



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

Majid Jamali, Bijan Mohammadi *, Mahmood Mehrdad Shokrieh

School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

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 the developed damage-entropy model. The main advantage of the damage-entropy model is that it accounts for the viscoelastic property and temperature increase during the fatigue loading conditions. The off-axis rubbery composite lay-ups exhibit a nonlinear stress-strain response similar to the rubber matrix. Hence, the Newton-Raphson method is employed to capture the nonlinear behaviour 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 behaviour of rubbery composites, static and fatigue experimental tests on different lay-ups are conducted. Moreover, the damage energy, the energy dissipation due to viscoelastic behaviour 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 modelling 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.

Review History:

Received: Apr. 23, 2024
Revised: Aug. 05, 2024
Accepted: Aug. 08, 2024
Available Online: Aug. 22, 2024

Keywords:

Fatigue Life
Rubbery Composites
Developed Damage-Entropy Model
Fracture Fatigue Entropy
Temperature Evolution

1- Introduction

The unique properties of rubber, including its softness, elasticity, resistance to cutting, high friction coefficient, and low gas permeability, make it an invaluable material for creating elastic structures such as hoses, belts, washers, and vibration insulation. Furthermore, rubber is a fundamental component of pneumatic tires [1]. Through the operational lifespan of rubbers, their components are exposed to static loads and fatigue. An effective approach to enhance their mechanical properties involves the integration of fibers into the rubber structure, thereby producing composite materials [2,3].

Nowadays, fatigue in composites is recognized as a definite phenomenon. With the increasing use of composites in various industries, it is essential to consider the deterioration of mechanical properties due to cyclic loading [4,5]. Multiple fatigue measurement models have been proposed by various researchers over the years. These include classic models like fatigue-life models and models for residual mechanical properties (such as stiffness and strength), as well as progressive damage models characterized by a gradual, cycle-by-cycle nature. The progressive damage models integrate classic fatigue criteria, fatigue life models,

and residual mechanical properties models [6].

In recent years, a novel method has emerged for examining the fatigue behaviour of composite materials. This method utilizes the concept of entropy production and has demonstrated considerable potential for advancement [7]. The concept of "Fatigue Failure Entropy (FFE)" was introduced by Naderi and colleagues in 2009. It quantifies the consistent amount of entropy generated in material under fatigue load, from the point of loading on the specimen to the moment of failure. Importantly, this measure is independent of load situation, load frequency, load magnitude, and other environmental conditions [8].

Rubbery materials undergo a considerable temperature rise due to their viscoelastic properties during the fatigue process. Previous studies have revealed that there is currently no model available that considers both the viscoelastic property and the temperature increase in steel cord rubber composites (SCRC) during the fatigue process. This research aims to analyze the fatigue behaviour of off-axis unidirectional SCRC structures using the damage-entropy model. Due to the non-linear stress-strain mechanical behaviour of SCRC, it is important to develop an entropy-damage model that accounts for this mechanical property of SCRC materials.

*Corresponding author's email: Bijan_Mohammadi@iust.ac.ir



2- Methodology

In the present study, we present an analysis of the fatigue behaviour exhibited by unidirectional off-axis SCRC under tensile fatigue loading. This analysis takes into account the nonlinear stress-strain mechanical characteristics of SCRC materials, employing the developed entropy-damage model.

The stress-strain behaviour of SCRC exhibits nonlinear changes due to the rubber matrix present in them. The article utilizes the Newton-Raphson method to accurately analyze the nonlinear fatigue behaviour of SCRC materials.

Damage-entropy model expresses that:

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

In which, \dot{W}_{ve} and \dot{E}_d are the dissipated energy because of the viscoelastic nature of the matrix and damage energy, respectively. Also, ρ , C , T , and \dot{E}_{diss} define the density, specific heat capacity, temperature, and dissipated heat, respectively.

The failure criterion in the damage-entropy model is determined by comparing the FFE value obtained using the model with experimental data. Parameters for failure growth in the longitudinal, transverse, and in-plane shear directions are calculated using CDM to measure the energy resulting from failure growth during the fatigue process.

$$\dot{E}_d = Y_i \dot{D}_i \quad (2)$$

Where E_d , Y , and D are damage energy, the conjugated force, and the damage variable, respectively.

Additionally, the dynamic damping behaviour of the SCRC structure, caused by the viscoelastic properties of rubber materials, is analyzed using DMTA to determine the energy lost due to viscoelastic behaviour.

$$W_{ve} = \int_0^{t_c} [\varepsilon_0 \sigma_0 \omega \sin(\omega t) \cos(\omega t + \delta)] dt = \pi \varepsilon_0^2 E_2 \quad (3)$$

Where ε_0 , σ_0 , E_2 , ω , δ and t_c are strain amplitude, stress amplitude, loss moduli, frequency, phase lag, and time duration per cycle, respectively.

Heat exchange from the sample to the environment is calculated through conduction, displacement, and radiation mechanisms.

3- Results & discussion

The damage-entropy model developed for unidirectional off-axis SCRC structures is validated using experimental results from $[45]_4$ lay-up. Finally, experimental results and modelling of hysteresis energy, temperature changes, and fatigue life are presented in the following for $[45]_4$ unidirectional off-axis SCRC at different stress levels and 0.1 stress ratio under 1 Hz frequency.

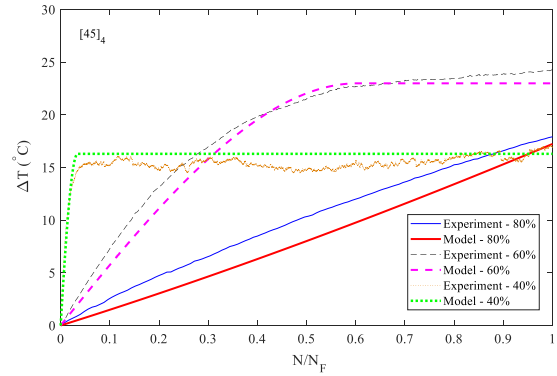


Fig. 1. Temperature variation of $[45]_4$ according to experimental results and model simulation

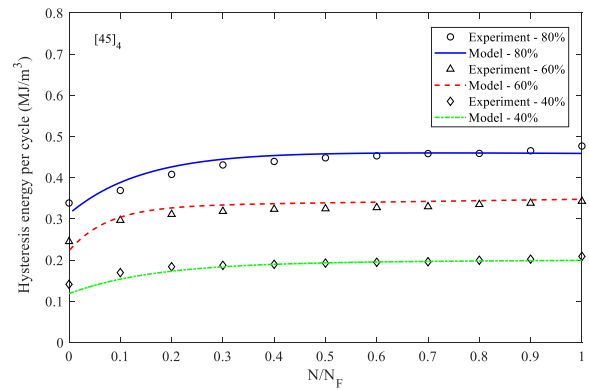


Fig. 2. Hysteresis energy variation of $[45]_4$ according to experiments and model simulation

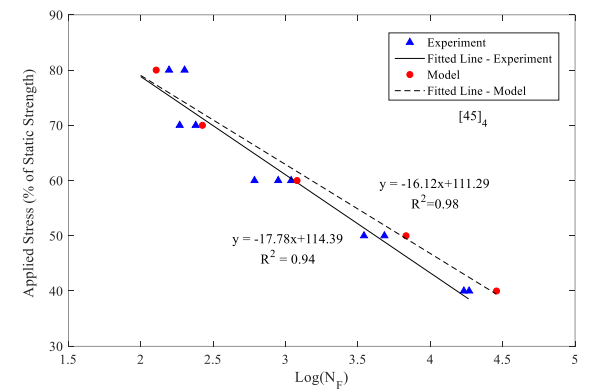


Fig. 3. Comparison of fatigue life of $[45]_4$ lay-up according to experiments and model

4- Conclusion

In this article, the fatigue behaviour of off-axis unidirectional $[45]_4$ lay-up by using the damage-entropy model was predicted. The comparison of hysteresis energy changes in composites with an epoxy matrix and SCRC shows that the wasted energy of SCRC is significantly higher than that of composites with an epoxy matrix. This is because the viscosity of the rubber matrix in the SCRC structure is higher than that of the epoxy matrix. The diagram of hysteresis energy changes indicates two stages of rapid growth followed by an increase with a constant slope until final failure. Additionally, the fatigue life of laminated $[45]_4$ unidirectional off-axis SCRC was predicted using the entropy-damage model and compared with experimental test results. The results showed that the entropy-damage model's predictions were in acceptable agreement with the experimental results.

