

تخمین مسیر رشد ترک مورب در صفحه سوراخدار تحت بارگذاری چند محوره

کاظم رضاکاشی زاده*

مدرس، گروه مهندسی مکانیک، واحد قم، دانشگاه آزاد اسلامی، قم، ایران

* Kazem.kashyzadeh@gmail.com

چکیده

در مقاله حاضر، هدف اصلی مشخص نمودن مسیر رشد ترک مورب در صفحه سوراخدار تحت بارگذاری چند محوره است. بدین منظور یک صفحه مستطیلی شکل که دارای یک سوراخ مربعی در وسط آن می‌باشد، در نظر گرفته شده است. در گوشه سمت راست بالای این سوراخ، ترک اولیه‌ای به طول ۵ میلی‌متر و زاویه ۵۵ درجه در جهت پادساعتگرد وجود دارد. با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس ضریب شدت تنش ترک در موده‌های شکست اول و دوم بدست آمده و در پی آن با محاسبه شدت تنش معادل، زاویه رشد ترک در مرحله بعدی به روش ماکزیمم تنش محیطی بدست آمده است. این روند تا شکست کامل قطعه و یا از کارافتادگی آن ادامه یافته است.

کلیدواژگان

ترک مورب، رشد ترک، عمر خستگی، شدت تنش معادل، مود اول شکست، مود دوم شکست، نرم افزار آباکوس.

Path estimation of crack growth under multi-axial loading in a plate with center rectangular notch

Kazem Reza Kashyzadeh^{1*}

1- Department of Mechanical Engineering, Qom Branch, Islamic Azad University, Qom, Iran.

* Kazem.kashyzadeh@gmail.com

Abstract

In the present paper, the main purpose is estimated path of crack growth under multi-axial loading. So, used plate with a center rectangular notch that has an initial crack with 5 mm length and -55° angle. At the First, has been obtained stress intensity factors of failure mode I and II by using ABAQUS software. Next has been calculated equivalent stress intensity factor and estimated path of crack growth by using the maximum environmental stress method. This trend has been continued to finish failure.

Keywords

Angular crack, crack growth, fatigue, stress intensity factor, failure modes, multi-axial loading.

می‌توان سه عامل عمده را برای وقوع شکست خستگی ضروری دانست

که عبارتند از:

- ✓ تنش کششی حداکثری به مقدار بسیار زیاد
- ✓ تغییرات به حد کافی زیاد یا نوسانی در تنش وارده
- ✓ زیاد بودن چرخه‌های تنش وارده

علاوه بر این، متغیرهای دیگری مانند تمرکز تنش، خوردگی، دما، بار اضافی، ساختار متالوژیکی، تنش‌های باقیمانده و تنش‌های مرکب نیز وجود دارند که شرایط را برای ایجاد خستگی تقویت می‌کنند.

قاسمی و همکارانش به بررسی رشد ترک خستگی ورق‌های ترکدار آلومینیومی که توسط وصله‌های کامپوزیتی FML تعمیر شده بودند، به روش XFEM پرداخته‌اند. این روش یکی از قوی‌ترین روش‌های عددی بر پایه المان محدود بوده و با غنی‌سازی گره‌ها و افزایش درجات آزادی آن‌ها بطور مجازی و بدون نیاز به تطبیق مش با هندسه ناپیوستگی، رشد ترک و نیز انجام تحلیل را فراهم می‌سازد [۲].

نادری و همکارش به مدلسازی خودکار رشد ترک در مود مرکب و رشد ترک خستگی بدون مش بندی مجدد پرداخته است. در این تحقیق نیز از روش XFEM به منظور تخمین مسیر رشد ترک و نیز تحلیل آن، استفاده شده است. در ادامه برای محاسبه عمر خستگی قطعه بر حسب مقدار طول ترک، از قانون پاریس استفاده شده است [۳].

۱- مقدمه

از سال ۱۸۵۰ معلوم شده است که فلز تحت تنش تکراری یا نوسانی، در تنشی به مراتب کمتر از تنش لازم برای شکست در اثر یک مرتبه اعمال بار، خواهد شکست. شکست‌هایی که در شرایط بارگذاری دینامیک رخ می‌دهند، شکست‌های خستگی نامیده می‌شوند. با پیشرفت صنعت و افزایش تعداد وسایلی از قبیل خودرو، هواپیما، کمپرسور، پمپ، توربین و غیره که تحت بارگذاری تکراری و ارتعاشی هستند، خستگی بیشتر متداول شده و اکنون چنین برداشتی می‌شود که عامل حداقل ۹۰ درصد شکست‌های ناشی از دلایل مکانیکی در حین کار پدیده خستگی می‌باشد [۱].

