مجله مهندسی مکانیک مدرس، آذر 1393، دوره 14، شماره 9، ص‌ص 133-139

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

ارزیابی ضرایب شدت تنش ترک مرکزی در ورق انحنادار در حضور سوراخ‌های متوقف‌کننده دو طرف ترک

مجید رضا آیت‌اللهی[1*]، سید محمد جواد رضوی[2]، حمید رضا چمنی[3]

1- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران

2- کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران

3- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران

* تهران، صندوق پستی 163-16765، m.ayat@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 17 مهر 1392

پذیرش: 21 آذر 1392

ارائه در سایت: 01 مهر 1393

کلید واژگان:

قطعه انحنادار

ترک مرکزی

سوراخ متوقف‌کننده

ضریب شدت تنش

چکیده

استفاده از سوراخ‌های متوقف‌کننده از جمله ساده‌ترین روش‌ها برای کاهش ضریب شدت تنش در نوک ترک و در نتیجه کاهش نرخ رشد ترک است. کارایی سوراخ‌های متوقف‌کننده در مهار رشد ترک بر مبنای تأثیرگذاری آن‌ها روی ضرایب شدت تنش سنجیده می‌شود. بسیاری از اجزای فلزی در سازه‌های مهندسی به دلیل هندسه خاص خود، دارای سطوحی انحنادار هستند. بنابراین در مقاله حاضر، با استفاده از تحلیل‌های اجزا محدود و با در نظر گرفتن آرایش‌های گوناگون سوراخ‌های متوقف‌کننده، تأثیر حضور این سوراخ‌ها بر ضرایب شدت تنش در قطعه انحنادار با ترک مرکزی مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج عددی بیانگر این است که موقعیت و اندازه سوراخ‌های متوقف‌کننده بر مقدار ضریب شدت تنش نوک ترک تأثیرگذار است. مهم‌ترین دلیل تغییر در ضریب شدت تنش، تأثیرگذاری سوراخ‌های متوقف‌کننده بر میدان تنش نوک ترک است. با افزایش اندازه سوراخ‌های دوطرف ترک و کاهش فواصل افقی و عمودی آنها از نوک ترک، تأثیرپذیری ضریب شدت تنش نیز بیش‌تر می‌شود. همچنین نتایج عددی بیانگر این نکته‌اند که کارایی سوراخ‌های متوقف کننده در سطوح انحنادار، برابر با کارایی روش مذکور در سطوح تخت است.

Evaluation of stress intensity factors of a center cracked curved plate in the presence of crack flank stop drill holes

Majid Reza Ayatollahi*, Seyed Mohamad Javad Razavi, Hamid Reza Chamani

Mechanical Engineering, Iran University of Science and Techology, Tehran, Iran

* P.O.B. 16765-163 Tehran, Iran m.ayat@iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 9 October 2013
Accepted 12 December 2013
Available Online 23 September 2014

Keywords:
Curved Plate
Center Crack
Stop Hole
Stress Intensity Factor

ABSTRACT

The use of stop drill holes is one of the most convenient methods for reducing the stress intensity factors and crack growth rate. The efficiency of stop drill holes on the crack growth retardation depends on the amount of reduction in stress intensity factors. The curved plates are frequently used in engineering structures. Therefore, in this paper, by using the finite element method, the effects of configurations and diameters of crack flank holes on the variations of stress intensity factor are studied for a curved plate. The numerical results indicate that the location and the size of stop drill holes affect the stress intensity factors which is mainly due to their interaction with the crack tip stresses. Closer distances to the crack tip and larger diameters of the flank holes provide more reduction in the stress intensity factors. Also, the finite element results show that the use of stop drill hole method for the curved plates has the same efficiency as that of the flat plates.

1- مقدمه

در بسیاری از سازه‌ها و قطعات مهندسی، جوانه‌زنی و رشد ترک پدیده‌ای اجتناب‌ناپذیر است. به عنوان مثال می‌توان قطعات جوش‌کاری شده‌ای مانند سازه‌های فلزی در هواپیماهای بزرگ، سازه‌های دریایی، پل‌ها، مخازن تحت فشار و همچنین محصولات پتک‌کاری شده مانند روتورهای توربین‌ها و ژنراتورها در نیروگاه‌ها را نام برد. تحت بارگذاری متناوب، آسیب‌های ناشی از خستگی عامل اصلی خرابی در اغلب قطعات صنعتی هستند. وجود ترک در اجزای مکانیکی سبب کاهش میزان بارپذیری و عمر خستگی و تضعیف آن‌ها می‌شود. شناسایی و داشتن درک صحیحی از این پدیده می‌تواند در جلوگیری و یا کاهش خرابی‌های ناشی از آن نقش به‌سزایی داشته باشد.

روش‌های متعددی برای مهار رشد ترک تحت بارگذاری‌های استاتیکی و خستگی وجود دارد و می‌توان به کمک جایگزینی اجزای آسیب دیده، کاهش بارهای اعمالی و یا کاستن نرخ رشد ترک به سطح قابل قبول، رشد ترک را مهار کرد. جایگزین کردن اجزای آسیب دیده معمولاً امری هزینه بردار است.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

M. R. Ayatollahi, S. M. J. Razavi, H. R. Chamani, Evaluation of stress intensity factors of a center cracked curved plate in the presence of crack flank stop drill holes, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 14, No. 9, pp. 133-139, 2014 (In Persian)

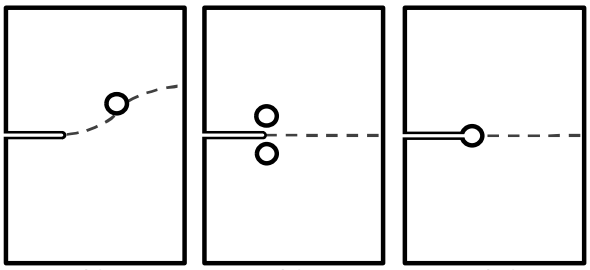
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.9.21.6]

