

Numerical and Experimental Investigations on Fatigue Behavior of a Carabiner made from Al-7175

Negah Parsi¹, *Bagher Mohammad Sadeghi², Hossein Arabi³, Bahman Mirzakhani⁴

1- M.S.c, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

2- Assistant professor, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

3- Professor, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

4- Associate professor, Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran.

Citation: Parsi N, Mohammad Sadeghi B, Arabi H, Mirzakhani B. Numerical and Experimental Investigations on Fatigue Behavior of a Carabiner made from Al-7175. Metallurgical Engineering 2021; 24(2): 98-109 <http://dx.doi.org/10.22076/ME.2022.533306.1322>

 <http://dx.doi.org/10.22076/ME.2022.533306.1322>

ABSTRACT

Fatigue behavior of GUARDO Carabiner made from Al-7175 was investigated in this study. Monotonic tensile test with a cross-head speed of 35 mm.min⁻¹ was applied on one of the Carabiners, before application of fatigue test on a similar Carabiner under a load range of 0-15 kN and a frequency of 2 Hz using a Falling Factor of 2 (this is equivalent to the free fall of a person with 120 kg weight whom attached to a rope and falls from a height of 6 m). Under the above-mentioned condition, the fatigue life of the Carabiner was 2227 cycles. Fatigue fracture surface of the Carabiner was also examined by Scanning Electron Microscope. The results of fractography showed the formation of all the three stages of fatigue cracking as expected, as well as the presence of secondary cracks in the vicinity of brittle phases. A geometrical model of the Carabiner was designed using CATIA and specific mesh size applied on it in ABAQUS software. Simulations via ABAQUS were performed for various cyclic tensile load ranges (3, 9, 13, 15, 21 kN) with a frequency of 2 Hz. The output data for each simulation were used as input data in FE-safe software in order to estimate the fatigue life of Carabiner model. In FE-safe software, fatigue properties of Al-7175 were estimated and then Manson-Coffin-Basquin equation was used for prediction of fatigue life of carabiner for each cyclic tensile loading. Finally, a mathematical model was proposed in order to predict the relationship between the applied force and the number of cycles to failure.

Keywords: Carabiner, Aluminium Alloy 7175, Fatigue Behavior, FEM Simulation, Fractography.

Received: 3 July 2021

Accepted: 24 January 2022

■ ■
* *Corresponding Author:*

Bagher Mohammad Sadeghi, PhD

Address: School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Tel: +98 (21) 73228862

E-mail: bmsadeghi@iust.ac.ir

بررسی عددی و تجربی رفتار خستگی کارابین ساخته شده از آلیاژ آلومینیوم ۷۱۷۵

نگاه پارسی^۱، باقر محمدصادقی^۲، حسین عربی^۳، بهمن میرزاخانی^۴

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

۳- استاد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

۴- دانشیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران.

چکیده

در این تحقیق رفتار خستگی کارابین مدل GUARDO ساخته شده از Al-7175 مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش کشش یکنواخت با سرعت ۳۵ mm/min بر روی یک کارابین اعمال شد. در مرحله بعد آزمایش خستگی بر روی یک کارابین مشابه، تحت بار کششی در محدوده صفر تا ۱۵ kN با فرکانس ۲ Hz و فاکتور سقوط ۲ (مشابه سقوط فردی به وزن ۱۲۰ kg از ارتفاع ۶ متر) انجام شد. عمر خستگی این کارابین در شرایط مذکور ۲۲۲۷ چرخه تعیین شد. سطح مقطع شکست این کارابین توسط میکروسکوپ الکترونی بررسی و تصویربرداری شد. در تصاویر حاصل از شکست نگاری علاوه بر مناطق سه گانه شکست خستگی، تشکیل ترک های ثانویه در محدوده فازهای ترد هم مشاهده شد. همچنین با استفاده از نرم افزار CATIA یک مدل هندسی برای کارابین طراحی شد. در ادامه به منظور مش بندی و بارگذاری خستگی کارابین تحت بارهای مختلف چرخه ای در محدوده صفر تا حداکثر نیرو (۳،۹،۱۳،۱۵،۲۱ kN) با فرکانس ۲ Hz، نرم افزار ABAQUS محدود مورد استفاده قرار گرفت. نتایج مستخرج از این نرم افزار، نظیر مقادیر تنش و کرنش در هر یک از شرایط مذکور بارگذاری، در نرم افزار FE-safe به عنوان اطلاعات ورودی اعمال شد. در این نرم افزار برای تخمین عمر خستگی کارابین از خواص خستگی این آلیاژ و مدل تخمین عمر مانسون-کافین-باسکویین استفاده شد و تعداد چرخه های منجر به شکست در هر یک از شرایط بارگذاری محاسبه گردید. در انتها یک مدل ریاضی جهت تخمین رابطه بین نیرو و عمر خستگی این نوع کارابین پیشنهاد شد.

واژه‌های کلیدی: کارابین، آلیاژ Al-7175، رفتار خستگی، شبیه‌سازی المان محدود، شکست نگاری.

دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۱۲ | پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۰۴

۱. مقدمه

هستند، تحقیقات زیادی روی مکانیزم‌های شکست و تخریب این قطعات انجام شده‌است. بیشترین علل تخریب این قطعات، خستگی، بازشدن درگاه و عدم هم‌ترازی درگاه با دماغه در هنگام بارگذاری گزارش شده‌است [۱۱].

استاندارد موجود جهت تعیین استحکام کارابین‌ها (ASTM-F1774-99) [۱۳]، بر اساس بارگذاری کششی یکنواخت (monotonic) تا لحظه شکست آنها است. به نظر می‌رسد این آزمایش، شرایط کاربری واقعی یک کارابین را نمی‌تواند پوشش دهد، چراکه کارابین‌ها در حین استفاده، مدام در حال تغییر شرایط تحمل بار هستند به گونه‌ای که در حین سقوط کوهنورد، آویزان شدن از طناب و پایین آمدن از

از آلیاژهای آلومینیوم سری ۷xxx به دلیل چگالی کم و استحکام بالا در صنایع مختلفی از جمله ساخت بدنه سازه های هوایی و حمل و نقل زمینی استفاده می‌شود [۹-۱۱]. همچنین از این آلیاژها در ساخت تجهیزات و ابزارهای کوهنوردی و سنگ‌نوردی استفاده می‌شود. اکثر ابزارهای مورد استفاده در این زمینه با روش‌هایی مانند خم کردن، فورج سرد یا گرم تولید می‌شوند [۱۴-۱۰]. کارابین یکی از مهم‌ترین ابزارهای سنگ‌نوردی و کوه‌نوردی است که برای اتصال اجزای مختلف یک سیستم صعود به یکدیگر، استفاده می‌شود. با توجه به اینکه کارابین‌ها مهم ترین ابزارهای کوه‌نوردی و سنگ‌نوردی

* نویسنده مسئول:

دکتر باقر محمدصادقی

نشانی: تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی.

تلفن: ۷۳۲۲۸۸۶۲ (۲۱) ۹۸+

پست الکترونیکی: bmsadeghi@iust.ac.ir

عمر کارابین های میانی مسیر (quick draw) را برآورد کرده و در صورت لزوم نسبت به استفاده از ابزار تجدید نظر نمایند. نوآوری این پژوهش بدست آوردن خواص کششی برای ابزاری با هندسه خاص مانند کارابین است و از آنجایی که در آن از نمونه های مرسوم کشش استفاده نمی شود، لذا نتایج این نوع از تحقیقات را می توان به عنوان نوآوری برشمرد. در این تحقیق رفتار خستگی یک نوع کارابین خاص و رایج مورد بررسی عددی و تجربی قرار گرفته است. ابتدا چند کارابین از نوع GUARDO تهیه شد. پس از انجام کوانتومتری و تعیین آلیاژ بکار رفته در ساخت کارابین و انجام آزمایش کشش ساده، منحنی نیرو بر حسب جابجایی و ضرایب ایمنی آن تعیین شدند. از منحنی کشش آزمایشگاهی و هندسه طراحی شده در نرم افزار CATIA جهت شبیه سازی در نرم افزار المان محدود ABAQUS و FE-safe استفاده شد. در ادامه به منظور اعتبارسنجی نتایج شبیه سازی، نمونه کارابین مطابق شرایط پیش بینی شده در حالت کاربری و شرایط شبیه سازی شده، تحت بارگذاری خستگی قرار گرفت. همچنین سطوح شکست توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی و تصاویر مقطع شکست ثبت شدند. در انتها منحنی پیش بینی کننده نیرو بر حسب تعداد چرخه تا شکست (F-N) برای این نوع کارابین ارائه شد.