دلیل عمده خطرناک بودن شکست خستگی این است که بدون آگاهی قبلی و قابل رویت بودن رخ می‌دهد. خستگی بصورت شکستی با ظاهر ترد، بدون هیچگونه تغییر شکل ناخالص در شکست نتیجه می‌شود. معمولاً سطح شکست در مقیاس میکروسکوپی بر جهت تنش کششی اصلی عمود است. همچنین سطح شکست خستگی از ظاهر سطح شکست تشخیص داده می‌شود. از یک ناحیه هموار حاصل از عمل ساییش با اشاعه ترک در مقطع و یک ناحیه ناهموار که در هنگام عدم تحمل بار توسط مقطع، در قطعه بصورت نرم شکسته شده، تشکیل می‌شود. غالباً پیشرفت شکست توسط یک دسته حلقه نشان داده می‌شود، که از نقطه شروع شکست به طرف داخل پیشرفت می‌کند.

۴- محاسبه شدت تنش معادل

با استفاده از حل مسئله در نرم‌افزار، در هر یک از مراحل مدل‌سازی رشد ترک، شدت تنش ترک در مودهای اول و دوم استخراج گردیده است و با داشتن این ضرایب، ضریب شدت تنش معادل بر اساس رابطه ارائه شده توسط Tanaka بصورت زیر قابل محاسبه است [۷]:

$$\Delta K_{eq} = [\Delta K_I^4 + 8\Delta K_{II}^4]^{0.25} \quad (1)$$

از آنجایی که نسبت تنش برابر صفر است، مقادیر ضریب شدت تنش مینیمم (به ازای بار صفر) برابر صفر است، لذا رابطه فوق را می‌توان بصورت زیر بازنویسی نمود [۷]:

$$K_{eq} = [K_I^4 + 8K_{II}^4]^{0.25} \quad (2)$$

۵- تعیین زاویه رشد ترک در مرحله بعدی

بطور کلی اگر رشد ترک را طی چندین مرحله پیوسته در نظر بگیریم، زاویه رشد ترک و نیز میزان رشد ترک (طول ترک) در هر یک از مراحل تا زمان شکست نهایی قطعه ممکن است متفاوت باشد. لذا دانستن زاویه و نیز میزان رشد ترک در هر یک از مراحل امری ضروری است. در روش‌های مختلف ارائه شده به منظور پیش‌بینی زاویه رشد ترک در مرحله بعدی، از اطلاعات موجود در مراحل قبلی استفاده می‌شود. در ادامه به بررسی چند روش پیش‌بینی زاویه رشد ترک پرداخته می‌شود که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از:

۱- معیارهای تنش جهت رشد ترک:

الف) ماکزیمم تنش اصلی (ب) ماکزیمم تنش محیطی

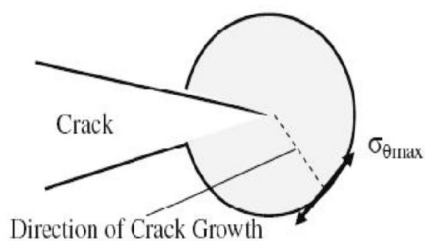
۲- ماکزیمم نرخ آزادسازی انرژی کرنشی

۳- مینیمم چگالی انرژی کرنشی

۴- ماکزیمم بازشدگی دهانه ترک

۵-۱- معیار ماکزیمم تنش محیطی جهت رشد ترک

اولین معیار در مورد مودهای ترکیبی شکست است که در سال ۱۹۶۳ توسط اردوگان تعریف شده و بیان می‌دارد که رشد ترک در جهتی رخ خواهد داد که ماکزیمم تنش محیطی وجود دارد [۸].

