



بررسی اثر فاق بر عمر خستگی نمونه‌های استوانه‌ای فولاد HSLA100 در بارگذاری خمشی چرخان با روش تجربی و نظریه ضعیف‌ترین عضو

جواد امیریان¹، حسام صفری²، مهدی شیرانی^{3*}، سعید شهبانی⁴

1- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

2- کارشناس ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

4- مربی، مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

* اصفهان، صندوق پستی 84156-83111، mehdi.shirani@cc.iut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 03 شهریور 1394

پذیرش: 14 مهر 1394

ارائه در سایت: 24 آبان 1394

کلید واژگان:

شکست خستگی

نظریه ضعیف‌ترین عضو

حد خستگی

فولاد

HSLA100

این مقاله به بررسی اثر فاق بر عمر خستگی فولاد HSLA100 که عمدتاً در صنایع دریایی کاربرد دارد، می‌پردازد. آزمایش‌های تجربی کشش ساده و خستگی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای ساده و فاق‌دار این فولاد انجام شده و مشخصات مکانیکی و همچنین نمودار تنش عمر نمونه‌های ساده و فاق‌دار به دست آمده‌اند. در این تحقیق به منظور بررسی کامل‌تر اثر فاق و همچنین اندازه هندسی بر روی عمر خستگی نمونه‌ها، دو نوع هندسه فاق و همچنین دو اندازه متفاوت برای نمونه‌های آزمایش در نظر گرفته شده است. از آزمایش‌های خستگی انجام شده بر روی نمونه‌های فاق‌دار و همچنین از طریق نظریه ضعیف‌ترین عضو (Weakest-link) ضریب حد خستگی فاق محاسبه شده است. برای محاسبه این ضریب از طریق نظریه ضعیف‌ترین عضو، ابتدا یک مدل‌سازی اولیه در آباکوس انجام شده و سپس از طریق برنامه‌نویسی میدان تنش در حالت خمشی چرخان به دست آمده است. برای بررسی بهتر ویژگی‌های نظریه ضعیف‌ترین عضو در محاسبه ضریب حد خستگی، این ضریب از روش‌های کلاسیک که براساس منحنی‌های تجربی هستند نیز محاسبه شده و با داده‌های حاصل از آزمایش مقایسه شده است. در نهایت مقایسه نتایج نظری و آزمایشگاهی نشان داد که نظریه ضعیف‌ترین عضو دقت بهتری نسبت به روش‌های کلاسیک مورد مطالعه در این تحقیق دارد و به نتایج آزمایش نزدیک‌تر است. علاوه بر این، در نظریه ضعیف‌ترین عضو از نتایج آنالیز المان محدود برای پیش‌بینی ضریب حد خستگی نمونه‌های فاق‌دار استفاده می‌شود که این امر استفاده از این نظریه در انجام آنالیز خستگی قطعات پیچیده را تسهیل می‌کند.

Theoretical and experimental investigation of notch effect on fatigue life of cylindrical HSLA100 steel specimens in rotating bending load

Javad Amirian¹, Hesam Safari², Mehdi Shirani^{2*}, Saeed Shabani²

1- Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

2- Subsea Research and Development Center, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

* P.O.B. 84156-83111 Isfahan, Iran, mehdi.shirani@cc.iut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 25 August 2015
Accepted 06 October 2015
Available Online 15 November 2015

Keywords:
Fatigue
Weakest-Link Theory
Strength Factor
Steel
HSLA100

ABSTRACT

This research investigates notch effect on fatigue life of HSLA100 steel which is widely applicable in the marine industry. Experimental tensile tests and rotating bending fatigue tests were performed on both smooth and notched cylindrical specimens and the corresponding mechanical properties and S-N curves were obtained. To better investigate the notch and also size effect on fatigue life of the specimens, two different notch geometries and specimen dimensions were used. To calculate the fatigue strength factor, stress distribution under bending load is simulated for smooth and notched specimens. Then, the stress distribution under bending load is converted to stress distribution under rotating bending load using an in-house developed code. Finally, using an in-house developed code, the fatigue strength factor of the specimens is calculated by weakest link theory. In order to better investigate the weakest-link theory, in calculating the fatigue strength factor, this factor is calculated using the classical methods and compared with experimental results. Finally, comparison of theoretical with experimental results shows that the weakest-link theory gives better predictions than other classical methods and the results are closer to experimental ones. Also, Weakest-link theory uses the finite element results to predict notch effect. This facilitates the use of this theory in fatigue design of complicated specimens.

1- مقدمه

یکنواخت قرار بگیرد، همگن و یکنواخت است. هر تغییر ناگهانی در مقطع

مثل وجود هر نوع فاق باعث توزیع موضعی ناهمگن تنش و کرنش می‌شود.

توزیع تنش و کرنش در یک جسم با سطح مقطع ثابت که تحت بارگذاری

Please cite this article using:

J. Amirian, H. Safari, M. Shirani, S. Shabani, Theoretical and experimental investigation of notch effect on fatigue life of cylindrical HSLA100 steel specimens in rotating bending load, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 113-120, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

J. Amirian, H. Safari, M. Shirani, S. Shabani, Theoretical and experimental investigation of notch effect on fatigue life of cylindrical HSLA100 steel specimens in rotating bending load, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 113-120, 2015 (In Persian)

ستین⁶ و هارکگارد⁷ در سال 2010 از طریق نظریه ضعیف‌ترین عضو و آزمایش، عمر قطعات بزرگ دندانه‌دار در حالت بارگذاری محوری را پیش‌بینی کردند [11]. شیرانی و هارکگارد در سال 2011 تأثیر اندازه و تنش متوسط را بر روی عمر خستگی نمونه‌های استوانه‌ای بزرگ در حالت بارگذاری محوری از طریق تجربی و نظریه ضعیف‌ترین عضو بررسی کردند [12]. شیرانی و هارکگارد در سال 2011 تأثیر ضخامت را بر عمر خستگی نمونه‌های مستطیلی در حالت بارگذاری محوری از طریق تجربی و نظریه ضعیف‌ترین عضو بررسی کردند [13]. بلاچا⁸ و همکاران در سال 2013 از نظریه ضعیف‌ترین عضو برای طراحی خستگی قطعات حاوی جوش استفاده کردند [14]. کاوا⁹ و همکاران در سال 2014 تأثیر اندازه هندسی در عمر خستگی را از طریق تجربی و نظریه ضعیف‌ترین عضو و ارزیابی سطح شکست نمونه، بررسی کردند [15].

در این مقاله عمر خستگی فولاد HSLA100 که از خانواده فولادهای کم‌آلیاژ پر استحکام است و عمدتاً در صنایع دریایی کاربرد دارد، مورد بررسی قرار گرفته است. این نوع فولاد مقدار کربن 0.05 تا 0.25 درصد برای حفظ قابلیت شکل‌گیری و جوش‌پذیری دارد. دیگر آلیاژهای مورد استفاده 2 درصد منگنز و مقدار کمی از مس، نیکل، نیتروژن، وانادیم، کرومیم، مولیبدن، تیتانیوم، کلسیم و زیرکونیم است. مقاومت و چقرمگی فولادهای HSLA در مقایسه با فولادهای کربنی معمولاً 25 تا 30 درصد بیشتر است. این نوع فولاد مقاومت بیشتری در برابر زنگ‌زدگی نسبت به فولادهای کربنی دارد و معمولاً چگالی آنها در حدود 7800 کیلوگرم بر متر مکعب است [16]. این نوع فولادها کاربرد گسترده‌ای در راه آهن، اتومبیل‌ها، پل‌ها، جرثقیل و خصوصاً در صنایع دریایی دارند.