۲. مواد و روش تحقیق

تعدادی کارابین از نوع GUARDO ساخت شرکت فرانسوی EDELWEISS تهیه شد. مشخصات فیزیکی و مکانیکی کارابین ها در جدول (۱) ارائه شده است. شکل (۱) نیز تصویر یک نمونه از کارابین های تهیه شده را نشان می دهد. از بین کارابین های مختلف موجود در بازار این مدل به دلیل داشتن بدنه صاف در محور اصلی کارابین انتخاب شد، چرا که به پژوهشگر امکان استخراج نمونه های مناسب برای انجام آزمایش های مکانیکی را می دهد. مطابق اطلاعات شرکت سازنده، شکل متقارن این کارابین قفل شونده، آنرا برای هم تراز نگه داشتن اجزای سیستم صعود در شرایط کاربری سخت، مناسب کرده است.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و مکانیکی کارابین GUARDO.

وزن	۷۳ g
ماده	Light Aluminium Alloy
میزان باز شدن قفل	۱۸ mm
استحکام در محور اصلی	۲۱ kN
استحکام در محور افقی	۸ kN
استحکام در محور اصلی با درب باز	۶ kN
طول کارابین	۱۱۰ mm
عرض کارابین	۶۱ mm

آن ممکن است این اتفاق رخ دهد. محدوده نیروی وارد بر این کارابین ها ۱-۲۰ kN گزارش شده است [۱۵] ولی معمولاً نیروی وارد بر آن ها در محدوده ۱-۱۰ kN است. کارابین ها معمولاً از میله های آلومینیومی اکستروژده شده با قطرهای ۱۰ mm، ۱۱ mm و ۱۲ mm ساخته می شوند. میله اکستروژده شده در طول مناسب بریده شده و پس از طی فرآیندهایی مانند خمکاری، فورج داغ و فورج سرد، کارابین با ابعاد نهایی تولید می شود. امروزه برای شکل دهی کارابین ها بیش تر از فرآیندهای مرتبط با فورج استفاده می شود که آن هم به دلیل افزایش توانایی در طراحی شکل های پیچیده و دلخواه و افزایش استحکام نهایی در حین فرآیند فورج است [۱۰]. در پژوهش علیها و همکاران [۱۶] مدل سه بعدی کارابین Type-D تولیدی شرکت PETZL فرانسه، با استفاده از اسکن لیزری که منجر به تهیه هندسه و ابعاد واقعی قطعه مورد نظر می شود، تهیه شد. این مدل در نرم افزار المان محدود ABAQUS وارد شده و با تعداد ۱۵۳۲۷۴ المان حجمی شش وجهی و چهاروجهی، مش بندی شد. مقادیر تمرکز تنش بر روی ترک در جهات مختلف در این پژوهش تابعی از ابعاد ترک و نیروی اعمالی در نظر گرفته شد. پس از آن با استفاده از رابطه پاریس تعداد چرخه های منجر به شکست و عمق ترک بحرانی محاسبه شد. کمترین عمر خستگی مربوط به ترکی است که عمق آن ۷/۶۶ mm بوده و محور عمود بر سطح ترک با محور اصلی بارگذاری زاویه ۳۰ درجه داشته و در این شرایط و با اعمال نیروی ۱/۲ kN تعداد چرخه های منجر به شکست برابر با ۲۶۷۳۵۰ چرخه محاسبه شد.

در پژوهش بلیر^۱ و کاستر^۲ [۱۵] برای تعیین نحوه عملکرد کارابین های آلومینیومی در حالت بارگذاری چرخه ای، کارابین تولید شده در شرایط فورج سرد (با شکل خاص، طرح D) با وزن ۵۰ g و ساخته شده از آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ تحت بارهایی با مقادیر مختلف در دو حالت درگاه باز و بسته مورد بررسی قرار گرفت. تغییر شکل کارابین در طول آزمایش به طور پیوسته با کرنش سنج نصب شده روی بدنه اصلی کارابین ثبت شد. طبق گزارش این افراد، رفتار خستگی و تعداد چرخه شکست در کارابین ها به شدت به هندسه آنها وابسته است و در نتیجه پیش بینی و ارائه یک الگوی یکسان برای رفتار خستگی در همه کارابین ها کار دشواری است. لذا با توجه به نوع آلیاژ و مشخصات هندسی کارابین، ارائه یک منحنی نیرو بر حسب تعداد چرخه تا شکست L-N^۳ با ثوابت اختصاصی برای هر کارابین، ضروری به نظر می رسد. دو محقق فوق الذکر ارتباط بین نیرو (kN) و عمر خستگی را برای کارابین مورد مطالعه خود به صورت $L_0 = 39.3 \times N_0^{-0.25}$ و $L_c = 85.4 \times N_c^{-0.25}$ به ترتیب در حالت درگاه بسته و درگاه باز تعیین کردند. افراد صعود کننده با استفاده از این رابطه کاربردی می توانند

1. Blair
2. Custer
3. Load-Number of cycles to failure

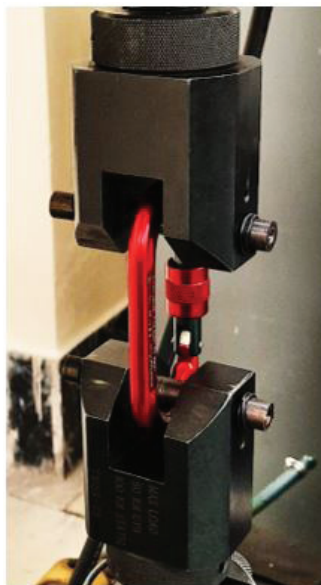
جدول ۲. میانگین ترکیب شیمیایی کارابین مورد استفاده در این تحقیق (بر حسب درصد وزنی).

نام آلیاژ	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
آلیاژ مورد استفاده در ساخت کارابین	0.13	0.01	2.16	0.08	2.37	0.22	5.89	89.07
آلیاژ AI-7175 استاندارد [۱۷]	0.15	0.20	1.2-2.0	0.1	2.1-2.9	0.18-0.28	5.1-6.1	88.0-90.7

جدول ۳. ابعاد پین‌های موجود در پایه نگهدارنده [۱۳].

شعاع مجاز پین چرخان	6 ± 0.05 mm
شعاع مجاز پین غیر چرخان	5 ± 0.05 mm

شکل (۲) فک های مورد استفاده برای قراردادن کارابین در دستگاه کشش را نشان می دهد. آزمایش کشش ساده با سرعت ۳۵ mm/min تا شکست کارابین ادامه یافت.



شکل ۲. فک های مورد استفاده برای قراردادن کارابین در دستگاه کشش

در ادامه برای تعیین عمر خستگی این نوع کارابین، آزمایش خستگی با دستگاه کشش ساده و فک های مذکور اما با بارگذاری چرخه (مقدار نیرو از صفر تا ۱۵ kN) با فرکانس ۲ Hz (زمان چرخه ۰/۵ s مطابق شکل (۳)) انجام شد. نیروی حداکثر در چرخه بارگذاری خستگی، با نگاهی به نیروی وارد بر طناب و کارابین در صورت سقوط یک صعودکننده و ابزارهای همراه او به وزن ۱۲۰ kg محاسبه شد. در صورت سقوط صعود کننده نیروی ایجاد شده در طناب از طریق رابطه (۱) قابل محاسبه است. در این رابطه M وزن صعود کننده، g شتاب گرانش زمین، k مدول الاستیک طناب و F فاکتور سقوط است [۱۹].

$$T = Mg \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2kF}{Mg} \right)} \right] \quad \text{رابطه (۱)}$$



شکل ۱. تصویر یک نمونه کارابین استفاده شده در این تحقیق.