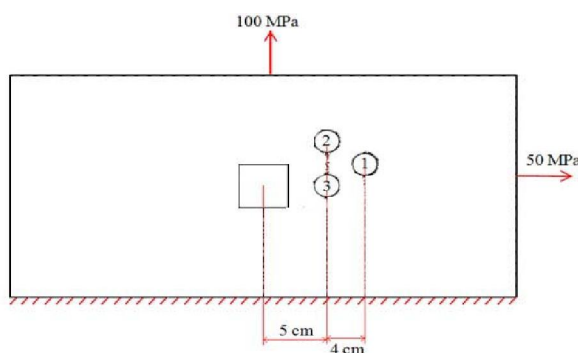


شکل ۲ طرحواره‌ای از معیار ماکزیمم تنش محیطی جهت پیش‌بینی زاویه رشد ترک [۸]

سمیع‌زاده و همکارانش عمر خستگی و رشد ترک در پره‌های فن روتور ژنراتور یک نیروگاه حرارتی را مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. در این کار به منظور شبیه‌سازی رشد ترک از نرم‌افزار France 3D استفاده شده است [۴].

۲- تعریف مسئله و هندسه

یک صفحه مستطیلی با ابعاد 40cm*20cm دارای سه سوراخ هر یک به قطر 2cm است. در مرکز این صفحه، مربعی به ضلع 4cm بریده شده است. فاصله عمودی سوراخ ۲ و ۳ برابر با 4cm و فاصله عمودی سوراخ ۱ و ۲ برابر با 2cm است. ضخامت صفحه 1cm بوده و نسبت تنش برابر صفر است. صفحه از جنس فولاد فریتی-پرلیتی است. هندسه صفحه همراه با بارهای وارده و شرایط مرزی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱ هندسه مسئله به همراه بارگذاری‌ها و شرایط مرزی

در مربع داخلی و در گوشه راست بالا ترکیبی با اندازه اولیه 5mm در زاویه 55- درجه وجود دارد.

۳- خواص مکانیکی و خستگی قطعه

جنس قطعه AISI-8620 در نظر گرفته شده است که نوعی فلز فریتی-پرلیتی است و خواص مکانیکی آن در جدول ۱ قابل مشاهده است [۵].

جدول ۱ خواص مکانیکی فلز فریتی-پرلیتی AISI-8620 [۵]

Properties	Metric
Density	7.85gr/cm ³
Tensile Strength	530Mpa
Yield Strength	385Mpa
Elastic Modulus	190-210Gpa
Bulk Modulus	140Gpa
Shear Modulus	80Gpa
Poisson's Ratio	0.27-0.30
Hardness Rockwell B	80

ثابت مربوط به رابطه پاریس ($\frac{da}{dN} = CAK^m$) بصورت زیر استخراج شده- اند [۶]:

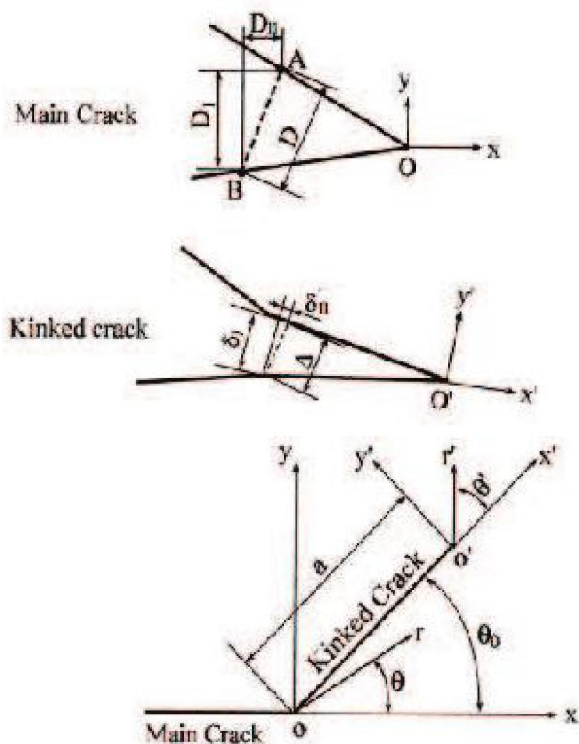
➤ ثابت اول رابطه پاریس

$$C = 6.9e - 12 \text{ Mpa}\sqrt{m}$$

➤ ثابت دوم رابطه پاریس

$$m = 3.0$$

در شکل‌های زیر ترک اصلی (Main crack) و شاخه ترک (Kinked crack) (Kinked crack می‌باشد [۱۲].



