



Finite Element Analysis of Metals Fatigue Damage Based on Thermodynamic Entropy models

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Asnaashari F.¹ MSc,
Dibajian S.H.*¹ PhD,
Mahmoudi M.² PhD

How to cite this article

Asnaashari F, Dibajian S.H, Mahmoudi M. Finite Element Analysis of Metals Fatigue Damage Based on Thermodynamic Entropy models. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(5):1361-1373.

ABSTRACT

The amount of entropy generation during the fatigue loading is treated as an indicator of the damage accumulation in the material. The net entropy production rate of the system can be computed using the thermography technique and recognizing the temperature field distribution at a specimen surface under cyclic loading by the infrared camera and calculating the dissipated energy and considering the possibility of the specimen heat transfer with the environment. It is expected that using the appropriate tool, this method can be used as a non-destructive inspection method concerning the fatigue-induced damage of materials. This research has been conducted to feasibility study and applicability of the methodology through numerical modeling and analysis. In this paper, using the finite element numerical method and in the framework of Abaqus software, simulations of fully reversed bending are carried out on the standard specimens of aluminum (Al6061-T6) whose experimental test results are available in the literature. Based on the results of the mechanical and thermal analysis, calculating the entropy production rate, fatigue fracture entropy, damage variable and remaining life assessment based on this variable are performed. The results obtained from the numerical simulation are compared and validated with the results of experimental tests. Also, a numerical analysis is carried out to estimate the temperature enhancement and fatigue self-heating phenomenon due to the cyclic loading based on the strain-life curve characteristics and dissipated energy on the axial specimen made of (AISI 4340). The results obtained from the research indicate that the infrared thermography technique as a non-destructive evaluation method in the low cycle fatigue range is a suitable tool for the temperature field evaluation and subsequently, the accumulated damage estimation in the material.

Keywords Fatigue Damage; Dissipated Energy; Thermography; Numerical Simulation

¹Applied Design Department, Mechanical & Energy Engineering Faculty, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

²Structure & Earthquake Department, Civil, Water & Environmental Engineering Faculty, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Applied Design Department, Mechanical & Energy Engineering Faculty, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
Phone: +98 (21) 73932674
Fax: -
h_dibajian@sbu.ac.ir

Article History

Received: January 07, 2019
Accepted: October 15, 2019
ePublished: May 09, 2020

CITATION LINKS

[1] Introduction to thermodynamics of mechanical fatigue [2] On the thermodynamic entropy of fatigue fracture [3] Entropic characterization of metal fatigue with stress concentration [4] Fatigue life prediction of AZ31B magnesium alloy and its welding joint through infrared thermography [5] A thermographic method for remaining fatigue life prediction of welded joints [6] Rapid estimation of fatigue entropy and toughness in metals [7] Real-time fatigue life monitoring based on thermodynamic entropy [8] Infrared thermography for condition monitoring—A review [9] A thermodynamic approach to fatigue damage accumulation under variable loading [10] Evaluation of an energy-based approach and a critical plane approach for predicting constant amplitude multiaxial fatigue life [11] An experimental approach to low-cycle fatigue damage based on thermodynamic entropy [12] An autocorrelation model of bat sonar [13] ABAQUS/CAE. User's manual, version 6.14 [14] On cyclic yield strength in definition of limits for characterization of fatigue and creep behavior [15] An experimental approach to evaluate the critical damage [16] Rapid determination of fatigue failure based on temperature evolution: Fully reversed bending load [17] matweb.com

تحلیل اجزای محدود آسیب خستگی فلزات براساس مدل‌های مبتنی بر آنتروپی ترمودینامیکی

فرهاد اثناعشری MSc

گروه طراحی کاربردی، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

سیدحسین دیباجیان PhD*

گروه طراحی کاربردی، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

محمدجواد محمودی PhD

گروه سازه و زلزله، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

مقدار آنتروپی تولیدی طی بارگذاری خستگی به عنوان یک شاخص از انباشت آسیب در ماده تلقی می‌شود. با استفاده از تکنیک ترموگرافی و ثبت توزیع میدان دما در سطح نمونه تحت بارگذاری چرخه‌ای به وسیله دوربین مادون قرمز و همچنین محاسبه انرژی اتلافی و در نظر گرفتن امکان تبادل حرارت نمونه با محیط، می‌توان نرخ خالص تولید آنتروپی در سیستم را محاسبه کرد. انتظار می‌رود که با به‌کارگیری ابزار مناسب، بتوان این روش را به عنوان یک روش بازرسی غیرمخرب در رابطه با آسیب ناشی از خستگی فلزات مورد استفاده قرار داد. این تحقیق به منظور امکان‌سنجی و بررسی قابلیت کاربرد روش یاد شده به کمک مدل‌سازی و تحلیل عددی انجام شده است. در این مقاله با استفاده از روش عددی اجزای محدود و در قالب نرم‌افزار آباکوس به شبیه‌سازی آزمون خستگی خمش کاملاً معکوس‌شونده روی نمونه‌های استاندارد از جنس آلومینیوم (Al6061-T6) که نتایج آزمون آزمایشگاهی آن موجود است، پرداخته می‌شود. براساس نتایج تحلیل مکانیکی و حرارتی به روش کوبل متوالی، به محاسبه نرخ تولید آنتروپی، آنتروپی شکست خستگی، متغیر آسیب و تخمین عمر باقی‌مانده براساس این متغیر پرداخته می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی مقایسه و اعتبارسنجی می‌شود. همچنین یک تحلیل عددی برای تخمین افزایش دما و بررسی پدیده خودگرمایی خستگی در اثر بارگذاری چرخه‌ای براساس مشخصه‌های منحنی کرنش-عمر و تخمین انرژی اتلافی، با بهره‌گیری از امکان اسکریپت‌نویسی پایتون در نرم‌افزار آباکوس روی نمونه آزمون محوری از جنس فولاد (AISI 4340) صورت می‌گیرد. نتایج پژوهش حاکی از آن است که کاربرد ترموگرافی مادون قرمز به عنوان یک روش ارزیابی غیرمخرب در محدوده خستگی کم‌چرخه اجزای مناسب برای ارزیابی میدان دما و در نتیجه تخمین آسیب انباشته در ماده است.

کلیدواژه‌ها: آسیب خستگی، انرژی اتلافی، ترموگرافی، تحلیل عددی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۷/۲۳

*نویسنده مسئول: h_dibajian@sbu.ac.ir

۱- مقدمه

ماهیت فیزیکی آسیب خستگی، معمولاً به‌عنوان تغییرات غیرقابل بازگشت در میکروساختار ماده تفسیر می‌شود. براساس قانون دوم ترمودینامیک در طی فرآیند انباشت آسیب خستگی، تولید آنتروپی

همواره مثبت است. مقدار آنتروپی تولیدی در طی بارگذاری خستگی به‌عنوان یک شاخص از انباشت آسیب در ماده تلقی می‌شود که فرمول‌بندی آن در گذشته براساس نظریه مکانیک محیط پیوسته و مکانیک آسیب بنا شده است. از آنجایی که در اثر بارگذاری چرخه‌ای و به‌ویژه در خستگی کم‌چرخه، تغییرشکل‌های پلاستیک در ماده اتفاق می‌افتد، مقدار انرژی اتلافی ناشی از کرنش پلاستیک قابل توجه خواهد بود. این انرژی که باید به‌صورت گرما به محیط منتقل شود، منجر به افزایش دمای ماده می‌شود. بنابراین انتظار می‌رود دوربین‌های ترموگرافی پیشرفته که قادر هستند اختلاف دماهایی در محدوده چند صدم درجه سانتی‌گراد را نیز ثبت کنند، برای مشاهده و بازرسی تحولات دمایی در سطح نمونه تحت بارگذاری خستگی، قابل استفاده و مفید واقع شوند[1].

مطالعات انجام‌شده در رابطه با این موضوع به اجرای آزمون‌های خستگی بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی کوچکی از فلزات که طبق استاندارد خاصی تهیه شده‌اند، محدود شده است. نادری و خوانساری[2] با استفاده از این مفاهیم و کاربرد ترموگرافی، روشی برای محاسبه آنتروپی تولیدی در فرآیند خستگی ارائه داده‌اند. آنها نشان دادند که شکست خستگی زمانی اتفاق می‌افتد که مقدار آنتروپی انباشته‌شده در نمونه به یک مقدار بحرانی معین برسد و همچنین خاطرنشان کردند که این پارامتر مستقل از نوع بارگذاری، هندسه نمونه و فرکانس بارگذاری است[2]. لیاکت و خوانساری از مفهوم آنتروپی ترمودینامیکی برای ارزیابی خستگی در فلزات دارای تمرکز تنش استفاده کردند. بدین ترتیب که آزمون‌های خستگی را روی نمونه شکاف‌دار و بدون شکاف در شرایط یکسان اعمال کردند. آنها مشاهده کردند که پارامتر آنتروپی شکست خستگی برای نمونه‌ای که دارای تمرکز تنش است، مقدار کمتری نسبت به نمونه سالم دارد که بیانگر عمر خستگی کوتاه‌تر آن است[3]. ژانگ و همکاران با بهره‌گیری از روش ترموگرافی مادون قرمز، یک روش تجربی برای تعیین عمر آلیاژ منیزیم AZ31B و اتصال جوش آن معرفی کردند[4]. ویلیامز و همکاران از روش ترموگرافی برای تعیین عمر باقی‌مانده اتصالات جوش استفاده نمودند. در آزمایشات خستگی از روش آزمون‌های تحریک کوتاه و روند تغییر شیب اولیه منحنی دما استفاده شده است[5]. لیاکت و خوانساری یک مدل تجربی برای تخمین چقرمگی خستگی (Fatigue Toughness) و آنتروپی ترمودینامیکی در فلزات تحت بارگذاری خستگی کشش- فشار تک‌محوره ارائه دادند. تغییرات انرژی کرنشی پلاستیک، دما و پاسخ حرارتی در طی آزمون خستگی مورد بحث واقع شد و از روش آزمون‌های تحریک کوتاه استفاده کردند[6]. نادری و همکاران این روش را به‌عنوان یک سیستم پایش وضعیت برای نمونه‌های فلزی در شرایط آزمایشگاهی پیشنهاد دادند. طبق نظر ایشان کارایی و قابلیت استفاده از این تکنیک در شرایط واقعی و مصادیق صنعتی، جای مطالعات و تحقیقات بیشتری دارد[7].

حین بارگذاری چرخه‌ای و عمرهایی بیش از عمر خستگی گذرا پرداخته شده است.