میانگین نتایج کوانتومتری از سه نقطه در جدول (۲) ارائه شده است. با مقایسه نتایج کوانتومتری حاصل از سطح مقطع نمونه های جدا شده از محور اصلی و ترکیب شیمیایی آلیاژهای آلومینیوم مذکور در منابع استاندارد [۱۷]، ماده مورد مطالعه، آلیاژ آلومینیوم AI-7175 شناسایی شد.

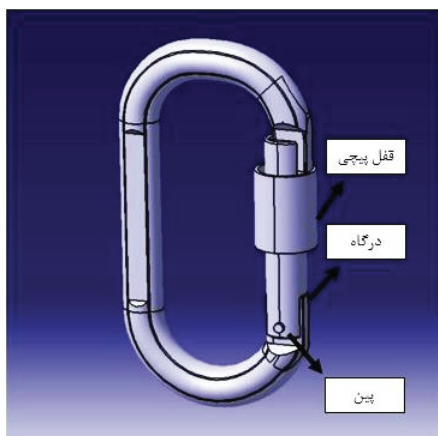
روش انجام آزمایش کشش و خستگی

در ابتدا برای تعیین خواص کششی آلیاژ AI-7175، یک نمونه آزمایش از محور اصلی کارابین تهیه شد. آزمایش کشش مطابق استاندارد ASTM-E8 [۱۸] انجام شد. همچنین برای تعیین خواص کششی کارابین، آزمایش کشش یکنواخت بر روی کارابین مورد نظر انجام شد. در ابتدا کارابین بر روی دستگاه آزمایش کشش (مدل INSTRON) مطابق با استاندارد ASTM F 1774-99 [۱۳] مرتبط با کارابین های سنگ نوردی و کوهنوردی، در فک های دستگاه قرار گرفت. مطابق این استاندارد برای اندازه گیری استحکام کارابین، فک های نگهدارنده مطابق ابعاد ذکر شده در جدول (۳) طراحی و ساخته شد تا کارابین در حین آزمایش از امتداد محور بارگذاری خارج نشود. ابعاد این پایه ها در مرجع [۱۳] ذکر شده است.

در این رابطه $g = 10 \text{ m.s}^{-2}$ ، $v_0 = 0 \text{ m.s}^{-1}$ و $d_0 = 0 \text{ m}$ در نظر گرفته شد. با این فرضیات می‌توان اظهار کرد که نیروی حداکثر محاسبه شده در مدت زمان مذکور در حین سقوط، به کارابین حمایت وارد می‌شود و در انتها می‌توان تعداد چرخه در شرایط سقوط فاکتور دو، که یک کارابین پیچی می‌تواند قبل از شکست تحمل کند را بدست آورد. پس از انجام آزمایش خستگی، سطوح شکست در نمونه کارابین توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل TESCANA-VAGA2 بررسی و از نقاط مختلف تصویربرداری شد.

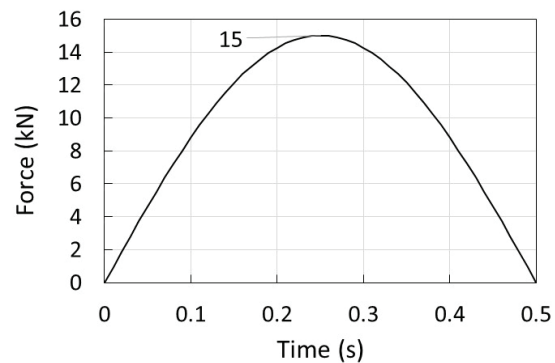
نحوه انجام شبیه‌سازی خستگی

شبیه‌سازی خستگی در این پژوهش به منظور بدست آوردن ارتباط بین نیرو و تعداد چرخه منجر به شکست در کارابین مدل GUARDO انجام شد. در ابتدا مدل سازی هندسی کارابین در نرم افزار CATIA P3 V5-6R2017 انجام شد. تصویر مدل خروجی کارابین در شکل (۴) مشخص است. مدل ترسیم شده در نرم‌افزار المان محدود ABAQUS نسخه ۲۰۲۰ فراخوانی و ارتباط بین اجزا مختلف کارابین تعریف شد. درگاه کارابین در این شبیه‌سازی به منظور کاهش زمان محاسباتی جسم صلب^۴ در نظر گرفته شد تا محاسبات تنش و کرنش بر روی آن انجام نشود. کارابین مدل سازی شده تحت بارهای مختلف (۳،۹،۱۳،۱۵،۲۱ kN) قرار گرفت و خروجی نرم افزار (مقادیر تنش و کرنش در هر المان)، در نرم‌افزار FE-safe تحلیل و تعداد چرخه منجر به شکست در هر المان مشخص شد. جزئیات مراحل شبیه‌سازی در ادامه تشریح شده است.



شکل ۴. مدل سازی هندسی کارابین ترسیم شده در نرم‌افزار CATIA P3.

پس از انجام محاسبات استقلال از مش در نرم افزار ABAQUS، اندازه و نوع مش مناسب انتخاب شد. در ادامه این بخش به روش بررسی استقلال از مش و نتایج آن اشاره شده است. کارابین طراحی شده پس از اعمال مش، دارای



شکل ۳. منحنی تغییرات چرخه بارگذاری در دستگاه آزمایش خستگی با دوره تناوب ۰/۵ s، نیروی حداقل صفر در ابتدا و انتهای چرخه و نیروی حداکثر ۱۵ kN در زمان ۰/۲۵ s در میانه چرخه.

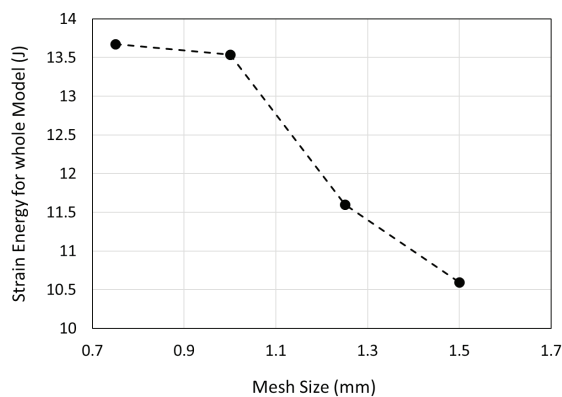
$$F = \frac{\text{Distance Fallen}}{\text{Rope in Service}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

فاکتور سقوط از طریق رابطه (۲) قابل محاسبه است. عدد فاکتور سقوط می‌تواند بین صفر تا دو باشد. سقوط فاکتور با مقدار ۲، بیشترین نیرو را در طناب ایجاد می‌کند و به عنوان خطرناک‌ترین شرایط برای ابزار و صعودکننده در نظر گرفته شده است [۱۹]. در این تحقیق نیز به منظور در نظر گرفتن حد بالایی در ایمنی ابزار، حادثه‌ترین شرایط برای محاسبه نیرو، یعنی فاکتور سقوط $F = 2$ در نظر گرفته شد.

با در نظر گرفتن $M = 120 \text{ kg}$ ، $g = 10 \text{ m.s}^{-2}$ و مدول الاستیک طناب $k = 30 \text{ kN}$ در منابع استاندارد [۱۵]، مقدار نیروی وارد بر طناب در صورت وقوع سقوط فاکتور ۲، طبق رابطه (۱) $T = 13.26 \text{ kN}$ محاسبه شد. با لحاظ کردن ایمنی در شرایط سقوط، مقدار نیروی وارد بر کارابین حمایت در شرایط ذکر شده مقداری بیشتر از عدد محاسبه شده، یعنی ۱۵ kN در نظر گرفته شد.

