

بررسی تئوری و تجربی رفتار خستگی ساختارهای کامپوزیتی پایه لاستیکی تک جهته خارج از محور با استفاده از مدل غیرخطی پیش بینی عمر

مجید جمالی^۱، بیژن محمدی^{۱*}، محمود مهرداد شکرپه^۱

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Bijan_Mohammadi@iust.ac.ir

چکیده

هدف این مقاله، مطالعه رفتار خستگی کامپوزیت‌های پایه لاستیکی با استفاده از روش آنتروپی-خرابی توسعه یافته تحت بارگذاری متناوب تک محوره کشش-کشش می‌باشد. دلیل استفاده از روش آنتروپی-خرابی برای کامپوزیت‌های پایه لاستیکی، قابلیت منحصر به فرد این روش در لحاظ کردن تغییرات دمایی حین فرآیند خستگی و همچنین در نظر گرفتن اثر ویسکوالاستیک ماده در پیش‌بینی عمر خستگی می‌باشد، زیرا لاستیک‌ها به دلیل دارا بودن خاصیت ویسکوالاستیک، افزایش قابل توجه دما در حین بارگذاری را تجربه می‌کنند. رفتار تنش-کرنش کامپوزیت‌های پایه لاستیکی دارای تغییرات غیرخطی هستند که بدلیل ماتریس لاستیکی موجود در آنها می‌باشد، در این تحقیق برای تجزیه و تحلیل دقیق رفتار غیرخطی کامپوزیت‌های پایه لاستیکی، روش نیوتن-رافسون استفاده می‌شود. آنتروپی شکست خستگی، کل آنتروپی تولید شده تا لحظه شکست، به عنوان معیار واماندگی نهایی سازه در مدل آنتروپی-خرابی مورد استفاده قرار می‌گیرد. پارامترهای مادی مورد نیاز با استفاده از آزمایش‌های استاتیکی و خستگی بر روی نمونه‌های کامپوزیتی پایه لاستیکی تحت لایه چینی‌های مختلف مشخصه‌یابی می‌شوند. سپس انرژی اتلافی ناشی از رشد خرابی حین فرآیند خستگی، انرژی اتلافی به دلیل رفتار ویسکوالاستیک ساختار ماده و تبادل حرارتی از نمونه به محیط محاسبه می‌شوند. در ادامه، نتایج تجربی لایه چینی [۴۵] برای اعتبارسنجی مدل آنتروپی-خرابی توسعه یافته شده برای کامپوزیت‌های پایه لاستیکی خارج از محور تک جهته، استفاده می‌شود. در نهایت، نتایج تجربی و مدلسازی انرژی هیستریزس، تغییرات دما و عمر خستگی، برای لایه چینی [۴۵] در سطوح مختلف تنش و نسبت تنش ۰/۱ تحت فرکانس ۱ هرتز ارائه می‌شود، مشاهده می‌شود که تطابق خوبی بین نتایج برقرار می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: عمر خستگی؛ کامپوزیت‌های پایه لاستیکی؛ مدل آنتروپی-خرابی توسعه یافته؛ آنتروپی

شکست خستگی؛ تغییرات دما؛

۱- مقدمه

لاستیک به علت داشتن ویژگی‌های متمایز، یک ماده کاربردی و قابل توجه بوده که از آن برای ساخت سازه‌های ارتجاعی مانند تایر، شلنگ، تسمه، واشر، عایق لرزش و غیره استفاده می‌کنند. لاستیک به دلیل دارا بودن خواصی جالب، مانند نرمی، کشش، مقاومت در برابر برش، ضریب اصطکاک بالا و نفوذپذیری کم در برابر گازها، یکی از اجزای اساسی تایرهای پنوماتیکی می‌باشد. [۱-۳] قطعات لاستیکی در طول عمر مفید خود تحت بارگذاری‌های استاتیک و خستگی قرار می‌گیرند که در نظر گرفتن رفتار خستگی برای اطمینان از دوام آن‌ها بسیار مهم است. یکی از روش‌های افزایش خواص مکانیکی مواد با توجه به کاربرد آنها، استفاده کردن الیاف در ساختار آنها برای تولید مواد کامپوزیتی است. یک دسته از کامپوزیت‌های لاستیکی، کامپوزیت‌هایی با الیاف کوتاه است که به آنها کامپوزیت‌های پایه لاستیکی با الیاف کوتاه می‌گویند [۴-۸]. در دسته دیگر، از الیاف پیوسته برای تولید کامپوزیت پایه لاستیکی استفاده می‌شود که به عنوان کامپوزیت‌های پایه لاستیکی تقویت شده با کورد^۱ شناخته می‌شوند. این مواد کاربرد گسترده‌ای در بخش‌های مختلف صنعتی مانند شلنگ، تسمه، تایر و غیره، دارند [۹-۱۳].

امروزه خستگی در کامپوزیت‌ها به عنوان پدیده‌ای قطعی در نظر گرفته می‌شود و با توجه به توسعه روزافزون استفاده از کامپوزیت‌ها در صنایع مختلف، در نظر گرفتن افت خواص مکانیکی به دلیل بارگذاری‌های سیکلی امری واجب و حیاتی است. با تلاش محققین در طول چند دهه اخیر پیشرفت‌های چشمگیری در شناخت و مدل‌سازی رفتار خستگی کامپوزیت‌ها حاصل شده است. مدل‌های متعددی توسط محققین مختلف پیشنهاد و در طول سال‌ها توسعه داده شده است. مدل‌های کلاسیک جزء اولین دسته از مدل‌های خستگی در کامپوزیت‌ها هستند و تحت عنوان مدل‌های عمر-خستگی [۱۴-۱۷] و مدل‌های خواص مکانیکی باقیمانده (سفتی و استحکام) [۱۸، ۱۹] به آن‌ها پرداخته می‌شود. یکی دیگر از مدل‌ها، مدل‌های آسیب پیشرونده هستند که گرچه تلفیقی از معیارهای

¹ Cord-rubber composite

واماندگی کلاسیک، مدل‌های عمر خستگی و مدل‌های خواص مکانیکی باقیمانده محسوب می‌شوند، اما ماهیتی تدریجی و چرخه به چرخه دارند. نخستین بار شکریه و لسارد^۱ در مجموعه مقالات خود [۲۰-۲۳] مدل آسیب پیش‌رونده‌ای را برای کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف تک‌جهته ارائه نمودند که به "مدل افت خواص مادی باقیمانده تعمیم یافته"^۲ معروف است. یکی دیگر از روش‌های مهم برای بررسی رفتار خستگی کامپوزیت‌ها، روش مکانیک شکست است که بر مبنای قانون پاریس^۳ [۲۴] می‌باشد.

با شناخت بهتر رفتار خستگی کامپوزیت‌ها و درک تفاوت‌های بنیادی این رفتار با خستگی فلزات، و همچنین ناکارآمدی روش‌های به کار رفته در فلزات در حوزه کامپوزیت‌ها، توجه محققین به سمت مدل‌ها و مبانی ترمودینامیکی جلب شد. در ابتدا مدل‌های مکانیک خرابی محیط‌های پیوسته که بر اساس ترمودینامیک محیط پیوسته گسترش یافته بودند، مورد توجه زیادی قرار گرفتند و پیشرفت‌های زیادی در آن‌ها صورت گرفت و در حال حاضر نیز در حال گسترش هستند [۲۵]. در چند سال اخیر نیز روش جدیدی در این حوزه و با استفاده از مفاهیم تولید آنتروپی^۴ گسترش یافته و نشان داده است که قابلیت بسیار زیادی برای توسعه دارد. استفاده از مفهوم آنتروپی در توضیح رفتار خستگی مواد ایده جدیدی است که ابتدا در حوزه فلزات توسط نادری و همکارانش [۲۶] در سال ۲۰۰۹ به کار گرفته شد. آن‌ها با استفاده از مفهوم آنتروپی نشان دادند که فلزات تحت بار خستگی از لحظه شروع بارگذاری بر روی قطعه تا لحظه شکست مقدار ثابتی آنتروپی تولید می‌کنند که مستقل از شرایط اعمال بار، فرکانس بارگذاری، اندازه بار و سایر موارد می‌باشد که این مقدار آنتروپی تولید شده را "آنتروپی شکست خستگی"^۵ نامیدند. در ادامه، نادری و خوانساری [۲۷] برای اولین بار این تئوری را در حوزه مواد کامپوزیت مورد آزمایش قرار دادند. در سال‌های اخیر محمدی و محمودی [۲۸-۳۰] به بررسی بیشتر روش تولید آنتروپی در کامپوزیت‌ها پرداختند و مدل آنتروپی-خرابی پیشنهادی خود را ارائه کردند.

¹ Lessard

² Generalized Residual Material Property Degradation Model

³ Paris law

⁴ Entropy

⁵ Fracture Fatigue Entropy (FFE)

لاستیک‌ها به دلیل دارا بودن خاصیت ویسکوالاستیک، افزایش قابل توجه دما در حین فرآیند خستگی را تجربه می‌کنند. با بررسی مقالات ارائه شده در بالا مشخص شد که مدلی که بتواند خاصیت ویسکوالاستیک و همچنین افزایش دما در کامپوزیت‌های پایه لاستیکی تقویت شده با سیم¹ در حین فرآیند خستگی را در نظر بگیرد وجود ندارد. از برتری‌های قابل توجه و منحصر به فرد مدل آنتروپی-خرابی قابلیت لحاظ کردن تغییرات دمایی ماده در حین فرآیند خستگی و همچنین در نظر گرفتن اثر ویسکوالاستیک ماده در پیش‌بینی عمر خستگی می‌باشد. بنابراین هدف این پژوهش بررسی رفتار خستگی ساختار کامپوزیت‌های پایه لاستیکی تک‌جهته خارج از محور با استفاده از مدل آنتروپی-خرابی است. با توجه به اینکه رفتار مکانیکی تنش-کرنش غیرخطی کامپوزیت‌های پایه لاستیکی می‌باشد، بنابراین بایستی مدل آنتروپی-خرابی بگونه‌ای توسعه یابد تا بتواند این رفتار مکانیکی مواد کامپوزیتی پایه لاستیکی را در نظر بگیرد.

در این مقاله رفتار خستگی کامپوزیت‌های پایه لاستیکی تک‌جهته خارج از محور تحت بارگذاری خستگی کششی با در نظر گرفتن رفتار مکانیکی تنش-کرنش غیرخطی مواد کامپوزیتی پایه لاستیکی با استفاده از مدل آنتروپی-خرابی توسعه یافته ارائه می‌شود. معیار شکست در مدل آنتروپی-خرابی براساس مقدار آنتروپی شکست خستگی² است که با استفاده از مدل آنتروپی-خرابی و داده‌های تجربی به دست می‌آید. پارامترهای رشد خرابی در جهت‌های طولی، عرضی و برشی درون صفحه‌ای توسط روش مکانیک خرابی محیط پیوسته³ مشخص می‌شوند تا انرژی ناشی از رشد خرابی حین فرآیند خستگی محاسبه شوند. علاوه بر این، رفتار میرایی دینامیکی ساختار کامپوزیت‌های پایه لاستیکی به دلیل خاصیت ویسکوالاستیک مواد لاستیکی، توسط تحلیل دینامیکی ترمومکانیکال⁴ مشخصه‌یابی می‌گردد تا انرژی تلف شده به دلیل رفتار ویسکوالاستیک تعیین شود. همچنین، تبادل حرارتی از نمونه به محیط از طریق مکانیسم‌های هدایت، جابجایی و تشعشع محاسبه می‌شود. رفتار تنش-کرنش

¹ Steel cord-rubber composites

² Fracture fatigue entropy

³ Continuum damage mechanics

⁴ Dynamic Mechanical Thermal Analysis

کامپوزیت‌های پایه لاستیکی دارای تغییرات غیرخطی هستند که بدلیل ماتریس لاستیکی موجود در آنها می‌باشد، در این مقاله روش نیوتن-رافسون به منظور تجزیه و تحلیل دقیق رفتار خستگی غیر خطی کامپوزیت‌های پایه لاستیکی، استفاده می‌شود. نتایج تجربی لایه چینی [۴۵] برای اعتبارسنجی مدل آنتروپی-خرابی که برای ساختارهای کامپوزیتی پایه لاستیکی خارج از محور تک جهت یافته شده، استفاده می‌شود. در نهایت، نتایج تجربی و مدلسازی انرژی هیستریزیس، تغییرات دما و عمر خستگی، برای لایه چینی [۴۵] تک جهت خارج از محور کامپوزیتی پایه لاستیکی در سطوح مختلف تنش و نسبت تنش ۰/۱ تحت فرکانس ۱ هرتز ارائه می‌شود.