همچنین کاستن میزان بار اعمالی نیز بعضاً مجاز نبوده و می‌تواند اثرات جانبی بر کارکرد صحیح قطعات داشته باشد. کاهش دادن نرخ رشد ترک و رساندن آن به سطحی قابل قبول، روشی اقتصادی در مواجهه با ترک‌های خستگی است که هزینه‌ها را کاهش داده و اثرات جانبی بر سایر اجزا ندارد. در مورد صفحات و ورق‌های ترک‌دار، روش‌های متنوعی برای کاهش نرخ رشد ترک و افزایش عمر سازه موجود است که از جمله آن می‌توان به جوش‌کاری محل ترک، استفاده از وصله‌های کامپوزیتی، دندانه‌گذاری اطراف ترک، ضربه‌زنی لیزری، ساچمه‌زنی و سوراخ متوقف‌کننده اشاره کرد [1،۲]. در این میان استفاده از سوراخ‌های متوقف‌کننده یکی از ساده‌ترین و در دسترس‌ترین روش‌ها برای کاهش ضریب شدت تنش در نوک ترک و در نتیجه کاهش نرخ رشد ترک است. در این روش حالت تکینگی تنش در نوک ترک حذف شده و تمرکز تنش اطراف ترک به مقدار قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند [3]. مهار رشد ترک با استفاده از سوراخ‌های متوقف‌کننده به علت کم هزینه بودن و در دسترس بودن آن، در صنایع هوایی، صنایع خطوط ریلی و صنایع کشتی‌سازی بسیار پر استفاده بوده است.

در شکل 1 سه روش مختلف ایجاد سوراخ متوقف کننده شامل سوراخ نوک ترک، سوراخ‌های دوطرف ترک و سوراخ منحرف کننده ترک به نمایش در آمده است. از جمله روش‌های کاربرد سوراخ متوقف کننده، می‌توان به سوراخ متوقف کننده نوک ترک اشاره کرد. در این روش با مشخص بودن موقعیت نوک ترک و سوراخ‌کاری آن، رشد ترک مهار می‌شود و ترک برای رشد مجدد نیاز به جوانه‌زنی مجدد از لبه سوراخ خواهد داشت [۴،5]. این عامل، خود باعث تأخیر و یا توقف رشد ترک در سازه می‌شود. استفاده از سوراخ‌هایی به صورت متقارن در دو طرف ترک، روش دیگری برای کاربرد روش مذکور بوده و با تأثیرگذاری بر روی میدان تنش نوک ترک، سبب کاهش نرخ رشد ترک و در نتیجه افزایش عمر سازه می‌شود. روش سوم در استفاده از سوراخ‌های متوقف کننده، سوراخ‌کاری در موقعیتی نزدیک به نوک ترک اما در راستایی غیر از راستای ترک اولیه است. در این روش ترک به سمت سوراخ منحرف شده و با افزایش طول، به داخل سوراخ نفوذ می‌کند [6]. در این روش نیز برای آغاز دوباره ترک از سوراخ متوقف کننده، به جوانه‌زنی ترک از لبه شیار نیاز است، که این عامل سبب افزایش عمر سازه ترک‌دار می‌شود.

در مقاله حاضر به بررسی روش سوراخ‌های دوطرف ترک پرداخته شده که در آن با ایجاد دو سوراخ متقارن در دو طرف خط ترک و در فاصله‌ای معین، نرخ رشد ترک خستگی کاهش یافته و عمر قطعه افزایش می‌یابد. در این زمینه، شین [2] با مقایسه چند روش مهار رشد ترک، استفاده از روش



شکل 1 روش‌های مختلف ایجاد سوراخ متوقف کننده؛ (الف) سوراخ نوک ترک، (ب) سوراخ‌های دوطرف ترک، (ج) سوراخ منحرف کننده ترک

سوراخ‌های دوطرف ترک را نسبت به روش‌های پر کردن فضای میان ترک با چسب و روش بیش‌بارگذاری، برای افزایش عمر خستگی سازه ترک‌دار توصیه کرده است. همچنین، لی [7] کارایی سوراخ‌های نوک ترک و دوطرف ترک را مقایسه و بیان کرده است که سوراخ‌های دوطرف ترک نسبت به سوراخ نوک ترک سبب کاهش بیشتر تمرکز تنش در نزدیکی نوک ترک می‌گردند.

تأثیر سوراخ‌های دوطرف ترک بر میزان بارپذیری قطعه و عمر خستگی را می‌توان با تغییرات ضرایب شدت تنش، مورد مطالعه قرار داد. عوامل متعددی بر مقدار تغییرات ضریب شدت تنش در حضور سوراخ‌های دوطرف ترک تأثیرگذارند؛ که از آن جمله می‌توان به موقعیت سوراخ متوقف کننده، اندازه قطر سوراخ متوقف‌کننده و ضخامت قطعه ترک‌دار اشاره کرد. از طرفی در نظر گرفتن شعاع انحنا برای قطعه ترک‌دار، سبب بوجود آمدن حالت تنشی متفاوت با حالت قطعه تخت می‌شود؛ لذا در تحلیل‌های عددی به بررسی کارایی روش سوراخ‌های دوطرف ترک در قطعات با شعاع انحناهای گوناگون پرداخته می‌شود. در مقاله حاضر با در نظر گرفتن چینش‌های متعدد سوراخ‌های متوقف‌کننده، میزان تغییرات ضریب شدت تنش تحت بارگذاری مود یک، مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای بررسی‌های صورت گرفته از تحلیل‌های عددی و روش اجزا محدود استفاده شده است.

2- تحلیل سطوح انحنادار با ترک مرکزی

در طراحی‌های صنعتی استفاده از اجزا با سطوح انحنادار امری معمول و متداول است. از جمله کاربردهای اجزا انحنادار می‌توان به سازه‌های هوایی، دریایی، صنایع خودروسازی و صنایع ساخت لوله و اتصالات اشاره کرد [8]. در تحقیقات صورت گرفته در گذشته، استفاده از سوراخ متوقف کننده تنها در سطوح مسطح مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. به علت کاربرد زیاد سطوح انحنادار در صنایع مختلف، بررسی اثربخشی روش‌های مهار رشد ترک در سطوح انحنادار از اهمیت خاصی برخوردار است.

