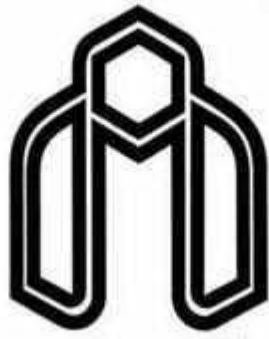


صلى الله عليه وسلم



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک

تحلیل عددی و تجربی کنترل مسیر رشد ترک خستگی در یک صفحه تحت
بارگذاری سیکلی تک محوره توسط ایجاد گشودگی

نگارش:

هادی داستانی

استاد راهنما:

دکتر محمود شریعتی

تابستان ۹۲

به پاس تعبیر عظیم و انسانی شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگان

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امید بخش وجودشان که در این سردترین روزگار ان بهترین پشتیبان است

به پاس قلب های بزرگشان که فریاد رس است و سرکردانی و ترس در پناهمشان به شجاعت می گراید

و به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند

این مجموعه را به پدر و مادر عزیزم تقدیم می کنم

تشکر و قدردانی

راز و رمز پویای علم و کشف معانی بدیع و تجلی جلوه‌های شهودی معرفت کیمیایی است که آسمان علم به برکت سیما و سیره ی نورانی نبی مکرم صلی الله علیه و آله و سلم، انسان دربند خاک را به معراج حضور می خواند .

و چه خرم علمی که از چشمه ی معارف سیراب شود و چه زیبا دانشی که قبای پرنیانش به عطر و بوی گلستان محمدی معطر شود و چه معماری باشکوهی، بنایی که سنگ هویت و فرهنگ آن ریشه درمدینه النبی بیابد.

و امروز کاخ آباد علم به سروش معنوی و مفهوم پیام او بیش از پیش محتاج راهنمایی است که علاوه بر حفظ آبادانی آن در راه اعتلای آن به فرزندان خویش محبت نمایند.

با تقدیر و تشکر شایسته از استاد فرهیخته و فرزانه جناب آقای دکتر محمود شریعتی که با نکته های دلاویز و گفته‌های بلند ، صحیفه های سخن را علم پرور نمود و همواره راهنما و راه گشای نگارنده در اتمام واکمال پایان نامه بوده است. و با یاری‌ها و راهنمایی‌های بی چشمداشت ایشان که بسیاری از سختی‌ها را برایم آسان تر نمودند.

چکیده

در این تحقیق به تحلیل عددی و تجربی رشد ترک در یک صفحه تحت بارگذاری خستگی تک محوره پرداخته شده است. تحلیل عددی این تحقیق با استفاده از نرم افزار آباکوس انجام شده و بارگذاری خستگی در این تحقیق با استفاده از قانون پاریس شبیه سازی شده است. برای پیش بینی مسیر رشد ترک معیار ماکزیمم تنش مماسی استفاده شده است که این معیار جامع ترین معیار در این زمینه می-باشد. بر اساس این معیار مسیر رشد ترک همواره در امتداد ماکزیمم تنش مماسی است. عوامل موثر در رشد ترک توسط تحلیل عددی بررسی و راهکارهایی برای کنترل رشد ترک بیان شده است سپس نتایج بدست آمده از تحلیل عددی با نتایج تجربی مقایسه شده است. آزمایش‌های تجربی این تحقیق با استفاده از دستگاه سرو هیدرولیک ۸۸۰۲ صورت گرفته است. نتایج عددی و تجربی نزدیکی خوبی با یکدیگر دارند. ورق‌های مستطیلی شکل دارای طول و عرض به ترتیب ۱۰۰ میلی‌متر و ۱۵۰ میلی‌متر و جنس ورق‌ها St37 با ضخامت ۲ میلی‌متر و SS304 با ضخامت ۰.۹ میلی‌متر و گشودگی ایجاد شده در ورق‌ها دایره‌ای شکل می‌باشد.

کلید واژه: بارگذاری سیکلی، رشد ترک، قانون پاریس، گشودگی، ورق فلزی

فهرست مطالب

۱	فصل اول: بارگذاری خستگی.....
۲	۱-۱-مقدمه
۳	۲-۱-چرخه های تنش.....
۵	۳-۱-خصوصیات ساختاری خستگی
۶	۴-۱-اثر سطح و خستگی
۷	۵-۱-اثر متغیرهای متالورژیکی بر خستگی
۹	فصل دوم: رشد ترک خستگی
۱۰	۱-۲- تاریخچه ای در مورد رشد ترک خستگی
۱۰	۲-۲- عوامل اصلی شکست
۱۳	۳-۲- مقدمه ای بر کنترل رشد ترک
۱۴	۴-۲- قانون پاریس
۱۷	فصل سوم: تحلیل عددی
۱۸	۱-۳-مقدمه ای بر نرم افزار آباکوس
۱۹	۲-۳- بخش های مختلف آباکوس
۲۰	۳-۳- مبانی نرم افزار آباکوس
۲۰	۳-۳-۱- پیش پردازش
۲۰	۳-۳-۲- پردازش
۲۱	۳-۳-۳- پس پردازش
۲۱	۴-۳- معیارهای پیش بینی مسیر رشد ترک
۲۲	۳-۴-۱- معیار حداکثر تنش مماسی
۲۳	۳-۴-۲- معیار حداکثر نرخ آزادسازی انرژی
۲۵	۳-۵- روش المان محدود گسترش یافته (XFEM)

۲۷	۳-۶- بررسی عوامل موثر بر رشد ترک
۲۹	۳-۶-۱- تاثیر شعاع گشودگی
۳۳	۳-۶-۲- تاثیر مختصات مرکز گشودگی
۳۳	۳-۶-۱- تاثیر فاصله افقی مرکز گشودگی
۳۶	۳-۶-۲- تاثیر فاصله عمودی مرکز گشودگی
۳۸	۳-۶-۳- تاثیر طول ترک
۳۸	۳-۶-۴- تاثیر نیروی وارد شده به قطعه
۴۰	۳-۶-۵- تاثیر افزایش تعداد گشودگی
۴۵	فصل چهارم: آزمایش‌های تجربی
۴۶	۴-۱- مقدمه‌ای درباره آزمایش‌های تجربی
۴۶	۴-۲- دستگاه آزمایش
۴۷	۴-۳- قطعات مورد آزمایش
۴۹	۴-۴- نحوه ایجاد ترک در صفحات
۵۱	۴-۵- نحوه قرار گرفتن صفحات در دستگاه
۵۲	۴-۶- بارگذاری وارده بر صفحات
۵۳	۴-۷- رشد ترک تحت بارگذاری سیکلی
۵۳	۴-۷-۱- تاثیر شعاع گشودگی بر مسیر رشد ترک
۵۶	۴-۷-۲- تاثیر افزایش نیرو
۵۹	۴-۷-۳- تاثیر فاصله عمودی گشودگی تا نوک ترک
۶۱	۴-۷-۴- بررسی جنس و ضخامت صفحات
۶۵	فصل پنجم: مقایسه نتایج تحلیل عددی و تجربی
۶۶	۵-۱- مقدمه
۶۶	۵-۲- بررسی و مقایسه نتایج تحلیل عددی و تجربی
۷۱	۵-۳- تاثیر نقاط ضعف در گشودگی
۷۳	فصل ششم: نتایج و پیشنهادات

۶-۱- نتایج ۷۴

۶-۲- پیشنهادات ۷۶

فهرست مراجع ۷۹

فهرست جداول

جدول ۴-۱	خواص مکانیکی فولاد SS304	۴۸
جدول ۴-۲	خواص شیمیایی فولاد SS304	۴۸
جدول ۴-۳	خواص مکانیکی فولاد ST37	۴۹
جدول ۴-۴	ترکیب شیمیایی فولاد St37	۴۹

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ ۱ چرخه کاملاً معکوس تنش سینوسی ۴
- شکل ۱-۲ ۲ چرخه‌های تنش تکراری ۴
- شکل ۲-۱ ۱ منحنی چگونگی رشد ترک خستگی ۱۴
- شکل ۳-۱ ۱ ناحیه تنش در نوک ترک در مختصات قطبی ۲۲
- شکل ۳-۲ ۲ صفحه مستطیل شکل دارای ترک تحت بارگذاری (ابعاد بر حسب میلیمتر) ۲۷
- شکل ۳-۳ ۳ مسیر رشد ترک در صفحه تحت بارگذاری خستگی ۲۸
- شکل ۳-۴ ۴ تاثیر میدان تمرکز تنش گشودگی بر ناحیه تنش نوک ترک ۳۰
- شکل ۳-۵ ۵ تاثیر شعاع گشودگی بر تغییر مسیر رشد ترک ۳۱
- شکل ۳-۶ ۶ تاثیر شعاع گشودگی بر اندازه میدان تمرکز تنش ایجاد شده ۳۲
- شکل ۳-۷ ۷ فاصله عمودی و فاصله افقی مرکز گشودگی ۳۳
- شکل ۳-۸ ۸ تاثیر فاصله ی افقی مرکز گشودگی بر مسیر رشد ترک ۳۴
- شکل ۳-۹ ۹ تاثیر فاصله افقی مرکز گشودگی نسبت به ترک بر مقدار تنش حاصل از گشودگی ۳۵
- شکل ۳-۱۰ ۱۰ تاثیر افزایش فاصله عمودی مرکز گشودگی بر میدانهای تنش ایجاد شده ۳۶
- شکل ۳-۱۱ ۱۱ تاثیر فاصله عمودی گشودگی نسبت به ترک در تغییر مسیر رشد ترک ۳۷
- شکل ۳-۱۲ ۱۲ تاثیر مقدار نیروی وارده بر قطعه بر مسیر رشد ترک ۳۹
- شکل ۳-۱۳ ۱۳ تاثیر افزایش نیرو بر میدان تمرکز تنش اطراف گشودگی ۴۰
- شکل ۳-۱۴ ۱۴ مسیر رشد ترک در صفحه تحت بارگذاری سیکلی و دارای دو گشودگی ۴۱
- شکل ۳-۱۵ ۱۵ تاثیر گشودگی اول در مسیر رشد ترک در صفحه دارای دو گشودگی ۴۲
- شکل ۳-۱۶ ۱۶ تاثیر گشودگی دوم بر مسیر رشد ترک در صفحه دارای دو گشودگی ۴۳
- شکل ۴-۱ ۱ دستگاه سروهیدرولیکی INSTRON8802 ۴۶
- شکل ۴-۲ ۲ فولاد SS304 به ضخامت ۰.۹ میلیمتر ۴۷
- شکل ۴-۳ ۳ فولاد St37 به ضخامت ۰.۹ میلیمتر (ابعاد بر حسب میلیمتر) ۴۸
- شکل ۴-۴ ۴ نمونه ترک ایجاد شده با وایرکات در صفحه فلزی ۵۰
- شکل ۴-۵ ۵ نحوه قرار گرفتن صفحات تحت آزمایش در فک‌های بالا و پایین دستگاه ۵۱
- شکل ۴-۶ ۶ نمودار لگاریتمی تنش و عمر خستگی ۵۳
- شکل ۴-۷ ۷ تاثیر شعاع گشودگی در تغییر مسیر رشد ترک ۵۵
- شکل ۴-۸ ۸ تاثیر افزایش مقدار نیرو بر تغییر مسیر رشد ترک در صفحه دارای گشودگی ۵۷
- شکل ۴-۹ ۹ ترک ثانویه و تاثیر آن بر تغییر مسیر رشد ترک اولیه ۵۸

- شکل ۴-۱۰ تاثیر فاصله عمودی مرکز گشودگی تا نوک ترک ۶۰
- شکل ۴-۱۱ محل ایجاد ترک ثانویه در صفحه دارای دو گشودگی ۶۱
- شکل ۴-۱۲ رشد ترک در صفحه SS304 با ضخامت ۱ میلیمتر تحت بارگذاری سیکلی ۶۲
- شکل ۵-۱ مقایسه تحلیل عددی و تجربی رشد ترک در صفحه SS304 با ضخامت ۱ میلیمتر و تحت بارگذاری سیکلی.. ۶۷
- شکل ۵-۲ مقایسه تحلیل عددی و تجربی رشد ترک در صفحه St37 با ضخامت ۲ میلیمتر و تحت بارگذاری سیکلی ... ۶۸
- شکل ۵-۳ تاثیر افزایش شعاع گشودگی در تحلیل عددی و تجربی برای صفحه St37..... ۷۰
- شکل ۵-۴ تاثیر خراشیدگی‌های حاصل از سوراخکاری در محیط گشودگی بر مسیر رشد ترک و ایجاد ترک ثانویه..... ۷۲

فصل اول

بارگذاری حسّتی

از سال ۱۸۵۰ معلوم شده است که فلز تحت تنش تکراری یا نوسانی، در تنشی به مراتب کمتر از تنش لازم لازم برای شکست در اثر یک مرتبه اعمال بار، خواهد شکست. شکست‌هایی که در شرایط بارگذاری دینامیکی رخ می‌دهند شکست‌های خستگی نامیده می‌شوند. که این نامگذاری احتمالا مبتنی بر این دلیل است که به طور کلی مشاهده می‌شود شکست‌ها فقط پس از یک دوره کار زیاد رخ می‌دهند. هیچگونه تغییر واضحی در ساختار فلزی که به علت خستگی می‌شکند وجود ندارد تا بتوان به عنوان مدرکی برای شناخت دلایل شکست خستگی از آن استفاده کرد. 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 برداشت می‌شود که عامل حداقل ۹۰ درصد از شکست‌ها، ناشی از شکست خستگی می‌باشد.

آزمایش‌های انجام شده بر روی مواد با مدول الاستیسیته مختلف بیانگر این موضوع است که گرادیان و مسیر رشد ترک در نمونه‌های تحت آزمایش به میدان تنش در اطراف نوک ترک بستگی دارد. در مکانیک شکست الاستیک خطی^۱ (LEFM)، میدان تنش در مجاورت نوک ترک به طول ترک و تنش اعمال شده وابسته می‌باشد. در حالت الاستیک اندازه میدان‌های تنش، کرنش و تغییر مکان را می‌توان به کمک یک پارامتر مشخصه بدست آورد. رشد ترک در سازه‌های الاستیک بستگی به میزان این پارامتر دارد. این پارامتر در علم مکانیک شکست ضریب شدت تنش^۲ نام دارد.

این ضریب با علامت اختصاری K نمایش داده می‌شود. معیارهای سنتی و متداول شکست غالبا قادر نیستند به صورت کامل اکثر موارد شکست سازه ای را که در تنش‌های خیلی کمتر از مقاومت نهایی

^۱ Linear Elastic Fracture Mechanics

^۲ Stress Intensity Factor

مواد اتفاق می‌افتد توجیه کنند. نمونه‌های از آن شامل پل‌ها، مخازن، لوله‌ها، کشتی‌ها و سازه‌های هوافضا می‌باشد [۱].

از آنجایی که سازه‌ای عملاً نمی‌تواند بدون نقص ساخته شود، طراحی ایمن سازه‌ها باید از دو طریق انجام شود:

نیروی مکانیکی ایمن در جایی که یک ترک با یک اندازه‌ی مشخص فرض می‌شود در سازه وجود داشته باشد، محاسبه گردد و یا اندازه ترکی که در سازه ایجاد می‌شود با نیروی کار مشخص باید محاسبه گردد.

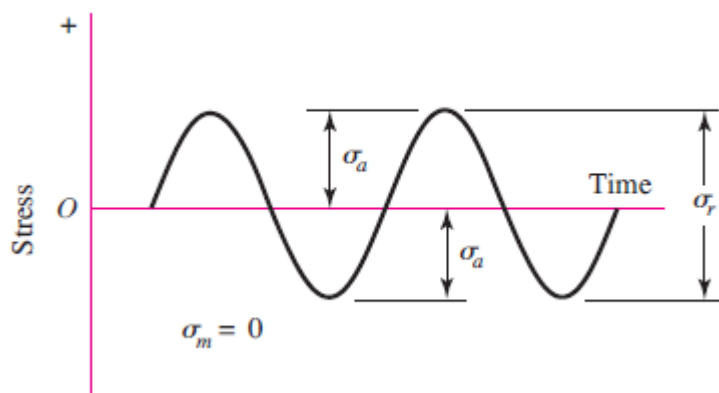
محاسبه نیروهای مکانیکی ایمن و همچنین اندازه‌گیری طول ترک در هر مرحله از بارگذاری و تعیین مسیر رشد ترک از طریق آزمایش مستلزم صرف هزینه و زمان زیادی می‌باشد.

یکی از محاسن بزرگ استفاده از شبیه‌سازی قبل از فرآیند شکل‌دهی و ساخت این است که بدون صرف زمان و هزینه زیاد قادر به اندازه‌گیری ضرایب شدت تنش در نواحی نوک ترک و پیش‌گویی مسیر رشد ترک و ارائه راهکارهای مناسب جهت متوقف ساختن رشد ترک و یا کنترل مسیر رشد ترک به سمت دلخواه خواهیم بود.

۱-۲- چرخه‌های تنش

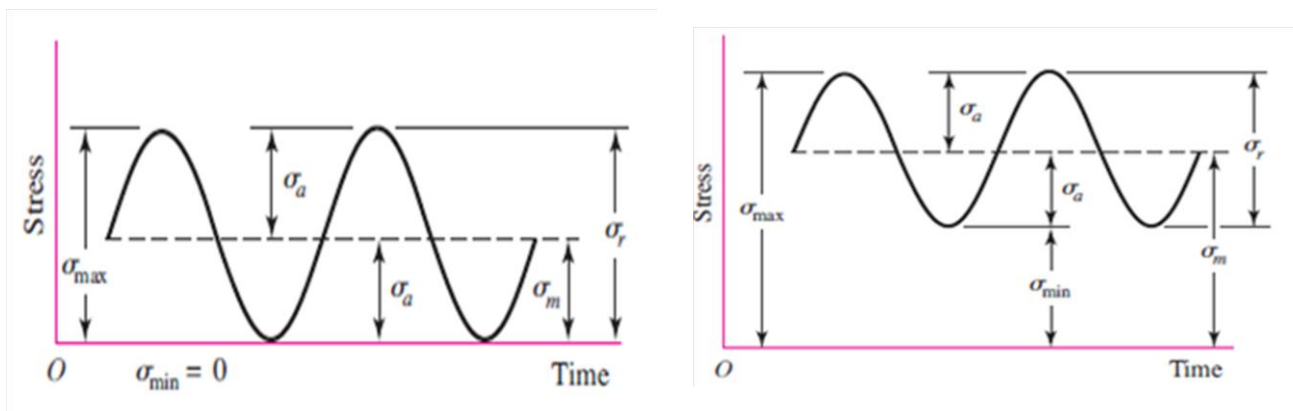
ابتدا تعریف مختصری از انواع کلی تنش‌های نوسانی که باعث خستگی می‌شوند، بیان می‌کنیم شکل ۱-۱ و ۲-۱ چرخه‌های نمونه‌ای تنش خستگی را نشان می‌دهد. شکل ۱-۱ چرخه کاملاً معکوس تنش سینوسی شکل را نشان می‌دهد. این چرخه یک حالت آرمانی است که توسط دستگاه خستگی محور چرخان مور تولید شده و در عمل از چرخش محوری با سرعت ثابت و بدون اضافه بار به دست می‌آید. در

این نوع چرخه تنش، تنش‌های حداقل و حداکثر برابرند. تنش حداقل همان کمترین تنش جبری در چرخه است. تنش کششی مثبت در نظر گرفته می‌شود و تنش فشاری منفی است.