مقدار ضریب ایمنی از نتایج آزمایش کشش ساده کارابین در حالت درگاه بسته بدست آمد. بدین صورت که مطابق استاندارد درج شده بر روی کارابین، این ابزار در راستای محور اصلی مقدار ۲۱ kN را تحمل می‌کند. در آزمایش کشش انجام شده در این تحقیق، نیروی حداکثر قابل تحمل برای این کارابین مقدار $23/3 \text{ kN}$ بدست آمد. این محاسبه حاکی از در نظر گرفتن ضریب ایمنی ۱/۱ در این ابزار است. مطابق قوانین فیزیک برای حرکت یک جسم با شتاب ثابت، برای محاسبه مسافت طی شده از رابطه (۳) باید استفاده کرد [۲۰]. در حالت سقوط مورد نظر در این پژوهش زمان سقوط در مسافت ۱ m برابر با ۰/۵ s است.

$$d = \frac{1}{2}(gt^2) + v_0t + d_0 \quad \text{رابطه (۳)}$$

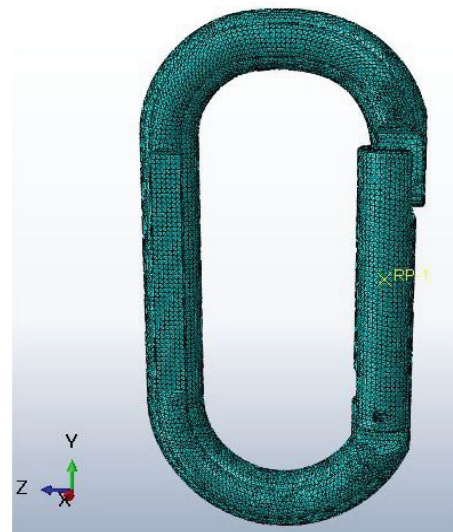


شکل ۶. منحنی تغییرات انرژی کرنشی کل مدل در اندازه مش‌های مختلف به منظور بررسی استقلال نتایج از مش.

در ادامه برای تعیین محل اعمال بار (از نوع جابجایی یا نیرو) در نرم افزار ABAQUS، نحوه قرارگیری کارابین در دستگاه کشش مورد بررسی دقیق قرار گرفت. در استاندارد ASTM F 1774-99 با عنوان "مشخصات تعیین شده برای کارابین‌های سنگ‌نوردی و کوهنوردی"، نحوه قرارگیری هر کارابین بر روی دستگاه، برای انجام آزمایش کشش و خستگی تعیین شده است. مطابق این استاندارد استوانه فولادی با شعاع 5 ± 0.5 mm [۱۳] نیروی تعیین شده در دستگاه را به کارابین وارد می‌کند. در ادامه به منظور کاهش زمان محاسبات در نرم‌افزار، پس از مش زدن کل قطعه، در راستای محور اصلی گره‌هایی در ناحیه‌ای به ابعاد ۱۰ mm در بالا و پایین بر روی کارابین مشخص و بارگذاری بر روی این دو ناحیه اعمال شد. این دو قسمت در شکل (۷) مشخص شده‌اند. ثابت بودن فک بالا و تحرک فک پایین در آزمایش عملی، در دو حالت زیر بر روی کارابین اعمال شد؛ الف- گره‌های تعیین شده در قسمت بالا در راستای محور ۷ حرکت ندارند. حرکت دورانی این گره‌ها در راستای سه محور اصلی نیز محدود شده است، ب- گره‌های تعیین شده در قسمت پایین در راستای محور ۷ تحت بارگذاری از نوع جابجایی قرار گرفته‌اند و در راستای سه محور اصلی حرکت دورانی ندارند.

به علت عدم توانایی نرم‌افزار در توزیع و تحلیل نیروهای زیاد در محل تماس میله با کارابین، بارگذاری از نوع کنترل شونده با جابجایی، انتخاب و اعمال شد. برای تعیین مقدار جابجایی ناشی از هر نیرو در کارابین، از منحنی نیرو-جابجایی حاصل از آزمایش کشش ساده (کارابین با درگاه بسته) که در ابتدای این بخش به آن اشاره شد، استفاده شد. منحنی نیرو-جابجایی بدست آمده از این آزمایش در شکل (۸) قابل مشاهده است. در هر تحلیل شبیه سازی، مقادیر جابجایی به گونه ای اعمال شده تا نیروهای مورد انتظار در خستگی در کارابین ایجاد شود. جدول (۵) مقادیر جابجایی و نیروهای متناظر اعمال شده را نشان می دهد. این مقادیر از منحنی

۱۵۲۶۵۶ المان درجه دوم از نوع گوه‌ای C3D10^۵ است. تعداد المان‌ها در قسمت درگاه و پین که در آن‌ها تحلیل مقادیر تنش و کرنش انجام نمی‌شود، ۳۱۳۶۳ المان از نوع C3D8 است. تصویر قطعه پس از اعمال مش در شکل (۵) قابل مشاهده است.



شکل ۵. تصویر کارابین مدل سازی شده پس از اعمال مش با اندازه مش بهینه.

به منظور بررسی استقلال نتایج از اندازه مش، شبیه سازی با اعمال نیروی ۱۳ kN انجام و پارامتر انرژی کرنشی کل مدل تحت این بارگذاری با تعداد مختلف المان (یا به عبارتی با اندازه های مختلف المان) بررسی شد. جدول (۴) اندازه مش و تعداد المان‌های حاصل از مش بندی با اندازه‌های مختلف را نشان می‌دهد. شکل (۶) ثابت شدن تقریبی مقدار انرژی کرنشی کل مدل بین مش‌بندی با اندازه ۷۵ mm تا ۱ mm را نشان می‌دهد. به منظور کاهش هزینه‌های محاسباتی مش‌بندی نهایی با اندازه ۱ mm با تعداد ۱۵۲۶۵۶ المان از نوع C3D10 بر روی بدنه اصلی کارابین به عنوان مش‌بندی بهینه انتخاب و برای شبیه‌سازی سایر کارابین‌ها نیز استفاده شد.

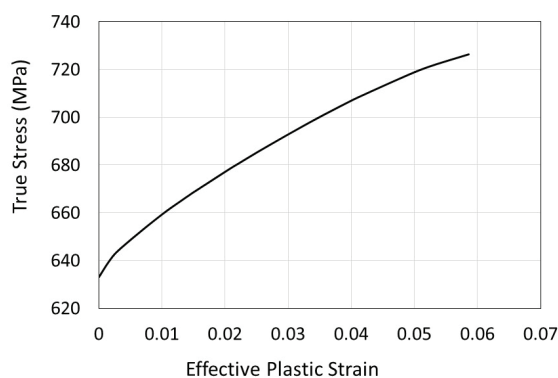
جدول ۴. اندازه مش و تعداد المان‌های حاصل از مش‌بندی با اندازه ذکر شده

تعداد المان بر روی بدنه اصلی	اندازه مش (mm)
309915	0.75
152656	1
93729	1.25
60960	1.5

5. Quadratic Tetrahedral Elements

منابع علمی [۲۱، ۲۲] انتخاب و مقادیر مدول الاستیک $E = 72$ GPa و ضریب پواسون $\nu = 0.33$ اعمال شد. مقادیر استحکام تسلیم و استحکام نهایی کششی حقیقی این آلیاژ پس از انجام آزمایش کشش استاندارد و ترسیم منحنی تنش-کرنش حقیقی به ترتیب برابر 633 MPa و 726 MPa تعیین شدند. مقادیر تنش و کرنش حقیقی در ناحیه پلاستیک از بخش های الزامی خواص پلاستیک مواد در این نرم افزار است، که اعداد مربوطه مطابق منحنی شکل (۹) در نرم افزار وارد شدند. میزان کرنش پلاستیک از نقطه تسلیم تا استحکام نهایی در نظر گرفته شد. بعبارتی کرنش اعمال شده باید معادل کرنش حقیقی پلاستیک از نقطه تسلیم تا نقطه گلوپی در آزمایش کشش در نظر گرفته شود. این مقادیر کرنش مطابق رابطه (۴) پس از انجام آزمایش کشش محاسبه شد [۲۳].

$$\epsilon_p = \epsilon_{total} - \left(\frac{\sigma_{total}}{E} \right) \quad \text{رابطه (۴)}$$

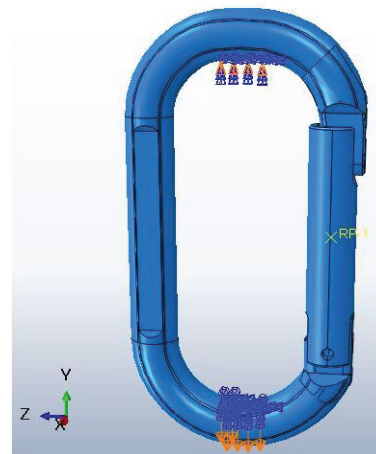


شکل ۹. منحنی تنش حقیقی-کرنش حقیقی پلاستیک در محدوده تنش تسلیم و استحکام نهایی ماده (نقطه UTS) حاصل از آزمایش کشش استاندارد آلیاژ AI-7175