۲- مدل غیر خطی آنتروپی-خرابی

کامپوزیت‌های پایه لاستیکی از ماتریس لاستیکی و تقویت کننده سیمی تشکیل شده است. ماتریس لاستیکی دارای رفتار مکانیکی تنش-کرنش غیرخطی است، در حالی که سیم فولادی دارای تغییرات خطی است، بنابراین رفتار مکانیکی تنش-کرنش ساختار کامپوزیت‌های پایه لاستیکی خارج از محور، بسیار شبیه به ماتریس لاستیکی است و رفتار آن غیرخطی می‌باشد. در نتیجه، به منظور تجزیه و تحلیل رفتار خستگی سازه‌های کامپوزیتی پایه لاستیکی و پیش بینی عمر خستگی آنها، بایستی روابط مکانیکی تنش-کرنش غیرخطی در نظر گرفته شود که در این مقاله، از روش نیوتن-رافسون برای توصیف رفتار مکانیکی غیرخطی کامپوزیت‌های پایه لاستیکی استفاده می‌شود.

با توجه به قوانین اول و دوم ترمودینامیک، در مدل آنتروپی-خرابی پیشنهادی محمدی و محمودی [۲۸-۳۱]، رابطه زیر در ارتباط با مکانیزم‌های ایجاد حرارت در ماده و نحوه مصرف حرارت تولیدی ارائه می‌شود:

$$\dot{E}_d + \dot{W}_{ve} = \rho C \dot{T} + \dot{E}_{diss} \quad (1)$$

در این رابطه، \dot{E}_d نرخ انرژی حاصل از رشد پارامتر خرابی، \dot{W}_{ve} انرژی تولید شده به واسطه خواص ویسکوالاستیک ماده و \dot{E}_{diss} نرخ حرارت اتلاف شده به واسطه انتقال حرارت می‌باشد. جمله‌های سمت چپ این معادله در واقع مکانیزم‌های ایجاد حرارت در ماده هستند و ترم‌های سمت راست مربوط به اتلاف و یا مصرف حرارت تولیدی می‌باشند.

باشند. مجموع ترم‌های سمت چپ معادله (۱) در واقع انرژی هیستریزیس ماده یا مساحت حلقه هیستریزیس است که به عنوان انرژی اتلاف^۱ شناخته می‌شود و می‌تواند منابع مختلفی از جمله انرژی حاصل از خرابی ماده، ذات ویسکوالاستیک الیاف/ماتریس و انرژی کرنشی حاصل از تغییر شکل‌های برگشت‌ناپذیر و غیره، داشته باشد [۳۲]. مدل آنتروپی-خرابی بیان می‌کند در صورتی که برای محاسبه آنتروپی، فقط ترم‌هایی که باعث تغییرات در ساختار ماده می‌شوند به حساب آیند نتایج دقیق‌تری حاصل می‌شود. همچنین با توجه به اینکه خواص ویسکوالاستیک بیشتر باعث تولید حرارت در ماده می‌شوند تا تغییر ساختار ماده لذا در محاسبه آنتروپی فقط آنتروپی حاصل از انرژی خرابی در مدل آنتروپی-خرابی در نظر گرفته می‌شود [۲۸-۳۱]:

$$\gamma_d = \int_0^{t_f} \frac{\dot{E}_d}{T} dt \quad (2)$$

در رابطه بالا T و مقدار آنتروپی نهایی شکست با γ_d نشان داده شده است که آنتروپی شکست نامیده می‌شود. برای محاسبه آنتروپی شکست طبق رابطه (۲) نیاز است تا دمای قطعه در هر لحظه موجود باشد، بنابراین نرخ تغییرات دمایی به طریق زیر محاسبه می‌شود [۲۸-۳۱]:

$$\dot{T} = \frac{\dot{W}_{ve} + \dot{E}_d - \dot{E}_{diss}}{\rho C} \quad (3)$$

ρ به عنوان چگالی ماده و C گرمای ویژه ماده می‌باشد.

۱-۲- تولید حرارت ناشی از خرابی

برای به دست آوردن انرژی آزاد شده ناشی از خرابی طبق رابطه $\dot{E}_d = Y\dot{D}$ نیاز است تا مقادیر پارامتر خرابی (D) و همین‌طور نیروی ترمودینامیکی متناظر با آن (Y) محاسبه شوند. برای این منظور از مدل خرابی محیط پیوسته توسعه یافته توسط محمدی و همکاران [۳۳] که براساس انرژی آزاد هلمهولتز می‌باشد، استفاده می‌شود:

$$\rho\psi = \frac{1}{2} [\sigma_{xx} \epsilon_{xx} + \sigma_{yy} \epsilon_{yy} + \tau_{xy} \gamma_{xy}] \quad (4)$$

¹ Damping energy

ρ و ψ به ترتیب چگالی و انرژی آزاد هلمهولتز هستند.

برای محاسبه انرژی خرابی خستگی، کاهش سفتی در امتداد جهت طولی، عرضی و برشی درون صفحه حین فرایند خستگی باید تعیین شود. برای دستیابی به این هدف، نیروهای ترمودینامیکی متناظر با پارامترهای خرابی و سه متغیر خرابی در امتداد جهت طولی، عرضی و برشی درون صفحه حین فرایند خستگی باید محاسبه شوند [۳۳]:

$$E_i = E_i^\circ (1 - D_i) \quad (5)$$

$$Y_i = \rho \frac{\partial \psi}{\partial D_i} = \frac{(\sigma_i)^2}{2E_i^\circ (1 - D_i)^2} \quad (6)$$

که در آن E و E° مدول‌های الاستیک حالت دارای خرابی و بدون خرابی هستند. Y نیرو ترمودینامیکی متناظر با پارامترهای خرابی و D پارامتر خرابی است. علاوه بر این i ($i = xx, yy, xy$) جهت طولی، عرضی و برشی درون صفحه را نشان می‌دهد.

رشد پارامترهای مادی مدل خرابی خستگی در راستای طولی، عرضی و برشی درون صفحه، بصورت زیر قابل استخراج می‌باشند [۳۳]:

$$\frac{dD_i}{dN} = \frac{A_i \sigma_{\max,i}^{2B_i}}{(2E_i^\circ)^{B_i} (1 - D_i)^{2B_i + C_i}} \quad (7)$$

N و σ_{\max} تعداد چرخه‌ها و حداکثر تنش در حین آزمایش خستگی هستند. A_i ، B_i و C_i پارامترهای مادی هستند. از هر دو طرف معادله بالا از $(D=0$ تا $D_{c,i})$ لگاریتم گرفته می‌شود [۳۳]:

$$\sigma_{\max,i}^{2B_i} N = \frac{(2E_i^\circ)^{B_i}}{A_i (2B_i + C_i + 1)} \left(1 - (1 - D_{c,i})^{2B_i + C_i + 1} \right) \quad (8)$$

$D_{c,i}$ مقدار بحرانی خرابی در امتداد جهات طولی، عرضی و برشی درون صفحه است که از نتایج آزمایش‌های تجربی، کاهش سفتی در راستاهای مختلف محاسبه می‌شوند.

از معادلات (۷) و (۸) لگاریتم گرفته می‌شود [۳۳]:

$$\log N = \log \left[\frac{(2E_i^\circ)^{B_i}}{A_i (2B_i + C_i + 1)} (1 - (1 - D_{c,i})^{2B_i + C_i + 1}) \right] + (-2B_i) \log \sigma_{\max,i} \quad (9)$$

$$\log \frac{dD_i}{dN} = \log \left[\frac{A_i}{(2E_i^\circ)^{B_i}} \sigma_{\max,i}^{2B_i} \right] + (2B_i + C_i) \log (1 - D_i)^{-1} \quad (10)$$

با توجه به معادله (۹)، B_i از شیب نمودار $(\log N)$ بر حسب $(\log \sigma_{\max,i})$ ، براساس داده‌های تجربی بدست می‌آیند. A_i و C_i را می‌توان از شیب و عرض از مبدا نمودار $(\log dD_i/dN)$ بر حسب $(\log (1 - D_i)^{-1})$ تعیین کرد.

مجموع نرخ انرژی آزاد شده ناشی از خرابی در طول فرآیند خستگی در جهات طولی، عرضی و برشی درون صفحه را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$\dot{E}_d = Y_i \dot{D}_i \quad (11)$$

۲-۲- تولید حرارت ناشی از ویسکوالاستیک ماده

مواد ویسکوالاستیک بواسطه تأخیر فاز بین تنش ورودی و کرنش حاصله در هر سیکل بارگذاری، انرژی حرارتی تولید می‌کنند که سهم آن‌ها در مقایسه با سایر عوامل قابل توجه است. لذا برای محاسبه مقدار انرژی تولید شده به واسطه خاصیت ویسکوالاستیک نیاز به یک مدل ویسکوالاستیک است تا متناظر با میدان تنش، مقدار حرارت تولید شده در ماده را مشخص کند [۳۴]. انرژی اتلاف شده ناشی از خاصیت ویسکوالاستیک W_{ve} در هر چرخه بصورت زیر بدست می‌آید [۳۴]:

$$W_{ve} = \int_0^{T_c} \sigma \frac{d\varepsilon}{dt} dt = \int_0^{2\pi} \sigma_0 \varepsilon_0 \omega \sin \omega t \cos \omega t + \delta dt = -\pi \sigma_0 \varepsilon_0 \sin \delta = -\pi \varepsilon_0^2 E'' \quad (12)$$

که در آن ϵ_0 و σ_0 دامنه کرنش و تنش می‌باشند، δ اختلاف فاز کرنش و تنش و ω فرکانس است. همچنین، دوره تناوب یک سیکل و E'' مدول اتلاف^۱ می‌باشد.

۲-۲- تبادل حرارت محیطی

ترم انرژی اتلاف شده \dot{E}_{diss} ، بوسیله انتقال حرارت از طریق هدایت^۲ (\dot{E}_{cond})، جابجایی^۳ (\dot{E}_{conv}) و تشعشعی^۴ (\dot{E}_{rad}) به فک‌های دستگاه و محیط اطراف منتقل می‌شود [۳۵]:

$$\dot{E}_{diss} = \dot{E}_{cond} + \dot{E}_{conv} + \dot{E}_{rad} \quad (13)$$

دما در قسمت گیج نمونه ثابت فرض شده است و گرما به سه شکل انتقال حرارت به فک‌های دستگاه، جابجایی با محیط و همچنین تابش به محیط اطراف تلف می‌شود [۳۴] و [۳۶]:

$$\dot{E}_{diss} = \frac{2kA_{cond}}{V} \frac{\Delta T}{\Delta z} + h T_s - T_a \frac{A_{surf}}{V} + e\beta T_s^4 - T_a^4 \frac{A_{surf}}{V} \quad (14)$$

که در آن V نمایانگر حجم، A_{cond} و A_{surf} به ترتیب مساحت سطح مقطع و مساحت محدوده گیج قطعه هستند. $\frac{\Delta T}{\Delta z}$ گرادیان دمایی بین محدوده گیج و فک‌های دستگاه می‌باشد. e, h, k و β به ترتیب ضریب هدایت گرمایی^۵، ضریب انتقال حرارت جابجایی^۶، ضریب تابش سطحی^۷ و ثابت استفان-بولتزمن^۸ هستند. T_s و T_a نشاندهنده دمای محیط اطراف و دمای سطح نمونه می‌باشند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مشخصه‌سازی پارامترهای مادی مواد کامپوزیتی پایه لاستیکی

¹ Loss modulus

² Conduction

³ Convection

⁴ Radiation

⁵ Thermal conductivity coefficient

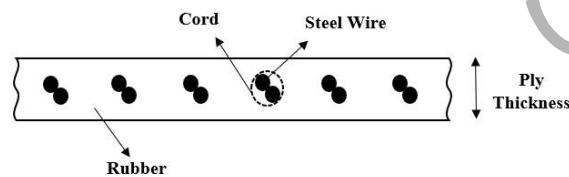
⁶ Convective heat transfer coefficient

⁷ Surface emissivity constant

⁸ Stefan-Boltzmann constant

برای استفاده از مدل آنتروپی-خرابی نیاز به پارامترهای مادی می‌باشد که برای مشخصه‌سازی آنها بایستی آزمایش‌های تجربی بر روی نمونه‌های کامپوزیتی پایه لاستیکی انجام شود. بنابراین در ابتدا نیاز است که نمونه‌های کامپوزیتی پایه لاستیکی در لایه‌چینی‌های مختلف ساخته شوند و سپس آزمایش‌های تجربی استاتیکی، خستگی و تحلیل دینامیکی ترمومکانیکال بر روی نمونه‌ها انجام شود تا خواص مکانیکی استاتیکی و خستگی، پارامترهای مادی مدل خستگی و پارامترهای مادی ویسکوالاستیک نمونه‌ها تعیین شوند. آزمون‌های آزمایشگاهی مربوطه در دانشگاه صنعتی دلفت^۱ هلند که در زمینه بررسی ساختارهای کامپوزیتی دارای تیم تحقیقاتی خبره و آزمایشگاه‌های مجهزی می‌باشد، انجام شد.

