azadi, M., and Jafari, S. M., “Failure Mechanisms in Open-Hole Laminated Composites Under Tensile Loading Using Acoustic Emission,” *J. Sci. Technol. Compos.*, Vol. 5, No. 1, pp. 143-152, 2018.
- [3] Wu, X.F., Zholobko, X., “Experimental Study of the Probabilistic Fatigue Residual Strength of a Carbon Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite,” *J. Compos. Sci.*, Vol. 4, 173, 2020.
- [4] Zolfaghari, M., Azadi, M., Azadi, M., “Characterization of High-Cycle Bending Fatigue Behaviors for Piston Aluminum Matrix SiO₂ Nano-Composites in Comparison with Aluminum-Silicon Alloys,” *Int. Metalcast*, Vol. 15, pp. 152-168, 2021.
- [5] Sayar, H., Azadi, M., Ghasemi-Ghalebahman, A., and Jafari, S. M., “Clustering Effect on Damage Mechanisms in Open-Hole Laminated Carbon/Epoxy Composite Under Constant Tensile Loading Rate, Using Acoustic Emission,” *Compos. Struct.*, Vol. 204, pp. 1-11, 2018.
- [6] Alizadeh, M., Sayar, H., Azadi, M., and Jafari, S. M., “Health Monitoring for Composite Under Low-Cycle Cyclic Loading, Considering Effects of Acoustic Emission Sensor Type,” *Mech. Adv. Compos. Struct.*, Vol. 6, pp. 19-26, 2019.
- [7] Azadi, M., Sayar, H., Ghasemi-Ghalebahman, A., and Jafari, S. M., “Tensile Loading Rate Effect on Mechanical Properties and Failure Mechanisms in Open-Hole Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites by Acoustic Emission Approach,” *Compos. Part B*, Vol. 158, pp. 448-458, 2019.
- [8] Azadi, M., Saeedi, M., Mokhtarishirazabad, M., and Lopez-Crespo, P., “Effects of Loading Rate on Crack Growth Behavior in Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites Using Digital Image Correlation Technique,” *Compos. Part B*, Vol. 175, 107161, 2019.
- [9] Azadi, M., Raeisi, N., Moosavian, S.A., and Shakouri, M., “Detection of Different Defects in Carbon Fiber Reinforced Polymer Matrix Laminated Composite Under Tension by Vibration Analysis,” *J. Sci. Technol. Compos.*, Vol. 6, No. 3, pp. 373-384, 2019.
- [10] James, T. K., Appl, F. J., and Bert, C. W., “Low-Cycle Fatigue of a Glass-Fabric-Reinforced Plastic Laminate,” *Exp. Mech.*, Vol. 8, No. 7, pp. 327-330, 1968.
- [11] Agarwal, B.D., and Dally, J.W., “Prediction of Low-Cycle Fatigue Behavior of GFRP: an Experimental Approach,” *J. Mater. Sci.*, Vol. 10, No. 2, pp. 193-199, 1975.
- [12] Jinen, E., “Accumulated Strain in Low-Cycle Fatigue of Short Carbon-Fiber Reinforced Nylon 6,” *J. Mater. Sci.*, Vol. 21, No. 2, pp. 435-443, 1986.
- [13] Barron, V., Buggy, M., and McKenna, N.H., “Frequency Effects on the Fatigue Behavior on Carbon Fiber Reinforced Polymer Laminates,” *J. Mater. Sci.*, Vol. 36, No. 7, pp. 1755-1761, 2001.
- [14] Harik, V.M., Klinger, J.R., and Bogetti, T.A., “Low-Cycle Fatigue of Unidirectional Composites: Bi-Linear S-N Curves,” *Int. J. Fatigue*, Vol. 24, No. 2, pp. 455-462, 2002.
- [15] Shokrieh, M.M., and Taheri-Behrooz, F., “Fatigue Life Evaluation of Unidirectional Composites by Using Residual Strain Energy,” *J. Polym. Sci. Technol.*, Vol. 21, No. 1, pp. 19-26, 2008.
- [16] Zabihipoor, M., Adibnazari, S., and Moslemian, R., “Fatigue Failure of Foam Core Sandwich Composites with Unsymmetrical Hybrid Faces