فولاد HSLA100 مورد بررسی در این مقاله تولید داخل کشور بوده و مطالعه ویژگی‌های خستگی این فولاد به منظور طراحی خستگی سازه‌های دریایی که از این فولاد ساخته می‌شوند، از اهمیت زیادی برخوردار است. هدف اصلی این مقاله محاسبه ضریب حد خستگی یا عمر خستگی دو نمونه فاق‌دار فولادی HSLA100 در حالت بارگذاری خمشی چرخان از طریق تجربی و تحلیلی و سپس مقایسه نتایج است. آزمایش کشش ساده و کوانتومتری به منظور به دست آوردن خصوصیات مکانیکی و شیمیایی این فولاد انجام شده است. آزمایش‌های خستگی خمشی چرخان بر روی نمونه‌های ساده و فاق‌دار فولاد HSLA100 انجام شده و منحنی‌های تنش‌عمر برای نمونه‌ها به دست آمده‌اند. بر اساس مشخصات مکانیکی و اطلاعات منحنی تنش‌عمر نمونه ساده، ضریب حد خستگی یا عمر خستگی نمونه‌های فاق‌دار از روش‌های ضعیف‌ترین عضو، پترسون، نیوبر و تغییرات تنش به دست آمده‌اند و با داده‌های حاصل از آزمایش مقایسه شده‌اند.

2- آزمایش‌های تجربی

به منظور مقایسه درصد عناصر فولاد تولید داخل با استانداردهای موجود، آنالیز کوانتومتری از نمونه تولید داخل انجام شده است. در جدول 1 درصد عناصر آلیاژی اصلی فولاد تولید داخل آورده شده است. مقادیر عناصر فولاد تولید داخل در محدوده استاندارد است [17].

برای به دست آوردن خصوصیات مکانیکی (استحکام تسلیم¹⁰، استحکام نهایی¹¹، مدول الاستیسیته) فولاد HSLA100، آزمایش کشش ساده بر روی

گسیختگی خستگی غالباً در یک فاق موجود در سطح ماده، جایی که به علت تمرکز تنش، سطح تنش افزایش یافته است، رخ می‌دهد. فاق به عنوان یک ناپیوستگی هندسی تعریف می‌شود که ممکن است به وسیله طراحی یا خرابی‌های ناشی از فرایند تولید ماده، یا علایم ماشین‌کاری به وجود آید. از دید نظری گفته می‌شود، استحکام اسمی قطعه یکنواخت بالاتر از استحکام قطعه فاق‌دار است و نسبت اولی به دومی برابر ضریب تمرکز تنش K_t است. با این حال، آزمایش‌ها نشان می‌دهند که حد خستگی یک قطعه فاق‌دار تحت تنش‌های چرخه‌ای اسمی، به اندازه ضریب حد خستگی K_f و نه K_t از مقدار مربوط به قطعه بدون فاق کمتر است. عموماً K_f مساوی یا کوچکتر از K_t است. اختلاف بین K_f و K_t با کاهش شعاع ریشه فاق و کاهش استحکام نهایی کششی، افزایش می‌یابد [1]. این اختلاف را می‌توان با استفاده از رفتار تسلیم چرخه‌ای یا نظریه شدت میدان تنش توضیح داد [2-4].

وجود فاق در یک قطعه سبب ایجاد تغییرات تنش در ریشه فاق شده و بر این اساس روش‌های کلاسیک برای پیش‌بینی عمر خستگی یا ضریب حد خستگی ارائه شده‌اند. دو نمونه از این روش‌ها، نظریه پترسون¹ و نیوبر² می‌باشند که در کتاب‌های اصلی طراحی خستگی توضیح داده شده‌اند [5]. روش دیگر نظریه تغییرات تنش است که توسط سیبل³ و استیلر⁴ ارائه شده است [6].

اساس روش‌های کلاسیک تغییرات تنش در ریشه فاق بوده و در این روش‌ها مسأله به صورت محلی بررسی می‌شود. یعنی میدان تنش در ناحیه اطراف فاق را برای محاسبه ضریب حد خستگی در نظر می‌گیرند.

با گذشت زمان و اثبات اینکه اندازه هندسی نمونه و پراکندگی داده‌ها در عمر خستگی یا ضریب حد خستگی تأثیرگذار است، روش‌های کلاسیک برای پیش‌بینی ضریب حد خستگی با اشکال مواجه شده و ضرورت استفاده از روش‌های آماری در پیش‌بینی عمر خستگی بیشتر احساس شد [7-9].

ورمسن⁵ در سال 2007 یک روش تنش غیر محلی بر اساس میدان تنش ایجاد شده در قطعه و توزیع احتمال مقدار حدی تعمیم یافته، ارائه داد که نظریه ضعیف‌ترین عضو نامیده می‌شود [10]. این نظریه از چگالی نقص‌های بحرانی در قطعه و مرتبط کردن این نقص‌ها با مقدار تنش، توسط مکانیک شکست الاستیک خطی، عمر خستگی یا ضریب حد خستگی را پیش‌بینی می‌کند.

در نظریه ضعیف‌ترین عضو میدان تنش ایجاد شده در کل قطعه برای محاسبه ضریب حد خستگی استفاده شده و بنابراین اثر اندازه هندسی نمونه در نظر گرفته می‌شود.

در نظریه ضعیف‌ترین عضو از چگالی نقص‌های بحرانی برای به دست آوردن احتمال شکست خستگی استفاده شده و فرض می‌شود که عیوب بحرانی در حجم ماده به صورت آماری پراکنده هستند. همچنین اندازه عیوب در مقایسه با فاصله بین آنها کوچک در نظر گرفته شده است که در واقع این فرض در بارگذاری‌های خستگی پرچرخه برقرار است.

یک قطعه با حجم مشخص، باقی خواهد ماند اگر تمام المان‌های حجمی آن باقی بمانند. بنابراین در نظریه ضعیف‌ترین عضو احتمال بقای کل حجم با ضرب احتمال بقای تمامی المان‌های حجمی برابر است.

عمدتاً پژوهش‌های خستگی انجام شده بر اساس روش ضعیف‌ترین عضو در حالت بارگذاری محوری بوده که تحلیل تنش به مراتب راحت‌تری نسبت به بارگذاری خمشی چرخان دارند. در ادامه چند نمونه از کارهای مشابه انجام شده، آورده شده است.

6- Cetin
7- Harkegard
8- Blacha
9- Cova
10- Yield Strength
11- Ultimate Strength

1- Peterson
2- Neuber
3- Siebel
4- Stieler
5- Wormsen



Fig. 4 Specimens used for fatigue tests

شکل 4 نمونه‌های استوانه‌ای آزمایش خستگی



Fig. 5 Rotating Bending fatigue machine

شکل 5 دستگاه آزمایش خستگی از نوع خستگی چرخان

دستگاه آزمایش خستگی در شکل 5 نشان داده شده است که از نوع خستگی خمشی چرخان با فرکانس 50 هرتز است. نتایج حاصل از آزمایش‌های خستگی برای 14 نمونه ساده در جدول 3، برای 12 نمونه با فاق V شکل در جدول 4 و برای 12 نمونه با فاق پله‌ای در جدول 5 آورده شده است. با توجه به داده‌های آزمایش خستگی در جدول‌های 3 و 4 و 5 حد خستگی برای نمونه ساده 310 مگاپاسکال، برای نمونه با فاق V شکل 170 مگاپاسکال و برای نمونه با فاق پله‌ای 240 مگاپاسکال به دست آمده است. ضریب حد خستگی با تقسیم حد خستگی نمونه‌های فاق‌دار بر حد خستگی نمونه ساده، برای نمونه با فاق V شکل 1.82 و برای نمونه با فاق پله‌ای 1.29 به دست آمده است.

جدول 3 نتایج آزمایش خستگی خمشی چرخان بر روی نمونه ساده استوانه‌ای

Table 3 Rotating-bending fatigue test results for plain cylindrical specimens

توضیح	عمر خستگی (سیکل)	تنش اعمالی (MPa)	شماره نمونه
شکسته نشده	3256870	300	1
شکسته نشده	3124546	300	2
شکسته شده	400345	320	3
شکسته شده	654124	320	4
شکسته شده	796545	320	5
شکسته شده	105710	400	6
شکسته شده	149547	400	7
شکسته شده	192150	400	8
شکسته شده	323526	400	9
شکسته شده	14300	500	10
شکسته شده	18426	500	11
شکسته شده	20220	500	12
شکسته شده	23445	500	13
شکسته شده	30300	500	14

سه نمونه یکسان انجام شده و میانگین داده‌های حاصل از این سه آزمایش به عنوان نتیجه نهایی در جدول 2 آورده شده است. همچنین نمودار تنش کرنش فولاد بررسی شده در شکل 1 نشان داده شده است. مقادیر خواص مکانیکی در محدوده مجاز استاندارد است [17].