شکل ۱-۱ چرخه کاملاً معکوس تنش سینوسی [۱]

شکل ۱-۲ دو چرخه تنش تکراری را نشان می‌دهد که در آن تنش حداکثر و تنش حداقل برابر نیستند. در یک چرخه تنش حداقل مخالف صفر و در چرخه دیگر تنش حداقل آن صفر می‌باشد و در هر دو شکل تنش حداکثر آن مقداری کششی می‌باشد و همچنان حالت سینوسی دارد.



شکل ۱-۲ چرخه‌های تنش تکراری [۱]

۱-۳ - خصوصیات ساختاری خستگی

در مطالعات، تغییرات ساختاری اصلی در فلزی که به آن تنش چرخه‌ای اعمال می‌شود، فرایند خستگی گفته می‌شود که برای سهولت درک به مراحل زیر تقسیم شده است:

۱. شروع ترک : شامل ایجاد اولیه عیب خستگی که با عملیات تابانیدن مناسب برطرف می‌شود.
۲. رشد ترک: عبارت است از عمیق شدن ترک اولیه روی صفحات با تنش برشی زیاد، این مرحله غالباً رشد ترک مرحله ۱ نامیده می‌شود.
۳. شکست ترک روی صفحاتی با تنش کششی زیاد: عبارت است از رشد یک ترک معین در جهت عمود بر تنش کششی حداکثر. این مرحله معمولاً رشد ترک مرحله ۲ نامیده می‌شود.
۴. شکست نهایی: هنگامی رخ می‌دهد که طول ترک به اندازه کافی برسد، طوری که سطح مقطع باقیمانده نتواند بار وارده را تحمل کند.

سهم نسبی هر مرحله از کل چرخه‌های مسبب شکست به شرایط آزمایش و ماده بستگی دارد. اما کاملاً مشخص شده است که یک ترک خستگی می‌تواند قبل از اینکه ۱۰ درصد عمر کل نمونه منقضی شود، تشکیل شود. البته در تصمیم‌گیری در مورد زمانی که یک نوار لغزش عمیق شده می‌تواند ترک نامیده شود، ابهام زیادی وجود دارد. به طور کلی، سهم بیشتری از کل چرخه‌های مسبب شکست به اشاعه ترک‌های مرحله ۲ در خستگی کم چرخه تعلق دارد تا خستگی پر چرخه، در صورتی که رشد ترک در مرحله ۱ برای خستگی پرچرخه و تنش کمینه، بیشتر است. اگر تنش کششی زیاد باشد، مانند خستگی در نمونه‌های با شیار تیز، رشد ترک مرحله ۱ به هیچ وجه قابل مشاهده نیست.

بررسی ساختاری دقیق خستگی این واقعیت را نشان می دهد که معمولا ترک‌های خستگی در یک سطح آزاد شروع می‌شوند. در موارد نادری که ترک‌های خستگی از قسمت داخلی شروع می شوند، همیشه مرزی، مانند حد فاصل یک لایه سطحی کربوره شده و فلز اصلی، باید وجود داشته باشد.

یک جنبه مهم ساختاری که به نظر می‌رسد منحصر به تغییر شکل خستگی باشد، تشکیل سطحی از برآمدگی و شیار است که فرورفتگیهای نوار لغزش و برآمدگی‌های نوار لغزش نامیده می‌شود. انجام عملیات فلز نگاری خیلی دقیق بر قسمت‌های مخروطی سطح نمونه نشان داده است که ترک‌های خستگی در مکان‌های فرورفتگی و برآمدگی شروع می‌شوند. تجربیات زیادی نشان می‌دهند که لغزش متقاطع در فرآیند ایجاد برآمدگی اهمیت زیادی دارد. مثلا تولید شکست خستگی در بلورهای یونی ویژه‌ای که به سادگی لغزش متقاطع نمی‌کنند مشکل بوده و تولید شکست خستگی در بلورهای روی که طوری جهتدار می‌شوند تا فقط به صورت لغزش آسان تغییر شکل دهند نیز خیلی مشکل است. از طرف دیگر در آلومینیوم خالص، که لغزش متقاطع آن بینهایت ساده است، برآمدگی نوار لغزش ایجاد نمی‌شود (بر خلاف بیشتر آلیاژهای آلومینیم). [1]

۴-۱ - اثر سطح و خستگی

عملا تمام شکست‌های خستگی از سطح شروع می‌شوند. در بسیاری از انواع متداول بارگذاری، مانند خمش و پیچش، تنش حداکثر در سطح رخ می‌دهد، طوری که شروع شکست از آن مکان منطقی جلوه می‌کند. اما در بارگذاری محوری، شکست خستگی تقریبا همیشه از سطح شروع می‌شود. مدارک فراوانی حاکی از اینکه خواص خستگی به شرایط سطحی بسیار حساس هستند در دست است. عواملی که در سطح یک نمونه خستگی تاثیر می‌گذارند عمدتا به سه دسته تقسیم می شوند:

(۱) نا همواری سطح یا منابع تنش سطحی

(۲) تغییر استحکام خستگی فلز سطحی

(۳) تغییرات شرایط تنش باقیمانده در سطح

علاوه بر این، سطح فلز در معرض اکسایش و خوردگی نیز قرار دارد.

۱-۵- اثر متغیرهای متالورژیکی بر خستگی

خواص خستگی فلزات کاملاً به ساختار حساس است. اما در حال حاضر، روش‌های محدودی وجود دارد که توسط آنها می‌توان خواص خستگی را از طریق متالورژیکی بهبود بخشید.

تغییرات طراحی به نحوی که تمرکز تنش کم شود و استفاده صحیح از تنش باقیمانده فشاری مفید به جای تغییر جنس از کارهای عمده‌ای است که در خواص خستگی بهبود ایجاد می‌کند. با این حال عوامل متالورژیکی ویژه‌ای وجود دارند که برای اطمینان از بهترین کارایی در اندازه‌گیری یک فلز یا آلیاژ خاص باید در نظر گرفته شوند. آن آزمایش‌های خستگی که برای خستگی طراحی شده‌اند، معمولاً با نمونه‌های صاف پرداخت شده و در شرایط تنش کاملاً معکوس انجام می‌شوند. عموماً فرض می‌شود هرگونه تغییری در خواص خستگی به علت عوامل متالورژیکی، مشابه همان مقدار تغییری است که در شرایط خستگی مرکب، مانند نمونه‌های شیار دار تحت تنش‌های مرکب، رخ می‌دهد، البته این نکته همیشه در مورد نتایج حساسیت به شیار مطابقت ندارد.

غالباً خواص خستگی به خواص کششی وابسته‌اند. به طور کلی حد خستگی فولادهای ریخته شده و کار شده تقریباً ۵۰ درصد استحکام نهایی کشش است. نسبت حد خستگی به استحکام کششی نسبت خستگی نامیده می‌شود. نسبت خستگی فلزات غیر آهنی مانند نیکل، مس و منیزیم در حدود ۳۵ درصد خواهد بود. اما با زیاد شدن استحکام تسلیم توسط مکانیزم‌های استحکام دهی مختلف، معمولاً حد

خستگی به طور متناسب با آن زیاد نمی‌شود. اکثر مواد با استحکام زیاد، در برابر خستگی با محدودیت مواجه‌اند.

رابطه عمر خستگی با اندازه دانه نیز به شیوه تغییر شکل بستگی دارد. بیشترین تاثیر اندازه دانه بر عمر خستگی در شرایط چرخه زیاد و تنش کم است که در آن ایجاد ترک مرحله ۱ مسلط است. در موادی با انرژی خطای انباشتگی زیاد (مانند آلومینیوم و مس) ساختارهای سلولی به سادگی به وجود آمده و انتشار ترک مرحله ۱ را کنترل می‌کند. بنابراین ساختار سلول نابجایی، اثر اندازه دانه را می‌پوشاند و عمر خستگی در تنش ثابت به اندازه حساس نیست. اما در ماده ای با انرژی خطای انباشتگی کم (مانند برنج آلفا)، عدم وجود ساختار سلولی به دلیل لغزش مسطح باعث می‌شود مرزهای دانه آهنگ ایجاد ترک را کنترل کنند. در این حالت، عمر خستگی با شعاع دانه متناسب است.

فصل دوم

رشد ترک حستی

۲-۱- تاریخچه‌ای در مورد رشد ترک خستگی

طی قرن‌های گذشته اغلب حوادث، ناشی از شکست چرخ‌ها، محورها و ریل‌ها بوده که ناشی از شکل دهی و تولید مواد و یا در اثر ضعف در طراحی بوده است. در نتیجه بررسی و تحقیقات زیادی در اغلب کشورها شروع شد.

اولین کارها در زمینه خستگی بوسیله شنک [۲] و پارکر [۳] انجام گرفت. در سال ۱۹۸۰ فوکس و همکاران پدیده خستگی را در فلزات بررسی نمودند [۴]. بعد از آن در سال ۱۹۸۴ فیشر مطالعاتی بر روی شکست در اثر خستگی را در سازه پل‌ها انجام داد [۵]. هر چند که ترک‌های خستگی به وسیله تکرار بارگذاری دینامیکی ایجاد می‌شوند، ولی شروع ترک خستگی، شکست ترد را به دنبال خواهد داشت. شکست نرم در اثر تغییر فرم پلاستیک و ایجاد نابجایی‌های خیلی ریز رخ می‌دهد.

برای تحلیل الاستیک خطی اجسام ترکدار، ابتدا بایستی ضریب شدت تنش را از معادلات مربوط برای تنش با دامنه مشخص نرخ رشد محاسبه نمود [۶-۸] که به خواص مکانیکی ماده، اندازه اولیه ترک و عملیات انجام شده بر روی سطح بستگی دارد [۹]. با مشخص کردن ترک زیر بحرانی، با استفاده از مکانیک شکست الاستیک می‌توان نرخ رشد ترک را تحت بارگذاری سیکلی و تعداد سیکل‌های مورد نیاز برای بزرگ شدن ترک از یک اندازه اولیه تا یک اندازه مجاز را پیش بینی کرد.

در مواردی که ترک شامل تسلیم و پلاسیسیته نوک ترک نیز باشد، از مکانیک شکست

الاستو- پلاستیک برای مشخص کردن رشد ترک خستگی استفاده می‌شود. [۱۰ و ۱۱]

۲-۲- عوامل اصلی شکست

عوامل گوناگونی بر بروز پدیده شکست ترد و ناگهانی در سازه‌ها نقش دارند که از آن جمله می‌توان خواص و استحکام ماده در مقابل شکست؛ درجه حرارت؛ شرایط محیطی؛ جوشکاری؛ تنش‌های پسماند؛ نوع و

مقدار بارگذاری (از نظر بار استاتیکی، متناوب و یا ضربه ای) و کیفیت تولید را نام برد. از بین این عوامل، سه عامل زیر در ایجاد شکست نقش کلیدی دارند:

۱- استحکام شکست ماده: استحکام ماده در مقابل شکست به میزان توانایی ماده جهت تحمل بارهای وارده در حضور یک ترک اطلاق می گردد. این خاصیت در حقیقت به تغییر شکل پلاستیک در حوالی ترک در اثر اعمال بار بستگی داشته و تابعی از درجه حرارت است. برای موادی که رفتار ارتجاعی خطی دارند، این خاصیت معمولاً بر حسب کمیتی به نام مقدار بحرانی فاکتور شدت تنش بیان می شود که در یک درجه حرارت معین تابعی از ضخامت قطعه ترک دار است. برای حالتی که تنش در قطعه دو بعدی (حالت تنش مسطح) باشد این کمیت با K_{IC} و برای حالتی که کرنش در قطعه دو بعدی باشد (حالت کرنش مسطح) این کمیت با K_{IIC} نمایش داده می شود. در حالتی که شرایط توزیع تنش بین دو حالت پیش گفته باشد، استحکام ماده در مقابل شکست، به نام مقدار بحرانی فاکتور شدت تنش برای حالت ترکیبی تنش _ کرنش مسطح شناخته می شود.

۲- طول ترک: معمولاً شکست از نا پیوستگی ها شروع می شود. این ناپوستگی ها می توانند از شکاف یا ترک های بسیار ریز و غیر قابل مشاهده با چشم غیر مسلح، تا ترک های بزرگ ایجاد شده در قطعه باشد. ترک ها و شکاف ها می توانند در اثر عوامل مختلف از جمله عدم دقت در ساخت و تولید، خراش های سطحی، خوردگی و خستگی و یا اصولاً ماهیت روش تولید بوجود آمده باشد. در اغلب موارد، هرچه طول ترک بزرگتر باشد احتمال وقوع پیوستن شکست ناگهانی نیز بیشتر است. البته در برخی شرایط خاص، بسته به حالت بارگذاری در طول های بزرگ لبه های ترک در نزدیکی نوک ترک بهم نزدیک شده و لذا فاکتور شدت تنش با بزرگ شدن طول ترک کم می شود.

۳- سطح تنش اعمالی: برای اینکه شکست در سازه رخ دهد احتیاج به تنش کششی و یا برشی می‌باشد که این تنش را می‌توان از روش‌های تحلیلی، عددی و یا تجربی محاسبه نمود. به طور کلی هرچه سطح تنش اعمالی بالاتر باشد احتمال وقوع گسیختگی در سازه بالاتر است. سه عامل یاد شده به عنوان عوامل اصلی کنترل کننده شکست در سازه‌ها شناخته شده اند. در اغلب موارد این سه عوامل توأماً وجود دارند، ولی شدت و ضعف هر یک از این عوامل خود می‌تواند در ایجاد و یا جلوگیری از شکست مهم باشد. علم مکانیک شکست نشان داده است که سه عامل یاد شده به یکدیگر مرتبط بوده اند. در واقع مکانیک شکست و گسیختگی قطعه بر حسب کمیت‌های شناخت شده ای همچون تنش و طول ترک می‌باشد.

در علم مکانیک شکست، روش مکانیک شکست ارتجاعی خطی دارای جایگاه ویژه ای است. مکانیک شکست ارتجاعی خطی، روشی برای بیان میدان توزیع تنش و جابجایی‌ها در حوالی نوک ترک بر حسب تنش اسمی اعمالی به قطعه، اندازه و شکل هندسی ترک و خصوصیات‌های ارتجاعی ماده به دست می‌دهد.

در مکانیک شکست ارتجاعی خطی، دو عامل فاکتور شدت تنش (K) و میزان رهایی انرژی کرنشی (G) نقش اساسی دارند. این دو عامل که اولی بر اساس توزیع تنش و دومی بر اساس میزان انرژی موجود در قطعه ترک دار است، علاوه بر نشان دادن حساسیت قطعه به ترک، می‌تواند نحوه ی رشد (از نظر پایداری و ناپایداری) و جهت رشد ترک را نیز مشخص نماید. [۱۲]

۲-۳- مقدمه ای بر کنترل رشد ترک

بارگذاری‌های با دامنه متغییر که در صنعت دیده می‌شود، عموماً نامنظم اند و این امر تحلیل آن‌ها را مشکل می‌سازد و باعث گردیده که محققین این نوع بارگذاری‌ها را به بلوک‌های بار ساده تر و منظم تری ساده سازی کنند. ساده ترین حالت، فرا بارگذاری^۱ است که تحلیل آن می‌تواند درک رفتار ترک تحت بارگذاری با دامنه متغییر را ساده تر کند.

نوک ترک به عنوان یک متمرکز کننده تنش عمل میکند. به همین علت معمولاً در اطراف نوک ترک تغییر شکل پلاستیک ماده و تنش پس ماند فشاری مشاهده می‌شود.

تنش پس ماند فشاری موجب بسته شدن ترک^۲ می‌گردد. در حقیقت در این حالت لبه‌های ترک بلافاصله پس از باربرداری و اعمال نیروی کششی از هم باز نمی‌شوند. بخشی از نیروی کششی وارده شده صرف غلبه بر تنش پس ماند فشاری موجود در قطعه می‌گردد و باقی مانده آن برای گشودن لبه‌های ترک به کار می‌رود. تا زمانی که ترک کاملاً باز نشده باشد ترک رشد نخواهد کرد. به عبارت دیگر فرا بارگذاری موجب تاخیر در رشد ترک می‌گردد [۱۳]. ترک زمانی نرخ رشد پیشین خود را باز می‌یابد که نوک ترک از ناحیه پلاستیک شده بر اثر فرا بارگذاری خارج شود [۱۴].

سوراخ‌ها به عنوان متمرکز کننده تنش عمل می‌کنند و در بسیاری از موارد شکست مشاهده می‌شود که ترک از لبه سوراخ قطعه شروع به رشد می‌کند.

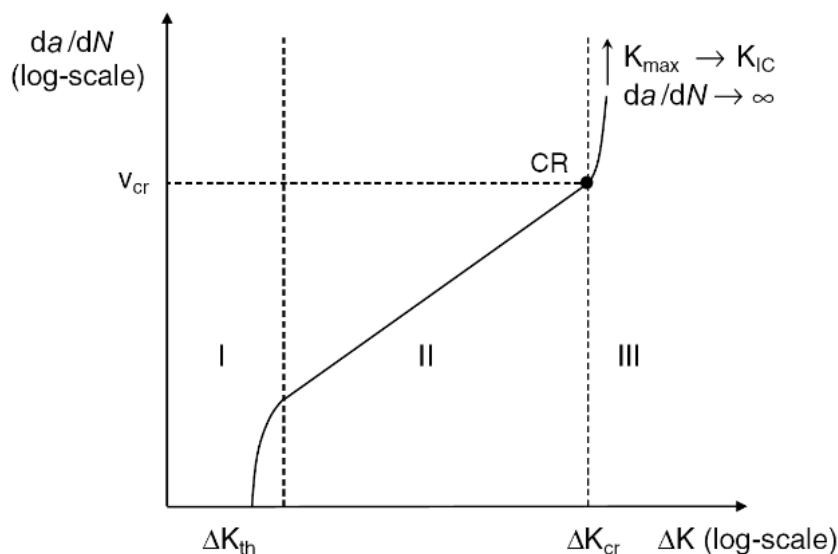
سوراخ‌های پرچ کاری در هواپیماها و کشتی‌ها و قطعات سوراخ دار موجود در خودروها که همگی تحت بار با دامنه متغییر قرار دارند نمونه‌های خوبی هستند که اهمیت توجه و بررسی رشد ترک در اطراف سوراخ تحت بارگذاری با دامنه متغییر را نشان می‌دهند. پیشتر رشد ترک در اطراف سوراخ تحت بارگذاری با دامنه ثابت مورد بررسی قرار گرفته است [۱۵-۱۸]

¹ Overload

² crack closure

۴-۲- قانون پاریس

رشد ترک خستگی پدیده‌ای است که در آن ترک در هر سیکل بارگذاری به میزان بسیار کم رشد می‌نماید. بر اساس مشاهدات و آزمایش‌های مختلف مشخص شده است که مقدار رشد ترک (Δa) در هر سیکل بارگذاری با نسبت تغییرات طول ترک به تغییرات سیکل بارگذاری (da/dN) قابل نمایش است. در اوایل دهه ۱۹۶۰، پاریس برای اولین بار نشان داد که مقدار رشد پایدار ترک در هر سیکل بارگذاری خستگی، با فاکتور شدت تنش در نوک ترک کنترل می‌شود. در شکل ۱-۲ رشد ترک خستگی بر حسب تغییرات لگاریتم da/dN و $\Delta K = K_{max} - K_{min}$ نشان داده شده است.



