مجله مهندسی مکانیک مدرس، مرداد 1396، دوره 17، شماره 5، ص‌ص 232-242

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

روش عددی برای پیش‌بینی عمر خستگی تحت بارگذاری‌های نامتناسب

حسن منصوری[1]، سعید بابایی[2]، احمد قاسمی قلعه بهمن[3*]

1- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء (ص)، تهران

2- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک دانشگاه سمنان، سمنان

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان

* سمنان، صندوق پستی 35131-19111، ghasemi@semnan.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 18 دی 1395

پذیرش: 22 اسفند 1395

ارائه در سایت: 16 اردیبهشت 1396

کلید واژگان:

خستگی

خستگی چند محوره

بارگذاری نامتناسب

مکانیک آسیب

روش‌های عددی

چکیده

در این تحقیق روش جدیدی برای پیش‌بینی عمر خستگی تحت بارگذاری‌های نامتناسب ارائه شده است. این روش عددی برای پیش‌بینی عمر خستگی مواد مختلف شامل فولاد 1045، فولاد 30CrNiMo8HH، تیتانیوم TC4، آلیاژ منیزم AZ31B اکستروژن شده و آلومینیوم آلیاژی 6061 تحت بارگذاری‌های متناسب و نامتناسب به‌کار گرفته می‌شود. روش ارائه شده در قالب دو اصلاحیه گسترش داده شده است. اصلاحیه اول با مرتبط کردن مقادیر آسیب بارگذاری‌های متناسب و نامتناسب و اصلاح مقدار آسیب بارگذاری نامتناسب سعی در کاهش خطای پیش‌بینی عمر خستگی تحت بارگذاری نامتناسب را داشته و اصلاحیه دوم با استفاده از ضریب سخت شوندگی نامتناسب و یک رابطه خطی مقدار آسیب در بارگذاری نامتناسب را اصلاح کرده و متعاقبا عمر خستگی هم مورد اصلاح قرار می‌گیرد. در ادامه، این روش روی چند مدل خستگی پرکاربرد شامل ماکزیمم کرنش برشی، مدل SWT، مدل فاطمی- سوشی به علاوه مدل بابایی-قاسمی اعمال شده و نتایج با مشاهدات آزمایشگاهی موجود در مقالات مقایسه و صحت‌سنجی می‌شود. میزان تغییرات خطا و افزایش دقت پیش‌بینی عمر خستگی با روش ارائه شده با مقادیر مقادیر اصلاح نشده مقایسه و مورد بحث قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند روش ارائه شده برای تمام مواد مورد بررسی میزان خطا در محاسبه عمر خستگی را به مقدار چشم‌گیری کاهش می‌دهد.

A novel numerical method for fatigue life prediction under non-proportional loadings

Hasan Mansoori [1], Saeid Babaei [2], Ahmad Ghasemi-Ghalebahman[2*]

1- Department of Mechanical Engineering, Khatam-ol-anbia University, Tehran, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran
* P.O.B. 35131-19111, Semnan, Iran, ghasemi@semnan.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 07 January 2017
Accepted 12 March 2017
Available Online 06 May 2017

Keywords:
Fatigue
Fatigue Models
Numerical Methods
Damage Mechanics

ABSTRACT

The present study proposes a novel numerical method for fatigue life prediction under non-proportional loading. This method is employed for fatigue life estimation of different materials including 1045 Steel, 30CrNiMo8HH, Titanium TC4, extracted AZ31B Magnesium and Aluminum alloy 6061 under both proportional and non-proportional loadings. Basis of the method is developed in the framework of two numerical modifications. The first modification modifies fatigue damage parameters by correlating damage quantities of non-proportional loading to the proportional one. The second modification uses the same equation as the first one, but the corresponding damage coefficient is replaced by the additional hardening coefficient. In addition, these modifications are applied to fatigue damage parameters including maximum shear strain, SWT, Fatemi-Socie, and Babaei-Ghasemi model and are also verified against experimental observations available in literature. Furthermore, the obtained results are discussed in detail and are also compared to the non-modified findings. Moreover, the variation of the fatigue life prediction error is calculated for the aforementioned models. Finally, the results show consideration and implementation of these modifications significantly improves the accuracy of the predicted fatigue lives for all the studied cases.

1- مقدمه

خستگی منشا اصلی بیشتر شکست‌های مکانیکی است. شمار زیادی از تجهیزات مهندسی در روند کاری خود تحت بارگذاری‌های پیچیده قرار می‌گیرند، که این بارگذاری‌های پیچیده منجر به ایجاد تنش های چند محوره در این قطعات می‌شود. به علت وجود پیچیدگی‌های هندسی در تنش افزاها و جدایی‌هایی نظیر خلل و فرج، تنش چند محوره حتی تحت بارگذاری‌های ساده یک محوره هم وجود دارد.

مدل‌های خستگی زیادی تاکنون ارائه شده است، اما مدلی که جامع بوده و برای تمام مواد و بارگذاری‌ها دقیق باشد وجود ندارد. بارگذاری‌های چند محوره می‌توانند به دو صورت متناسب یا هم‌فاز و به صورت نامتناسب یا ناهم فاز باشند. در بارگذاری متناسب جهت‌های اصلی تانسور تنش و کرنش ثابت بوده در حالی که در بارگذاری نامتناسب جهت‌های اصلی در خلال بارگذاری دوران می‌کنند.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

H. Mansoori, S. Babaei, A. Ghasemi-Ghalebahman, A novel numerical method for fatigue life prediction under non-proportional loadings, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 232-242, 2017 (in Persian)

در ناحیه خستگی کم چرخه، بارگذاری نامتناسب بحرانی تر از بارگذاری متناسب بوده و منجر به آسیب بیشتری می‌شود [2,1]. در بعضی مواد این چرخش محورهای اصلی موجب سخت شوندگی اضافی در ماده شده که این امر را با کاهش عمر مرتبط می‌دانند [4,3]. چرخش جهت اصلی باعث چرخش صفحه ماکزیمم تنش برشی هم شده که منجر به تغییر شکل‌های پلاستیک در صفحات لغزش مختلف و درنهایت کاهش عمر خستگی می‌شود. همه مواد به بارگذاری نامتناسب حساسند، جدا از این‌که مواد از خود سخت شوندگی اضافی نشان دهند یا نه، اما مقدار این حساسیت برای مواد مختلف متفاوت است.

این پژوهش اثر بارگذاری نامتناسب را روی عمر خستگی بررسی کرده و برای به حساب آوردن مسیر بارگذاری و کاهش خطای محاسبه عمر خستگی تحت این بارگذاری‌ها روشی جامع ارائه می‌کند. این روش مختص به یک مدل و ماده نبوده و قابلیت اعمال بر روی تمامی مواد و مدل‌ها را دارد. در این تحقیق دو اصلاحیه براساس مکانیک آسیب برای کاهش خطای محاسبه عمر خستگی تحت بارگذاری های نامتناسب پیشنهاد و بررسی می‌شود. روش ارائه شده برای پیش‌بینی عمر خستگی مواد مختلفی از جمله فولاد 1045، فولاد 30CrNiMo8HH، تیتانیوم TC4، آلیاژ منیزم AZ31B اکستروژن و آلومینیوم آلیاژی 6061 شده به‌کار رفته و صحت‌سنجی می‌شود، همچنین اصلاحیه ها برای چند مدل خستگی پرکاربرد از جمله ماکزیمم کرنش برشی، مدل SWT، و مدل فاطمی- سوشی و مدل بابایی– قاسمی اعمال شده و برای پیش‌بینی عمر خستگی مواد فوق الذکر استفاده شده و نتایج و تغییرات میزان خطا در محاسبه عمر بعد از اعمال آن‌ها بررسی می‌شوند.

یک روش برای پیش‌بینی عمر خستگی استفاده از پارامتر انرژی برای مرتبط کردن بارگذاری و عمر خستگی می‌باشد. در حالت کلی روند خستگی شامل تغییر شکل‌های پلاستیک می‌شود که این تغییرات به مسیر بارگذاری وابسته است، بنابراین معیارهای خستگی که فقط شامل کرنش و یا تنش هست یا به عبارتی مدل‌های تنش-پایه و یا کرنش-پایه نمی‌توانند این وابستگی مقدار آسیب به مسیر بارگذاری را در محاسبه عمر منعکس کنند [5].

اکثر مدل‌های انرژی-پایه که رفتار تنش-کرنش ماده را در نظر می‌گیرند و مقدار انرژی را از حلقه هیسترزیس محاسبه می‌کنند برای به‌کار بردن دارای سهولت لازم نیستند و تحت بارگذاری‌های نامتناسب برای تخمین حلقه هیسترزیس تنش-کرنش باید از مدل‌های پلاستیسیته سیکلی و پلاستیسیته نموی بهره برد که خود دارای پیچیدگی‌های بسیارند. لیو برای اولین بار متغیری به نام انرژی مجازی کرنشی تعریف کرد و با استفاده از آن و دو نوع مکانیزم ترک در ماده (A,B) و دو دایره مور تنش و کرنش عمر خستگی را پیش‌بینی کرد [6].

برای به حساب آوردن مسیر بارگذاری در محاسبه عمر خستگی و همچنین بررسی تاثیر آن روی عمر خستگی تحقیقات متعددی انجام شده و پارامترهای عدم تناسب[1] متعددی تعریف شده است.