شکل ۵ طرحواره‌ای از معیار بازشدگی ترک و نیز مشخص نمودن ترک اصلی و شاخه آن [۱۲]

معیارهای دیگری نیز جهت پیش‌بینی زاویه رشد ترک وجود دارند مثل معیار انتگرال I و ... در این مقاله پس از تعیین مقادیر ضریب شدت تنش در هر مرحله از پیشروی ترک، می‌توان با استفاده از رابطه زیر (استخراج شده از روش معیار ماکزیمم تنش محیطی: با برابر صفر قرار دادن عبارت مشتق تنش محیطی نسبت به زاویه θ) و بسته به علامت ضریب شدت تنش مود دوم، زاویه رشد ترک در مرحله بعد بدست می‌آید. این زاویه در واقع زاویه بین ترک کنونی و جهت رشد ترک آتی است [۸].

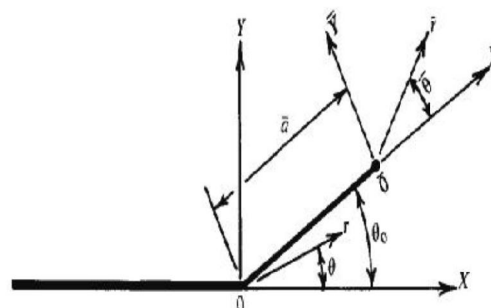
$$\theta_0 = 2 \tan^{-1} \left[\frac{K_{II}}{4K_{I1}} - \frac{1}{4} \sqrt{\left(\frac{K_{II}}{K_{I1}} \right)^2 + 8} \right] \quad \text{for } K_{II} > 0 \quad (3)$$

$$\theta_0 = 2 \tan^{-1} \left[\frac{K_{II}}{4K_{I1}} + \frac{1}{4} \sqrt{\left(\frac{K_{II}}{K_{I1}} \right)^2 + 8} \right] \quad \text{for } K_{II} < 0 \quad (4)$$

با جمع نمودن مقادیر زوایای رشد ترک در مراحل گذشته، زاویه کلی لبه ترک نسبت به محور مختصات عمومی در هر مرحله حاصل می‌گردد.

۲-۵- معیار ماکزیمم نرخ آزاد سازی انرژی کرنشی جهت رشد ترک

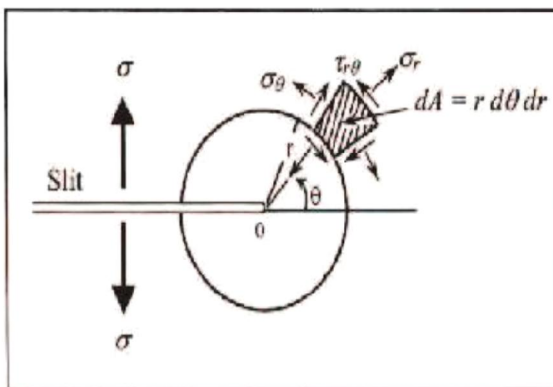
هوسان و همکارانش در سال ۱۹۷۴ معیار ماکزیمم نرخ آزاد سازی انرژی کرنشی را برای مواد همگن ارائه کردند. که مضمون آن چنین است [۹]: ترکی که در جهت بارهای مرکب قرار دارد در جهتی رشد خواهد کرد که آزاد سازی انرژی کرنشی بیشینه است و همچنین ترک زمانی رشد خواهد کرد که ماکزیمم نرخ آزاد سازی انرژی کرنشی به یک مقدار بحرانی برسد.



شکل ۳ طرحواره‌ای از روش ماکزیمم نرخ آزادسازی انرژی جهت پیش‌بینی زاویه رشد ترک [۹]

۳-۵- معیار مینیمم چگالی کرنشی جهت رشد ترک

اولین بار توسط شی و همکارانش برای مواد همگن معرفی گردید. بدین ترتیب که ترک در جهتی رشد خواهد کرد که چگالی انرژی کرنشی در آن راستا به حداقل مقدار خود برسد [۱۰].