شکل ۱-۲ منحنی چگونگی رشد ترک خستگی [۱۲]

بر اساس نتایج آزمایشگاهی سه ناحیه برای این منحنی داده شده است [۱۹]. ناحیه اول مربوط به دامنه فاکتور شدت تنش‌های نزدیک به مقدار آستانه پایین ΔK_{th} است که زیر این مقدار رشد ترک اتفاق نمی‌افتد. به این ناحیه، ناحیه آستانه گفته می‌شود.

بخش خطی دوم موجود در نمودار معرف یک رابطه توانی بین نرخ رشد ترک و محدوده فاکتورهای شدت تنش است. در انتها زمانی که K_{max} میل به مقدار فاکتور شدت تنش بحرانی K_{IC} می‌کند، رشد

سریع ترک اتفاق افتاده و ترک به صورت ناپایدار رشد می‌کند. در ناحیه دوم معادله پاریس تقریب خوبی از داده‌های آزمایشگاهی را بیان می‌کند.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (1-2)$$

در رابطه (۱-۲)، C و m ثابت‌های تجربی هستند که تحت عنوان پارامترهای قانون پاریس شناخته می‌شوند.

طی سال‌ها مطالعات زیادی بر روی این پارامترها صورت گرفته است تا نشان دهند که این دو مقدار را نمی‌توان فقط به عنوان ثابت مصالح تعریف کرد. در واقع آن‌ها به شرایط آزمایش مانند هندسه و اندازه نمونه و طول اولیه ترک و نسبت بارگذاری بستگی دارد [۲۰ و ۲۱]

فصل سوم

تخلیل عددی

۳-۱- مقدمه ای بر نرم افزار آباکوس

نرم افزار آباکوس (ABAQUS) از جمله نرم افزارهای قدرتمند اجزای محدود در بازار است. اسم و نشان این نرم افزار از abacus در زبان انگلیسی به معنای چرتکه گرفته شده است.

آباکوس قابلیت حل مسایل از یک تحلیل خطی ساده تا پیچیده ترین مدل سازی غیر خطی را دارا می باشد. این نرم افزار دارای مجموعه المان های بسیار گسترده ای می باشد که هر نوع هندسه ای را می توان توسط این المان ها مدل کرد. همچنین دارای مدل های رفتاری بسیار زیادی است که در مدل سازی انواع مواد با خواص و رفتار گوناگون نظیر فلزات، لاستیک ها، پلیمرها، کامپوزیت ها، بتن مسلح، فوم های فبری و نیز شکننده و همچنین مصالحی ژئوتکنیکی نظیر خاک و سنگ، قابلیت بالایی را ممکن می سازد. نظر به اینکه آباکوس یک ابزار مدل سازی عمومی و گسترده می باشد، استفاده از آن تنها به تحلیل مسائل مکانیک جامدات (یعنی مسئله تنش - کرنش) محدود نمی شود. با استفاده از این نرم افزار می توان مسایل مختلفی نظیر انتقال حرارت، نفوذ جرم، تحلیل حرارتی اجزاء الکتریکی، اکوستیک، تراوش و پیزو الکتریک را مورد مطالعه قرار داد.

با وجود اینکه آباکوس مجموعه قابلیت های بسیار گسترده ای را در استفاده از نرم افزار در اختیار کاربر قرار می دهد، کار با آن نسبتا ساده می باشد. پیچیده ترین مسایل را می توان به آسانی مدل کرد. به عنوان مثال مسایل شامل بیش از یک جزء را می توان با ایجاد مدل هندسی هر جزء و سپس نسبت دادن رفتار ماده مربوطه به هر جزء و سپس مونتاژ اجزاء مختلف مدل کرد. در اغلب مدل سازی ها، حتی مدل های با درجه غیر خطی بالا، کاربر می بایست تنها داده های مهندسی نظیر هندسه مساله، رفتار ماده مربوط به آن، شرایط مرزی و بارگذاری آن مساله را تعیین کند. آباکوس در یک تحلیل غیر خطی، به طور اتوماتیک میزان نمو بار را انتخاب و همچنین در طول تحلیل مقادیر آن ها را جهت دستیابی به یک جواب صحیح

تعدیل می‌کند. در نتیجه کاربر به ندرت می‌بایست مقادیر پارامترهای کنترلی حل عددی مساله را تعیین کند.

۳-۲- بخش‌های مختلف آباکوس

نرم افزار آباکوس شامل ۴ بخش است:

۱. Abaqus/CAE که شامل محیطی برای طراحی و مدلسازی (پیش پردازش) و نمایش گرافیکی نتایج حاصل از تحلیل است.

۲. Abaqus/CFD که یک نرم افزار تحلیل دینامیکی سیالات است و از نسخه ۶.۰.۰ به بعد به این مجموعه نرم افزاری اضافه شد.

۳. آباکوس / استاندارد که یک تحلیل گر کلی بر مبنای روش اجزای محدود می‌باشد و از رویکرد انتگرال گیری ضمنی استفاده می‌کند.

۴. Abaqus/EXPLICIT که یک تحلیل گر خاص اجزای محدود می‌باشد و از رویکرد صریح برای انتگرال گیری استفاده می‌کند و برای حل سیستم‌های غیرخطی شامل مسائل تماس و در حالت بارگذاری گذرا کاربرد دارد.

همچنین این نرم افزار از زبان برنامه نویسی منبع باز پایتون برای برنامه نویسی در داخل نرم افزار پشتیبانی می‌کند. وجود امکان اسکریپت نویسی در داخل نرم افزار، قابلیت‌های مدلسازی آن را دو چندان می‌کند.

یکی از مهمترین قابلیت‌های نرم افزار آباکوس نسبت به سایر نرم افزارهای اجزای محدود موجود، امکان تغییر و اضافه کردن به امکانات و کتابخانه‌های نرم افزار است. قابلیتی تحت عنوان «ساب روتین» نویسی

که ابزاری بسیار قدرتمند برای کاربران حرفه‌ای می‌باشد. ساب روتین در واقع یک مجموعه کد است که توسط کاربر با استفاده از زبان برنامه نویسی فرترن برای کاربرد خاصی نوشته می‌شود. با استفاده از این قابلیت می‌توان مواردی نظیر تعریف مدل‌های رفتاری جدید، انجام بارگذاری‌های خاص و... را انجام داد

۳-۳- مبانی نرم افزار آباکوس

یک تحلیل کامل در برنامه آباکوس معمولاً از سه مرحله تشکیل شده‌است

۱. مرحله پیش پردازش

۲. مرحله پردازش

۳. مرحله پس پردازش

۳-۳-۱- پیش پردازش

در این مرحله باید مدل مساله را ساخته و یک فایل ورودی آباکوس ایجاد کنید. مدل را معمولاً می‌توان به صورت گرافیکی با استفاده از ABAQUS/CAE و یا سایر پیش پردازنده‌ها ایجاد کرد و یا می‌توان فایل ورودی آباکوس را با استفاده از یک ویرایشگر متن مثل Notepad ساخت.

۳-۳-۲- پردازش

پردازش که معمولاً به صورت یک روند در پس زمینه اجرا می‌شود، مرحله‌ای است که در آن آباکوس استاندارد و یا صریح مساله عددی را که در مدل تعریف شده حل می‌کند. مثال‌هایی از خروجی تحلیل تنش عبارت است از تغییرمکان‌ها و تنش‌هایی که در فایل‌های باینری ذخیره می‌شود و برای مرحله پس

از پردازش مورد استفاده قرار می‌گیرد. بسته به پیچیدگی مساله‌ای که باید تحلیل شود و قدرت رایانه‌ای که تحلیل را انجام می‌دهد، زمان تحلیل می‌تواند بین چند ثانیه تا چند روز طول بکشد.

۳-۳-۳- پس پردازش

ارزیابی نتایج را می‌توان بعد از اتمام مرحله پردازش یعنی وقتی که تنش‌ها تغییر مکان‌ها و سایر متغیرهای اساسی محاسبه شده‌اند، انجام داد. ارزیابی معمولاً با استفاده از مدول بصری یا سایر پس‌پردازنده‌ها انجام می‌شود. مدول بصری داده‌های فایل خروجی باینری را می‌خواند و گزینه‌های متفاوتی مانند کانتورهای رنگی، انیمیشن، فرم تغییرشکل یافته و یا نمایش داده‌ها به صورت نمودار برای نمایش نتایج دارد.

۳-۴- معیارهای پیش‌بینی مسیر رشد ترک

معیارهای مختلفی برای پیش‌بینی مسیر رشد ترک وجود دارد که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از:

- معیار حداکثر تنش مماسی^۱ (MTS-Criterion) [۲۲]
- معیار حداقل چگالی انرژی کرنشی^۲ (SED-Criterion) [۲۳]
- معیار حداکثر نرخ آزادسازی انرژی^۳ (MER-Criterion) [۲۴]
- معیار حداکثر تنش سه محوره^۴ (M-Criterion) [۲۵]

^۱ Maximum Tangential Stress

^۲ Strain Energy Density

^۳ Maximum Energy Release Rate

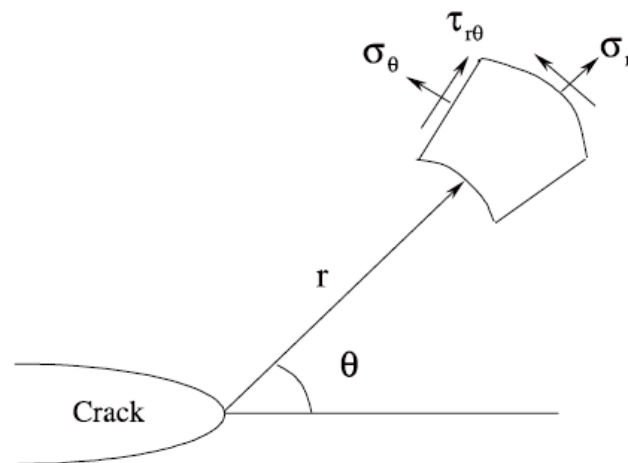
^۴ Mohr criterion

۳-۴-۱- معیار حداکثر تنش مماسی

در تحلیل عددی از معیار حداکثر تنش مماسی برای پیش بینی مسیر رشد ترک در نرم افزار استفاده شده است. این معیار ساده ترین و قدیمی ترین معیار بوده و بیان می کند که جهت شروع ترک هم جهت با امتداد ماکزیمم تنش مماسی در محدوده نوک ترک می باشد. این معیار در حقیقت رشد ترک را در حالت مود ۱ در نظر می گیرد و اذعان می دارد که در جهتی که حداکثر پتانسیل برای باز شدن ترک وجود دارد، ترک رشد می کند.

اگر وضعیت تنش در نوک ترک به صورت شکل ۳-۱ در نظر گرفته شود، مولفه های تنش مربوطه

عبارتند از:



شکل ۳-۱ ناحیه تنش در نوک ترک در مختصات قطبی [۲۶]

$$\sigma_{\theta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \left[\left\{ \frac{K_I}{2} \cos \frac{\theta}{2} (1 + \cos \theta) \right\} - \left\{ \frac{3K_{II}}{2} \sin \frac{\theta}{2} (1 + \cos \theta) \right\} \right] \quad (1-3)$$

$$\sigma_r = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \left[\left\{ \frac{K_I}{2} \cos \frac{\theta}{2} (3 - \cos \theta) \right\} - \left\{ \frac{K_{II}}{2} \sin \frac{\theta}{2} (1 - 3 \cos \theta) \right\} \right] \quad (2-3)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \left[\left\{ \frac{K_I}{2} \sin \frac{\theta}{2} (1 + \cos \theta) \right\} - \left\{ \frac{K_{II}}{2} \cos \frac{\theta}{2} (1 - 3 \cos \theta) \right\} \right] \quad (3-3)$$

از روابط بالا و با توجه به معیار حداکثر تنش مماسی داریم [۲۶]:

$$\frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} = 0 \quad \frac{\partial^2 \sigma_\theta}{\partial \theta^2} < 0 \quad (4-3)$$

با جای‌گذاری رابطه ۳-۱ در رابطه ۳-۴ داریم:

$$\tan^2 \frac{\theta}{2} - \frac{\mu}{2} \tan^2 \frac{\theta}{2} \tan \frac{\theta}{2} - \frac{1}{2} = 0 \quad (5-3)$$

$$-\frac{3}{2} \left[\left\{ \frac{1}{2} \cos^3 \frac{\theta}{2} - \cos \frac{\theta}{2} \sin^2 \frac{\theta}{2} \right\} + \frac{1}{\mu} \left\{ \sin^3 \frac{\theta}{2} - \frac{7}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos^3 \frac{\theta}{2} \right\} \right] < 0 \quad (6-3)$$

$$\mu = \frac{K_I}{K_{II}} \quad (7-3)$$

مقدار θ بدست آمده از روابط فوق بیانگر زاویه ی شروع رشد ترک نسبت به صفحه ترک می‌باشد.

۳-۴-۲- معیار حداکثر نرخ آزادسازی انرژی

در تحلیل عددی از معیار حداکثر نرخ آزادسازی انرژی به عنوان معیاری برای شروع رشد ترک در نرم افزار استفاده شده است.

معادله تعادل انرژی در غیاب اتلافات، به صورت زیر نوشته شده است [۲۷].

$$\Delta U_e = \Delta U_s + G \cdot \Delta A \quad (8-3)$$

که در آن U_e کار خارجی اعمال شده، U_s انرژی ارتجاعی ذخیره شده و $G \cdot \Delta A$ انرژی لازم جهت تغییر سطح به میزان ΔA می‌باشد. در شرایط رفتار ارتجاعی خطی، می‌توان G را برای مقادیر کوچک dA به

فرم زیر تعریف نمود. [۱۲]

$$G = \frac{1}{dA} (dU_e - dU_s) \quad (9-3)$$

از رابطه (۹-۳) مشاهده می‌شود که G تابع بار وارده، هندسه و ماده تشکیل دهنده جسم ترک‌دار است. در شرایطی که رشد ترک در تغییر مکان ثابت صورت گیرد (شرایط گریفیث^۱ [۲۸])، dU_e صفر شده در نتیجه رابطه میزان رهایی انرژی کرنشی به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$G = -\frac{dU_s}{dA} \quad (10-3)$$

اگر قطعه در حالت تنش و یا کرنش مسطح باشد و یا ضخامت صفحه برابر واحد در نظر گرفته شود، رابطه G به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$G = -\frac{dU_s}{da} \quad (11-3)$$

که در آن da یک افزایش جزئی طول ترک است.

در این معیار گسترش ترک در جهتی که مقدار کل میزان رهایی انرژی کرنشی حداکثر است، پیش‌بینی می‌گردد. (کل میزان رهایی انرژی کرنشی برابر با مجموع میزان رهایی انرژی کرنشی برای مودهای مختلف است.) بر طبق این معیار، گسترش ترک نیز زمانی رخ می‌دهد که این مقدار حداکثر، به مقدار بحرانی (G_c) برسد. لذا این معیار به صورت زیر بیان می‌شود.

$$G_T = G_c \quad (12-3)$$

¹ Griffith

که در آن G_c میزان رهایی انرژی کرنشی بحرانی است که تابع نوع ماده بوده و از آزمایش شکست تعیین می‌شود. این معیار در مسائل مختلفی (چه مواد فلزی و چه مواد مرکب) مورد استفاده قرار گرفته و نتایج بسیار خوبی از آن به دست آمده است. [۲۹]

۳-۵- روش المان محدود گسترش یافته (XFEM)

در چند دهه گذشته مهمترین روش عددی مورد استفاده در تحلیل مسائل مختلف، از جمله مسائل مرتبط با مکانیک شکست روش المان محدود بوده است. این روش دارای مزیت‌های بسیاری است که باعث ساده سازی حل بسیاری از مسائل می‌شود؛ اما در کنار این مزیت‌ها معایبی نیز دارد که حل برخی مسائل مانند مسائل مربوط به حوزه مکانیک شکست را مشکل و یا حتی غیر ممکن می‌سازد. به همین دلیل نیاز بود تا روش‌های جایگزینی که در اصول اولیه مشابه روش المان محدود بوده اما کامل تر از آن هستند، مورد استفاده قرار گیرد. روش‌هایی نظیر پارتیشن واحد^۱، المان محدود تعمیم یافته^۲ و یا المان محدود گسترش یافته^۳ نتیجه نیاز برای تولید روش‌های دقیق تر و کاملتری نسبت به روش المان محدود هستند. روش‌های فوق در ماهیت کلی مشابه هستند؛ ولی در جزئیات نسبت به هم متفاوت بوده که این تفاوت باعث کارآمد تر شدن هر یک از این روش‌ها در زمینه خاصی شده‌اند.

به علت محدودیت‌های روش المان محدود در تحلیل مسائل مرتبط با مکانیک شکست، روش جایگزین یعنی روش XFE به وجود آمد. به کمک روش XFE تحلیل ناپیوستگی‌ها از جمله ترک‌ها ساده تر شده است.

روش المان محدود برای برخی از کاربرد ها در زمینه مکانیک شکست، نظیر محاسبه فاکتور شدت تنش و یا نسبت انرژی آزاد شده قابل استفاده است؛ اما در زمینه گسترش ترک با اشکالات اساسی

¹ Partition of Unity(PU)

² Generalized Finite Element Method(GFEM)

³ eXtended Finite Element Method(XFEM)

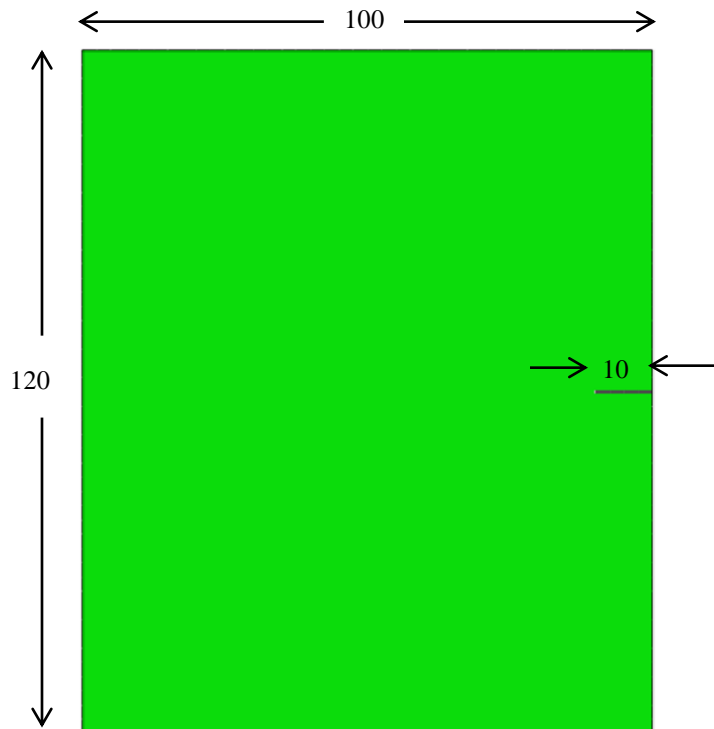
رو به رو است. مهمترین مشکل استفاده از روش المان محدود در بررسی پدیده گسترش ترک، نیاز به مش زنی مجدد مسئله پس از هر مرحله رشد ترک است. این امر باعث پیچیده تر شدن مسئله رشد ترک شده و در برخی موارد نظیر هندسه‌های پیچیده باعث غیر ممکن شدن حل آن می‌شود. توانایی تحلیل گسترش ترک به کمک روش المان محدود از نسخه های قدیمی نرم افزار ABAQUS وارد این نرم افزار شده است. اما این روش یک اشکال اساسی دارد که باعث شده است کاربرد آن برای تحلیل مسائل واقعی بسیار محدود باشد. به کمک روش المان محدود و با استفاده از نرم افزار ABAQUS نمی‌توان گسترش ترک در یک مسیر دلخواه را مورد بررسی قرار داد، به این معنی که مسیر رشد ترک بایستی از پیش معلوم بوده تا به کمک نرم افزار زمان و میزان این رشد مشخص گردد. در حالی که در بسیاری از مسائل واقعی مسیر رشد ترک قبل از حل مسئله معلوم نیست. به خاطر این مشکلات و مشکلات مشابه روش XFE به وجود آمده است [۳۰].