۲- تئوری و فرضیات

۲-۲- قانون دوم ترمودینامیک

قانون دوم ترمودینامیک به بیان کلایوس برای یک جسم تغییرشکل‌یافته، به شکل نامساوی رابطه (۱) بیان می‌شود:

$$\dot{\gamma} = \frac{\sigma \cdot \dot{\epsilon}^p}{T} - \frac{\dot{q}}{T^2} \cdot \nabla T - \frac{A_k \dot{V}_k}{T} \geq 0 \quad (1)$$

که در آن $\dot{\gamma}$ نرخ تولید آنتروپی، A_k نیروهای ترمودینامیکی و \dot{V}_k به متغیر درونی اشاره دارد. امیری و خوانساری به صورت تجربی نشان دادند که ترم $\frac{A_k \dot{V}_k}{T}$ تنها ۵ تا ۱۰٪ در مقدار آنتروپی تولیدشده در تغییرشکل پلاستیک سهم دارد و اغلب از این ترم در محاسبه آنتروپی تولیدی صرف نظر می‌شود [1]. با انتگرال‌گیری از رابطه (۱) در کل زمان فرآیند، مقدار آنتروپی تولیدشده طبق رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$\gamma = \int_0^{t_f} \frac{W_p}{T} dt - \int_0^{t_f} \left(\frac{\dot{q}}{T^2} \cdot \nabla T \right) dt \quad (2)$$

که در آن W_p انرژی کرنش چرخه‌ای بر واحد حجم، T دمای مطلق سطح و \dot{q} شار حرارتی است [9].

۲-۲- معادله کرنش-عمر

معادله تنش-کرنش چرخه‌ای که به رابطه رامبرگ-اسگود نیز معروف است، عبارت است از:

$$\epsilon_a = \frac{\Delta \sigma}{2E} + \left(\frac{\Delta \sigma}{2K'} \right)^{\frac{1}{n'}} = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \quad (3)$$

با جایگذاری روابط کافین-مانسون و رابطه باسکوئین در معادله رامبرگ-اسگود، رابطه (۴) یا معادله کرنش-عمر به دست می‌آید که در قالب منحنی‌های $\epsilon - N$ و در مقیاس تمام لگاریتمی رسم می‌شود.

$$\epsilon_a = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \epsilon_f' (2N_f)^c \quad (4)$$

که در آن σ_f' ضریب استحکام خستگی، b توان استحکام خستگی، ϵ_f' ضریب نرم‌شوندگی خستگی و c توان نرم‌شوندگی خستگی است. این چهار پارامتر را مشخصه‌های خستگی کم‌چرخه یا مشخصه‌های منحنی $\epsilon - N$ گویند که از آزمون نمونه‌های کوچک، صاف و تحت بارگذاری محوری به دست می‌آیند [11].

۲-۳- چگالی انرژی کرنشی و عمر خستگی

در گذشته کارهای متعددی با هدف مرتبط‌ساختن انرژی پلاستیک اتلافی با عمر خستگی کم‌چرخه براساس رویکرد کرنش-عمر انجام گرفته است. پارک و نلسون برای ارتباط عمر خستگی و کل انرژی تولیدشده رابطه‌ای تجربی ارائه کردند. انرژی کل تولیدشده برابر با مجموع ترم‌های پلاستیک، الاستیک، حجمی و استاتیک (اثر تنش متوسط) است که به ترتیب در رابطه (۵) آورده شده است [10]:

$$\Delta W = \Delta W_p + \Delta W_e + \Delta W_h + W_m \quad (5)$$

در خستگی کم‌چرخه، انرژی کرنش پلاستیک بسیار بزرگ‌تر از ترم‌های دیگر است. همچنین به دلیل آزادسازی تنش، ترم ناشی از اثر تنش متوسط نیز قابل نظر خواهد بود. مارو به صورت

امروزه ترموگرافی مادون قرمز (IRT)، یک ابزار تکامل‌یافته و مورد پذیرش در ارزیابی‌های غیرمخرب (NDE) به‌شمار می‌رود که بدون احتیاج به تماس با نمونه، قادر است سطح قابل توجهی را در زمان کوتاهی مورد بازرسی قرار دهد. از جمله مزایای بازرسی ترموگرافی مادون قرمز این است که برای هندسه‌های پیچیده و یا مجموعه‌ای از مواد شبیه به هم و همچنین شرایطی که تنها یک‌طرفه قطعه مورد بررسی در دسترس است، مناسب است. علاوه بر این، روش ترموگرافی بسیار سریع بوده و بدون نیاز به تماس با سطح قطعه، دربرگیرنده مناطق وسیعی از سطح صاف و یا قطعات دارای انحنا است [8].

در روش‌های مبتنی بر آنتروپی، فرآیند خستگی را به‌عنوان یک فرآیند اتلافی (Dissipative) در نظر می‌گیرند که می‌توان با استفاده از قوانین ترمودینامیک به تحلیل آن پرداخت. خرابی‌های ماندگار مصداق یک فرآیند بازگشت‌ناپذیر هستند که سیستم را دچار بی‌نظمی کرده و طبق قانون دوم ترمودینامیک، ارزیابی این بی‌نظمی با مقدار آنتروپی تولیدی صورت می‌گیرد. آسیب یا خرابی به‌طور پیوسته در ماده انباشته‌شده تا اینکه به یک مقدار بحرانی معین رسیده و ماده دچار واماندگی (Failure) می‌شود. انباشت آسیب در ماده همراه با ایجاد انرژی کرنش پلاستیک است که تبدیل به گرما شده و به محیط منتقل می‌شود. بنابراین آنتروپی و انرژی‌های ترمودینامیکی، یک رفتار طبیعی از خرابی اجزا را ارائه می‌دهند. مقدار تقریبی آنتروپی در لحظه شکست با انتگرال‌گیری از انرژی کرنش پلاستیک تقسیم بر دمای ماده محاسبه می‌شود [1].

هدف از انجام این پژوهش، ارائه یک تحلیل عددی و اعتبارسنجی نتایج حاصل از آن با نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی موجود و سپس امکان‌سنجی کاربرد روش بازرسی غیرمخرب ترموگرافی در تخمین میدان دمای جسم در حین بارگذاری چرخه‌ای در محدوده خستگی پرچرخه و طول عمرهایی فراتر از عمر خستگی گذرا به‌وسیله روش مذکور است. در صورتی که نتایج حاصل در مقایسه با نتایج آزمون آزمایشگاهی دارای خطای قابل قبول در حوزه مهندسی باشد، آنگاه می‌توان به بررسی فرآیند خستگی پرچرخه و دستیابی به توزیع میدان حرارت برای تعیین حوزه کاربرد ترموگرافی در شرایط واقعی کارکرد اجزا و قطعات پرداخت. بر همین اساس می‌توان در انتخاب دوربین ترموگرافی مناسب با حساسیت و نرخ داده‌برداری موردنیاز و فراهم‌کردن شرایط محیطی مناسب برای انجام بازرسی غیرمخرب و داده‌برداری، دقت کافی را در دستور کار قرار داد.

در این مقاله آزمون خستگی خمش کاملاً معکوس‌شونده، مدل‌سازی شده و نتایج حاصل با نتایج تجربی موجود، مورد مقایسه و اعتبارسنجی قرار گرفته است. علاوه بر آن با استفاده از داده‌های منحنی کرنش-عمر برای فولاد AISI 4340 و در نظرگرفتن کرنش پلاستیک به‌عنوان یک منبع ایجاد حرارت در تحلیل انتقال حرارت، به امکان‌سنجی قابلیت استفاده از ابزار ترموگرافی در تعیین افزایش دما در این فولاد استحکام بالا در

۵-۲- آنتروپی شکست خستگی (FFE)

با انتگرال‌گیری از رابطه نرخ تولید آنتروپی از زمان شروع بارگذاری تا لحظه شکست، به رابطه‌ای می‌رسیم که با کمک آن مقدار آنتروپی شکست خستگی محاسبه می‌شود. این رابطه نشان می‌دهد که آنتروپی شکست خستگی برابر با مجموع آنتروپی تولیدی ناشی از انرژی کرنش پلاستیک و هدایت حرارت است. این پارامتر صرف نظر از نوع بارگذاری، فرکانس آزمون، اندازه نمونه و دامنه بارگذاری، همواره ثابت خواهد بود [2]. به‌عنوان مثال مقدار این پارامتر برای فولاد زنگ‌نزن 304L تقریباً برابر با $\gamma_f = 60 \text{ MJ/m}^3 \text{ k}$ و برای آلومینیوم 6061-T6 تقریباً برابر با $\gamma_f = 4 \text{ MJ/m}^3 \text{ k}$ گزارش شده است [1]. طبق رابطه (۸-الف) مقدار آنتروپی شکست خستگی عبارت است از:

$$FFE = \int_0^{t_f} \frac{W_p}{T} dt - \int_0^{t_f} \left(\frac{q}{T^2} \cdot \nabla T \right) dt \quad (۸-الف)$$

همچنین با جایگذاری $q = -k \nabla T$ در رابطه (۸-الف)، این رابطه برحسب تعداد سیکل بارگذاری به شکل رابطه (۸-ب) تبدیل می‌شود.

$$FFE = \int_0^{N_f} \frac{\Delta W_p}{T} dN + \int_0^{N_f} \left[\frac{k}{T^2} \cdot (\nabla T)^2 \right] dN \quad (۸-ب)$$

۶-۲- تخمین آسیب

برای برآورد آسیب انباشته (Cumulative Damage) در ماده بر اثر خستگی، می‌توان از روش‌های مبتنی بر آنتروپی استفاده کرد. مزایای استفاده از این روش در مقایسه با روش‌های سنتی از جمله قانون ماینر، این است که علاوه بر در نظر گرفتن شرایط محیطی، امکان استفاده در بارگذاری چندمحوره را نیز دارد. همچنین اثر توالی بار با دامنه‌های مختلف، نیز در این روش قابل مشاهده خواهد بود. نادری و خوانساری به‌منظور ارزیابی آسیب خستگی رابطه (۹) را برای پارامتر آسیب پیشنهاد دادند [11]:

$$D = \frac{D_c}{\ln(1 - \frac{\gamma_c}{\gamma_f})} \ln(1 - \frac{\gamma}{\gamma_f}) \quad (۹)$$

که در آن D_c مقدار آسیب بحرانی در هنگام جوانه‌زنی میکروک، γ_c انباشت آنتروپی متناظر با مقدار آسیب بحرانی و γ_f به مقدار انباشت آنتروپی در لحظه شکست اشاره دارد.