آزمایش‌های خستگی بر روی سه نوع نمونه استوانه‌ای فولاد HSLA100 (ساده، فاق‌دار با فاق V شکل، فاق‌دار با فاق پله‌ای) براساس استاندارد ASTM E 466 انجام شده است [18]. جزئیات ابعاد نمونه ساده و نمونه‌های فاق‌دار در شکل‌های 2 و 3 نشان داده شده است. در شکل 4 تصویر سه نمونه استوانه‌ای آزمایش خستگی در کنار هم آورده شده است.

جدول 1 درصد عناصر اصلی فولاد HSLA100

Table 1 chemical composition of the studied HSLA100

عنصر	کربن	نیکل	مس	سیلیسیم	منگنز	آهن
درصد وزنی	0.02	3.99	1.61	0.26	0.67	باقیمانده

جدول 2 خصوصیات مکانیکی فولاد HSLA100

Table 2 Mechanical properties of the studied HSLA100

استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	کرنش نهایی (%)	مدول الاستیسیته (GPa)
790	895	31	197

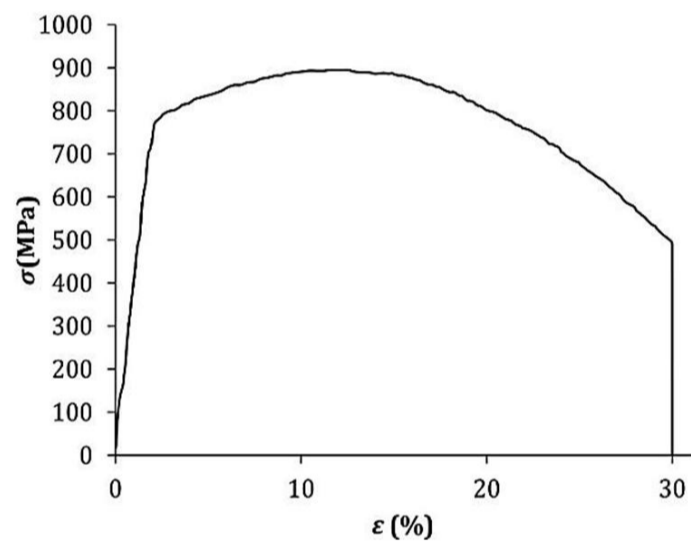


Fig. 1 HSLA100 stress-strain diagram

شکل 1 نمودار تنش - کرنش فولاد HSLA100

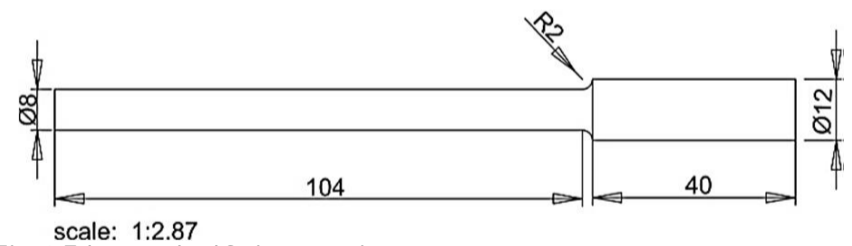


Fig. 2 Edge-notched fatigue specimen geometry

شکل 2 جزئیات ابعاد نمونه با فاق پله‌ای برای آزمایش خستگی

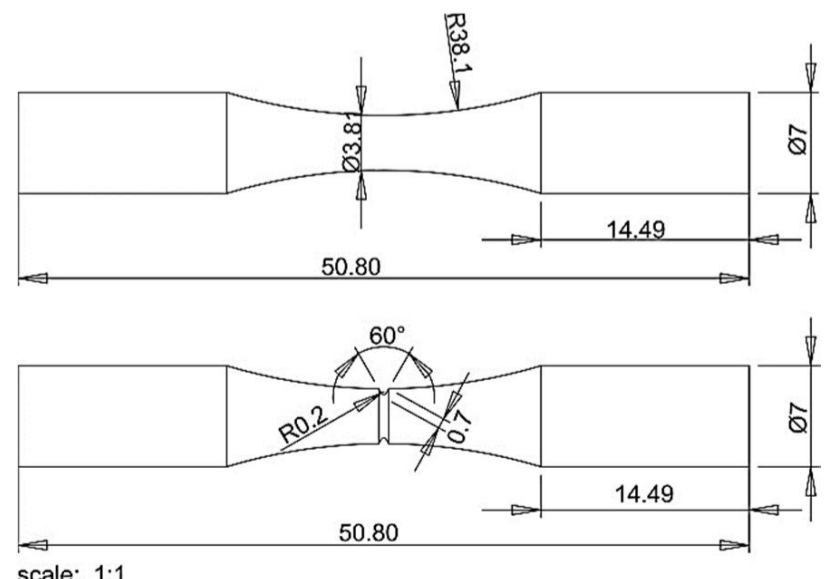


Fig. 3 Plain and V-notched specimen geometry for fatigue test

شکل 3 جزئیات ابعاد نمونه ساده و نمونه با فاق V شکل برای آزمایش خستگی

معمولا معادلات منحنی‌های تنش عمر براساس قانون باسکوئین بیان می‌شود که به صورت معادله (1) است:

$$\sigma_a = \sigma_f' (N_f)^{-1/m} \quad (1)$$

که m و σ_f' ثوابت این معادله هستند.

معادلات نمودارهای ترسیم شده در مقیاس لگاریتمی (شکل 6) در ادامه آورده شده‌اند.

معادله منحنی توانی نمونه ساده:

$$\sigma_a = 1441.4 (N_f)^{-0.107} \quad (a)$$

معادله منحنی توانی نمونه با فاق V شکل:

$$\sigma_a = 1056.8 (N_f)^{-0.129} \quad (b)$$

و معادله منحنی توانی نمونه با فاق پله‌ای:

$$\sigma_a = 1004.8 (N_f)^{-0.101} \quad (c)$$

با معادل قرار دادن معادله (1) با معادلات (1. a) و (1. b) و (1. c) ثوابت باسکوئین برای هر سه نمونه به دست آمده‌اند.

ثوابت معادله باسکوئین نمونه ساده:

$$\sigma_f' = 1441.4, m = 9.34$$

ثوابت معادله باسکوئین نمونه با فاق V شکل:

$$\sigma_f' = 1056.8, m = 7.75$$

ثوابت معادله باسکوئین نمونه با فاق پله‌ای:

$$\sigma_f' = 1004.8, m = 9.90$$

3- نظریه ضعیف‌ترین عضو

تمامی نظریه‌های کلاسیک بر اساس روش‌های تنش عمر و کرنش عمر، عمر قطعه را به صورت قطعی تخمین می‌زنند. اما در واقعیت پراکندگی زیادی در پیش‌بینی عمر خستگی قطعات در نظر گرفته می‌شود. یک نمونه استوانه‌ای با طول و سطح مقطع معین را در نظر بگیرید که تحت بارگذاری خمشی قرار دارد. در این صورت نمونه استوانه‌ای باید در تنش‌های بالاتر از حد خستگی در عمر مشخصی گسیخته شده و بنابراین بر اساس نظریه‌های کلاسیک، هر نمونه یکسان دیگری نیز باید در همان مقدار تنش گسیخته شود. ولی این موضوع حتی برای بارگذاری‌های ساده و یکنواخت نیز صدق نمی‌کند. بنابراین ضروری است که از روش‌های آماری برای پیش‌بینی عمر خستگی قطعات استفاده شود. یک روش آماری باید به صورت منطقی بتواند اثرات اندازه هندسی و پراکندگی را در نظر بگیرد.

به عنوان مثال چنانچه دو قطعه با حجم‌های متفاوت و البته تحت بارگذاری‌های یکسان در نظر گرفته شود، عمدتا قطعه بزرگتر حد خستگی کمتری دارد [12].

برای بکارگیری موفق روش‌های آماری استفاده از یک تابع توزیع مناسب ضروری است. یک تابع توزیع مناسب باید با رفتار مشاهده شده از ماده سازگار بوده و بیانگر خصوصیات ذات ماده باشد. ظاهرا استفاده از تابع توزیع نرمال مناسب است، اما باید توجه شود که این تابع توزیع دارای خصوصیتی است که در علم شکست ماده قابل توجه نیست [19]. ویبول¹ یک تابع توزیع ساده و قدرتمند ارائه داده است که عمدتا در بررسی شکست ماده استفاده می‌شود [20].