References

- [1] A.N. Gent, *Engineering with rubber: how to design rubber components*, Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, (2012).
- [2] 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.
- [3] V. Golovanevskiy, A. Kondratiev, *Elastic Properties of Steel-Cord Rubber Conveyor Belt*, *Experimental Techniques*, 45(2) (2021) 217-226.
- [4] 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.
- [5] W. Van Paepegem, *Fatigue damage modeling of fibre-reinforced composite materials*, *Applied Mechanics Reviews*, 54(4) (2001) 279-300.
- [6] 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.
- [7] P. Ladeveze, *A damage approach for composite structures: theory and identification*, in: *Mechanical Identification of Composites*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1991, pp. 44-57.
- [8] 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.



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، بیژن محمدی^{ID}، محمود مهرداد شکریه

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۴
بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۱۵
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۱۸
ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۰۶/۰۱

کلمات کلیدی:

عمر خستگی
کامپوزیت‌های پایه لاستیکی
مدل آنتروپی-خرابی توسعه یافته
آنتروپی شکست خستگی
تغییرات دما

خلاصه: 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 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.

۱- مقدمه

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

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 استاتیکی 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



پرداختند و مدل آنتروپی - خرابی پیشنهادی خود را ارائه کردند. 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 سیم^۶ 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 خستگی^۷ 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 پیوسته^۸ 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 ترمومکانیکال^۹ 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 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.

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 واماندگی کلاسیک، مدل‌های عمر خستگی و مدل‌های خواص مکانیکی باقیمانده محسوب می‌شوند، اما ماهیتی تدریجی و چرخه به چرخه دارند. نخستین بار شکرپه 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 براساس 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

6 Steel cord-rubber composites
7 Fracture fatigue entropy
8 Continuum damage mechanics
9 Dynamic Mechanical Thermal Analysis

1 Lessard
2 Generalized Residual Material Property Degradation Model
3 Paris law
4 Entropy
5 Fracture Fatigue Entropy (FFE)

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.

۲-۱- 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:

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

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

برای محاسبه انرژی خرابی خستگی، کاهش سختی 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

نتایج تجربی لایه چینی [۴۵] برای اعتبارسنجی مدل آنتروپی-خرابی که برای ساختارهای کامپوزیتی پایه لاستیکی خارج از محور تک جهته توسعه یافته شده، استفاده می‌شود. در نهایت، نتایج تجربی و مدلسازی انرژی هیستریزس، تغییرات دما و عمر خستگی، برای لایه چینی [۴۵] تک‌جهته خارج از محور کامپوزیتی پایه لاستیکی در سطوح مختلف تنش و نسبت تنش ۰/۱ تحت فرکانس ۱ هرتز ارائه می‌شود.

۲-۲ مدل غیر خطی آنتروپی-خرابی

کامپوزیت‌های پایه لاستیکی از ماتریس لاستیکی و تقویت‌کننده 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. مجموع ترم‌های سمت چپ معادله (۱) در واقع انرژی هیستریزس ماده یا مساحت حلقه هیستریزس است که به عنوان انرژی اتلاف 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].

حین فرایند خستگی باید محاسبه شوند [۳۳]:

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

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

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

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 فرایند 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، T_c دوره تناوب یک سیکل و E'' مدول اتلاف می‌باشد.

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 $i = xx, yy, xy$ 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 $(D_{c,i})$ تا $(D=0)$ لگاریتم گرفته می‌شود [۳۳]:

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

$D_{c,i}$ 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]:

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

۲-۳- تبادل حرارت محیطی

ترم انرژی اتلاف شده \dot{E}_{diss} ، بوسیله انتقال حرارت از طریق هدایت^۱ (\dot{E}_{cond})، جابجایی^۲ (\dot{E}_{conv}) و تشعشی^۳ (\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^۴، ضریب انتقال حرارت جابجایی^۵، ضریب تابش سطحی^۶ و ثابت استفان-بولتزمن^۷ 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

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

- 1 Conduction
- 2 Convection
- 3 Radiation
- 4 Thermal conductivity coefficient
- 5 Convective heat transfer coefficient
- 6 Surface emissivity constant
- 7 Stefan-Boltzmann constant

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^۸ هلند که در زمینه بررسی ساختارهای کامپوزیتی دارای تیم تحقیقاتی خبره و آزمایشگاه‌های تجهیزی می‌باشد، انجام شد.

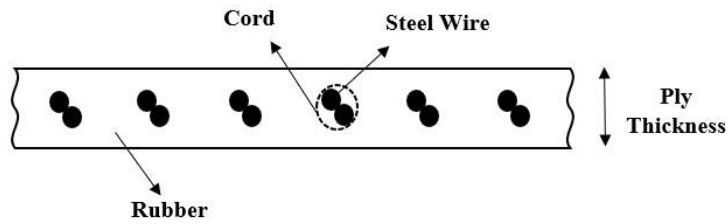
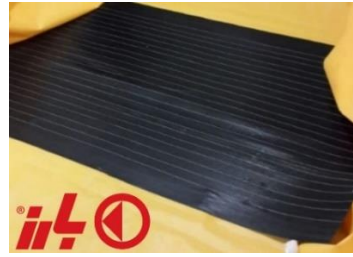
در این بخش در ابتدا روش ساخت نمونه‌ها و در ادامه مشخصه‌سازی پارامترهای مادی نمونه‌های کامپوزیتی پایه لاستیکی ارائه می‌شود. در این تحقیق برای ساخت نمونه‌های کامپوزیتی پایه لاستیکی، از سیم دارای پوشش مورد استفاده در تایر شرکت تایرسازی بارز با کد BPN01-460 استفاده می‌شود. شکل (۱) صفحات لاستیکی تقویت شده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

صفحات لاستیکی تقویت شده با سیم مورد استفاده برای تولید نمونه‌ها دارای ضخامت $1/1$ میلیمتر، قطر سیم $0/6$ میلیمتر و تعداد ۹۵ سیم در ده سانتیمتر^۹ می‌باشند. برای تهیه نمونه‌های کامپوزیتی زمینه لاستیکی در ابعاد 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 تب‌هایی جهت قرارگیری در فیکسچر دستگاه آزمایش تعبیه شده‌اند که ضخامت در این قسمت‌ها به اندازه ۲ میلیمتر از وسط نمونه‌ها بیشتر می‌باشد.

شکل (۲) نمای سه بعدی نمونه‌ها و همچنین ابعاد هر کدام از لایه چینی‌ها را بصورت جزئی نشان داده شده است. ضخامت لایه چینی $0/4$