۳- شبیه‌سازی عددی

۱۲-۳- تحلیل تنش-حرارت به‌صورت کوپل متوالی

فرآیند کوپل متوالی شامل تحلیل پدیده‌های مکانیکی و حرارتی به‌صورت جداگانه می‌شود. پاسخ مکانیکی در یک‌گام از فرآیند تحلیل تعیین‌شده و نتایج به گام بعدی برای استفاده در تحلیل حرارتی منتقل می‌شود. پارامتر ارتباط‌دهنده دو تحلیل مکانیکی و حرارتی در این روش، چگالی انرژی کرنشی است، زیرا این کمیت منبع اصلی اتلاف حرارتی خواهد بود. نتایج و یافته‌های تجربی نشان‌دهنده این واقعیت است که می‌توان چگالی انرژی کرنشی پلاستیک بر هر چرخه را در رژیم خستگی کم‌چرخه ثابت فرض کرد [10]. براساس همین فرض، برای تعیین پارامتر مذکور، به‌جای استفاده از نتایج مربوط به تمام عمر خستگی، می‌توان از تعداد

تجربی ثابت کرد که انرژی پلاستیک تولیدشده در هر سیکل، برای یک بارگذاری چرخه‌ای کاملاً معکوس‌شونده، تقریباً ثابت است. براساس این موضوع، پارک و نلسون رابطه‌ای بین انرژی کرنش پلاستیک و عمرخستگی کم‌چرخه ارائه دادند [10]:

$$\Delta W_p = A(N_f)^\alpha \quad (۶)$$

که در آن A و α ثابت‌های تجربی هستند. پارک و نلسون با استفاده از خواص خستگی تک‌محوره، ثابت‌های تجربی رابطه خویش را به‌صورت روابط (۷-الف) و (۷-ب) تخمین زدند.

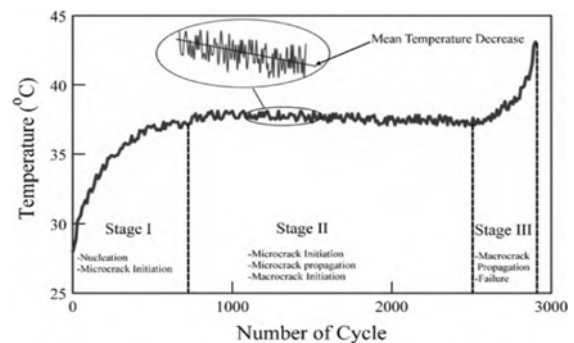
$$A = 2^{2+b+c} \sigma_f' \epsilon_f' \left(\frac{c-b}{c+b} \right) \quad (۷-الف)$$

$$\alpha = b + c \quad (۷-ب)$$

برای مرتبط‌ساختن روش آنتروپی با رفتار مکانیکی ماده، تحلیل عمر براساس انرژی کرنشی مفید خواهد بود، چون ترم انرژی کرنش پلاستیک در رابطه تولید آنتروپی را می‌توان با استفاده از داده‌های تجربی یا شبیه‌سازی عددی و با استفاده از خواص ماده که در بالا ذکر شد محاسبه کرد.

۴-۲- تغییرات دمای سطح نمونه در آزمون خستگی

در نمودار ۱ تغییرات دمای سطح یک نمونه آلومینیومی (6061-T6) در طی یک آزمون خستگی با فرکانس ۱۰ هرتز و دامنه جابجایی اعمالی ۵ میلی‌متر برحسب تعداد سیکل‌های اعمالی رسم شده است. این آزمایش توسط نادری و خوانساری [9] انجام گرفت و در آن به‌منظور ثبت داده‌های دمایی از یک دوربین ترموگرافی با حساسیت ۰/۸ درجه سانتی‌گراد و نرخ داده‌برداری ۷/۵ هرتز استفاده شده است [9].



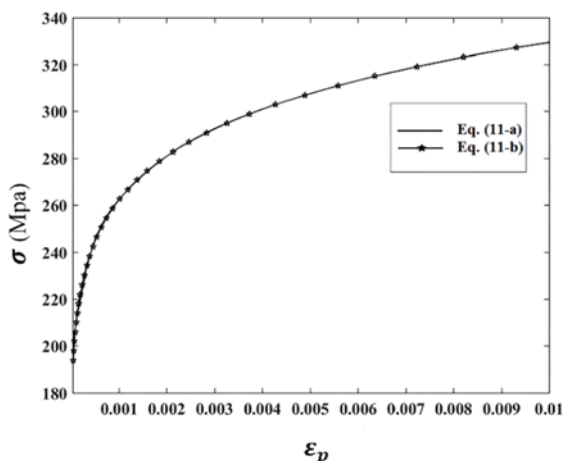
نمودار ۱) تغییرات دمای سطح نمونه آلومینیومی در طی آزمون خستگی [9]

بررسی نمودار ۱ نشان می‌دهد که تغییرات دمای سطح نمونه شامل سه مرحله است؛ در مرحله نخست که تقریباً ۱۰٪ از کل عمر نمونه را شامل می‌شود، یک افزایش دمای اولیه مشاهده می‌شود. این افزایش دما بر اثر پاسخ ماده به حرکت ناگهانی نایجابی‌ها اتفاق می‌افتد. در مرحله دوم پس از گذشت تعداد سیکل معینی تولید انرژی اتلافی و تبادل حرارتی به تعادل رسیده و دمای سطح نمونه تقریباً ثابت خواهد شد. در مرحله سوم که تقریباً ۵ تا ۱۰٪ از عمر نمونه را شامل می‌شود، دما در یک تعداد سیکل محدود به سرعت افزایش می‌یابد که ناشی از تولد و رشد سریع ماکروکرک‌ها است [9].

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = k' \left(\frac{\Delta\epsilon_p}{2}\right)^{n'} \quad (11-a)$$

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = \sigma_y^c + \sum_{i=1}^3 \frac{C_i}{\gamma_i} \tanh\left(\gamma_i \frac{\Delta\epsilon_p}{2}\right) \quad (11-b)$$

که در آن تنش تسلیم چرخه‌ای و (C_i, γ_i) ضرایب سخت‌شوندگی سینماتیک وابسته به ماده است. فرآیند تعیین ضرایب و تنش تسلیم چرخه‌ای، با استفاده از حل‌گر نرم‌افزار اکسل انجام شده است. بدین ترتیب که پس از وارد کردن رابطه (11-الف) و رابطه (11-ب)، مقادیر به‌دست‌آمده از این دو رابطه در یک بازه کرنش معین محاسبه می‌شوند. سپس میانگین اختلاف مطلق مقادیر به‌دست‌آمده از این دو رابطه، به حداقل مقدار ممکن کاهش داده می‌شود. برای نمونه آلومینیومی (Al 6061-T6) با استفاده از این روش نمودار تنش-کرنش برآزش شده و منحنی رامبرگ-اسگود در نمودار ۲ نشان داده شده است. مقادیر تنش تسلیم چرخه‌ای و ضرایب سخت‌شوندگی سینماتیک تا محدوده کرنش ۱٪ در جدول ۱ گزارش شده‌اند.



نمودار ۲) برآزش منحنی تنش-کرنش چرخه‌ای برای (Al 6061-T6)

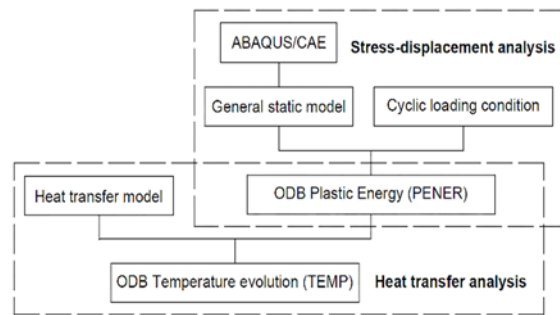
جدول ۱) ضرایب سخت‌شوندگی و تنش تسلیم چرخه‌ای (Al 6061-T6)

γ_1	γ_2	γ_3	C_3 (Mpa)	C_2 (Mpa)	C_1 (Mpa)	σ_y^c (Mpa)
۵۳۳	۲۷۰۸	۱۰۳	۱۹۳۲۴	۱۱۶۳۱۷	۷۳۶۷	۱۹۵

۳-۳- شبیه‌سازی آزمون خمش کاملاً معکوس‌شونده

در این بخش به شبیه‌سازی عددی آزمون‌های خستگی انجام‌شده توسط امیری و همکاران پرداخته می‌شود [15]. آنها در آزمون آزمایشگاهی براساس استاندارد ASTM STP 566 نمونه‌هایی آلومینیومی تهیه کردند که هندسه آن در شکل ۲ نشان داده شده است. نمونه را به‌صورت تیر یک‌سر گیردار تحت بارگذاری خمشی کاملاً معکوس‌شونده با جابجایی کنترل‌شده در انتهای آزاد قرار دادند. شماتیک و تجهیزات آزمون نیز در شکل ۳ نمایش داده شده است. از دوربین ترموگرافی برای اندازه‌گیری دمای سطح نمونه در ناحیه نزدیک به انتهای گیردار که در آن ناحیه شکست محتمل است، استفاده کردند [15].

کمی سیکل بارگذاری استفاده کرد. شماتیک از فرآیند و گام‌های کوپل متوالی تنش-حرارت در شکل ۱ نشان داده شده است [12].



شکل ۱) شماتیک مراحل تحلیل تنش-حرارت به روش کوپل متوالی [13]

۲-۳- مدل‌سازی رفتار چرخه‌ای فلزات در آباکوس

برای شبیه‌سازی رفتار فلزات تحت بارگذاری چرخه‌ای در آباکوس، مدل‌های سخت‌شوندگی سینماتیک در نظر گرفته شده است. این مدل‌ها معمولاً برای تحلیل خستگی کم‌چرخه و خزش تناوبی اعمال می‌شوند.

مفهوم اساسی این مدل‌ها این است که سطح تسلیم در فضای تنش جابجاشده تا کرنش در یک‌جهت، تنش تسلیم در جهت مخالف را کاهش دهد. در واقع اثر بواشینگر و ناهمسان‌گردی به‌وسیله کارسختی در نظر گرفته می‌شود. الگوی ارایه‌شده در آباکوس به‌صورت رابطه (۱۰) است.

$$\dot{\alpha} = C \bar{\epsilon}^{pl} \frac{1}{\sigma_0} (\sigma_{ij} - \alpha_{ij}) + \frac{1}{c} \dot{C} \alpha_{ij} - \gamma \alpha_{ij} \bar{\epsilon}^{pl} \quad (10)$$

که در آن C و γ ثابت‌های سخت‌شوندگی ماده است. آباکوس سه راه را برای ورود داده‌های مربوط به مولفه سینماتیک سخت‌شوندگی ترکیبی ارایه می‌دهد. استفاده از داده‌های آزمون مربوط به نیم‌چرخه از بارگذاری، استفاده از داده‌های آزمون مربوط به چرخه پایدار و یا ورود پارامترهای سخت‌شوندگی سینماتیک که شامل C, γ و σ_0 است.

