

Investigation of parameters affecting crack growth in metal matrix nanocomposites

Mohammad Salari*, Seyyed Mohammad Sadegh Fatemian

Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, University of Qom, Qom, Iran.

*m.salari@qom.ac.ir

ABSTRACT

In this research, the effective parameters on fatigue crack growth in metal matrix nanocomposites were investigated. Materials of the study were aluminum, nickel, magnesium, titanium and copper and fillers of single-walled carbon nanotubes. Modeling was carried out using abaqus software and the effect of parameters such as weight percentage of carbon nanotubes, initial crack angle, initial crack length, material of different backgrounds and sheet thickness was investigated. The analysis showed that the increase in the initial crack length leads to an increase in the CGR and the number of cycles of failure. An increase in the initial crack angle leads to a decrease in FGR, resulting in an increase in the number of fracture cycles. Also, CNTs with higher weight percentages showed more resistance to crack growth. By increasing the thickness of plate, FGR decreased and the number of cycles increased to complete failure. Finally, by examining the material of nanocomposites, it can be said that the fatigue strength of materials with single - walled carbon nanotubes is relatively high in the order of mg-al-cu-ni and ti, respectively. The results showed that proper combination of materials and control of the crack geometry can help to increase the life of parts.

KEYWORDS

Nanocomposite, Metal matrix, Crack length, Crack angle, Fatigue growth rate

* Corresponding Author: Email: m.salari@qom.ac.ir

1. Introduction

The topic of fracture mechanics and strengthening of cracked structures against crack propagation and growth is one of the most important fields in mechanical engineering. Nanocomposites, due to their unique properties, are recognized as key materials in a wide range of engineering applications, including aerospace, automotive, and biomedical industries. Among these, metal matrix nanocomposites are particularly susceptible to corrosion, excessive stress, and fracture [1]; therefore, their reinforcement, strength enhancement, and fracture prevention have become major focuses of current research. In recent years, the use of carbon nanotubes in the fabrication of nanocomposites has increased due to their outstanding mechanical properties. Carbon nanotubes possess extremely high tensile strength and Young's modulus, and these characteristics have attracted considerable attention from researchers. Meanwhile, a study titled 'Investigation of Fracture Toughness Parameters of Epoxy Matrix Nanocomposites for Various Crack Angles' by Faridoun et al. in 2012 showed that adding carbon nanotubes to polymer-based materials can improve mechanical properties, including fracture toughness [2]. Also, in a study titled 'Tensile Properties of Epoxy Polymer Reinforced with Nanosilica Particles and its Simulation by XFEM Method in Abaqus Software' by Wang et al. in 2013, it was demonstrated that increasing the content of nanofillers increases the tensile strength of nanocomposites [3]. In 2024, Salari and Fatemian investigated crack growth in metal matrix nanocomposites and showed the impact of various parameters on the fatigue life of the structure [4].

2. Relationship governing the problem

In this paper, considering that the performed modeling is in the macro state, therefore, the best relationships that can be used to calculate the properties of the nanocomposite are the mixture rule relationships. This rule is a general term for a formulation that describes the properties of a composite material made from two or more substances. The mixture rule can be used to estimate the equivalent properties of a composite, such as: density, elastic modulus, Poisson's ratio, yield stress, maximum principal stress, and energy release rate based on the properties and the ratio of the matrix and filler components. [5-9]

$$\rho_c = \rho_f v_f + \rho_m v_m \quad (1)$$

$$E_c = E_f v_f + E_m v_m \quad (2)$$

$$U_c = U_f v_f + U_m v_m \quad (3)$$

$$\sigma_c = \sigma_f v_f + \sigma_m v_m \quad (4)$$

$$G_{(lc)c} = G_{(lc)f} v_f + G_{(lc)m} v_m \quad \text{and} \quad G_{lc} = \frac{K_{lc}^2}{E} \quad (5)$$

$$G_{(llc)c} = G_{(llc)f} v_f + G_{(llc)m} v_m \quad \text{and} \quad G_{llc} = \frac{K_{llc}^2 (1-\nu^2)}{E} \quad (6)$$

To define the crack path and growth rate in Abaqus software, Paris's law and its transformations within the software are used, which are as follows:

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m \quad (7)$$

$$N_0 = C_1 \Delta G^{C_2} \quad (8)$$

$$\frac{da}{dN} = C_3 (\Delta G_{eq})^{C_4} \quad (9)$$

$$C_3 = CE^{\frac{m}{2}} \quad (10)$$

$$C_4 = \frac{m}{2} \quad (11)$$

Using the coefficients C and m in Paris's equation, the crack growth rate in Abaqus software can be determined, which is represented by the parameters C1, C2, C3, C4.

3. Finite element analysis

For the simulation of the model, a square sheet with dimensions of 1.0 by 1.0 meter and a thickness of 0.003 meters, along with an initial crack of 0.05 meters in length, was considered and modeled in Abaqus software. In this research, the crack is considered to be an edge crack. Then, to investigate the parameters mentioned in the problem description section, the material properties were applied to the model by combining single-walled and multi-walled carbon nanotubes with the aforementioned metal matrices at weight percentages of 0.5%, 1%, 1.5%, 3%, and 5%, according to the table below.

Table 1. Al + SWCNT 0.5%

Composites	C1 (cycle/P a ²)	C2 (Unit less)	C3 (m/cycle/ Pa ⁴)	C4 (Unit less)
Al (6061- T6)+swcnt [10]	15.871 2	-2.1028	0.0228	1.5 745

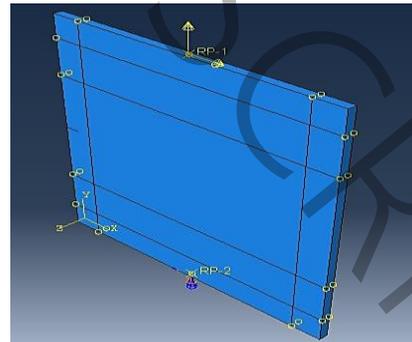


Figure 1. modeled sheet view in Abaqus

4. Results and Discussion

This paper analyzed the fatigue crack growth in metal-matrix nanocomposites reinforced with carbon nanotubes. For this study, five matrix materials were selected: aluminum, nickel, magnesium, titanium, and copper. Subsequently, to analyze and study the fatigue crack growth, parameters such as initial crack length, initial crack orientation, weight percentage of single-walled carbon nanotubes, the type of metal used in the nanocomposite matrix, and the sheet thickness were investigated using the finite element software ABAQUS. The summary of the results is as follows: a) With the increase in initial crack length, the slope of the crack length curve increases, and the crack growth rate also increases. In other words, as the initial crack length increases, the initial stress intensity factor increases, leading to an increased fatigue growth rate and a reduced number of cycles to complete fracture of the component. Essentially, the component fails sooner. b) With the increase in the initial crack angle, the equivalent stress intensity factor, or the total energy release rate (G_{eq}), decreases, consequently reducing the fatigue growth rate and increasing the number of cycles to complete fracture of the component. This means the component fails later.

In other words, as the crack angle increases, the effect of Mode II is enhanced, and the effect of Mode I is reduced. Since Mode I is more dangerous for crack growth, this results in a reduced crack growth rate and an increased number of cycles. Therefore, a crack angle of zero degrees (pure Mode I) leads to earlier failure, and vice versa. c) Based on the obtained results, it can be stated that with an increase in the weight percentage of single-walled carbon nanotubes, the slope of the crack length versus the number of cycles curve decreases because the fatigue growth rate is reduced, and the number of cycles to complete fracture of the component increases, leading to later failure. In other words, since the fatigue strength of nanoparticles is greater than that of the matrix, it is observed that as the weight percentage of SWCNTs increases, the material's resistance to crack growth increases, and the number of cycles to fracture also increases. d) Given the varying resistance to crack growth in different nanocomposite matrices, the fatigue crack growth rate and the number of cycles to fracture for these materials differ. Based on this, we can conclude that the fatigue strength of materials combined with single-walled carbon nanotubes, from lowest to highest, is as follows: Magnesium - Aluminum - Copper - Nickel - Titanium e) Finally, by examining the obtained results, it is observed that as the thickness of the nanocomposite sheet increases, the stress state transitions from plane stress towards plane strain. The differing stress components in these two states near the crack tip cause variations in the fatigue crack growth rate. With these considerations, it is seen that increasing the nanocomposite sheet thickness slightly reduces the stress intensity factor and the fatigue growth rate, and increases the number of cycles to complete fracture, leading to later failure. However, these changes are not as significant as those related to other parameters. It has

also been assumed that the fracture toughness of the material remains constant and its variations with material thickness are disregarded.

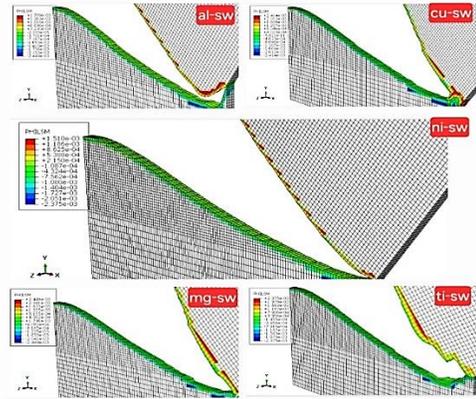


Figure 2. Crack surface obtained from the combination of SWCNT nanotubes with different matrices

5. References

- [1] R. Jones, S. Pitt, D. Hui, A. Brunner, Fatigue crack growth in nano-composites, *Compos Struct*, 99 (2013) 375-9.
- [2] A. Fereidoon, L. Mottahedin, S. T. Latibari, Investigation of fracture toughness parameters of epoxy nanocomposites for different crack angles, *Journal of Polymer Engineering*, 32 (2012) 311-7.
- [3] Z. Wang, F. Liu, W. Liang, L. Zhou, Study on Tensile Properties of Nanoreinforced Epoxy Polymer: Macroscopic Experiments and Nanoscale FEM Simulation Prediction, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013 (2013) 1-8.
- [4] M. Salari, S.M.S. Fatemian, Investigation of crack growth in metal matrix nanocomposites, *Second National Conference on Structural and Fluid Mechanics*, Bonab, Iran, (2024) (in persian).
- [5] N. R. Burhani, Effect of Compaction Pressure on Final Properties of Multiwall Carbon Nanotubes (MWCNTs) reinforced Aluminum (Al) Composite, *Seri Iskandar, Malaysia: Universiti Teknologi PETRONAS*, (2010).
- [6] B. N. Gohain, S. Kirtania, Evaluation of Axial Young's Modulus of CNT-based Composites using Square, Hexagonal and Cylindrical Representative Volume Elements, *ADBU-Journal of Engineering Technology*, 6 (2017).
- [7] S. S. Salam, N. M. Mehat, S. Kamaruddin, Optimization of Laminated Composites Characteristics via integration of Chamis Equation, Taguchi method and Principal Component Analysis, *IOP Conf Series: Materials Science and Engineering*, 551 (2019) 1-8.
- [8] S. M. A. K. Mohammed, D. L. Chen, Carbon Nanotube-Reinforced Aluminum Matrix Composites, *Advanced Engineering Materials*, 22 (2019).
- [9] D. Kopeliovich, Estimations of composite materials properties, <https://www.substech.com>, (2023).
- [10] S. Arifeen, G. Potirmiche, A. Elshabini, F. Barlow, Modeling of Failure in Aluminum Alloy Braze for a High Temperature Thermoelectric Assembly, *46th International Symposium on Microelectronics (IMAPS 2013)*, Orlando, FL USA, (2013).