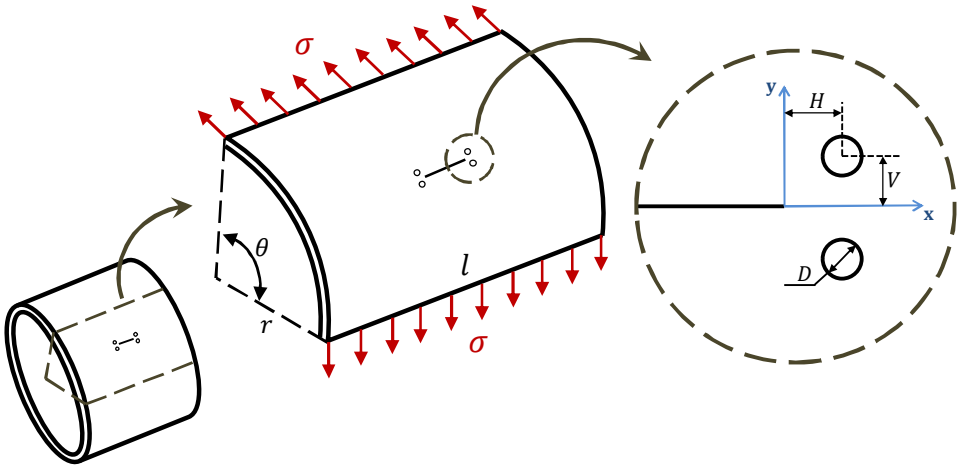
مکانیک شکست ارتجاعی خطی، روشی برای بیان توزیع تنش در نزدیکی نوک ترک و شیار بر حسب بارگذاری در دور دست، ابعاد و شکل هندسی ترک یا ناپیوستگی ترک‌گونه است [9].

مهم‌ترین اصل مکانیک شکست ارتجاعی خطی این است که توزیع تنش نزدیک یک ترک نوک تیز بر حسب یک کمیت به نام ضریب شدت تنش K، (با واحد $MPa.m^{0.5}$) قابل بیان است که به دو عامل تنش وارده به قطعه در دور دست (σ) و هندسه قطعه (شامل طول ترک a)، بستگی دارد. با استفاده از ضریب شدت تنش می‌توان تنش موضعی در نوک ترک را به تنش دور دست (مانند تنش اعمال شده به قطعه) مرتبط کرد [10].

در حضور سوراخ‌های دوطرف ترک، ضریب شدت تنش صفحه با ترک مرکزی مقادیر متفاوتی را تجربه می‌کند؛ بدین معنا که بسته به موقعیت افقی سوراخ‌ها نسبت به موقعیت نوک ترک، مقادیر ضرایب شدت تنش می‌تواند با کاهش و یا افزایش روبرو شود. فواصل عمودی و قطر سوراخ‌های متوقف‌کننده از جمله دیگر پارامترهای تأثیرگذار در ضرایب شدت تنش هستند. در شکل‌های 2 و 3 هندسه قطعه مورد بررسی، بارگذاری و شرایط مرزی اعمال شده بر آن به نمایش در آمده است. سه پارامتر فاصله افقی (H)، فاصله عمودی (V) و قطر سوراخ‌های دوطرف ترک (D)، به عنوان پارامترهای متغیر اصلی در مقاله حاضر در نظر گرفته شدند.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.9.21.6]



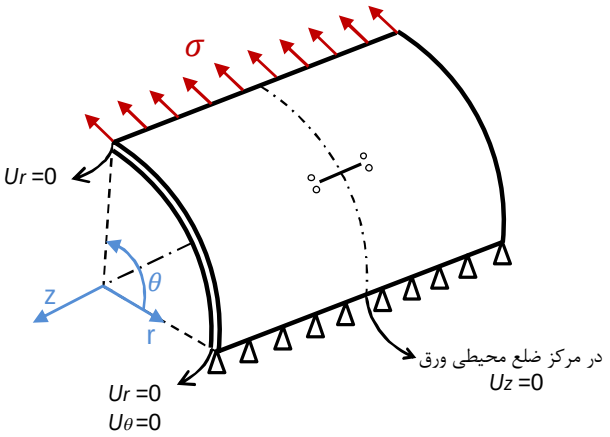
شکل 2 هندسه قطعه انحنادار با ترک مرکزی و سوراخ‌های دوطرف ترک

3- مدل‌سازی اجزا محدود

روش اجزا محدود، از جمله روش‌های معمول عددی در بررسی مسائل مکانیک شکست است. در مقاله حاضر، یک ورق انحنادار با ترک مرکزی در نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس مدل‌سازی شده و ضرایب شدت تنش در نوک ترک مستقیماً از نرم‌افزار استخراج می‌شود.

برای افزایش دقت تحلیل‌ها و همچنین بررسی تغییرات ضرایب شدت تنش در راستای ضخامت ورق، از مدل‌سازی سه بعدی برای تحلیل‌های عددی استفاده شده است. چگالی المان‌های مورد استفاده در نزدیکی نوک ترک و همچنین در لبه سوراخ‌های دوطرف ترک بیشتر در نظر گرفته شده است. در مدل‌سازی، از المان‌های شش وجهی با گره‌های میانی (المان‌های بیست گره‌ای C3D20R) استفاده شد. در اطراف نوک ترک از المان‌های تکین استفاده شد تا تکینگی تنش را به خوبی مدل‌سازی کند (شکل 4).

قطعه مورد تحلیل، یک ورق مستطیل شکل انحنادار با ترک مرکزی از جنس آلیاژ آلومینیوم 2024 با مدول الاستیسیته 74 GPa و ضریب پواسون 0/33 است. ورق مذکور به صورت برش قطاعی به زاویه $\theta = \pi/6$ از یک پوسته استوانه‌ای در نظر گرفته شده است (شکل 2). مطابق شکل 3، دو لبه بالا و پایین ورق انحنادار در راستای شعاعی مقید شده و بارکششی مرجع σ به میزان 1 MPa در راستای عمود بر اضلاع محیطی ورق وارد می‌شود.