در این بخش در ابتدا روش ساخت نمونه‌ها و در ادامه مشخصه‌سازی پارامترهای مادی نمونه‌های کامپوزیتی پایه لاستیکی ارائه می‌شود. در این تحقیق برای ساخت نمونه‌های کامپوزیتی پایه لاستیکی، از سیم دارای پوشش مورد استفاده در تایر شرکت تایرسازی بارز با کد BPN01-460 استفاده می‌شود. شکل (۱) صفحات لاستیکی تقویت شده با سیم با ابعاد $1500 \times 1000 \times 1/1$ میلیمتر که شامل آمیزه لاستیکی و سیم تقویت کننده می‌باشد را نشان می‌دهد.



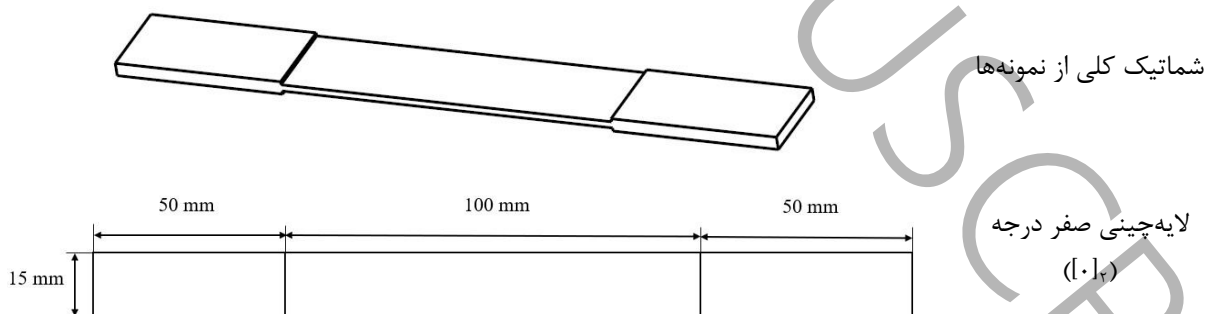
شکل ۱: صفحات لاستیکی تقویت شده با سیم تهیه شده از شرکت تایرسازی بارز

Figure 1. Coated cord planes which are from Barez industrial group

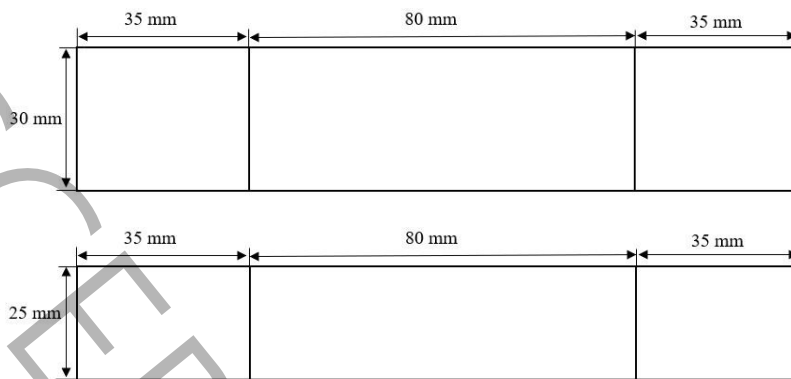
¹ Delft University of Technology (TU Delft)

صفحات لاستیکی تقویت شده با سیم مورد استفاده برای تولید نمونه‌ها دارای ضخامت ۱/۱ میلی‌متر، قطر سیم ۰/۶ میلی‌متر و تعداد ۹۵ سیم در ده سانتیمتر^۱ می‌باشند. برای تهیه نمونه‌های کامپوزیتی زمینه لاستیکی در ابعاد و هندسه مورد نظر بایستی ابتدا قالب مورد نیاز طراحی و ساخته شود و در ادامه با برش صفحات لاستیکی تقویت شده، متناسب با اندازه قالب و پخت با استفاده از دستگاه پرس گرم، نمونه‌های کامپوزیتی پایه لاستیکی مورد نظر ساخته شوند.

با توجه به اینکه برای انجام آزمون‌های نمونه‌های کامپوزیتی زمینه لاستیکی، استاندارد وجود ندارد، به منظور تعیین ابعاد مورد نظر نمونه‌ها، بصورت زیر عمل شد. در ابتدا قالب اولیه‌ای ساخته شد و ابعاد اولیه‌ای برای نمونه‌ها در نظر گرفته شد. سپس با توجه به نتایج آزمون‌های انجام شده بر روی نمونه‌های ساخته شده از قالب اولیه نتیجه شد که بایستی در ابعاد نمونه‌ها (طول، عرض و ضخامت) تغییراتی داده شود. برای بدست آوردن ابعاد مناسب نمونه‌ها با توجه به تجربیات ناشی از آزمون‌های انجام شده بر روی نمونه‌های تولید شده از قالب اولیه، استانداردهای متناسب با ساختارهای کامپوزیتی (ASTM-D3039) و همچنین براساس مراجع موجود [۳۷-۴۰] در رابطه با ساختارهای کامپوزیتی پایه لاستیکی، ابعاد زیر در نظر گرفته شدند. توجه شود که در دو طرف نمونه‌ها تپ‌هایی جهت قرارگیری در فیکسچر دستگاه آزمایش تعبیه شده‌اند که ضخامت در این قسمت‌ها به اندازه ۲ میلی‌متر از وسط نمونه‌ها بیشتر می‌باشد.



¹ End count Per Deci-Meter



لایه چینی نود درجه
 $[90]_4$

لایه چینی های خارج از
 محور $[45]_4$ و $[45\pm]_5$

شکل ۲: نمای سه بعدی و ابعاد نمونه های کامپوزیتی زمینه لاستیکی در لایه چینی های متفاوت

Figure 2. 3D drawing and dimensions of SCRC in different lay-ups

شکل (۲) نمای سه بعدی نمونه ها و همچنین ابعاد هر کدام از لایه چینی ها را بصورت جزئی نشان داده شده است. ضخامت لایه چینی $[0]_2$ ، لایه چینی $[90]_4$ و لایه چینی های خارج از محور به ترتیب برابرند با ۲، ۴ و ۴ میلیمتر می باشند.

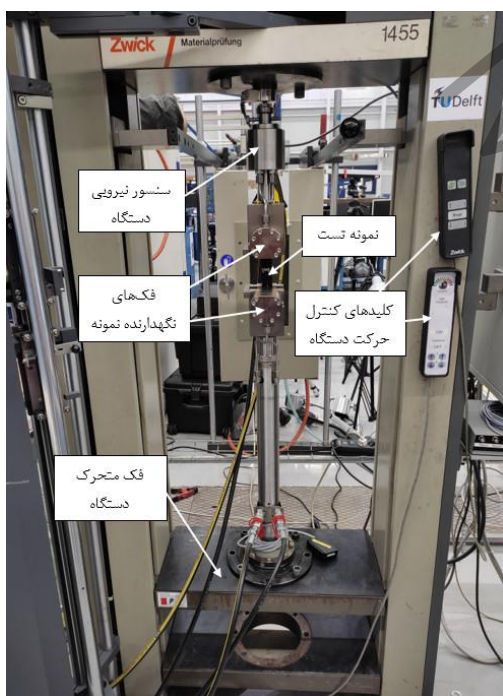
همانطور که اشاره شد، مدل به کار رفته نیازمند مشخصه سازی خواص مکانیکی کامپوزیت های پایه لاستیکی دارد که برای این منظور بایستی آزمایش های استاتیکی و خستگی بر روی نمونه های ساخته شده انجام شود. در این بخش، از نتایج آزمایش های استاتیکی و خستگی به منظور مشخصه سازی خواص مکانیکی کامپوزیت های پایه لاستیکی استفاده می شود که در ادامه این روند توضیح داده می شود.

با انجام آزمایشات استاتیکی بر روی نمونه های $[0]_2$ ، $[90]_4$ و $[45\pm]_5$ ، مدول کششی و استحکام استاتیکی در راستای سیم، عمود بر سیم و برشی ($E_{xx}, E_{yy}, E_{xy}, X_T, Y_T, S$) برای مواد کامپوزیتی پایه لاستیکی مشخصه یابی می شوند. پس از آماده سازی نمونه ها برای انجام آزمایش، از دستگاه ۲ تن زوئیک^۱ موجود در آزمایشگاه دانشکده هوافضا دانشگاه صنعتی دلفت استفاده شد. برای اطمینان از عدم پراکندگی نتایج، برای هر آزمایش ۵ نمونه مورد آزمون قرار گرفت. همچنین برای جلوگیری از اثرات بارهای مکانیکی، آزمایش های استاتیکی برای لایه

¹ Zwick

چینی‌های 0_2 ، $45 \pm s_4$ و 90_4 به ترتیب با نرخ بارگذاری ۳، ۱۲ و ۱۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام شده است [۳۷-۴۰]. با توجه به بررسی‌های انجام گرفته، نرخ‌های در نظر گرفته شده کمترین تاثیر را در تغییرات خواص مکانیکی نمونه‌های ساخته شده دارا می‌باشند. همچنین، بدلیل اینکه لایه چینی مورد بررسی در این مقاله از نوع خارج از محور 45_4 می‌باشد و چون زاویه گذار کامپوزیت‌های پایه لاستیکی مورد بررسی در این مقاله $8/64$ درجه است، بنابراین زاویه لایه چینی 45_4 بیشتر از زاویه گذار است. در نتیجه تنش‌های عرضی و برشی به نسبت تنش‌های طولی حاکم هستند و فقط اثر آنها در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اینکه نرخ کرنش بارگذاری‌های انجام شده در لایه‌چینی‌های $45 \pm s_4$ و 90_4 به ترتیب برابرند با $0/154$ و $0/161$ ، نرخ کرنش این دو بارگذاری بسیار نزدیک به هم هستند و نتایج تست‌های تجربی قابل قبول هستند.

شکل (۳)، آماده‌سازی نمونه‌ها برای انجام آزمایش و نمایی از دستگاه آزمایش استاتیکی را نمایش می‌دهد.



(ب)



(الف)

شکل ۳: الف) آماده‌سازی نمونه‌ها برای انجام آزمایش و ب) دستگاه آزمایش استاتیکی ۲۰ کیلو نیوتن ژوئیک در دانشگاه صنعتی دلفت

Figure 3. a) SCRC sample preparation for doing static test, b) Zwick 20kN static test machine in Delft university

جدول ۱: خواص مکانیکی ساختار کامپوزیتی پایه لاستیکی

Table 1. Mechanical properties of SCRC structure

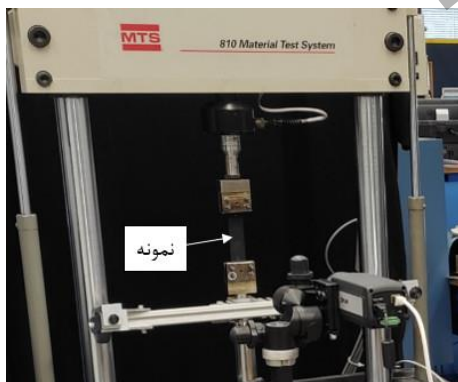
انحراف معیار	مقدار	خواص مکانیکی
۳/۲۳	۱۸/۹۲ GPa	E_{xx}
۰/۲۴	۸۳/۳۸ MPa	E_{yy}
۰/۸۷	۲۲/۳۹ MPa	E_{xy}
۵/۳۳	۳۳۹/۱۳ MPa	X_T
۰/۲۶	۷/۸۲ MPa	Y_T
۰/۹۱	۲۰/۹۷ MPa	S_{xy}
-	۰/۴۹	ν_{xy} [2]
۱/۱۲	۵۶/۸ MPa	E_r
۳/۸۱	۴۴/۹ GPa	E_c
-	۰/۳۱	V_c

نتایج آزمایش‌های تجربی نمونه‌های $[0]_2$ ، $[90]_4$ و $[45]_s$ به ترتیب برای توصیف خواص مکانیکی ساختار کامپوزیتی پایه لاستیکی در امتداد طولی، عرضی و برشی درون صفحه استفاده می‌شوند. بنابراین خواص مکانیکی این نمونه‌ها با در نظر گرفتن نتایج آزمایش‌های تجربی در جدول (۱) تعریف و ارائه شده است. در این جدول E_{xx} ، E_{xy} و E_{yy} به ترتیب سفتی در جهت طولی، عرضی و برشی درون صفحه‌ای می‌باشند. علاوه بر این، Y_T ، X_T و S_{XY} به ترتیب استحکام کششی طولی، عرضی و برشی درون صفحه‌ای هستند. همچنین، E_r ، E_c و V_c به ترتیب سفتی ماتریس لاستیکی، سیم فولادی و کسر حجمی سیم هستند.