در نظریه ضعیف‌ترین عضو احتمال شکست خستگی به صورت معادله (2) تعریف می‌شود [10]:

$$p_{f,V} = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_{A_0}^*} \right)^{b_\sigma} \right] \quad (2)$$

معادله 2 توزیع استحکام خستگی ویبول است و با توزیع دوپارامتری ویبول

1- Weibull

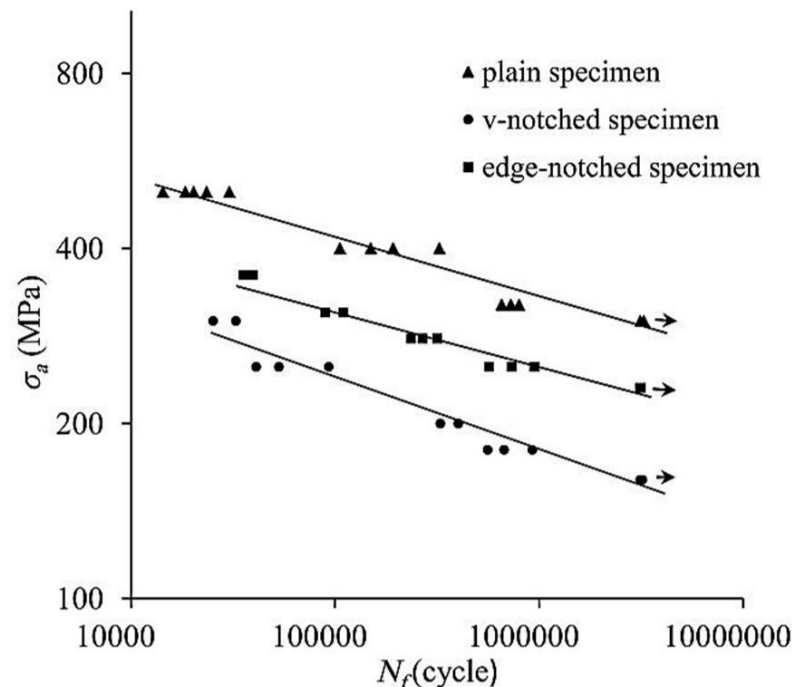


Fig. 6 S-N curves for 3 tested specimens

شکل 6 نمودار تنش عمر سه نمونه آزمایش شده در مقیاس لگاریتمی

جدول 4 نتایج آزمایش خستگی خمشی چرخان بر روی نمونه با فاق V شکل

Table 4 Rotating-bending fatigue test results for V-notched specimens

شماره نمونه	تنش اعمالی (MPa)	عمر خستگی (سیکل)	توضیح
1	160	3124535	شکسته نشده
2	160	3214587	شکسته نشده
3	180	558741	شکسته شده
4	180	675412	شکسته شده
5	180	925485	شکسته شده
6	200	328523	شکسته شده
7	200	402469	شکسته شده
8	250	41015	شکسته شده
9	250	53124	شکسته شده
10	250	92856	شکسته شده
11	300	25254	شکسته شده
12	300	32568	شکسته شده

جدول 5 نتایج آزمایش خستگی خمشی چرخان بر روی نمونه با فاق پله‌ای

Table 5 Rotating-bending fatigue test results for Edge-notched specimens

شماره نمونه	تنش اعمالی (MPa)	عمر خستگی (سیکل)	توضیح
1	230	3156231	شکسته نشده
2	230	3127451	شکسته نشده
3	250	946732	شکسته شده
4	250	732421	شکسته شده
5	250	518000	شکسته شده
6	280	317000	شکسته شده
7	280	267315	شکسته شده
8	280	236321	شکسته شده
9	310	89231	شکسته شده
10	310	109654	شکسته شده
11	360	26452	شکسته شده
12	360	15875	شکسته شده

با استفاده از داده‌های به دست آمده از آزمایش خستگی نمودار تنش عمر در مقیاس لگاریتمی با عبور دادن یک منحنی توانی از داده‌های خستگی برای هر سه نمونه در شکل 6 رسم شده است.

نمونه‌ها آزمایش شوند تعداد سیکل تا شکست از نمونه‌ای به نمونه دیگر متفاوت است. بنابراین احتمال شکست خستگی P با تنش اعمالی σ و تعداد سیکل تا شکست N ارتباط دارد. این سه پارامتر را می‌توان در یک نمودار $P-S-N$ بیان کرد. این نمودار یک خانواده از نمودارهای $S-N$ را شامل می‌شود که هر منحنی با احتمال شکست خستگی خاصی مطابق است. برای ایجاد این چنین نمودار $P-S-N$ باید روابط $P-N$ برای سطح تنش‌های مختلف به صورت آزمایشگاهی تعیین شود [20,21]. این روش به تعداد زیادی آزمایش در هر سطح تنش نیاز دارد. اما معمولاً به علت محدودیت منابع، تعداد آزمایش‌های انجام شده کم است و از روش دیگری برای تحلیل آماری داده‌ها استفاده می‌شود [22].

اگر فرض شود که ضریب تغییرات استحکام ثابت است، نمودارهای $S-N$ برای احتمال شکست‌های مختلف در یک نمودار $P-S-N$ در جهت تنش (محور عمودی) مقدار ثابتی تغییر مکان می‌دهند. یعنی تمامی نمودارهای $S-N$ که احتمال شکست‌های متفاوتی را نشان می‌دهند موازی هستند. در این روش فرض می‌شود که هر داده آزمایش خستگی نمونه ساده، معرف یک نمودار تنش عمر در یک احتمال شکست مشخص است. بنابراین اگر داده در اختیار باشد، می‌توان در مقیاس لگاریتمی نمودار خطی با شیب نمودار اصلی تنش عمر از این داده‌ها عبور داد. یعنی هر کدام از این خطوط یک احتمال شکست را مشخص می‌کنند.

در این تحقیق تعداد 14 آزمایش خستگی بر روی نمونه ساده انجام شده است، بنابراین با روش ذکر شده مطابق شکل 7، می‌توان تعداد 14 منحنی تنش عمر رسم کرد. نمودارهای استاندارد $S-N$ در اغلب کتاب‌های طراحی به صورتی رسم می‌شوند که تنش، متغیر مستقل و تعداد سیکل تا شکست، متغیر وابسته است.

روش استاندارد در عبور دادن منحنی¹ به این صورت است که متغیر مستقل بر محور افقی و متغیر وابسته بر محور عمودی رسم می‌شود. اما باید توجه شود که در داده‌های خستگی، تنش، متغیر مستقل است و اگر تعداد سیکل به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شود سبب ایجاد خطا می‌شود [23]. بنابراین برای تحلیل آماری داده‌های نمونه ساده تنش بر روی محور افقی و عمر بر روی محور عمودی رسم می‌شود (شکل 7).