روش XFE نخستین بار در سال ۱۹۹۹ در دانشگاه North Western ارائه شد. در همان سال توسط بلتسچیکو و همکارانش [۳۱] این روش بر روی مسأله ترک پیاده سازی شد. موس و همکارانش [۳۲] با اعمال تغییراتی در ماهیت اولیه روش، نیاز به مش زنی مجدد را در هنگام بررسی گسترش ترک به روش XFE را از بین بردند. کار وی و همکارانش تنها محدود به مسائل دو بعدی بود و پس از آن سوکومر و همکارانش [۳۳] کار مشابهی را برای مسائل سه بعدی انجام دادند. از آن زمان به بعد دیگر برای حل مسائل به روش XFE نیاز به مش زنی مجدد مسئله در حین حل آن نبود. با بهره گیری بعضی توابع خاص مدل سازی شکست چسبناک امکان پذیر شد. این کار به وسیله موس و بلتسچیکو آغاز شد و گسترش یافت [۳۴ و ۳۵] روش XFE برای نخستین بار از نسخه ۶.۹ وارد نرم افزار تحلیل گر ABAQUS شد.

۳-۶- بررسی عوامل موثر بر رشد ترک

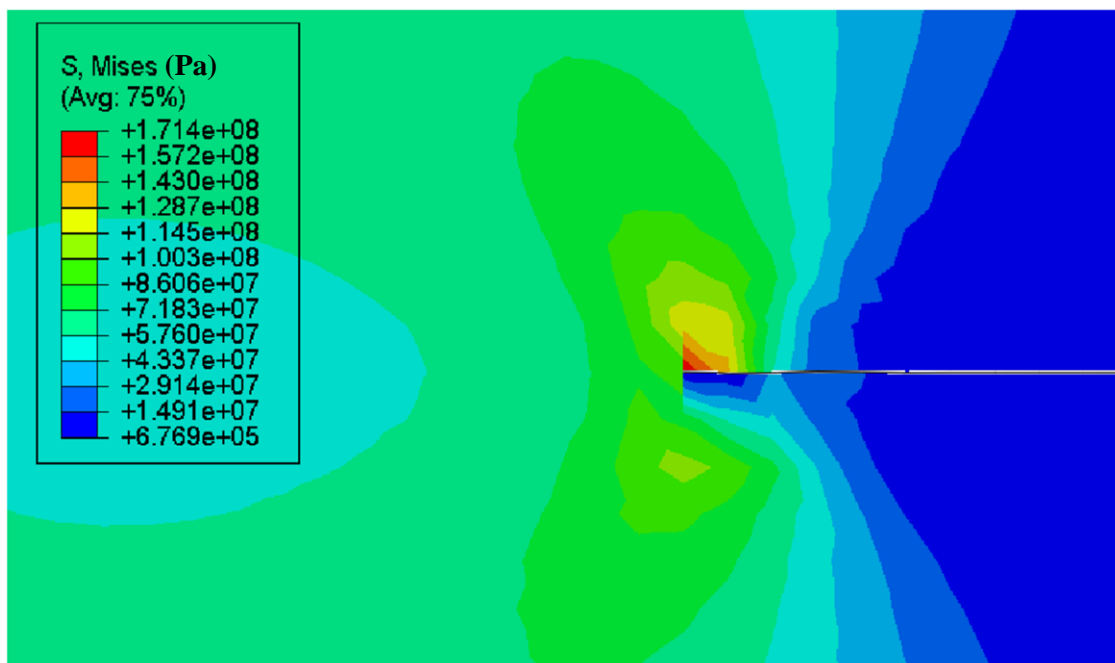
در این تحلیل به بررسی مسیر رشد ترک خستگی و عوامل موثر بر تغییر مسیر رشد ترک پرداخته می‌شود. در تحلیل عددی نرم افزار ABAQUS برای رشد ترک تحت بار خستگی از قانون پاریس استفاده شده است و عوامل موثر در مسیر رشد ترک با استفاده تحلیل عددی بررسی می‌شود.

در تحلیل رشد ترک در هر مرحله از رشد با استفاده از معیار ماکزیمم تنش مماسی استفاده شده است. با توجه به این معیار مسیر رشد ترک همواره در امتداد حداکثر تنش مماسی در محدوده نوک ترک می‌باشد. ابتدا با استفاده از این تحلیل به رشد ترک در صفحه مستطیلی شکل تحت بارگذاری سیکلی پرداخته می‌شود و سپس به مطالعه تغییر مسیر رشد ترک به علت وجود گشودگی در این صفحه پرداخته می‌شود، سپس عوامل موثر در رشد ترک در صفحه دارای گشودگی مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۳-۲ صفحه مستطیلی شکلی را نشان می‌دهد که تحت بارگذاری خستگی قرار گرفته است.



شکل ۳-۲ صفحه مستطیلی شکل دارای ترک (ابعاد برحسب میلی‌متر)

در شکل ۳-۳ مسیر رشد ترک در هنگام بارگذاری و ناحیه تنش نوک ترک به صورت یک هندسه لوبیایی شکل نشان داده شده است. می توان با تغییر در وضعیت این میدان تنش، مسیر رشد ترک را تغییر و به سمت مسیر مشخصی کنترل کرد.



شکل ۳-۳ مسیر رشد ترک در صفحه تحت بارگذاری خستگی

همانطور که در شکل ۳-۳ مشاهده می شود، میدان تنش نوک ترک به صورت مجموعه اشکال منظم درون هم که همگی به صورت لوبیایی شکل هستند، ایجاد شده است. هرکدام از مناطق نشان داده شده دارای یک محدوده تنشی مشخص می باشد که مقادیر آنها به صورت یک جدول در کنار شکل آورده شده است. در شکل ۳-۳ مسیر رشد ترک برای صفحه دارای ترک و بدون گشودگی نمایش داده شده است و باتوجه به اینکه هر گشودگی دارای یک میدان تمرکز تنش نیز می باشد، می توان با ایجاد گشودگی در صفحه و تاثیر میدان تمرکز تنش گشودگی بر ناحیه تنش نوک ترک، ناحیه تنش را تغییر داد و لذا مسیر رشد ترک را به سمت مسیر مشخصی کنترل کرد.

در ادامه وضعیت‌های مختلف گشودگی و تاثیرات آن بر مسیر رشد ترک مورد بررسی قرار می‌گیرد.

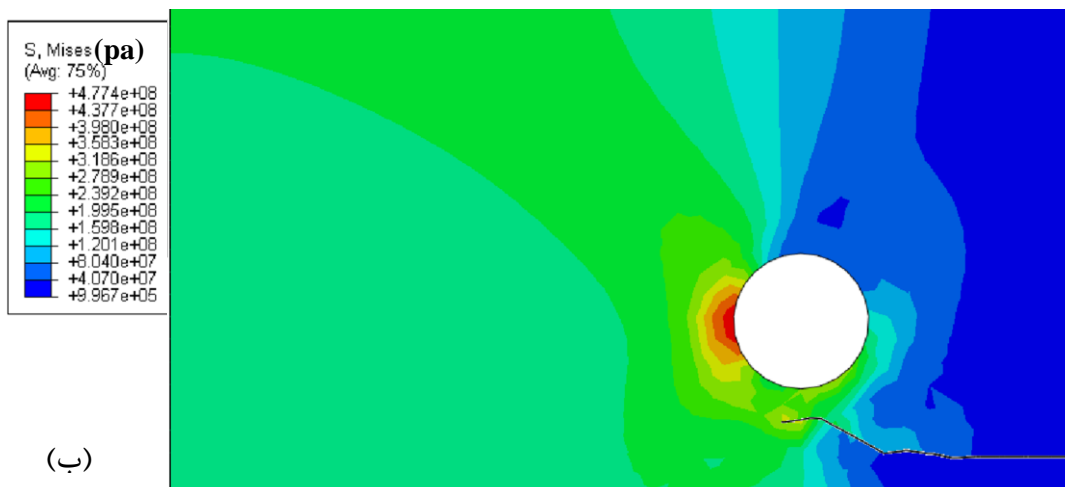
با توجه به معیار حداکثر تنش مماسی با ایجاد گشودگی در اطراف ترک، میدان تمرکز تنش ایجاد شده حاصل از گشودگی بر حوزه تنش نوک ترک تاثیر گذاشته و مسیر رشد ترک را تغییر می‌دهد. بدین منظور صفحه‌ای مستطیل شکل و دارای ترک لبه‌ای را با استفاده از نرم افزار آباکوس شبیه سازی کرده و تاثیر عوامل مختلف رشد ترک را بررسی می‌کنیم. طول و عرض صفحه مستطیل شکل به ترتیب برابر با ۱۲۰ میلی‌متر و ۱۰۰ میلی‌متر می‌باشد. جنس صفحه در حل عددی که در مثال‌های زیر آمده است، فولاد ضدزنگ ۳۰۴ بوده که دارای مدول یانگ برابر ۲۱۷ گیگا پاسگال و ضریب پواسون آن برابر با ۰.۳۳ در نظر گرفته می‌شود.

۳-۶-۱- تاثیر شعاع گشودگی

برای بررسی چگونگی مسیر رشد ترک اقدام به ایجاد گشودگی در نزدیکی مسیر رشد ترک قبلی می‌کنیم. با ایجاد گشودگی تمرکز تنش در محدوده اطراف گشودگی ایجاد شد و تاثیر مستقیمی بر روی ناحیه تنش نوک ترک دارد و لذا باعث تغییر مسیر رشد ترک می‌گردد.

بارگذاری به صورت سیکلی و با دامنه‌ی ۱۰/۷۵ کیلو نیوتن و میانگین ۱۱/۲۵ کیلو نیوتن و فرکانس ۱۰ هرتز انجام شده است.

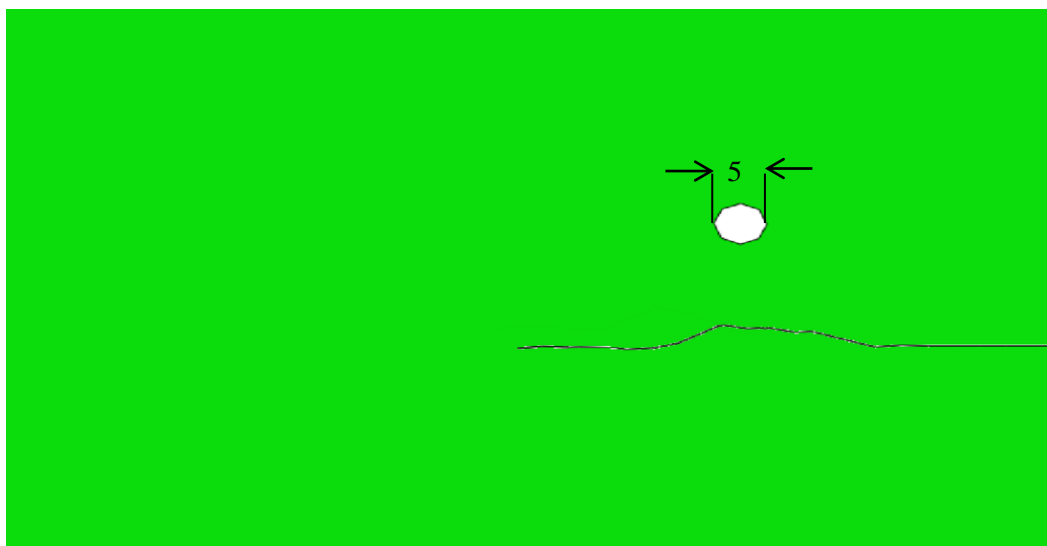
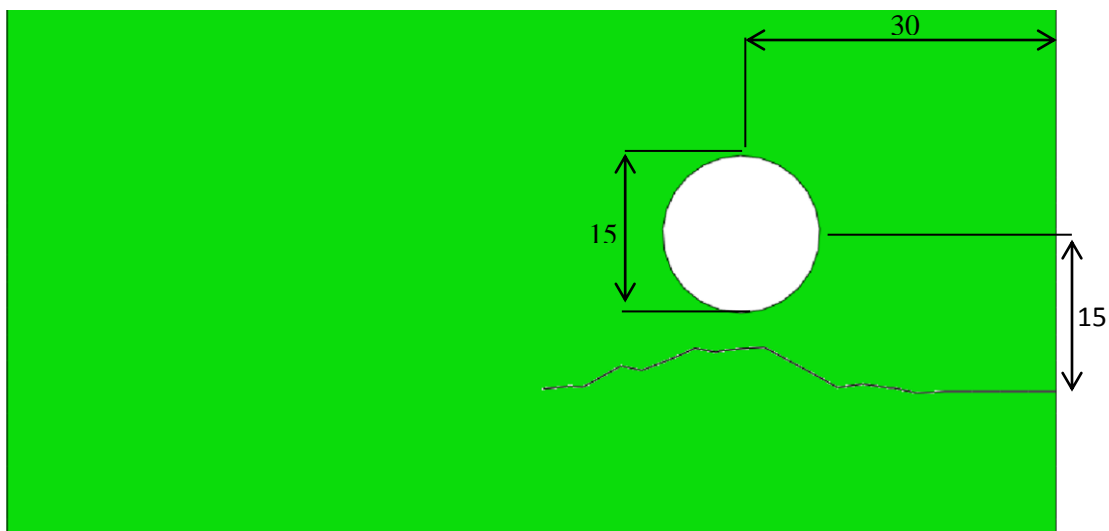
در شکل ۳-۴ تاثیر میدان تمرکز تنش بر ناحیه شدت تنش نوک ترک نشان داده شده است. همانطور در قسمت اول شکل ۳-۴ نشان داده شده است، گشودگی ایجاد شده میدان تنشی پروانه شکلی ایجاد می‌کند که بر روی میدان تنش لوبیایی شکل نوک ترک تاثیر می‌گذارد. این تاثیر باعث تغییر در مسیر رشد ترک می‌شود. شکل ۳-۴ (الف) تاثیر نیمه راست حوزه تمرکز تنش گشودگی بر نوک ترک مشاهده می‌شود و در شکل ۳-۴ (ب) زمانی که ترک رشد کرده و از محدوده نیمه راست گشودگی عبور کرده است و تحت تاثیر میدان تمرکز تنش نیمه چپ گشودگی قرار گرفته است مشاهده می‌گردد.



شکل ۳-۴ تاثیر میدان تمرکز تنش گشودگی بر ناحیه تنش نوک ترک

با توجه به این که هر گشودگی دارای میدان تمرکز تنش مشخصی می‌باشد و با افزایش شعاع گشودگی این میدان بزرگتر می‌شود، لذا می‌توان با تغییر شعاع، مسیر رشد ترک را تغییر داد. بدین منظور در ادامه نتایج حل دو گشودگی با قطرهای مختلف آمده است. در این دو حالت که دارای شرایط یکسانی بوده و فقط دارای شعاع گشودگی متفاوتی می‌باشند، تاثیر شعاع گشودگی بررسی شده است. قطر گشودگی در حالت اول ۵ میلی متر و در حالت دوم ۱۵ میلی متر می‌باشد.

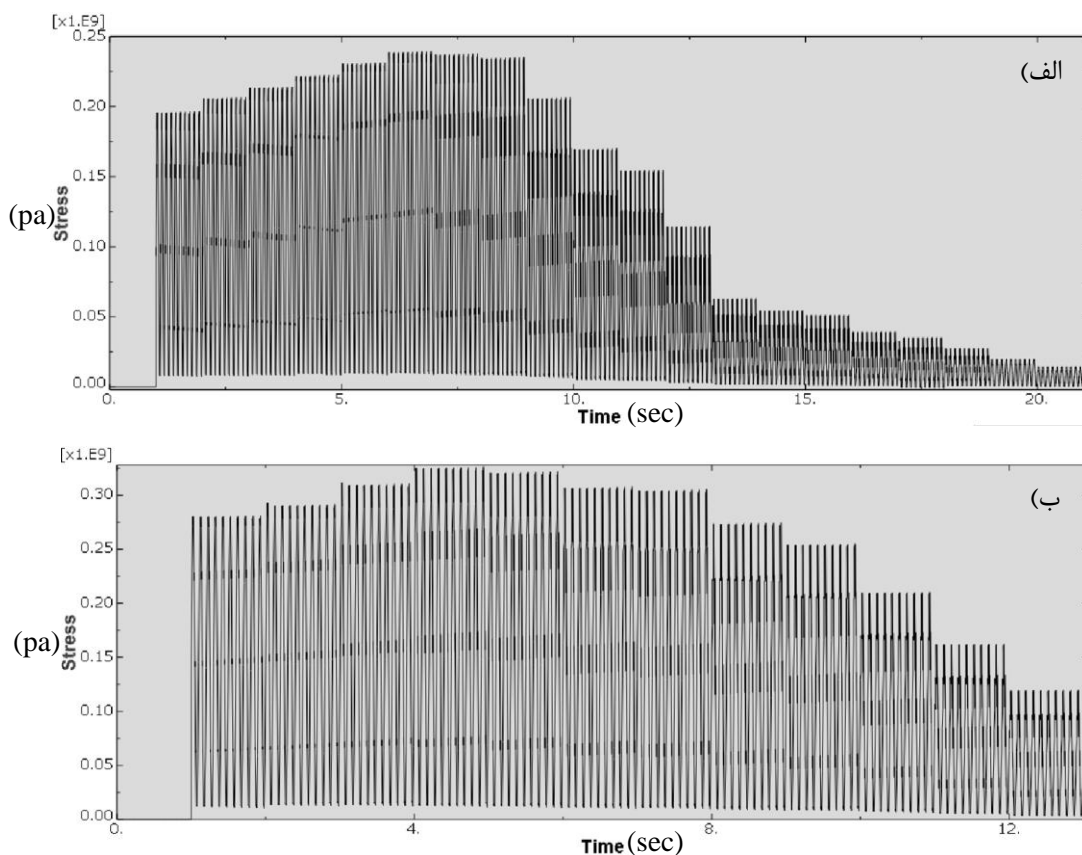
همانطور که در شکل ۳-۵ مشاهده می‌شود، با افزایش شعاع گشودگی، شعاع میدان تمرکز تنش نیز افزایش یافته و در اثر تداخل با ناحیه تنش نوک ترک؛ مسیر رشد آن را تغییر می‌دهد. در حالتی که گشودگی کوچک باشد به علت اینکه این دو میدان برهم تاثیر کمتری دارند تغییر مسیر ترک کمتر اتفاق افتاده است.



شکل ۳-۵ تاثیر شعاع گشودگی بر تغییر مسیر رشد ترک (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

لذا شعاع گشودگی باید به اندازه‌ای باشد که میدان تمرکز تنش ایجاد شده با میدان تنشی نوک ترک برخورد داشته باشد و هر مقدار این برخورد بیشتر باشد، تاثیر گشودگی بر مسیر رشد ترک بیشتر می‌باشد.