بررسی پارامترهای مؤثر بر رشد ترک در نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی

محمد سالاری*، سید محمد صادق فاطمیان

دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه قم، قم، ایران
* m.salari@qom.ac.ir

چکیده

در این تحقیق، پارامترهای مؤثر بر رشد ترک خستگی در نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی مورد بررسی قرار گرفته است. جنس زمینه‌های مورد بررسی در این پژوهش آلومینیوم، نیکل، منیزیم، تیتانیوم و مس و پرکننده‌ها نانولوله‌های کربنی تک‌جداره در نظر گرفته شدند. مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس انجام و تأثیر پارامترهایی از جمله درصد وزنی نانولوله‌های کربنی، طول ترک اولیه، زاویه ترک اولیه، جنس زمینه‌های مختلف و ضخامت ورق بررسی گردید. تحلیل‌ها نشان داد که افزایش طول ترک اولیه منجر به افزایش نرخ رشد ترک و کاهش تعداد سیکل‌های شکست می‌شود. افزایش زاویه ترک اولیه منجر به کاهش نرخ رشد خستگی شده که نتیجه آن افزایش تعداد سیکل‌های شکست است. همچنین، نانولوله‌های کربنی با درصد وزنی بالاتر، مقاومت بیشتری در برابر رشد ترک نشان دادند. ضمناً با افزایش ضخامت ورق، نرخ رشد خستگی کاسته شده و تعداد سیکل تا شکست کامل قطعه افزایش می‌یابد. در نهایت با بررسی جنس زمینه نانوکامپوزیت می‌توان گفت که استحکام خستگی مواد ترکیب شده با نانولوله کربنی تک‌جداره از کم به زیاد به ترتیب منیزیم - آلومینیوم - مس - نیکل و تیتانیوم است. این پژوهش نشان داد که ترکیب مناسب مواد و کنترل پارامترهای هندسی ترک می‌تواند به افزایش طول عمر قطعات کمک کند.

کلمات کلیدی

نانوکامپوزیت، زمینه فلزی، طول ترک، زاویه ترک، نرخ رشد خستگی

۱- مقدمه

مبحث مکانیک شکست و مقاوم‌سازی سازه‌های دارای ترک در برابر انتشار و گسترش آن یکی از مهم‌ترین مباحث علم مهندسی مکانیک است. نانوکامپوزیت‌ها به دلیل خواص منحصر به فرد خود، به‌عنوان مواد اصلی در کاربردهای متنوع مهندسی از جمله صنایع هوافضا، خودرو و پزشکی شناخته شده‌اند و نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی یکی از کامپوزیت‌هایی هستند که بسیار در معرض خوردگی، تنش بیش از اندازه و شکست هستند [۱]؛ بنابراین مقاوم‌سازی، افزایش استحکام و جلوگیری از شکست آن‌ها بخش بزرگی از مطالعات محققین را امروزه به خود اختصاص داده است. در سال‌های اخیر، استفاده از نانولوله‌های کربنی در ساخت نانوکامپوزیت‌ها به دلیل خواص مکانیکی عالی، افزایش یافته است. نانولوله‌های کربنی از استحکام کششی و مدول یانگ بسیار بالایی برخوردار هستند و به دلیل این خواص، توانسته‌اند توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کنند.

پژوهش‌های مختلفی به بررسی تأثیر مشخصات نانولوله‌های کربنی بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی پرداخته‌اند. اگرچه پژوهش‌های انجام شده در این زمینه اکثراً مربوط به نانوکامپوزیت‌های زمینه غیرفلزی می‌باشند. در این میان، مطالعه‌ای تحت عنوان بررسی پارامترهای چقرمگی شکست نانوکامپوزیت‌های زمینه اپوکسی برای زوایای مختلف ترک توسط فریدون و همکاران در سال ۲۰۱۲ نشان داده است که با افزودن نانولوله‌های کربنی به مواد مبتنی بر پلیمر می‌توان خواص مکانیکی از جمله چقرمگی شکست را بهبود بخشید [۲]. همچنین، در مطالعه‌ای با عنوان ویژگی کششی پلیمر اپوکسی تقویت شده با ذرات نانوسیلیس و شبیه‌سازی آن با روش اجزاء محدود

توسعه یافته^۱ در نرم افزار آباکوس که توسط وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۳ انجام شد، نشان داد که با افزایش محتوای نانو پرکننده‌ها استحکام کششی نانوکامپوزیت‌ها افزایش می‌یابد [۳]. در ادامه، مطالعه‌ای با عنوان تجزیه و تحلیل رشد ترک نانوکامپوزیت پلیمری تقویت شده بوسیله نانولوله کربنی با استفاده از روش المان محدود توسعه یافته توسط نگی و همکاران در سال ۲۰۱۸ صورت پذیرفت که نشان داد هنگامی که محتوای نانولوله کربنی تک‌جداره و چند جداره داخل ماتریس افزایش پیدا می‌کند، بهبود در مدول الاستیک دیده می‌شود [۴]. همچنین مطالعه‌ای با عنوان بررسی خواص مکانیکی، ساز و کار شکست و رشد ترک نانوکامپوزیت‌های با زمینه پلی آمید-آکریلوتیریل بوتان دی آن تقویت شده با نانوذرات خاک رس توسط نخعی و همکاران در سال ۲۰۲۰ انجام شد که نشان داد افزودن مقدار درصد حجمی مشخصی از مواد تقویت کننده باعث افزایش استحکام کششی و مدول کششی می‌شود [۵]؛ در سال ۲۰۲۲ مطالعه‌ای تحت عنوان پایش مجازی رشد ترک در صفحات نانوکامپوزیتی پلیمری تقویت شده با نانولوله کربنی در نرم‌افزار انسیس به روش اجزاء محدود توسعه یافته که توسط رودریگز و همکاران صورت گرفت، یک طرح عددی مبتنی بر المان محدود برای محاسبه تغییرات مقاومت ناشی از حضور ترک‌ها و رشد ترک را ارائه کرد [۶]. در سال ۲۰۲۴ سالاری و فاطمیان رشد ترک در نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی را بررسی کرده و تاثیر پارامترهای مختلف بر عمر خستگی سازه را نشان دادند [۷]. Malaki و همکاران در سال ۲۰۲۰ در مقاله خود به بررسی رفتار خستگی نانوکامپوزیت‌های با زمینه فلزی^۲ با توجه ویژه به تحقیقات اخیر انجام شده بر روی این نوع مواد پرداخته‌اند. اعتقاد بر این است که انتخاب مواد، ویژگی‌های ریزساختاری، پارامترهای تولید و پردازش و غیره تأثیر غالبی بر پاسخ خستگی نانوکامپوزیت‌های با زمینه فلزی دارند. [۸]

Shin و همکاران در سال ۲۰۱۸ رفتار خستگی کامپوزیت‌های ماتریسی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴^۳ تقویت شده با نانولوله‌های کربنی چندجداره^۴ تحت شرایط آزمایش خستگی کششی-فشاری را بررسی کرده‌اند. نتیجه این شده است که استحکام کششی و خستگی کامپوزیت‌های Al2024/MWCNT با افزایش مقدار الیاف افزایش می‌یابد و هنگامی که کامپوزیت به صورت چرخه‌ای بارگذاری می‌شود، ناسازگاری ایجاد شده بین ماتریس و الیاف باعث بیرون کشیدن الیاف (در حالت کشش نشان داده نشده است) می‌شود و هنگام انتشار ترک‌ها به عنوان یک پل عمل می‌کند. [۹]

Vaghari و همکاران در سال ۲۰۱۹ به بررسی رفتار خستگی نانوکامپوزیت‌های پایه فلزی Al/Al2O3 پرداختند. درصدهای مختلف Al2O3 به عنوان تقویت کننده (۴، ۶ و ۸ درصد وزنی) در نظر گرفته شد و نتایج نشان داد که حضور نانوذرات Al2O3 تا ۶ درصد وزنی، استحکام خستگی نانوکامپوزیت‌های Al/Al2O3 را افزایش می‌دهد، در حالی که مقدار بالاتر تقویت کننده، تأثیر مخربی بر استحکام خستگی دارد. [۱۰]

Mahan و همکاران در سال ۲۰۲۴ با استفاده از یک سیستم تزریق پودر جدید، نانوذرات TiO2 با اندازه متوسط ذرات 30 ± 5 نانومتر را به زمینه آلیاژ AA2024 اضافه کردند. تأثیر مقدار TiO2 بر عمر خستگی قبل و بعد از عملیات حرارتی بررسی شد و نتایج نشان داد که خواص خستگی AA2024 با نانوذرات TiO2 پس از عملیات حرارتی افزایش یافته است. بهبود بهینه در خواص خستگی در ۵ درصد وزنی TiO2 پس از عملیات حرارتی به دست آمد که عمر خستگی آن در مقایسه با نمونه پایه ۱۴،۷۱ درصد بهبود یافته بود. [۱۱]

در سال ۲۰۲۵ آقای Pu و همکاران رفتار رشد ترک خستگی کوتاه در شرایط ثابت و اضافه بار ورق کامپوزیت TiB2/Al-Cu-Mg با استفاده از آزمایش خستگی درجا را بررسی نموده و همبستگی بین نوسانات نرخ رشد ترک خستگی و توزیع ذرات TiB2 با توصیف ریزساختاری مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. [۱۲]

¹ XFEM

² MMNC

³ Al2024

⁴ MWCNTs

در سال ۲۰۲۴ آقای Balakumar و همکاران رفتار رشد ترک خستگی کامپوزیت زمینه فلزی تیتانیوم ساخته شده به روش افزایشی با ذرات TiB در دمای اتاق با استفاده از یک نمونه کششی فشرده و در نسبت تنش ۰/۱ را مورد مطالعه قرار دادند. آزمایش‌های نرخ رشد ترک خستگی عمود و موازی با ماده افزودنی با هدف یافتن هرگونه ناهمسانگردی خستگی در دمای اتاق انجام شد. یافته‌ها نشان می‌دهد که کامپوزیت Ti-TiB ساخته شده به روش افزایشی، خواص خستگی ایزوتروپیک را در رابطه با رشد ترک خستگی نشان می‌دهد. [۱۳]

در سال ۲۰۲۳ آقای Wang و Shin یک مدل چند مقیاسی برای پیش‌بینی رفتار رشد ترک خستگی نانوکامپوزیت‌های نانوالیاف کربن^۵ /پوکسی توسعه داده‌اند. آنها بر بررسی تأثیر مکانیسم‌های چقرمگی میکروسکوپی مشاهده‌شده تجربی (جدا شدن نانوالیاف کربن، رشد نانوحفره‌های پلاستیکی متعاقب آن و بیرون کشیدن نانوالیاف کربن‌ها) برای پیش‌بینی رفتار رشد ترک خستگی نانوکامپوزیت‌های نانوالیاف کربن/پوکسی تمرکز کرده‌اند. [۱۴]

به طور کلی، پژوهش‌ها در حوزه ارزیابی نانوکامپوزیت‌ها اکثراً با زمینه‌های پلیمری و یا خاک رس بوده و درصد بسیار کمی از مقالات مربوط به کامپوزیت‌های زمینه فلزی می‌باشد. همچنین بیشتر تمرکز این مقالات بر افزایش عمر مواد و جلوگیری از رشد ترک‌های حاصل شده از تنش‌ها می‌باشد و رفتارهای ترک و رشد آن‌ها کمتر مورد ارزیابی قرار گرفته است.

از آنجایی که آزمایش‌های تجربی بر روی نانوکامپوزیت‌ها فرایندی پرهزینه و زمان‌بر است، در سال‌های اخیر روش‌های محاسباتی تجزیه و تحلیل نانوکامپوزیت‌ها از جمله مکانیک محیط پیوسته به همراه روش اجزاء محدود بسط و گسترش یافته‌اند. در این مقاله، رفتار خستگی نانوکامپوزیت‌های فلزی تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی با استفاده از شبیه‌سازی در نرم افزار المان محدود آباکوس و روش اجزاء محدود توسعه یافته مورد بررسی قرار گرفته است. مواد زمینه فلزی مورد استفاده در این تحقیق شامل آلومینیوم، تیتانیوم، نیکل، مس و منیزیم بودند. نانولوله‌های کربنی به‌عنوان ماده تقویت‌کننده در دو حالت تک‌جداره و چند جداره به نانوکامپوزیت‌ها اضافه شدند و تأثیر پارامترهایی همچون طول ترک اولیه، زاویه ترک اولیه، درصد وزنی نانولوله‌ها، جنس زمینه نانوکامپوزیت و ضخامت ورق بر رشد ترک خستگی مورد بررسی قرار گرفتند. در تحلیل رشد ترک خستگی در نانوکامپوزیت‌ها به دو صورت عمل می‌شود. اگر هدف بررسی و مطالعه یک قسمت کوچک از ورق برای مثال اینتراکشن یک یا دو نانوالیاف در زمینه باشد، ماده بصورت میکرو مدل شده و تحلیل می‌شود. اما در حالتی که هدف بررسی و تحلیل رشد ترک در کل ورق که حاوی دهها هزار نانوالیاف می‌باشد مدلسازی میکرو عملاً غیرممکن بوده و مدلسازی بصورت ماکرو می‌باشد. این کار در اکثر مقالات در زمینه رشد ترک خستگی در نانوکامپوزیت‌ها انجام شده و در مقاله حاضر هم از مدلسازی ماکرو استفاده شده است.