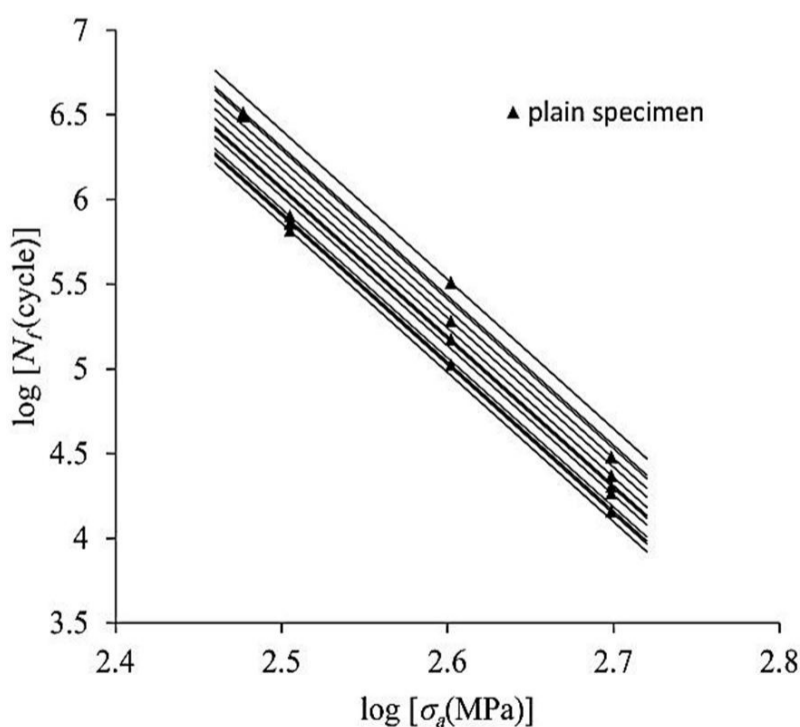


Fig. 7 N-S curves at different probabilities of failure

شکل 7 خطوط عبوری از داده‌های خستگی (منحنی‌های عمر تنش در احتمال شکست‌های مختلف)

1- Curve fitting

معادل است. b_σ پارامتر شکل است و به اندازه پراکندگی استحکام خستگی نمونه مرجع (نمونه ساده) اشاره دارد و به طور غیر مستقیم اندازه پراکندگی نقص‌های موجود در ماده را نشان می‌دهد. $\sigma_{A_0}^*$ مشخصه حد خستگی یا حد خستگی در یک احتمال شکست مشخص نمونه ساده آزمایش شده است. $\bar{\sigma}_a$ دامنه تنش ویبول است و به دامنه تنش مؤثر خستگی اشاره دارد.

نظریه ضعیف‌ترین عضو دارای دو فرمول بندی حجمی و سطحی است. در فرمول بندی حجمی دامنه تنش مؤثر به صورت معادله (3) به دست می‌آید:

$$\bar{\sigma}_a = \left(\frac{1}{V_0} \int_V \sigma_a^{b_\sigma} \right)^{\frac{1}{b_\sigma}} \quad (3)$$

و در فرمول بندی سطحی:

$$\bar{\sigma}_a = \left(\frac{1}{A_0} \int_V \sigma_a^{b_\sigma} \right)^{\frac{1}{b_\sigma}} \quad (4)$$

که V_0 حجم نمونه ساده، A_0 مساحت سطح نمونه ساده و V حجم نمونه دلخواه یا همان حجم نمونه فاق دار است.

توزیع استحکام خستگی ویبول (معادله 2) را می‌توان توسط معادله باسکوئین به توزیع عمر خستگی (معادله 5) تبدیل کرد:

$$P_{f,v} = 1 - \exp \left[- \left(\frac{n}{N_0^*(R, \bar{\sigma}_a)} \right)^{b_n} \right] \quad (5)$$

که b_n ضریب شکل و $N_0^*(R, \bar{\sigma}_a)$ ضریب مقیاس و یک مشخصه عمر برای نمونه ساده است. b_n با b_σ توسط رابطه 6 مرتبط می‌شود:

$$b_n = \frac{b_\sigma}{m} \quad (6)$$

که m توان باسکوئین است.

در نظریه ضعیف‌ترین عضو فرض می‌شود که قطعه به المان‌های کوچکی تقسیم شده است و احتمال بقای یک قطعه از ضرب احتمال بقای تمامی المان‌ها به دست می‌آید. احتمال بقای یک المان تابعی از تعداد سیکل، مشخصه استحکام خستگی، اندازه پراکندگی و اندازه المان است.

در این تحقیق برای اعمال نظریه ضعیف‌ترین عضو از یک برنامه پس پردازش المان محدود استفاده شده است. در این برنامه تنش مؤثر، تعداد سیکل تا شکست و احتمال شکست خستگی محاسبه می‌شود.

ورودی‌های برنامه برای محاسبه احتمال شکست خستگی و تعداد سیکل تا شکست نمونه فاق دار به صورت زیر است:

- مشخصات مکانیکی و خستگی فولاد بررسی شده (مدول الاستیسیته، استحکام نهایی، استحکام خستگی) که در بخش 2 از آزمایش به دست آمده‌اند.
- ضرایب باسکوئین منحنی تنش عمر نمونه ساده (ضریب استحکام خستگی، توان استحکام خستگی) معادله (1).

- ثوابت ویبول برای نمونه ساده (ضریب شکل، ضریب اندازه) که روش محاسبه این ثوابت در بخش 3-1 (تحلیل آماری نمونه ساده) توضیح داده شده است.

- یک فایل المان محدود شبیه‌سازی شده نمونه فاق دار شامل موقعیت المان‌ها، مختصات گره‌ها و تنش‌های ایجاد شده در گره‌ها، که در بخش 3-2 (تحلیل تنشی نمونه فاق دار) توضیح داده شده است.

- مقدار حجم و مساحت سطح نمونه مرجع خستگی آزمایش شده که در اینجا همان حجم و سطح نمونه ساده آزمایش است. در این تحقیق حجم نمونه ساده 19572 mm^3 و مساحت سطح خارجی نمونه ساده 6448 mm^2 می‌باشد.

3-1- تحلیل آماری نمونه ساده خستگی به منظور یافتن ضرایب ویبول

هدف از تحلیل آماری عمدتاً پیدا کردن یک نمودار $S-N$ در یک سطح احتمالی است که درصد کمی از نمونه‌ها شکسته شوند. اگر تعداد زیادی از

نرم افزار جی الیو اینووا² نشان می‌دهد. در حالت استاتیکی نمونه از یک طرف ثابت است و از طرف دیگر تحت یک بار خمشی قرار گرفته است. در این نوع بارگذاری نمونه ثابت است و چرخشی ندارد. اما در بارگذاری خمشی نمونه تحت خمش است و چرخش نیز دارد و در هر دور چرخش نمونه، تمامی نقاط سطح مقطع بیشترین تنش کششی و فشاری را متحمل می‌شوند. برای اعمال نظریه ضعیف‌ترین عضو به تنش‌های ماکزیمم اعمال شده به قطعه در حین چرخش نیاز است و این میدان تنش از تبدیل میدان تنش بارگذاری استاتیکی به میدان تنش خستگی به دست آمده است. بنابراین از میدان تنش استاتیکی استفاده شده تا میدان تنش خستگی مورد نیاز محاسبه شود.

تغییر تانسور تنش از حالت استاتیکی در آباکوس به تانسور تنش در حالت چرخان توسط برنامه نویسی در نرم افزار فرترن انجام شده است. فایل ورودی برنامه فرترن نوشته شده، 8 ماتریس شامل 6 ماتریس مربوط به تانسور تنش‌های محوری برای دو حالت استاتیکی، یک ماتریس مربوط به مختصات گره‌ها و یک ماتریس مربوط به موقعیت المان‌ها است. خروجی کد فرترن نوشته شده 3 ماتریس مربوط به تانسور تنش در حالت چرخان است. ضریب حد خستگی و عمر خستگی پیش‌بینی شده توسط نظریه ضعیف-ترین عضو در بخش نتایج آورده شده است.

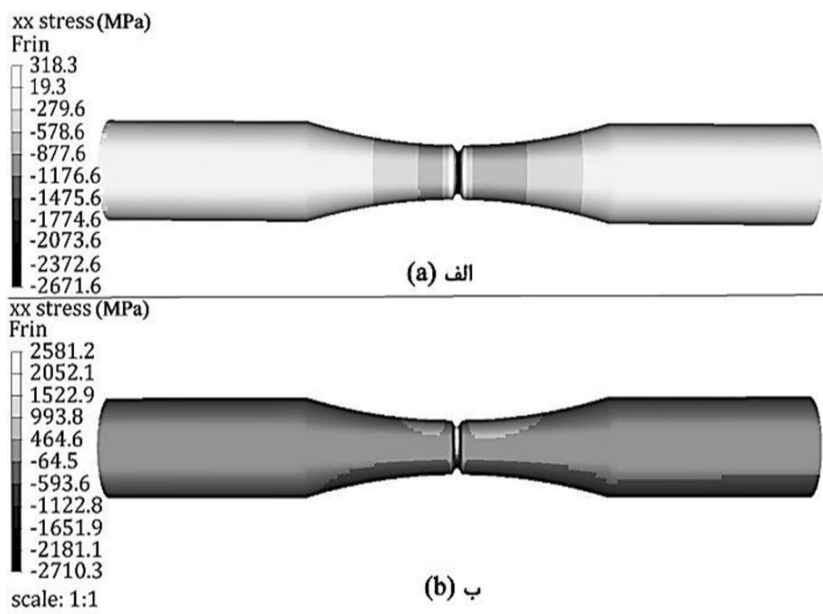


Fig. 9 Stress distribution at rotating bending (a) and static (b) loading for V-notched specimens