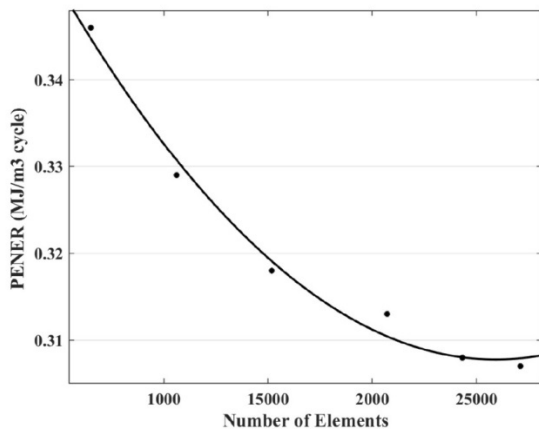
قسمت سینماتیک از مدل سخت‌شوندگی ترکیبی شاپوش با استفاده از برهم‌نهی چند تانسور تنش زمینه (Back Stress) مستقل، رفتار سخت‌شوندگی سینماتیک ماده را مدل‌سازی کرده و می‌تواند با یک مدل سخت‌شوندگی ایزوتروپیک ترکیب شود. به‌منظور تعیین تنش تسلیم چرخه‌ای (σ_y^c) و ضرایب سخت‌شوندگی سینماتیک (C_i, γ_i) رابطه تنش دامنه برحسب کرنش پلاستیک (11-الف) براساس ضریب استحکام تناوبی (k') و توان سخت‌شوندگی تناوبی (n') بر مولفه سینماتیک مدل سخت‌شوندگی شاپوش برآزش می‌شود [14]. برای یک برآزش دقیق، چابوچه استفاده از تعداد سه تانسور تنش زمینه مستقل را پیشنهاد کرده است. گوراش و مکنزی رابطه (11-ب) را با انتگرال‌گیری از مولفه سینماتیک مدل سخت‌شوندگی شاپوش با فرض ثابت‌بودن کرنش پلاستیک در مقادیر تنش بیشینه در شرایط کرنش کنترل شده پیشنهاد دادند [14].

خواص سخت‌شوندگی سینماتیک غیرخطی طبق جدول ۱ به نرم‌افزار معرفی می‌شود. خواص خستگی آلومینیوم مطابق با جدول ۳ در نظر گرفته می‌شود.

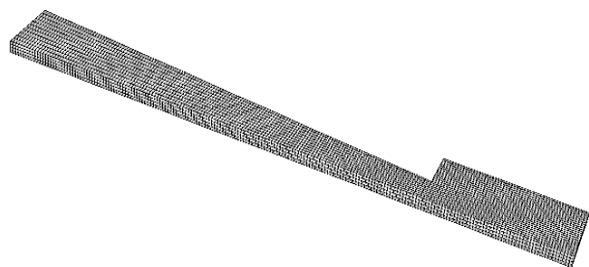
جدول ۳) مشخصه‌های خستگی [12] (Al 6061-T6)

c	b	ϵ_f'	σ_f' (Mpa)	n'	K' (Mpa)
-۰/۸۳	-۰/۰۸۲	۱/۳۴	۵۳۵	۰/۰۹۹	۵۲۰

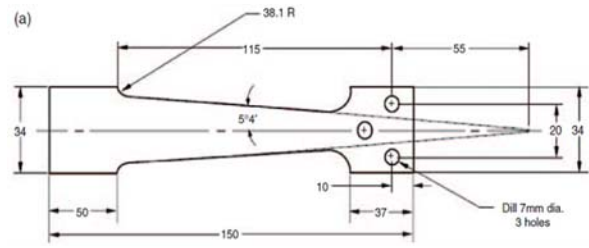
تحلیل مکانیکی توسط حل‌گر استاندارد آباکوس و در زمان یک ثانیه معادل ۱۰ سیکل بارگذاری انجام می‌شود. المان مورد استفاده برای تحلیل مکانیکی، المان تنش سه‌بعدی خطی با هشت‌گره و فرمولاسیون مود ناسازگار (C3D8I) است. هنگام استفاده از المان مرتبه اول برای مدل‌سازی رفتار خمشی در یک تحلیل مکانیکی، در نظر گرفتن تعداد المان کافی در ضخامت قطعه برای حصول نتایج دقیق‌تر از اهمیت بالایی برخوردار است. همچنین ابعاد المان به کار گرفته شده یا به عبارت دیگر تعداد المان استفاده شده برای شبکه‌بندی نمونه حایز اهمیت است. در واقع باید تعداد المان بهینه برای دستیابی به نتایج با دقت بیشتر و همچنین جلوگیری از افزایش بی‌مورد حجم محاسباتی در نظر گرفته شود. در نمودار ۳ حساسیت پاسخ نسبت به تعداد المان مورد استفاده برای یکی از دامنه‌های بارگذاری بررسی شده است. همچنین در شکل ۵ مدل المان محدود نیمی از هندسه نمونه نشان داده شده است.



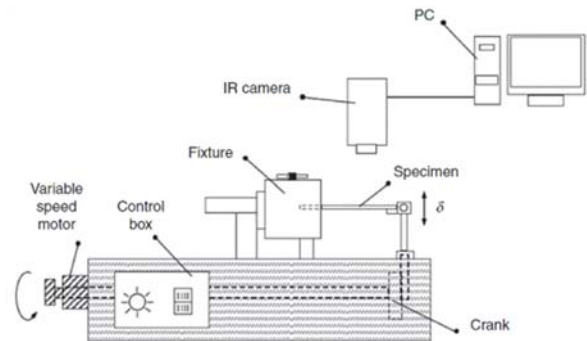
نمودار ۳) حساسیت پاسخ نسبت به تعداد المان شبکه‌بندی برای دامنه بارگذاری ۴۴/۴۵ میلی‌متر



شکل ۵) شبکه‌بندی المان محدود نیمی از هندسه نمونه



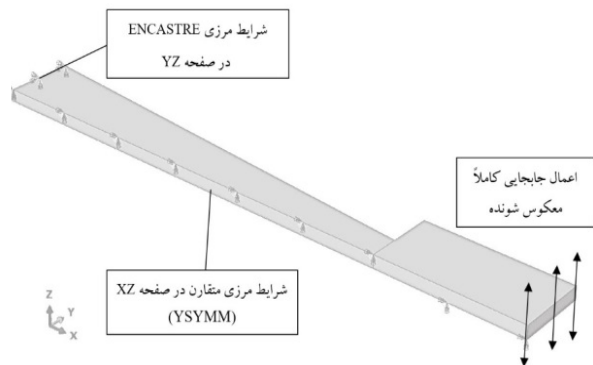
شکل ۲) هندسه نمونه [15]



شکل ۳) شماتیک تجهیزات آزمون خستگی با دامنه جابجایی کنترل شده [15]

۲-۳-۳- تحلیل مکانیکی

به دلیل هندسه متقارن نمونه، تنها نیمی از آن به صورت سه‌بعدی مدل‌سازی می‌شود. در خط تقارن، شرایط مرزی متقارن و در انتهای گیردار نمونه، شرایط مرزی گیردار (Encastre) اعمال می‌شود. در شکل ۴ شرایط مرزی و نحوه بارگذاری نشان داده شده است. بارگذاری به صورت اعمال جابجایی کاملاً معکوس شونده در انتهای آزاد نمونه با چهار دامنه متفاوت و فرکانس ۱۰ هرتز است.



شکل ۴) شرایط مرزی و نحوه بارگذاری

علاوه بر خواص الاستیک، به خواص پلاستیک و تعیین قانون سخت‌شوندگی نیز نیاز است. خواص الاستیک طبق جدول ۲ وارد می‌شود.

جدول ۲) خواص الاستیک [12]

ν	E (Gpa)	Al 6061-T6
۰/۳۳	۷۰	

تغییرات دمایی زیادی در نمونه اتفاق نمی‌افتد، خواص حرارتی مستقل از دما و طبق جدول ۵ تعریف می‌شود.

جدول ۵) خواص حرارتی و پارامترهای مورد نیاز در تحلیل انتقال حرارت^[1]

σ (Wm ⁻² K ⁻¹)	e	T ₀ (°C)	h (Wm ⁻² k ⁻¹)	ρ (kg m ⁻³)	C _v (kJ ⁻¹ kg ⁻¹)	k (Wm ⁻¹ k ⁻¹)
۵/۶۷×۱۰	۰/۹۳	۲۸	۱۲۰	۲۷۱۰	۸۹۳	۱۷۳

امیری و همکاران در آزمون آزمایشگاهی، سطح نمونه‌ها در ناحیه سنج طول را با رنگ مشکی اسپری کرده تا ضریب تشعشع آن به یک نزدیک گردد؛ همچنین آنها ضریب انتقال حرارت جابجایی را با متوقف کردن ناگهانی آزمون در شرایط پایدار دمایی و اندازه‌گیری نرخ خنک‌شدن نمونه، محاسبه کردند^[15].

شرایط مرزی در تحلیل انتقال حرارت به این ترتیب است که سطح انتهای آزاد نمونه در دمای ثابت و برابر با دمای اولیه باقی‌مانده و سطح انتهای گیردار دارای شرط مرزی بی‌دررو است. در آزمون واقعی نیز برای جلوگیری از تبادل حرارت بین نمونه و گیره دستگاه، در این ناحیه از عایق حرارتی استفاده کردند. مرزهای متقارن نیز دارای شرایط بی‌دررو هستند. بقیه سطوح از طریق جابجایی و تشعشع با محیط تبادل حرارت دارند.

به‌منظور تعریف شار حرارتی، منطبق بر انرژی کرنشی ایجادشده در مرحله قبل، از ابزار نگاشت میدان تحلیلی در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. از آنجایی که تقریباً معادل ۹۰٪ از کار پلاستیک صرف افزایش دمای جسم می‌شود، این ضریب نیز اعمال شده است. هر چند در برخی فلزات با ساختار اتمی هگزگونال فشرده (hcp) مثل زیرکونیم، درصد قابل توجهی از کار پلاستیک در ماده ذخیره‌شده و اتلاف گرمایی کمتر خواهد بود^[2].

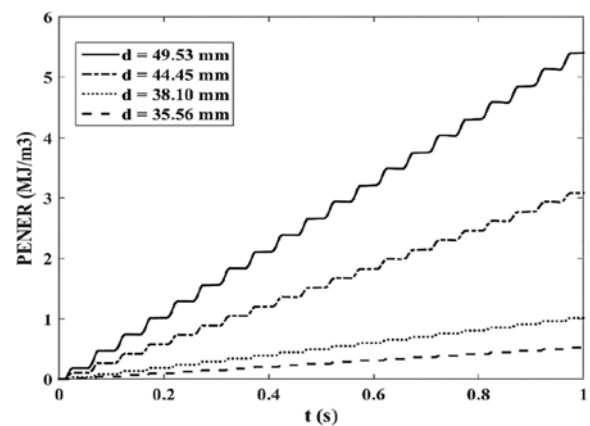
در جدول ۶ دمای ناحیه بحرانی نمونه در مجاورت انتهای گیردار، حاصل از تحلیل عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. همچنین اختلاف دمای ناشی از بارگذاری خستگی نسبت به دمای اولیه نمونه، آورده شده است. خطای بین مقادیر اختلاف دمای تجربی و اختلاف دمای عددی نیز محاسبه شده است.