در شکل ۳-۶ تاثیر افزایش شعاع گشودگی بر اندازه تنش میدان تمرکز تنش بررسی شده است. بدین منظور مقدار تنش در قسمت سمت راست گشودگی نسبت به زمان آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش شعاع گشودگی میزان تنش این میدان بزرگتر می‌شود و به همین علت تاثیر بیشتری بر ناحیه تنش نوک ترک می‌گذارد که باعث افزایش تغییر در مسیر رشد ترک می‌شود.

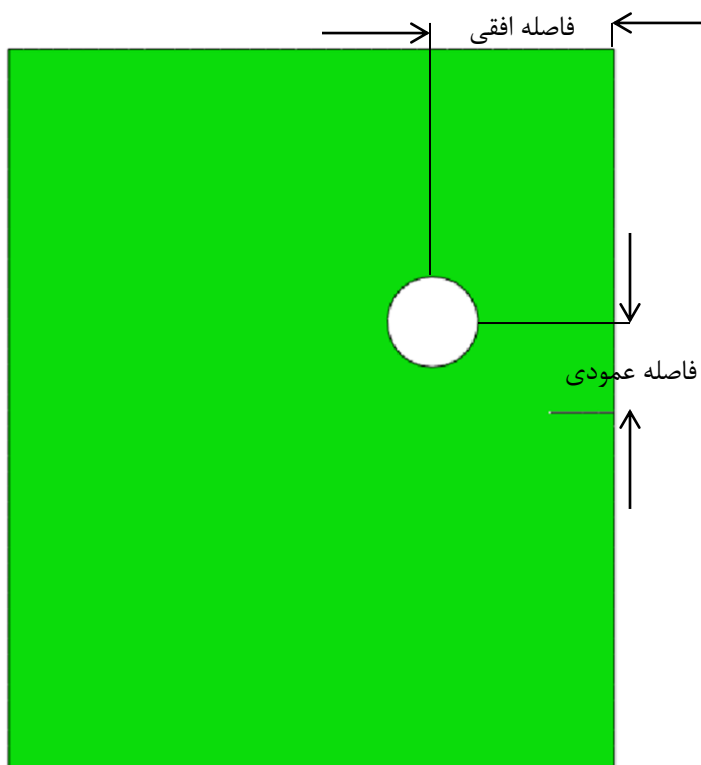


شکل ۳-۶ تاثیر شعاع گشودگی بر اندازه میدان تمرکز تنش ایجاد شده

الف) قطر گشودگی ۵ میلی‌متر، ب) قطر گشودگی ۱۵ میلی‌متر

۳-۶-۲- تاثیر مختصات مرکز گشودگی

با تغییر مختصات مرکز گشودگی نسبت به موقعیت ترک، تاثیر میدان تمرکز تنش تغییر می‌کند. تاثیر مختصات مرکز گشودگی شامل فاصله افقی و فاصله عمودی مرکز گشودگی نسبت به ترک می‌باشد. فاصله افقی و فاصله عمودی ذکر شده در شکل ۳-۷ مشخص شده است و در ادامه به تاثیر فاصله افقی و فاصله عمودی مرکز گشودگی در مسیر رشد ترک پرداخته شده است.

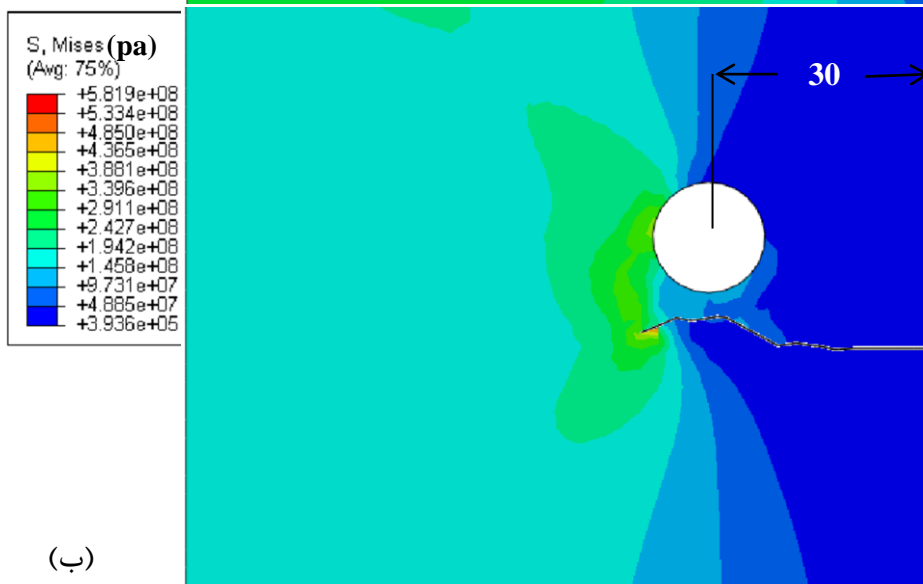
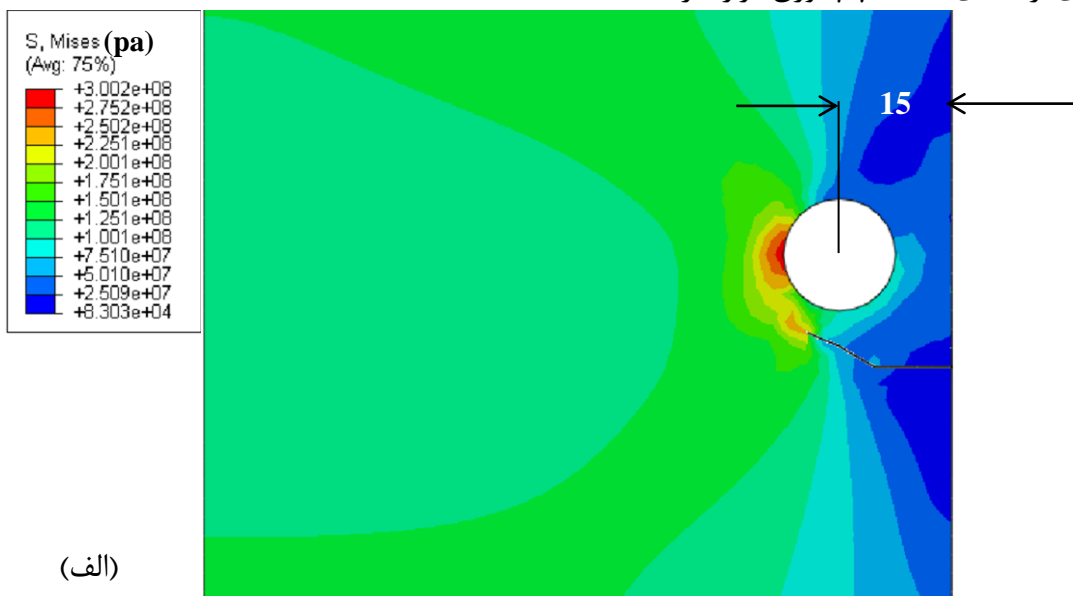


شکل ۳-۷ فاصله عمودی و فاصله افقی مرکز گشودگی

۳-۶-۲-۱ تاثیر فاصله افقی مرکز گشودگی

با تغییر فاصله افقی مرکز گشودگی از نوک ترک تاثیر میدان تمرکز تنش تغییر می‌کند. چون بارگذاری عمود بر طول ترک می‌باشد، همانطور که در شکل ۳-۸ مشاهده می‌شود، تاثیر بارگذاری بیشتر بر نقاط افقی گشودگی می‌باشد.

تأثیر مختصات مرکز گشودگی بر مسیر رشد ترک در دو حالت بررسی شده است. در حالت اول مرکز گشودگی در فاصله افقی ۱۵ میلی متری از لبه سمت راست ورق و در حالت دوم در فاصله ۳۰ میلی متری از لبه سمت چپ ورق قرار دارد.

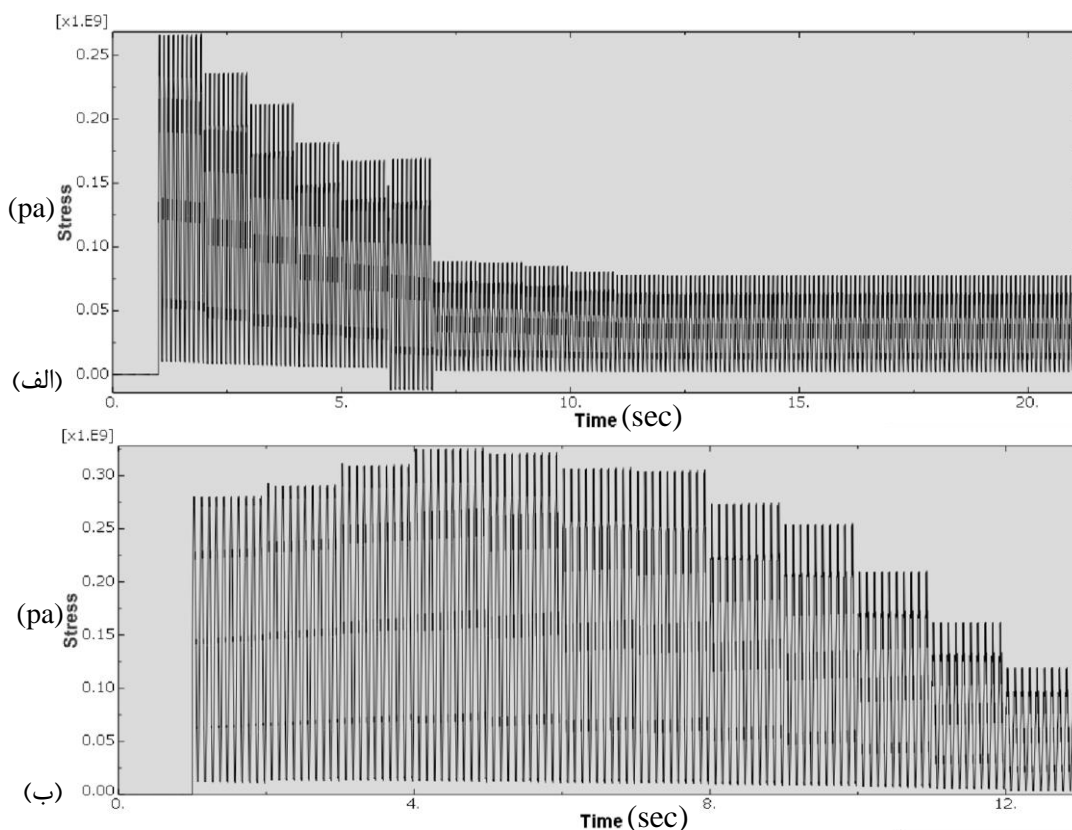


شکل ۳-۸ تأثیر فاصله ی افقی مرکز گشودگی بر مسیر رشد ترک

(الف) فاصله افقی ۱۵ میلی متر، (ب) فاصله افقی ۳۰ میلی متر

همانطور که در شکل ۳-۸ مشاهده می‌شود، با کاهش فاصله مرکز گشودگی تا لبه عمودی سمت راست ورق، تاثیر میدان تنش سمت راست گشودگی بر مسیر رشد ترک کاهش می‌یابد.

در شکل ۳-۹ مقدار تنش بر حسب زمان برای بخش سمت راست گشودگی برای هر دو حالت فوق الذکر ترسیم شده است. با توجه به نمودارها مشاهده می‌شود در حالتی که فاصله مرکز گشودگی نسبت به نوک ترک کمتر می‌شود، میدان تنش حاصل از سمت راست گشودگی و تاثیر میدان تمرکز تنش حاصل از گشودگی بر مسیر رشد ترک کاهش می‌یابد.

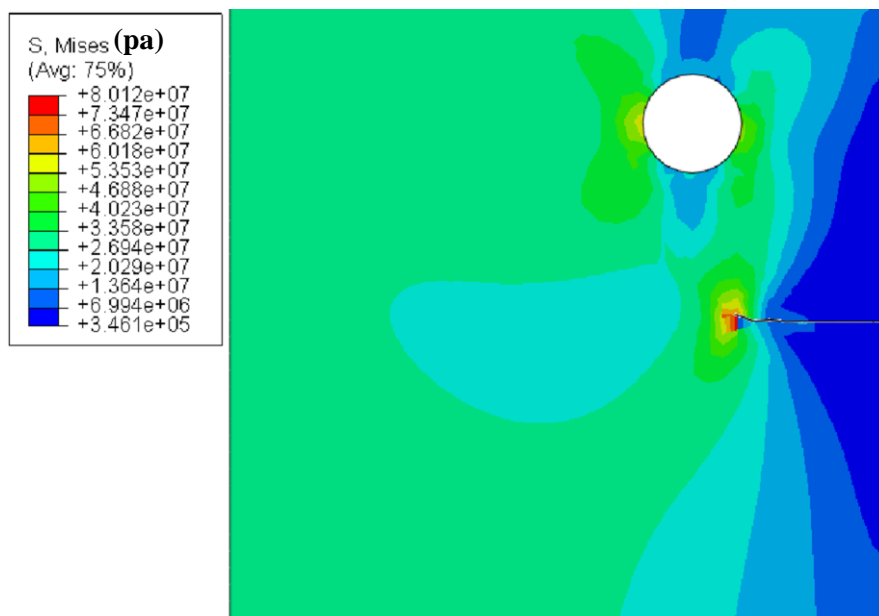


شکل ۳-۹ تاثیر فاصله افقی مرکز گشودگی نسبت به ترک بر مقدار تنش حاصل از گشودگی

(الف) فاصله افقی ۱۵ میلی‌متر، (ب) فاصله افقی ۳۰ میلی‌متر

۳-۶-۲-۲- تاثیر فاصله عمودی مرکز گشودگی

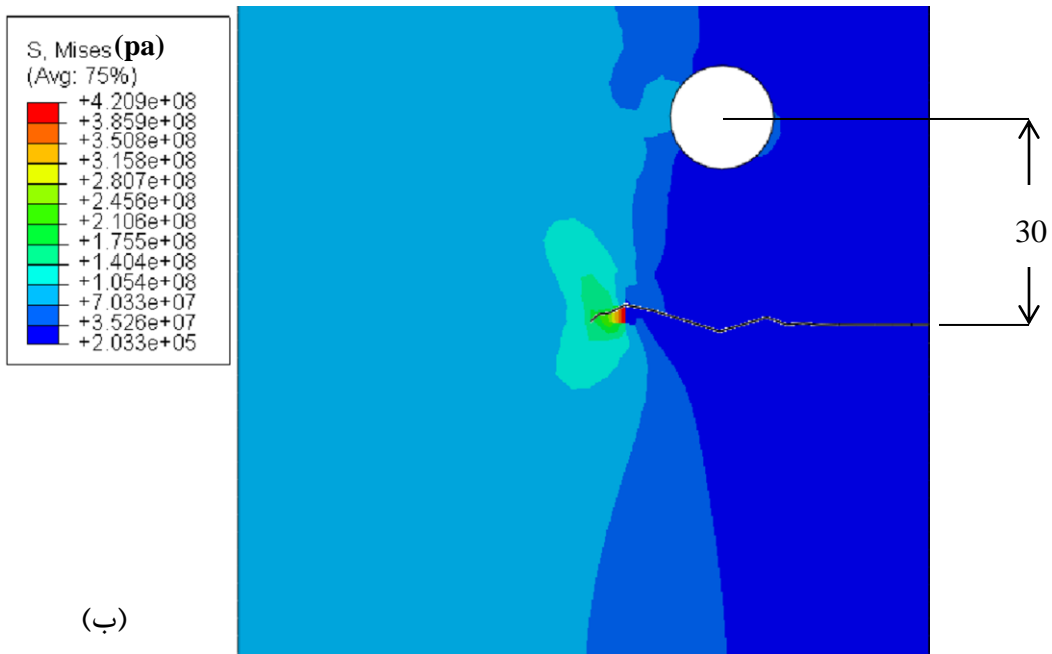
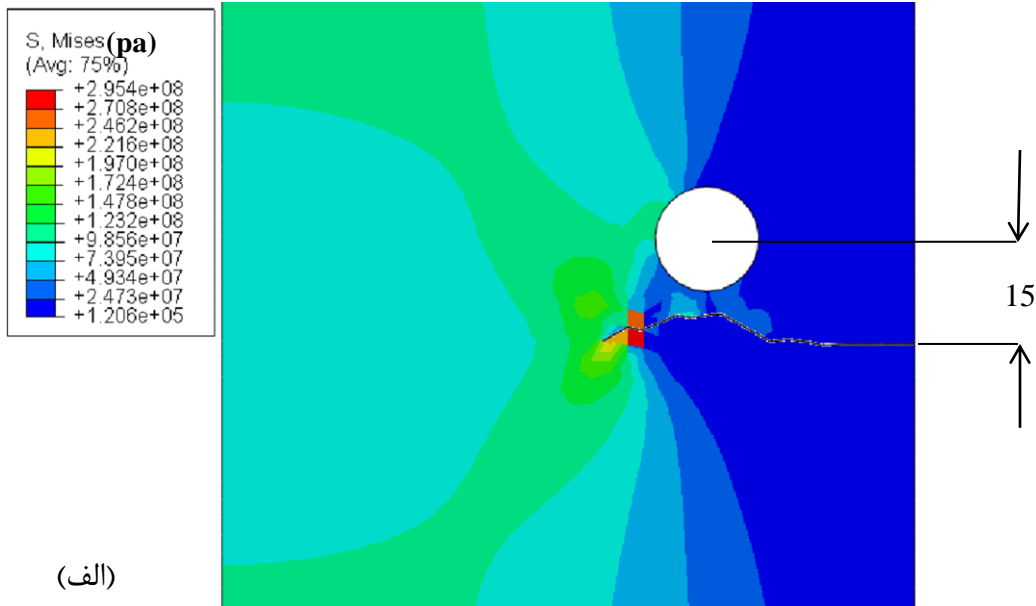
با تغییر فاصله عمودی مرکز گشودگی نسبت به نوک ترک می توان تاثیر میدان تمرکز تنش را بر حوزه تنشی نوک ترک تغییر داده و مسیر رشد ترک را عوض کرد.



شکل ۳-۱۰- تاثیر افزایش فاصله عمودی مرکز گشودگی بر میدان های تنش ایجاد شده

همانطور که در شکل ۳-۱۰ مشاهده می شود، با افزایش فاصله عمودی گشودگی نسبت به ترک، میدان پروانه ای شکل گشودگی تاثیر بسیار کمی بر میدان لوبیایی شکل ناحیه تنش نوک ترک دارد؛ به همین علت تاثیر کمتری بر مسیر رشد ترک دارد.

همانطور که در شکل ۳-۱۱ مشاهده می شود، با افزایش فاصله عمودی مرکز گشودگی و کاهش تاثیر میدان تمرکز تنش گشودگی بر ناحیه تنش نوک ترک، انحراف مسیر رشد ترک کاهش می یابد. در شکل ۳-۱۱ دو فاصله عمودی مختلف مرکز گشودگی نسبت به امتداد ترک نشان شده است. در شکل بالا مرکز گشودگی تا امتداد ترک ۱۵ میلی متر و در شکل پایین ۳۰ میلی متر فاصله دارد.