شبیه سازی خستگی آلیاژ تشکیل دهنده کارابین در نرم افزار FE-safe

خروجی های نرم افزار ABAQUS که شامل دامنه کرنش الاستیک و پلاستیک و تنش در هر سه راستای مختصات کارترین برای تمام المان و گره های کارابین است، برای هر یک از شرایط بارگذاری خستگی در قالب فایل Job به عنوان فایل ورودی در نرم افزار FE-safe فراخوان (Import) شدند. ثوابت خستگی مربوط به آلیاژ AI-7175 در نرم افزار FE-safe با استفاده از استحکام تسلیم و استحکام نهایی کشش مهندسی (به دست آمده از آزمایش کشش استاندارد)، مدول یانگ موجود در منابع علمی [۲۲]، مطابق مدل تخمین ثوابت خستگی سیگر^۶ [۲۴] محاسبه شدند. مطابق رابطه (۵)، دامنه کرنش از دو بخش الاستیک و پلاستیک تشکیل شده است. رابطه (۶) نیز مدل تخمین عمر خستگی مانسون-

6. Seeger Model

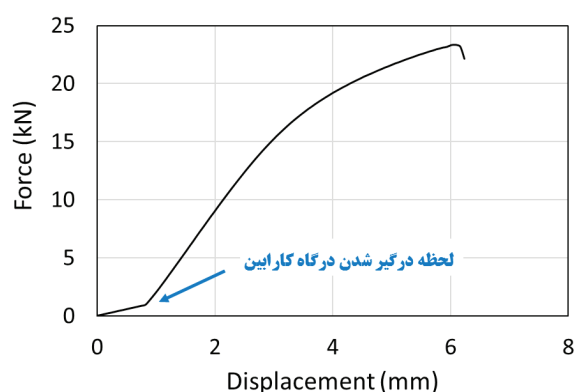


شکل ۷. نواحی تحت بار در کارابین شبیه سازی شده در نرم افزار ABAQUS

نیرو-جابجایی آزمایش کشش (شکل ۸) استخراج و در جابجایی بخش تحتانی کارابین اعمال شد.

جدول ۵. مقادیر جابجایی اعمال شده بر روی قسمت پایین کارابین و نیروهای متناظر با آن.

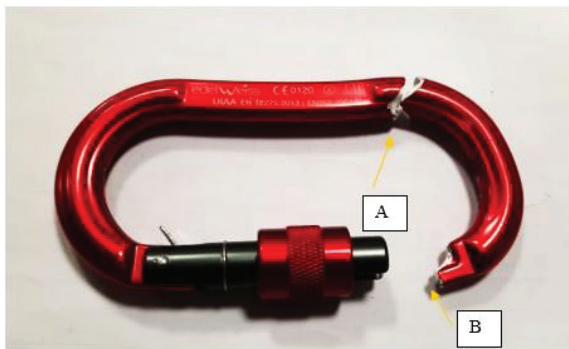
نیرو (kN)	جابجایی (mm)
3	1.17
9	2.04
13	2.64
15	2.99
21	4.76



شکل ۸. منحنی نیرو-جابجایی بدست آمده از آزمایش کشش ساده بر روی کارابین با درگاه بسته.

نحوه تعریف خواص آلیاژ تشکیل دهنده کارابین در نرم افزار ABAQUS

در بخش اول تعیین خواص در نرم افزار ABAQUS، خواص الاستیک آلیاژ تشکیل دهنده کارابین، آلیاژ AI-7175، مطابق



شکل ۱۰. مقاطع شکسته شده در کارابین پس از آزمایش خستگی.

خستگی با فلش سفید رنگ مشخص شده اند. به نظر می رسد جوانه زنی در این منطقه در لایه های زیرسطحی از مناطق حاوی فاز ثانویه ترد شروع شده است. در ادامه خستگی، ترک ایجاد شده شروع به رشد پایدار کرده و خطوط موجی^۸ شکل در سطح مقطع شکست ایجاد کرده است. این خطوط که مشخصه منطقه دوم رشد ترک خستگی هستند، به وضوح در شکل (۱۱-ب) مشاهده می شوند. همچنین جهت رشد ترک در منطقه رشد پایدار با فلش در شکل (۱۱-الف) مشخص شده است. به نظر می رسد که رشد ترک در مرحله دوم رشد، مستقل از صفحات کریستالوگرافی رخ داده است.

در نواحی مختلف سطح شکست امواجی با دامنه های متفاوت مشاهده می شود که احتمالا در هنگام عبور ترک از یک دانه به دانه ای دیگر ایجاد شده اند. همچنین نمونه هایی از ترک های ثانویه در شکل (۱۲) نشان داده شده اند. ترک های ثانویه چندشاخه بطور عمده ناشی از حضور رسوبات در درون یا مرز دانه ها بوده که منجر به تغییر مسیر رشد ترک می شوند. لذا با توجه به حضور ذرات فاز ثانویه به خصوص فازهایی که با زمینه به صورت غیر هم سیما هستند، این احتمال را تقویت می کند که انتخاب مسیر ترک در هنگام رشد در مرحله دوم رشد ترک خستگی عامل اصلی برای ایجاد ترک های ثانویه و همچنین شکست موضعی در فصل مشترک فاز ثانویه و زمینه بصورت ترد بوده است. نمونه ای از این فازهای ترد در شکل (۱۳) قابل مشاهده است. با آنالیز عنصری انجام شده در حین شکست نگاری، رسوب مشاهده شده در وسط شکل (۱۳)، فاز شکست نگاری، S-phase (Al₂CuMg) تشخیص داده شد. این رسوب یک فاز ترد بوده و نوع شکست آن نیز در تصویر گویای این مطلب است.

نتایج شبیه سازی خستگی

همانطور که در بخش روش تحقیق ذکر شد، به منظور دستیابی به نقطه شروع ترک و تعیین تعداد چرخه هایی که منجر به شکست تحت بارهای مختلف (۳،۹،۱۳،۱۵،۲۱ kN)

کافین-باسکویین^۷ [۲۵] را نشان می دهد. عمر خستگی هر المان از کارابین در نرم افزار FE-safe [۲۶] با استفاده از روابط و ثوابت مذکور، محاسبه شد.

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\Delta \varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_p}{2} \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \left(\frac{\sigma'_f}{E} \right) (2N_f)^b + (\varepsilon'_f) (2N_f)^c \quad \text{رابطه (۶)}$$

پارامترهای رابطه (۶) در جدول (۶) معرفی و مقادیر محاسبه شده آنها در نرم افزار FE-safe نشان داده شده است.

جدول ۶. مقادیر پارامترهای مربوط به مدل تخمین عمر خستگی آلیاژ Al-7175 محاسبه شده توسط نرم افزار FE-safe [۲۶].

مقدار محاسبه شده	تعریف	پارامتر
1125 MPa	ضریب استحکام خستگی	σ'_f
0.35	ضریب داکتیلیتی خستگی	ε'_f
-0.095	توان استحکام خستگی	b
-0.69	توان داکتیلیتی خستگی	c

پس از انجام محاسبات عمر خستگی در نرم افزار FE-safe نتایج در یک فایل خروجی با پسوند "odb" ذخیره شده و دوباره در نرم افزار ABAQUS جهت نمایش بر روی تصویر کارابین بازخوانی شدند. نتایج شبیه سازی عمر خستگی در بخش نتایج ارائه و تحلیل شده است.