۲- روابط حاکم بر مساله

در این مقاله با توجه به این که مدلسازی انجام شده به حالت ماکرو است، بنابراین بهترین روابطی که می‌توان برای محاسبه خواص نانوکامپوزیت استفاده کرد، روابط قانون مخلوط‌ها است. این قانون یک اصطلاح کلی برای فرموله‌ای است که خصوصیات یک ماده کامپوزیت ساخته شده از دو یا چند ماده را توصیف می‌کند. از قانون مخلوط‌ها می‌توان برای برآورد خواص معادل یک کامپوزیت مانند: چگالی، مدول الاستیک، ضریب پواسون، تنش تسلیم، حداکثر تنش اصلی، نرخ رهايش انرژی بر اساس خواص و نسبت اجزای ماده زمینه به پرکننده استفاده کرد. بنابراین معادلات مورد نیاز در این تحقیق به صورت زیر به دست می‌آیند: [۱۵-۱۹]

$$\rho_c = \rho_f v_f + \rho_m v_m \quad (۱)$$

$$E_c = E_f v_f + E_m v_m \quad (۲)$$

$$v_c = v_f v_f + v_m v_m \quad (۳)$$

$$\sigma_c = \sigma_f v_f + \sigma_m v_m \quad (۴)$$

⁵ CNF

$$\text{and } G_{Ic} = \frac{K_{Ic}^2}{E} \quad G_{(Ic)c} = G_{(Ic)f} \nu_f + G_{(Ic)m} \nu_m \quad (5)$$

$$\text{and } G_{IIc} = \frac{K_{IIc}^2 (1-\nu^2)}{E} \quad G_{(IIc)c} = G_{(IIc)f} \nu_f + G_{(IIc)m} \nu_m \quad (6)$$

در روابط فوق، ν درصد حجمی، ρ چگالی، E مدول الاستیسیته، ν نسبت پواسون، σ تنش نهایی، K_{Ic} و K_{IIc} به ترتیب ضریب شدت تنش بحرانی مود یک و دو و G_{Ic} و G_{IIc} به ترتیب نرخ رهايش انرژی بحرانی مود یک و مود دو هستند. همچنین اندیس f مربوط به خاصیت الیاف و اندیس m مربوط به خاصیت زمینه کامپوزیت است. همچنین برای تعریف مسیر و نرخ رشد ترک در نرم افزار آباکوس، از روابط پاریس و تبدیلات آن در نرم افزار استفاده می شود که به شرح زیر هستند [۲۰]:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (7)$$

$$N_0 = C_1 \Delta G^{C_2} \quad (8)$$

$$\frac{da}{dN} = C_3 (\Delta G)^{C_4} \quad (9)$$

$$C_3 = CE^{\frac{m}{2}} \quad (10)$$

$$C_4 = \frac{m}{2} \quad (11)$$

با استفاده از ضرایب C و m در معادله پاریس می توان نرخ رشد ترک در نرم افزار آباکوس را مشخص کرد که با پارامترهای C_1, C_2, C_3, C_4 نمایش داده می شود؛ در حقیقت می توان گفت که C_1, C_2 بیانگر پارامترهای شروع رشد ترک و C_3, C_4 بیانگر پارامترهای مسیر رشد ترک هستند که معادله (۹) همان معادله پاریس است که بر حسب نرخ رهايش انرژی نوشته شده است. در حالت مود ترکیبی معادله (۹) بر حسب نرخ رهايش انرژی معادل و بصورت زیر نوشته می شود:

$$\frac{da}{dN} = C_3 (\Delta G_{eq})^{C_4} \quad (12)$$

۳- تحلیل المان محدود

برای شبیه سازی مدل، ورقی مربعی شکل به ابعاد ۰/۱ در ۰/۱ متر و به ضخامت ۰/۰۰۳ متر به همراه ترک اولیه به طول ۰/۰۰۵ متر در نرم افزار آباکوس در نظر گرفته شده و مدل سازی شد. در این پژوهش ترک به صورت لبه ای در نظر گرفته شده است. سپس برای بررسی پارامترهایی که در قسمت شرح مساله بیان شد، خواص ماده از ترکیب نانولوله های کربنی تک جداره و چند جداره با زمینه های فلزی نام برده شده در درصد وزنی های ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۳ و ۵ درصد مطابق جدول زیر به مدل اعمال گردید.

جدول ۱: خواص مواد مورد استفاده در پژوهش در حالت نانوکامپوزیت SWCNT با درصد وزنی ۰/۵٪

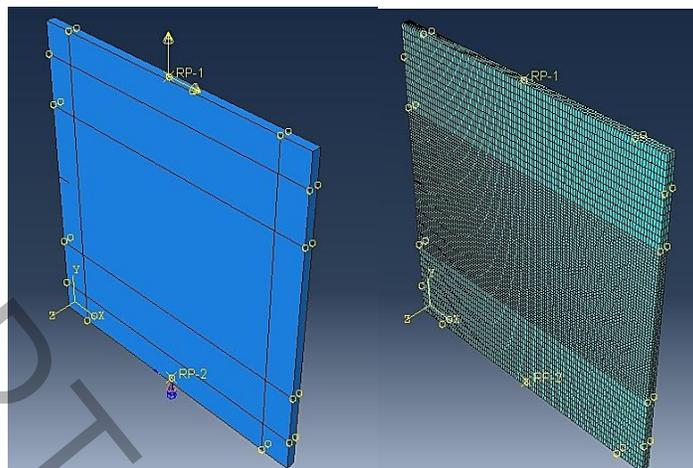
Table 1: Properties of materials used in the research in the state of SWCNT nanocomposite with a weight percentage of 0.5%

کامپوزیت	چگالی (Kg/m ³)	مدول الاستیسیته (Pa)	نسبت پواسون (Unit less)	تنش اصلی ماکزیمم (Pa)	تنش تسلیم (Pa)
Al (6061-T6)+swcnt [۲۱-۲۵]	۲۶۷۷/۲	۸۱/۳۷۷×۱۰ ^۹	۰/۳۲۹۶	۱۶۴۵/۸×۱۰ ^۶	۲۷۶×۱۰ ^۶

Ni (Pure)+swent [۲۶-۳۱]	۸۵۶۹/۵	۲۳۴/۲۴×۱۰ ^۹	۰/۳۰۹۶	۴۶۱۰/۲×۱۰ ^۶	۷۰×۱۰ ^۶
Mg (Pure)+swent [۲۱]و[۳۲-۳۹]	۱۷۳۰/۶	۵۳/۳۰۹×۱۰ ^۹	۰/۲۹۰۱	۹۵۹/۲۲×۱۰ ^۶	۲۷/۵×۱۰ ^۶
Ti (Ti-6Al-4V)+swent [۲۱]و[۴۰-۴۲]	۴۴۲۹	۱۳۵/۵۲×۱۰ ^۹	۰/۳۱۹۵	۳۱۳۸/۹×۱۰ ^۶	۸۸۰×۱۰ ^۶
Cu (Pure)+swent [۴۳]	۷۷۱۰/۶	۱۳۴/۷۴×۱۰ ^۹	۰/۳۳۸۵	۳۹۳۰/۹×۱۰ ^۶	۳۳×۱۰ ^۶

کامپوزیت	G_{IC} (j/m ²)	G_{IIC} (j/m ²)	ضریب رابطه پاریس (C) (m/ (cycle×Pa×m ^{1/2}))	توان رابطه پاریس (m) (Unit less)
Al (6061-T6)+swent [۲۳و۲۵]	۱۴/۸۰۳×۱۰ ^۳	۱۰/۸۵۳×۱۰ ^۳	۱/۵۰۹۵×۱۰ ^{-۱۹}	۳/۱۴۹۰
Ni (Pure)+swent [۳۱و۲۸و۲۷]	۶/۰۴۴۵×۱۰ ^۳	۳/۳۵۱۲×۱۰ ^۳	۴/۸۲۱۴×۱۰ ^{-۱۹}	۲/۵۱۸۲
Mg (Pure)+swent [۳۸و۳۷]	۰/۵۹۷۶۴۷۶×۱۰ ^۳	۰/۱۹۸۴۷۰۴×۱۰ ^۳	۹/۸۰۰۶×۱۰ ^{-۲۰}	۲/۴۶۳۰
Ti (Ti-6Al-4V)+swent [۴۰و۲۱]	۴۸/۸۹۷×۱۰ ^۳	۸/۸۰۰۷×۱۰ ^۳	۲/۴۸۹۶×۱۰ ^{-۱۹}	۳/۰۲۷۵
Cu (Pure)+swent [۴۳]	۰/۴۲۵۱۶۳۳×۱۰ ^۳	۰/۳۷۵۸۷۹۶×۱۰ ^۳	۴/۳۴۸۳×۱۰ ^{-۱۹}	۳/۰۸۱۸

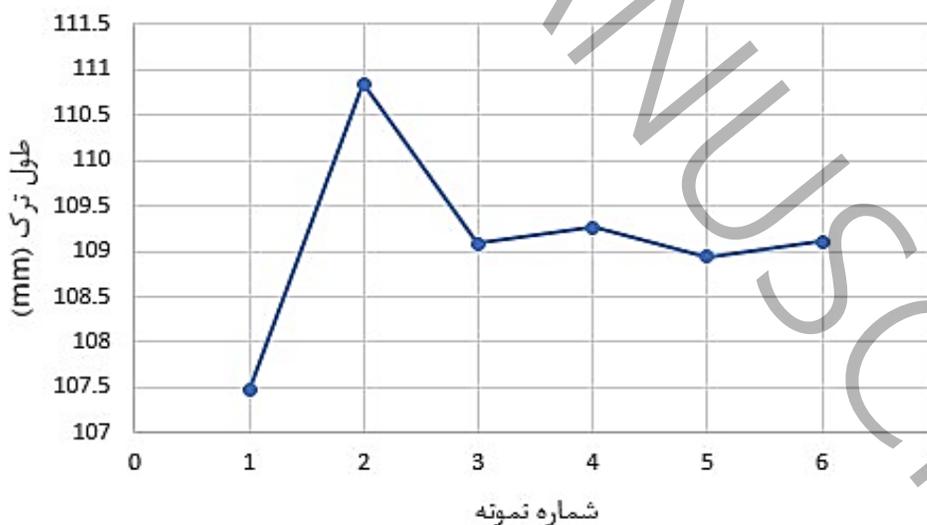
کامپوزیت	C_1 (cycle/Pa ^{c2})	C_2 (Unit less)	C_3 (m/cycle/Pa ^{c4})	C_4 (Unit less)
Al (6061-T6)+swent [۴۴]	۱۵/۸۷۱۲	-۲/۱۰۲۸	۰/۰۲۲۸	۱/۵۷۴۵
Ni (Pure)+swent [۴۵]	۱۸/۶۳۸۹	-۰/۶۵۵۲	۹/۹۷۰۴×۱۰ ^{-۵}	۱/۲۵۹۱
Mg (Pure)+swent [۴۶]	۰/۲۱۱۵	-۰/۵۸۸۷	۱/۵۸۹۷×۱۰ ^{-۶}	۱/۲۳۱۵
Ti (Ti-6Al-4V)+swent [۴۵]	۰/۷۶۶۹	-۰/۸۱۰۹	۰/۰۱۷۷	۱/۵۱۳۷
Cu (Pure)+swent [۴۳]	۰/۰۶۷۴	-۰/۰۰۴	۰/۰۶۱۳	۱/۵۴۰۹



شکل ۱: نمای ورق مدل شده پروژه در نرم افزار آباکوس
Figure 1: View of the modeled project sheet in Abaqus software

همان طور که در شکل فوق مشخص است لبه بالایی ورق تحت بارگذاری همزمان برشی و کششی قرار دارد و ترک نیز به روش اجزاء محدود توسعه یافته تعریف می شود. همچنین از معیار آسیب^۶ Maxps در تعریف خواص ماده استفاده شده است. جهت بدست آوردن اندازه المانی که نتایج صحیح و کم خطایی بدهد، تحلیلی به نام آزمون همگرایی مش انجام می شود. بدین صورت که در اندازه های مختلف المان از بزرگ به کوچک تحلیل رشد ترک صورت می گیرد تا نتیجه تقریباً ثابت و همگرا شود. سپس ادامه پژوهش را با اندازه مشی که از این آزمون بدست آوردیم، انجام می دهیم. نتایج آزمون همگرایی مش انجام شده به طول ترک اولیه ۵ میلی متر و خواص ماده نانوکامپوزیت AL+SWCNT در ۰/۵ درصد وزنی در نمودار شکل ۲ آمده است.