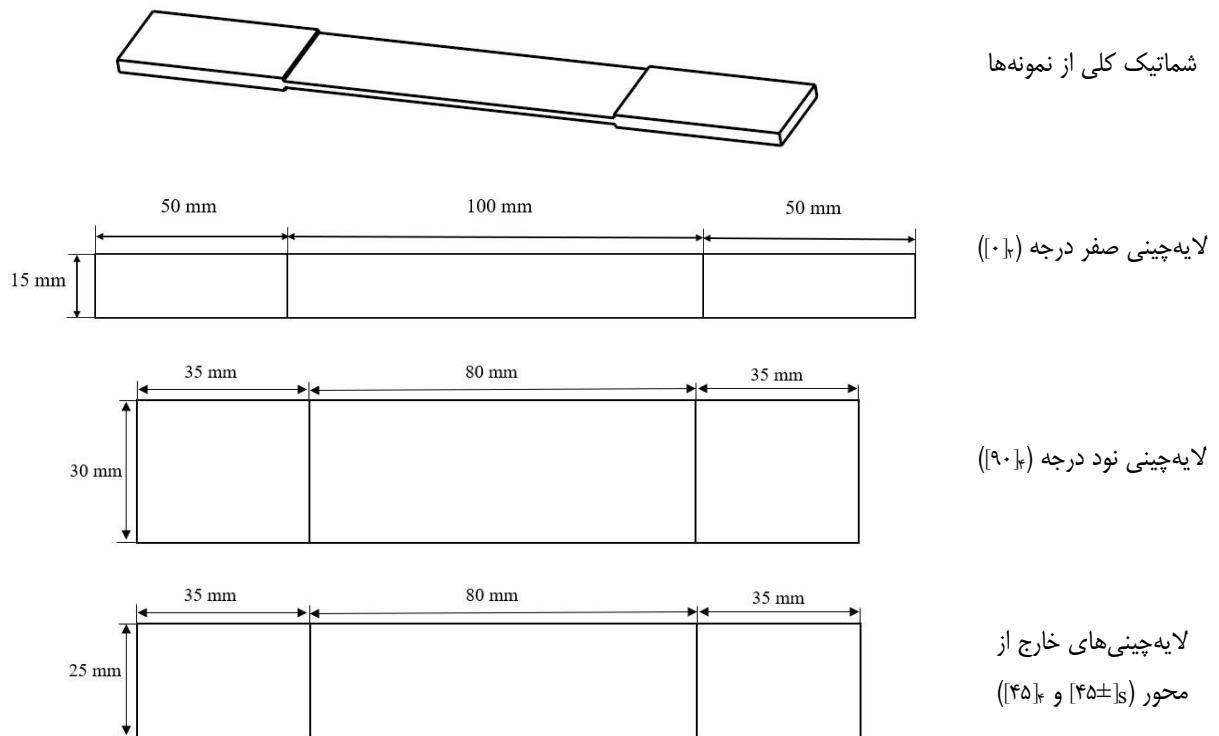
8 Delft University of Technology (TU Delft)

9 End count Per Deci-Meter



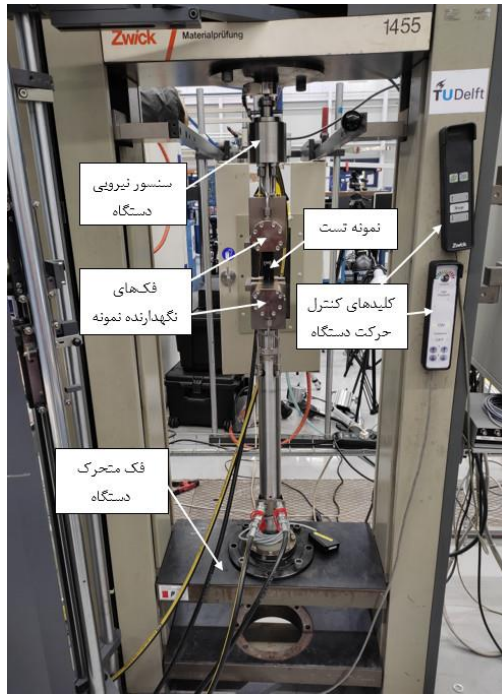
شکل ۱. صفحات لاستیکی تقویت شده با سیم تهیه شده از شرکت تیرسازی بارز

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



شکل ۲. نمای سه بعدی و ابعاد نمونه‌های کامپوزیتی زمینه لاستیکی در لایه‌چینی‌های متفاوت

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



(ب)



(الف)

شکل ۳. الف) آماده سازی نمونه ها برای انجام آزمایش و ب) دستگاه آزمایش استاتیکی ۲۰ کیلو نیوتن زویک در دانشگاه صنعتی دلفت

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

۵ نمونه مورد آزمون قرار گرفت. همچنین برای جلوگیری از اثرات بارهای مکانیکی، آزمایش‌های استاتیکی برای لایه چینی‌های $[0]_p$ ، $[45\pm]_p$ و $[90]_p$ 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 $[45]_p$ می‌باشد و چون زاویه گذار کامپوزیت‌های پایه لاستیکی مورد بررسی در این مقاله $8/64$ درجه است، بنابراین زاویه لایه چینی $[45]_p$ 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 $[45\pm]_p$ و $[90]_p$ 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.

لایه چینی $[90]_p$ و لایه چینی‌های خارج از محور به ترتیب برابرند با ۲، ۴ و ۴ میلی‌متر می‌باشند.

همانطور که اشاره شد، مدل به کار رفته نیازمند مشخصه‌سازی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پایه لاستیکی دارد که برای این منظور بایستی آزمایش‌های استاتیکی و خستگی بر روی نمونه‌های ساخته شده انجام شود. در این بخش، از نتایج آزمایش‌های استاتیکی و خستگی به منظور مشخصه‌سازی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پایه لاستیکی استفاده می‌شود که در ادامه این روند توضیح داده می‌شود.

با انجام آزمایشات استاتیکی بر روی نمونه‌های $[0]_p$ ، $[90]_p$ و $[45\pm]_p$ ، مدل کششی و استحکام استاتیکی در راستاهای سیم، عمود بر سیم و برشی $(E_{xx}, E_{yy}, E_{xy}, X_T, Y_T, S)$ برای مواد کامپوزیتی پایه لاستیکی مشخصه‌یابی می‌شوند. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها برای انجام آزمایش، از دستگاه ۲ تن زویک^۱ موجود در آزمایشگاه دانشکده هوافضا دانشگاه صنعتی دلفت استفاده شد. برای اطمینان از عدم پراکندگی نتایج، برای هر آزمایش

1 Zwick

جدول ۱. خواص مکانیکی ساختار کامپوزیتی پایه لاستیکی

Table 1. Mechanical properties of SCRC structure

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

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.

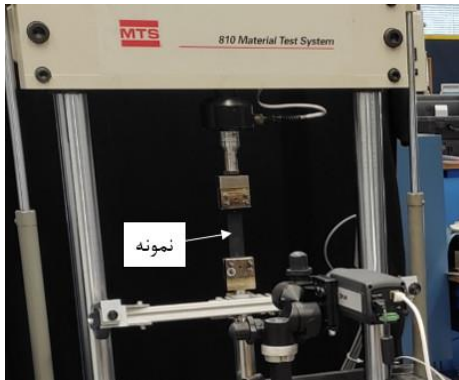
نسبت تنش در تمامی نمونه‌ها ۰/۱ در نظر گرفته شده است تا هم نزدیک به صفر بوده و از طرفی در صورت وقوع خطای احتمالی، دستگاه وارد محدوده تنش منفی نشود و کماتش در نمونه‌ها اتفاق نیفتد. در هر آزمایش چندین نمونه مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند تا با توجه به پراکندگی داده‌ها نتایج از دقت کافی برخوردار باشند.

شکل (۵) نتایج آزمایش‌های خستگی تک محوره با فرکانس ۱ هرتز و نسبت تنش ۰/۱ را برای لایه‌چینی‌های مختلف SCRC ($[0]_p$)، $[90]_p$ و $[45\pm]_p$) 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

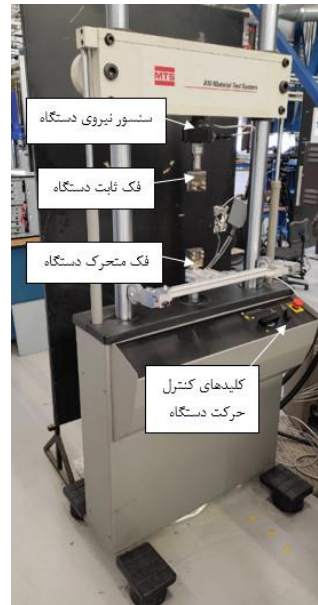
نتایج آزمایش‌های تجربی نمونه‌های $[0]_p$ ، $[90]_p$ و $[45\pm]_p$ به ترتیب برای توصیف خواص مکانیکی ساختار کامپوزیتی پایه لاستیکی در امتداد طولی، عرضی و برشی درون صفحه استفاده می‌شوند. بنابراین خواص مکانیکی این نمونه‌ها با در نظر گرفتن نتایج آزمایش‌های تجربی در جدول (۱) تعریف و ارائه شده است. در این جدول E_{xx} ، E_{yy} و E_{xy} به ترتیب سفتی در جهت طولی، عرضی و برشی درون صفحه‌ای می‌باشند. علاوه بر این، X_T ، Y_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 سروویدرولیک 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