کانازاوا و همکارانش [7] در پژوهشی تغییر شکل های متناوب فولاد 1%Cr-Mo-V را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برای به‌دست آوردن منحنی تنش-کرنش تحت بارگذاری های نامتناسب فاکتور چرخشی معرفی کردند که بیانگر مقدار لغزشی بود که صفحه بحرانی آن را تجربه می‌کند. این فاکتور چرخش که به‌عنوان پارامتر عدم تناسب بارگذاری هم می‌تواند استفاده شود برابر است با نسبت کرنش برشی در صفحه‌ای که با صفحه‌ای که ماکزیمم کرنش برشی را تجربه می‌کند زاویه 45 درجه می‌سازد به ماکزیمم دامنه کرنش برشی.

یک روش پرکاربرد دیگر برای اندازه گیری عدم تناسب بارگذاری، روش کوچکترین بیضی محیط شده[2] یا MCE است [8]. اگر مسیر بارگذاری در فضای داخل یک بیضی محاط شود، پارامتر عدم تناسب به صورت نسبت قطر کوچک بیضی به قطر بزرگ بیضی تعریف می‌شود. چن و همکارانش [9] رفتار خستگی فولاد 42CrMo و تاثیر مسیرهای مختلف بارگذاری روی سخت شوندگی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها یک پارامتر عدم تناسب را براساس اصول فیزیکی و مکانیکی تعریف کردند. آن‌ها ماکزیمم کرنش برشی در جهات مختلف را در مختصات قطبی رسم کرده و پارامتری را به صورت نسبت سطح پوشیده شده توسط منحنی ماکزیمم کرنش برشی در جهات مختلف به مساحت دایره‌ای به شعاع ماکزیمم کرنش برشی در یک سیکل تعریف کردند.

2- روشی عددی برای پیش‌بینی عمر خستگی

برای بیشتر مواد، بارگذاری نامتناسب یا ناهم‌فاز بحرانی تر از بارگذاری متناسب و هم‌فاز است، و مدل های خستگی برای این بارگذاری‌ها اغلب عمر را بیشتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کنند [12-10,1].

به طور کلی می‌توان گفت، وقتی عمر پیش‌بینی شده با عمر آزمایشگاهی متفاوت است، مدل خستگی مقدار آسیب خستگی را کمتر یا بیشتر از مقداری که محاسبه می‌شده، حدس زده است. مقدار این اضافی یا کمتر حدس زدن آسیب، وابسته به مدل و نوع بارگذاری متفاوت است.

برای موادی که به عدم تناسب بارگذاری حساسند[3] عمر پیش‌بینی شده برای بارگذاری‌های متناسب با خطای کمتری نسبت به عمر پیش‌بینی شده برای بارگذاری‌های نامتناسب همراه است [14,13,6]. از طرفی عمر خستگی از میزان آسیب پیش‌بینی شده بدست می‌آید. پس با مرتبط و هماهنگ ساختن مقادیر آسیب برای بارگذاری‌های نامتناسب با متناسب می‌توان مقدار خطای پیش‌بینی عمر را برای بارگذاری‌های نامتناسب کاهش داد. بر این اساس در این مقاله روشی برای اصلاح مقدار آسیب تحت بارگذاری‌های نامتناسب ارائه می‌شود. این روش عددی قابلیت اعمال بر روی تمام پارامترهای آسیب و مدل‌های خستگی را داراست.

2-1- پیش‌بینی عمر خستگی به روش آسیب همبسته[4]

این اصلاحیه مقدار آسیب بارگذاری‌های نامتناسب را به روش مرتبط کردن آن‌ها با آسیب‌های به‌دست آمده برای بارگذاری‌های متناسب اصلاح می‌کند. در واقع این روش سعی می‌کند مقدار آسیب برای بارگذاری‌های متناسب و نامتناسب برای یک عمر مشخص را باهم برابر کند. این امر توسط یک رابطه خطی به صورت زیر انجام می‌شود:

$$D_{NP}^{*} = (1 + \alpha_{dc} F) D_{NP} \qquad (1)$$

که در آن D_{NP}^{*} آسیب اصلاح شده بارگذاری نامتناسب، α_{dc} ضریب همبستگی آسیب، F ضریب نامتناسب بودن بارگذاری[5] و D_{NP} مقدار اولیه یا اصلاح نشده آسیب بارگذاری نامتناسب است.

برای به حساب آوردن تاثیرات مسیر بارگذاری ضریب‌های عدم تناسب مختلفی ارائه شده است. در این پژوهش از فاکتور ارائه شده توسط کانازاوا

[1] Non-proportionality factor

[2] Minimum circumscribed ellipse
[3] Non-proportionality sensitive materials
[4] Damage correlation modification
[5] Loading non-proportionality factor

استفاده شده است. برتری این فاکتور در این است که جنس ماده را هم با در نظر گرفتن ضریب پواسون در نظر گرفته است. این فاکتور به‌صورت زیر تعریف شده است:

$$F = \frac{\text{shear strain range at } 45° \text{ to maximum shear plane}}{\text{maximum shear strain range}} \quad (2)$$

برای بارگذاری‌های موج سینوسی این فاکتور به این صورت به‌دست می‌آید:

$$F^2 = \frac{\lambda^2 + (1+\nu)^2 - \sqrt{((1+\nu)^2 - \lambda^2)^2 + (2\lambda(1+\nu)\cos(\phi))^2}}{\lambda^2 + (1+\nu)^2 + \sqrt{((1+\nu)^2 - \lambda^2)^2 + (2\lambda(1+\nu)\cos(\phi))^2}} \quad (3)$$

ثابت همبستگی آسیب یک ثابت مربوط به جنس ماده و وابسته به مدل خستگی است. برای محاسبه این ثابت می‌توان از روش حداقل مربعات استفاده کرد. اما اولین قدم برای به‌دست آوردن ثابت همبستگی آسیب برازیدن تابعی[1] روی نقاط مربوط به بارگذاری متناسب در دیاگرام آسیب-عمر است. چون رابطه بین آسیب و عمر در رابطه کافین- منسون توانی است، ما هم یک تابع توانی به‌صورت زیر را برای رسم روی نمودار آسیب-عمر بارگذاری متناسب در نظر می‌گیریم:

$$D_p = aN^b \quad (4)$$

که در آن D_p آسیب بارگذاری متناسب، a و b هم ثوابت ماده هستند که با استفاده از نرم‌افزار محاسباتی مثل متلب[2] یا ماکروسافت اکسل[3] به‌دست می‌آید. برای به‌دست آوردن ثابت همبستگی آسیب از روش رگرسیون خطی (حداقل مربعات) استفاده می‌کنیم. روش حداقل مربعات (رگرسیون خطی) به صورت زیر قابل توضوح است.

فرض کنیم که تابعی خطی $ax_i + b$ برای عبور از بین نقاط مشخص $y_i (i = 0,1,2,\dots)$ در نظر گرفته شده است مقدار خطا برای هر نقطه برابر است با:

$$\text{error: } \sum |y_i - (ax_i + b)| \quad (5)$$

خطای حداقل مربعات به صورت زیر تعریف می شود:

$$\text{least square error: } \sum [y_i - (ax_i + b)]^2 \quad (6)$$

که در آن ثوابت a و b باید به گونه‌ای مشخص شوند که خطای فوق مینیمم شود [15].

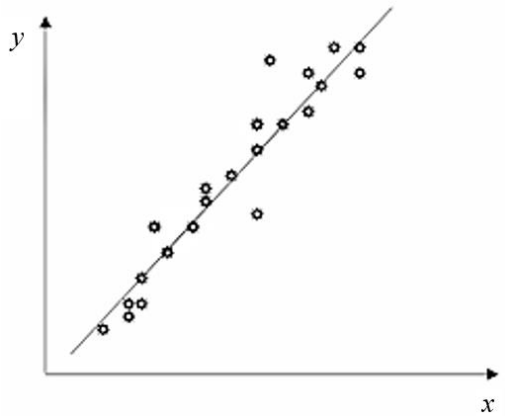

Fig. 1 Linear regression

شکل 1 رگرسیون خطی

[1] Curve fitting
[2] Matlab
[3] Microsoft excel

برای تعیین مقدار کمیت "همبستگی آسیب" باید آسیب خستگی در حالت نامتناسب یا ناهم‌فاز را به آسیب خستگی در حالت متناسب یا هم‌فاز مرتبط شود. برای این امر باید حالتی عکس حالت کلی روش رگرسیون خطی انجام شود. در واقع تابع برای ما مشخص است و می‌خواهیم مقادیری را به آن مرتبط و نزدیک کنیم. تابعی که برای ما مشخص است و مقادیر آن موجود است همان مقدار آسیب مربوط به بارگذاری متناسب به ازای عمرهای مختلف است که همان تابع توانی رابطه (4) است، و مقادیری که می‌خواهیم به این تابع مشخص مرتبط کنیم مقادیر آسیب‌های مربوط به بارگذاری نامتناسب است. به این ترتیب متغیرهای بالا به‌صورت زیر جای‌گذاری می‌شود:

$$y_i = D_P \quad (7)$$

$$(ax_i + b) = D_{NP}(1 + \alpha_{dc}F) \quad (8)$$

که در آن D_p آسیب مربوط به بارگذاری متناسب یا هم فاز، و D_{Np} آسیب مربوط به بارگذاری نامتناسب است. همان‌طور که اشاره شد، آسیب خستگیِ حالت متناسب را به‌صورت تابعی توانی از عمر خستگی در نظر گرفتیم:

$$D_P = aN_f{}^b \quad (9)$$

که ثوابت a و b با توجه به معیار مورد نظر و روش حداقل مربعات و به کمک نرم‌افزار محاسباتی به‌دست می‌آیند. برای محاسبه ثابت حساسیت به مسیر داریم:

$$\sum D_P - D_{NP}(1 + \alpha_{dc}F) = \text{error} \quad (10)$$

$$\text{least square error: } \sum [D_P - D_{NP}(1 + \alpha_{dc}F)]^2 \quad (11)$$

$$LS, e: \sum \left[D_P - D_{NP}(1 + \alpha_{dc}F)\right]^2 \quad (12)$$

برای حداقل کردن مقدار خطا از آن نسبت به α_{dc} مشتق گرفته و برابر صفر قرار می‌دهیم:

$$\frac{\partial\, LS,e}{\partial\, \alpha_{dc}} = 0$$
$$\sum D_{NP}(i) + \sum D_{NP}(i)\,\alpha_{dc}(i)F_i = \sum D_P(i)$$
$$\sum D_{NP}(i)\,\alpha_{dc}(i)F_i = \sum D_P(i) - \sum D_{NP}(i) \quad (13)$$

و درنهایت نتیجه می‌شود:

$$\alpha_{dc} = \frac{\sum D_P(i) - \sum D_{NP}(i)}{\sum D_{NP}(i)F_i} \quad (14)$$

ضریب همبستگی آسیب می‌تواند به صورت جداگانه برای هر بارگذاری از رابطه (14) محاسبه شده و یا برای بحرانی‌ترین بار که بارگذاری با 90°اختلاف فاز[4] است محاسبه شده و برای بقیه بارگذاری‌ها هم همان مقدار مورد استفاده قرارگیرد، در این مقاله ضریب همبستگی برای بارگذاری بحرانی محاسبه شده و برای سایر بارگذاری‌ها هم به‌کار رفته است.