۳. نتایج و بحث

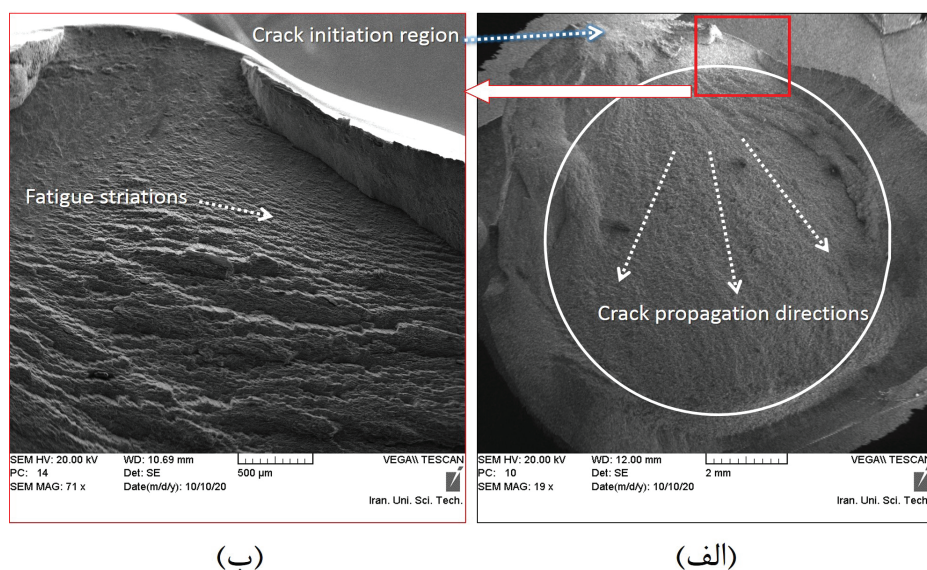
نتایج تجربی آزمایش خستگی

آزمایش خستگی بر روی نمونه کارابین اولیه برای تعیین تعداد چرخه تا شکست و بررسی مقطع شکست، انجام شد. نمونه کارابین با شرایط بارگذاری ذکر شده در بخش روش تحقیق، پس از ۲۲۲۷ چرخه دچار شکست شد. تصویر کارابین پس از شکست در شکل (۱۰) قابل مشاهده است. در این شکل، مقطع شکست A، محل شکست خستگی و مقطع B، شکست ناگهانی در اثر نیروی آخرین چرخه خستگی می باشد.

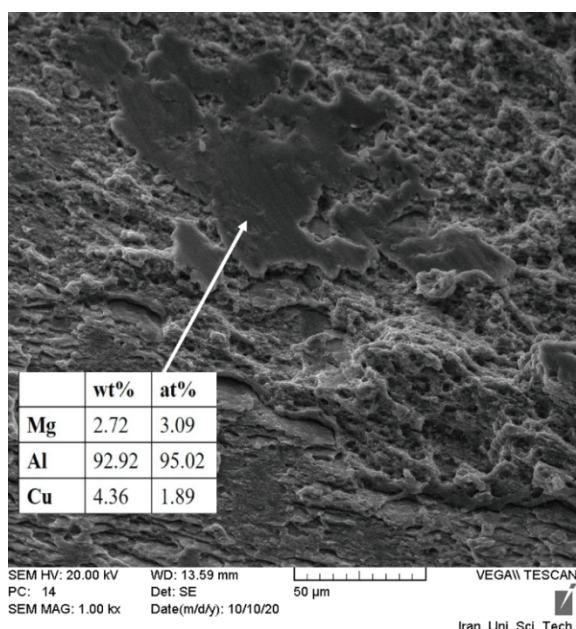
سطح شکست در ناحیه A با میکروسکوپ الکترونی TESCAN-VAGA2 بررسی شد. تصاویر SEM از سطح شکست در ناحیه A در شکل (۱۱) در دو بزرگنمایی نشان داده شده است. در نیمه بالایی شکل (۱۱-الف) ناحیه داخلی محور اصلی کارابین مشاهده می شود. نتایج بدست آمده در این تحقیق حاکی از آن است که شروع ترک خستگی از سطوح انحنای داخلی محور اصلی کارابین که تحت تنش کششی بیشتری قرار دارد و دارای کمترین جابجایی در حین بارگذاری بوده، رخ می دهد. در شکل (۱۱-الف) مناطق جوانه زنی و شروع رشد ترک

8. Striation Marks

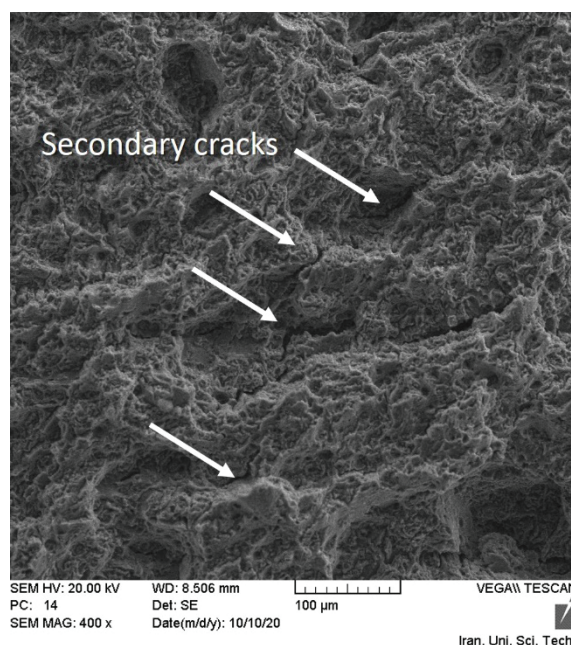
7. Manson-Coffin-Basquin



شکل ۱۱. تصویر SEM از سطح شکست کارابین در اثر خستگی، الف- کل سطح شکست و ب- تصویر بخشی از سطح شکست با بزرگنمایی بالاتر.



شکل ۱۳. تصویر SEM و آنالیز عنصری از فاز ثانویه با شکست ترد مشاهده شده در سطح مقطع شکست خستگی کارابین.



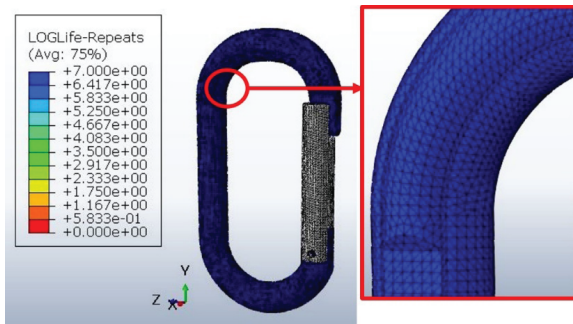
شکل ۱۲. ترک‌های ثانویه مشاهده شده در تصویر SEM از سطح شکست خستگی کارابین.

برحسب زمان نشان می‌دهد. مطابق این شکل، جابجایی به صورت ناگهانی به محل مورد نظر اعمال نشده‌است، بلکه با گذشت زمان نیمه اول چرخه (۰/۲۵ s) جابجایی به صورت خطی تا مقدار مورد نظر افزایش یافته‌است. با مشاهده منحنی نیرو-جابجایی در آزمایش کشش یکنواخت کارابین می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات خطی جابجایی منجر به تغییرات غیرخطی نیرو خواهد شد و لذا نزدیکترین رابطه غیرخطی برای تغییرات نیرو، رابطه تغییرات سینوسی تشخیص داده

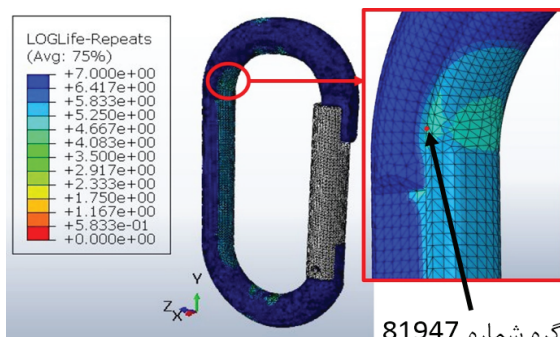
می‌شود و همچنین تعیین رابطه بین نیرو و تعداد چرخه منجر به شکست در کارابین، دو نرم‌افزار ABAQUS و FE-safe به کار گرفته شد. همچنین خواص کششی آلیاژ Al-7175 با استفاده از آزمایش کشش استاندارد بدست آمد. همچنین از نتایج آزمایش کشش یکنواخت کارابین (مقادیر نیرو و جابجایی) در شبیه سازی بارگذاری خستگی کارابین استفاده شد.

شکل (۱۴) تغییرات خطی جابجایی اعمال شده را

از ۲۲۲۷ چرخه دچار شکست شده و خطای کمتر از ۳ درصد نشان از دقت زیاد در نتایج شبیه سازی است.