1 Off-axis



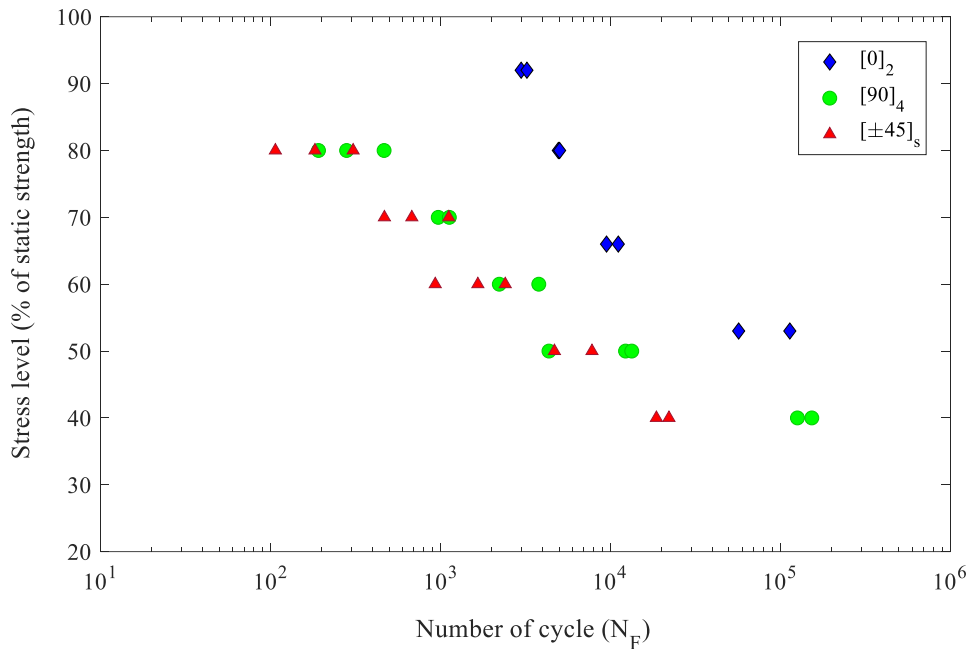
ب) نحوه قرارگیری نمونه در دستگاه



الف) دستگاه آزمون خستگی

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

Fig. 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

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

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		$۴/۰۷ \times ۱۰^{-۶}$	%۹۲
-۱۹/۰۲۷۵	۳/۰۵۶۸	$۱/۷۳ \times ۱۰^{-۵}$	%۸۰
-۲۹/۷۴۹۵		$۴/۳۳ \times ۱۰^{-۶}$	%۵۳
-۲۴/۸۷۵۸	۳/۰۵۶۸	$۸/۵۷ \times ۱۰^{-۶}$	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		$۲/۰۹ \times ۱۰^{-۵}$	%۸۰
-۱۳/۰۱۴۲	۴/۳۴۴۵	$۲/۸۲ \times ۱۰^{-۵}$	%۶۰
-۱۰/۷۸۹۴		$۱/۳۵ \times ۱۰^{-۵}$	%۴۰
-۱۳/۱۲۷۹	۴/۳۴۴۵	$۲/۰۹ \times ۱۰^{-۵}$	میانگین

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 لایه چینی مختلف $[0]_p$ ، $[90]_p$ و $[45\pm]_s$ استفاده می‌شود که نتایج آنها در جداول (۲، ۳ و ۴) ارائه می‌شود.

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

طرف فک دستگاه بر سطح مقطع هر نمونه استفاده شده است. با توجه به شکل (۵)، می‌توان نتیجه گرفت که ترتیب طول عمر خستگی برای لایه چینی‌های مختلف بصورت $[0]_p < [90]_p < [45\pm]_s$ است. بنابراین، تنش برشی درون صفحه‌ای (که در لایه چینی $[45\pm]_s$ غالب است) بیشتر از تنش طولی (که در لایه چینی $[0]_p$ غالب است) و عرضی (که در لایه چینی $[90]_p$ غالب است) در سازه‌های کامپوزیتی پایه لاستیکی تحت بارهای خستگی، مخرب می‌باشد.

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 (۱-۲)، از نتایج

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

C_x	B_x	A_x	تنش اعمالی (% از استحکام نهایی استاتیکی)
-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

قسمت ۲، محاسبه می‌شوند. در ادامه، آنالیز حرارتی انجام می‌شود و دمای سطح نمونه در هر سیکل محاسبه می‌شود. در ضمن، مقدار آنتروپی شکست خستگی با توجه به مدل آنتروپی-خرابی و نتایج آزمایش‌های تجربی، برای استفاده به عنوان معیار شکست محاسبه می‌شود (مقدار آنتروپی شکست خستگی برای لایه چینی‌های خارج از محور کامپوزیت‌های پایه لاستیکی که در این پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرد برابر $۲۳۳۴ \text{ J.m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ 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.

۳-۲-۱- تغییرات دما

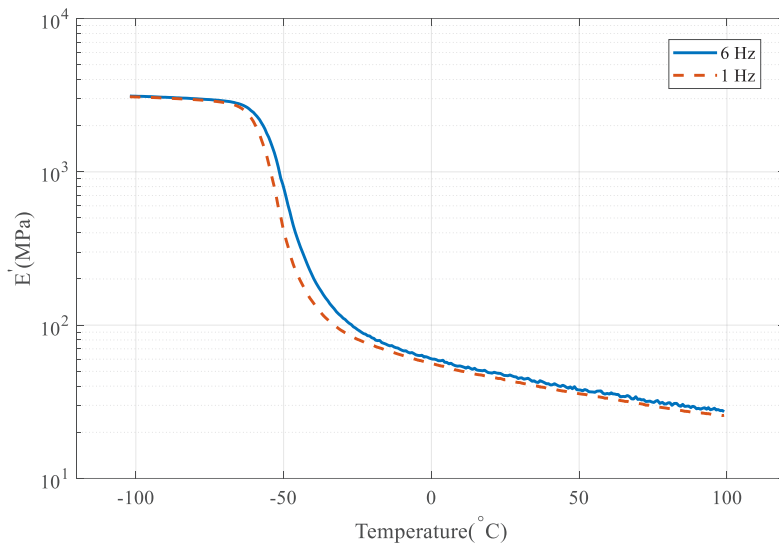
شکل (۸) مقایسه‌ای بین نتایج تجربی (ثبت شده توسط دوربین حرارتی حین فرایند خستگی) و مدل‌سازی عددی دمای سطح لایه چینی پ [۴۵] از جنس کامپوزیت‌های پایه لاستیکی تحت بارگذاری خستگی برای سطوح مختلف تنش را نشان می‌دهد. هنگامی که سطح تنش بالا باشد، تا زمانی که شکست اتفاق بیفتد دما به سرعت افزایش می‌یابد، اما زمانی 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

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.