جدول ۶) مقایسه دمای ناحیه بحرانی و اختلاف دمای ایجاد شده در آزمون تجربی و شبیه‌سازی عددی

خطا	ΔT_{exp}	ΔT_{num}	T _{exp} (°C)	T _{num} (°C)	d (mm)
%۲۳	۹/۴	۷/۲	۳۷/۴	۳۵/۲	۴۹/۵۳
%۰/۷	۶	۵	۳۴	۳۳	۴۴/۴۵
%۳۰	۲	۲/۶	۳۰	۳۰/۶	۳۸/۱
%۴۴	۰/۵	۰/۹	۲۸/۵	۲۸/۹	۳۵/۵۶

برای هر آزمون با دامنه بارگذاری خاص، شار حرارتی متناظر از تحلیل مکانیکی تعریف، و همچنین زمانی برابر با عمر خستگی به‌دست‌آمده از مرحله قبل برای تحلیل حرارتی تعیین شده است. در شکل ۶ توزیع دما در نمونه برای دو دامنه بارگذاری متفاوت نشان داده شده است.

در نرم‌افزار آباکوس چگالی انرژی اتلافی در متغیری با عنوان PENER ذخیره می‌شود. قبل از حل مساله باید این متغیر را به‌عنوان خروجی درخواست داد. همان‌طور که در فصل سه بیان گردید، طبق نظریه مارو برای خستگی کم‌چرخه، این انرژی در هر سیکل مقدار تقریباً ثابتی خواهد داشت. در نمودار ۴ برای چهار دامنه متفاوت بارگذاری، تغییرات چگالی انرژی اتلافی برحسب زمان در ۱۰ سیکل بارگذاری رسم شده است. مقدار این انرژی در ناحیه نزدیک به انتهای گیردار نمونه، به‌طور موضعی دارای مقدار بیشینه است و داده‌های ارایه‌شده از گره‌های روی سطح در آن قسمت از مدل استخراج شده است. همچنین مقادیر چگالی انرژی کرنش پلاستیک بر واحد سیکل، برای چهار دامنه بارگذاری متفاوت در جدول ۴ گزارش شده است.



نمودار ۴) نمودار چگالی انرژی اتلافی طی ۱۰ سیکل بارگذاری برای نمونه آلومینیومی در دامنه بارگذاری‌های متفاوت

جدول ۴) مقایسه مقادیر تجربی و عددی چگالی انرژی اتلافی بر واحد سیکل

خطا	W _p (MJ/m ³ Cycle)	PENER (MJ/m ³ Cycle)	d (mm)
%۲۸	۰/۴۲	۰/۵۴	۴۹/۵۳
%۲۰	۰/۲۴۴	۰/۳۰۸	۴۴/۴۵
%۲۶	۰/۱۴۹	۰/۱۱	۳۸/۱
%۴۳	۰/۰۹۴	۰/۰۵۳	۳۵/۵۶

۲-۳-۳- تحلیل انتقال حرارت

پس از تحلیل مکانیکی و تعیین مقدار و توزیع چگالی انرژی اتلافی در هر دامنه بارگذاری، نوبت به تحلیل انتقال حرارت گذرا برای تعیین میدان دما در نمونه در طی بارگذاری خستگی می‌رسد. به‌نحوی که خروجی تحلیل مکانیکی یعنی چگالی انرژی اتلافی، به‌عنوان منبع گرمایی به‌صورت شار حرارتی حجمی بر روی نمونه اعمال می‌شود. در این مرحله باید خواص حرارتی نظیر ضریب هدایت k و گرمای ویژه C_v تعریف شود. همچنین پارامترهای مربوط به انتقال حرارت با محیط اطراف از قبیل ضریب انتقال حرارت همرفت h، ضریب تابش سطح ε، دمای محیط و ثابت استفان-بولتزمن نیز به نرم‌افزار معرفی شود که در مازول برهم‌کنش (Interaction) تعریف می‌شوند. از آنجایی که

۴- نتایج

۴-۲- محاسبه نرخ تولید آنتروپی و آنتروپی شکست خستگی

با استفاده از مقدار انرژی کرنش پلاستیک اتلافی و دمای سطح نمونه و با صرف نظر از ترم مربوط به هدایت حرارت در رابطه (۸- الف)، نرخ تولید آنتروپی را می‌توان براساس رابطه (۱۲- الف) محاسبه کرد.

$$\dot{\gamma} = \frac{\sigma : \dot{\epsilon}_p}{T} \quad (12-f)$$

اگر در این رابطه به جای $\sigma : \dot{\epsilon}_p$ از حاصل ضرب چگالی انرژی کرنش پلاستیک اتلافی بر واحد سیکل در فرکانس بارگذاری استفاده شود، رابطه (۱۲- ب) برای محاسبه نرخ تولید آنتروپی به دست می‌آید.

$$\dot{\gamma} = \frac{(PENER)f}{T} \quad (12-b)$$

که در آن PENER چگالی انرژی کرنش اتلافی بر واحد سیکل، f فرکانس بارگذاری و T دمای مطلق سطح نمونه است. در واقع صورت کسر در رابطه (۱۲- ب) برابر با نرخ تولید انرژی کرنش اتلافی است.

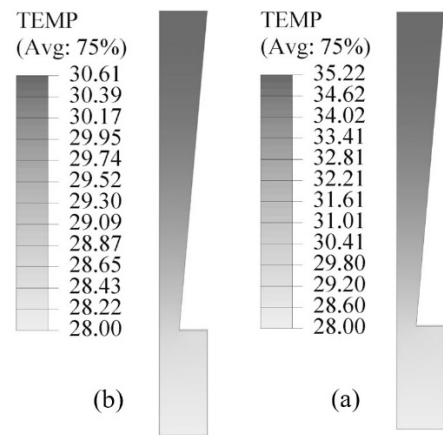
با استفاده از مقادیر به دست آمده از شبیه‌سازی، نرخ تولید آنتروپی متناظر با هر یک از دامنه‌های بارگذاری در فرکانس ۱۰ هرتز محاسبه شده و در جدول ۷ گزارش شده است. باید توجه شود که دمای مورد استفاده در محاسبه نرخ تولید آنتروپی، برحسب کلوین است.

جدول ۷) مقادیر نرخ تولید آنتروپی و آنتروپی شکست خستگی

γ_f (MJ m ⁻³ K ⁻¹)	$\dot{\gamma}$ (MJ m ⁻³ S ⁻¹ K ⁻¹)	d (mm)
۳/۹۸	/۰۱۷۶	۴۹/۵۳
۴/۱۵	/۰۱۰۲	۴۴/۴۵
۴/۲۶	/۰۰۳۶	۳۸/۱
۴/۳۹	/۰۰۱۷۵	۳۵/۵۶

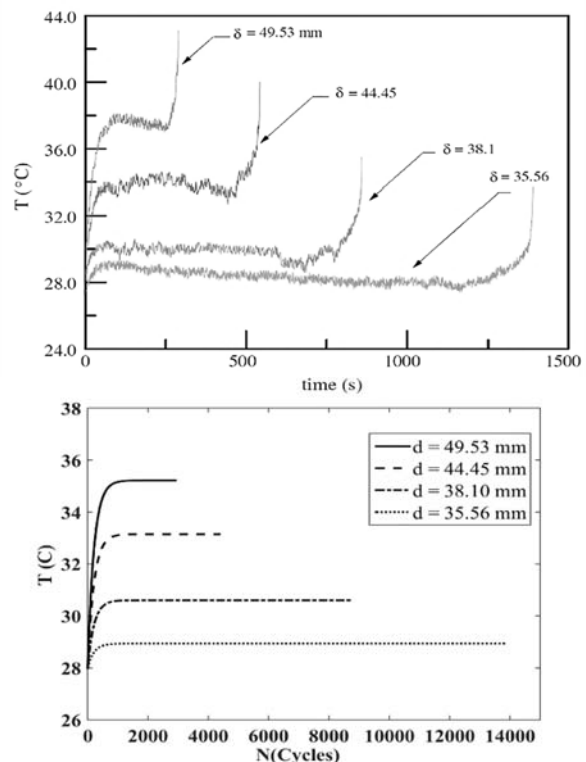
مشخص است که در بارگذاری با دامنه جابجایی و کرنش بزرگ‌تر، نرخ تولید آنتروپی شدیدتر بوده است و در مدت زمان کوتاه‌تری به مقدار بحرانی می‌رسد. با استفاده از نتایج مربوط به زمان شکست یا عمر خستگی به دست آمده برای هر دامنه بارگذاری با استفاده از رابطه (۶)، مقدار آنتروپی شکست خستگی (γ_f)، برای هر دامنه بارگذاری با انتگرال‌گیری از رابطه (۱۲- ب) محاسبه شده و در جدول ۷ گزارش شده است.

مشاهده می‌شود که مقادیر به دست آمده برای آنتروپی شکست خستگی در دامنه‌های متفاوت بارگذاری، تقریباً مقدار ثابتی خواهد داشت که میانگین آن برای این چهار دامنه برابر با ۴/۲ مگاژول بر مترمکعب کلوین است. این مطلب بیانگر آن است که واماندگی خستگی در قطعه، زمانی اتفاق می‌افتد که مقدار انباشت آنتروپی به یک مقدار بحرانی رسیده باشد. این مقدار برای هر ماده منحصر به فرد خواهد بود. مقدار میانگین آنتروپی شکست آزمایشگاهی برای این آزمون خستگی بر روی نمونه آلومینیومی (Al6061-T6) برابر با ۴/۰۷ مگاژول بر مترمکعب کلوین است.



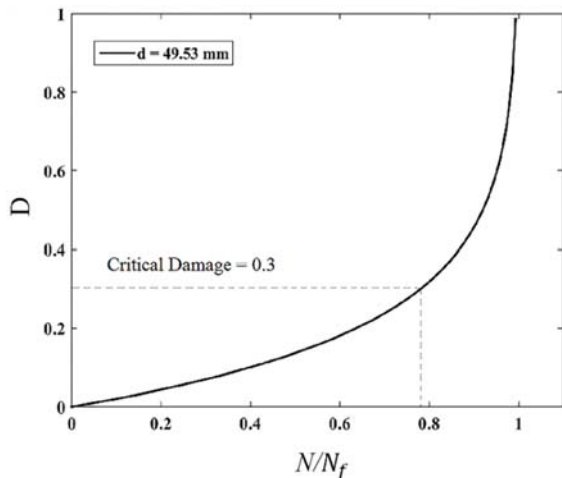
شکل ۶) توزیع دمای سطح نمونه آلومینیومی، الف) بارگذاری با دامنه ۴۹/۵۳ میلی‌متر ب) بارگذاری با دامنه ۳۸/۱ میلی‌متر

در نمودار ۵ روند تغییرات دمای سطح نمونه در ناحیه بحرانی با نمودار حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است. در نتایج شبیه‌سازی، قسمت مربوط به افزایش اولیه دما و حالت دمای تعادل، مخصوصاً در دامنه بارگذاری بزرگ‌تر، با دقت قابل قبولی با نمودار آزمایشگاهی مطابقت دارد. افزایش ناگهانی در دما در حدود ۱۰٪ پایانی عمر نمونه ناشی از ایجاد ماکروکرک و رشد ناپایدار آنها است که در نهایت باعث شکست نمونه می‌شود. از آنجایی که تولد ماکروکرک‌ها در این فرآیند مدل‌سازی نشده است، این قسمت از نمودار را در نتایج مدل‌سازی نخواهیم داشت. علاوه بر این نوسانات دمایی نیز ناشی از اثر ترموالاستیک است که این پارامتر حول یک مقدار متوسط نوسان دارد.