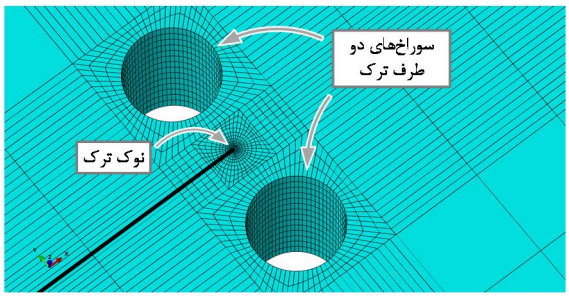
شکل 3 بارگذاری و شرایط مرزی مدل اجزا محدود

طول ضلع محیطی (l) و ضخامت مدل مورد بررسی، برابر با 0/5 m و 4 mm و همچنین طول ترک مرکزی، 30 mm در نظر گرفته شد. چهار پارامتر هندسی شعاع انحنای ورق (r)، فاصله افقی (H)، فاصله عمودی (V) و قطر سوراخ‌ها (D) در تحلیل‌های عددی به عنوان پارامترهای متغیر اصلی در نظر گرفته شدند. تحلیل‌ها برای شعاع‌های انحنای (r) برابر با 0/3، 1 و 4 متر، قطرهای سوراخ (D) برابر با 2، 3، 4 و 5 میلی‌متر، فواصل افقی از لبه سوراخ (H-D/2) برابر با 6-، 5-، 4-، 3-، 2-، 1-، 0، 1، 2، 3، 4، 5 و 6 میلی‌متر و فواصل عمودی از لبه سوراخ (V-D/2) برابر با 1، 2 و 3 میلی‌متر انجام گرفتند.

برای صحت‌سنجی تحلیل‌های اجزا محدود، ابتدا نتیجه عددی حاصل از تحلیل سه بعدی یک ورق مسطح با ترک مرکزی با مقدار تئوری آن مقایسه شد. در شکل 5 مدل مورد استفاده جهت صحت‌سنجی نمایش داده شده است. رک و کارترایت [11] رابطه (1) را برای محاسبه ضریب شدت تنش مود یک برای صفحه‌ای با ترک مرکزی، ارائه کرده‌اند؛

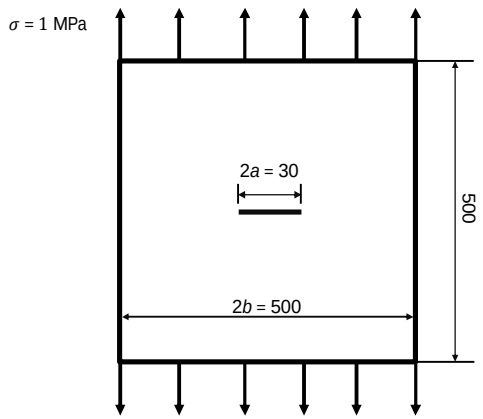
$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a}\left(\frac{1-\frac{a}{2b}+0.326\left(\frac{a}{b}\right)^2}{\sqrt{1-\frac{a}{b}}}\right) \quad (1)$$

که در آن $2a$ طول ترک، $2b$ عرض ورق و σ تنش اعمالی به قطعه است. مقایسه نتایج اجزا محدود و حل تئوری ضریب شدت تنش، در جدول 1 به نمایش در آمده است. اختلاف مقادیر بدست آمده برای ضریب شدت تنش مود یک، بسیار ناچیز است.



شکل 4 المان‌بندی مدل اجزا محدود

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.9.21.6]



شکل 5 مدل با عرض محدود دارای ترک مرکزی (ابعاد بر حسب mm)

جدول 1 ضریب شدت تنش ورق تخت با ترک مرکزی (واحدها بر حسب $MPa.mm^{0.5}$ هستند)

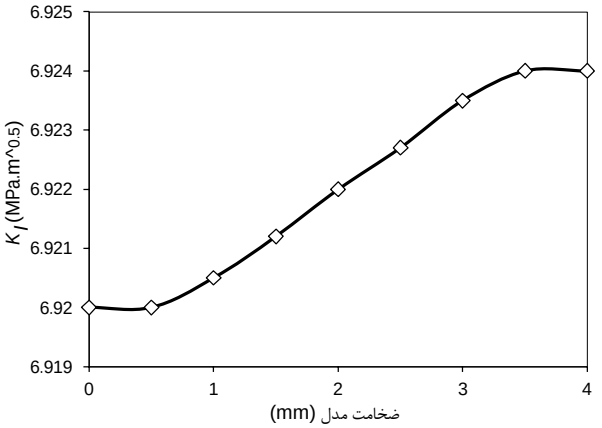
حل تئوری (رابطه 1)	حل عددی (اجزا محدود)	درصد اختلاف
6/876	6/878	0/03

4- نتایج تحلیل عددی

ضریب شدت تنش مود یک در قطعات ترک‌دار منحنی شکل به سه پارامتر طول ترک (a)، بارگذاری خارجی (σ) و شعاع انحنای قطعه (r) وابسته‌اند. بنابراین به صورت کلی می‌توان ضریب شدت تنش را به شکل زیر نوشت:

$$K_I=f\,(a,\sigma,r) \qquad (2)$$

به علت تقارن هندسی مدل مورد بررسی و همچنین تقارن بارگذاری، مقدار ضرایب شدت تنش در هر دو جبهه ترک یکسان بودند؛ لذا تنها به ذکر مقادیر ضریب شدت تنش یکی از جبهه‌ها اکتفا می‌شود. با توجه به انجام تحلیل‌های اجزا محدود در حالت سه‌بعدی، بررسی روند تغییرات ضرایب شدت تنش در راستای ضخامت ورق، امری شایان توجه است. شکل 6 به بررسی تغییرات مقادیر ضرایب شدت تنش در راستای ضخامت ورق انحنادار با شعاع انحنای 1m، پرداخته است. مشاهده می‌شود که در ورق انحنادار، مقادیر ضریب شدت تنش مود یک از شعاع انحنای داخلی به سمت شعاع خارجی، با افزایش روبرو می‌شود. لازم به ذکر است که به علت ضخامت کم ورق نسبت به اضلاع دیگر، تغییرات ضریب شدت تنش در ضخامت ورق بسیار کم است. بنابراین در کلیه بخش‌های بررسی نتایج عددی در این مقاله، از مقدار میانگین ضریب شدت تنش در راستای ضخامت ورق استفاده شده است.