شکل ۳-۱۱ تاثیر فاصله عمودی گشودگی نسبت به ترک در تغییر مسیر رشد ترک

(الف) فاصله عمودی ۱۵ میلی متر، (ب) فاصله عمودی ۳۰ میلی متر

۳-۶-۳- تاثیر طول ترک

با توجه به رابطه گریفیث مشاهده می شود که رابطه‌ای بین استحکام شکست (σ) و طول ترک (a) برقرار است که می‌توان نتیجه گرفت:

$$\sigma \propto \frac{1}{\sqrt{a}} \quad (۱۳-۳)$$

با توجه به رابطه ۳-۱۳ با افزایش طول ترک (a) تنش لازم برای رشد ترک کاهش می‌یابد. بنابراین با افزایش طول ترک، سرعت رشد ترک افزایش می‌یابد.

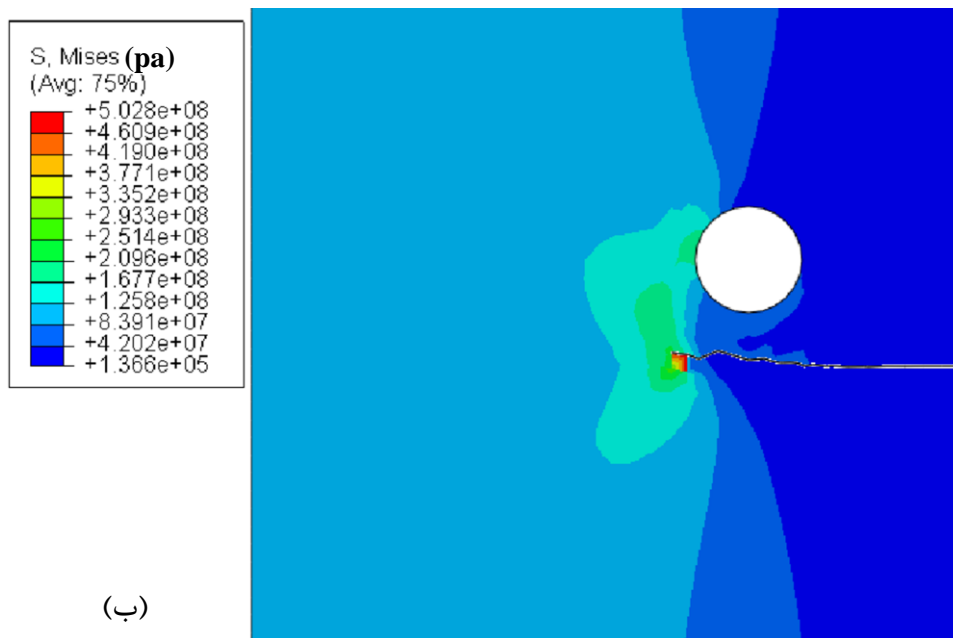
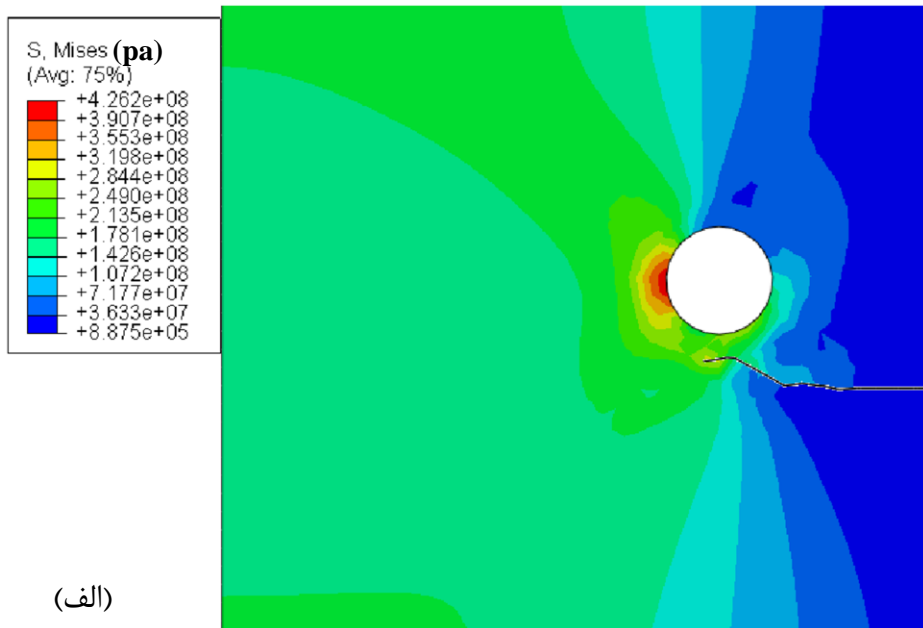
۳-۶-۴- تاثیر نیروی وارد شده به قطعه

تاثیر گشودگی بر مسیر رشد ترک با ایجاد میدان تمرکز تنش حاصل از گشودگی و اثر آن بر ناحیه تنش نوک ترک حاصل می‌شود، البته مقدار نیروی وارد شده نباید از مقدار نیروی تسلیم قطعه بیشتر شود؛ زیرا در این صورت نوک ترک وارد ناحیه پلاستیک می‌شود و دیگر قوانین الاستیک بر آن صادق نمی‌باشد. هرچقدر میزان نیرو وارده کمتر باشد، رفتار ماده به رفتار الاستیک نزدیکتر می‌باشد؛ البته با کاهش نیرو سرعت رشد ترک نیز کاهش می‌یابد.

در شکل ۳-۱۲ (الف) نیرویی به صورت سیکلی و با دامنه $۱۰/۷۵$ کیلو نیوتن و میانگین $۱۱/۲۵$ کیلو نیوتن وارد شده است و در شکل ۳-۱۲ (ب) نیرو با دامنه $۱۵/۷۵$ کیلو نیوتن و میانگین $۱۶/۲۵$ کیلو نیوتن بر قطعه اعمال شده است.

همانطور که ذکر شد با افزایش نیرو سرعت رشد ترک افزایش می‌یابد. در شکل ۳-۱۲ برای تعداد سیکل مشخص در هر دو حالت، سرعت رشد ترک در حالت (ب) کمی بیشتر است. البته با افزایش نیرو احتمال خروج از ناحیه الاستیک قطعه در محدوده ترک می‌باشد؛ به همین علت هرچقدر

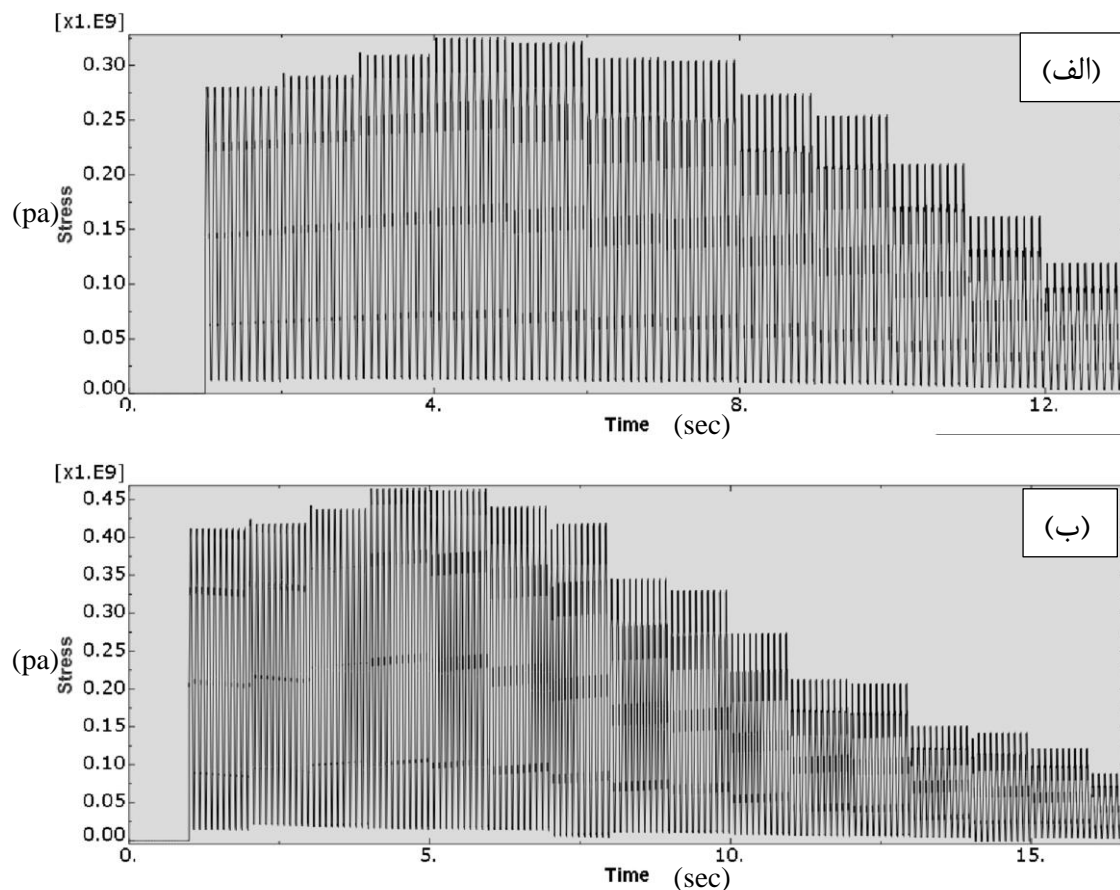
میزان نیروی وارده کمتر باشد و از محدوده نیروی تسلیم دورتر شود، جواب بدست آمده از دقت بالاتری برخوردار است.



شکل ۳- ۱۲ تاثیر مقدار نیروی وارده بر قطعه بر مسیر رشد ترک

(الف) دامنه ۱۰/۷۵ کیلو نیوتن و میانگین ۱۱/۲۵ کیلو نیوتن، (ب) دامنه ۱۵/۷۵ کیلو نیوتن و میانگین ۱۶/۲۵ کیلو نیوتن

همانطور که در شکل ۳-۱۳ مشاهده می‌شود؛ نمودارها مقیاسی از یکدیگر می‌باشند و تنها از نظر مقدار نیرو با یکدیگر تفاوت دارند. با افزایش نیرو مقدار تنش میدان تمرکز تنش بزرگتر می‌شود، ولی در شکل میدان تمرکز تنش تغییری ایجاد نمی‌گردد.



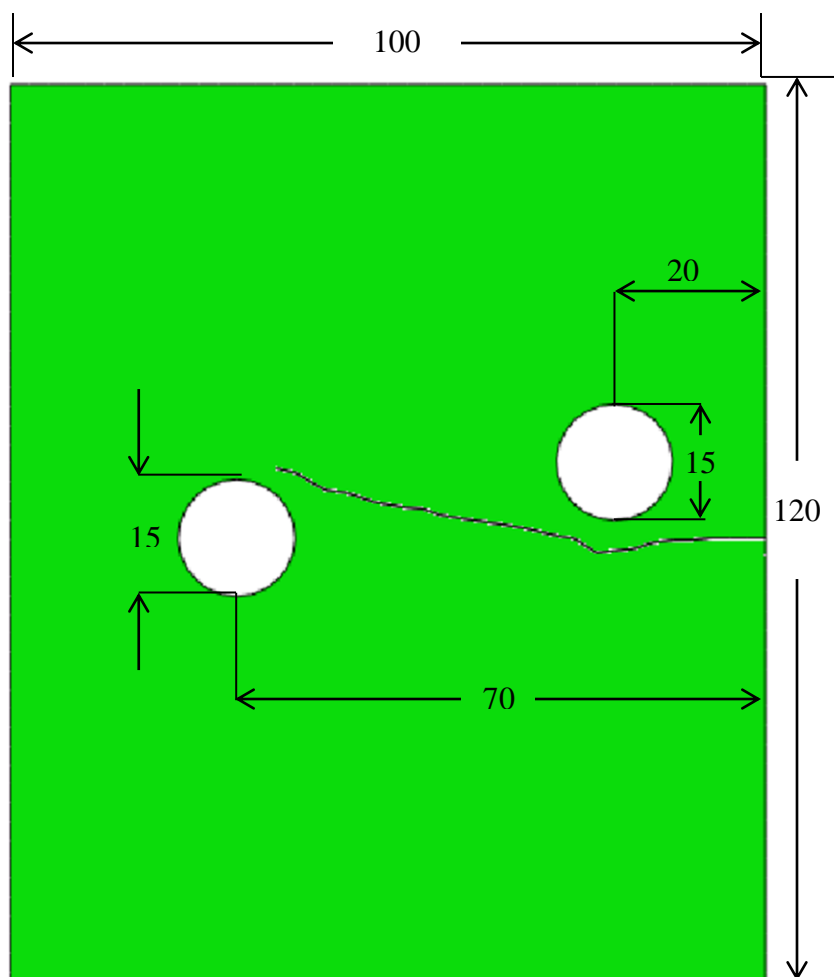
شکل ۳-۱۳ تاثیر افزایش نیرو بر میدان تمرکز تنش اطراف گشودگی

(الف) دامنه ۱۰/۷۵ کیلو نیوتن و میانگین ۱۱/۲۵ کیلو نیوتن، (ب) دامنه ۱۵/۷۵ کیلو نیوتن و میانگین ۱۶/۲۵ کیلو نیوتن

۳-۶-۵- تاثیر افزایش تعداد گشودگی

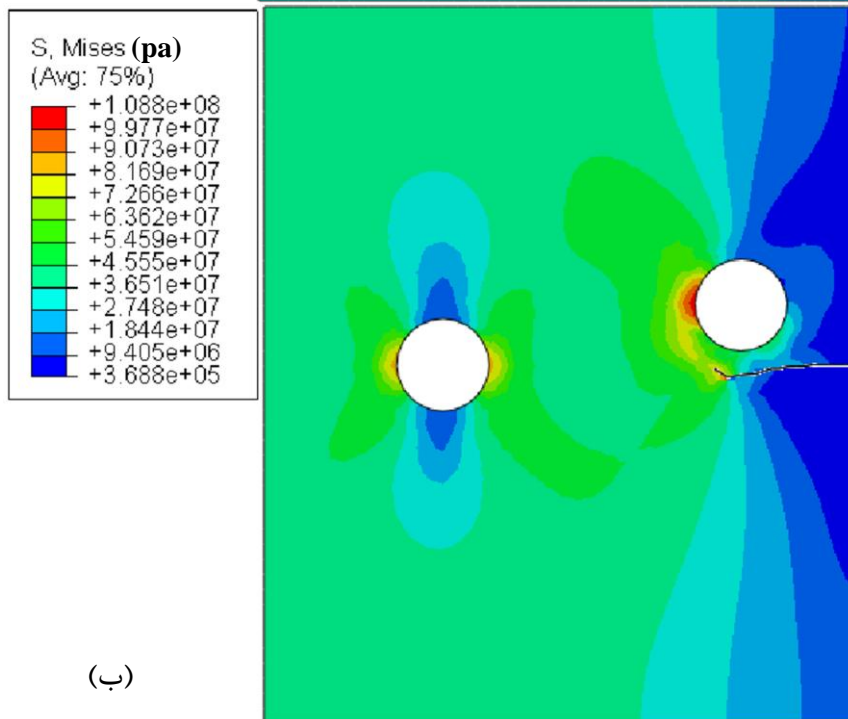
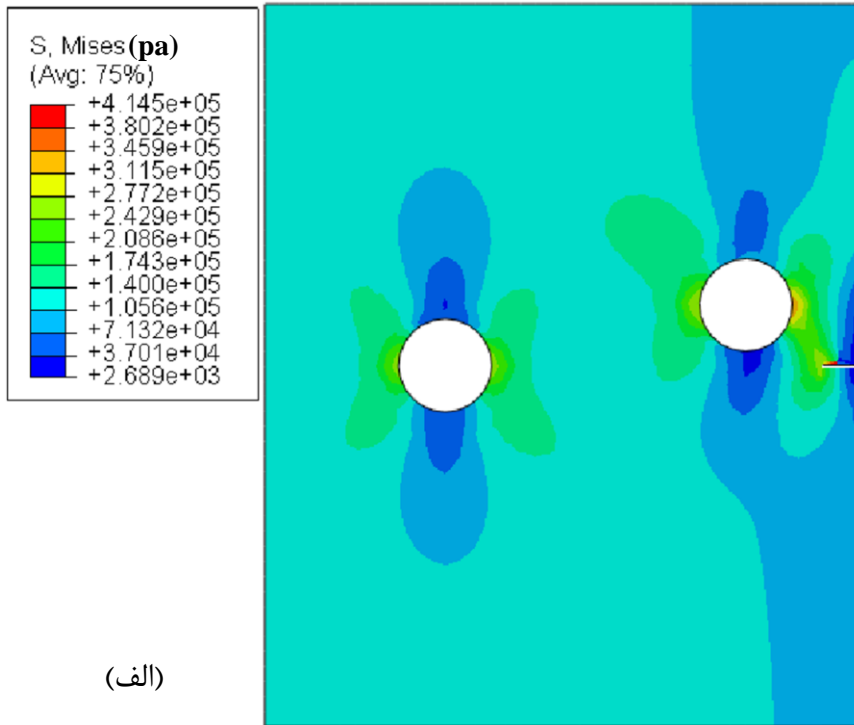
به ازای هر گشودگی یک میدان تمرکز تنش در اطراف گشودگی ایجاد می‌شود که بر مسیر رشد ترک تاثیر می‌گذارد. با افزایش تعداد گشودگی‌ها می‌توان مسیر رشد ترک را باز هم تغییر داد.

همانطور که در شکل ۱۵-۳ و ۱۶-۳ مشاهده می‌شود، با ایجاد دو گشودگی دو بار مسیر رشد ترک منحرف شده است. در شکل ۱۱-۳ تاثیر گشودگی اول و میدان تمرکز تنش مربوطه و در شکل ۱۶-۳ تاثیر گشودگی دوم و میدان تمرکز تنش ایجاد شده مربوط به آن نشان داده شده است.