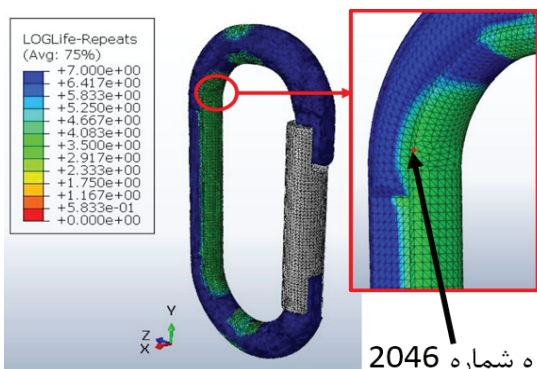


شکل ۱۵. توزیع لگاریتم عمر خستگی در کارابین تحت بار ۳ kN و عدم وقوع ترک خستگی پس از طی 10^7 چرخه.



گره شماره 81947

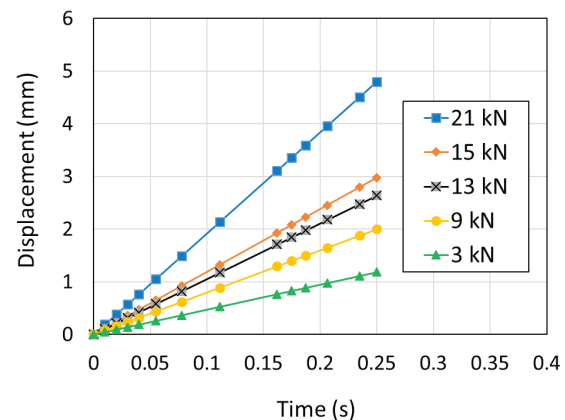
شکل ۱۶. توزیع لگاریتم عمر خستگی در کارابین تحت بار ۹ kN و موقعیت (شماره گره) وقوع ترک خستگی پس از طی $10^{5.12}$ یا 131826 چرخه.



گره شماره 2046

شکل ۱۷. توزیع لگاریتم عمر خستگی در کارابین تحت بار ۱۳ kN و موقعیت (شماره گره) وقوع ترک خستگی پس از $10^{3.65}$ یا 4467 چرخه.

شد. به همین دلیل در نرم افزار ABAQUS اعمال تغییرات خطی جابجایی در مدت زمان نیمه اول چرخه در لبه پایینی کارابین، موجب اعمال نیرو به صورت سینوسی در این قسمت از کارابین خواهد شد. این تغییرات نیرو مشابه شرایط بارگذاری خستگی در کارابین واقعی می باشد.



شکل ۱۴. تغییرات مقدار نیرو در اثر جابجایی در مدت زمان نیمه اول چرخه بارگذاری، اعمال شده در نرم افزار المان محدود ABAQUS.

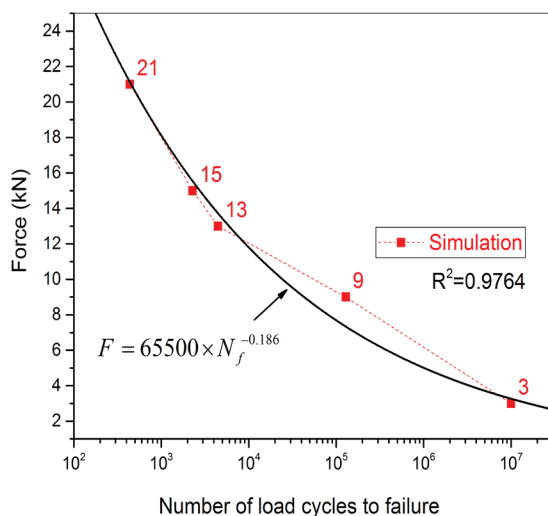
شکل های (۱۵) تا (۱۹) نتایج خروجی از نرم افزار FE-safe را نشان می دهند. در این تصاویر توزیع لگاریتم عمر خستگی در کارابین و موقعیت المان با کمترین عمر خستگی در مقادیر مختلف بارگذاری مشاهده می شود. به غیر از شکل (۱۵) در بقیه موارد توزیع مشابهی از لگاریتم عمر خستگی مشاهده می شود. در شکل (۱۵) به نظر می رسد مقدار نیرو برای شروع رشد ترک در قطعه کافی نبوده و پس از طی ۱۰۷ چرخه هنوز تغییری در قطعه رخ نداده است. همچنین در المان های ناحیه داخل انحنا و قسمت بالای محور اصلی کارابین با حداقل جابجایی، کمترین مقدار عمر خستگی مشاهده می شود. این بخش از کارابین دارای بیشترین تنش و کرنش و در عین حال کمترین جابجایی در امتداد بارگذاری است. لازم به ذکر است که کارابین در آزمایش خستگی در قسمت بالا ثابت بوده و از قسمت پایین کشیده می شود.

نتایج این تحقیق نشان داد که محل پیش بینی شده شروع ترک خستگی در شبیه سازی با نرم افزارهای ABAQUS و FE-safe مطابقت خوبی با نتایج آزمایش عملی دارد. در شکل (۲۰) موقعیت شکست خستگی و تعداد چرخه تا شکست در نتایج شبیه سازی شده و همچنین آزمایش خستگی در نمونه واقعی کارابین تحت نیروی ۱۵ kN نمایش داده شده است. مقایسه این نتایج، حاکی از دقت بالای نتایج شبیه سازی در پیش بینی محل وقوع شکست و عمر خستگی را در کارابین نشان می دهد. شکست خستگی در کارابین شبیه سازی شده در ناحیه مشخص شده در شکل (۲۰-الف) پس از حدود ۲۲۹۰ چرخه و در کارابین واقعی مطابق شکل (۲۰-ب) پس

شکست را برای کارابین مدل GUARDO در قالب یک رابطه ریاضی (رابطه (۷)) پیشنهاد کرد.

$$F = 65500 \times N_f^{-0.186} \quad \text{رابطه (۷)}$$

در این رابطه $F(N)$ نیروی اعمالی بر کارابین مدل GUARDO و N_f تعداد چرخه منجر به شکست می باشد. این رابطه یکی از دستاوردهای مهم و کاربردی این تحقیق است که می تواند در ساخت و استفاده از این نوع کارابین مورد توجه قرار گیرد. چنانچه در شکل (۲۱) نیز مشاهده می شود، داده های بدست آمده از شبیه سازی بارگذاری چرخه ای یعنی نیروی اعمالی بر حسب تعداد چرخه منجر به شکست خستگی با منحنی رابطه (۷) مطابقت زیادی دارند.

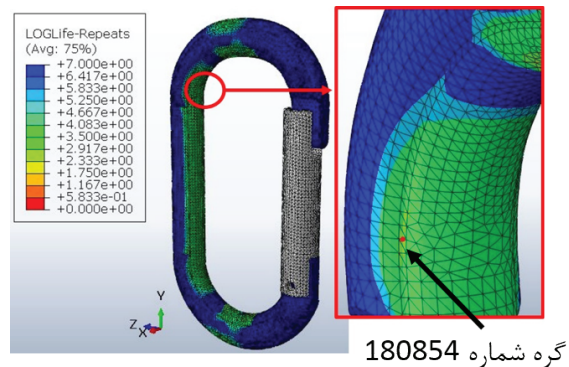


شکل ۲۱. منحنی رابطه پیشنهادی (۷) به همراه نتایج شبیه سازی نیرو بر حسب تعداد چرخه تا شکست در کارابین شبیه سازی شده.