۳-۲- اعتبارسنجی مدل آنتروپی-خرابی توسعه یافته

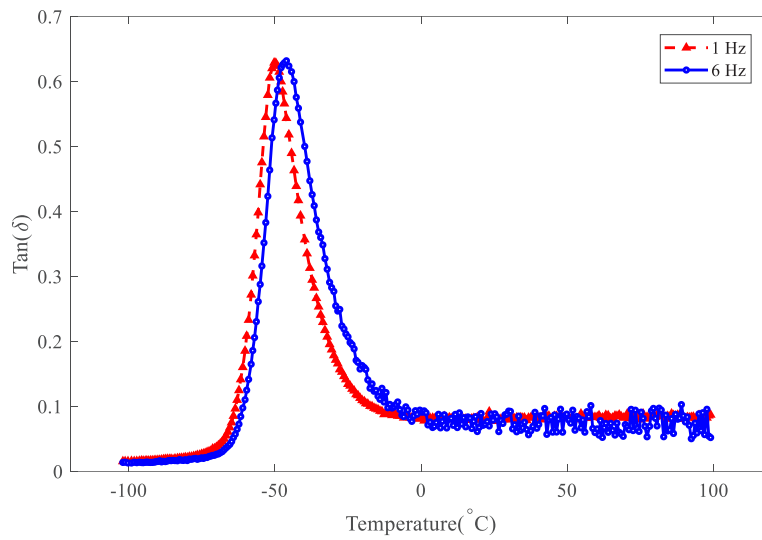
در این قسمت به منظور اعتبارسنجی مدل آنتروپی-خرابی توسعه یافته برای ساختارهای کامپوزیتی پایه لاستیکی خارج از محور تک جهته، نتایج تجربی و مدل‌سازی مربوط به انرژی هیستریزس، تغییرات دما و عمر خستگی، برای لایه چینی پ [۴۵] در سطوح تنش متفاوت، مقایسه خواهد شد. نتایج تجربی با استفاده از آزمایش‌های خستگی کشش-کشش 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 شبیه‌سازی با استفاده از مدل آنتروپی-خرابی توسعه یافته براساس رفتار غیرخطی مواد کامپوزیتی پایه لاستیکی محاسبه می‌شوند. در فرایند مدل‌سازی 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

- 1 Storage Modulus
- 2 Mechanical Loss



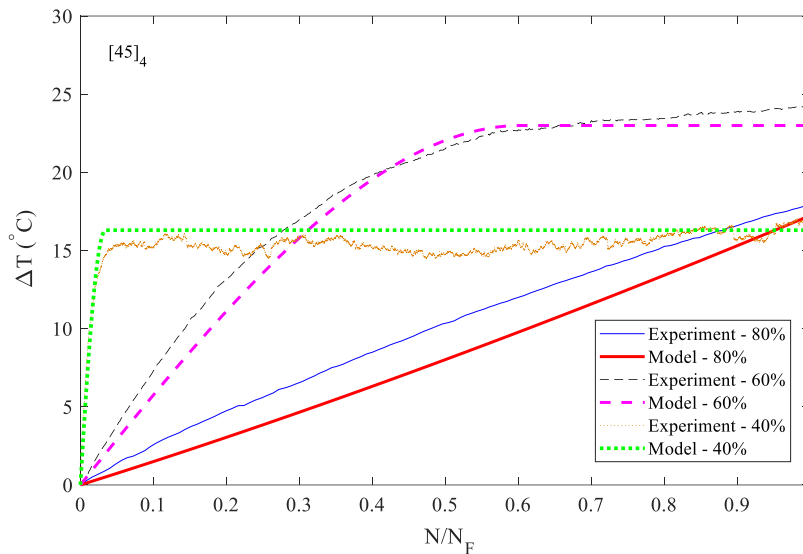
شکل ۶. تغییرات مدول ذخیره برحسب دمای ماتریس لاستیکی در فرکانس های مختلف

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



شکل ۷. تغییرات $\tan\delta$ برحسب دمای ماتریس لاستیکی در فرکانس های مختلف

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



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

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

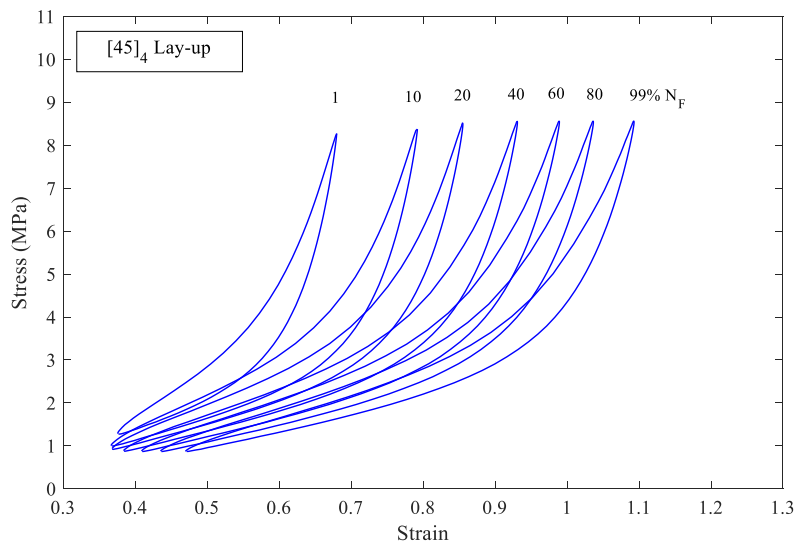
استحکام تسلیم برای لایه چینی $[45]_4$ ملاحظه می‌شود. با مقایسه نتایج مدلسازی عددی و تجربی در شکل (۸) ملاحظه می‌شود که بیشترین خطای نسبی بین نتایج، برای سطوح تنش ۰.۸٪، ۰.۶٪ و ۰.۴٪ استحکام کششی به ترتیب برابر با ۰.۱۹٪، ۰.۱۲٪ و ۰.۱۵٪ می‌باشد. بهر حال تطابق خوبی بین نتایج وجود دارد و تفاوت‌های کوچکی که بین آنها بوجود آمده می‌تواند بدلیل نوسانات دمایی 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.

۳-۲-۲- انرژی هیستریزس

حلقه هیستریزس 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 می‌شود که مسیرهای بارگذاری و باربرداری در حین بارگذاری خستگی منطبق نیستند. تفاوت بین مسیرهای بارگذاری و باربرداری نشان دهنده انرژی هیستریزس در هر سیکل است. انرژی هیستریزس، بیانگر انرژی تلف شده است که در اثر ایجاد خرابی حین فرایند خستگی و همچنین بدلیل

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 تنش 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 $[45]_4$ 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 ماکروترک‌ها ایجاد می‌شوند و در نهایت شکست نهایی نمونه اتفاق می‌افتد. با رشد خرابی در ماده انرژی اتلاف می‌شود که باعث افزایش دمایی 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 دمایی 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



شکل ۹. نتایج آزمایشگاهی حلقه هیستریزس لایه چینی [۴۵]_۴ از جنس کامپوزیت پایه لاستیکی (سطح تنش اعمال شده ۶۰ درصد استحکام استاتیکی)

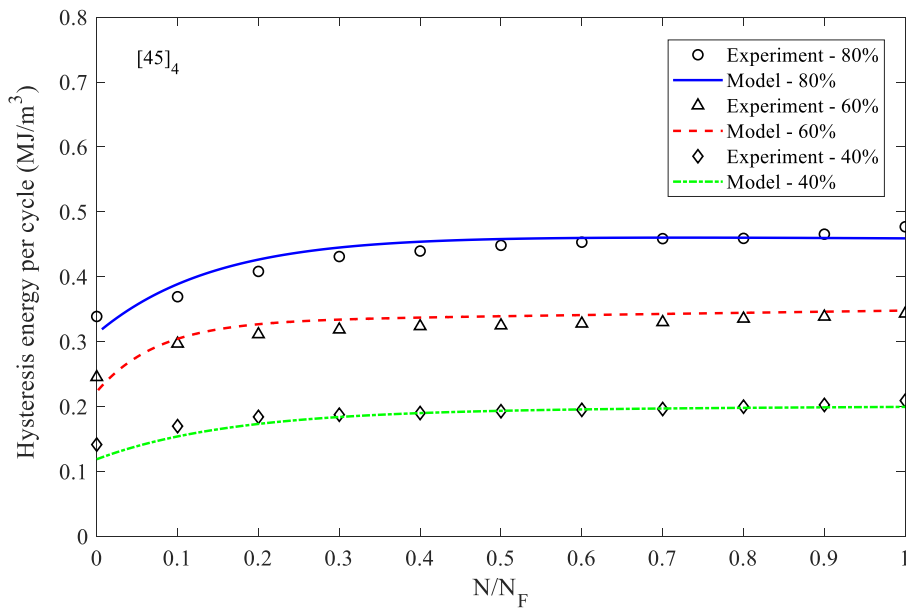
Fig. 9. Experimental hysteresis loop variation of [45]₄ for 60% of static strength loading

ویسکوالاستیک ماده با افزایش سطح تنش بیشتر می‌شود. در ضمن، تغییرات انرژی هیستریزس لایه چینی‌های متفاوت در حین فرایند خستگی نیز در پیوست (ب) ارائه شده است.