ضریب همبستگی آسیب ممکن است مثبت یا منفی باشد. زمانی که یک مدل خستگی در یک عمر مشخص مقدار آسیبی که برای یک بارگذاری نامتناسب حدس میزند کمتر از مقداری باشد که برای بارگذاری متناسب حدس زده این ضریب مثبت بوده و زمانی که مقدار آسیب حدس زده شده برای بارگذاری نامتناسب بیشتر از بارگذاری متناسب باشد این ضریب منفی است. ضرایب همبستگی آسیب به‌دست آمده از رابطه (14) برای مواد مختلف و مدل‌های مورد بررسی در جدول 1 ارائه شده است.

[4] 90° out-of-phase

جدول 1 ضرایب آسیب همبسته

Table 1 Damage correlation coefficients

مدل خستگی ماده	فاطمی-سوشی	بیشینه کرنش برشی	SWT	بابایی-قاسمی
فولاد 1045	0.90	1.05	1.00	1.00
30CrNiMo8HH	0.52	1.29	1.16	1.62
TC4 تیتانیوم	0.38	0.53	0.72	0.72
AZ31B	-0.15	0.18	-.016	0.23
6061 آلومینیوم	0.32	0.45	0.79	0.64

2-2- پیش‌بینی عمر خستگی با استفاده از سخت شوندگی نامتناسب

برخی از مواد تحت بارگذاری نامتناسب یک سخت شوندگی تناوبی اضافی از خودشان نشان می‌دهند. این اثر می‌تواند با مقایسه منحنی تنش-کرنش سیکلی برای بارگذاری‌های متناسب و نامتناسب مشاهده شود. ضریب سخت شوندگی نامتناسب به صورت نسبت تنش معادل در بارگذاری با 90° اختلاف فاز به تنش معادل در بارگذاری متناسب در یک کرنش معادل مشخص تعریف می‌شود. این ثابت از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\alpha_{ah} = \frac{\bar{\sigma}_{OP}}{\bar{\sigma}_{IP}} - 1 \tag{15}$$

که در آن α_{ah} ضریب سخت شوندگی نامتناسب، $\bar{\sigma}_{OP}$ و $\bar{\sigma}_{IP}$ به ترتیب تنش معادل برای بارگذاری نامتناسب با 90° اختلاف فاز و تنش معادل برای بارگذاری متناسب است.

در اصلاحیه دوم هم از رابطه‌ای شبیه اصلاحیه اول استفاده می‌کنیم با این تفاوت که در آن ضریب همبستگی آسیب جای خود را به ضریب سخت شوندگی نامتناسب داده است. به صورت زیر:

$$D_{NP}^{*} = (1 + \alpha_{ah}F)D_{NP} \tag{16}$$

اما این اصلاحیه محدودیتی نسبت به اصلاحیه قبل دارد، این محدودیت توانایی برای استفاده از آن فقط برای موادی است که از خود سخت شوندگی نامتناسب نشان می‌دهند. در غیر این‌صورت، استفاده از این اصلاحیه ممکن نیست.

3- مدل‌های خستگی

3-1- مدل بیشینه کرنش برشی

در دهه 1950 کافین و منسون مستقل از یکدیگر یک رابطه توانی بین کرنش پلاستیک و عمر خستگی در رژیم کم چرخه را ارائه نمودند. این کشف مطابق با نیاز به توسعه ابزارهای طراحی سازه‌های جدید بود که استراتژی عمر نامحدود در طراحی آن‌ها قابل کاربرد نبود. پارامترهای کرنش-پایه اصولا با خستگی کم چرخه که در آن امکان بروز پلاستیسیته قابل توجه وجود دارد، هماهنگ می‌باشد.

تقریبا 10 سال بعد از ارائه روش کافین و مانسون، در جهت کوشش برای همبستگی و تطابق داده‌های آزمایش‌های خستگی چندمحوره، نسخه‌ای از معیار تسلیم استاتیکی کرنش-پایه ارائه گردید.

برای مدل کرنش برشی بیشینه رابطه عمر به صورت زیر است:

$$\frac{\Delta\gamma_{\mathrm{eq}}}{2} = \frac{\tau_f'}{G}(2N_f)^{b_s} + \gamma_f'(2N_f)^{c_s} \tag{17}$$

که در آن τ_f' ضریب مقاومت خستگی برشی، G مدول برشی، γ_f' ضریب شکل‌پذیری خستگی برشی و b_s، c_s به ترتیب نمای مقاومت خستگی برشی و نمای شکل‌پذیری خستگی برشی هستند.

روش‌های کرنش معادل، جوانه زنی و رشد ترک خستگی را روی صفحات خاص ثابت نسبت به قطعات آزمایش شده نشان نمی‌دهد. در عوض، کرنش معادل سنجه‌ای از کرنش متوسط در یک حجم کوچک ماده می‌باشد. تجربه نشان داده که در موارد زیادی نسبت مقاومت خستگی کشش-پیچش متفاوت است. روش کرنش معادل این تفاوت را نمی‌تواند نشان دهد. همچنین این مدل برای بارگذاری نامتناسب دقیق نمی‌باشند. با این وجود، برای بعضی بارگذاری‌ها و مواد خاص ممکن است مدل کرنش-پایه موفقیت‌آمیز باشد.

3-2- مدل صفحه بحرانی اسمیت، واتسون و تاپر (SWT)

روش‌های صفحه بحرانی براساس مشاهدات تجربی جوانه زنی و رشد ترک‌ها در طی بارگذاری استنتاج شده‌اند. در اثر شرایطی مثل ماده، حالت تنش، محیط و دامنه کرنش، عمر خستگی تحت سیطره و تسلط رشد ترک در صفحه برشی یا صفحه کششی می‌باشد. مدل صفحه بحرانی شامل پارامترهای غالب حاکم بر هر نوع رشد ترک می‌باشد. خاطر نشان می‌سازد، مدل‌های موفق بایستی قادر باشند هم عمر خستگی و هم صفحه واماندگی غالب را پیش‌بینی کنند. به علت وجود مودهای واماندگی متفاوت (برشی حاکم یا کششی حاکم)، نباید انتظار داشت که یک مدل آسیب با نتایج تجربی برای همه مواد و همه رژیم‌های عمر مطابقت داشته باشد.

پارامتر SWT را می‌توان در تحلیل هر دو نوع بارگذاری متناسب و نامتناسب قطعاتی که ماده آن‌ها اصولا تحت ترک خوردن کششی مود I وامانده می‌شوند به‌کار برد. در بارگذاری چند محوره پارامتر SWT براساس بازه کرنش اصلی و تنش بیشینه روی صفحه بازه کرنش اصلی است. رابطه آسیب عمر مدل SWT به صورت زیر می‌باشد [16]:

$$\sigma_{n,\max}\frac{\Delta\varepsilon_1}{2} = \frac{{\sigma_f'}^2}{E}(2N_f)^{2b} + \sigma_f'\varepsilon_f'(2N_f)^{b+c} \tag{18}$$

جمله $\sigma_{n,\max}$ در این مدل، آن را برای توضیح تنش متوسط در بارگذاری چند محوره و اثرات سخت شوندگی ناشی از بارگذاری نامتناسب مناسب می‌سازد.

3-3- مدل صفحه بحرانی فاطمی-سوشی

مدل فاطمی سوشی [17] براساس روش بران و میلر [18] می‌باشد با این تفاوت که به جای کرنش عمودی از تنش عمودی استفاده شده است.

در طی بارگذاری برشی، سطح ترک‌های نامنظم تشکیل شده موجب نیروی اصطکاکی می‌گردد که این نیرو تنش‌های نوک ترک را کاهش می‌دهد، در نتیجه رشد ترک کند و عمر خستگی افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، تنش و کرنش‌های عمودی سطوح ترک را از هم جدا می‌کند و نیروی اصطکاک را کاهش می‌دهد.

مدل فاطمی- سوشی را می‌توان به عنوان کرنش برشی سیکلی اصلاح شده توسط تنش عمودی دانست. این مدل‌ها اثرات بسته شدن ترک[1] را در محاسبه پارامتر آسیب ملحوظ میدارند.

$$\frac{\Delta\gamma_{\max}}{2}\left(1 + \frac{k\sigma_{n,\max}}{\sigma_y}\right) = \frac{\tau_f'}{G}(2N_f)^{b_s} + \gamma_f'(2N_f)^{c_s} \tag{19}$$

این مدل نه تنها تفاوت بین بارگذاری کششی و پیچشی را توضیح می‌دهد بلکه می‌تواند اثرات تنش متوسط و سخت‌شوندگی نامتناسب را نیز توضیح دهد. مدل‌های صفحه بحرانی که فقط شامل عباراتی از کرنش می‌باشند نمی‌توانند اثر تنش متوسط یا کرنش سختی وابسته به مسیر بارگذاری را لحاظ کنند.