شکل 6 تغییرات ضریب شدت تنش مود یک در راستای ضخامت ورق با شعاع انحنای r = 1m

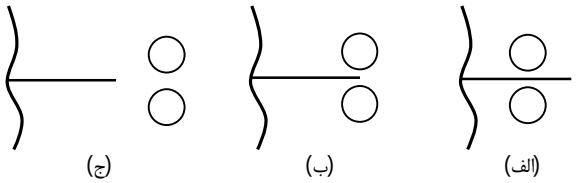
با در نظر گرفتن دستگاه مختصات محلی بر روی نوک ترک و قرار دادن راستای محور افقی آن در راستای ترک مرکزی، فواصل افقی سوراخ‌های دوطرف ترک را می‌توان به سه حالت مجزا دسته‌بندی کرد، فواصل افقی منفی، بدین معنا که سوراخ‌ها در پشت نوک ترک در دو طرف آن واقع شده‌اند؛ فواصل افقی صفر، به شکلی که خط عبوری از مراکز دو سوراخ، از نوک ترک عبور کند و فواصل افقی مثبت که در این حالت موقعیت افقی سوراخ‌ها در پیش روی ترک و در راستای رشد آن است. شکل 7 سه حالت فوق را برای فواصل افقی سوراخ‌های دوطرف ترک نمایش می‌دهد.

تحلیل‌های عددی برای بررسی تأثیر چینش سوراخ‌ها بر ضریب شدت تنش مود یک، در قطعه‌ای با شعاع انحنای 1 متر انجام شده است. با توجه به حالت اعمال بار به قطعه ترک‌دار آنگونه که در شکل 3 به نمایش در آمده است، بارگذاری در مدل، به صورت مود یک است. نتایج تحلیل اجزا محدود نیز چنین نتیجه‌ای را نمایش دادند به گونه‌ای که در کلیه مدل‌های مورد بررسی ضرایب شدت تنش مود دو و مود سه مقادیری بسیار ناچیز و تقریباً برابر با صفر را به خود اختصاص دادند. لذا در بررسی‌ها به تغییرات ضریب شدت تنش مود یک (K_I) بر اثر حضور سوراخ متوقف کننده پرداخته شده است.

شکل 8 تغییرات ضرایب شدت تنش مود یک نسبت به تغییر فواصل افقی، فواصل عمودی و قطر سوراخ‌ها را نمایش می‌دهد. در این شکل، K_{I_Plain} بیانگر ضریب شدت تنش در قطعه انحنادار با ترک مرکزی و در نبود سوراخ‌های دوطرف ترک است. با توجه به کردارهای شکل 8، هر چه موقعیت سوراخ‌ها به نوک ترک نزدیک‌تر باشد، تغییرات ضریب شدت تنش با شدت بیش‌تری اتفاق می‌افتد.

کمترین تأثیرپذیری ضریب شدت تنش در قطعه با سوراخ‌هایی به قطر 2mm مشاهده شد. در مورد قطعات با سوراخ‌های به قطر 2mm، بیشترین مقدار کاهش ضریب شدت تنش در فاصله افقی صفر (H=0) و به میزان 20% رخ داد همچنین بیشترین مقدار افزایش ضریب شدت تنش در فاصله افقی H=2mm و به میزان 15/8% بود. همچنین بیشترین تأثیرپذیری ضرایب شدت تنش در ورق ترمیم شده با سوراخ‌هایی به قطر 5mm مشاهده شد، که بیشترین مقدار کاهش ضریب شدت تنش در فاصله افقی صفر (H=0) و به میزان 37% و بیشترین افزایش ضریب شدت تنش در فاصله افقی H=3/5mm و به مقدار 35% بود. به همین ترتیب با کاهش فواصل عمودی مراکز سوراخ‌های دوطرف ترک (V)، ضرایب شدت تنش با شدت بیشتری تحت تأثیر این سوراخ‌ها قرار گرفتند.

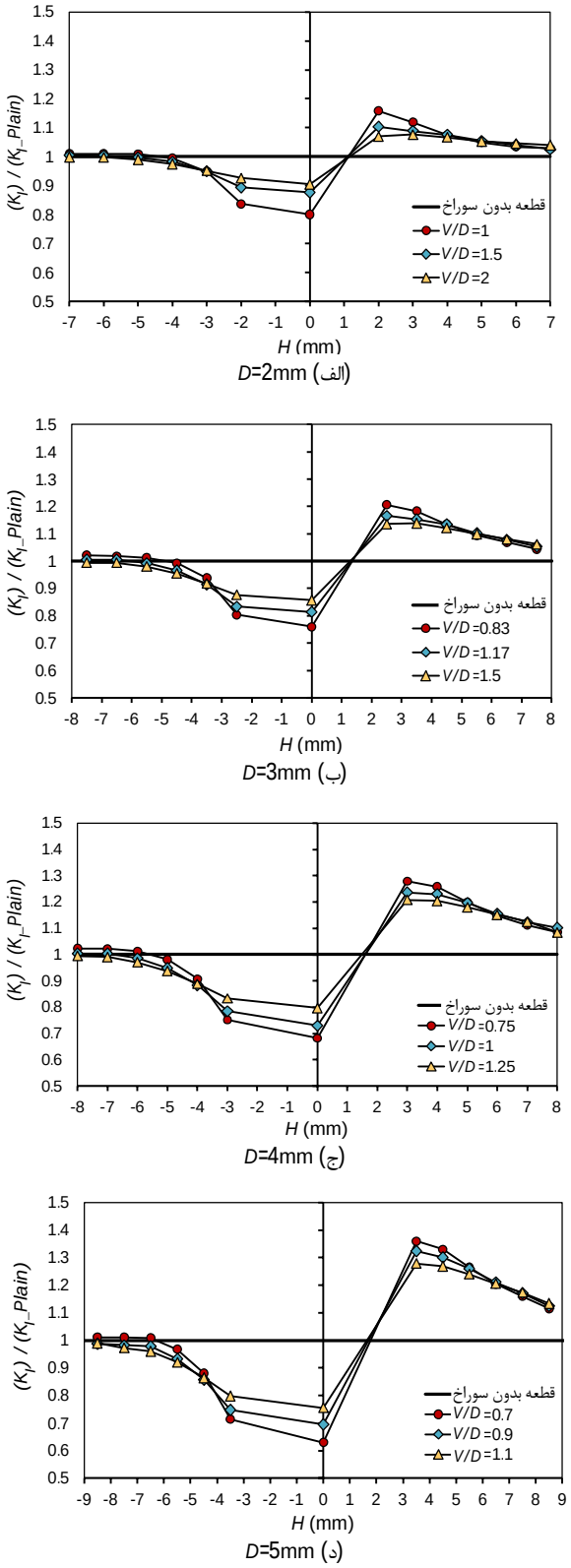
با توجه به نتایج ذکر شده، وجود سوراخ‌های دوطرف ترک در موقعیت‌های افقی منفی و صفر، سبب کاهش ضرایب شدت تنش و در نتیجه کاهش نرخ رشد ترک می‌شود. در مقابل، ایجاد سوراخ‌های دوطرف ترک در موقعیت‌های افقی مثبت، افزایش ضرایب شدت تنش را به همراه خواهد داشت که منجر به