به منظور مشخصه‌سازی رفتار خستگی مواد کامپوزیتی پایه لاستیکی، آزمایش‌های خستگی در حالت نیرو کنترل با استفاده از دستگاه MTS 810 موجود در آزمایشگاه دانشکده هوافضا دانشگاه صنعتی دلفت، که در شکل (۴) نشان داده شده، انجام شده است. این دستگاه از سیستم سروو هیدرولیک بهره می‌برد و ظرفیت نامی اعمال بار آن ۱۵ کیلونیوتن می‌باشد. در این پژوهش نمونه‌های آزمایشگاهی در فرکانس ۱ هرتز تحت بارگذاری خستگی قرار گرفته‌اند. لازم به ذکر است، دلیل اینکه آزمون‌های خستگی در فرکانس ۱ هرتز انجام شده است این است که

با توجه به اینکه تغییر شکل نمونه‌های کامپوزیتی پایه لاستیکی حین آزمون بسیار بالا می‌باشد (۱۰۰ میلی‌متر)، انجام آزمون خستگی با چنین کورس جابجایی بالایی در فرکانس‌های بالا توسط دستگاه‌های آزمون مورد استفاده، امکان پذیر نمی‌باشد. بنابراین با توجه به تغییر شکل بالای این نمونه‌ها و محدودیت دستگاه‌های آزمون، فرکانس ۱ هرتز مورد استفاده قرار گرفت.

نسبت تنش در تمامی نمونه‌ها ۰/۱ در نظر گرفته شده است تا هم نزدیک به صفر بوده و از طرفی در صورت وقوع خطای احتمالی، دستگاه وارد محدوده تنش منفی نشود و کمانش در نمونه‌ها اتفاق نیفتد. در هر آزمایش چندین نمونه مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند تا با توجه به پراکندگی داده‌ها نتایج از دقت کافی برخوردار باشند.



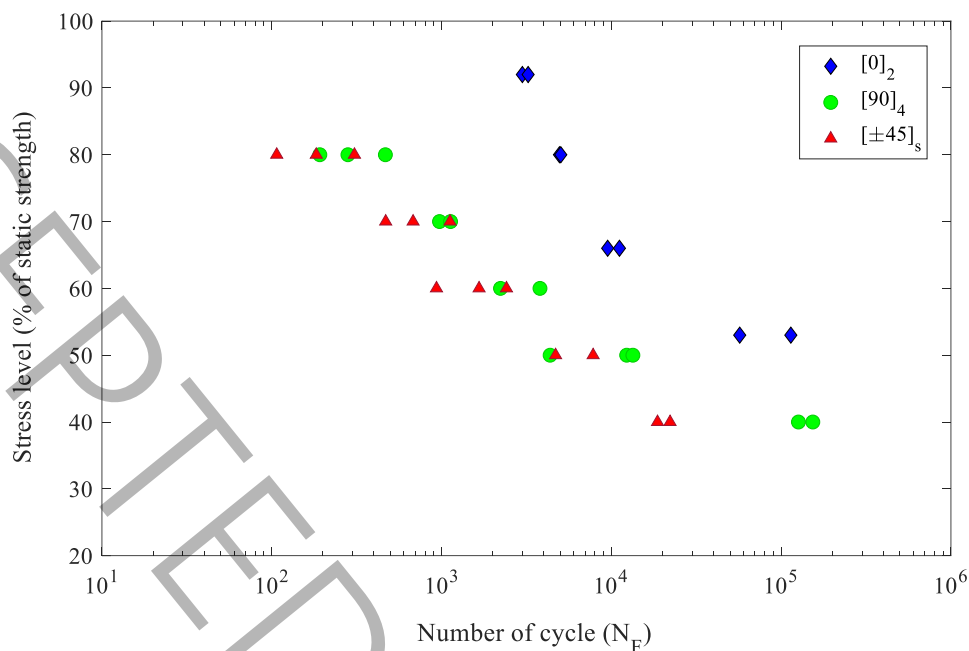
ب) نحوه قرارگیری نمونه در دستگاه



الف) دستگاه آزمون خستگی

شکل ۴: دستگاه آزمایش خستگی ۱۵ کیلو نیوتن MTS در دانشگاه صنعتی دلفت

Figure 4. MTS 15kN fatigue test machine in Delft university; a) fatigue test machine, b) Sample preparation in test machine



شکل ۵: نتایج آزمایش خستگی SCRC با لایه چینی های مختلف

Figure 5. Fatigue experimental results of SCRC in different lay-ups

شکل (۵) نتایج آزمایش های خستگی تک محوره با فرکانس ۱ هرتز و نسبت تنش ۰/۱ را برای لایه چینی های مختلف SCRC $[0]_2$ ، $[90]_4$ و $[\pm 45]_s$ در پنج سطح تنش نشان داده است. لازم به ذکر است که برای محاسبه تنش خارج از محور^۱ در هر لایه چینی از تقسیم نیروی اعمالی از طرف فک دستگاه بر سطح مقطع هر نمونه استفاده شده است. با توجه به شکل (۵)، می توان نتیجه گرفت که ترتیب طول عمر خستگی برای لایه چینی های مختلف بصورت $[0]_2 < [90]_4 < [\pm 45]_s$ است. بنابراین، تنش برشی درون صفحه ای (که در لایه چینی $[\pm 45]_s$ غالب است) بیشتر از تنش طولی (که در لایه چینی $[0]_2$ غالب است) و عرضی (که در لایه چینی $[90]_4$ غالب است) در سازه های کامپوزیتی پایه لاستیکی تحت بارهای خستگی، مخرب می باشد.

¹ Off-axis

یکی از مهم‌ترین بخش‌های مدل‌های خستگی، محاسبه پارامترهای مادی خرابی ساختار مورد نظر می‌باشد. به منظور محاسبه پارامترهای مادی (C_i و B_i ، A_i) مربوط به مدل خرابی اشاره شده در بخش (۲-۱)، از نتایج آزمایش‌های استاتیکی، خستگی و همچنین روابط (۹) و (۱۰) استفاده می‌شود.

به منظور تعیین پارامترهای مادی در راستای طولی (C_x و B_x ، A_x)، عرضی (C_y و B_y ، A_y) و جهت برشی درون صفحه (C_s و B_s ، A_s)، به ترتیب از سه لایه‌چینی مختلف $[0]_2$ ، $[90]_4$ و $[45\pm]_s$ استفاده می‌شود که نتایج آنها در جداول زیر ارائه می‌شود.

جدول ۲: پارامترهای مادی مدل خرابی در جهت طولی ساختار کامپوزیتی پایه لاستیکی

Table 2. Material parameter for damage model along longitudinal direction

C_x	B_x	A_x	تنش اعمالی (% از استحکام نهایی استاتیکی)
-۲۵/۸۵۰۵		$4/07 \times 10^{-6}$	%۹۲
-۱۹/۰۲۷۵	۳/۰۵۶۸	$1/73 \times 10^{-5}$	%۸۰
-۲۹/۷۴۹۵		$4/33 \times 10^{-6}$	%۵۳
-۲۴/۸۷۵۸	۳/۰۵۶۸	$8/57 \times 10^{-6}$	میانگین

جدول ۳: پارامترهای مادی مدل خرابی در جهت عرضی ساختار کامپوزیتی پایه لاستیکی

Table 3. Material parameter for damage model along transverse direction

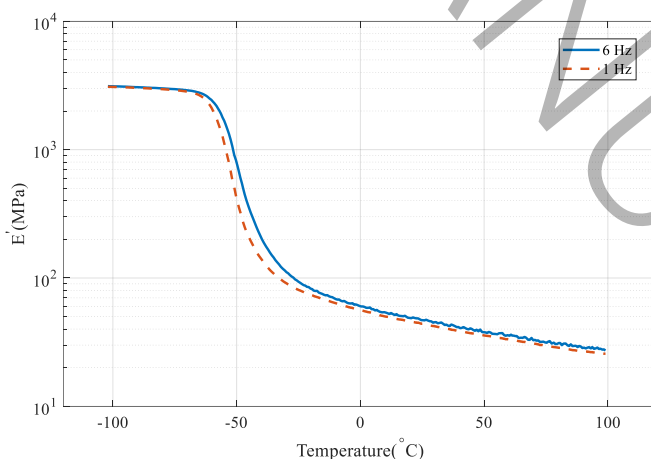
C_x	B_x	A_x	تنش اعمالی (% از استحکام نهایی استاتیکی)
-۱۵/۵۸۰۱		$2/09 \times 10^{-5}$	%۸۰
-۱۳/۰۱۴۲	۴/۳۴۴۵	$2/82 \times 10^{-5}$	%۶۰
-۱۰/۷۸۹۴		$1/35 \times 10^{-5}$	%۴۰
-۱۳/۱۲۷۹	۴/۳۴۴۵	$2/09 \times 10^{-5}$	میانگین

جدول ۴: پارامترهای مادی مدل خرابی در جهت برشی درون صفحه‌ای ساختار کامپوزیتی پایه لاستیکی

Table 4. Material parameter for damage model along in-plane shear direction

تنش اعمالی (% از استحکام نهایی استاتیکی)			
C_x	B_x	A_x	
-۱۸/۸۴۸۱		$۷/۰۴ \times ۱۰^{-۶}$	%۸۰
-۱۶/۰۸۴۶	۳/۲۲۵۶	$۱/۲۳ \times ۱۰^{-۵}$	%۶۰
-۱۱/۰۶۵۵		$۱/۱۸ \times ۱۰^{-۵}$	%۴۰
-۱۵/۳۳۲۷	۳/۲۲۵۶	$۱/۰۴ \times ۱۰^{-۵}$	میانگین

به منظور مشخصه‌سازی خواص ویسکوالاستیک نمونه‌ها نیاز است آزمایش تحلیل دینامیکی ترمومکانیکال بر روی نمونه‌ها انجام شود. در آزمون تحلیل دینامیکی ترمومکانیکال، تنش هارمونیک با فرکانس‌های مختلف و در دماهای مختلف بر نمونه اعمال می‌شود و کرنش حاصل برای محاسبه مدول ذخیره^۱ (E') و تلفات مکانیکی^۲ ($\tan(\delta)$) ثبت می‌شوند. E' و $\tan(\delta)$ برحسب دمای ماتریس لاستیکی در فرکانس‌های مختلف در اشکال (۶) و (۷) نشان داده شده است. برای آزمایش تحلیل دینامیکی ترمومکانیکال از نمونه‌های لاستیکی با ابعاد $۱ \times ۱۰ \times ۳۰$ میلیمتر استفاده شد و سرعت آزمون $۵ \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$ در نظر گرفته شده است. همچنین استاندارد مورد استفاده برای انجام این آزمون ASTM E 1640 می‌باشد.

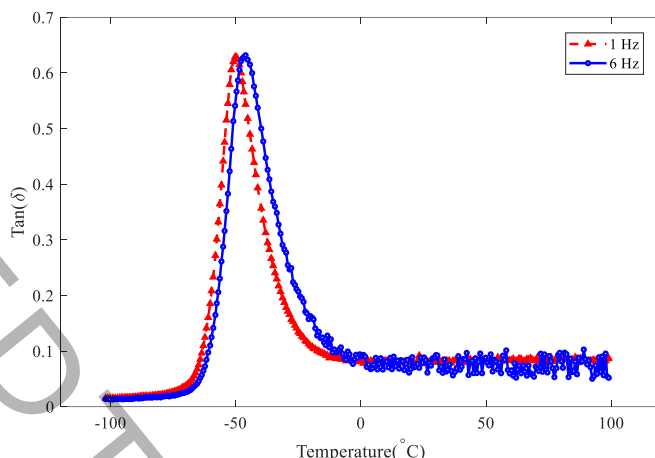


شکل ۶: تغییرات مدول ذخیره برحسب دمای ماتریس لاستیکی در فرکانس‌های مختلف

Figure 6. Storage modulus variation of rubbery matrix for different frequencies

¹ Storage Modulus

² Mechanical Loss



شکل ۷: تغییرات $\tan\delta$ بر حسب دمای ماتریس لاستیکی در فرکانس های مختلف

Figure 7. $\tan\delta$ variation of rubbery matrix for different frequencies

۲-۳- اعتبارسنجی مدل آنروپی-خرابی توسعه یافته

در این قسمت به منظور اعتبارسنجی مدل آنروپی-خرابی توسعه یافته برای ساختارهای کامپوزیتی پایه لاستیکی خارج از محور تک جهته، نتایج تجربی و مدل سازی مربوط به انرژی هیستریزس، تغییرات دما و عمر خستگی، برای لایه چینی [۴۵] در سطوح تنش متفاوت، مقایسه خواهد شد. نتایج تجربی با استفاده از آزمایش های خستگی کشش-کشش تک محوره که در سطوح مختلف تنش و با نسبت تنش ۰/۱ توسط دستگاه آزمایش سروو هیدرولیک MTS 810 انجام شده، استخراج گردیده است. نتایج شبیه سازی با استفاده از مدل آنروپی-خرابی توسعه یافته براساس رفتار غیرخطی مواد کامپوزیتی پایه لاستیکی محاسبه می شوند. در فرآیند مدل سازی عددی، در ابتدا، انرژی تلف شده ناشی از خرابی و خاصیت ویسکوالاستیک ماده و سپس گرمای انتقال یافته به محیط با توجه به معادلات ارائه شده در قسمت ۲، محاسبه می شوند. در ادامه، آنالیز حرارتی انجام می شود و دمای سطح نمونه در هر سیکل محاسبه می شود. در ضمن، مقدار آنروپی شکست خستگی با توجه به مدل آنروپی-خرابی و نتایج آزمایش های تجربی، برای استفاده به عنوان معیار شکست محاسبه می شود (مقدار آنروپی شکست خستگی برای لایه چینی های خارج از محور کامپوزیت های پایه لاستیکی که در این پژوهش مورد بررسی