3-4- مدل انرژی مجازی کل (بابایی-قاسمی)

[1] Crack closure

بابایی و قاسمی [19]، مدل جدیدی براساس انرژی مجازی کرنشی (VSE) به‌عنوان پارامتر آسیب ارائه داده‌اند. یک پارامتر VSE مثل ΔW_T به‌صورت حاصل ضرب $\Delta\sigma_T$ و $\Delta\varepsilon_T$ به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Delta W_T = \Delta\sigma_T \,.\, \Delta\varepsilon_T \tag{20}$$

که در آن $\boldsymbol{\sigma_T}$ و $\boldsymbol{\varepsilon_T}$ به ترتیب تنش کل و کرنش کل می باشند که به صورت زیر تعریف می شوند:

$$\sigma_T = \sqrt{{\sigma_1}^2 + {\sigma_2}^2 + {\sigma_3}^2} \tag{21}$$

$$\varepsilon_T = \sqrt{{\varepsilon_1}^2 + {\varepsilon_2}^2 + {\varepsilon_3}^2} \tag{22}$$

که در آن $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ تنش‌های اصلی و $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ کرنش‌های اصلی هستند. از آن‌جایی که σ_T، ε_T و W_T پارامترهایی هستند که همیشه بزرگتر از صفر هستند بنابراین دامنه تغییرات این متغیرها برابر است با ماکزیمم مقدار آن‌ها در طول یک سیکل و رابطه (20) به صورت زیر می‌شود:

$$\Delta W_T = W_{T_{\max}} = \sigma_{T_{\max}} \cdot \varepsilon_{T_{\max}} \tag{23}$$

و درنهایت رابطه پیشنهادی برای محاسبه عمر هم همان رابطه استاندارد باسکوئین-کافین-منسون است که به‌صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\Delta W_T = \frac{{\sigma_f'}^2}{E}(2N_f)^{2b} + \sigma_f'\varepsilon_f'(2N_f)^{b+c} \tag{24}$$

مدل ارائه شده بیشتر برای موادی مناسب است که بیشتر در مد I دچار شکست می‌شوند. در این مد ترک‌ها در صفحات برشی جوانه می‌زنند، اما عمر خستگی با رشد این ترک‌ها در صفحه‌ی عمود بر صفحه بیشینه تنش اصلی و بیشینه کرنش اصلی کنترل می‌شود.

4- اعمال روش و صحت‌سنجی نتایج

برای صحت‌سنجی و مشخص شدن دقت مدل ارائه شده و همچنین اصلاحیه‌ها، اطلاعات آزمایشگاهی از طیف مختلفی از مواد از جمله فولاد 1045 [20]، فولاد 30CrNiMo8HH [21]، تیتانیوم TC4 [22]، آلیاژ منیزم AZ31B اکستروژن شده [24,23] و آلیاژ الومینیوم 6061 [13] مورد بررسی قرار گرفتند. مسیرهای بارگذاری برای فولاد 30CrNiMo8HH، تیتانیوم TC4 و آلیاژ منیزم AZ31B شامل بارگذاری محوری، پیچشی، بارگذاری متناسب، بارگذاری با °45 اختلاف فاز و بارگذاری با °90 اختلاف فاز می‌شوند. مسیرهای بارگذاری در "شکل 2" نمایش داده‌اند. مسیرهای بارگذاری برای فولاد 1045 شامل همه مسیرهای ذکر شده بجز بارگذاری با °45 اختلاف فاز می‌شود. ترکیب خصوصیات خستگی همه مواد در جدول 2 آمده است.

همه آزمایشات موجود به وسیله دستگاه سرو هیدرولیک[1] محوری-پیچشی و تحت بارگذاری کاملا معکوس شونده با شکل موج سینوسی و تحت شرایط کرنش-کنترل شده انجام شده‌اند.

قدر مطلق خطای پیش‌بینی عمر با استفاده از رابطه زیر به‌دست آمده است:

$$E = 100 \times \left| 1 - \log\frac{N_{\text{predicted}}}{N_{\text{experimental}}} \right| \tag{25}$$

و میانگین خطا

$$\bar{E} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} E_i \tag{26}$$

برای مقایسه و صحت‌سنجی بهتر اصلاحیه‌ها و توانایی به‌کاربردنشان برای مدل‌های مختلف، برنامه‌های متلب مربوط به مدل‌های مورد بررسی نوشته شد و هر دو اصلاحیه برای آن‌ها به‌کار گرفته شد.

[1] Servo hydraulic

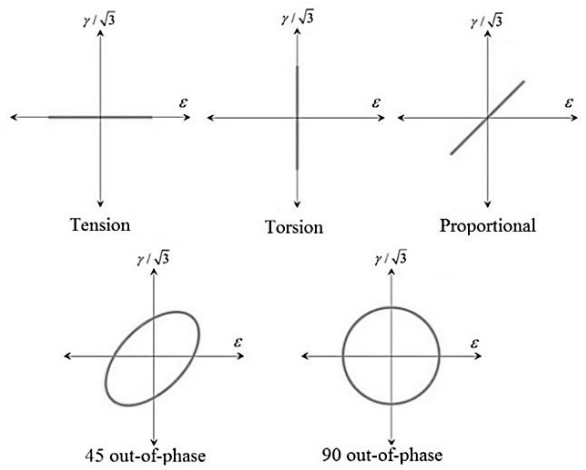

Fig. 2 Loading Paths

شکل 2 مسیر های بارگذاری

4-1- صحت‌سنجی برای فولاد 1045

برای فولاد 1045 تست‌های خستگی روی نمونه‌های استوانه‌ای شکل با قطر 5.63 میلی‌متر و ضخامت جداره 1 میلی‌متر و دهانه به طول 33 میلی‌متر انجام شده است و واماندگی خستگی معادل کاهش بار به میزان 10٪ در نظر گرفته شده است [16].

برای هر مدل خستگی در بارگذاری نامتناسب سه عمر مختلف شامل عمر پیش‌بینی شده به‌وسیله مدل خستگی بدون هیچ اصلاحیه ای، عمر به‌دست آمده توسط مدل با اصلاحیه همبستگی آسیب و عمر به‌دست آمده توسط مدل و اعمال اصلاحیه سخت شوندگی نامتناسب به‌دست آمده است. مقایسه بین عمر پیش‌بینی شده توسط مدل‌ها و اصلاحیه‌ها و مشاهدات آزمایشگاهی در "شکل 3" نمایش داده شده است.

مقدار میانگین خطا از رابطه (26) به‌دست آمده و در جدول 3 نمایش داده شده است. در "شکل 3" و جدول 3، mdf1 اشاره به روش همبستگی آسیب و mdf2 اشاره به روش با سخت شوندگی نامتناسب دارد.

همان‌طور که در "شکل 3" نمایش داده شده است. عمر پیش‌بینی شده توسط مدل ارائه شده برای همه بارگذاری‌ها به غیر از بارگذاری با °90 اختلاف فاز قابل اطمینان بوده و داخل خط پهنای باند 2[2] قرار می‌گیرد. با افزایش اختلاف فاز و عدم تناسب مقدار خطا برای تمامی مدل‌ها افزایش می‌یابد. هر دو اصلاحیه میزان خطا را کاهش می‌دهند. اما اختلاف بین نقاط مربوط به بارگذاری نامتناسب و متناسب در دیاگرام آسیب-عمر بیشتر از مقداریست که با ضریب سخت شوندگی نامتناسب جبران شود و اصلاحیه همبستگی آسیب به‌صورت موثرتری خطا را کاهش می‌دهد. بعد از اعمال اصلاحیه همبستگی آسیب، دقیق‌ترین مدل مدلی است که بارگذاری متناسب را دقیق‌تر حدس زده باشد، که برای فولاد 1045 مدل بیشینه کرنش برشی به‌دست می‌آید.

4-2- صحت‌سنجی برای 30CrNiMo8HH

نمونه‌های استوانه‌ای تو پر باقطر 2.12 میلی‌متر و طول دهانه‌ی 2.10 میلی‌متر برای تست محوری و استوانه‌های تو خالی با قطر خارجی 3.12 میلی‌متر و قطر داخلی 23.8 و طول دهانه 18 میلی‌متر برای تست‌های پیچشی و چند محوره مورد استفاده قرار گرفت واماندگی خستگی به عنوان 20٪ کاهش بارگذاری درنظر گرفته شده است [17].