نمودار آزمون همگرایی مش



⁶ Maximum principal stress

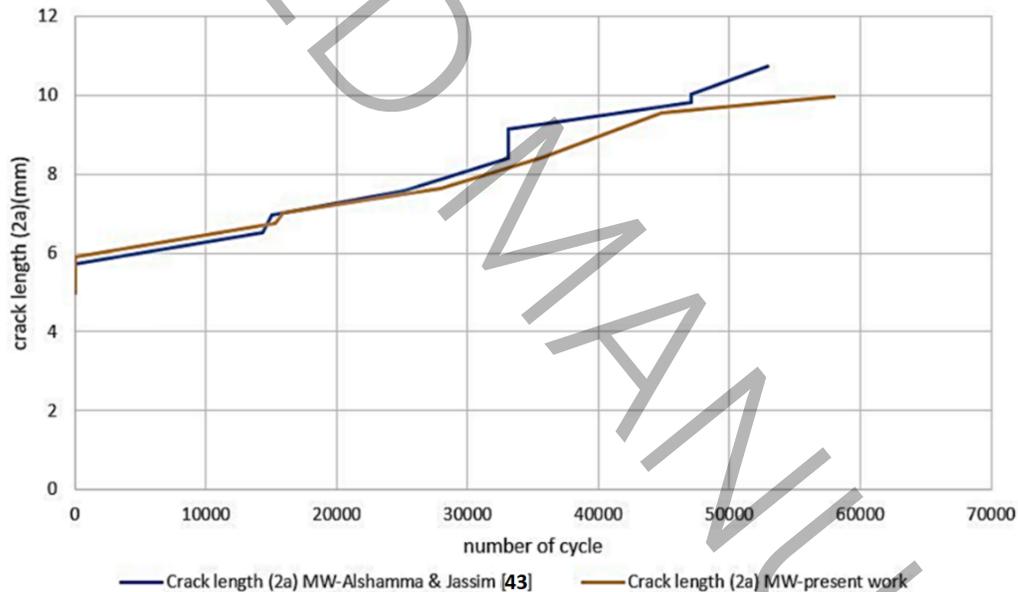
شکل ۲: نمودار آزمون همگرایی مش

Figure 2: Mesh convergence test diagram

همان طور که از نمودار فوق مشخص می‌باشد، نتایج تقریباً در نقطه ۵ همگرا شده و این اندازه المان برای تحلیل عددی مساله مناسب است. در این اندازه مش، تعداد المان‌ها ۳۲۲۵۰ و تعداد گره‌ها ۴۳۸۴۸ عدد بوده و نوع المان C3D8R می‌باشد.

۴- صحنه‌سنجی پژوهش

برای صحنه‌سنجی این مقاله از مقاله الشما و جاسم [۴۳] استفاده شده است. آنها در مطالعه خود به بررسی انتشار ترک در صفحات نانوکامپوزیت تحت بارگذاری چرخه‌ای چندمحوری پرداختند؛ قطعه مورد بررسی ورقی مستطیلی به طول ۱۵۰ میلی‌متر و عرض ۲۵ میلی‌متر و به ضخامت ۲ میلی‌متر است. ترک اولیه نیز با طول ۵ میلی‌متر به صورت ترک مرکزی است. جنس صفحه از نوع مس خالص تقویت شده با ۶ درصد وزنی نانولوله کربنی است و همچنین مخلوط زمینه و تقویت‌کننده به صورت همگن در نظر گرفته شده است. در شکل ۳ مقایسه نمودار طول ترک بر حسب تعداد سیکل بارگذاری مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده تطابق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی مقاله حاضر و مرجع [۴۳] است.



شکل ۳: نمودار مقایسه طول ترک بر حسب تعداد سیکل با مرجع [43]

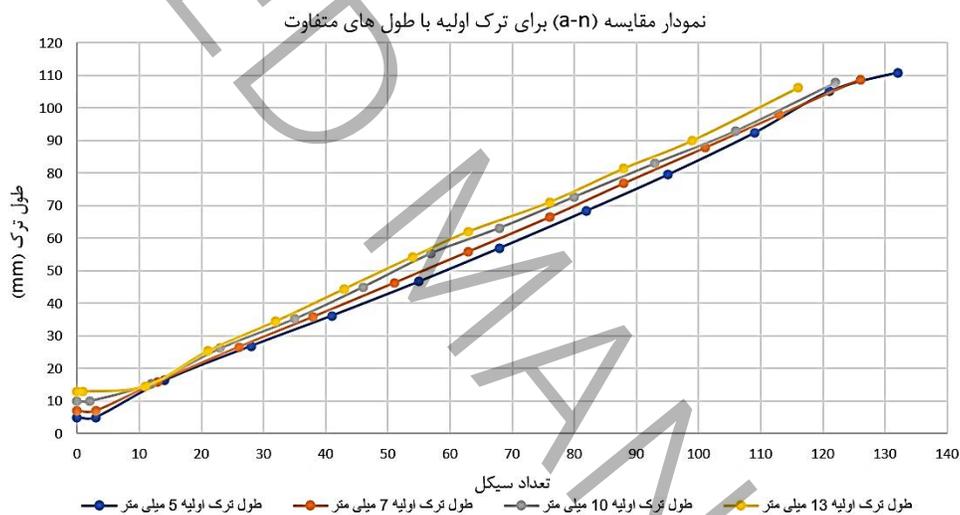
Figure 3: Graph comparing crack length versus number of cycles with reference [43]

۵- نتایج شبیه‌سازی

بعد از مدلسازی و صحنه‌سنجی پژوهش به بررسی پارامترهای تاثیرگذار در رشد ترک خستگی می‌پردازیم. این پارامترها شامل طول ترک اولیه، زاویه ترک اولیه، درصد وزنی نانولوله‌ها، جنس زمینه نانوکامپوزیت و ضخامت ورق می‌باشند. روند کار به اینصورت است که هر دفعه مقادیر یکی از این پارامترها را تغییر داده و بقیه پارامترها را ثابت در نظر می‌گیریم و تاثیر تغییر پارامتر مورد نظر را بر رشد ترک خستگی بررسی می‌کنیم.

۱-۵ بررسی طول ترک اولیه

۰	۵/۰۰	۰	۷/۰۰	۰	۱۰/۰۰	۰	۱۳/۰۰
۳	۵/۰۰	۳	۷/۰۰	۲	۱۰/۰۰	۱	۱۳/۰۰
۱۴	۱۶/۲۷	۱۳	۱۵/۹۰	۱۲	۱۵/۴۱	۱۱	۱۴/۶۰
۲۸	۲۶/۹۱	۲۶	۲۶/۵۷	۲۳	۲۶/۱۵	۲۱	۲۵/۳۹
۴۱	۳۶/۲۰	۳۸	۳۵/۸۹	۳۵	۳۵/۲۱	۳۲	۳۴/۵۶
۵۵	۴۶/۶۸	۵۱	۴۶/۲۶	۴۶	۴۵/۰۳	۴۳	۴۴/۵۱
۶۸	۵۶/۹۸	۶۳	۵۵/۹۰	۵۷	۵۵/۴۳	۵۴	۵۴/۳۶
۸۲	۶۸/۴۵	۷۶	۶۶/۴۴	۶۸	۶۳/۱۹	۶۳	۶۲/۱۲
۹۵	۷۹/۴۷	۸۸	۷۶/۸۶	۸۰	۷۲/۷۳	۷۶	۷۱/۱۱
۱۰۹	۹۲/۳۹	۱۰۱	۸۷/۷۵	۹۳	۸۳/۰۱	۸۸	۸۱/۵۱
۱۲۱	۱۰۵/۱۵	۱۱۳	۹۷/۹۱	۱۰۶	۹۲/۹۷	۹۹	۹۰/۰۲
۱۳۲	۱۱۰/۹۰	۱۲۶	۱۰۸/۷۷	۱۲۲	۱۰۷/۷۴	۱۱۶	۱۰۶/۲۱



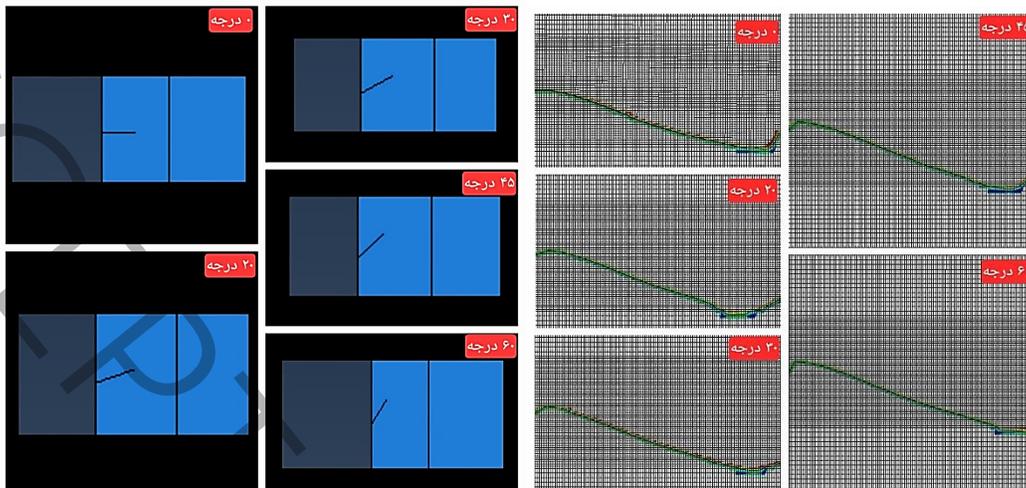
شکل ۶: نمودار مقایسه طول ترک به تعداد سیکل در طول ترک اولیه های متفاوت

Figure 6: Graph comparing crack length versus number of cycles for different initial crack lengths

باتوجه به جدول و نمودار بالا می توان نتیجه گرفت با توجه به این که شیب خط ۱۳ میلی متر بیشتر از ۵ میلی متر است، در نتیجه با افزایش طول ترک اولیه، شیب منحنی طول ترک افزایش یافته و نرخ رشد ترک نیز بیشتر خواهد بود یا به عبارتی با افزایش طول ترک اولیه، ضریب شدت تنش اولیه افزایش پیدا کرده و نرخ رشد خستگی افزایش یافته و تعداد سیکل تا شکست کامل قطعه کاهش می یابد و در واقع قطعه زودتر به شکست می رسد.

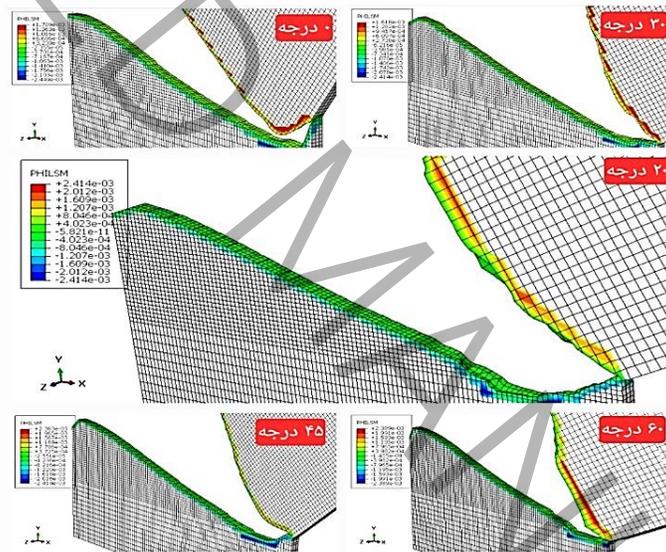
۲-۵ بررسی زاویه ترک اولیه

پارامتر بعدی که تأثیر آن بر رشد ترک خستگی ورق نانوکامپوزیتی بررسی می شود، زاویه قرارگیری ترک اولیه است که در این قسمت، ترک اولیه با طول ۵ میلی متر در زاوایای ۰، ۲۰، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه قرار گرفته و در نرم افزار آباکوس تحلیل می گردد. در شکل ۷ و ۸ مسیر رشد ترک در این ۴ حالت زاویه ترک مشاهده می گردد.