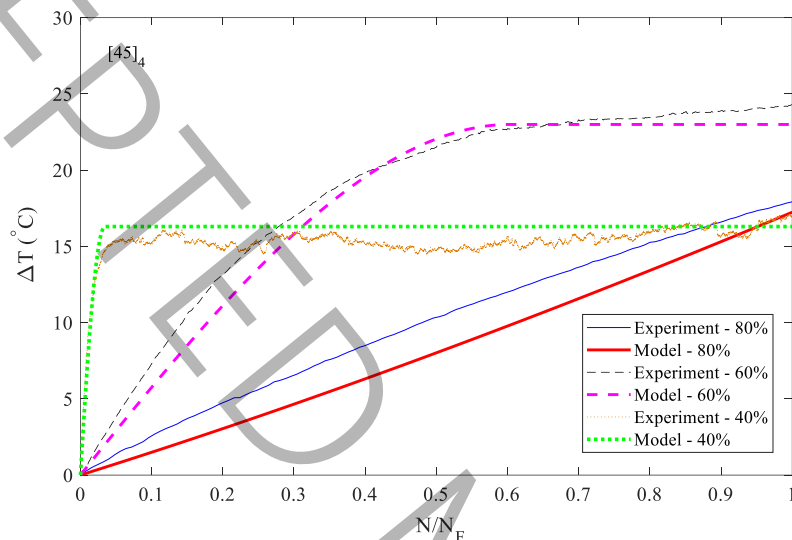
قرار می‌گیرد برابر $2334 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$ می‌باشد). در نهایت، مقدار آنتروپی در هر سیکل محاسبه می‌شود و با مقدار آنتروپی شکست خستگی مقایسه می‌شود و این روند تا شکست نهایی نمونه ادامه می‌یابد.

۱-۲-۳- تغییرات دما

شکل (۸) مقایسه‌ای بین نتایج تجربی (ثبت شده توسط دوربین حرارتی حین فرایند خستگی) و مدل‌سازی عددی دمای سطح لایه چینی^۴ [۴۵] از جنس کامپوزیت‌های پایه لاستیکی تحت بارگذاری خستگی برای سطوح مختلف تنش را نشان می‌دهد. هنگامی که سطح تنش بالا باشد، تا زمانی که شکست اتفاق بیفتد دما به سرعت افزایش می‌یابد، اما زمانی که سطح تنش پایین است، ابتدا دما به شدت بالا می‌رود و سپس تقریباً تا شکست نهایی ثابت می‌ماند. دلیل این پدیده این است که در سطح تنش بالا، عمر سازه کمتر است و زمان کافی برای اتلاف انرژی به محیط وجود ندارد، بنابراین دمای سازه تا زمان شکست نهایی به طور مداوم افزایش می‌یابد. هنگامی که سطح تنش پایین است، ابتدا دما به شدت بالا می‌رود اما پس از آن به دلیل زمان کافی برای اتلاف انرژی به محیط، دما ثابت می‌ماند. همچنین، تغییرات دمایی سطح لایه چینی‌های متفاوت در حین فرایند خستگی در سطوح تنشی متفاوت نیز در پیوست (الف) ارائه شده است.

افزایش دما بدلیل حرارت تولید شده بواسطه رشد خرابی، تغییر شکل‌های برگشت ناپذیر، خواص ویسکوالاستیک و سایر تغییرات میکروساختاری ماده است که این موضوع نیز توسط کارهای تحقیقاتی دیگر تایید شده است [۲۷، ۴۱-۴۳]. رشد خرابی لایه چینی^۴ [۴۵] در حین فرایند خستگی به این شکل است که در ابتدا میکروترک در ناحیه بین لاستیک و کوردها بوجود می‌آید و سپس با رشد میکروترک‌ها در ناحیه بین لاستیک و کوردها میکروترک‌ها ایجاد می‌شوند و در نهایت شکست نهایی نمونه اتفاق می‌افتد. با رشد خرابی در ماده انرژی اتلاف می‌شود که باعث افزایش دمای نمونه خواهد شد. همچنین، با توجه به توضیحات ارائه شده در قسمت‌های قبل، مواد کامپوزیتی پایه لاستیکی بدلیل دارا بودن ماتریس لاستیکی دارای خاصیت ویسکوالاستیک قابل توجهی

می‌باشد که بدلیل این خاصیت، انرژی قابل ملاحظه‌ای اتلاف می‌شود که باعث افزایش دمای نمونه حین فرایند خستگی می‌شود. همانطور که از شکل مشخص است افزایش دمای ۱۸، ۲۴ و ۱۷ درجه سانتیگراد به ترتیب برای سطوح تنش ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد استحکام تسلیم برای لایه چینی $[45]_4$ ملاحظه می‌شود.



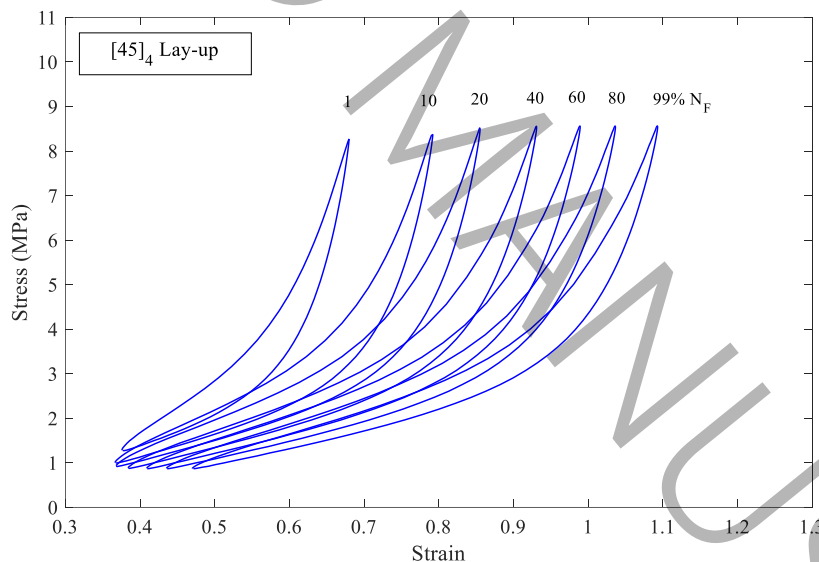
شکل ۸: مقایسه نتایج تجربی و مدلسازی تغییرات دمایی سطح لایه چینی $[45]_4$ در حین فرایند خستگی در سطوح تنشی متفاوت

Figure 8. Temperature variation of $[45]_4$ according experimental results and model simulation

با مقایسه نتایج مدلسازی عددی و تجربی در شکل (۸) ملاحظه می‌شود که بیشترین خطای نسبی بین نتایج، برای سطوح تنشی ۸۰٪، ۶۰٪ و ۴۰٪ استحکام کششی به ترتیب برابر با ۱۹٪، ۱۲٪ و ۱۵٪ می‌باشد. بهر حال تطابق خوبی بین نتایج وجود دارد و تفاوت‌های کوچکی که بین آنها بوجود آمده می‌تواند بدلیل نوسانات دمای محیط در حین ثبت دما توسط دوربین حرارتی باشد که بر نتایج تجربی تأثیر می‌گذارد. علت دیگر ممکن است برخی تغییرات در خواص مواد به دلیل تغییرات دما در حین فرآیند بارگذاری باشد که در مدل در نظر گرفته نشده است.

۲-۲-۳- انرژی هیستریزیس

حلقه هیستریزیس در لایه چینی $[45]_4$ از جنس کامپوزیت پایه لاستیکی برای شش سیکل مجزا (۱، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰، و ۹۹٪ از N_F) در شکل (۹) نشان داده شده است. با بررسی نمودارهای تجربی تنش-کرنش، مشاهده می شود که مسیرهای بارگذاری و باربرداری در حین بارگذاری خستگی منطبق نیستند. تفاوت بین مسیرهای بارگذاری و باربرداری نشان دهنده انرژی هیستریزیس در هر سیکل است. انرژی هیستریزیس، بیانگر انرژی تلف شده است که در اثر ایجاد خرابی حین فرایند خستگی و همچنین بدلیل خاصیت ویسکوالاستیک ساختار کامپوزیتی پایه لاستیکی ایجاد می شود. لازم به ذکر است که حلقه های هیستریزیس لایه چینی های متفاوت در حین فرایند خستگی نیز در پیوست (ب) ارائه شده است.

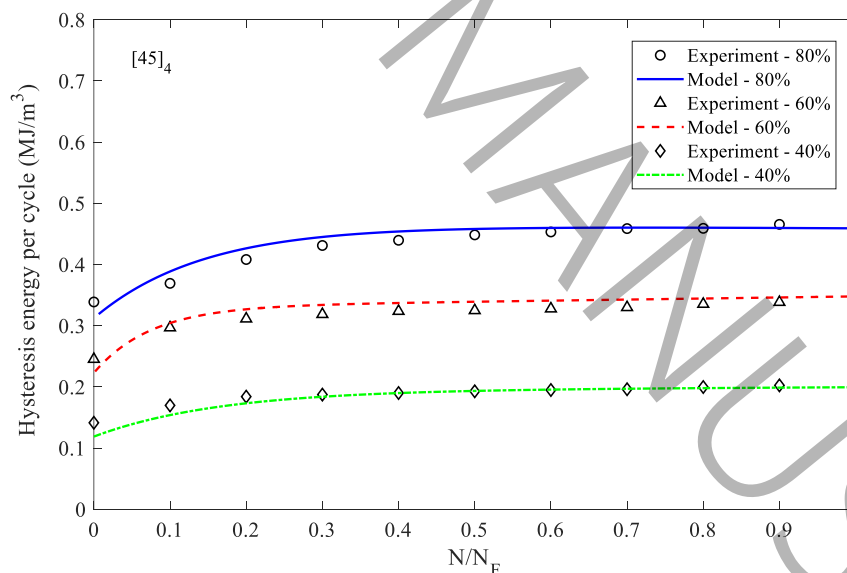


شکل ۹: نتایج آزمایشگاهی حلقه هیستریزیس لایه چینی $[45]_4$ از جنس کامپوزیت پایه لاستیکی (سطح تنش اعمال شده ۶۰ درصد استحکام استاتیکی)

Figure 9. Experimental hysteresis loop variation of $[45]_4$ for 60% of static strength loading

شکل (۱۰) مقادیر تجربی و شبیه سازی عددی انرژی هیستریزیس را در هر چرخه برحسب عمر خستگی برای لایه چینی $[45]_4$ تحت بارگذاری خستگی ۸۰٪، ۶۰٪ و ۴۰٪ استحکام استاتیکی با فرکانس ۱ هرتز و نسبت تنش ۰/۱ نشان می دهد. انرژی هیستریزیس در اصل انرژی آزاد شده ناشی از رشد خرابی و خاصیت ویسکوالاستیک ماده

است بنابراین در شبیه سازی عددی، میزان انرژی هیستریزس برابر است با $(\dot{E}_{Hys} = \dot{E}_d + \dot{W}_{ve})$. به منظور بررسی عملکرد مدل پیشنهادی، مقادیر تجربی و شبیه سازی عددی تغییرات انرژی هیستریزس در سطوح تنش مختلف مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به بررسی مقالات علمی دیگر روند تغییرات ارائه شده در شکل (۱۰) با نتایج ارائه شده توسط دیگر مراجع [۳۰، ۳۵، ۴۱] نیز تایید می شود. با توجه به شکل (۱۰) ملاحظه می شود که با افزایش سطح تنش، میزان انرژی هیستریزس افزایش می یابد. زیرا در سطح تنش بالاتر، تنش بیشتری به ماده اعمال می شود که باعث ایجاد خرابی بیشتر و همچنین تغییر شکل بالا در ماده می شود که باعث آزادسازی انرژی بیشتر ناشی از ویسکوالاستیک ماده می شود، بنابراین میزان آزادسازی انرژی ناشی از رشد خرابی و خاصیت ویسکوالاستیک ماده با افزایش سطح تنش بیشتر می شود. در ضمن، تغییرات انرژی هیستریزس لایه چینی های متفاوت در حین فرایند خستگی نیز در پیوست (پ) ارائه شده است.