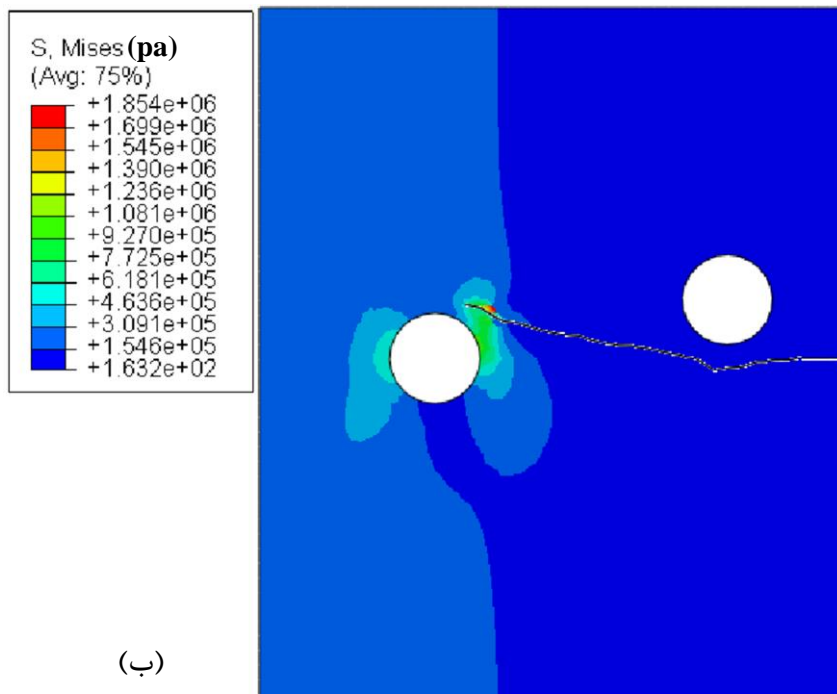
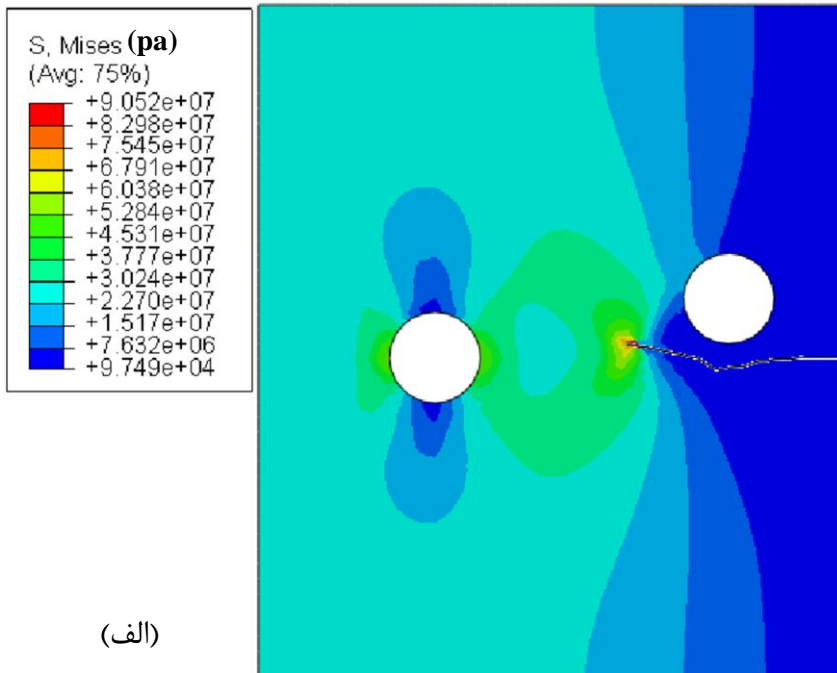
شکل ۳-۱۴ مسیر رشد ترک در صفحه تحت بارگذاری سیکلی و دارای دو گشودگی

همانطور که در اشکال ۱۵-۳ و ۱۶-۳ مشاهده می‌شود و قبلا نیز ذکر شده بود، ناحیه تنش نوک ترک به صورت لوبیایی شکل و ناحیه تنش گشودگی‌ها به صورت پروانه ای شکل می‌باشد.



شکل ۳-۱۵ تاثیر گشودگی اول در مسیر رشد ترک در صفحه دارای دو گشودگی

(الف) تاثیر سمت راست گشودگی اول، (ب) تاثیر سمت چپ گشودگی اول



شکل ۳-۱۶ تاثیر گشودگی دوم بر مسیر رشد ترک در صفحه دارای دو گشودگی

(الف) تاثیر گشودگی دوم بر میدان تنش نوک ترک، (ب) تغییر مسیر رشد ترک بر اثر گشودگی دوم

فصل چهارم

آزمایش های تجربی

۴-۱- مقدمه‌ای درباره آزمایش‌های تجربی

در این فصل نتایج بدست آمده در مورد رشد ترک تحت بارگذاری خستگی در یک ورق مستطیلی مورد بررسی قرار گرفته است. که مسیر رشد ترک توسط ایجاد گشودگی در موقعیت‌های مختلف تغییر داده شده است، این آزمایش بر روی صفحات با جنس‌ها و ضخامت‌ها و ابعاد مختلف به شرح زیر انجام شده است.

۴-۲- دستگاه آزمایش

آزمایش‌های انجام شده در این بخش توسط دستگاه سروهیدرولیک INSTRON8802 که توانایی اعمال بار دینامیکی تا ظرفیت ۲۵۰ کیلو نیوتن را دارا می‌باشد، انجام گرفته است. [۳۶]



شکل ۴-۱ دستگاه سروهیدرولیک INSTRON8802

۳-۴- قطعات مورد آزمایش

برای انجام آزمایش از قطعات مستطیلی شکل با ابعاد مختلف استفاده شده است، جنس قطعات استفاده شده در آزمایش‌ها و اندازه قطعات به شرح زیر می‌باشد:

فولاد SS304 : در این تحقیق از فولاد SS304 با ضخامت ۱ میلی‌متر و طول و عرض ۱۳۵ میلی‌متر و نیز ضخامت ۰.۹ میلی‌متر و طول و عرض به ترتیب ۱۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر استفاده شده است. خواص مکانیکی فولاد SS304 در جدول ۴-۱ و ترکیب شیمیایی آن در جدول ۴-۲ آورده شده است [۳۷].



شکل ۴-۲ فولاد SS304 به ضخامت ۰.۹ میلی‌متر

(ابعاد بر حسب میلی‌متر)

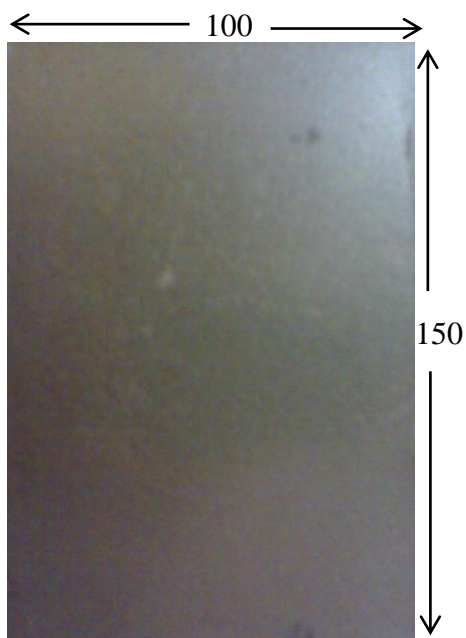
جدول ۴-۱- خواص مکانیکی فولاد SS304

مقدار	مشخصات
۲۱۷Gpa	مدول یانگ
۳۴۵Mpa	تنش تسلیم
۴۵۰ Mpa	تنش نهایی
۰.۳۳	ضریب پواسون

جدول ۴-۲- خواص شیمیایی فولاد SS304

Cr	Ni	Mn	N	S	C	Si	P
۱۷	۸	۲	۰.۱	۰.۰۳	۰.۱۵	۰.۷۵	۰.۰۴۵

فولاد St37 : در این تحقیق از صفحات فولاد St37 با ضخامت ۲ میلی متر و طول و عرض به ترتیب ۱۵۰ و ۱۰۰ میلی متر نیز استفاده شده است. خواص مکانیکی فولاد St37 در جدول ۴-۳ و ترکیب شیمیایی آن در جدول ۴-۴ آمده است.



شکل ۴-۳- فولاد St37 به ضخامت ۲ میلی متر (ابعاد بر حسب میلی متر)

جدول ۴-۳ خواص مکانیکی فولاد ST37

مقدار	مشخصات
۲۰۷Gpa	مدول یانگ
۲۶۵Mpa	تنش تسلیم
۴۵۰Mpa	تنش نهایی
۰.۳۳	ضریب پواسون

جدول ۴-۴ ترکیب شیمیایی فولاد St37

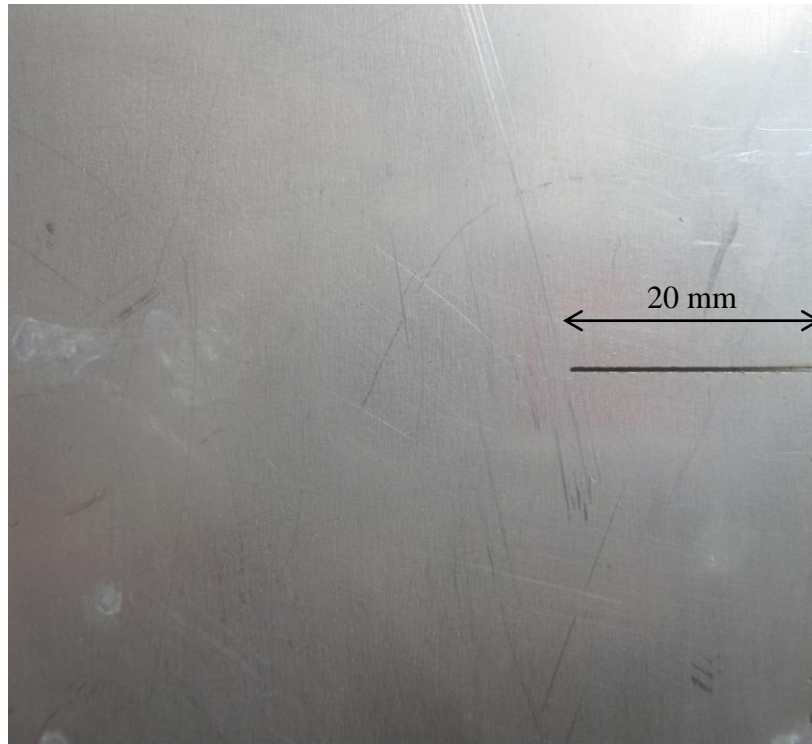
C	Mn	Si	P	S	Cr	N
۰.۰۷-۰.۱۴	۰.۳۵-۰.۶۵	۰.۱۷-۰.۳۷	۰.۰۳۵	۰.۰۴	۰.۱۵	۰.۰۰۸

۴-۴- نحوه ایجاد ترک در صفحات

در این تحقیق هدف پیش بینی مسیر رشد ترک و کنترل مسیر آن می باشد؛ بدین منظور در ابتدا باید صفحه مورد آزمایش دارای یک ترک اولیه باشد و سپس مسیر در اثر بارگذاری نوسانی ادامه رشد ترک مورد بررسی قرار گیرد.

برای ایجاد ترک لبه ای در صفحات از سیم برشی^۱ استفاده شده است. قطر سیمی که در دستگاه وایرکات برای ایجاد ترک در این صفحات استفاده شده است برابر با ۰.۱ میلی متر می باشد. هرچه قطر سیم کمتر باشد، شیار ایجاد شده در صفحات به ترک نزدیک تر می باشد.

¹ Wire Cut



شکل ۴-۴ نمونه ترک ایجاد شده با وایرکات در صفحه فلزی

ایجاد ترک با استفاده از وایرکات باعث ایجاد شکل نیم دایره در نوک ترک می‌شود در حالی که نوک ترک واقعی تیز می‌باشد. بدین منظور برای اینکه نوک ترک ایجاد شده به وسیله وایرکات شباهت بیشتری با نوک ترک داشته باشد، می‌توان نوک ترک را به حالت مثلثی تبدیل کرد. بدین منظور می‌توان از اره‌ای با ضخامت کمتر از ۰.۱ میلی متر استفاده کرد و شیار را از حالت نیم دایره ای خارج و نوک آنرا را تیز کرد. البته لازم به ذکر است که این کار باید با دقت بالایی انجام شود تا تاثیری بر مسیر رشد ترک نداشته باشد، هرچند این تاثیر می‌تواند بسیار ناچیز باشد.

۴-۵- نحوه قرار گرفتن صفحات در دستگاه

صفحات مورد آزمایش بین دو فک هیدرولیکی بالا و پایین دستگاه محکم قرار می‌گیرند. ترک‌های ایجاد شده در صفحات کاملاً به صورت افقی و بدون هیچگونه زاویه نسبت به اضلاع صفحه ایجاد شده است. بدین منظور صفحه مورد آزمایش کاملاً به صورت عمودی قرار می‌گیرد تا نیروی وارد شده به صفحه کاملاً به صورت عمود بر راستای ترک وارد شود. زیرا در غیر اینصورت نیروی وارد شده به صورت یک مود ترکیبی عمل خواهد کرد.



شکل ۴-۵ نحوه قرار گرفتن صفحات تحت آزمایش در فک‌های بالا و پایین دستگاه

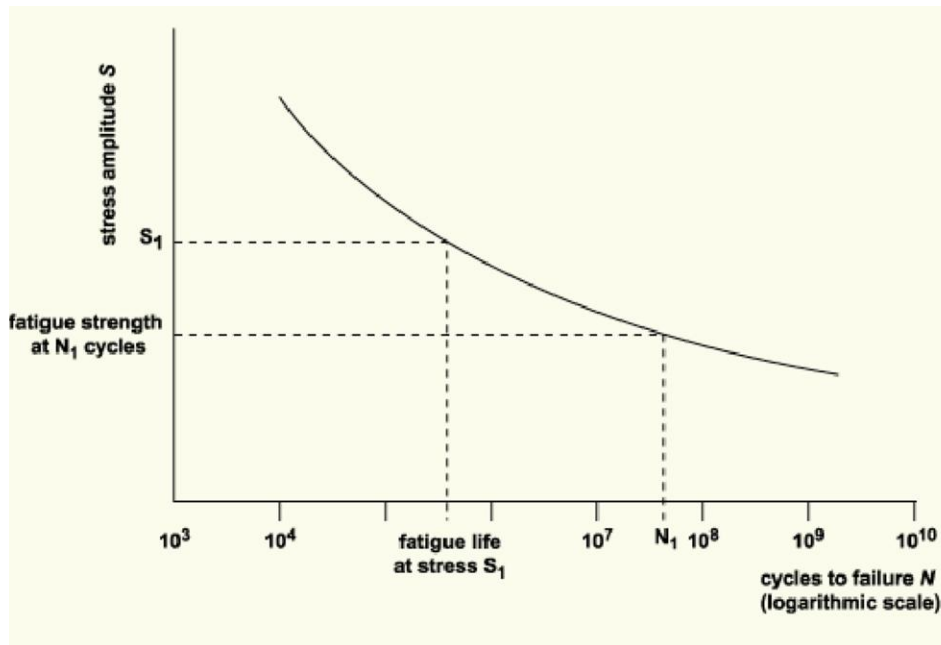
۴-۶- بارگذاری وارده بر صفحات

صفحات مورد آزمایش تحت بارگذاری سیکلی قرار گرفته و به منظور رشد ترک همواره بارگذاری به صورت کششی است. برای این منظور مقدار میانگین بار سیکلی به مقدار $0/5$ کیلو نیوتن از مقدار دامنه بار سیکلی بزرگتر می‌باشد تا همواره صفحه تحت کشش باشد. میانگین و دامنه بارگذاری سیکلی برای صفحات مختلف متفاوت در نظر گرفته شده است و معیار انتخاب براساس جنس قطعات و تنش تسلیم و ضخامت قطعات می‌باشد.

همانطور که قبلاً ذکر شده، بارگذاری باید به صورتی باشد که قطعه همواره در محدوده الاستیک باشد و وارد محدوده پلاستیک نشود. بدین منظور همواره تنش وارده بر قطعه کمتر از تنش تسلیم است.

برای بدست آوردن نیروی تسلیم، تنش تسلیم ماده مورد نظر را در سطح مقطعی که تحت بارگذاری قرار دارد (بخش بدون ترک) ضرب می‌کنیم، این مقدار نیروی تسلیم می‌باشد که حداکثر نیروی وارده به قطعه همواره باید کمتر از نیروی تسلیم باشد. حداکثر نیروی وارده بر صفحات برابر با مجموع نیروی دامنه و میانگین بارگذاری سیکلی است، که این مقدار همواره باید کمتر از نیروی تسلیم باشد.

با توجه به نمودار S-N شکل ۴-۶ با افزایش تنش عمر خستگی کاهش و با کاهش تنش، عمر خستگی افزایش می‌یابد. با افزایش و کاهش نیروی اعمالی می‌توان تعداد سیکل خستگی را تغییر داد.



شکل ۴-۶ نمودار لگاریتمی تنش و عمر خستگی [۳۸]

۴-۷- رشد ترک تحت بارگذاری سیکلی

در این تحقیق برای کنترل مسیر رشد ترک از گشودگی استفاده شده است، میدان تمرکز تنش ایجاد شده توسط گشودگی باعث تغییر مسیر رشد ترک می‌شود.

۴-۷-۱- تاثیر شعاع گشودگی بر مسیر رشد ترک

بدین منظور صفحه مستطیلی شکلی با ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر در ۱۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر از جنس St37 دارای ترک لبه ای با طول ۱۰ میلی‌متر واقع در وسط طول صفحه مستطیلی شکل تهیه شد. گشودگی با قطر ۱۵ میلی‌متر و مرکز گشودگی دارای فاصله افقی ۲۰ میلی‌متر و فاصله عمودی ۱۵ میلی‌متر از نوک ترک ایجاد گردید.

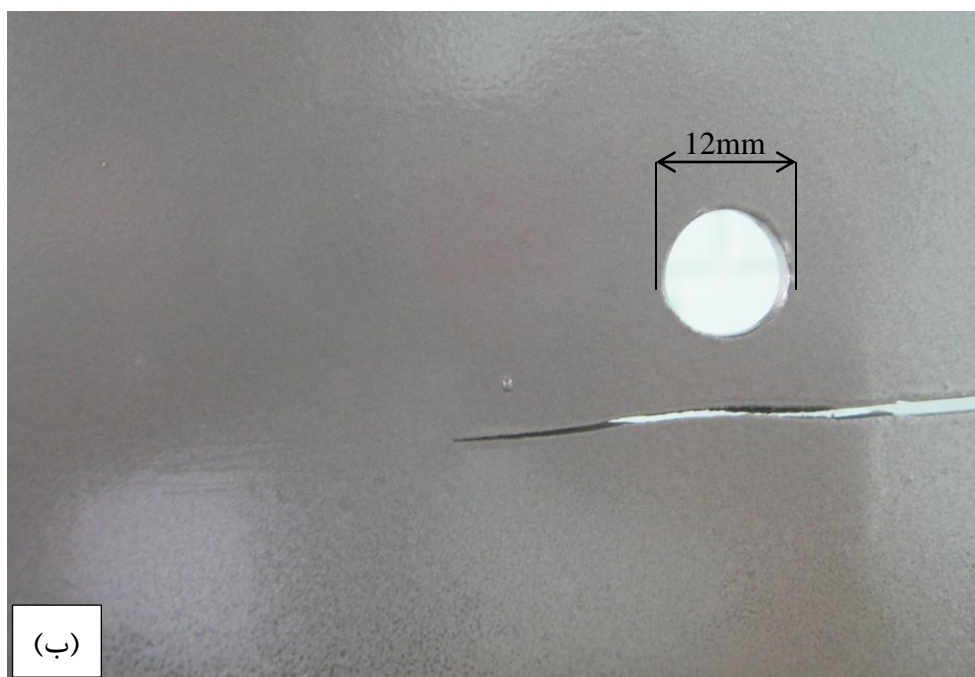
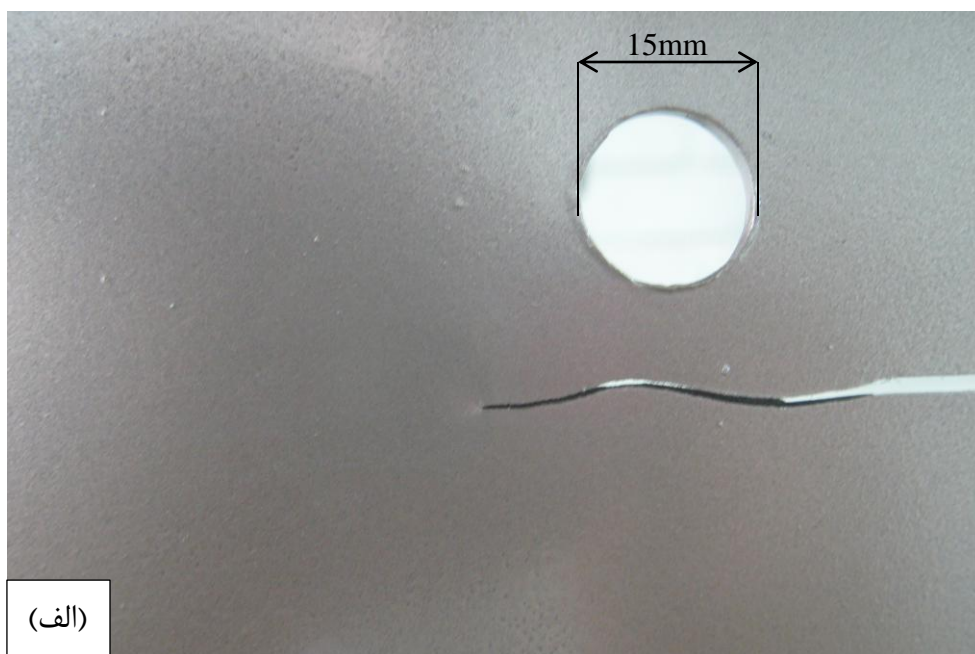
بارگذاری به شکل سیکلی با دامنه ۸/۷۵ کیلو نیوتن و میانگین ۹/۲۵ کیلو نیوتن و به صورت عمودی بر صفحه وارد می‌شود. با این بارگذاری همواره صفحه تحت کشش بوده و ترک تحت مود I رشد

می‌کند. ناحیه شدت تنش نوک ترک با نزدیک شدن ترک به گشودگی تحت تاثیر میدان تمرکز تنش گشودگی قرار می‌گیرد و تغییر مسیر می‌دهد.