شکل 9 تفاوت توزیع تنش در دو حالت چرخان (الف) و استاتیکی (ب) برای نمونه با فاق v شکل

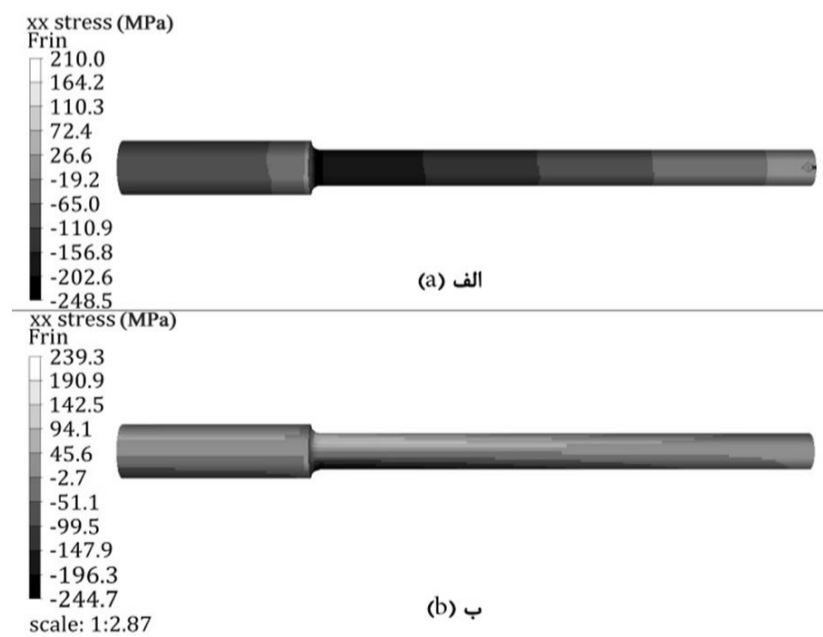


Fig. 10 Stress distribution at rotating bending (a) and static (b) loading for Edge-notched specimens

شکل 10 تفاوت توزیع تنش در دو حالت چرخان (الف) و استاتیکی (ب) برای نمونه با فاق پله‌ای

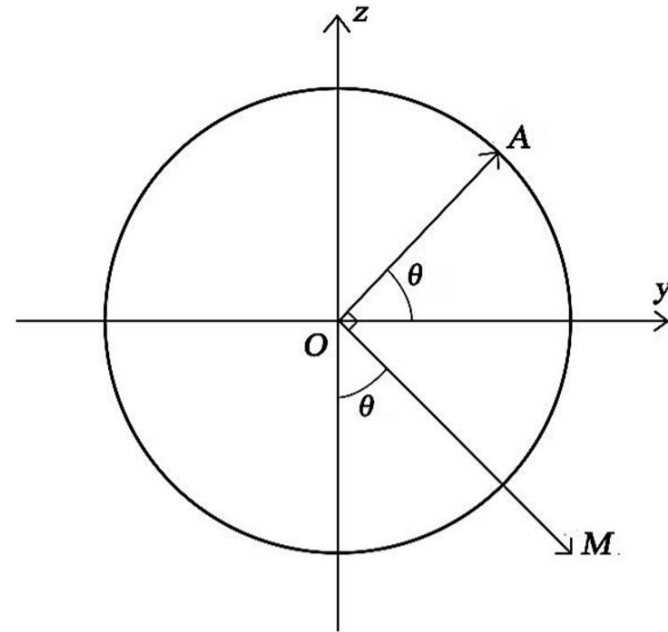


Fig. 8 A cylindrical rotating bending specimen cross section

شکل 8 سطح مقطع یک نمونه استوانه‌ای چرخان تحت بارگذاری خمشی

حال به ازای یک تنش مشخص تعداد 14 عمر مشخص وجود دارد که با عبور دادن تابع توزیع ویبول از این داده‌ها ثوابت توزیع عمر خستگی به دست آمده‌اند $(b_n = 2.78, N^*_0(R, \bar{\sigma}_a) = 7.56 \times 10^5)$. با استفاده از این داده‌ها و معادله باسکوئین ثوابت توزیع استحکام خستگی نیز محاسبه شده‌اند $(b_\sigma = 25.98, \sigma^*_{A_0} = 348.68)$. تحلیل آماری داده‌های حاصل از آزمایش با نرم افزار مینی‌تب¹ انجام شده است.

3-2- تحلیل تنش‌های نمونه‌های فاق‌دار در حالت بارگذاری خمشی چرخان

در شکل 8 سطح مقطع یک نمونه استوانه‌ای چرخان که تحت خمش قرار گرفته است نشان داده شده است. بدیهی است که تمامی نقاط روی سطح در حین یک دوران کامل به مقدار بیشترین تنش می‌رسند و این حالت برای تمامی نقاط در قطعه وجود دارد. یعنی تمامی نقاط روی یک شعاع مشخص، به مقدار معینی از بیشترین تنش می‌رسند. حال برای به کار بردن نظریه ضعیف‌ترین عضو به این بیشترین تنش برای تمامی نقاط قطعه نیاز است. همان‌طور که در شکل 8 نشان داده شده است این قطعه تحت خمش قرار گرفته است و بیشترین تنش به نقطه A زمانی وارد می‌شود که بردار گشتاور بر بردار r که مختص نقطه A است، عمود باشد.

بنابراین بیشترین تنش محوری وارد شده به نقطه A برابر است با:

$$\sigma_a(A) = \frac{y \times M \cos \theta}{I} + \frac{z \times M \sin \theta}{I} \quad (7)$$

مقدار تنش برای دو حالت خاص $\theta = 0$ و $\theta = \frac{\pi}{2}$ به صورت معادلات (8) و (9) است:

$$\sigma_{\theta=0}(A) = \frac{My}{I} \quad (8)$$

$$\sigma_{\theta=\frac{\pi}{2}}(A) = \frac{Mz}{I} \quad (9)$$

بنابراین معادله (7) به صورت معادله (10) نیز قابل بازنویسی است:

$$\sigma_a(A) = \sigma_{\theta=0}(A) \cos \alpha + \sigma_{\theta=\frac{\pi}{2}}(A) \sin \alpha \quad (10)$$

مقدار تنش‌ها در $\sigma_{\theta=0}(A)$ و $\sigma_{\theta=\frac{\pi}{2}}(A)$ توسط دو بارگذاری جداگانه در المان محدود به دست می‌آیند. رابطه 10 باید برای تمامی گره‌های نمونه فاق‌دار شبیه سازی شده در آباکوس اعمال شود. بنابراین دو تانسور تنش در دو حالت خاص استاتیکی از آباکوس استخراج و با برنامه نویسی این دو تانسور تنش به تانسور تنش در حالت چرخان تبدیل شده است که همان تنش‌های مورد نیاز نظریه ضعیف‌ترین عضو است [24]. شکل‌های 9 و 10 تفاوت توزیع تنش محوری در دو حالت استاتیکی و چرخان، قبل و بعد از اعمال برنامه نوشته شده در فرترن را در

سیبل و استیلر و با استفاده از نظریه کشسانی محاسبه شده و برای قطعات فاق‌دار مختلف ارائه شده‌اند.