با توجه به تغییرات انرژی هیستریزس در شکل (۱۰)، می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات انرژی هیستریزس در حین بارگذاری خستگی تا زمان شکست دارای ۲ مرحله می‌باشد. 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 تنشی ۸۰٪، ۶۰٪ و ۴۰٪ از استحکام کششی به ترتیب برابرند با ۱۱٪، ۹٪ و ۱۴٪. 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

خاصیت ویسکوالاستیک ساختار کامپوزیتی پایه لاستیکی ایجاد می‌شود. لازم به ذکر است که حلقه‌های هیستریزس لایه چینی‌های متفاوت در حین فرایند خستگی نیز در پیوست (ب) ارائه شده است.

شکل (۱۰) مقادیر تجربی و شبیه‌سازی عددی انرژی هیستریزس را در هر چرخه برحسب عمر خستگی برای لایه چینی [۴۵]_۴ تحت بارگذاری خستگی ۸۰٪، ۶۰٪ و ۴۰٪ استحکام استاتیکی با فرکانس ۱ هرتز و نسبت تنش ۰/۱ نشان می‌دهد. انرژی هیستریزس در اصل انرژی آزاد شده ناشی از رشد خرابی و خاصیت ویسکوالاستیک ماده است بنابراین در شبیه‌سازی 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 شبیه‌سازی عددی تغییرات انرژی هیستریزس در سطوح تنشی 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 می‌شود. با توجه به شکل (۱۰) ملاحظه می‌شود که با افزایش سطح تنش، میزان انرژی هیستریزس افزایش می‌یابد. زیرا در سطح تنش بالاتر، تنش بیشتری به ماده اعمال می‌شود که باعث ایجاد خرابی بیشتر و همچنین تغییر شکل بالا در ماده می‌شود که باعث آزادسازی انرژی بیشتر ناشی از ویسکوالاستیک ماده می‌شود، بنابراین میزان آزادسازی انرژی ناشی از رشد خرابی و خاصیت



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

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

۶٪، ۱۰٪، ۱۳٪ و ۱۱٪ می‌باشند، بنابراین نتایج مدل آنتروپی-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.

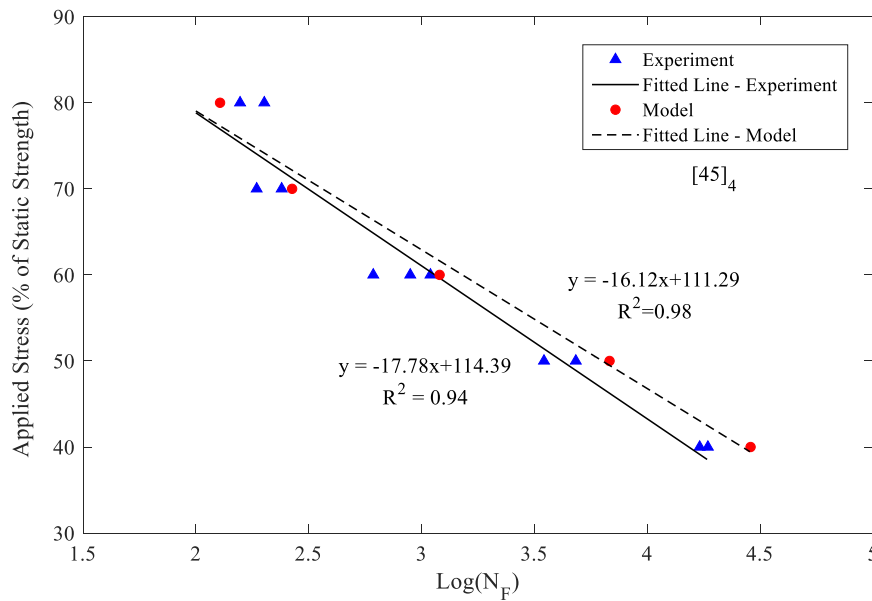
۴- نتیجه‌گیری

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

تأثیر 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- پیش‌بینی عمر خستگی

در این بخش، عمر خستگی لایه چینی‌های خارج از محور کامپوزیت‌های پایه لاستیکی براساس مدل آنتروپی-خرابی و با استفاده از مقدار آنتروپی شکست خستگی به عنوان معیار شکست، پیش‌بینی شده است. شکل (۱۱) مقایسه نتایج عمر خستگی آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی لایه چینی [۴۵]_۴ 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 آنتروپی-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 تنشی ۸۰٪، ۷۰٪، ۶۰٪، ۵۰٪ و ۴۰٪ از استحکام تنشی به ترتیب برابر با ۹٪،



شکل ۱۱. مقایسه نتایج تجربی و مدلسازی عمر خستگی لایه چینی [۴۵]_۴

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

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 [۴۵]_۴ 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 پیش‌بینی شده توسط مدل پیشنهادی بیشتر از نتایج تجربی می‌باشد. زیرا مدل پیشنهادی همه پدیده‌هایی که در ساختار ماده حین فرایند 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 تحقیقاتی‌ای که در ادامه این پژوهش پیشنهاد می‌شود عبارتند از: بررسی کارایی مدل آنتروپی-خرابی توسعه یافته برای پیش‌بینی عمر خستگی لایه‌چینی‌های متفاوت کامپوزیت‌های پایه لاستیکی (شبه کامپوزیت‌های چند لایه پایه لاستیکی خارج از محور، متعامد و بافته شده)، بررسی سطح شکست نمونه‌های کامپوزیتی پایه لاستیکی ناشی

بررسی رفتار میرایی دینامیکی ساختار و همچنین، تبادل حرارتی از نمونه به محیط محاسبه شد. در نهایت، نتایج تجربی و مدلسازی انرژی هیستریزس، تغییرات دما و عمر خستگی، برای لایه چینی [۴۵]_۴ تک‌جهته خارج از محور کامپوزیت‌های پایه لاستیکی در سطوح مختلف تنش ارائه شد.

در این مقاله تغییرات انرژی هیستریزس بر حسب عمر خستگی بر اساس نتایج تجربی و عددی برای لایه چینی [۴۵]_۴ ساختار کامپوزیتی پایه لاستیکی مورد بررسی قرار گرفت. با مقایسه تغییرات انرژی هیستریزس 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 هیستریزس 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 فرایند 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

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,

از بارگذاری‌های استاتیک و نوسانی، بررسی تغییرات کرنش کامپوزیت‌های 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.