شکل ۴ طرحواره به همراه المان در معیار مینیمم چگالی کرنشی جهت تعیین زاویه رشد ترک [۱۰]

در ادامه بوچارد در سال ۲۰۰۳ روشی برای یافتن زاویه رشد ترک بر اساس معیار چگالی انرژی کرنشی ارائه داده که نیاز به محاسبه ضرایب شدت تنش ندارد [۱۱].

۴-۵- معیار بازشدگی دهانه ترک

در سال ۲۰۰۰ این معیار (CTOD) برای اولین بار ارائه گردید که در ادامه به بیان روابط آن پرداخته می‌شود.

23	-3.1	26.399	-12.081	6.5711	-3.1162
28	-3.1	28.103	-12.987	6.8007	-3.1195
33	-3.11	29.026	-13.892	6.9893	-3.1216
38	-3.12	28.996	-14.799	7.1358	-3.1228
43	-3.12	28.248	-15.801	7.2712	-3.1235

با توجه به روابط بیان شده، می‌توان ضریب شدت تنش معادل را برای این مسئله بصورت زیر نوشت:

$$K=0.0325*a+5.8549$$

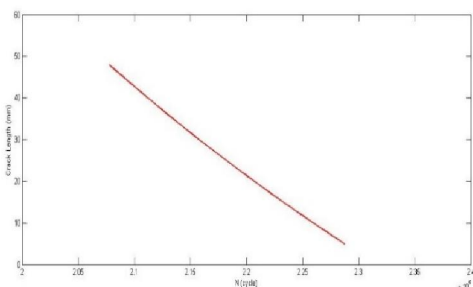
(۵)

بر اساس رابطه پاریس:

$$\frac{da}{dN} = C\Delta k^m \rightarrow dN = \frac{da}{C\Delta k^m} \rightarrow N = \int_{a_0}^{a_{cr}} \frac{da}{C(0.0325a+5.8549)^m}$$

(۶)

عمر خستگی قطعه بر اساس طول ترک موجود در آن مطابق شکل ۷ بدست آمده است.



شکل ۷ نمودار طول ترک بر حسب عمر خستگی مربوط به صفحه سوراخدار بدون سوراخ متوقف کننده با وجود ترک مورب

۷- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، با استفاده از روش ماکزیمم تنش محیطی، زاویه رشد ترک مورب تحت بارگذاری چند محوری را در مرحله بعد بدست آورده و با ادامه دادن این روند در مراحل بعدی رشد ترک، مسیر رشد ترک در قطعه تخمین زده شده است. در طی گذشت مراحل اولیه دیده می‌شود که مود اول شکست غالب می‌شود بطوریکه پس از طی نمودن چندین مرحله از رشد ترک، با تقریب بسیار خوبی می‌توان از مود دوم شکست صرف نظر نمود. پس از آن، با استفاده از رابطه پاریس به محاسبه عمر خستگی قطعه بر حسب طول ترک پرداخته شده است.

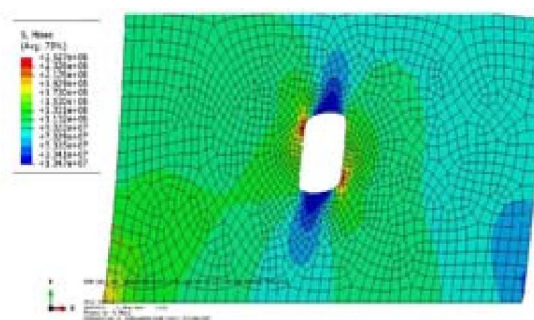
۸- مراجع

- [1] K. R. Kashyzadeh, A. Arghavan, "Study of the effect of different industrial coating with microscale thickness on the CK45 steel by experimental and finite element methods", strength of materials, Vol. 45, No. 6, 2013

۶- محاسبه تعداد سیکل خستگی

با داشتن ضریب شدت تنش معادل (ΔK_{eq}) و فرض مقدار رشد ترک مشخص Δa در هر مرحله، می‌توان با استفاده از رابطه پاریس تعداد سیکل مرتبط با این میزان رشد ترک را در هر مرحله محاسبه نمود. بدین ترتیب که هر چقدر طول ترک بزرگ‌تر باشد، آنگاه عمر خستگی کمتری را خواهد داشت و بالعکس هر چقدر طول ترک کوچک باشد، قطعه دارای عمر خستگی بیشتری خواهد بود.