شکل ۷: تحلیل مسیر رشد ترک تا لحظه شکست به ازای زوایای ترک اولیه مختلف

Figure 7: Analysis of the crack growth path until the moment of failure for different initial crack angles



شکل ۸: سطح ترک بدست آمده از زاویه ترک اولیه های متفاوت

Figure 8: Crack surface obtained from different initial crack angles

همچنین نمودار و جدول مقایسه طول ترک به تعداد سیکل برای بررسی تاثیر پارامتر زاویه ترک اولیه به صورت زیر است:

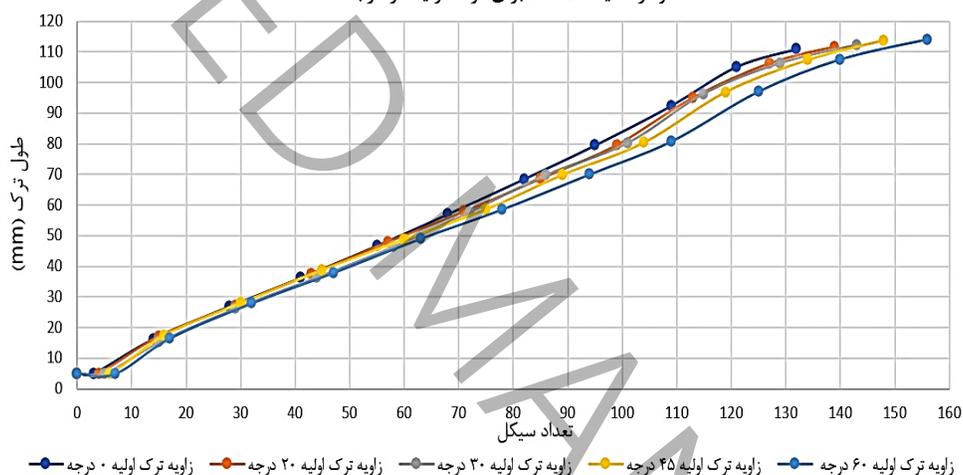
جدول ۳: مقدار طول ترک اندازه گیری شده در هر سیکل در هر زاویه ترک اولیه

Table 3: The measured crack length in each cycle for each initial crack angle

تعداد سیکل	زاویه ترک اولیه (درجه ۰)	تعداد سیکل	زاویه ترک اولیه (درجه ۲۰)	تعداد سیکل	زاویه ترک اولیه (درجه ۳۰)	تعداد سیکل	زاویه ترک اولیه (درجه ۴۵)	تعداد سیکل	زاویه ترک اولیه (درجه ۶۰)
۰	۵/۰۰	۰	۵/۰۰	۰	۵/۰۰	۰	۵/۰۰	۰	۵/۰۰
۳	۵/۰۰	۴	۵/۰۰	۵	۵/۰۰	۶	۵/۰۰	۷	۵/۰۰

۱۴	۱۶/۲۷	۱۵	۱۷/۱۶	۱۵	۱۵/۲۰	۱۶	۱۷/۵۰	۱۷	۱۶/۵۱
۲۸	۲۶/۹۱	۲۹	۲۷/۲۰	۲۹	۲۶/۲۲	۳۰	۲۷/۹۶	۳۲	۲۷/۹۳
۴۱	۳۶/۲۰	۴۳	۳۷/۴۶	۴۴	۳۶/۴۰	۴۵	۳۸/۸۲	۴۷	۳۷/۸۶
۵۵	۴۶/۶۸	۵۷	۴۷/۸۱	۵۸	۴۶/۳۶	۶۰	۴۸/۷۲	۶۳	۴۹/۰۱
۶۸	۵۶/۹۸	۷۱	۵۷/۸۲	۷۲	۵۷/۶۹	۷۵	۵۸/۵۲	۷۸	۵۸/۵۷
۸۲	۶۸/۴۵	۸۵	۶۸/۴۹	۸۶	۶۹/۸۰	۸۹	۶۹/۸۲	۹۴	۶۹/۹۸
۹۵	۷۹/۴۷	۹۹	۷۹/۵۲	۱۰۱	۸۰/۲۰	۱۰۴	۸۰/۳۷	۱۰۹	۸۰/۷۴
۱۰۹	۹۲/۳۹	۱۱۳	۹۵/۰۴	۱۱۵	۹۶/۳۱	۱۱۹	۹۶/۹۱	۱۲۵	۹۷/۰۲
۱۲۱	۱۰۵/۱۵	۱۲۷	۱۰۶/۱۸	۱۲۹	۱۰۶/۲۶	۱۳۴	۱۰۷/۳۴	۱۴۰	۱۰۷/۵۱
۱۳۲	۱۱۰/۹	۱۳۹	۱۱۱/۶۲	۱۴۳	۱۱۲/۲۱	۱۴۸	۱۱۳/۷۷	۱۵۶	۱۱۴/۰۶

نمودار مقایسه (a-n) برای ترک اولیه در درجات متعدد



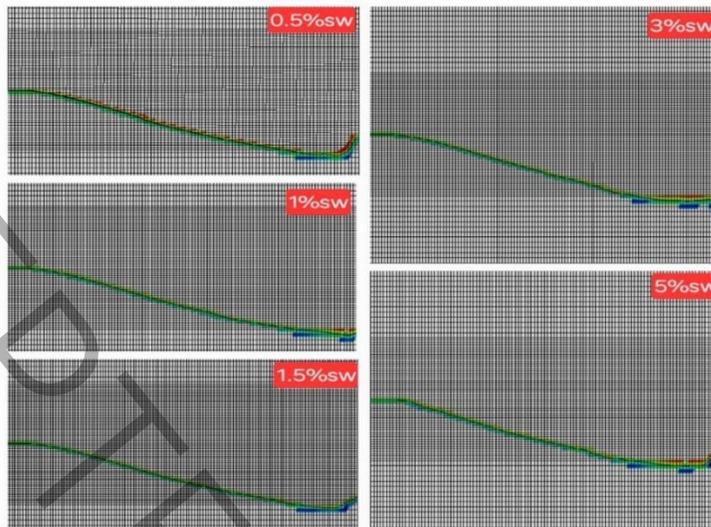
شکل ۹: نمودار مقایسه طول ترک به تعداد سیکل در زاویه ترک اولیه‌های متفاوت

Figure 9: Graph comparing crack length versus number of cycles for different initial crack angles

با توجه به نتایج فوق می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش زاویه ترک اولیه، ضریب شدت تنش معادل یا مقدار نرخ رهاش انرژی کل و در نتیجه نرخ رشد خستگی (معادله (۱۲)) کاهش پیدا کرده و تعداد سیکل تا شکست کامل قطعه افزایش می‌یابد و قطعه دیرتر به شکست می‌رسد؛ به عبارت دیگر می‌توان بیان کرد که با افزایش زاویه ترک، اثر مود II تقویت شده و اثر مود I کمتر می‌شود و از آنجا که مود I برای رشد ترک خطرناک‌تر است پس منجر به کاهش نرخ رشد ترک و افزایش تعداد سیکل می‌شود و در نتیجه می‌توان گفت زاویه ترک صفر درجه (مود یک خالص) زودتر به شکست می‌رسد و بالعکس.

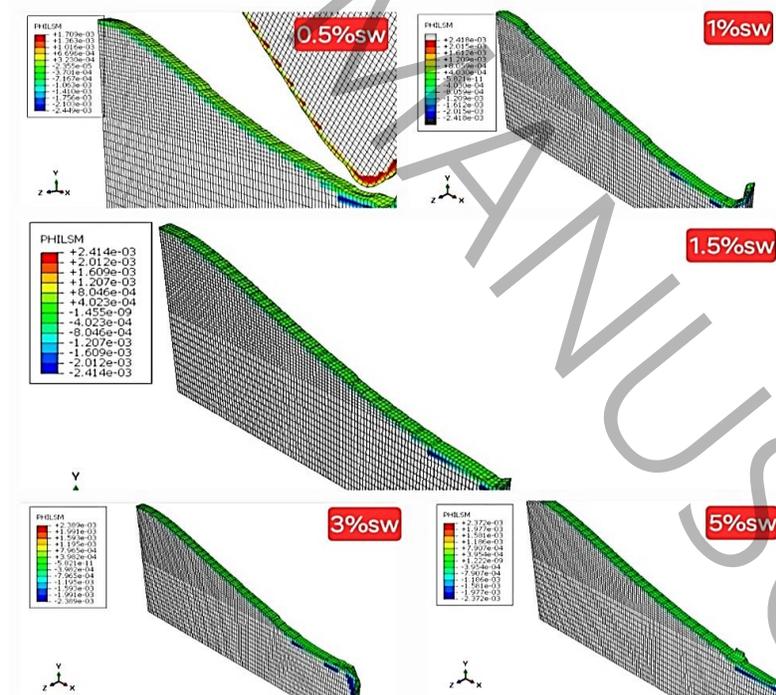
۳-۵ بررسی درصد وزنی پرکننده‌ها در نانوکامپوزیت

در گام بعدی از تحلیل پارامترهای مؤثر در رشد ترک خستگی ورق نانوکامپوزیتی، به بررسی درصد وزنی ذرات نانو اعمال شده در کامپوزیت پرداخته می‌شود؛ بدین منظور در این قسمت ذرات نانولوله کربنی در حالت نانولوله کربنی تک‌جداره یا به عبارتی SWCNT با درصد‌های وزنی ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۳ و ۵ درصد به کامپوزیت اعمال شده و سپس با تحلیل در نرم‌افزار، به تفسیر و بررسی رشد ترک خستگی در هر کدام پرداخته می‌شود. در شکل ۱۰ و ۱۱ مسیر رشد ترک در این ۵ حالت مشاهده می‌گردد.



شکل ۱۰: مسیر رشد ترک تا لحظه شکست به ازای درصد وزنی‌های متفاوت در حالت SWCNT

Figure 10: Crack growth path until the moment of failure for different weight percentages in the SWCNT state



شکل ۱۱: سطح ترک بدست آمده از درصد وزنی‌های مختلف نانولوله های SWCNT

Figure 11: Crack surface obtained from different weight percentages of SWCNT nanotubes

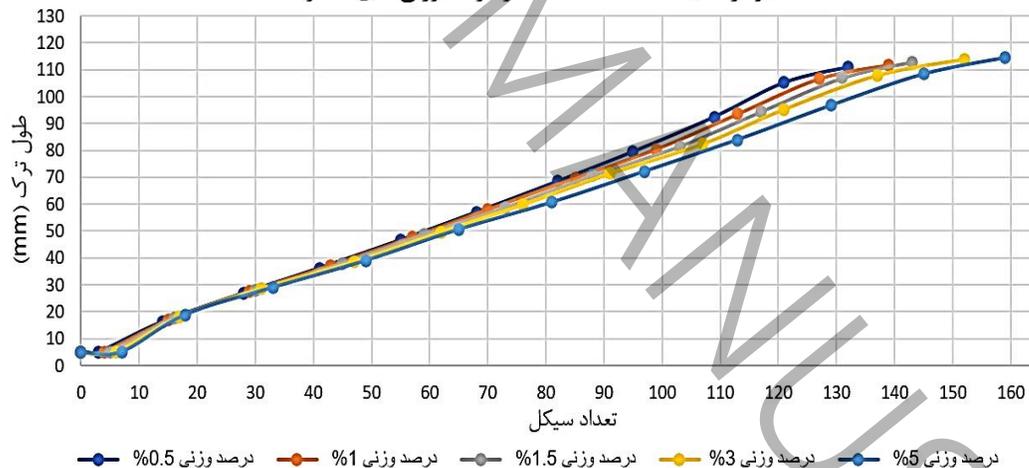
همچنین جدول و نمودار مقایسه طول ترک به تعداد سیکل برای بررسی پارامتر درصد وزنی SWCNT به صورت زیر است:

جدول ۴: مقدار طول ترک اندازه‌گیری شده در هر سیکل در هر درصد وزنی SWCNT (mm)

Table 4: The measured crack length in each cycle for each SWCNT weight percentage (mm)

تعداد سیکل	درصد وزنی 0.5%	تعداد سیکل	درصد وزنی 1%	تعداد سیکل	درصد وزنی 1.5%	تعداد سیکل	درصد وزنی 3%	تعداد سیکل	درصد وزنی 5%
۰	۵/۰۰	۰	۵/۰۰	۰	۵/۰۰	۰	۵/۰۰	۰	۵/۰۰
۳	۵/۰۰	۴	۵/۰۰	۵	۵/۰۰	۶	۵/۰۰	۷	۵/۰۰
۱۴	۱۶/۲۷	۱۵	۱۶/۸۸	۱۶	۱۷/۵۹	۱۷	۱۸/۱۲	۱۸	۱۸/۸۷
۲۸	۲۶/۹۱	۲۹	۲۷/۵۲	۳۰	۲۷/۹۷	۳۱	۲۸/۴۸	۳۳	۲۸/۹۳
۴۱	۳۶/۲۰	۴۳	۳۷/۲۱	۴۵	۳۷/۹۱	۴۷	۳۸/۴۵	۴۹	۳۸/۹۶
۵۵	۴۶/۶۸	۵۷	۴۷/۷۳	۵۹	۴۸/۶۷	۶۲	۴۹/۵۸	۶۵	۵۰/۵۴
۶۸	۵۶/۹۸	۷۰	۵۷/۹۷	۷۳	۵۸/۷۴	۷۶	۵۹/۶۶	۸۱	۶۰/۶۲
۸۲	۶۸/۴۵	۸۵	۶۹/۶۹	۸۸	۷۰/۵۹	۹۱	۷۱/۲۱	۹۷	۷۲/۱۷
۹۵	۷۹/۴۷	۹۹	۸۰/۳۸	۱۰۳	۸۱/۴۲	۱۰۷	۸۲/۲۸	۱۱۳	۸۳/۹۱
۱۰۹	۹۲/۳۹	۱۱۳	۹۳/۴۸	۱۱۷	۹۴/۳۳	۱۲۱	۹۵/۱۷	۱۲۹	۹۶/۶۷
۱۲۱	۱۰۵/۱۵	۱۲۷	۱۰۶/۶۲	۱۳۱	۱۰۶/۹۴	۱۳۷	۱۰۷/۷۵	۱۴۵	۱۰۸/۳۵
۱۳۲	۱۱۰/۹۰	۱۳۹	۱۱۱/۷۸	۱۴۳	۱۱۲/۸۵	۱۵۲	۱۱۳/۶۹	۱۵۹	۱۱۴/۴۳

نمودار مقایسه AL+SWCNT در درصد وزنی های متفاوت

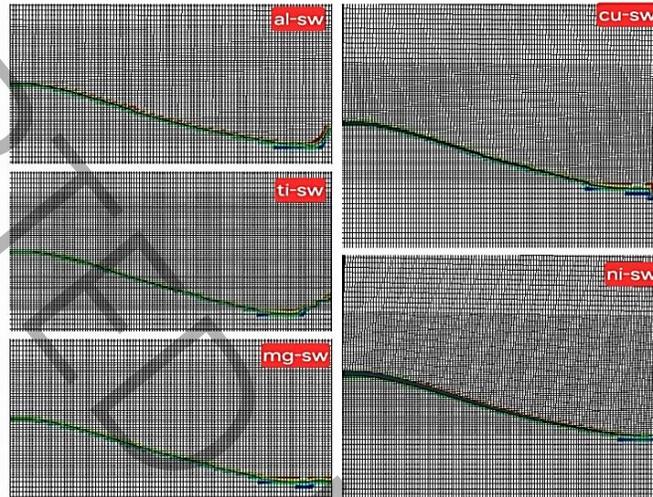


شکل ۱۲: نمودار مقایسه طول ترک به تعداد سیکل در هر درصد وزنی متفاوت در حالت SWCNT

Figure 12: Graph comparing crack length versus number of cycles for different weight percentages in the SWCNT state

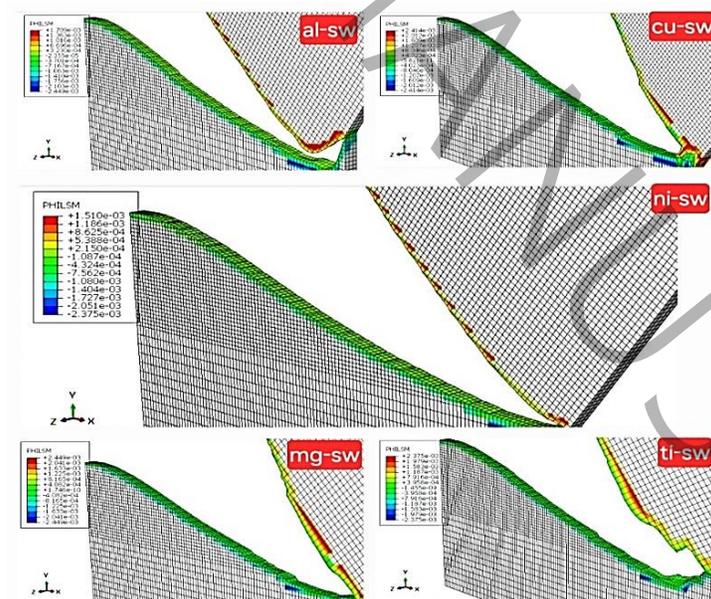
با توجه به نتایج بدست آمده در این قسمت می‌توان گفت که با افزایش درصد وزنی نانولوله کربنی تک‌جداره، شیب نمودار طول ترک به تعداد سیکل کاهش می‌یابد زیرا نرخ رشد خستگی کاهش یافته و تعداد سیکل تا شکست کامل قطعه افزایش می‌یابد و قطعه دیرتر به شکست می‌رسد. به عبارت دیگر می‌توان بیان کرد که چون استحکام خستگی نانوذرات از زمینه بیشتر است، مشاهده می‌شود که با افزایش درصد وزنی نانوالیاف SWCNT مقاومت ماده به رشد ترک افزایش پیدا کرده و تعداد سیکل تا شکست بیشتر می‌شود.

پس از تحلیل تاثیر درصد وزنی‌های اعمال شده توسط پرکننده‌ها بر مواد، نوبت به بررسی تاثیر جنس مواد به کاررفته در زمینه نانوکامپوزیت بر رشد ترک است. در این قسمت از ۵ نوع ماده فلزی مختلف برای زمینه استفاده می‌شود که عبارت‌اند از: آلومینیوم، نیکل، منیزیم، تیتانیوم و مس؛ لازم به ذکر می‌باشد که برای تحلیل این بخش از درصد وزنی ۰/۵٪ پرکننده‌ها در حالت نانولوله کربنی تک جداره برای بررسی استفاده شده است. در شکل های ۱۳ و ۱۴ مسیر رشد ترک در این ۵ حالت مشاهده می‌گردد.



شکل ۱۳: تاثیر جنس زمینه اعمال شده به ورق نانوکامپوزیتی در حالت SWCNT بر رشد ترک

Figure 13: Effect of the applied matrix material on the nanocomposite sheet in the SWCNT state on crack growth



شکل ۱۴: سطح ترک بدست آمده از ترکیب نانولوله های SWCNT با زمینه‌های مختلف

Figure 14: Crack surface obtained from the combination of SWCNT nanotubes with different matrices

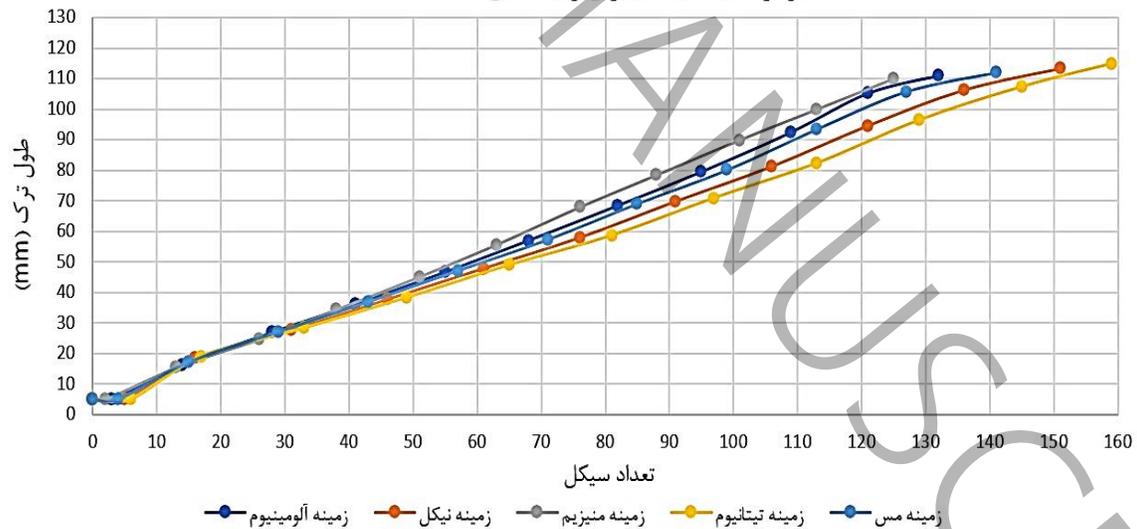
همچنین جدول و نمودار مقایسه طول ترک به تعداد سیکل برای ترکیب SWCNT با زمینه‌های مختلف به صورت زیر است:

جدول ۵: مقدار طول ترک اندازه گیری شده از ترکیب SWCNT با زمینه های مختلف

Table 5: The measured crack length from the combination of SWCNT with different matrices

تعداد سیکل	زمینه آلومینیوم	تعداد سیکل	زمینه نیکل	تعداد سیکل	زمینه منیزیم	تعداد سیکل	زمینه تیتانیوم	تعداد سیکل	زمینه مس
۰	۵/۰۰	۰	۵/۰۰	۰	۵/۰۰	۰	۵/۰۰	۰	۵/۰۰
۳	۵/۰۰	۵	۵/۰۰	۲	۵/۰۰	۶	۵/۰۰	۴	۵/۰۰
۱۴	۱۶/۲۷	۱۶	۱۸/۳۶	۱۳	۱۵/۳۵	۱۷	۱۹/۰۲	۱۵	۱۷/۱۶
۲۸	۲۶/۹۱	۳۱	۲۷/۵۲	۲۶	۲۴/۶۵	۳۳	۲۸/۲۷	۲۹	۲۷/۱۲
۴۱	۳۶/۲۰	۴۶	۳۷/۶۹	۳۸	۳۴/۳۳	۴۹	۳۸/۲۳	۴۳	۳۶/۸۶
۵۵	۴۶/۶۸	۶۱	۴۷/۸۱	۵۱	۴۵/۰۴	۶۵	۴۸/۹۱	۵۷	۴۷/۱۲
۶۸	۵۶/۹۸	۷۶	۵۷/۸۸	۶۳	۵۵/۵۳	۸۱	۵۸/۵۹	۷۱	۵۷/۲۶
۸۲	۶۸/۴۵	۹۱	۶۹/۷۸	۷۶	۶۷/۸۴	۹۷	۷۰/۸۷	۸۵	۶۹/۰۲
۹۵	۷۹/۴۷	۱۰۶	۸۱/۲۱	۸۸	۷۸/۳۶	۱۱۳	۸۲/۲۴	۹۹	۸۰/۰۴
۱۰۹	۹۲/۳۹	۱۲۱	۹۴/۵۶	۱۰۱	۸۹/۸۳	۱۲۹	۹۶/۳۶	۱۱۳	۹۳/۳۹
۱۲۱	۱۰۵/۱۵	۱۳۶	۱۰۶/۲۶	۱۱۳	۹۹/۸۳	۱۴۵	۱۰۷/۲۹	۱۲۷	۱۰۵/۷۴
۱۳۲	۱۱۰/۹۰	۱۵۱	۱۱۳/۳۰	۱۲۵	۱۰۹/۸۶	۱۵۹	۱۱۴/۸۱	۱۴۱	۱۱۱/۹۸