منابع

- [1] [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.
- [7] J. Zhong, Z. Luo, Z. Hao, Y. Guo, Z. Zhou, P. Li, B. Xue,
-
- 1 Iran National Science Foundation
 2 René Alderliesten
 3 Delft Aerospace & Materials Laboratory

- 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 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*

- 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.
- 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,

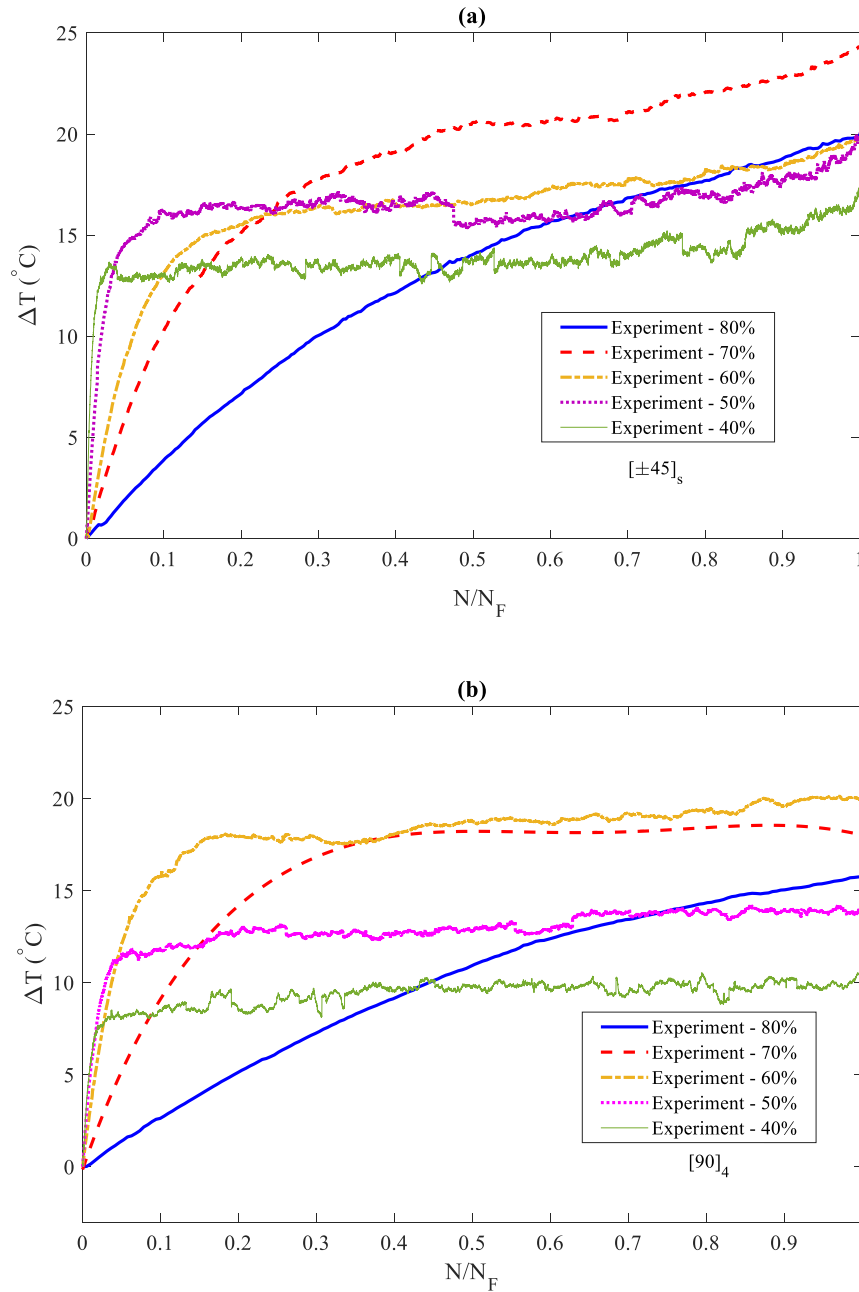
چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Jamali, B. Mohammadi, M. Mehrdad Shokrieh, *Theoretic and Experimental Fatigue Analysis of Off-axis Unidirectional Rubbery Composites Using Nonlinear Life Prediction Model*, Amirkabir J. Mech Eng., 56(4) (2024) 567-594.

DOI: [10.22060/mej.2024.23129.7720](https://doi.org/10.22060/mej.2024.23129.7720)



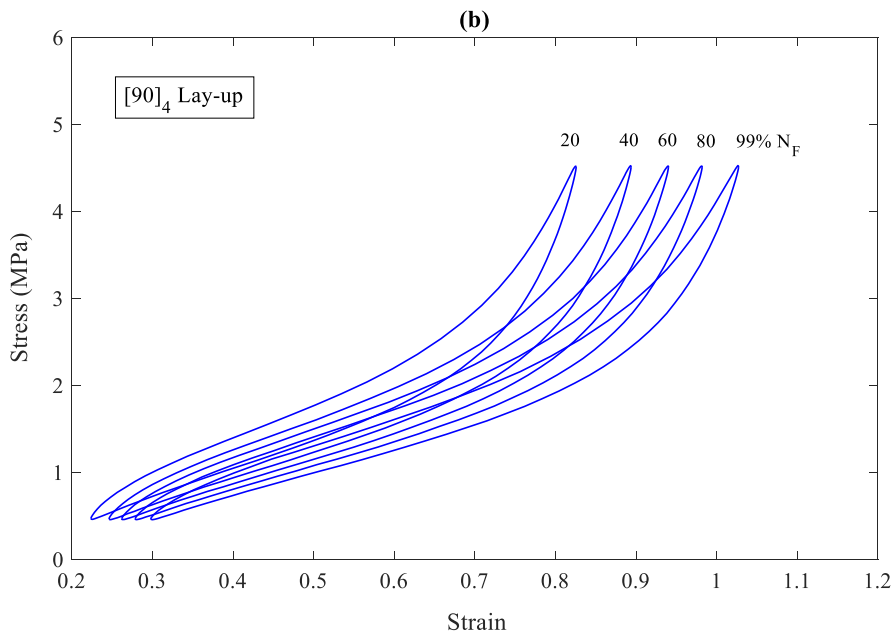
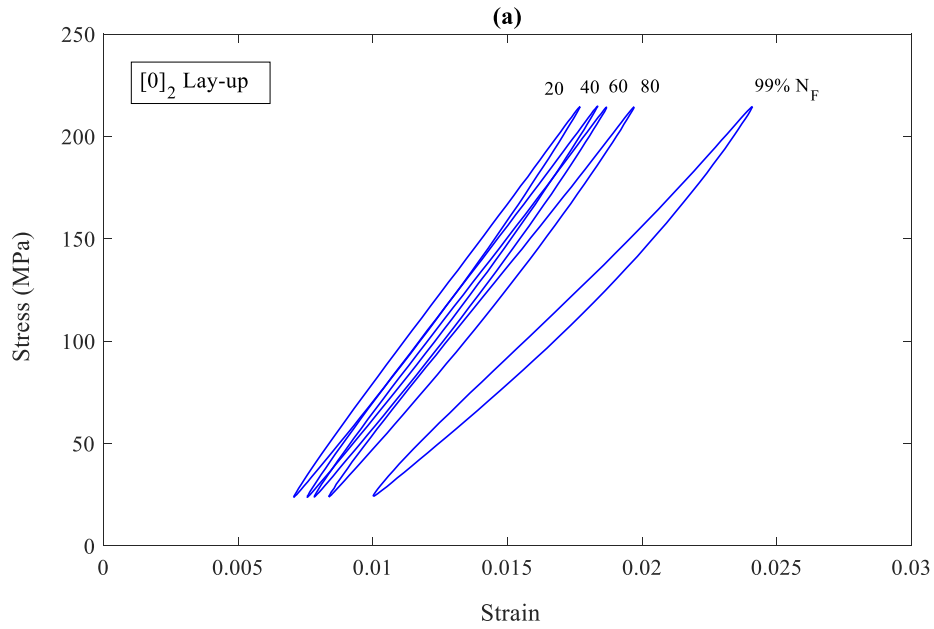
پیوست (الف):