شکل 7 موقعیت‌های افقی سوراخ‌های دوطرف ترک؛ (الف) فواصل افقی منفی، (ب) فواصل افقی صفر و (ج) فواصل افقی مثبت

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.9.21.6]



شکل 8 تغییرات ضریب شدت تنش مود یک نسبت به موقعیت افقی و عمودی سوراخ‌های متوقف‌کننده برای قطرهای متفاوت سوراخ‌های دو طرف ترک

افزایش نرخ رشد ترک می‌شود. در میان کلیه حالات بررسی شده فواصل افقی سوراخ‌ها، موقعیت افقی صفر، بیشترین کاهش ضریب شدت تنش را نتیجه داد. همچنین فاصله عمودی 1mm از نوک ترک تا لبه سوراخ‌های دوطرف (V-D/2=1mm) و قطر سوراخ 5mm سبب کاهش بیشتری در ضریب شدت تنش در قطعه شدند. روند تغییرات ضریب شدت تنش در کلیه حالات تقریباً یکسان بوده و تنها مقادیر ضرایب شدت تنش در آن‌ها متفاوت است.

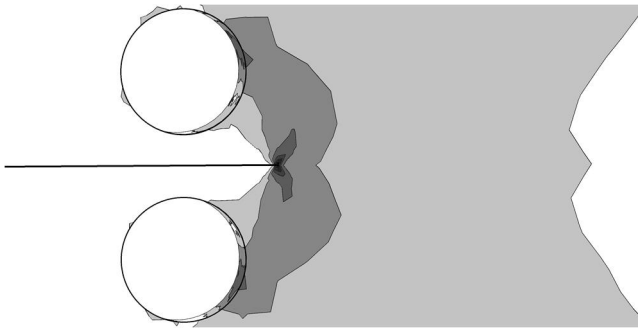
شکل 9 توزیع تنش در نزدیکی نوک ترک را برای سه حالت فاصله افقی منفی، صفر و مثبت نمایش می‌دهد. با توجه به شکل 9، ایجاد سوراخ‌های دوطرف ترک، سبب تغییر آرایش تنش در ناحیه نزدیک نوک ترک شده است. با سوراخ‌کاری دو طرف ترک، به دلیل ایجاد یک میدان تمرکز تنش جدید، میدان تنشی موافق و یا مخالف با میدان تنش اولیه ترک بوجود خواهد آمد که باعث افزایش و یا کاهش سطح تنش در ناحیه اطراف نوک ترک و ضریب شدت تنش حاصله خواهد شد.

افزایش سطح تنش در ناحیه اطراف نوک ترک باعث افزایش ضریب شدت تنش و نتیجتاً باعث افزایش نرخ رشد ترک می‌شود. از طرفی با افزایش نرخ رشد ترک خستگی، عمر خستگی سازه ترک‌دار کاهش می‌یابد. بنابراین با بررسی چینش‌های گوناگون سوراخ‌های دوطرف ترک، بهترین آرایش برای کاهش ضریب شدت تنش مود یک را می‌توان انتخاب کرد. در صورت ایجاد سوراخ‌های دوطرف ترک با فاصله افقی منفی (شکل 9- الف)، میدان تنش نوک ترک به سمت خلاف جهت رشد ترک متمایل شده و این عامل سبب کاهش ضرایب شدت تنش می‌شود. در صورت ایجاد سوراخ‌های دو طرف ترک در فاصله افقی صفر (شکل 9- ب)، کانتور تنش نزدیکی نوک ترک به شدت تحت تأثیر قرار گرفته و به سمت جبهه ترک متمایل می‌شود. در این حالت، میدان تنش اطراف نوک ترک بیشترین کاهش را تجربه می‌کند. در حالتی دیگر، ایجاد سوراخ‌های متوقف‌کننده در فواصل افقی مثبت و در جلوی جبهه ترک (شکل 9- ج) عاملی برای تشدید میدان تنش و افزایش تنش در نوک ترک است که ترک را به سمت خود متمایل می‌کند. انتظار می‌رود که با کاهش فواصل افقی و عمودی سوراخ‌های دوطرف ترک، تأثیرگذاری سوراخ بر میدان تنش اطراف ترک بیشتر شده و میدان تنش بیشتر به طرف سوراخ‌ها متمایل شود.

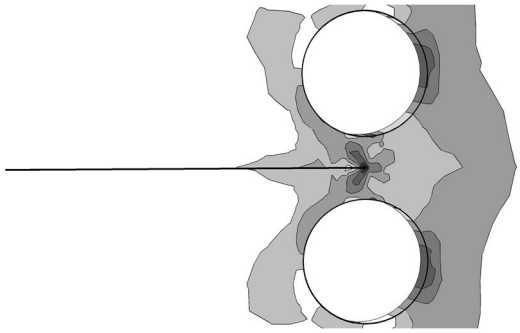
به علت بارگذاری مود یک، ترک در راستای اولیه خود رشد می‌کند. در صورتی که سوراخ‌های دوطرف ترک در مقابل جبهه ترک ($H > 0$) وجود داشته باشند، ترک از میان سوراخ‌ها رشد کرده و نهایتاً به طول بحرانی خود می‌رسد. در شکل 10 با ثابت نگه داشتن سوراخ‌های دوطرف ترک در موقعیت اولیه روبروی جبهه ترک (V=3/5mm و H=4/5mm)، تغییرات ضریب شدت تنش مود یک حین رشد ترک از میان سوراخ‌های دوطرف ترک به قطر D=5mm به نمایش در آمده است.