شکل ۱۰: مقایسه نتایج تجربی و مدل سازی انرژی هیستریزس در هر سیکل برای لایه چینی [۴۵]_۴ تحت بارگذاری خستگی در سطوح تنش متفاوت

Figure 10. Hysteresis energy variation of [45]₄ according experimental results and model simulation

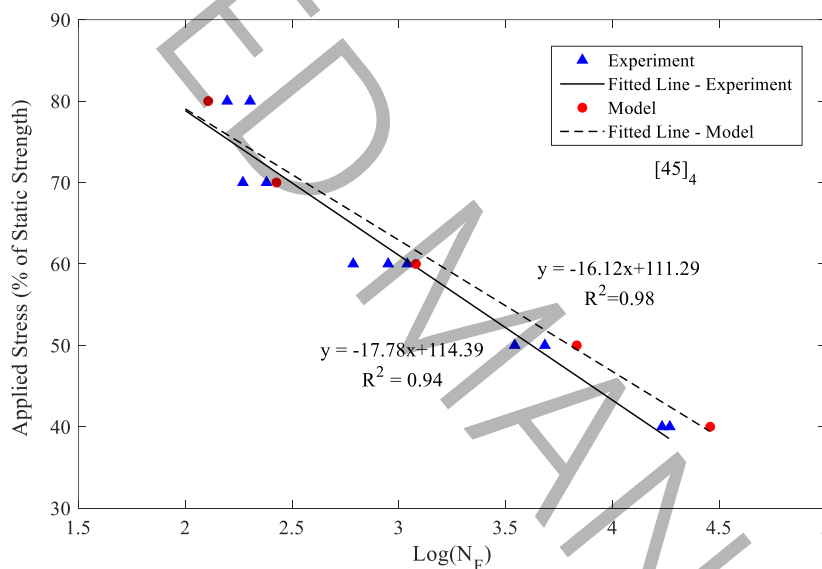
با توجه به تغییرات انرژی هیستریزس در شکل (۱۰)، می توان نتیجه گرفت که تغییرات انرژی هیستریزس در حین بارگذاری خستگی تا زمان شکست دارای ۲ مرحله می باشد. در مرحله اول سرعت تغییرات انرژی هیستریزس

بسیار زیاد است که در این قسمت بیشترین خرابی ناشی از جداسازی سیم از ماتریس می‌باشد. در قسمت بعدی، انرژی با شیب ثابت تغییر می‌کند و جدا شدن سیم از ماتریس و ترک ماتریسی در حین فرایند خستگی در لبه نمونه‌ها دیده می‌شود. از نیمه مرحله دوم به بعد، تورق و جدا شدن سیم از زمینه رخ می‌دهد. با توجه به شکل (۱۰)، نتیجه‌گیری می‌شود که بیشترین خطای نسبی بین نتایج مدلسازی عددی و داده‌های تجربی در سطوح تنش 0.80% ، 0.60% و 0.40% از استحکام کششی به ترتیب برابرند با 0.11% ، 0.9% و 0.14% . در کل تطابق خوبی بین نتایج عددی و تجربی وجود دارد و اختلافات جزئی که بین نتایج عددی و تجربی مشاهده می‌شود، می‌تواند بدلیل تغییرات دما در حین بارگذاری خستگی باشد و این پدیده ممکن است خواص مواد را کمی تغییر دهد که در مدل لحاظ نشده است. البته قابل ذکر است که تغییرات دمایی در نمونه‌ها حین فرایند خستگی بسیار بالا نیست که تاثیر بسیار بالایی در تغییر خواص مکانیکی ساختار کامپوزیتی پایه لاستیکی بگذارد ولی همین مقدار جزئی تغییرات دمایی که در نمونه‌ها اتفاق می‌افتد می‌تواند باعث تغییرات اندکی در خواص مکانیکی ساختار شود.

۳-۲-۳- پیش بینی عمر خستگی

در این بخش، عمر خستگی لایه چینی‌های خارج از محور کامپوزیت‌های پایه لاستیکی براساس مدل آنروپی-خرابی و با استفاده از مقدار آنروپی شکست خستگی به عنوان معیار شکست، پیش‌بینی شده است. شکل (۱۱) مقایسه نتایج عمر خستگی آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی لایه‌چینی [۴۵] را نشان می‌دهد. در این پژوهش، فرض بر این است که شرایط محیطی ثابت بوده و نمونه‌های کامپوزیتی پایه لاستیکی بدون نقاط تمرکز تنش هستند. یک مزیت کلیدی مدل آنروپی-خرابی این است که رفتار ویسکوالاستیک و افزایش دمای مواد لاستیکی را در طول تجزیه و تحلیل عمر خستگی در نظر می‌گیرد، که فاکتورهای مهم برای ارزیابی خواص ساختارهای کامپوزیتی پایه لاستیکی هستند. در شکل (۱۱) با مقایسه نتایج مدل و آزمایشات تجربی، خطای نسبی بین نتایج در سطوح تنش 0.80% ، 0.70% ، 0.60% ، 0.50% و 0.40% از استحکام تنش به ترتیب برابر با 0.9% ، 0.6% ، 0.10% ، 0.13% و 0.11% می‌باشند، بنابراین نتایج مدل آنروپی-خرابی با نتایج آزمایش‌های تجربی مطابقت قابل قبولی دارد.

همانطور که ملاحظه می‌شود، عمر خستگی پیش‌بینی شده توسط مدل پیشنهادی بیشتر از نتایج تجربی می‌باشد. زیرا مدل پیشنهادی بسیاری از موضوعات همچون پدیده‌هایی که در ناحیه تماس کورد سیمی با پایه لاستیکی اتفاق می‌افتد، افت خواص مکانیکی بوجود آمده در ناحیه تماس کورد سیمی با پایه لاستیکی، افت خواص مکانیکی با تغییرات دما و غیره، را در نظر نمی‌گیرد. بنابراین عمری که توسط مدل پیش‌بینی شده است بیشتر از نتایج تجربی می‌باشد ولی بازه اختلاف نتایج عددی و تجربی بگونه‌ای است که قابل قبول باشد.



شکل (۱): مقایسه نتایج تجربی و مدلسازی عمر خستگی لایه چینی [۴۵]_۴

Figure 11. Comparison of fatigue life of [45]₄ lay-up according experimental results and model simulation

۴- نتیجه‌گیری

مدل آنژیوتروپی-خرابی توسعه یافته برای بررسی رفتار خستگی غیرخطی لایه چینی‌های خارج از محور تک جهته مواد کامپوزیتی پایه لاستیکی تحت بارگذاری خستگی-کشش به کار گرفته شد. در این مقاله مقدار آنژیوتروپی شکست خستگی به عنوان معیار شکست استفاده شد که با توجه به مدل آنژیوتروپی-خرابی و نتایج تجربی محاسبه شد. روش مکانیک محیط پیوسته برای توصیف رشد خرابی، روش تحلیل دینامیکی ترمومکانیکال برای بررسی

رفتار میرایی دینامیکی ساختار و همچنین، تبادل حرارتی از نمونه به محیط محاسبه شد. در نهایت، نتایج تجربی و مدلسازی انرژی هیستریزیس، تغییرات دما و عمر خستگی، برای لایه چینی^۴[۴۵] تک‌جهته خارج از محور کامپوزیت‌های پایه لاستیکی در سطوح مختلف تنش ارائه شد.

در این مقاله تغییرات انرژی هیستریزیس بر حسب عمر خستگی براساس نتایج تجربی و عددی برای لایه چینی^۴[۴۵] ساختار کامپوزیتی پایه لاستیکی مورد بررسی قرار گرفت. با مقایسه تغییرات انرژی هیستریزیس در کامپوزیت‌های با ماتریس اپوکسی و کامپوزیت‌های پایه لاستیکی، مشخص می‌شود که مقدار انرژی تلف شده کامپوزیت‌های پایه لاستیکی به طور قابل توجهی بیشتر از کامپوزیت‌های با ماتریس اپوکسی است. دلیل آن این است که ویسکوزیته ماتریس لاستیکی در ساختار کامپوزیت‌های پایه لاستیکی بیشتر از ماتریس اپوکسی می‌باشد. با توجه به نمودار تغییرات انرژی هیستریزیس واضح است که این تغییرات دارای دو مرحله رشد سریع و سپس افزایش با شیب ثابت تا شکست نهایی می‌باشد.

در ساختار کامپوزیت‌های پایه لاستیکی در حین فرآیند خستگی، افزایش دما رخ می‌دهد. با توجه به نمودارهای ارائه شده مشخص است که وقتی سطح تنش بالا باشد، دما تا شکست نهایی به سرعت بالا می‌رود، اما زمانی که سطح تنش پایین است، ابتدا دما به شدت بالا می‌رود و سپس تقریباً با شیب ثابت تا شکست نهایی افزایش می‌یابد. بهر حال تطابق خوبی بین نتایج وجود دارد و دلیل اختلافات موجود می‌تواند بدلیل نوسانات دمای محیط در حین ثبت دما توسط دوربین حرارتی باشد که بر نتایج تجربی تأثیر می‌گذارد.

عمر خستگی لایه چینی^۴[۴۵] تک‌جهته خارج از محور کامپوزیت‌های پایه لاستیکی، بر مبنای مدل آنتروپی-خرابی پیش بینی شد و با نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی مقایسه گردید و مشخص گردید که نتایج مدل آنتروپی-خرابی با نتایج آزمایش‌های تجربی مطابقت قابل قبولی دارد. همانطور که ملاحظه می‌شود، عمر خستگی پیش بینی شده توسط مدل پیشنهادی بیشتر از نتایج تجربی می‌باشد. زیرا مدل پیشنهادی همه پدیده‌هایی که در ساختار ماده حین فرآیند خستگی رخ می‌دهد و باعث افت خواص مکانیکی می‌شود را در نظر نمی‌گیرد، در نتیجه عمر خستگی را بیشتر پیش‌بینی می‌کند.

لازم به ذکر است که کارهای تحقیقاتی ای که در ادامه این پژوهش پیشنهاد می‌شود عبارتند از: بررسی کارایی مدل آنتروپی-خرابی توسعه یافته برای پیش بینی عمر خستگی لایه‌چینی‌های متفاوت کامپوزیت‌های پایه لاستیکی (شبیه کامپوزیت‌های چند لایه پایه لاستیکی خارج از محور، متعامد و بافته شده)، بررسی سطح شکست نمونه‌های کامپوزیتی پایه لاستیکی ناشی از بارگذاری‌های استاتیک و نوسانی، بررسی تغییرات کرنش کامپوزیت-های پایه لاستیکی حین فرایند خستگی، بررسی میکرومکانیک خرابی در مواد کامپوزیتی پایه لاستیکی.

قدردانی

این پژوهش توسط صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور^۱ به شماره ۹۸۰۲۰۴۹۰ حمایت مالی شده است. از آقای دکتر رنه آلدرلیستن^۲ در دانشکده هوافضا دانشگاه صنعتی دلفت بواسطه کمک‌ها و همکاری ایشان در بخش انجام آزمایشات تجربی این پژوهش در آزمایشگاه هوافضا و مواد دانشگاه صنعتی دلفت^۳ قدردانی و تشکر می‌گردد. همچنین، از شرکت صنعتی تایرسازی بارز جهت تهیه مواد اولیه برای ساخت کامپوزیت‌های پایه لاستیکی قدردانی می‌نماییم.

مراجع:

- [1] A.N. Gent, Engineering with rubber: how to design rubber components, Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, (2012).
- [2] A.N. Gent, J.D. Walter, Pneumatic tire, Mechanical engineering faculty research, (2006), 854.
- [3] P. Behroozinia, S. Taheri, R. Mirzaeifar, An investigation of intelligent tires using multiscale modeling of cord-rubber composites, Mechanics Based Design of Structures and Machines, 46(2) (2018) 168-183.
- [4] M.R. Kashani, Aramid-short-fiber reinforced rubber as a tire tread composite, Journal of applied polymer science, 113(2) (2009) 1355-1363.
- [5] L. Qu, Y. Nie, G. Huang, G. Weng, J. Wu, Dynamic fatigue behavior of natural rubber reinforced with nanoclay and carbon black, Journal of Macromolecular Science, Part B, 50(8) (2011) 1646-1657.
- [6] J. Clarke, J. Harris, Controlled orientation of short fibre reinforcement for anisotropic performance of rubber compounds, Plastics, rubber and composites, 30(9) (2001) 406-415.