[2] 2X bandwidth

جدول 2 خواص مکانیکی و ضرایب خستگی مواد

Table 2 Materials fatigue properties and coefficients [17-22]

مواد	σ_y (MPa)	E (GPa)	σ'_f (MPa)	ε'_f	b	c	G (GPa)	τ'_f (MPa)	γ'_f	b_s	c_s
فولاد1045	250	205	948	0.26	-0.09	-0.44	82.8	505	0.41	-0.10	-0.44
30CrNiMo8HH	895.3	195.4	951	1.064	-0.041	-0.733	71.6	608	0.277	-0.057	-0.470
تیتانیومTC4	942.5	108.4	1116.9	0.579	-0.049	-0.679	43.2	716.9	2.44	-0.06	-0.8
AZ31B	244	43.72	723.5	0.252	-0.159	-0.718	15.54	142.82	0.131	-0.11	-0.427
آلومینیوم6061	276	68.9	565	0.376	-0.097	-0.703	28	326	0.651	-0.097	-0.703

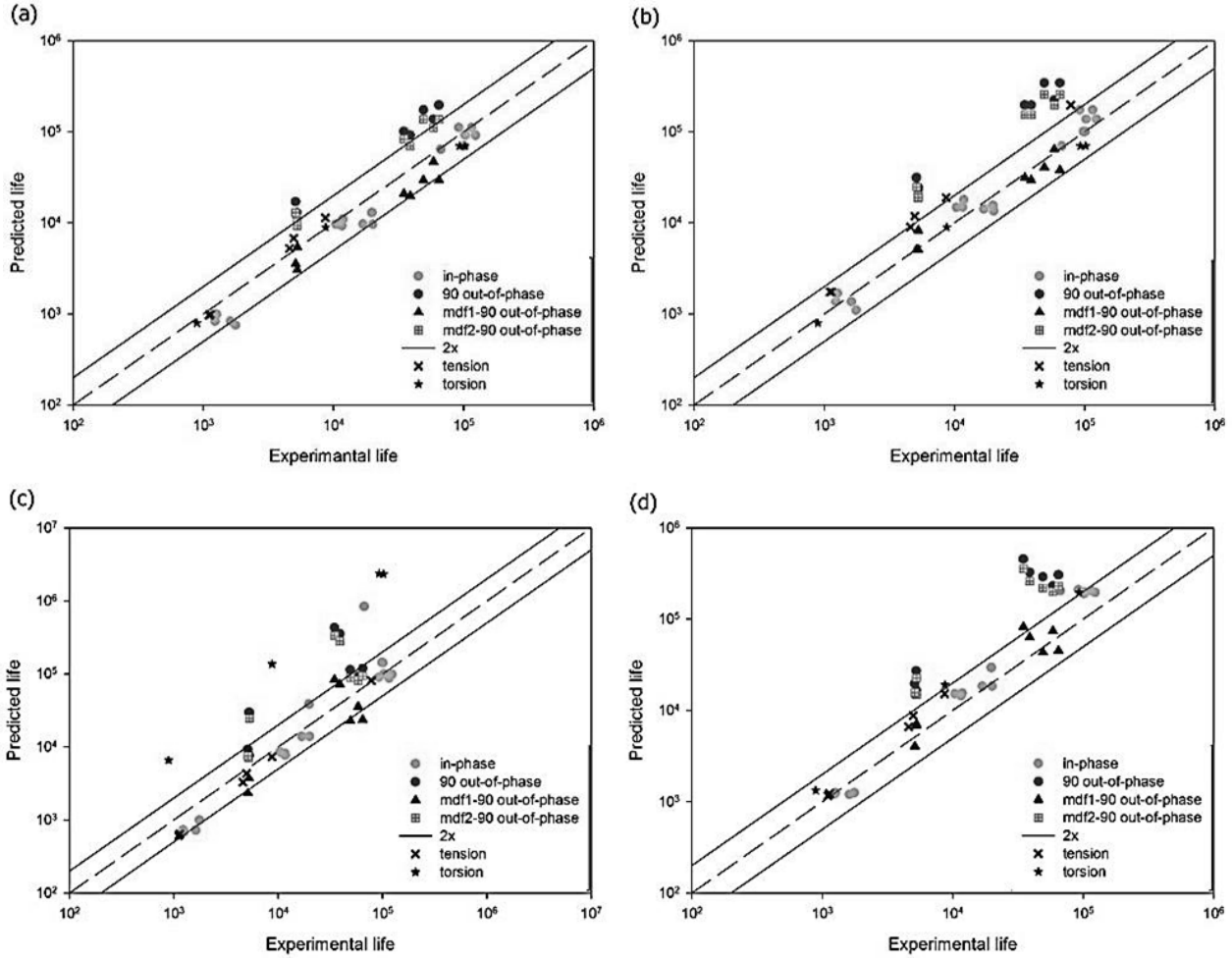

Fig. 3 Predicted and modified life vs. experimental life for 1045 steel, Fatemi-Socie (a), maximum shear strain (b), SWT (c), Babaei-Ghasemi (d)

شکل 3 مقایسه عمر پیش‌بینی شده و اصلاح شده با عمر آزمایشگاهی برای فولاد 1045، (a) فاطمی سوشی، (b) بیشینه کرنش برشی، SWT(c) ، (d) مدل پیشنهادی بابایی-قاسمی

جدول 3 مقدار خطای میانگین برای پیش‌بینی عمر خستگی فولاد 1045

Table 3 The average absolute errors in fatigue life prediction for 1045 steel

مسیر بارگذاری / مدل خستگی	کشش	برش	هم‌فاز	90°ناهم‌فاز	Mdf1 90° ناهم‌فاز	Mdf2 90° ناهم-فاز
فاطمی - سوشی	2.3970	1.8744	3.6882	10.1634	4.5015	7.8240
بیشینه کرنش برشی	7.9237	1.8744	2.7274	16.7140	2.1077	14.3462
SWT	4.0541	28.9347	5.3526	11.7749	6.6678	9.7870
بابایی- قاسمی	3.8223	6.7947	3.9491	16.9794	3.5872	14.8925

از آن‌جایی که فولاد 30CrNiMo8HH تحت بارگذاری‌های نامتناسب هیچ سخت‌شوندگی ار خود نشان نمی‌دهد تنها اصلاحیه که می‌توان برای آن به‌کار برد اصلاحیه همبستگی آسیب است. مقایسه بین عمر پیش‌بینی شده و نتایج آزمایشگاهی (شکل 4) نشان می‌دهد که مدل ارائه شده برای بارگذاری محوری از سایر مدل‌ها دقیق‌تر است، و به جز در بارگذاری با °90 اختلاف فاز برای بقیه بارگذاری‌ها نتایج در خط پهنای باند 2 قرار گرفته‌اند. اصلاحیه همبستگی آسیب برای همه مدل‌ها به‌صورت تاثیرگذاری مقدار خطا را کاهش داده است و تا مرز 98٪ برای مدل SWT (جدول 4). در "شکل 4" و جدول 4،

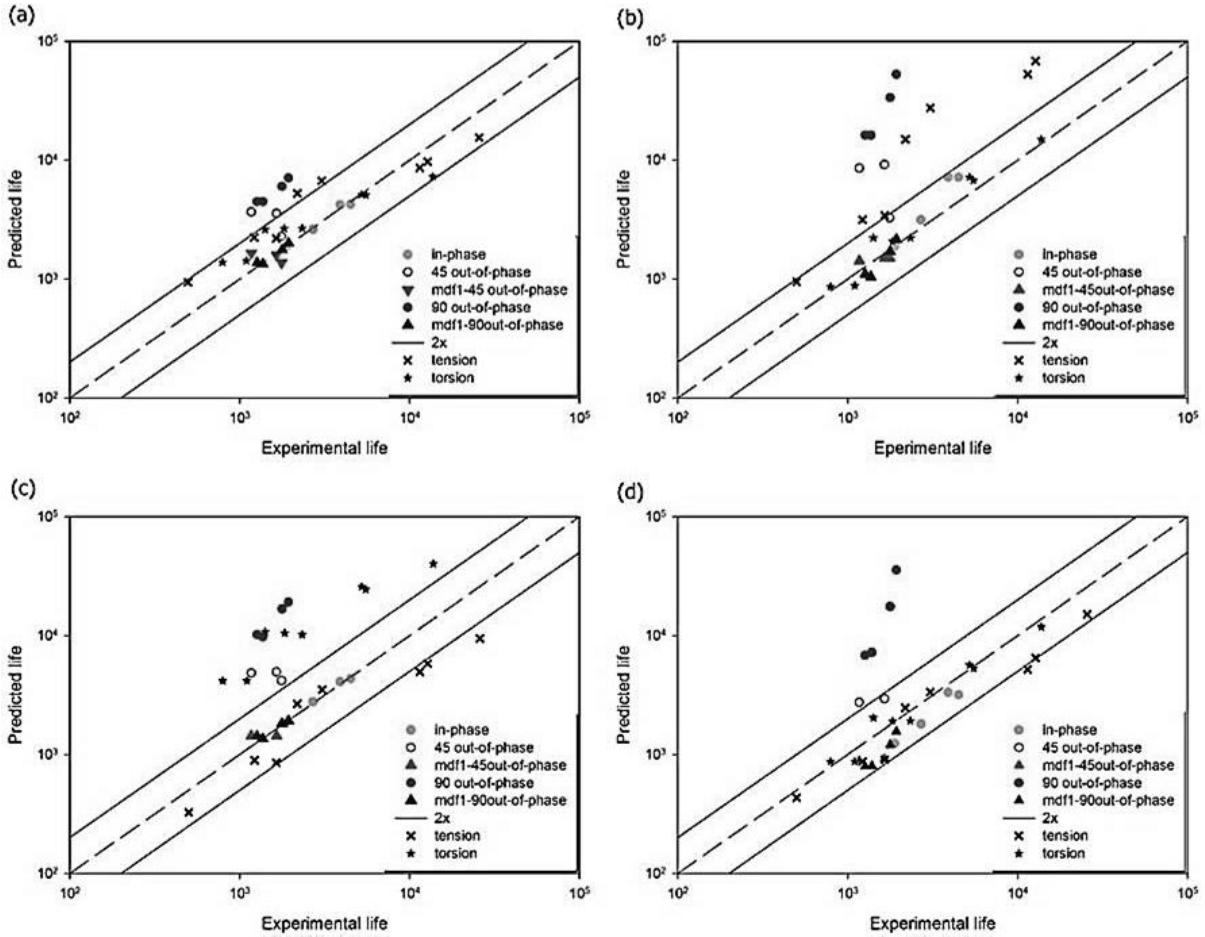

Fig.4 Predicted and modified life vs. experimental life for 30CrNiMo8HH, Fatemi-Socie (a), maximum shear strain (b), SWT (c), Babaei-Ghasemi (d)