با رشد ترک، تغییرات ضریب شدت تنش، ترکیبی از سه حالت ذکر شده برای فواصل افقی خواهد بود. بدین معنا که تا هنگامی که ترک به ناحیه میانی دو سوراخ نرسیده است، تغییرات ضریب شدت تنش همچون تغییرات مذکور برای فواصل افقی مثبت، بوده و با افزایش طول ترک، ضریب شدت تنش افزایش می‌یابد (ناحیه 1). با رشد ترک و رسیدن آن به موقعیت میانی دو سوراخ، رفتار ضریب شدت تنش، همچون حالت مذکور برای فواصل افقی صفر خواهد بود. در ناحیه میانی دو سوراخ، ضریب شدت تنش با کاهش چشمگیری روبرو شده (ناحیه 2) و پس از عبور ترک از ناحیه میانی دو سوراخ به علت موقعیت افقی منفی سوراخ‌ها در وضعیت جدید، تغییرات ضرایب شدت تنش همچون حالت فاصله افقی منفی، می‌شود. در این حالت ضریب شدت تنش تا رسیدن به مقدار خود در حالت عدم حضور سوراخ‌های دوطرف ترک، افزایش می‌یابد (ناحیه 3). بنابراین در صورت وجود سوراخ‌های

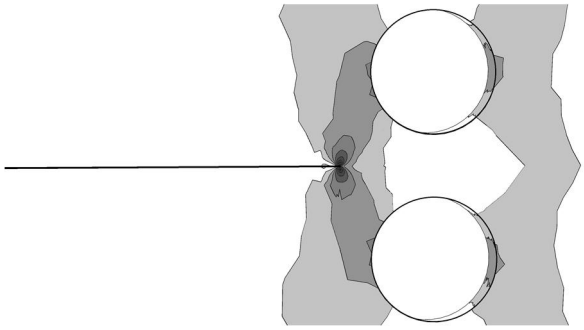
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.9.21.6]



(الف) D=4mm ، V= 3mm و H= -5mm



(ب) D=4mm ، V= 3mm و H= 0

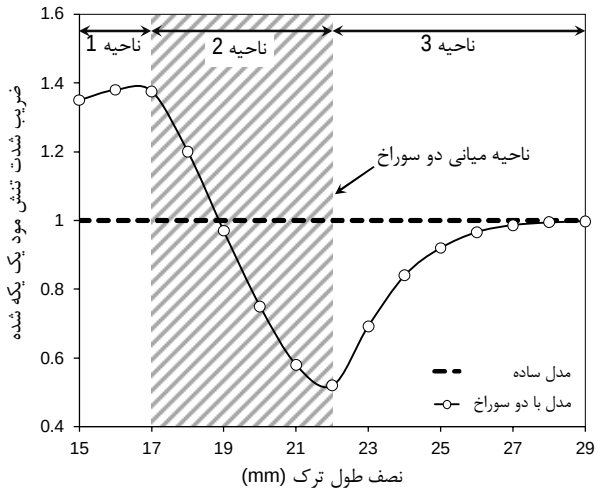


(ج) D=4mm ، V= 3mm و H= 5mm

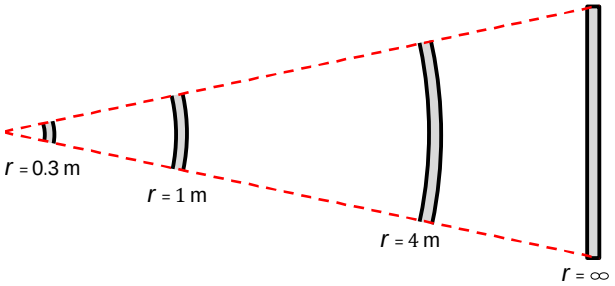
شکل 9 توزیع تنش اطراف نوک ترک در حضور سوراخ‌های جناح ترک

دوطرف ترک در مسیر رشد ترک، با رشد آن ضریب شدت تنش نسبت به قطعه بدون سوراخ متوقف کننده، ابتدا افزایش، سپس کاهش و دوباره تا رسیدن به مقدار مربوطه در قطعه بدون سوراخ افزایش می‌یابد. با توجه به شکل 10، میزان کاهش ضریب شدت تنش در ناحیه‌های 2 و 3 از مقدار افزایش ضریب شدت تنش در ناحیه یک بیشتر بوده و در کل وجود این سوراخ‌ها، سبب کاهش ضریب شدت تنش نسبت به قطعه بدون سوراخ می‌شوند.

در قسمت قبل بهترین آرایش سوراخ‌های دوطرف ترک برای به دست آوردن بیشترین کاهش ضریب شدت تنش، مشخص شد. حال با در نظر گرفتن آرایش مذکور (قطر سوراخ D = 5mm در موقعیت V =3/5mm و H =0)، به بررسی تأثیر شعاع انحنای ورق در مدل اجزا محدود روی میزان کارایی روش سوراخ متوقف کننده پرداخته می‌شود. برای این منظور، سه مقدار مختلف r=0/3, 1, 4m برای شعاع انحناهای مدل اجزا محدود لحاظ شده و نتایج با مدل بدون انحنا مقایسه می‌شود. سایر ابعاد مدل اجزا محدود، ثابت در نظر گرفته می‌شود. سطح مقطع عرضی مدل‌های انحنادار و تخت در شکل 11 نمایش داده شده است.



شکل 10 تغییرات ضریب شدت تنش حین رشد ترک در حضور سوراخ‌های دوطرف ترک به قطر D =5mm در موقعیت اولیه V =3/5mm و H =4/5mm



شکل 11 سطح مقطع عرضی مدل‌های اجزا محدود (θ = 30°)

مقادیر کاهش ضرایب شدت در چهار مدل مورد بررسی، در جدول 2 به نمایش در آمده است. ضرایب شدت تنش ارائه شده در جدول 2 به صورت میانگین مقادیر ضرایب شدت تنش در جبهه ترک هستند.

با توجه به یکسان بودن طول ترک، بارگذاری و طول اتصال در مقابل نوک ترک، علیرغم تغییر شعاع انحنا، مقادیر ضرایب شدت تنش از دامنه تغییرات وسیعی برخوردار نیست.