5- نتایج و بحث

نتایج خروجی برنامه پس‌پردازش المان محدود برای احتمال شکست 50 درصد برای دو روش سطحی و حجمی نظریه ضعیف‌ترین عضو در جدول 5 آورده شده است. لازم به ذکر است که احتمال شکست 50 درصد به این علت انتخاب شده است که تمامی منحنی‌های تنش‌عمر که از قانون باسکوئین تبعیت می‌کنند در احتمال شکست 50 درصد می‌باشند. در هر کدام از روش‌ها به ازای یک تنش اعمالی، نرم افزار یک تنش مؤثر محاسبه می‌کند که همان افزایش تنش به علت وجود فاق یا تمرکز تنش در قطعه است و با استفاده از این تنش مؤثر عمر قطعه محاسبه می‌شود. با تقسیم تنش مؤثر بر تنش اعمالی، ضریب حد خستگی برای نمونه فاق‌دار V شکل در فرمولبندی سطحی 1.89 و در فرمولبندی حجمی 1.61 به دست آمده است (جدول 5). همچنین ضریب حد خستگی برای نمونه با فاق پله‌ای در فرمولبندی سطحی 1.35 و در فرمولبندی حجمی 1.22 به دست آمده است (جدول 6).

همان‌طور که از جدول‌های 7 و 8 مشخص است پیش‌بینی نظریه ضعیف‌ترین عضو به نتایج آزمایش نزدیکتر است و دقت بهتری نسبت به روش‌های کلاسیک دارد. علاوه بر این، در نظریه ضعیف‌ترین عضو از نتایج آنالیز المان محدود برای پیش‌بینی ضریب حد خستگی نمونه‌های فاق‌دار استفاده می‌شود. در نظریه ضعیف‌ترین عضو برای محاسبه تنش مؤثر، از میدان تنش ایجاد شده در کل قطعه بر روی حجم یا سطح نمونه انتگرال-گیری می‌شود و در نتیجه اندازه هندسی نمونه نیز در نظر گرفته می‌شود. همچنین اثرات پراکندگی داده‌های آزمایش (ضرایب تابع توزیع ویبول برای داده‌های خستگی) که می‌تواند بر اساس نوع ساخت و یا جنس نمونه‌ها متغیر باشد، نیز در این روش لحاظ شده است. روش ضعیف‌ترین عضو برای رسیدن به نتایج فرایند سخت‌تری نسبت به روش‌های کلاسیک دارد ولی در عوض دقت بهتری نسبت به این روش‌ها وجود دارد.

همان‌طور که در بخش‌های قبلی توضیح داده شد روش‌های کلاسیک نیز برای پیش‌بینی عمر خستگی یا ضریب حد خستگی نمونه‌های فاق‌دار وجود دارند. در این تحقیق روش‌های کلاسیک نیز برای دو نمونه فاق‌دار فولادی HSLA100 اعمال شده‌اند و ضرایب حد خستگی پیش‌بینی شده به دست آمده‌اند. ضرایب حد خستگی پیش‌بینی شده توسط تمامی روش‌ها در جدول 7 و درصد خطای هر روش در جدول 8 آورده شده است. اختلاف مقادیر نظری و آزمایش تقسیم بر مقدار به دست آمده از آزمایش همان خطای محاسبه شده است. همان‌طور که از جدول‌های 7 و 8 مشخص است ضرایب پیش‌بینی شده از روش‌های کلاسیک (پترسون، نیوبر، تغییرات تنش) محتاطانه هستند. فرضیات این روش‌ها عمدتاً بر اساس تغییرات تنش که در ریشه فاق ایجاد می‌شود، استوار است و بر این اساس منحنی‌ها و معادلات تجربی ارائه شده است که برای پیش‌بینی ضریب حد خستگی به کار می‌روند.

جدول 6 نتایج روش ضعیف‌ترین عضو برای دو فرمولبندی حجمی و سطحی در احتمال شکست 50 درصد

Table 6 Weakest-link method results for surface and volume formulation at 50% probability of failure

روش	نمونه با فاق V شکل		نمونه با فاق پله‌ای	
	تنش اعمالی	تنش مؤثر	تنش اعمالی	تنش مؤثر
سطحی	181.47	342.7	253.85	342.7
حجمی	213.03	342.7	280.90	342.7

4- نظریه‌های کلاسیک برای محاسبه ضریب حد خستگی

در این بخش نظریه‌های پترسون، نیوبر و تغییرات تنش برای محاسبه ضریب حد خستگی دو نمونه فاق‌دار فولادی اعمال می‌شوند. این سه نظریه از ضریب تمرکز تنش استاتیکی و خصوصیات مکانیکی ماده برای محاسبه ضریب حد خستگی استفاده می‌کنند. ضریب تمرکز تنش استاتیکی برای نمونه با فاق پله‌ای از منحنی‌های تجربی 1.5 به دست آمده است [25].

ضریب تمرکز تنش استاتیکی برای نمونه با فاق V شکل به علت در دسترس نبودن منحنی‌های تجربی برای این نوع فاق، از آنالیز المان محدود تحت بارگذاری خمشی 2.73 به دست آمده است.

یک فرمول تجربی که در کاربرد مهندسی قابل قبول است و ضریب استحکام خستگی را به ضریب تمرکز تنش استاتیکی مرتبط می‌کند به صورت معادله (11) است [1].

$$k_f = 1 + q(1 + k_t) \quad (11)$$

که q ضریب حساسیت به فاق نامیده می‌شود. کاربرد فرمول (11) در روش پترسون و نیوبر است.

4-1- نظریه پترسون

پترسون فرض کرد که شکست خستگی زمانی اتفاق می‌افتد که مقدار تنش در فاصله مشخصی از ریشه فاق به مقدار حد خستگی نمونه ساده برسد. با فرض تغییرات خطی برای تنش در نزدیکی فاق، پترسون معادله تجربی 12 را برای q به دست آورد [26].

$$q = \frac{1}{1 + \frac{a_p}{r}} \quad (12)$$

که r شعاع ریشه فاق و a_p یک ثابت ماده است که به اندازه دانه و بارگذاری بستگی دارد. با استفاده از رابطه‌های (11) و (12) مقدار ضریب استحکام خستگی برای هر دو نمونه فاق‌دار برای روش پترسون محاسبه می‌شود.

4-2- نظریه نیوبر

نیوبر فرض کرد که شکست خستگی زمانی اتفاق می‌افتد که مقدار میانگین تنش در یک فاصله مشخص از ریشه فاق به حد خستگی نمونه ساده برسد و بر این اساس رابطه تجربی (13) را برای ضریب حساسیت q به فاق ارائه کرد [27].

$$q = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{a_n}{r}}} \quad (13)$$

که r شعاع ریشه فاق و a_n ثابت ماده نیوبر است و با استحکام نهایی رابطه دارد. با استفاده از رابطه (1) و (13) مقدار ضریب استحکام خستگی برای هر دو نمونه فاق‌دار برای روش نیوبر محاسبه می‌شود.

4-3- نظریه تغییرات تنش

سیبل و استیلر از اثرات تغییرات تنش بر روی کاهش استحکام خستگی به جای شعاع ریشه فاق استفاده کردند و ضریب تغییرات تنش نسبی را به صورت معادله (14) ارائه دادند:

$$RSG = \frac{1}{\sigma^e(x)} \left(\frac{d\sigma^e(x)}{dx} \right)_{x=0} \quad (14)$$

که x فاصله عمودی از ریشه فاق و $\sigma^e(x)$ توزیع تنش کشسان نظری است. سیبل و استیلر با آزمون استحکام خستگی نمونه‌های یکنواخت و فاق‌دار در 2×10^7 چرخه، مجموعه‌ای از منحنی‌های تجربی را ارائه دادند که مقادیر k_t/k_f را برای مواد مختلف به RSG آنها ربط می‌دهند. مقادیر RSG به وسیله

8- مراجع

[1] Y. Lee, J. Pan, R. Hathaway, M. Barkey, Fatigue testing and analysis - theory and practice, First Edition, pp. 140-147, Oxford: Elsevier Butterworth Heinemann, 2005.

[2] W. Yao, Stress field intensity approach for predicting fatigue life, International Journal of Fatigue, Vol. 15, No. 3, pp. 243-45, 1993.

[3] H. Adib, G. Pluvinage, Theoretical and numerical aspects of volumetric approach for fatigue life prediction in notched components, International Journal of Fatigue, Vol. 25, pp. 67-76, 2003.

[4] G. Qylafku, Z. Azari, M. Gjonaj, G. Pluvinage, Application of a new model proposal for fatigue life prediction on notches and key-seats, International Journal of Fatigue, Vol. 21, pp. 753-60, 1999.