در این قسمت صفحه سوراخدار بدون وجود ترک، تحت شرایط بارگذاری فوق‌الذکر قرار گرفته و پس از تحلیل استاتیکی، نقاط بحرانی بر اساس معیار تنش فون-مایز مشخص گردیده که احتمال ایجاد ترک و یا شکست در این نقاط بیشتر از دیگر نقاط می‌باشد. بدین ترتیب که توزیع تنش در قطعه بر اساس معیار فون-مایز در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶ کانتور تنش در قطعه سوراخدار بدون وجود سوراخ متوقف کننده و بدون ترک بر اساس معیار فون-مایز

بر اساس تحلیل استاتیکی انجام شده به منظور رشد ترک، شدت تنش-های مود اول و دوم استخراج گردیده و با استفاده از روابط بیان شده در قسمت‌های قبلی ضریب شدت تنش معادل و نیز زاویه رشد ترک در مرحله بعدی را محاسبه نموده و با رسم نمودار ضریب شدت تنش بر حسب طول ترک، معادله شدت تنش بر حسب طول ترک بدست آمده و در انتها با استفاده از رابطه خطی قانون پاریس و معادله بدست آمده و یک انتگرال‌گیری به محاسبه عمر خستگی قطعه بر اساس طول ترک پرداخته شده است. در جدول ۲ اطلاعات مربوط به تحلیل در نرم‌افزار و محاسبات مربوط به ضریب شدت تنش معادل و زاویه رشد ترک آورده شده است.

جدول ۲ اطلاعات استخراجی از نرم‌افزار و محاسبات مربوط به صفحه سوراخدار بدون سوراخ متوقف کننده با وجود ترک مورب

Total length crack	Angle crack	KI	KII	K(eq)	Calculated angle
5	-55	12.829	-12.060	6.0368	-3.0889
8	-3.09	14.980	-14.166	6.5404	-3.1034
13	-3.1	21.107	-9.5265	5.8504	-3.1011
18	-3.1	24.089	-11.109	6.2923	-3.1113

- [۲] فه آشنای قاسمی، ع. کمالی انارکی، الفد ح روزبهانی، "استفاده از روش *XFEM* در بررسی رشد ترک خستگی ورق‌های ترک‌دار آلومینیومی تعمیر شده توسط وصله‌های کامپوزیتی *FML*"، ماهنامه علمی پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۳، شماره ۱۴، ۱۳۹۲
- [۳] ر. نادری، ع. خادم الرسول، "مدلسازی خودکار رشد ترک در مود مرکب و رشد ترک خستگی بدون مش بندی مجدد"، مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها، دوره ۱، شماره ۱، ۱۳۹۰
- [۴] م. سمیع‌زاده، ح. فرهنگ، ن. سلطانی، "بررسی شکست خستگی و عمر رشد ترک در پره-های فن روتور ژنراتور یک نیروگاه حرارتی"، نشریه علمی پژوهشی مکانیک هوافضا، جلد ۲، شماره ۱، ۱۳۸۵
- [5] AISI 8620 Alloy Steel (UNS G86200), metals and materials for research & industry, www.goodfellow.com, 2015
- [6] R. Stephens, A. Fatemi, H. O. Fuchs, "Metal Fatigue in Engineering", Wiley Publisher, Second Edition, 2000
- [7] M. A. Meggiolaro, A. C. O. Miranda, J. T. P. Castro, L. F. Martha, "Stress intensity factor equations for branched crack growth", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 72, 2005
- [8] P. Paris, F. Erdogan, "A critical analysis of crack propagation laws", Journal Fluids Engineering, Vol. 85, No. 4, 1963
- [9] M. A. Hussain, N. Y. Watervliet, "Strain energy release rate for a crack under combined Mode I and Mode II", ASTM, 1974
- [10] G. C. Sih, "Strain energy density factor applied to mixed mode crack problems", International Journal Fracture Mechanics, Vol. 10, 1974
- [11] P. O. Bouchard, F. Bay, Y. Chasted, "Numerical modeling of crack propagation automatic remeshing and comparison of different criteria", Computer Methods in Mechanics and Engineering, Vol. 92, 2003
- [۱۲] غ. فرهی، مکانیک شکست، دانشگاه بوعلی‌سینا همدان، چاپ دوم، تابستان ۱۳۸۷