نمودار ۵) تغییرات دمای سطح نمونه در ناحیه بحرانی نمونه آلومینیومی، الف) نتایج آزمایشگاهی، ب) نتایج حاصل از شبیه‌سازی [16]

نتایج حاصل از شبیه‌سازی در مقدار آسیب بحرانی، عمر باقی‌مانده را حدود ۱۹٪ تخمین می‌زند که با نتایج تجربی خطایی معادل با ۱۰٪ را نشان می‌دهد.

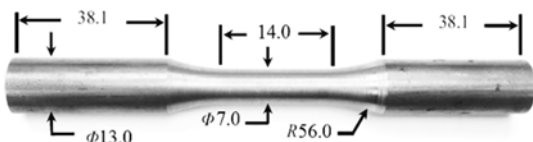


نمودار ۶) متغیر آسیب خستگی برحسب عمر خستگی بدون بعد برای دامنه بارگذاری ۴۹/۵۳ میلی‌متر

جدول ۸) تخمین عمر باقی‌مانده در مقدار آسیب بحرانی

عمر باقی‌مانده	d (mm)
۲۲٪	۴۹/۵۳
۱۸٪	۴۴/۴۵
۱۶٪	۳۸/۱

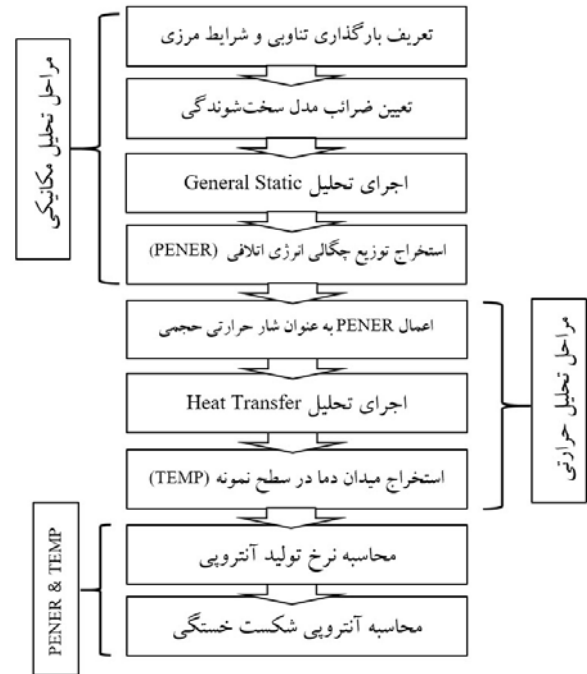
۳-۴- تخمین سریع افزایش دما با استفاده از منحنی کرنش-عمر در این بخش به امکان‌سنجی کاربرد ترموگرافی در اندازه‌گیری توزیع میدان دما در سطح نمونه محوری و اندازه‌گیری مقدار دما در ناحیه بحرانی، با استفاده از داده‌های منحنی کرنش-عمر پرداخته می‌شود. شبیه‌سازی آزمون خستگی محوری کشش-فشار کاملاً معکوس‌شونده با کرنش کنترل‌شده بر روی نمونه‌ای از جنس فولاد AISI 4340 با هدف تعیین میزان افزایش دما در حالت کرنش‌های پلاستیک کوچک و قابلیت اندازه‌گیری این افزایش دما توسط دوربین ترموگرافی انجام می‌شود (شکل ۸).



شکل ۸) هندسه نمونه طبق استاندارد ASTM E466-07 [6]

در تحلیل عددی به روش اجزا محدود، شبکه‌بندی دامنه مساله با تعداد المان کافی بسیار مهم است. به همین دلیل در فرآیند شبیه‌سازی باید همواره مساله را با تعداد المان متفاوت مورد بررسی قرار داد، تا جایی که دیگر افزایش تعداد المان یا به عبارت دیگر کوچک کردن ابعاد المان، کمترین تاثیر را بر جواب مساله

اختلاف نتایج آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی خطایی معادل با ۳٪ دارد. مراحل مربوط به تحلیل مکانیکی، تحلیل حرارتی و محاسبه آنتروپی شکست خستگی، به‌طور خلاصه در شکل ۷ نمایش داده شده است.



شکل ۷) شمایک مراحل تحلیل مکانیکی، حرارتی و محاسبه آنتروپی

۲-۴- محاسبه آسیب براساس آنتروپی

برای درک خرابی و انباشت آسیب، آنتروپی نسبت به انرژی اتلافی دارای مفهومی پایه‌ای‌تر است [12]. در این بخش با استفاده از نتایج حاصل از شبیه‌سازی به محاسبه متغیر آسیب با استفاده از رابطه (۹) پرداخته می‌شود و با نتایج تجربی به‌دست‌آمده در منبع مذکور مورد مقایسه قرار می‌گیرد. طبق گزارشات تجربی/میری و همکاران در هنگامی که پارامتر آسیب به ۳/۰ می‌رسد، عمر خستگی باقی‌مانده نمونه تقریباً معادل ۱۰٪ است [12]. با توجه به ثابت بودن دما در محدوده وسیع از عمر خستگی و رابطه خطی آنتروپی تولیدی با تعداد سیکل بارگذاری در این محدوده، می‌توان در رابطه (۹)، به جای نسبت $\frac{Y}{Y_f}$ از نسبت $\frac{N}{N_f}$ استفاده شود و پارامتر آسیب را برحسب عمر خستگی بدون بعد رسم کرد [1]. با انتگرال‌گیری عددی از نرخ آنتروپی تولیدی (رابطه ۱۲-ب) براساس داده‌های حاصل از شبیه‌سازی و محاسبه متغیر آسیب برحسب مقدار آنتروپی تولیدی، روند انباشت آسیب برای دامنه بارگذاری ۴۹/۵۳ میلی‌متر در نمودار ۶ رسم شده است. مشاهده می‌شود که عمر باقی‌مانده خستگی برای نمونه آلومینیومی در این آسیب بحرانی تقریباً برابر با ۲۲٪ است، در حالی که آزمون‌های تجربی عمر باقی‌مانده را در این پارامتر آسیب ۱۰٪ نتیجه دادند. به همین ترتیب درصد عمر باقی‌مانده برای دو دامنه بارگذاری دیگر محاسبه شده و نتایج در جدول ۸ آورده شده است. به‌طور میانگین

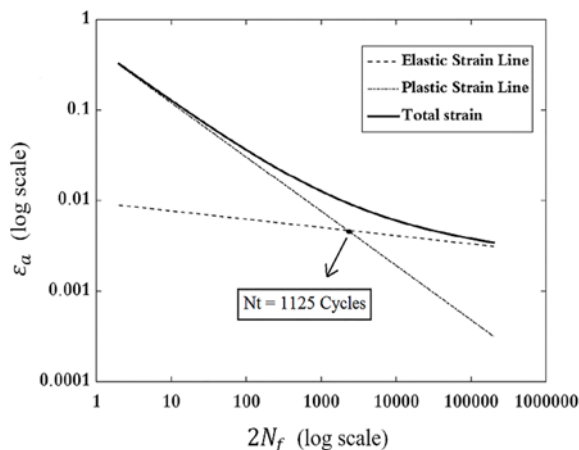
جدول ۹) مشخصه‌های خستگی فولاد [17] AISI 4340

c	b	n'	k' (Mpa)	ϵ_f'	A (Mpa)	σ_f' (Mpa)	σ_y' (Mpa)
-۰/۶	-۰/۰۹۱	۰/۱۵	۲۲۳۲	۰/۴۸	۱۸۷۸	۲۰۰۰	۸۵۰

جدول ۱۰) خواص مکانیکی و حرارتی فولاد [17] AISI 4340

ρ (kgm ⁻³)	C_v (kJ ⁻¹ kg ⁻¹)	k (Wm ⁻¹ k ⁻¹)	σ_y (Mpa)	ν	E (Gpa)
۷۸۵۰	۴۷۵	۴۴	۱۳۷۰	۰/۳	۲۱۲

ابتدا با استفاده از خواص خستگی ماده طبق جدول ۹، منحنی کرنش- عمر و خطوط کرنش الاستیک و پلاستیک برای فولاد AISI 4340 مطابق نمودار ۸ در مقیاس لگاریتمی رسم می‌شود. در عمرهای پایین و کرنش‌های پلاستیک قابل توجه، منحنی کرنش- عمر بر خط پلاستیک مماس می‌شود، در حالی که در طول عمرهای طولانی و کرنش‌های پلاستیک بسیار ناچیز، منحنی کرنش- عمر بر خط کرنش الاستیک مماس می‌شود^[1]. محل تقاطع خط کرنش الاستیک و خط کرنش پلاستیک را عمر خستگی گذرا (N_f) گویند. عمرهای خستگی مورد بررسی در این تحقیق مقادیر بیش از عمر خستگی گذرا هستند که کرنش پلاستیک در مقایسه با کرنش الاستیک کم و کمتر می‌شود.