نمودار مقایسه (a-n) برای زمینه های مختلف SWCNT



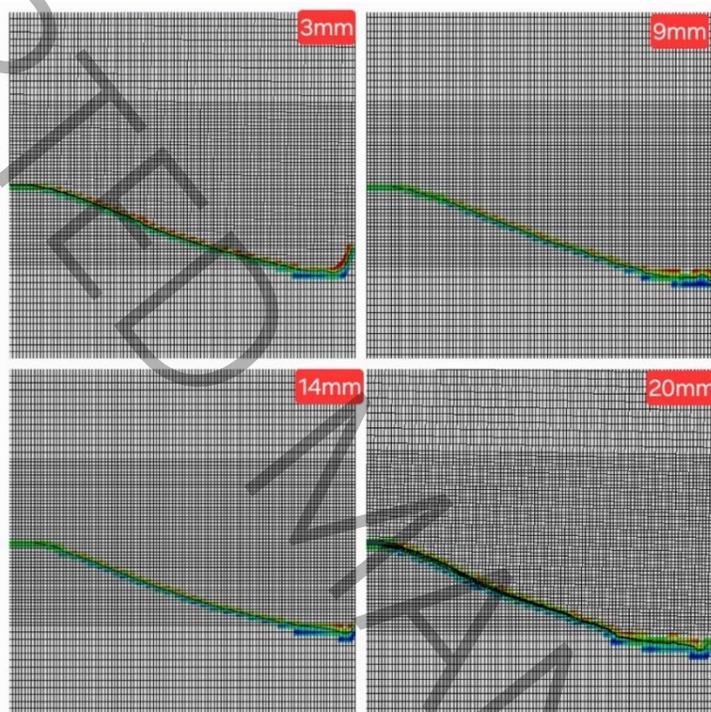
شکل ۱۵: نمودار مقایسه طول ترک به تعداد سیکل از ترکیب SWCNT با زمینه های مختلف

Figure 15: Graph comparing crack length versus number of cycles from the combination of SWCNT with different matrices

با مشاهده نتایج بدست آمده در جدول و نمودار فوق می توان نتیجه گرفت که با توجه به متفاوت بودن مقاومت به رشد ترک در زمینه های مختلف نانوکامپوزیت، نرخ رشد ترک خستگی و همچنین تعداد سیکل تا شکست این مواد با یکدیگر متفاوت می باشد. بر همین اساس می توان نتیجه گرفت که استحکام خستگی مواد ترکیب شده با نانولوله کربنی تک جداره از کم به زیاد به ترتیب زیر است:

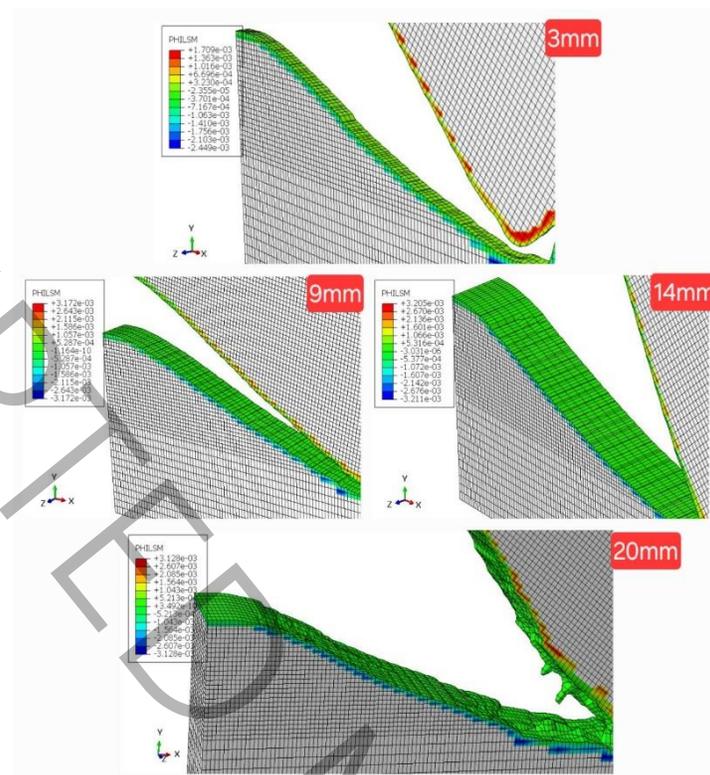
۵-۵ بررسی پارامتر ضخامت ورق نانوکامپوزیت

برای بررسی تأثیر ضخامت ورق نانوکامپوزیتی، ضخامت‌های متفاوتی با مقادیر ۳، ۹، ۱۴ و ۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد و سپس در نرم‌افزار آباکوس مورد تحلیل قرار گرفتند که نتایج بدست آمده به صورت زیر می‌باشند. در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ تصاویر ترک خوردن ورق و مسیر رشد ترک مشاهده می‌شود.



شکل ۱۶: مسیر رشد ترک تا لحظه شکست در ضخامت‌های مختلف ورق نانوکامپوزیت

Figure 16: Crack growth path until the moment of failure at different thicknesses of the nanocomposite sheet



شکل ۱۷: سطح ترک بدست آمده در هر ضخامت از ورق نانوکامپوزیت

Figure 17: Crack surface obtained at each thickness of the nanocomposite sheet

نمودار و جدول مقایسه طول ترک به تعداد سیکل برای هر ضخامت از ورق نانوکامپوزیت نیز در جدول ۶ و شکل ۱۸ آمده است.
 جدول ۶: مقدار طول ترک اندازه گیری شده برای هر ضخامت از ورق نانوکامپوزیت (mm)

Table 6: The measured crack length for each thickness of the nanocomposite sheet (mm)

تعداد سیکل	ضخامت 3mm	تعداد سیکل	ضخامت 9mm	تعداد سیکل	ضخامت 14mm	تعداد سیکل	ضخامت 20mm
۰	۵/۰۰	۰	۵/۰۰	۰	۵/۰۰	۰	۵/۰۰
۳	۵/۰۰	۳	۵/۰۰	۴	۵/۰۰	۵	۵/۰۰
۱۴	۱۶/۲۷	۱۵	۱۶/۹۲	۱۶	۱۷/۶۴	۱۷	۱۸/۰۴
۲۸	۲۶/۹۱	۲۹	۲۷/۴۵	۳۱	۲۸/۱۲	۳۲	۲۸/۹۴
۴۱	۳۶/۲۰	۴۳	۳۶/۹۷	۴۵	۳۷/۳۵	۴۷	۳۹/۰۲
۵۵	۴۶/۶۸	۵۷	۴۷/۱۲	۵۹	۴۸/۰۳	۶۱	۵۰/۱۲
۶۸	۵۶/۹۸	۶۹	۵۷/۶۱	۷۱	۵۸/۷۲	۷۴	۶۰/۲۳
۸۲	۶۸/۴۵	۸۶	۶۹/۱۳	۸۹	۷۰/۴۹	۹۳	۷۲/۶۲
۹۵	۷۹/۴۷	۹۷	۸۰/۸۶	۱۰۰	۸۱/۹۷	۱۰۴	۸۳/۳۸
۱۰۹	۹۲/۳۹	۱۱۰	۹۳/۵۳	۱۱۱	۹۴/۶۷	۱۱۵	۹۶/۷۵
۱۲۱	۱۰۵/۱۵	۱۲۲	۱۰۵/۷۲	۱۲۴	۱۰۶/۲۵	۱۲۷	۱۰۷/۸۲
۱۳۲	۱۱۰/۹۰	۱۳۳	۱۱۱/۴۱	۱۳۵	۱۱۲/۸۹	۱۳۶	۱۱۴/۱۹

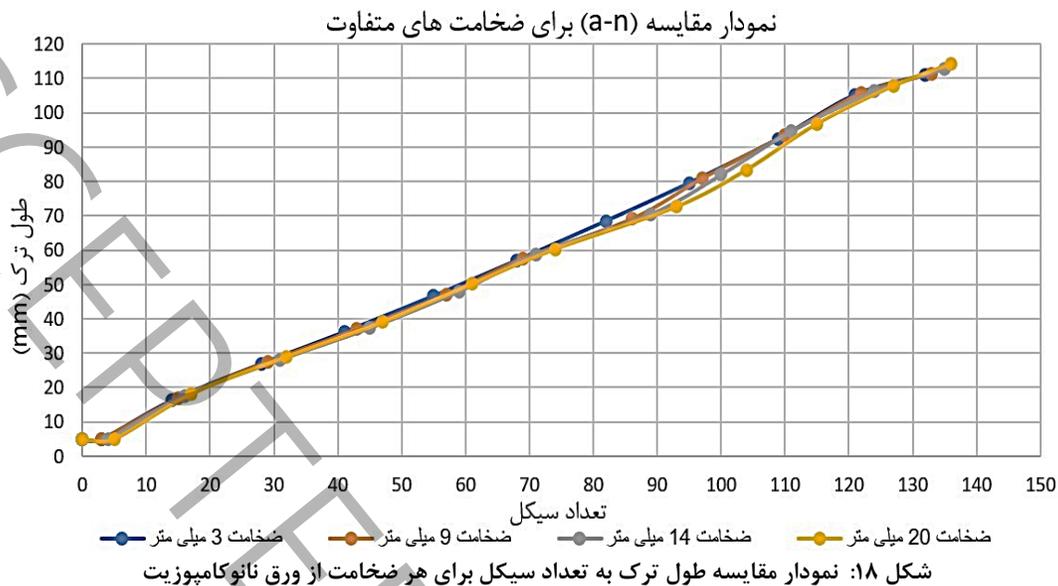


Figure 18: Graph comparing crack length versus number of cycles for each thickness of the nanocomposite sheet

نتایج بدست آمده در نمودار و جدول بالا نشان دهنده اینست که با افزایش ضخامت ورق نانوکامپوزیت، وضعیت از تنش صفحه‌ای به سمت کرنش صفحه‌ای می‌رود و متفاوت بودن مؤلفه‌های تنش در این دو حالت در حوالی نوک ترک باعث متفاوت بودن نرخ رشد ترک خستگی می‌شود؛ با این تفاسیر می‌توان گفت که با افزایش ضخامت ورق نانوکامپوزیت، کمی از ضریب شدت تنش و نرخ رشد خستگی کاسته شده و تعداد سیکل تا شکست کامل قطعه افزایش می‌یابد و قطعه دیرتر به شکست می‌رسد. البته این تغییرات به اندازه پارامترهای دیگر نیست و همچنین فرض شده است که چقرمگی شکست ماده ثابت بوده و از تغییرات آن نسبت به ضخامت ماده صرف‌نظر شده است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله به تحلیل رشد ترک خستگی در نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی به همراه نانولوله‌های کربنی پرداخته شد که پنج ماده زمینه آلومینیم، نیکل، منیزیم، تیتانیوم و مس برای این مطالعه انتخاب شدند و در ادامه برای تحلیل و بررسی رشد ترک خستگی، پارامترهایی همچون طول ترک اولیه، زاویه قرارگیری ترک اولیه، درصد وزنی نانولوله‌های کربنی تک‌جداره، جنس فلزات مورد استفاده در زمینه نانوکامپوزیت و ضخامت ورق با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس مورد پژوهش قرار گرفتند. جمع‌بندی نتایج به شرح زیر می‌باشد:

الف) با افزایش طول ترک اولیه، شیب منحنی طول ترک افزایش یافته و نرخ رشد ترک نیز بیشتر می‌شود یا به عبارتی با افزایش طول ترک اولیه، ضریب شدت تنش اولیه افزایش پیدا کرده و نرخ رشد خستگی افزایش یافته و تعداد سیکل تا شکست کامل قطعه کاهش می‌یابد. در واقع قطعه زودتر به شکست می‌رسد.

ب) با افزایش زاویه ترک اولیه، ضریب شدت تنش معادل یا مقدار نرخ رهایش انرژی کل G_{eq} و در نتیجه نرخ رشد خستگی کاهش پیدا کرده و تعداد سیکل تا شکست کامل قطعه افزایش می‌یابد و قطعه دیرتر به شکست می‌رسد. به عبارت دیگر می‌توان بیان کرد که با افزایش زاویه ترک، اثر مود II تقویت شده و اثر مود I کمتر می‌شود و از آنجا که مود I برای رشد ترک خطرناک‌تر است پس منجر به کاهش نرخ رشد ترک و افزایش تعداد سیکل می‌شود و در نتیجه می‌توان گفت زاویه ترک صفر درجه (مود یک خالص) زودتر به شکست می‌رسد و بالعکس.