¹ Iran National Science Foundation

² René Alderliesten

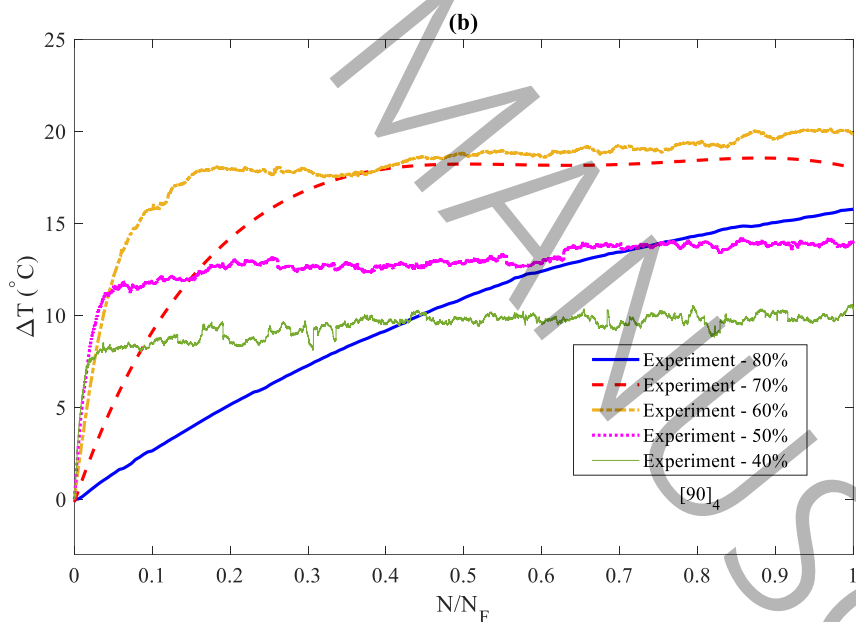
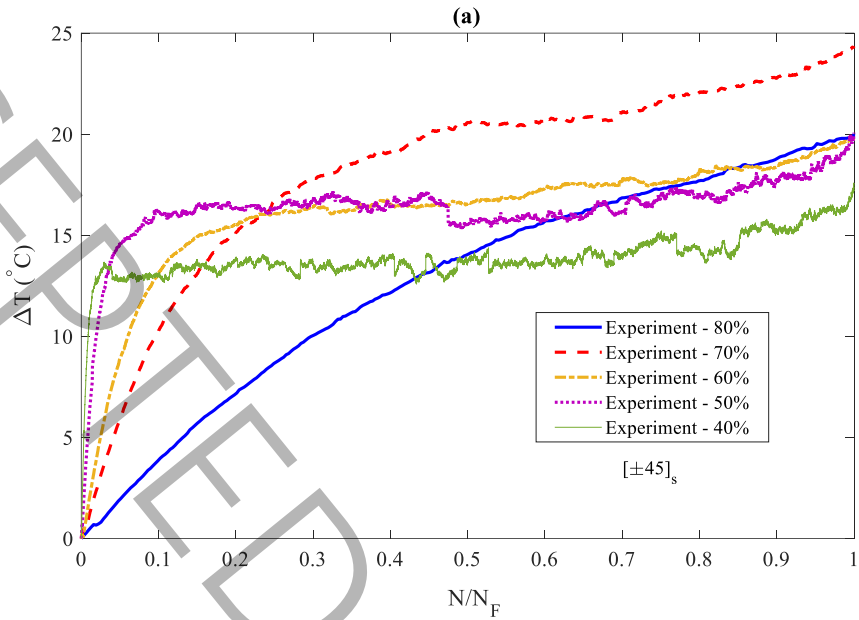
³ Delft Aerospace & Materials Laboratory

- [7] J. Zhong, Z. Luo, Z. Hao, Y. Guo, Z. Zhou, P. Li, B. Xue, Enhancing fatigue properties of styrene butadiene rubber composites by improving interface adhesion between coated aramid fibers and matrix, *Composites Part B: Engineering*, 172 (2019) 485-495.
- [8] J. Gao, X. Yang, L. Huang, Numerical prediction of mechanical properties of rubber composites reinforced by aramid fiber under large deformation, *Composite Structures*, 201 (2018) 29-37.
- [9] S. Weiser, T. Lehmann, R. Landgraf, N. Goldberg, H. Donner, J. Ihlemann, Experimental and numerical analysis of cord–elastomer composites, *Journal of Rubber Research*, 24(2) (2021) 211-225.
- [10] V. Golovanevskiy, A. Kondratiev, Elastic Properties of Steel-Cord Rubber Conveyor Belt, *Experimental Techniques*, 45(2) (2021) 217-226.
- [11] D. Wei, C. An, C. Wu, M. Duan, S.F. Estefen, Torsional structural behavior of composite rubber hose for offshore applications, *Applied Ocean Research*, 128 (2022) 103333-103333.
- [12] Y. Dong, X. Yao, H. Yan, L. Yuan, H. Yang, Macro-and mesoscopic mechanical properties of complex fabric rubber composite under different temperatures, *Composite Structures*, 230 (2019) 111510-111510.
- [13] A.V. Pozdeev, D.A. Chumakov, V.V. Novikov, I.A. Golyatkin, K.V. Chernyshov, A.E. Gavrilov, A.V. Leonard, Thermographic bench tests of rubber-cord pneumatic spring, in: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2019, pp. 12042-12042.
- [14] Z. Hashin, A. Rotem, A Fatigue Failure Criterion for Fiber Reinforced Materials, *Journal of Composite Materials*, 7(4) (1973) 448-464.
- [15] M. Shariati, H. Hatami, H. Eipakchi, H. Yarahmadi, H. Torabi, Experimental and numerical investigations on softening behavior of POM under cyclic strain-controlled loading, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 50(15) (2011) 1576-1582.
- [16] M. Shariati, H. Hatami, H. Yarahmadi, H.R. Eipakchi, An experimental study on the ratcheting and fatigue behavior of polyacetal under uniaxial cyclic loading, *Materials & Design*, 34 (2012) 302-312.
- [17] H. Hatami, M. Shariati, Numerical and experimental investigation of SS304L cylindrical shell with cutout under uniaxial cyclic loading, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 43 (2019) 139-153.
- [18] W. Van Paepegem, Fatigue damage modeling of fibre-reinforced composite materials, *Applied Mechanics Reviews*, 54(4) (2001) 279-300.
- [19] P.C. Chou, R. Croman, Degradation and sudden-death models of fatigue of graphite/epoxy composites, in: *Composite materials: testing and design (fifth conference)*, ASTM International, 1979.
- [20] M.M. Shokrieh, L.B. Lessard, Progressive fatigue damage modeling of composite materials, Part I: Modeling, *Journal of composite materials*, 34(13) (2000) 1056-1080.
- [21] M.M. Shokrieh, L.B. Lessard, Multiaxial fatigue behaviour of unidirectional plies based on uniaxial fatigue experiments—I. Modelling, *International Journal of Fatigue*, 19(3) (1997) 201-207.
- [22] M.M. Shokrieh, L.B. Lessard, Multiaxial fatigue behaviour of unidirectional plies based on uniaxial fatigue experiments—II. Experimental evaluation, *International journal of fatigue*, 19(3) (1997) 209-217.
- [23] M.M. Shokrieh, L.B. Lessard, Residual fatigue life simulation of laminated composites, in: *International Conference on Advanced Composites(ICAC 98)*, Hurghada, Egypt 1998, pp. 79-86.
- [24] P.C. Paris, M.P. Gomez, W.E. Anderson, A Rational Analytical Theory of Fatigue The Trend in Engineering, *U. of Washington, Seattle, Wa*, 13(1) (1961).

- [25] P. Ladeveze, A damage approach for composite structures: theory and identification, in: *Mechanical Identification of Composites*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1991, pp. 44-57.
- [26] M. Naderi, M. Amiri, M.M. Khonsari, On the thermodynamic entropy of fatigue fracture, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 466(2114) (2009) 423-438.
- [27] M. Naderi, M.M. Khonsari, Thermodynamic analysis of fatigue failure in a composite laminate, *Mechanics of Materials*, 46 (2012) 113-122.
- [28] B. Mohammadi, A. Mahmoudi, Developing a new model to predict the fatigue life of cross-ply laminates using coupled CDM-entropy generation approach, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 95 (2018) 18-27.
- [29] A. Mahmoudi, B. Mohammadi, Theoretical-experimental investigation of temperature evolution in laminated composites due to fatigue loading, *Composite Structures*, 225 (2019) 110972-110972.
- [30] A. Mahmoudi, B. Mohammadi, On the evaluation of damage-entropy model in cross-ply laminated composites, *Engineering Fracture Mechanics*, 219 (2019) 106626-106626.
- [31] A. Mahmoudi, B. Mohammadi, H. Hosseini-Toudeshky, Damage behaviour of laminated composites during fatigue loading, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 43(4) (2020) 698-710.
- [32] R. Joven, R. Das, A. Ahmed, P. Roozbehjavan, B. Minaie, Thermal properties of carbon fiber-epoxy composites with different fabric weaves, *SAMPE*, Charleston, SC, (2012).
- [33] B. Mohammadi, B. Fazlali, D. Salimi-Majd, Development of a continuum damage model for fatigue life prediction of laminated composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 93 (2017) 163-176.
- [34] B. Mohammadi, M.M. Shokrieh, M. Jamali, A. Mahmoudi, B. Fazlali, Damage-entropy model for fatigue life evaluation of off-axis unidirectional composites, *Composite Structures*, 270 (2021) 114100-114100.
- [35] M. Naderi, M.M. Khonsari, On the role of damage energy in the fatigue degradation characterization of a composite laminate, *Composites Part B: Engineering*, 45(1) (2013) 528-537.
- [36] C. Cho, J.W. Holmes, J.R. Barber, Estimation of interfacial shear in ceramic composites from frictional heating measurements, *Journal of the American Ceramic Society*, 74(11) (1991) 2802-2808.
- [37] J.T. South, *Mechanical properties and durability of natural rubber compounds and composites*, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2002.
- [38] S. Rao, I.M. Daniel, D. McFarlane, Fatigue and fracture behavior of a steel cord/rubber composite, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 14(3) (2001) 213-224.
- [39] S. Rao, I.M. Daniel, E.E. Gdoutos, Mechanical properties and failure behavior of cord/rubber composites, *Applied composite materials*, 11(6) (2004) 353-375.
- [40] J. Song, *Fatigue of cord-rubber composites for tires*, The Pennsylvania State University, 2004.
- [41] B. Lee, J. Smith, J. Medzorian, M. Chawla, P. Ulrich, Study of Fracture Behavior of Cord-Rubber Composites for Lab Prediction of Structural Durability of Aircraft Tires II. Fatigue Damage Accumulation of Bias Carcass, *SAE Transactions*, (1992) 1897-1903.
- [42] J. Montesano, Z. Fawaz, H. Bougherara, Use of infrared thermography to investigate the fatigue behavior of a carbon fiber reinforced polymer composite, *Composite structures*, 97 (2013) 76-83.

[43] J. Huang, M.L. Pastor, C. Garnier, X.J. Gong, A new model for fatigue life prediction based on infrared thermography and degradation process for CFRP composite laminates, International Journal of Fatigue, 120 (2019) 87-95.

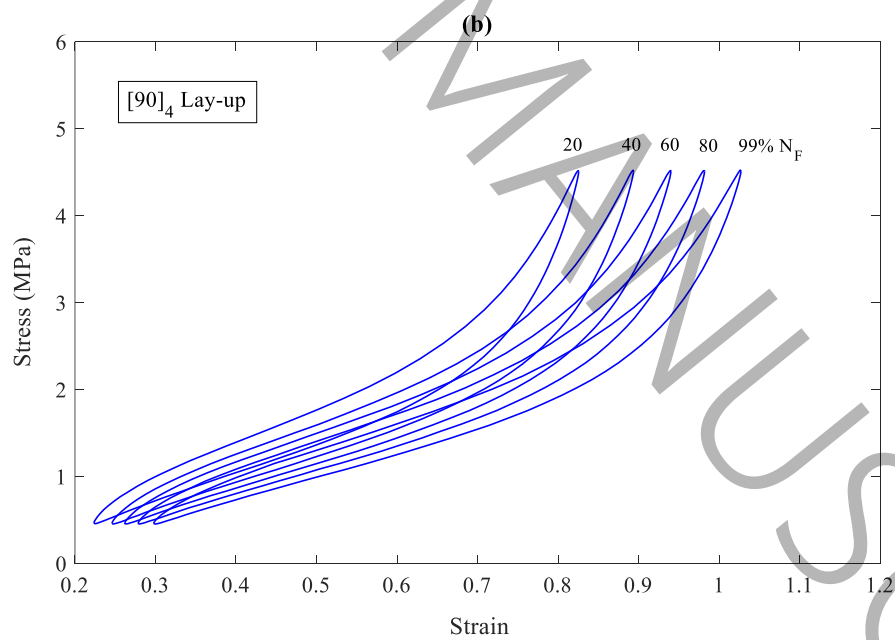
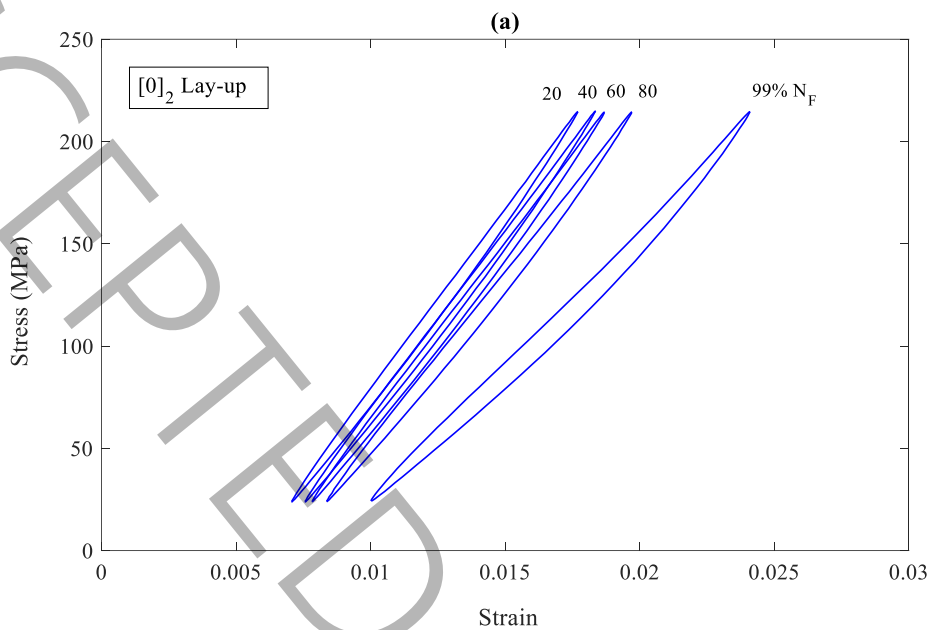
ACCEPTED MANUSCRIPT