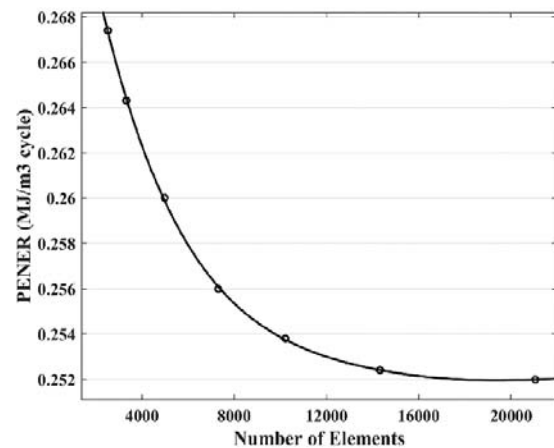


نمودار ۸) منحنی کرنش- عمر برای فولاد AISI 4340

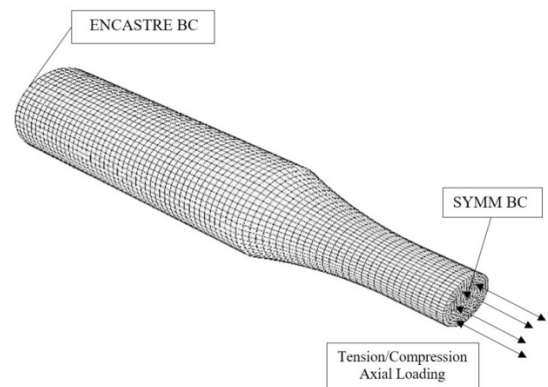
با استفاده از اسکریپت‌نویسی بر روی داده‌های خروجی ODB و با استفاده از داده‌های منحنی کرنش- عمر و معادله کافین- مانسون به تخمین انرژی کرنش اتلافی پرداخته شده است. در اسکریپت پایتون برای هر یک از المان‌های موجود در مدل المان محدود و در نقطه انتگرالی متناظر، کرنش محاسبه می‌شود. از آنجایی که فرمولاسیون المان از نوع انتگرال‌گیری کاهش یافته است، هر المان یک نقطه انتگرالی در مرکز خود دارد و مختصات این نقطه نیز با استفاده از مختصات هشت‌گانه المان قابل محاسبه است. پس از آن با مراجعه به نمودار، عمر خستگی متناظر با مقایسه کرنش محاسبه شده با مقادیر دامنه کرنش در منحنی کرنش- عمر برای هر المان استخراج می‌شود. باید توجه داشت که در منحنی کرنش- عمر، محور افقی برحسب تعداد بازگشت‌ها یعنی $2N_f$ است.

داشته باشد. در نمودار ۷ تاثیر تعداد المان بر پاسخ به‌دست‌آمده مشاهده می‌شود. می‌توان گفت که تعداد المان ۱۴۰۰۰ برای این مساله مقدار بهینه است، چون در صورت افزایش بیش از این مقدار کمتر از ۵٪ در جواب تاثیرگذار خواهد بود، در حالی که حجم محاسبات نیز افزایش خواهد یافت.

همچنین در شکل ۹ شبکه‌بندی اجزا محدود مدل نشان داده شده است که به‌علت تقارن در هندسه نمونه و صرفه‌جویی در هزینه محاسباتی، از نیمه‌مدل برای تحلیل استفاده شده است.



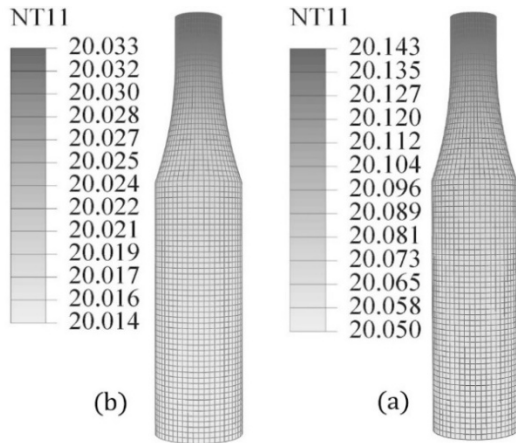
نمودار ۷) اثر تعداد المان در شبکه‌بندی اجزا محدود بر چگالی انرژی کرنش اتلافی بر واحد سیکل



شکل ۹) مدل المان محدود نیمی از هندسه نمونه

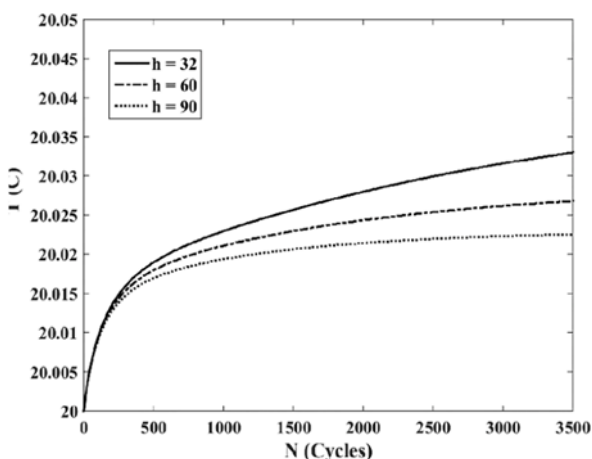
فرض می‌شود که کرنش پلاستیک ایجادشده در هر سیکل، دارای مقدار ثابتی است و این مقدار با استفاده از منحنی کرنش- عمر محاسبه می‌شود. بنابراین تنها یک سیکل بارگذاری بر روی نمونه انجام شده و آزمون با دامنه کرنش کنترل شده فرض می‌شود. سپس با محاسبه مقادیر کرنش پلاستیک در نقاط انتگرال‌گیری، مقدار انرژی اتلافی محاسبه خواهد شد. در واقع یک تخمین از محدوده افزایش دمای نمونه در شرایطی که عمر خستگی از عمر خستگی گذرا (N_f) بیشتر باشد، به‌دست‌آمده و نسبت به برخی پارامترهای موثر در پاسخ حرارتی حساسیت‌سنجی می‌شود. مشخصه‌های خستگی این فولاد و همچنین خواص مکانیکی و حرارتی آن به‌ترتیب در جداول ۹ و ۱۰ آورده شده است.

از پایان تحلیل حرارتی، دمای حالت پایدار و افزایش دمای ناشی از بارگذاری خستگی از خروجی تحلیل قابل استخراج خواهد بود. در شکل ۱۰ توزیع دمای سطح نمونه‌ها برای دامنه کرنش ۰/۰۰۹۴ و ۰/۰۰۷۰ پس از رسیدن به تعادل دمایی با محیط نشان داده شده است.



شکل ۱۰ توزیع دمای سطح نمونه در حالت پایدار، الف) دامنه کرنش ۰/۰۰۹۴ ب) دامنه کرنش ۰/۰۰۷۰

در نمودار ۹ تأثیر ضریب انتقال حرارت جابجایی بر روی پاسخ حاصل از تحلیل حرارتی و دمای تعادل سطح نمونه در مرکز سنجه طول در قالب سه منحنی با ضرایب انتقال حرارت متفاوت برای یک دامنه بارگذاری معین نشان داده شده است. تغییرات در ضریب انتقال حرارت طبق رابطه (۱۴) می‌تواند ناشی از تغییر در سرعت جریان هوا در اطراف نمونه و یا تغییر در دمای محیط باشد که بر روی خواص فیزیکی سیال هوا تأثیرگذار خواهد بود. مشاهده می‌شود که مقدار افزایش دما تقریباً با دو برابر کردن این پارامتر، معادل ۲۰٪ و با سه برابر کردن آن حدود ۳۵٪ کاهش می‌یابد.



نمودار ۹) تأثیر ضریب انتقال حرارت بر افزایش در ناحیه سنجه طول در دامنه کرنش ۰/۰۰۷۰

همچنین از دیگر عوامل تأثیرگذار بر پاسخ حرارتی ماده می‌توان به ضریب تابش سطح اشاره کرد که در هنگام استفاده از تکنیک

با محاسبه کرنش پلاستیک بر واحد سیکل ϵ_p و حاصل ضرب آن در تنش معادل σ_{eq} (تنش معادل میسز در داده‌های خروجی)، فرکانس بارگذاری f و درصد تبدیل کرنش پلاستیک به انرژی اتلافی ($\eta = 0.9$)، نرخ انرژی کرنش اتلافی بر واحد حجم طبق رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود. در واقع ۹۰٪ از مقدار چگالی انرژی کرنشی انباشته در جسم به‌عنوان یک شار حرارتی حجمی برای تحلیل حرارتی در نظر گرفته می‌شود.

$$\dot{W}_p = \eta \sigma_{eq} \frac{\epsilon_p}{N_f} f \quad (13)$$

مقدار انرژی کرنش اتلافی به همراه مختصات نقاط انتگرال‌گیری مدل در یک فایل متنی ذخیره می‌شود و به‌صورت ابر نقاط به‌عنوان یک شار حرارتی حجمی برای تحلیل حرارتی بر مدل المان محدود نگاشت می‌شود. به‌عنوان مثال، پارامترهای محاسبه‌شده در نقطه انتگرال‌گیری یک المان در مرکز سنجه طول نمونه برای چهار دامنه کرنش متفاوت، در جدول ۱۱ گزارش شده است.

جدول ۱۱) مقادیر محاسبه شده در چهار دامنه کرنش در مرکز طول سنجه

N_f (Cycles)	ϵ_a
۱۱۰۲	۰/۰۰۹۴
۲۷۳۰	۰/۰۰۷۰
۹۵۷۶	۰/۰۰۵۱
۳۳۲۸۰	۰/۰۰۴۱

ضریب انتقال حرارت جابجایی بین سطح نمونه و هوای اطراف، با استفاده از رابطه تجربی (۱۴) قابل محاسبه خواهد بود. خواص فیزیکی سیال هوا را باید در فشار و دمای محیط آزمایش جایگذاری کرد [17].

$$h = \frac{0.664 k_a \sqrt{N_{Pr}}}{l} \sqrt{\frac{ul}{\nu}} \quad (14)$$

که در آن k_a ضریب هدایت هوا، N_{Pr} عدد پرانتل هوا، ν لزجت سینماتیک هوا در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و فشار یک اتمسفر، u سرعت جریان هوا و l طول مشخصه است که می‌توان از طول سنجه نمونه برای این پارامتر استفاده کرد. فرض می‌شود که سرعت جریان هوا در شرایط آزمایش برابر اتمربرثانیه است. خواص فیزیکی سیال هوا در دما و فشار موجود در شرایط آزمون خستگی در جدول ۱۲ آورده شده است. با استفاده از این خواص، مقدار ضریب انتقال حرارت طبق رابطه (۱۴) تقریباً برابر با ۳۲ وات بر مترمربع کلویین به‌دست می‌آید.

جدول ۱۲) خواص فیزیکی سیال هوا در فشار یک اتمسفر و دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد [17]

ρ (kgm ⁻³)	N_{Pr}	ν (m ² s ⁻¹)	k (Wm ⁻¹ K ⁻¹)
۱/۲۰۴	۰/۷۳۰۹	۱/۵۱۶×۱۰ ^{-۵}	۰/۰۲۵۱۴

دمای اولیه برابر با ۲۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است که به‌صورت یک میدان از پیش تعریف‌شده به‌عنوان شرایط اولیه مساله برای شروع تحلیل حرارتی به نرم‌افزار معرفی می‌شود. پس

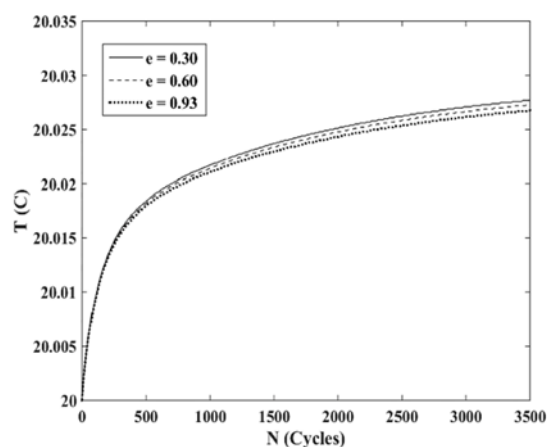
نتایج مربوط به نرخ تولید انرژی کرنش پلاستیک بر واحد حجم، حاصل از تحلیل عددی، در مواردی که کرنش پلاستیک قابل توجهی در ماده ایجاد می‌شود، نسبت به زمانی که کرنش پلاستیک ناچیز است از دقت بالاتری برخوردار است. همچنین میدان دمای حاصل از تحلیل حرارتی با نتایج به‌دست‌آمده از آزمون آزمایشگاهی، خطایی در محدوده ۱۷ تا ۴۴٪ در دامنه‌های متفاوت بارگذاری را نشان می‌دهد.