ج) با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان گفت که با افزایش درصد وزنی نانولوله کربنی تک‌جداره، شیب نمودار طول ترک به تعداد سیکل کاهش می‌یابد زیرا نرخ رشد خستگی کاهش یافته و تعداد سیکل تا شکست کامل قطعه افزایش می‌یابد و قطعه دیرتر به شکست می‌رسد. به عبارت دیگر می‌توان بیان کرد که چون استحکام خستگی نانوذرات از زمینه بیشتر است، مشاهده می‌شود که با افزایش درصد وزنی نانوالیاف SWCNT مقاومت ماده به رشد ترک افزایش پیدا کرده و تعداد سیکل تا شکست بیشتر می‌شود.

د) با توجه به متفاوت بودن مقاومت به رشد ترک در زمینه‌های مختلف نانوکامپوزیت، نرخ رشد ترک خستگی و همچنین تعداد سیکل تا شکست این مواد با یکدیگر متفاوت می‌باشد. بر همین اساس می‌توان نتیجه گرفت که استحکام خستگی مواد ترکیب شده با نانولوله کربنی تک‌جداره از کم به زیاد به ترتیب زیر است:

منیزیم - آلومینیوم - مس - نیکل - تیتانیوم

ه) در نهایت با دقت در نتایج بدست آمده مشاهده می‌گردد که با افزایش ضخامت ورق نانوکامپوزیت، وضعیت از تنش صفحه‌ای به سمت کرنش صفحه‌ای می‌رود و متفاوت بودن مؤلفه‌های تنش در این دو حالت در حوالی نوک ترک باعث متفاوت بودن نرخ رشد ترک خستگی می‌شود. با این تفاسیر دیده می‌شود که با افزایش ضخامت ورق نانوکامپوزیت، کمی از ضریب شدت تنش و نرخ رشد خستگی کاسته شده و تعداد سیکل تا شکست کامل قطعه افزایش می‌یابد و قطعه دیرتر به شکست می‌رسد. البته این تغییرات به اندازه پارامترهای دیگر نیست و همچنین فرض شده است که چقرمگی شکست ماده ثابت بوده و از تغییرات آن نسبت به ضخامت ماده صرف‌نظر شده است.

و) با دقت در نتایج بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت که برای افزایش عمر خستگی این گونه مواد، پارامترهای مختلفی را می‌توان در نظر گرفت که با انتخاب مناسب آنها حداکثر عمر خستگی قطعه بدست آید. این مورد در طراحی قطعات ساخته شده از نانوکامپوزیتها می‌تواند مورد توجه قرار گیرد.

۷- مراجع

- [1] R. Jones, S. Pitt, D. Hui, A. Brunner. Fatigue crack growth in nano-composites, *Compos Struct*, 99 (2013) 375-9.
- [2] A. Fereidoon, L. Mottahedin, S. T. Latibari, Investigation of fracture toughness parameters of epoxy nanocomposites for different crack angles, *Journal of Polymer Engineering*, 32 (2012) 311-7.
- [3] Z. Wang, F. Liu, W. Liang, L. Zhou, Study on Tensile Properties of Nanoreinforced Epoxy Polymer: Macroscopic Experiments and Nanoscale FEM Simulation Prediction, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013 (2013) 1-8.
- [4] A. Negi, G. Bhardwaj, J. Saini, N. Grover, Crack growth analysis of carbon nanotube reinforced polymer nanocomposite using extended finite element method, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 233 (2018).
- [5] M. R. Nakhaei, G. Naderi, M. H. R. Ghoreishy, Experimental Investigation of Mechanical Properties, Fracture Mechanism and Crack Propagation of PA6/NBR/Clay Nanocomposites, *Iranian Journal of Polymer Science & Technology*, 33 (2020) 159-72 (In persian).
- [6] L. Rodríguez-Tembleque, J. Vargas, E. García-Macías, F.C. Buroni, A. Sáez, XFEM crack growth virtual monitoring in self-sensing CNT reinforced polymer nanocomposite plates using ANSYS, *Composite Structures*, 284 (2022) 115-37.
- [7] M. Salari, S.M.S. Fatemian. Investigation of crack growth in metal matrix nanocomposites. Second National Conference on Structural and Fluid Mechanics, Bonab, Iran, 2024 (In persian).
- [8] M. Malaki, A. Fadaei Tehrani, B. Niroumand, Fatigue behavior of metal matrix nanocomposites, *Ceramics International*, 46 (2020) 326-336.

- [9] S.E. Shin, D.H. Bae, Fatigue behavior of Al2024 alloy-matrix nanocomposites reinforced with multi-walled carbon nanotubes, *Composites Part B-engineering*, 134 (2018) 61-68.
- [10] M. Vaghari, G.R. Khayati, S.A. Jenabali Jahromi, Studying on the fatigue behavior of Al- Al2O3 metal matrix nanocomposites processed through powder metallurgy, *Journal of Ultrafine Grained and Nanostructured Materials*, 52 (2019) 210-17.
- [11] H.M. Mahan, S.V. Konovalov, S.M. Najm, O. Mihaela, T. Trzepieciński, Experimental and Numerical Investigations of the Fatigue Life of AA2024 Aluminium Alloy-Based Nanocomposite Reinforced by TiO2 Nanoparticles Under the Effect of Heat Treatment, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 25 (2024) 141-53.
- [12] Q. Pu et. Al, Microstructural insights into short fatigue crack growth in particle-reinforced Al-matrix composite sheet, *International Journal of Fatigue*, 193 (2025) 108787.
- [13] T. Balakumar, A. Edrissy, R.A. Riahi, Fatigue Crack Growth Behavior of Additively Manufactured Ti Metal Matrix Composite with TiB Particles, *Coatings*, 14(11) (2024) 1447.
- [14] H. Wang, H. Shin, A multiscale model to predict fatigue crack growth behavior of carbon nanofiber/epoxy nanocomposites, *International Journal of Fatigue*, 168 (2023) 107467.
- [15] N. R. Burhani, Effect of Compaction Pressure on Final Properties of Multiwall Carbon Nanotubes (MWCNTs) reinforced Aluminum (Al) Composite, Seri Iskandar, Malaysia: Universiti Teknologi PETRONAS, (2010).
- [16] B. N. Gohain, S. Kirtania, Evaluation of Axial Young's Modulus of CNT-based Composites using Square, Hexagonal and Cylindrical Representative Volume Elements, *ADB U-Journal of Engineering Technology*, 6 (2017).
- [17] S. S. Salam, N. M. Mehat, S. Kamaruddin, Optimization of Laminated Composites Characteristics via integration of Chamis Equation, Taguchi method and Principal Component Analysis, *IOP Conf Series: Materials Science and Engineering*, 551 (2019) 1-8.
- [18] S. M. A. K. Mohammed, D. L. Chen, Carbon Nanotube-Reinforced Aluminum Matrix Composites, *Advanced Engineering Materials*, 22 (2019).
- [19] D. Kopeliovich. Estimations of composite materials properties. <https://www.substech.com>. (2023).
- [20] S. Chang, C. Lee, S. Jeon, Measurement of Rock Fracture Toughness Under Modes I and II and Mixed-Mode Conditions by Using Disc-Type Specimen, *Engineering Geology*, 66 (2002) 79-97.
- [21] www.Matweb.com, Online Materials Information Resource.
- [22] M. Ahmad, K. A. Ismail, M. H. M. Hanid, F. Mat, A. M. Roslan, Modification of the design of circular thin-walled tubes to enhance dynamic energy absorption characteristics: Experimental and finite element analysis, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 917 (2020) 1-13.
- [23] A. Carpinteri, M. Paggi, Are the Paris' law parameters dependent on each other? *Fracture and Structural Integrity*, 1 (2008) 10-6.
- [24] D. Roylance, *Introduction to Fracture Mechanics*, Cambridge, (2001).
- [25] P. Kumar, P. S. Shinde, G. Bhojar, Fracture Toughness and Shear Strength of the Bonded Interface Between an Aluminium Alloy Skin and a FRP Patch, *Journal of The Institution of Engineers (India) Series C*, 100 (2018) 779-789.
- [26] F. Habashi, *Nickel, Physical and Chemical Properties*, Encyclopedia of Metalloproteins, Springer, New York, (2013).
- [27] Nickel chemical element. www.britannica.com/science/nickel-chemical-element, (2025).
- [28] J. Bashyal, Nickel (Ni) Element: Important Properties, Uses, Health Effects, (2023). www.scienceinfo.com/nickel-ni-element-important-properties.

- [29] J. Zacharias, The Temperature Dependence of Young's Modulus for Nickel, *Physical Review Journals Archive*, 44 (1933) 116-122.
- [30] Nickel – Properties – Price – Applications – Production, [www. material-properties.org/nickel-properties-applications-price-production](http://www.material-properties.org/nickel-properties-applications-price-production).
- [31] J.M. Silvaa, R. A. Cláudiob, C. Moura Brancoc, J. Martins Ferreirad, Creep-fatigue behavior of a new generation Ni-base superalloy for aeroengine usage, *Procedia Engineering*, 2 (2010) 1865-1875.
- [32] Magnesium. <https://en.wikipedia.org/wiki/Magnesium>.
- [33] K.D. Naoum, Magnesium: Definition, Composition, Properties, and Applications, www.xometry.com/resources/materials/what-is-magnesium. (2023).
- [34] Magnesium. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/element/Magnesium>.
- [35] V.K. Bommala, M.G. Krishna, C.T. Rao, Magnesium matrix composites for biomedical applications: A review, *Journal of Magnesium and Alloys*, 7 (2019) 72-79.
- [36] Yield strength of magnesium, www.studybuff.com/what-is-the-yield-strength-of-magnesium.
- [37] Z.Q. Cui, H.W. Yang , W.X. Wang, Z.F. Yan, Z.Z. Ma, B.S. Xu, H.Y. Xu, Research on fatigue crack growth behavior of AZ31B magnesium alloy electron beam welded joints based on temperature distribution around the crack tip, *Engineering Fracture Mechanics*, 133 (2015) 14-23.
- [38] N. Xiong, S. Friedrich, S.R. Mohamed, I. Kirillov, X. Ye, Y. Tian, B. Friedrich, The Separation Behavior of Impurities in the Purification of High-Purity Magnesium via Vacuum Distillation, *Journal of Sustainable Metallurgy*, 8 (2022) 1561-1572.
- [39] M. M. Jamel, H. Lopez, B. Schultz, W. Otieno, The Effect of Solidification Rate on the Microstructure and Mechanical Properties of Pure Magnesium, *Metals*, 11 (2021) 1-13.
- [40] TITANIUM ALLOY GUIDE, An RTI International Metals, (2000) 37-42.
- [41] The ISCAR Reference Guide for Machining Titanium, www.iscar.com.
- [42] T. Chen, B. Barua, T. Hu, M. C. Messner, T. El-Wardany, An ICME Modeling Framework for Titanium/Tungsten-Carbide Metal Matrix Composites, Argonne National Laboratory U.S. Department of Energy laboratory managed by UChicago Argonne, (2023).
- [43] F. A. Alshamma, O. A. Jassim, Dynamic crack propagation in nano-composite thin plates under multi-axial cyclic loading, *Journal of Materials Research and Technology*, 8 (2019) 4672-81.
- [44] S. Arifeen, G. Potirniche, A. Elshabini, F. Barlow, Modeling of Failure in Aluminum Alloy Braze for a High Temperature Thermoelectric Assembly, 46th International Symposium on Microelectronics (IMAPS 2013), Orlando, FL USA, (2013).
- [45] D. Marzal, Modeling and Testing of Shape Memory Alloys: Solar Sail Applications, California State University, Long Beach ProQuest Dissertations & Theses, (2022).
- [46] N. D. Toan, Combined Hardening Behavior for Sheet Metal and its Application - Chapter 5: Case Study for Magnesium Alloy Sheets to Predict Ductile Fracture of Rotational Incremental Forming, AIJR Publisher, India, (2019).