شکل 4 مقایسه عمر پیش‌بینی شده و اصلاح شده با عمر آزمایشگاهی برای فولاد 30CrNiMo8HH ، (a) فاطمی سوشی، (b) بیشینه کرنش برشی، (c)SWT ، (d) مدل بابایی - قاسمی

جدول 4 مقدار خطای میانگین برای پیش بینی عمر خستگی فولاد 30CrNiMo8HH

Table 4 The average absolute errors in fatigue life prediction for 30CrNiMo8HH

مسیر بارگذاری / مدل خستگی	کشش	برش	هم‌فاز	45°ناهم‌فاز	Mdf1 45° ناهم‌فاز	90°ناهم‌فاز	Mdf1 90° ناهم‌فاز
فاطمی - سوشی	6.8740	4.4231	0.4921	10.0141	2.8434	16.9048	0.5279
یشینه کرنش برشی	18.0149	2.5069	3.7357	19.8956	2.0086	38.2237	1.8805
SWT	6.4784	20.1627	0.3985	15.4982	1.6743	29.1656	0.5522
بابایی- قاسمی	4.8208	1.9720	4.1784	9.9702	5.8018	28.9341	5.4168

mdf1 اشاره به اصلاحیه همبستگی آسیب دارد.

4-3- صحت‌سنجی برای تیتانیوم TC4

دو مدل نمونه برای تست‌های خستگی تیتانیوم TC4 مورد استفاده قرار گرفته است. استوانه توپر به قطر 6 میلی‌متر و طول دهانه 15 میلی‌متر برای تست محوری و استوانه توخالی با قطر خارجی 17 و قطر داخلی 14 و طول دهانه 32 میلی‌متر برای تست‌های پیچش خالص و بارهای چند محوره مورد استفاده قرار گرفته است. تسلیم خستگی به عنوان افت 10 تا 15 درصدی بارگذاری محوری یا ممان پیچشی درنظر گرفته شده است [18].

تیتانیوم TC4 بر اثر بارگذاری نامتناسب سخت‌شوندگی اضافی از خود نشان می‌دهد و هر دو اصلاحیه را می‌توان برای آن به‌کار برد. مقایسه بین عمرهای پیش‌بینی شده و نتایج آزمایشگاهی (شکل 5) نشان می‌دهد، مدل پیشنهادی برای همه بارگذاری‌ها از مدل SWT دقیق‌تر است، اما به نظر می‌رسد مدل‌های برش-پایه برای این ماده از دقت بیشتری برخوردارند (جدول5)، و مدل فاطمی سوشی از سایر مدل‌ها دقیق‌تر است. در "شکل 5" و جدول 5، mdf1 اشاره به اصلاحیه همبستگی آسیب و mdf2 اشاره به اصلاحیه با سخت شوندگی نامتناسب دارد.

هر دو اصلاحیه میزان خطا در پیش‌بینی عمر خستگی را کاهش می‌دهند. برای مدل فاطمی سوشی اصلاحیه با سخت شوندگی نامتناسب موثرتر ولی برای سایر مدل‌ها اصلاحیه همبستگی آسیب ترجیح داده می‌شود.

4-4- صحت‌سنجی برای آلیاژ منیزیم AZ31B

نمونه های استوانه ای به ابعاد قطر خارجی 3.12، قطر داخلی 8 و طول دهانه 25 میلی‌متر برای تست‌های خستگی تک و چند محوره مورد استفاده قرار

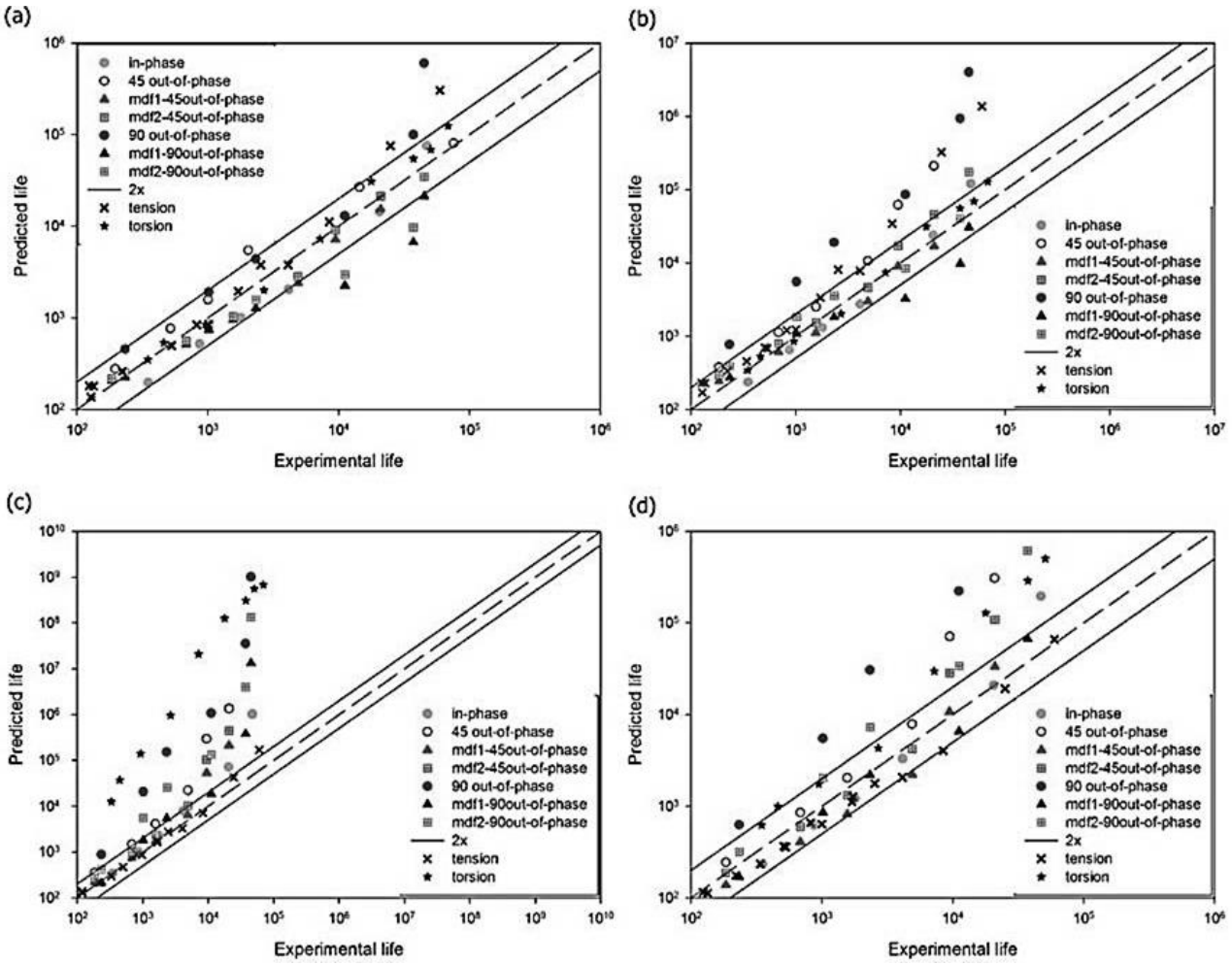

Fig. 5 Predicted and modified life vs. experimental life for TC4, Fatemi-Socie (a), maximum shear strain (b), SWT (c), Babaei-Ghasemi (d)

شکل 5 مقایسه عمر پیش‌بینی شده و اصلاح شده با عمر آزمایشگاهی برای تیتانیوم TC4، (a) فاطمی سوشی، (b) بیشینه کرنش برشی، SWT(c) ، (d) مدل بابایی - قاسمی

جدول 5 مقدار خطای میانگین برای پیش بینی عمر خستگی تیتانیوم TC4

Table 5 The average absolute errors in fatigue life prediction for Titanium TC4

مسیر بارگذاری / مدل خستگی	کشش	برش	هم‌فاز	45°ناهم‌فاز	Mdf1 45° ناهم‌فاز	Mdf2 45° ناهم‌فاز	90°ناهم‌فاز	Mdf1 90° ناهم‌فاز	Mdf2 90° ناهم‌فاز
فاطمی-سوشی	4.5016	2.8245	6.9488	5.9471	4.6122	3.1922	10.7828	8.9022	6.3775
بیشینه کرنش برشی	10.5817	2.9257	5.0760	13.4409	3.3373	4.3659	27.9462	6.0900	6.6269
SWT	2.4259	70.8462	9.1433	22.3876	8.6144	14.0222	54.8887	16.8824	35.2598
بابایی-قاسمی	4.729	14.2768	5.5642	11.1331	6.2891	5.8121	37.6133	8.5753	20.1250

گرفت و تسلیم خستگی معادل کاهش بار محوری یا ممان پیچشی به میزان 50٪ در نظر گرفته شده است. در رفتار ماده سخت‌شوندگی اضافی ناشی از بارگذاری نامتناسب مشاهده شده است، اما تغییر زاویه فاز (اختلاف فاز بین مولفه های بارگذاری) و نامتناسب بودن تاثیر چشم گیری در عمر خستگی نداشته است [19].