با محاسبه نرخ تولید انرژی و انتگرال‌گیری از آن در طول عمر نمونه که منجر به محاسبه انرژی شکست خستگی می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که مقدار انرژی انباشته شده در لحظه شکست خستگی برای یک ماده در دامنه بارگذاری‌های متفاوت تقریباً ثابت است. روش‌های مبتنی بر انرژی ترمودینامیکی که نیازمند محاسبه انرژی کرنش اتلافی و میدان دمای جسم هستند، در رژیم خستگی کم‌چرخه با کرنش‌های پلاستیک قابل توجه، نسبت به خستگی پرچرخه که کرنش پلاستیک عموماً ناچیز است، کارایی بیشتری خواهند داشت. با مقایسه اختلاف دمای به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمون تجربی، مشاهده می‌شود که هرچه دامنه بارگذاری کاهش می‌یابد و به تبع آن مقدار دامنه کرنش پلاستیک و انرژی اتلافی ناشی از آن کاهش می‌یابد، درصد خطا افزایش می‌یابد. در واقع این موضوع بیانگر این نکته است که نتایج عددی در محدوده کرنش‌های پلاستیک بزرگ‌تر پاسخ دقیق‌تری ارائه می‌دهد.

در بخش مربوط به امکان‌سنجی کاربرد ترموگرافی مادون قرمز در محدوده عمرهایی فراتر از عمر خستگی گذرا، با استفاده از منحنی کرنش- عمر به تخمین انرژی کرنش اتلافی ناشی در دامنه‌های بارگذاری متفاوت پرداخته شد. این ایده نیازمند معلوم‌بودن خواص خستگی برای رسم نمودار کرنش- عمر و همچنین استفاده از قابلیت اسکریپت‌نویسی پایتون در نرم‌افزار آباکوس است. به نحوی که محاسبه عمر براساس کرنش ایجادشده در هر المان و سپس تعیین عمر متناظر از روی نمودار و در نهایت محاسبه انرژی کرنش اتلافی مستلزم آماده‌سازی یک الگوریتم برای دسترسی به داده‌های خروجی تحلیل و اعمال بر روی تک‌تک المان‌ها خواهد بود. به‌منظور نگاشت چگالی انرژی اتلافی بر هندسه مدل المان محدود در تحلیل حرارتی، هنگامی که از کوپل متوالی تنش-حرارت استفاده می‌شود، به‌کارگیری ابزار نگاشت میدان تحلیلی به‌صورت نگاشت براساس توزیع پارامتر خروجی مورد نظر و یا نگاشت ابرنقاط طبق داده‌های حاصل از اسکریپت پایتون، ابزار مناسبی است که در نرم‌افزار آباکوس تعبیه شده است.

نتایج به‌دست‌آمده در بخش امکان‌سنجی برای عمرهای طولانی‌تر از عمر خستگی گذرا که کرنش‌های پلاستیک در مقایسه با کرنش الاستیک بسیار کوچک‌تر هستند، بیانگر این است که میزان افزایش دما در ماده در حدود چند صدم درجه سانتی‌گراد است که برای تشخیص این اختلاف دما نیاز به دوربین‌های ترموگرافی با حساسیت و دقت بالایی است. همچنین مشاهده شد که ضریب

ترموگرافی برای اندازه‌گیری دمای سطح هدف، برای یک ارزیابی دقیق ضروری است که این پارامتر هر چه دقیق‌تر تعیین و به ابزار ترموگرافی یا همان دوربین مادون قرمز معرفی شود. در نمودار ۱۰ تاثیر ضریب تابش سطح نمونه بر پاسخ حرارتی ماده در ناحیه سنجه طول نمایش داده شده است. می‌توان مشاهده کرد که اثرگذاری این پارامتر در مقایسه با ضریب جابجایی به مراتب کمتر است. با کاهش ضریب تابش سطح به یک‌سوم مقدار اولیه، افزایش دما تنها چیزی حدود کمتر از ۴٪ افزایش می‌یابد. به طور کلی حرارت منتقل‌شده از جسم به محیط از طریق تشعشع در مقایسه با جابجایی کوچک‌تر بوده و به تبع آن تاثیر ضریب تابش سطح در مقایسه با ضریب جابجایی نیز بر دمای نهایی کم‌تر خواهد بود.



نمودار ۱۰) تاثیر ضریب تابش سطح بر افزایش دما در مرکز سنجه طول

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش ابتدا با معرفی یک فرآیند مبتنی بر کوپل متوالی تنش- حرارت و فرض ثابت‌بودن مقدار چگالی انرژی کرنش پلاستیک در هر سیکل از رژیم خستگی کم‌چرخه، به تخمین نرخ تولید انرژی کرنش اتلافی و میزان افزایش دما در ناحیه بحرانی نمونه آلومینیومی در طی یک بارگذاری خمش کاملاً معکوس‌شونده پرداخته می‌شود. دو پارامتر نرخ تولید انرژی کرنش اتلافی و دمای سطح نمونه برای محاسبه انرژی شکست خستگی استفاده می‌شود. هر چند در این روش نیازی به مدل‌سازی تمام عمر نمونه است، اما نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی دارای تفاوت قابل قبولی است که برای پارامترهای متفاوت در مراحل مختلف تحلیل در محدوده ۲۰ تا ۴۰٪ است.

از برزاش بخش مربوط به کرنش پلاستیک رابطه رامبرگ- اسگود با منحنی حاصل از انتگرال قانون سخت‌شوندگی چابوچه با تعداد سه تانسور تنش زمینه، برای تعیین منحنی تنش- کرنش چرخه‌ای ماده، تخمین تنش تسلیم چرخه‌ای و استخراج پارامترهای مربوط به قانون سخت‌شوندگی سینماتیک استفاده می‌شود. این ضرایب برای مدل‌سازی رفتار ماده در ناحیه پلاستیک در نرم‌افزار آباکوس مورد استفاده قرار می‌گیرد.

prediction of welded joints. *Materials and Design*. 2013;51:916-923.

6- Liakat M, Khonsari MM. Rapid estimation of fatigue entropy and toughness in metals. *Materials and Design*. 2014;62:149-157.

7- Naderi M, Khonsari MM. Real-time fatigue life monitoring based on thermodynamic entropy. *Structural Health Monitoring*. 2011;10(2):89-97.

8- Bagavathiappan S, Lahiri BB, Saravanan T, Philip J, Jayakumar T. Infrared thermography for condition monitoring-A review. *Infrared Physics & Technology*. 2013;60:35-55.

9- Naderi M, Khonsari MM. A thermodynamic approach to fatigue damage accumulation under variable loading. *Materials Science and Engineering A*. 2010;527(23):6133-6139.

10- Park J, Nelson D. Evaluation of an energy-based approach and a critical plane approach for predicting constant amplitude multiaxial fatigue life. *International Journal of Fatigue*. 2000;22(1):23-39.

11- Naderi M, Khonsari MM. an experimental approach to low-cycle fatigue damage based on thermodynamic entropy. *International Journal of Solids and Structures*. 2010;47(6):875-880.

12- Wiegrebe L. An autocorrelation model of bat sonar. *Biological Cybernetics*. 2008;98(6):587-595.

13- ABAQUS. ABAQUS/CAE. User's manual, version 6.14. [Internet]. Rhode Island: ABAQUS Inc; 2014 [Unknown Cited]. Available from: <http://ivt-abaqusdoc.ivt.ntnu.no:2080/texis/search/?query=wetting&submit.x=0&submit.y=0&group=bk&CDB=v6.14>

14- Gorash Y, Mackenzie D. On cyclic yield strength in definition of limits for characterization of fatigue and creep behavior. *Open Engineering*. 2017;7(1):126-140.

15- Amiri M, Naderi M, Khonsari MM. An experimental approach to evaluate the critical damage. *International Journal of Fatigue*. 2011;20(1):382-389.

16- Amiri M, Khonsari M. Rapid determination of fatigue failure based on temperature evolution: Fully reversed bending load. *International Journal of Fatigue*. 2010;32(2):382-389.

17- matweb.com [Internet]. Unknown City: MatWeb; 2018 [Unknown Cited]. Available from: <http://www.matweb.com/search/MaterialGroupSearch.aspx>

انتقال حرارت جابجایی در مقایسه با سایر عوامل مانند ضریب تابش سطح نمونه، پارامتر مهم‌تری به شمار رفته و تاثیر بیشتری در دمای تعادل نمونه با محیط و قابلیت کاربرد روش مذکور خواهد داشت. به‌طور کلی هر چند استفاده از این روش برای تخمین آسیب در رژیم خستگی کم‌چرخه مناسب است، اما کاربرد آن در برآورد آسیب در رژیم خستگی پرچرخه نیاز به تحقیقات بیشتری دارد.

تشکر و قدردانی: از دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی دانشگاه شهید بهشتی که امکانات لازم برای انجام این پژوهش را فراهم نمودند، تشکر و قدردانی می‌شود.

تاییدیه اخلاقی: محتویات علمی مقاله حاصل فعالیت علمی نویسندگان مقاله بوده و صحت و اعتبار نتایج بر عهده نویسندگان است.

تعارض منافع: مولفین مقاله، هیچ گونه تعارض منافی با فرد یا گروه دیگری ندارند.

سهم نویسندگان: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

منابع مالی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

منابع

1- Khonsari MM, Amiri M. Introduction to thermodynamics of mechanical fatigue. 1st Edition. Boca Raton, Florida: CRC Press; 2017.

2- Naderi M, Khonsari MM. On the thermodynamic entropy of fatigue fracture. *Proceedings: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2010;466(2114):423-438.

3- Liakat M, Khonsari MM. Entropic characterization of metal fatigue with stress concentration. *International Journal of Fatigue*. 2014;70:223-234.

4- Xiao-qing L, Hong-xia Z, Zhi-feng Y. Fatigue life prediction of AZ31B magnesium alloy and its welding joint through infrared thermography. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2013;67-68:46-52.

5- Williams P, Liakat M, Khonsari MM, Kabir OM. A thermographic method for remaining fatigue life