با توجه به نتایج جدول 2، قابل مشاهده است که در کلیه مدل‌ها درصد کاهش ضریب شدت تنش در حضور سوراخ‌های دوطرف ترک تقریباً برابر با مقدار 37% است. در مدل با شعاع انحنای r=0/3m، کوچک بودن عرض قطعه، سبب تأثیر بیشتر شرایط مرزی بر میدان تنش در نوک ترک شده و ضریب شدت تنش مود یک، با اندکی اختلاف، به میزان 38/2% کاهش یافته است. بنابراین، وجود انحنا در ورق‌های ترک‌دار، هر چند سبب تغییرات اندک در ضرایب شدت تنش می‌گردند، اما در کارایی روش سوراخ متوقف کننده تأثیر چندانی نخواهد داشت.

جدول 2 نتایج عددی بررسی تأثیر شعاع انحنا در کارایی روش سوراخ متوقف کننده (D=5mm، V =3/5mm و H =0)

شعاع انحنای مدل (m)	0/3	1	4	بینهایت (صفحه تخت)
ضریب شدت تنش در غیاب سوراخ‌های دوطرف ترک (MPa.mm$^{0.5}$)	7/42	6/92	6/88	6/88
درصد کاهش ضریب شدت تنش در حضور سوراخ‌های دوطرف ترک	38/2	37/03	37	37

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.9.21.6]

5- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در مقاله حاضر به مطالعه و بررسی تغییرات ضریب شدت تنش مود یک قطعه انحنادار با ترک مرکزی در حضور سوراخ‌های دوطرف ترک پرداخته شد. چینش‌های گوناگون برای موقعیت سوراخ‌های متوقف‌کننده دوطرف ترک در نظر گرفته شد. چهار پارامتر قطر سوراخ، فاصله افقی و فاصله عمودی لبه سوراخ تا نوک ترک و شعاع انحنای ورق ترک‌دار، به عنوان پارامترهای متغیر تحلیل‌های عددی در نظر گرفته شدند. نتایج حاصل از تحلیل‌های سه بعدی اجزا محدود، تطابق قابل قبولی با نتایج معادلات تئوری نشان دادند. در قطعاتی که سوراخ‌ها با قطر بزرگ‌تر و یا در فواصل افقی و عمودی کمتری نسبت به نوک ترک ایجاد شده بودند تأثیرگذاری سوراخ‌ها بر ضرایب شدت تنش بیشتر بودند. ایجاد سوراخ‌های دوطرف ترک در فواصل افقی مثبت نسبت به نوک ترک، سبب افزایش ضریب شدت تنش نسبت به حالت بدون سوراخ شد. اما ایجاد سوراخ‌های مذکور در فواصل افقی صفر و منفی، ضرایب شدت تنش را نسبت به حالت بدون سوراخ، کاهش داد. نتایج عددی نشان دادند که ایجاد سوراخ‌ها در دو طرف نوک ترک ($H = 0$)، باعث بیشترین کاهش ضریب شدت تنش در قطعه ترک‌دار می‌شود. همچنین بررسی نتایج اجزا محدود بیانگر این مطلب است که کارایی روش سوراخ‌های دوطرف ترک برای مهار رشد ترک در ورق‌های انحنادار تقریباً به میزان کارایی روش مذکور در ورق‌های تخت بوده و می‌توان به عنوان روشی ارزان و در دسترس، از آن بهره برد.

6- فهرست علایم

a	نصف طول ترک (mm)
b	نصف طول ضلع مدل تخت (mm)
D	قطر سوراخ‌های دوطرف ترک (mm)
H	فاصله افقی مراکز سوراخ‌های دوطرف ترک از نوک ترک (mm)
K	ضریب شدت تنش ($MPa.mm^{0.5}$)
K_{I_Plain}	ضریب شدت تنش مود یک برای قطعه بدون سوراخ ($MPa.mm^{0.5}$)
l	طول مدل (m)
r	شعاع انحنای مدل اجزا محدود (m)
SIF	ضریب شدت تنش ($MPa.mm^{0.5}$)
V	فاصله عمودی مراکز سوراخ‌های دوطرف ترک از نوک ترک (mm)

علائم یونانی

θ	زاویه قطاع مدل اجزا محدود
σ	تنش دوردست اعمالی بر قطعه انحنادار (MPa)

زیرنویس‌ها

I	مود بارگذاری یک

7- مراجع

[1] Z. Domazet, Comparison of fatigue crack retardation methods, *Journal of Engineering Failure Analysis,* Vol. 3, No. 2, pp. 137–147, 1996.

[2] C.S. Shin, C.M. Wang, P.S. Song, Fatigue damage repair: a comparison of some possible methods, *International Journal of Fatigue,* Vol. 18, No. 8, pp. 535–546, 1996.

[3] D. Broek, *Elementary engineering fracture mechanics,* London, Kluwer academic publishers, 2002.

[4] P.S. Song, Y.L. Shieh, Stop drilling procedure for fatigue life improvement, *International Journal of Fatigue,* Vol. 26, pp. 1333–1339, 2004.

[5] P. Pedersen, Design study of hole positions and hole shapes for crack tip stress releasing, *Structural and Multidisciplinary Optimization,* Vol. 28, pp. 243–251, 2004.

[6] C. Makabe, A. Murdani, K. Kuniyoshi, Y. Irei, A. Saimoto, Crack-growth arrest by redirecting crack growth by drilling stop holes and inserting pins into them, *Engineering Failure Analysis,* Vol.16, pp. 475–483, 2009.

[7] J. Lee, *Crack initiation in plates with multiple defects,* PhD Dissertation University of California, Los Angeles, 1996.

[8] R. Karimi, M. Mirzai, Evalution of thin wall pipe under Explosion loading using finite element method, Modares Mechanical Engineering, Vol. 9, No. 37, pp. 51-72, 2009. (In Persian)

[9] Z. Kaveh, M.R. Ayatollahi, Computation of mode I notch stress intensity factors in a V-notched TPB specimen, Modares Mechanical Engineering, Vol. 13, No. 5, pp. 74-82, 2013. (In Persian)

[10] F. Javidrad, *Fracture mechanic and its application in engineering,* Tehran: aerospace industries, 2004. (In Persian)

[11] D.P. Rooke, D.J. Cartwright, *Compendium of stress intensity factors,* HMSO Ministry of Defence, Procurement Executive, 1976.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.9.21.6]