مقایسه بین عمر پیش‌بینی شده توسط هر چهار مدل خستگی و با اعمال هر دو اصلاحیه و مشاهدات آزمایشگاهی در "شکل 6" ارائه شده است. مقدار میانگین خطا در پیش‌بینی عمر خستگی برای همه بارگذاری‌ها در جدول 6 آمده است. همان‌طور که در جدول 7 مشاهده می‌شود مدل بابایی- قاسمی برای همه بارگذاری‌ها از مدل SWT دقیق‌تر است. در "شکل 7" و جدول 6، mdf1 اشاره به اصلاحیه همبستگی آسیب و mdf2 اشاره به اصلاحیه با سخت شوندگی نامتناسب دارد.

از آن‌جایی که زاویه فاز تاثیر بسزایی در عمر خستگی AZ31B ندارد، این ماده یک مورد خاص برای اعمال اصلاحیه‌ها می‌باشد. مدل فاطمی-سوشی و مدل SWT برای همه بارگذاری‌های نامتناسب و مدل پیشنهادی برای بارگذاری 45° اختلاف فاز عمر خستگی را کمتر از مقدار واقعی حدس زده‌اند (مقدار آسیب را بیشتر از مقدار واقعی حدس زده‌اند) بنابراین ضریب همبستگی آسیب در این موارد منفی است ($\alpha_{dc} < 0$)، و برای بهبود دقت عمر پیش‌بینی شده مقدار آسیب محاسبه شده باید کاهش پیدا کند. این در حالی است که ضریب سخت شوندگی نامتناسب همیشه مثبت است، بنابراین استفاده از اصلاحیه سخت‌شوندگی نامتناسب به جای کاهش خطا، میزان خطا را افزایش می‌دهد. اصلاحیه با سخت شوندگی نامتناسب برای مدل

بیشینه کرنش برشی خطا را کاهش می‌دهد. اصلاحیه همبستگی آسیب برای تمام مدل ها خطا را کاهش می‌دهد و ارجح است.

4-5- صحت‌سنجی برای آلومینیوم 6061

برای آلومینیوم نمونه‌های استوانه‌ای تو خالی با ابعاد، قطر خارجی 12، قطر داخلی 9 و فاصله دهانه 4.6 میلی‌متر استفاده شده است. آلومینیوم مورد استفاده تحت عملیات حرارتی T6 قرار گرفته و سپس تست‌های خستگی بر آن صورت گرفته است. نمونه‌ها تحت 14 مسیر بارگذاری مختلف مطابق "شکل 6" قرار گرفته‌اند [21]. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که بارگذاری‌های نامتناسب باعث کاهش عمر خستگی نمونه‌ها شده و همچنین ماده تحت این بارگذاری‌ها سخت شوندگی نا متناسب از خود نشان می‌دهد. میزان کاهش عمرِ ناشی از بارگذاری‌های نامتناسب مانند آلیاژهای فولادی شدید نیست.

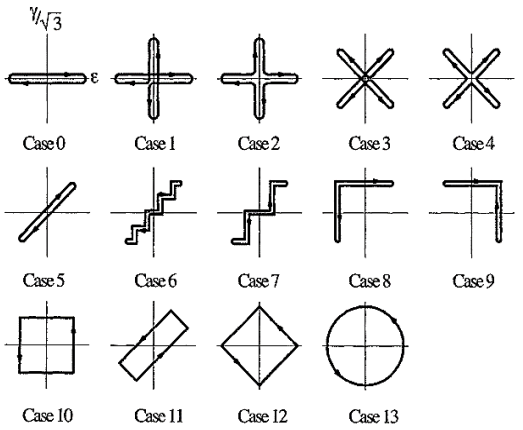

Fig. 6 Loading paths for aluminum

شکل 6 مسیرهای بارگذاری برای آلومینیوم

جدول 6 مقدار خطای میانگین برای پیش‌بینی عمر خستگی AZ31B

Table 6 The average absolute errors in fatigue life prediction for AZ31B

مسیر بارگذاری / مدل خستگی	کشش	برش	هم‌فاز	45° ناهم‌فاز	Mdf1 45° ناهم-فاز	Mdf2 45° ناهم-فاز	90° ناهم‌فاز	Mdf1 90° ناهم‌فاز	Mdf2 90° ناهم‌فاز
فاطمی-سوشی	4.1660	4.1967	4.2929	5.7107	4.8085	10.1289	9.2643	5.1573	16.2390
بیشینه کرنش برشی	4.3840	3.4286	3.0547	2.6528	2.6378	3.1759	8.3809	5.2113	4.7975
SWT	7.5875	74.9365	5.7496	8.5676	6.8141	8.7835	6.8888	5.2847	8.7505
بابایی-قاسمی	2.8694	28.8664	3.6769	6.1432	6.1018	7.0579	6.0454	4.9780	4.9379

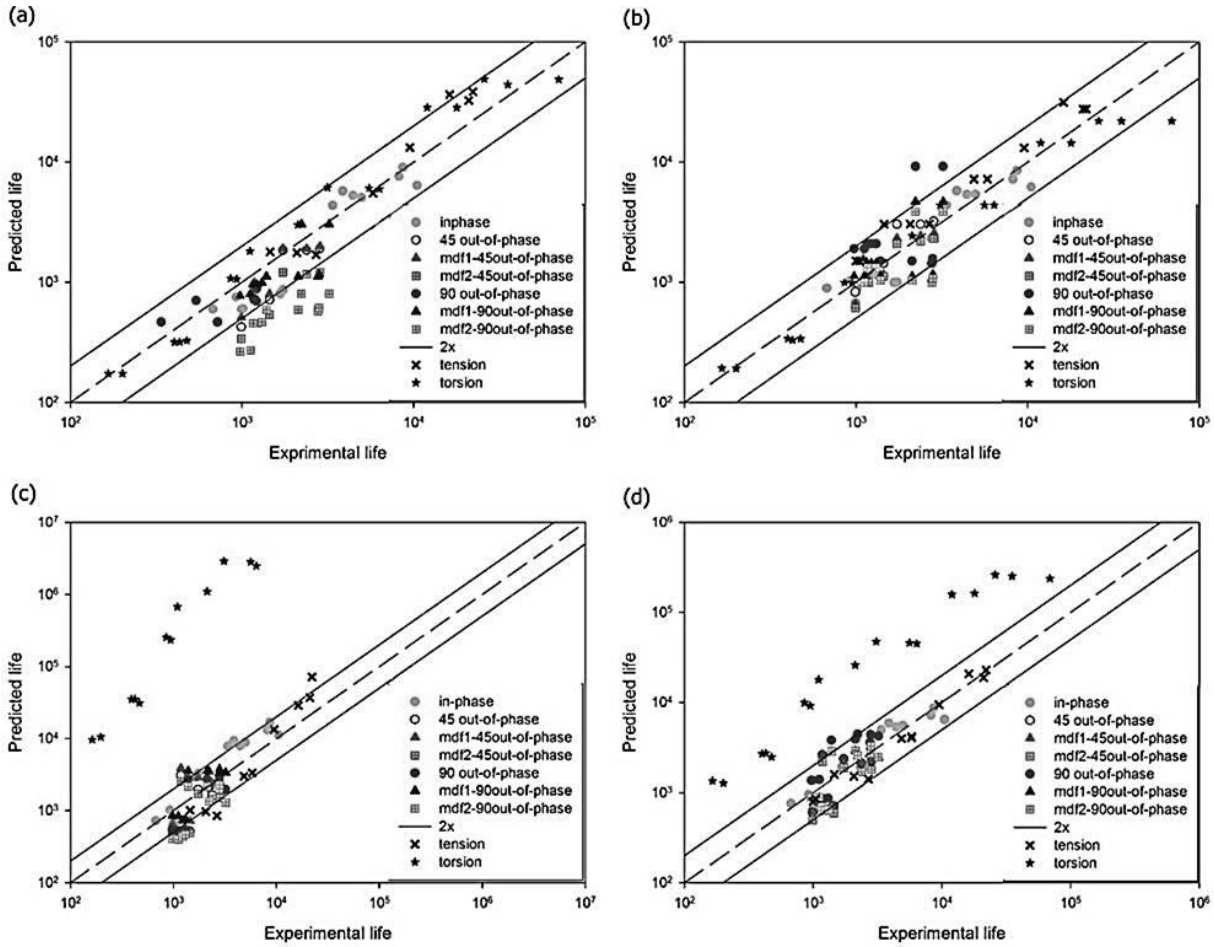

Fig.7 Predicted and modified life vs. experimental life for AZ31B, Fatemi-Socie (a), maximum shear strain (b), SWT (c), Babaei-Ghasemi (d)

شکل 7 مقایسه عمر پیش‌بینی شده و اصلاح شده با عمر آزمایشگاهی برای AZ31B، (a) فاطمی سوشی، (b) بیشینه کرنش برشی، SWT(c) ، (d) مدل بابایی - قاسمی

جدول 7 مقدار خطای میانگین برای پیش بینی عمر خستگی آلومینیوم 6061

Table 7 The average absolute errors in fatigue life prediction for Aluminum 6061

مسیر بارگذاری / مدل خستگی	هم‌فاز	ناهم‌فاز	Mdf1 ناهم‌فاز	Mdf2 ناهم‌فاز
فاطمی-سوشی	1.73118	4.815642	3.266946	4.102052
بیشینه کرنش برشی	0.96078	5.267295	3.932517	4.815642
SWT	2.698605	8.263047	4.680198	5.267295
بابایی-قاسمی	1.21892	6.975646	4.235667	5.002606