[5] E. Siebel, M. Stieler, Ungleichförmige Spannungsverteilung bei schwingen- der Beanspruchung. VDI-Z, Vol. 97, No. 5, pp. 121-6, 1955.

[6] N. Dowling, Mechanical behavior of materials - engineering methods for deformation, fracture, and fatigue, Third Edition, pp. 473-479, New Jersey: Prentice Hall, 2007.

[7] M. Makkonen, Notch Size Effect in the Fatigue Limit of Steel, International Journal of Fatigue, Vol. 25, No. 1, pp. 17-26, 2003.

[8] M. Makkonen, Response to Comments by Prof. Taylor On "Notch Size Effect in the Fatigue Limit of Steel" By M. Makkonen, International Journal of Fatigue, Vol. 25, No. 8, pp. 781-783, 2003.

[9] L. Flacelière, F. Morel, Probabilistic Approach in High-Cycle Multiaxial Fatigue: Volume and Surface Effects, Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. 27, No. 12, pp. 1123-35, 2004.

[10] A. Wormsen, B. Sjodin, G. Härkegård, A. Fjeldstad, Non-Local Stress Approach for Fatigue Assessment Based on Weakest-Link Theory and Statistics of Extremes, Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. 30, No. 12, pp. 1214-27, 2007.

[11] A. Cetin, G. Härkegård, Fatigue life prediction for large threaded components, Procedia Engineering, Vol. 2, No. 1, pp. 1225-33, 2010.

[12] M. Shirani, G. Härkegård, Fatigue life distribution and size effect in ductile cast iron for wind turbine components, Journal of Engineering Failure analysis, Vol. 18, No. 1, pp. 12-24, 2011.

[13] M. Shirani, G. Härkegård, Large scale axial fatigue testing of ductile cast iron for heavy section wind turbine components, Journal of Engineering Failure analysis, Vol. 18, No. 6, pp. 1496-10, 2011.

[14] L. Blacha, A. Karolczuk, R. Bański, P. Stasiuk, Application of the weakest link analysis to the area of fatigue design of steel welded joints, Journal of Engineering Failure analysis, Vol. 35, pp. 665-77, 2013.

[15] M. Cova, M. Nanni, R. Tovo, Geometrical size effect in high cycle fatigue strength of heavy-walled ductile cast iron GJS400: Weakest link vs defect-based approach, Procedia Engineering, Vol. 74, pp. 101-104, 2014.

[16] R. Mattes, Microstructure and Mechanical Properties of HSLA-100 Steel, - Master of Science Thesis, Department of Mechanical Engineering, Marquette University, 1982.

[17] United states navy standard. T9074-BD-GIB-010/0300, Sea systems command, 1990.

[18] ASTM Standard E2948-14. Standard Test Method for Conducting Rotating Bending Fatigue Tests of Solid Round Fine Wire. West Conshohocken (PA, USA): ASTM International; 2007.

[19] J. Rösler, H. Harders, M. Bäker, Mechanical Behaviour of Engineering Materials: Metals, Ceramics, Polymers, and Composites, pp. 236-242, Teubner Verlag Wiesbaden, 2006.

[20] W. Weibull, A statistical distribution function of wide applicability, Journal of Applied Mechanics, Vol. 18, No. 3, pp. 293-7, 1951.

[21] W. Weibull, K.C. Rockey, Fatigue testing and analysis of results, Journal of Applied Mechanics, Vol. 29, No. 3, pp. 607, 1961.

[22] S. Nishijima, Statistical fatigue properties of some heat-treated steels for machine structural use, ASTM Specific Technology Publications, No. 744, pp. 75-88, 1981.

[23] J. Wilson, Statistical comparison of fatigue data, Journal of Materials Science Letters, Vol. 7, No. 3, pp. 307-8, 1988.

[24] G. Härkegård, G. Halleraker, Assessment of methods for prediction of notch and size effects at the fatigue limit based on test data by Böhm and Magin, International Journal of Fatigue, Vol. 32, No. 10, pp. 1701-9, 2010.

[25] R.G. Budynus, J.K. Nisbett, J.E. Shigley, Shigley's mechanical engineering design, Ninth Edition, pp. 1006-1013, New York: McGraw-Hill, 2011.

[26] R.E. Peterson, Notch sensitivity. In: G. Sines, J.L. Waisman, editors. Metal fatigue, New York: McGraw Hill, pp. 293-306, 1959.

[27] H. Neuber, Theory of notch stresses - principles for exact calculation of strength with reference to structural form and material, pp. 347-354, Berlin: Springer, 1958.

جدول 7 ضریب حد خستگی (k_f) پیش‌بینی شده توسط تمامی روش‌ها

Table 7 Predicted k_f by different classical methods

نمونه	روش	ضعیف‌ترین عضو		
		سطحی	حجمی	پترسون نیوبر
فاق ۷ شکل	1.82	1.89	1.61	2.09
فاق پله‌ای	1.30	1.35	1.22	1.47

جدول 8 درصد خطای محاسبه شده برای تمامی روش‌ها

Table 8 Different classical methods prediction error percent

نمونه	روش	ضعیف‌ترین عضو		
		سطحی	حجمی	پترسون نیوبر
فاق ۷ شکل	0.038	0.038	0.115	0.148
فاق پله‌ای	0.038	0.038	0.061	0.131

استفاده از این روش‌ها بسیار راحت است ولی از دقت پیش‌بینی خوبی برخوردار نبوده و نتایج آنها محتاطانه است. همچنین روش‌های کلاسیک میدان تنش ایجاد شده در قطعه را به صورت محلی در نظر می‌گیرند، یعنی صرف‌نظر از اندازه هندسی نمونه، تنها ابعاد فاق اهمیت دارد. در صورتی که اندازه هندسی یک پارامتر تأثیر گذار در عمر خستگی نمونه است که در این روش‌ها نادیده گرفته می‌شود. همچنین روش‌های کلاسیک با آنالیز المان محدود سازگاری ندارند و صرفاً از منحنی‌ها و معادلات تجربی استفاده می‌کنند.

6- نتیجه‌گیری

آزمایش‌های کشش ساده و خستگی از نوع خمشی چرخان بر روی نمونه‌های ساده و فاق‌دار فولاد HSLA100 انجام شد. دو نوع هندسه فاق و همچنین دو اندازه متفاوت برای نمونه‌های آزمایش خستگی در نظر گرفته شد. به منظور محاسبه ضریب حد خستگی از طریق نظریه ضعیف‌ترین عضو، شبیه‌سازی اولیه در نرم‌افزار آباکوس انجام شده و سپس با برنامه‌نویسی میدان تنش مورد نیاز به دست آمد. نظریه‌های کلاسیک پترسون، نیوبر و تغییرات تنش به منظور مقایسه با نتایج نظریه ضعیف‌ترین عضو و نتایج آزمایش اعمال شده‌اند.

- خصوصیات مکانیکی و خستگی فولاد HSLA100 شامل استحکام تسلیم، استحکام نهایی و کرنش نهایی، استحکام خستگی و نمودار تنش‌عمر، از آزمایش کشش ساده و خستگی به دست آمد. مقادیر به دست آمده از آزمایش با استاندارد مقایسه شده و تطبیق خوبی دارند.
- اثر فاق بر عمر خستگی فولاد مورد بررسی به صورت آزمایشگاهی بررسی شد و حد خستگی دو نمونه فاق‌دار به دست آمد.
- ضریب حد خستگی نمونه‌های فاق‌دار از طریق نظریه‌های ضعیف‌ترین عضو، پترسون، نیوبر و تغییرات تنش محاسبه شده و با داده‌های حاصل از آزمایش مقایسه شدند.
- مقایسه نتایج نظری و آزمایشگاهی نشان داد که پیش‌بینی نظریه ضعیف‌ترین عضو به نتایج آزمایش نزدیکتر است و دقت بهتری نسبت به روش‌های کلاسیک دارد.
- با مقایسه نتایج نظری و آزمایشگاهی مشخص شد که پیش‌بینی نظریه‌های پترسون، نیوبر و تغییرات تنش محتاطانه است و دقت خوبی ندارند.

7- تقدیر و تشکر

با تقدیر و تشکر شایسته از سرکار خانم مهندس مدینه شبانی که ویرایش نگارشی مقاله را بر عهده داشتند.