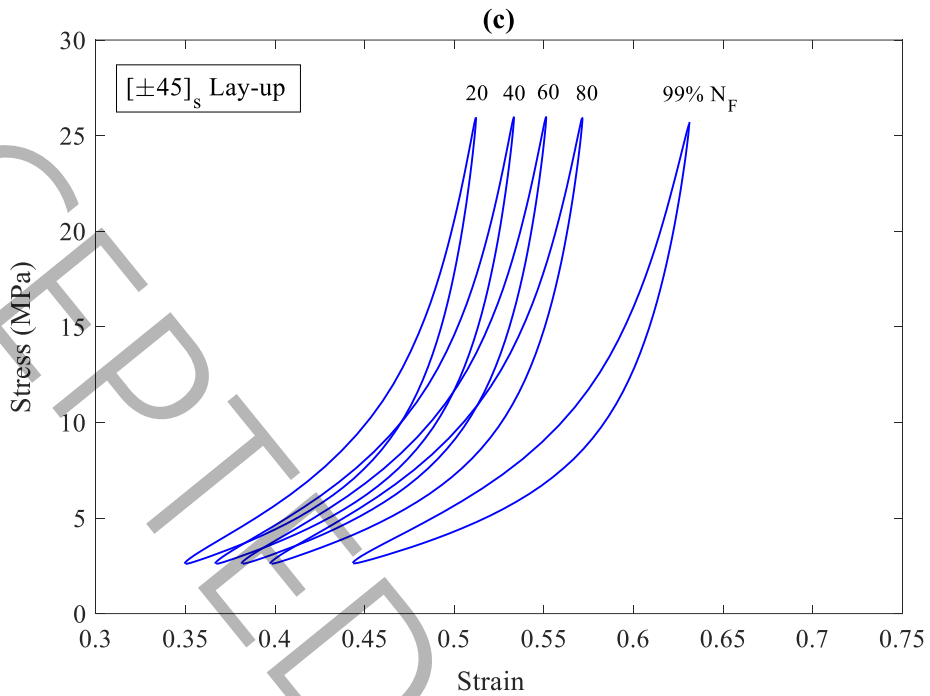


شکل ۱۲: نتایج آزمایشگاهی دمای سطح نمونه برای لایه چینی های مختلف کامپوزیت های پایه لاستیکی تحت بارگذاری خستگی: الف) لایه چینی برشی درون صفحه ای $[\pm 45]_s$; ب) لایه چینی عرضی $[90]_4$:

Figure 12. Experimental temperature variation of SCRC sample with different lay-ups during fatigue test: a) $[\pm 45]_s$, b) $[90]_4$

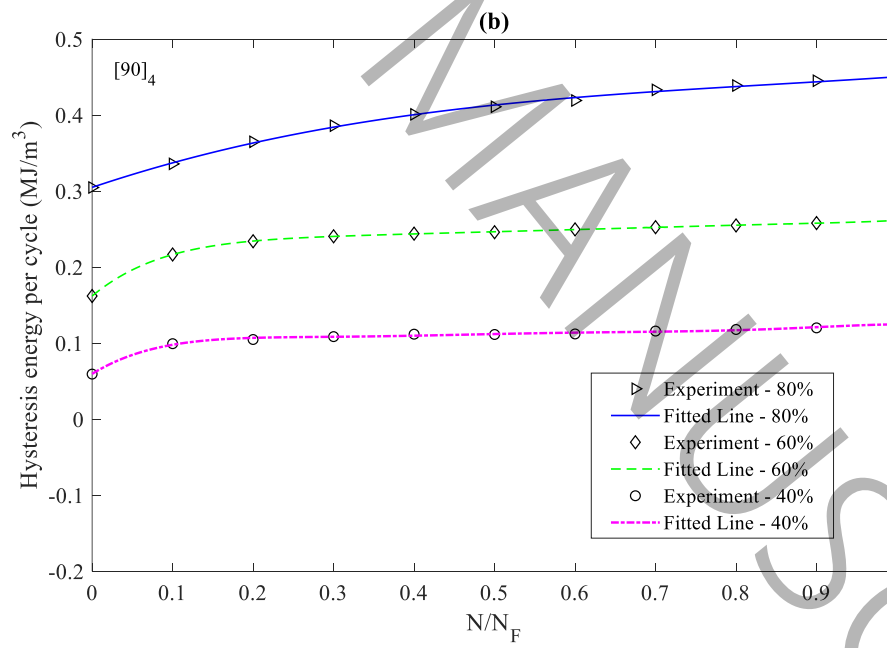
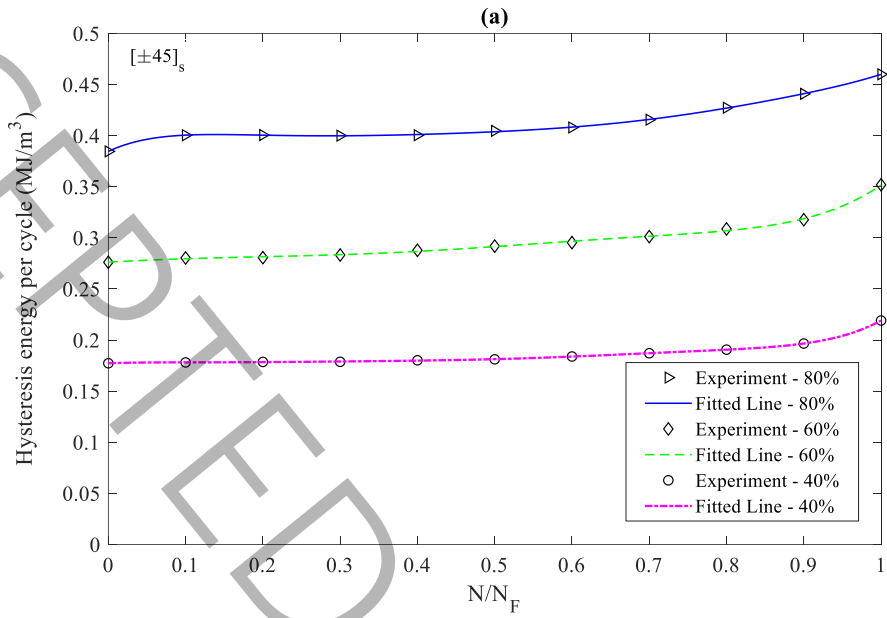
پیوست (ب):

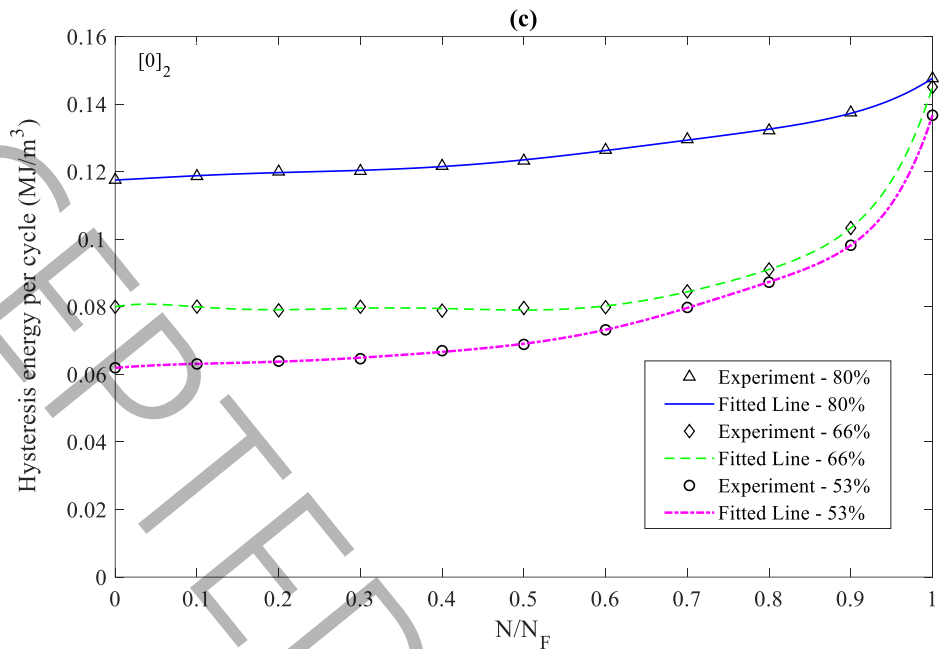




شکل ۱۳: نتایج آزمایشگاهی حلقه هیستریزس برای لایه چینی های مختلف کامپوزیت های پایه لاستیکی تحت بارگذاری خستگی (سطح تنش اعمال شده ۶۰ درصد استحکام استاتیکی): الف) لایه چینی طولی ($[0]_2$); ب) لایه چینی عرضی ($[90]_4$); ج) لایه چینی برشی درون صفحه ای ($[\pm 45]_s$).

Figure 13. Experimental hysteresis loop variation of different lay-ups during fatigue test for 60% of static strength loading: a) $[0]_2$, b) $[90]_4$, c) $[\pm 45]_s$





شکل ۱۴. نتایج آزمایشگاهی انرژی هیستریزس برای لایه چینی های مختلف کامپوزیت های پایه لاستیکی تحت بارگذاری خستگی: الف) لایه چینی برشی درون صفحه ای $[45\pm]_8$ ؛ ب) لایه چینی عرضی $(90)_4$ ؛ ج) لایه چینی طولی $(0)_2$

Figure 14. Experimental hysteresis energy variation of different lay-ups during fatigue test: a) $[\pm 45]_8$, b) $[90]_4$, c) $[0]_2$

Theoretic and Experimental Fatigue Analysis of Off-axis Unidirectional Rubbery Composites Using Nonlinear Life Prediction Model

M. Jamali¹, B. Mohammadi^{1*} and M.M. Shokrieh¹

¹ School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, 16846-13114, Iran.

* Corresponding author Email: Bijan_Mohammadi@iust.ac.ir

Abstract

The aim of this article is analyzing the fatigue behavior of off-axis unidirectional rubbery composites under uniaxial tension-tension cyclic loading based on developed damage-entropy model. The main advantage of the damage-entropy model is that it accounts the viscoelastic property and temperature increase during the fatigue loading conditions. The off-axis rubbery composites lay-ups exhibit a nonlinear stress-strain response similar to the rubber matrix. Hence, the Newton-Raphson method is employed to capture the nonlinear behavior of rubbery composites in this study. The failure criterion in the damage-entropy model is based on the fracture fatigue entropy value. To characterize the longitudinal, transverse, and in-plane shear behavior of rubbery composites, static and fatigue experimental tests on different lay-ups are conducted. Moreover, the damage energy, the energy dissipation due to viscoelastic behavior and the heat transfer to the environment during the fatigue loading will be calculated. Furthermore, the experimental results of [45]₄ lay-up are utilized to validate the developed damage-entropy model. Finally, the experimental and modeling results of hysteresis energy, temperature change, and fatigue life of steel-cord rubber composite [45]₄ lay-up for different stress levels subjected to stress ratio 0.1 and 1 Hz frequency, are compared. The comparison between the analytical results and experiments indicates the capabilities of the present model.

Keywords

Fatigue life, Rubbery composites, Developed damage-entropy model, Fracture fatigue entropy, Temperature evolution.