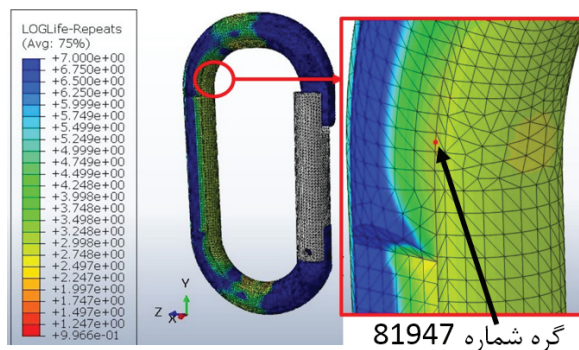
۴. نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی تجربی و عددی رفتار خستگی کارابین مدل GUARDO پرداخته شد. ابتدا آزمایش کشش استاندارد بر روی نمونه بریده شده از کارابین به منظور تعیین خواص کششی آلیاژ انجام شد. همچنین یک نمونه کارابین جهت رسم منحنی نیرو-جابجایی تحت کشش یکنواخت قرار گرفت. آزمایش خستگی تحت بار کششی صفر تا ۱۵ kN انجام شد. در ادامه مدل هندسی کارابین در نرم افزار CATIA طراحی و مقادیر تنش و کرنش و تخمین عمر خستگی آن در نرم افزار المان محدود ABAQUS و FE-safe شبیه سازی شد. خلاصه نتایج این تحقیق عبارتند از:

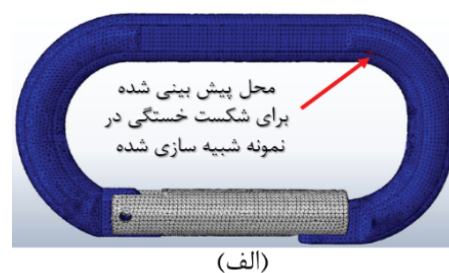
- ۱- کارابین مورد مطالعه تحت بار کششی در محدوده صفر تا ۱۵ kN با فرکانس ۲ Hz پس از طی ۲۲۲۷ چرخه دچار شکست خستگی شد.
- ۲- سطح شکست خستگی با میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شد. در تصاویر حاصل از شکست نگاری مناطق



شکل ۱۸. توزیع لگاریتم عمر خستگی در کارابین تحت بار ۱۵ kN و موقعیت (شماره گره) شروع ترک خستگی پس از $10^{3.36}$ یا ۲۲۹۱ چرخه.



شکل ۱۹. توزیع لگاریتم عمر خستگی در کارابین تحت بار ۲۱ kN و موقعیت (شماره گره) وقوع ترک خستگی پس از $10^{2.64}$ یا ۴۳۷ چرخه.



(الف)



(ب)

شکل ۲۰. مقایسه محل وقوع شکست در کارابین تحت بار چرخه ای kN ۱۵، (الف) شکست پس از ۲۲۹۰ چرخه در شبیه سازی خستگی و (ب) شکست پس از ۲۲۲۷ چرخه در آزمایش تجربی خستگی.

با بررسی داده های بدست آمده از شبیه سازی بارگذاری چرخه ای می توان ارتباط بین نیروی اعمالی و تعداد چرخه تا

- [10] Haake S. The engineering of sport: design and development. In Blackwell Science; 1998. p. 7-161.
- [11] The Carabiner Handbook [Internet]. [cited 2021 Oct 8]. Available from: <https://www.climbing.com/gear/the-carabiner-handbook/>
- [12] "A History of Rock Climbing Gear Technology and Standards" by Casandra Marie Bright [Internet]. [cited 2021 Oct 15]. Available from: <https://scholarworks.uark.edu/meeguht/41/>
- [13] Astm F 1774 - 99 pdf free download - CIVIL STANDARDS [Internet]. [cited 2021 Oct 15]. Available from: <https://allcivil-standard.com/astm-f-1774-99-pdf-free-download/>
- [14] Nergiş DPB, Nejneru C, Achişei DC, Cimpoeşu N, Bejinariu C. Structural Analysis of Carabiners Materials Used at Personal Protective Equipments. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing; 2018. p. 12040.
- [15] Blair KB, Custer DR, Graham JM, Okal MH. Analysis of fatigue failure in D-shaped karabiners. Sport Eng. Springer; 2005;8(2):107-13.
- [16] Aliha MRM, Bahmani A, Akhondi S. Fracture and fatigue analysis for a cracked carabiner using 3D finite element simulations. Strength Mater. Springer; 2015;47(6):890-902.
- [17] Aluminium Association. International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys with Support for On-line Access From: Aluminum Extruders Council Use of the Information. Alum Assoc Arlington, Virginia. 2015;31.
- [18] ASTM E8 / E8M - 21 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. (n.d.). Retrieved November 4, 2021, from <https://www.astm.org/Standards/E8.htm>
- [19] Pavier M. Experimental and theoretical simulations of climbing falls. Sport Eng. Wiley Online Library; 1998;1(2):79-91.
- [20] Meriam JL, Kraige LG, Bolton JN. Engineering mechanics: dynamics. John Wiley & Sons; 2020.
- [21] Alloys H-SAPM. Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials. 1998;2:62-122.
- [22] Young's Modulus - Tensile and Yield Strength for some common Materials [Internet]. [cited 2021 Oct 8]. Available from: https://www.engineeringtoolbox.com/young-modulus-d_417.html
- [23] Abaqus 2020 [Internet]. [cited 2021 Oct 15]. Available from: <https://www.3ds.com/support/hardware-and-software/simulia-system-information/abaqus-2020/>
- [24] Park J-H, Song J-H. Detailed evaluation of methods for estimation of fatigue properties. Int J Fatigue. Elsevier; 1995;17(5):365-73.
- [25] Manson SS. Fatigue: a complex subject—some simple approximations. Exp. Mech. Springer; 1965;5(4):193-226.
- [26] fe-safe | SIMULIA Durability Analysis Software [Internet]. [cited 2021 Oct 8]. Available from: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/fe-safe/>

سه گانه شکست خستگی به همراه ترک های ثانویه در محدوده فازهای ترد مشاهده شد.

۳- شبیه سازی خستگی جهت تخمین عمر و موقعیت شروع ترک در دو نرم افزار ABAQUS و FE-safe تحت بارهای چرخه ای در محدوده صفر تا حداکثر نیرو کششی (۳,۹,۱۳,۱۵,۲۱ kN) با فرکانس ۲ Hz انجام شد.

۴- محل پیش بینی شده برای آغاز ترک خستگی توسط نرم افزار FE-safe با محل شکست خستگی در کارابین واقعی تحت بار ۱۵ kN مطابقت می کند. عمر خستگی حاصل از شبیه سازی، عدد ۲۲۹۰ چرخه را نشان می دهد، که در مقایسه با عدد ۲۲۲۷ چرخه در آزمایش تجربی نتیجه قابل قبولی است.

۵- نتایج شبیه سازی خستگی (نیرو بر حسب تعداد چرخه تا شکست) با مدل ریاضی پیشنهادی $F = 65500 \times N_f^{-0.186}$ جهت تخمین عمر خستگی کارابین، انطباق زیادی دارند.

References

- [1] Hui W, LUO Y, Friedman P, CHEN M, Lin GAO. Warm forming behavior of high strength aluminum alloy AA7075. Trans Nonferrous Met Soc China. Elsevier; 2012;22(1):1-7.
- [2] Lim ST, Yun SJ, Nam SW. Improved quench sensitivity in modified aluminum alloy 7175 for thick forging applications. Mater Sci Eng A. Elsevier; 2004;371(1-2):82-90.
- [3] Lim ST, Eun IS, Nam SW. Control of equilibrium phases (M, T, S) in the modified aluminum alloy 7175 for thick forging applications. Mater Trans. The Japan Institute of Metals and Materials; 2003;44(1):181-7.
- [4] Li J-F, Peng Z, Li C-X, Jia Z-Q, Chen W, Zheng Z-Q. Mechanical properties, corrosion behaviors and microstructures of 7075 aluminum alloy with various aging treatments. Trans Nonferrous Met Soc China. Elsevier; 2008;18(4):755-62.
- [5] Dursun T, Soutis C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys. Mater Des. Elsevier; 2014;56:862-71.
- [6] Vu C, Wern C, Kim B-H, Kim SK, Choi H-J, Yi S. Fatigue characteristic analysis of new ECO7175v1 extruded aluminum alloy. J Aerosp Eng. American Society of Civil Engineers; 2019;32(1):4018128.
- [7] Silva FS, Pinho ACM. The effect of temperature on crack behavior in an 7175 aluminum alloy under mode I+ steady mode III. In: European Structural Integrity Society. Elsevier; 2002. p. 247-56.
- [8] DuQuesnay DL, Underhill PR. Fatigue life scatter in 7xxx series aluminum alloys. Int J Fatigue. Elsevier; 2010;32(2):398-402.
- [9] Ghalehbandi SM, Fallahi Arezodar A, Hosseini Toudeshky H. Fatigue crack growth resistance of 7075 Al alloy after equal channel angular pressing. Fatigue Fract Eng Mater Struct. Wiley Online Library; 2016;39(12):1517-25.