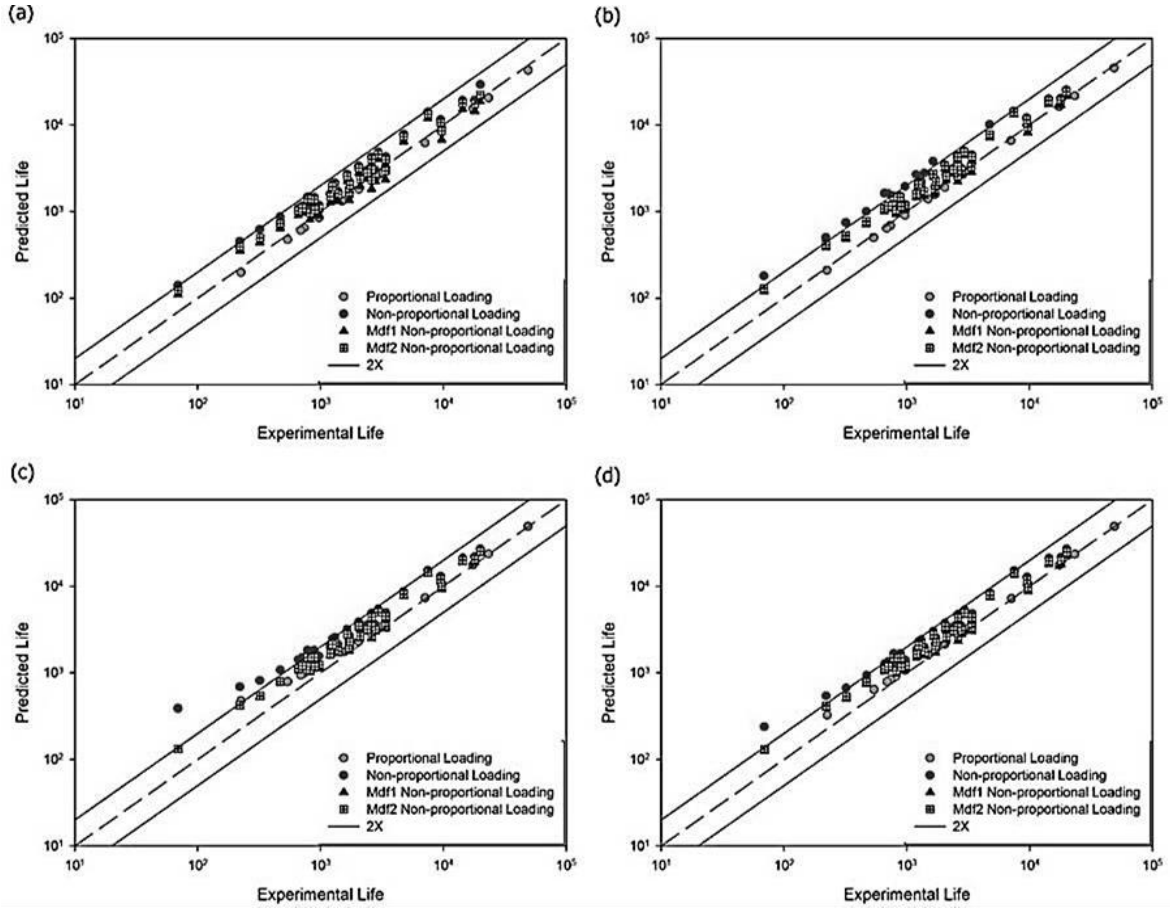

Fig.8 Predicted and modified life vs. experimental life for Al 6061, Fatemi-Socie (a), maximum shear strain (b), SWT (c), Babaei-Ghasemi (d)

شکل 8 مقایسه عمر پیش‌بینی شده و اصلاح شده با عمر آزمایشگاهی برای آلومینیوم 6061، (a) فاطمی سوشی، (b) بیشینه کرنش برشی، (c)SWT ، (d) بابایی - قاسمی

خطای پیش‌بینی عمر خستگی را کاهش داده‌اند، هرچند اصلاحیه همبستگی آسیب موثرتر به نظر می‌رسد (جدول8).

5- جمع‌بندی

نتایج به‌دست آمده از این پژوهش را به‌صورت خلاصه به‌صورت زیر می‌توان بیان کرد.

1- مد شکست در نظر گرفته شده در مدل بابایی-قاسمی و مدل SWT یکسان است و در کل مدل ارائه شده برای همه مواد بررسی شده از مدل SWT دقیق‌تر است، پس از مدل ارائه شده می‌توان به عنوان یک جایگزین مطمئن برای مواردی که مدل SWT مورد استفاده قرار میگرفته بهره برد. برای همه مواد بررسی شده روش همبستگی آسیب میزان خطا را کاهش داد و استفاده از آن برای پیش‌بینی عمر خستگی تحت بارگذاری‌های نامتناسب توصیه می‌شود.

2- با توجه به میزان دقت روش‌های ارائه شده روش آسیب همبسته نسبت به اصلاحیه با ضریب سخت‌شوندگی ارجحیت دارد.

3- برای موادی مانند AZ31B که نامتناسب بودن بارگذاری تاثیر خاصی روی عمر آن‌ها ندارد، توصیه می‌شود در درجه اول یک مدل خستگی مناسب برای پیش‌بینی عمر خستگی آن‌ها یافت و در صورت استفاده از اصلاحیه از اصلاحیه همبستگی آسیب استفاده شود و اصلاحیه با کمک ضریب سخت شوندگی توصیه نمی‌شود.

4- برای تیتانیوم TC4 و فولاد 1045 مدل‌های خستگی که براساس برش باشند دقیق‌تر هستند.

6- مراجع

[1] N. Shamsaei, Multiaxial Fatigue and Deformation Including Non-proportional Hardening and Variable Amplitude Loading Effects, PhD Thesis, The University of Toledo; 2010.

[2] H. Zenner, Multiaxial fatigue methods, hypotheses and applications an overview, 7th. International Conference on Biaxial/Multiaxial Fatigue and Fracture, Berlin, Germany, pp. 3-16, 2004.
[3] D. F Socie, G. B Marquis, Multiaxial Fatigue. Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA 2000.
[4] X, Chen, Q, Gao. Sun, Low-cycle fatigue under non-proportional loading, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol. 19, pp. 19–54, 1996.
[5] B.R, You, S.B, Lee, A critical review on multiaxial fatigue assessments of metals. International Journal of Fatigue, Vol. 18, pp. 235-244 1996.
[6] R. Ghajar, Mechanical structures under multiaxial loading, Khaje Nasir University, 2010 (in Persian فارسی).
[7] K. Kanazawa, K.J. Miller, MW. Brown, Cyclic deformation of 1%Cr–Mo–V steel under out-of phase loads, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, pp. 217–228, 1979.
[8] Md Freitas, B Li, JL Santos, A numerical approach for high-cycle fatigue life prediction with multiaxial loading. In: Kalluri S, Bonacuse P, editors. Multiaxial fatigue and deformation: testing and prediction, ASTM; pp. 139-156, 2000.
[9] X. Chen, J. Song, K.S, Kim. Low cycle fatigue life prediction of 63Sn–37Pb solder under proportional and non-proportional loading. International Journal of Fatigue, pp. 757-766, 2006.
[10] J. Albinmousa, H. Jahed. Multiaxial effects on LCF behaviour and fatigue failure of AZ31B magnesium extrusion, International Journal of Fatigue, Vol. 67 pp. 103-116, 2014.
[11] M. Noban, H. Jahed, S. Winkler, A. Ince. Fatigue characterization and modeling of 30CrNiMo8HH under multiaxial loading. Materials Science and Engineering: A, Vol. 529 pp. 2484-2494, 2011.
[12] A. Fatemi, Fatigue and deformation under proportional and nonproportional loading, PhD Thesis, University of Iowa; 1985.
[13] T. Itoh, T. Nakata, M. Sakane, M. Ohnami. Nonproportional low cycle fatigue of 6061 aluminum alloy under 14 strain paths. European structural integrity society, pp. 41-54, 1999.
[14] Z.R.Wu, X.T. Hu, Y.D. Song, Multiaxial fatigue life prediction for titanium alloy TC4 under proportional and nonproportional loading. International Journal of Fatigue, Vol.59, pp. 170-175, 2014.
[15] Joe D. Hoffman, Numerical methods for engineers and scientists, Secound edition, Mc-Graw Hill Inc 2002.
[16] R.N. Smith, P. Watson, and T.H. Topper, A Stress-Strain Parameter for the Fatigue of Metals, Journal of Materials, Vol.5, No.4, pp.767–778, 1970.
[17] A. Fatemi,, and D.F Socie, A Critical Plane Approach to Multiaxial Fatigue Damage Including Out-of-Phase Loading, Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol.11, No.3, pp.149–166, 1988.
[18] M. W. Brown and K.J. Miller, A Theory for Fatigue under Multiaxial Stress-Strain Conditions, Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, Vol.187, pp.745–756, 1973.
[19] S. Babaei, A. Ghasemi-Ghalebahman, A fatigue model for sensitive materils to non-proportional loading. International journal of fatigue, pp. 266–277, 2015.
[20] A. Fatemi, Fatigue and deformation under proportional and nonproportional biaxial loading, PhD Thesis, University of Iowa; 1985.
[21] M. Noban, H. Jahed, S. Winkler, A. Ince. Fatigue characterization and modeling of 30CrNiMo8HH under multiaxial loading. Materials Science and Engineering: A, Vol. 528, pp. 2484-2494, 2011.
[22] Z.R. Wu, X.T. Hu, Y.D. Song, Multiaxial fatigue life prediction for titanium alloy TC4 under proportional and nonproportional loading. International Journal of Fatigue, pp. 170-175 2014.
[23] J. Albinmousa, H. Jahed, Multiaxial effects on LCF behaviour and fatigue failure of AZ31B magnesium extrusion. International Journal of Fatigue, pp. 103-116, 2014.
[24] J. Albinmousa, Multiaxial Fatigue Characterization and Modeling of AZ31B Magnesium Extrusion, PhD Thesis, University of Waterloo; 2011.