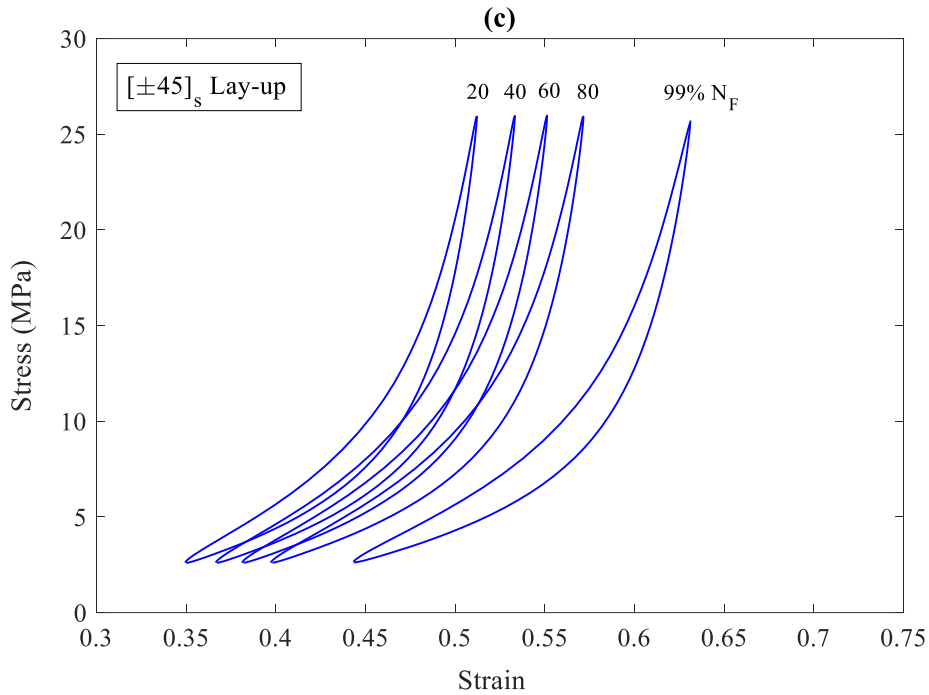


شکل ۱۲: نتایج آزمایشگاهی دمای سطح نمونه برای لایه چینی های مختلف کامپوزیت های پایه لاستیکی تحت بارگذاری خستگی: الف) لایه چینی برشی درون صفحه ای $[\pm 45]_s$ ؛ ب) لایه چینی عرضی $[(90)_4]$ ؛

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

پیوست (ب):

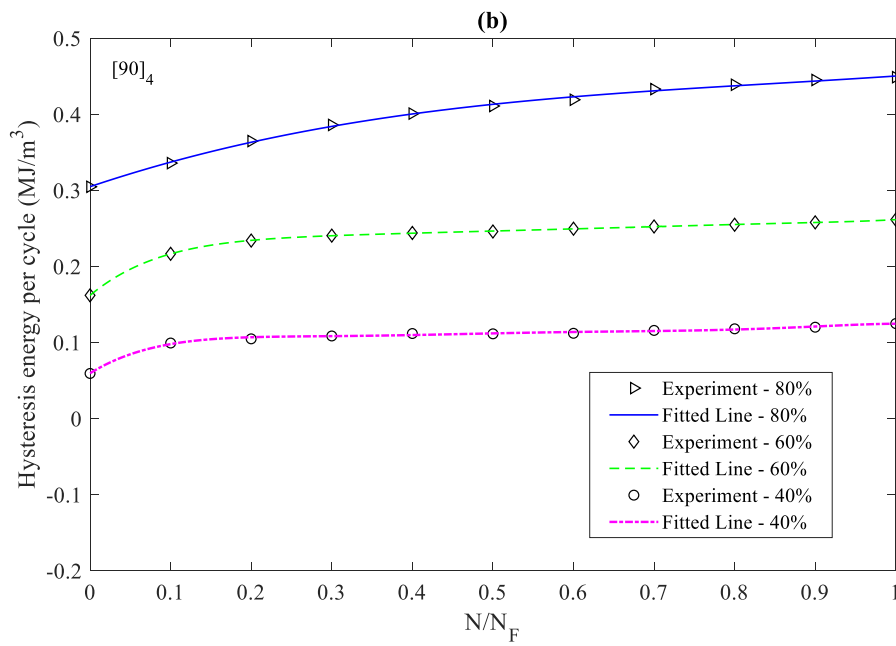
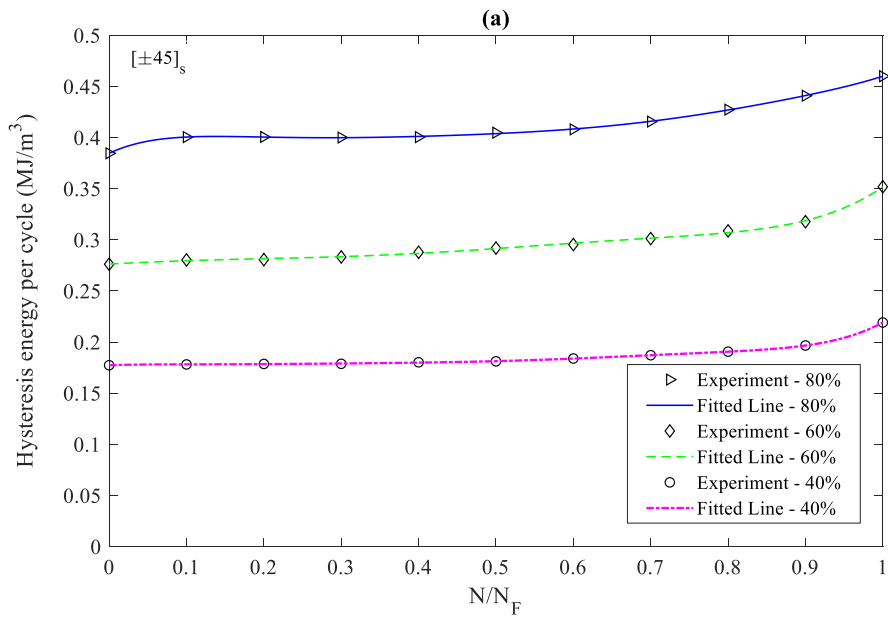


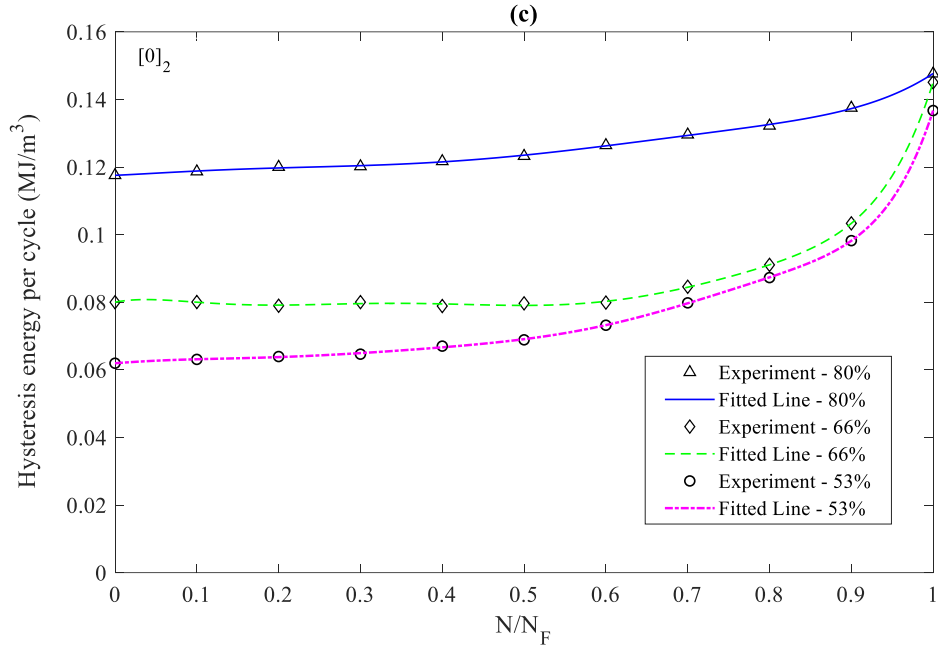


شکل ۱۳: نتایج آزمایشگاهی حلقه هیستریزیس برای لایه چینی های مختلف کامپوزیت های پایه لاستیکی تحت بارگذاری خستگی (سطح تنش اعمال شده ۶۰ درصد استحکام استاتیکی): الف) لایه چینی طولی ($[0]_2$): ب) لایه چینی عرضی ($[90]_4$): ج) لایه چینی برشی درون صفحه ای $[\pm 45]_s$

Fig. 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) $[\pm 45]_s$

پیوست (پ):





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 $[\pm 45]_s$ ؛ ب) لایه چینی عرضی $[\pm 90]_s$ ؛ ج) لایه چینی طولی $[0]_r$

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