در آزمایشی دیگر شعاع گشودگی را به ۱۲ میلی‌متر کاهش داده و شرایط آزمایش قبل را با همان بارگذاری تکرار می‌کنیم و بدین صورت تاثیر شعاع گشودگی در تغییر مسیر رشد ترک بررسی می‌گردد.

در شکل ۴-۷ رشد ترک تحت بارگذاری سیکلی با گشودگی به قطر ۱۵ میلی‌متر و گشودگی به قطر ۱۲ میلی‌متر نشان داده شده است. با بررسی و مقایسه مسیرهای رشد ترک در دو صفحه می‌توان تاثیر شعاع گشودگی بر مسیر رشد ترک را مشاهده و مقایسه کرد.

همانطور که در شکل ۴-۷ مشاهده می‌شود، با نزدیک شدن نوک ترک به گشودگی، مسیر رشد آن به سمت گشودگی تغییر کرده و با عبور از میدان تمرکز تنش گشودگی این تاثیر کاهش می‌یابد. با افزایش شعاع گشودگی تاثیر میدان تمرکز تنش گشودگی و پیرو آن تغییر مسیر رشد ترک افزایش می‌یابد.



شکل ۴-۷ تاثیر شعاع گشودگی در تغییر مسیر رشد ترک
(الف) گشودگی با قطر ۱۵ میلی‌متر، (ب) گشودگی با قطر ۱۲ میلی‌متر

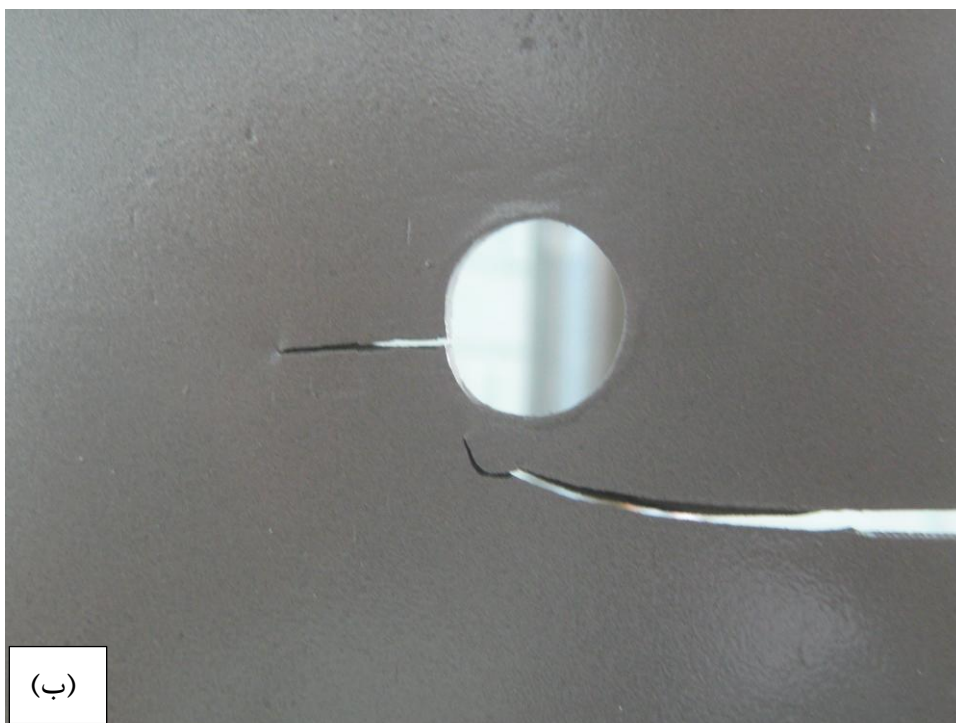
۴-۷-۲- تاثیر افزایش نیرو

در این قسمت تاثیر اندازه نیرو در مسیر رشد ترک و میدان تمرکز تنش حاصل از گشودگی بررسی می‌شود. برای این منظور دو صفحه مستطیلی با شرایط یکسان طول و عرض به ترتیب ۱۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر از جنس St37 تهیه شد. مرکز گشودگی در هر دو صفحه با فاصله افقی ۲۰ میلی‌متر و فاصله عمودی ۱۵ میلی‌متر از نوک ترک قرار دارد، قطر گشودگی ۱۵ میلی‌متر و طول ترک ۱۰ میلی‌متر انتخاب گردید.

در حالت اول بارگذاری سیکلی وارده دارای دامنه ۸/۷۵ کیلو نیوتن و میانگین ۹/۲۵ کیلو نیوتن و در حالت دوم بارگذاری سیکلی دارای دامنه ۱۱/۷۵ کیلو نیوتن و میانگین ۱۱/۲۵ کیلو نیوتن می‌باشد. مسیر رشد ترک در دو حالت بارگذاری در شکل ۴-۸ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۴-۸ مشاهده می‌شود، افزایش اندازه نیرو مسیر رشد ترک را تغییر داده و تاثیر میدان تمرکز تنش حاصل از گشودگی را افزایش می‌دهد. البته این نکته قابل ذکر است که در هر دو حالت بارگذاری، صفحه دچار تسلیم نمی‌شود و در محدوده الاستیک باقی می‌ماند.



(الف)



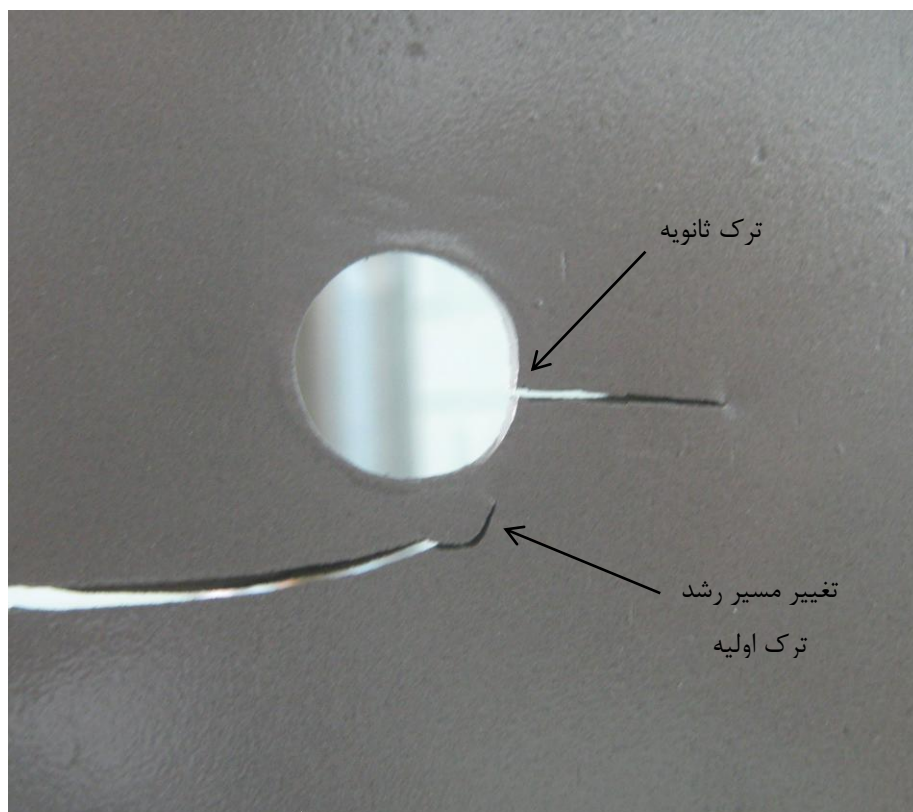
(ب)

شکل ۴-۸ تاثیر افزایش مقدار نیرو بر تغییر مسیر رشد ترک در صفحه دارای گشودگی

(الف) دامنه ۸/۷۵ کیلو نیوتن و میانگین ۹/۲۵ کیلو نیوتن، (ب) دامنه ۱۱/۷۵ کیلو نیوتن و میانگین ۱۱/۲۵ کیلو نیوتن

همانطور در شکل ۴-۸ قسمت دوم مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار نیرو تاثیر گشودگی بر رفتار رشد ترک افزایش می‌یابد. با افزایش نیرو احتمال ایجاد ترک ثانویه در اطراف گشودگی وجود دارد، ایجاد این ترک ثانویه باعث تغییر مسیر رشد ترک اولیه و همینطور کاهش سرعت رشد آن و در بعضی اوقات باعث توقف ترک اولیه می‌شود.

برای جلوگیری از ترک ثانویه، محیط گشودگی ایجاد شده باید شامل حداقل عیوب ممکن باشد که این امر از نحوه ایجاد گشودگی تاثیر می‌پذیرد. در شکل ۴-۹ محل ایجاد ترک ثانویه و تاثیر آن بر تغییر مسیر رشد ترک اولیه نشان داده شده است.



شکل ۴-۹ ترک ثانویه و تاثیر آن بر تغییر مسیر رشد ترک اولیه

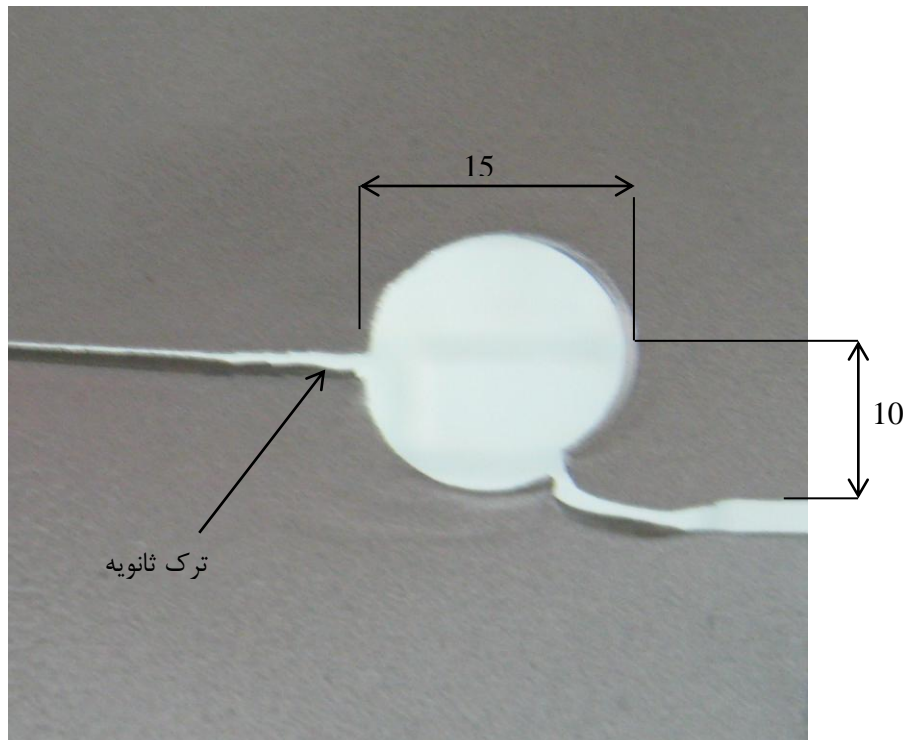
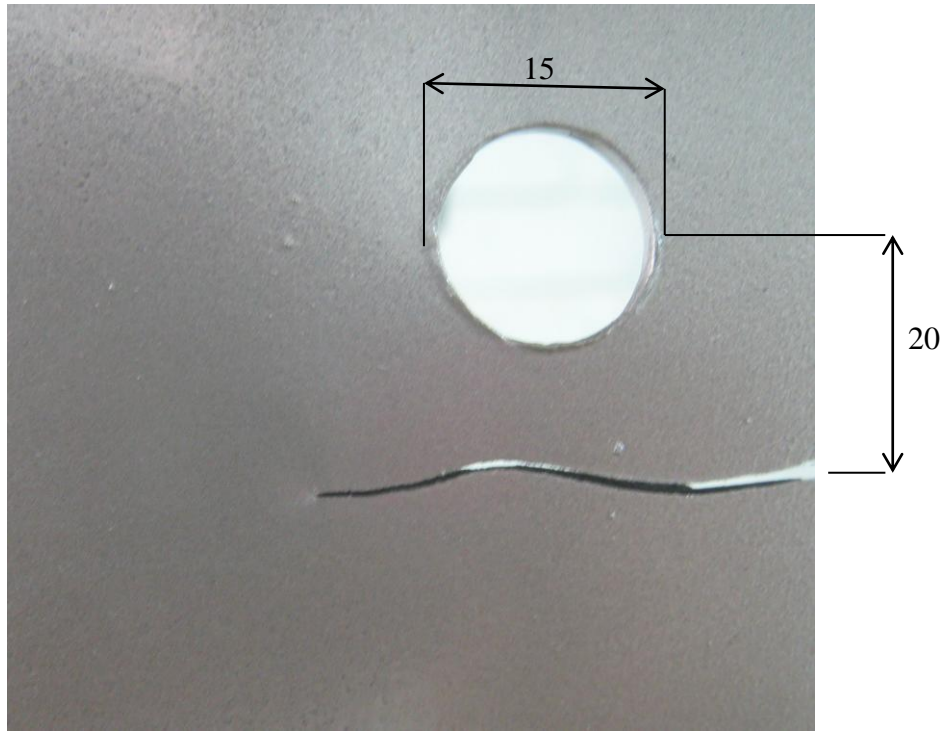
۴-۷-۳- تاثیر فاصله عمودی گشودگی تا نوک ترک

برای بررسی تاثیر فاصله عمودی گشودگی تا نوک ترک دو صفحه مستطیل شکل با ضخامت ۲ میلی‌متر و جنس St37 دارای ترک لبه ای به طول ۱۰ میلی‌متر را در نظر بگیرید. فاصله عمودی مرکز گشودگی در صفحه اول تا نوک ترک برابر با ۱۵ میلی‌متر و فاصله عمودی مرکز گشودگی در صفحه دوم تا نوک ترک برابر با ۱۰ میلی‌متر می‌باشد. هر دو صفحه تحت بارگذاری سیکلی با شرایط یکسان قرار می‌گیرند.

شکل ۴-۱۰ نتیجه مقایسه بین دو حالت گفته شده را نمایش می‌دهد. همانطور که در شکل ۴-۱۰ نشان داده شده است، با کاهش فاصله عمودی مرکز گشودگی تا نوک ترک، تاثیرات میدان تمرکز تنش حاصل از گشودگی بر ناحیه تنش نوک ترک افزایش می‌یابد و پیرو آن تغییر مسیر رشد ترک افزایش می‌یابد. با کاهش فاصله مرکز گشودگی تا نوک ترک، ترک به سمت گشودگی تغییر مسیر داده و به گشودگی می‌رسد. پس از برخورد ترک با گشودگی در قسمتی دیگر از گشودگی که بیشترین تمرکز تنش تحت بارگذاری فوق را دارا است، ترک ثانویه ایجاد می‌شود. این ترک ثانویه و محل ایجاد آن در گشودگی در شکل ۴-۱۰ مشاهده می‌شود. در ادامه با رشد ترک ثانویه تحت بارگذاری و ایجاد دومین گشودگی در مسیر رشد ترک، مسیر رشد ترک ثانویه را می‌توان تغییر داد.

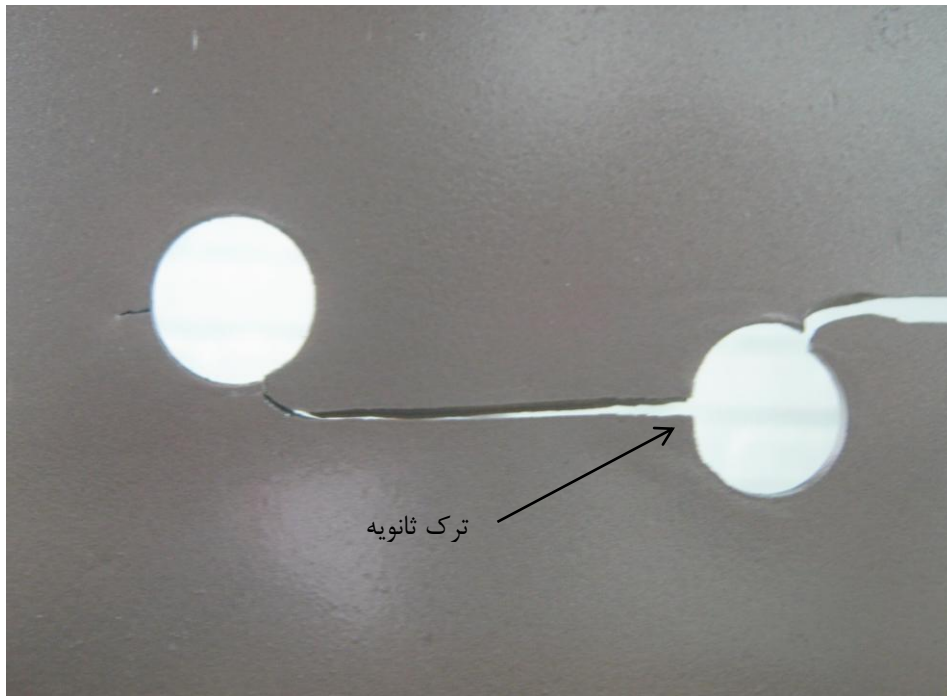
۴-۷-۴- تاثیر دو گشودگی بر مسیر رشد ترک

شکل ۴-۱۱ تغییر مسیر رشد ترک با ایجاد دو گشودگی را نشان می‌دهد، همچنین تغییر مسیر رشد ترک حاصل از تاثیر گشودگی و محل ایجاد ترک‌های ثانویه در شکل ۴-۱۱ مشخص شده است.



شکل ۴-۱۰ تاثیر فاصله عمودی مرکز گشودگی تا نوک ترک

(ابعاد بر حسب میلی‌متر)



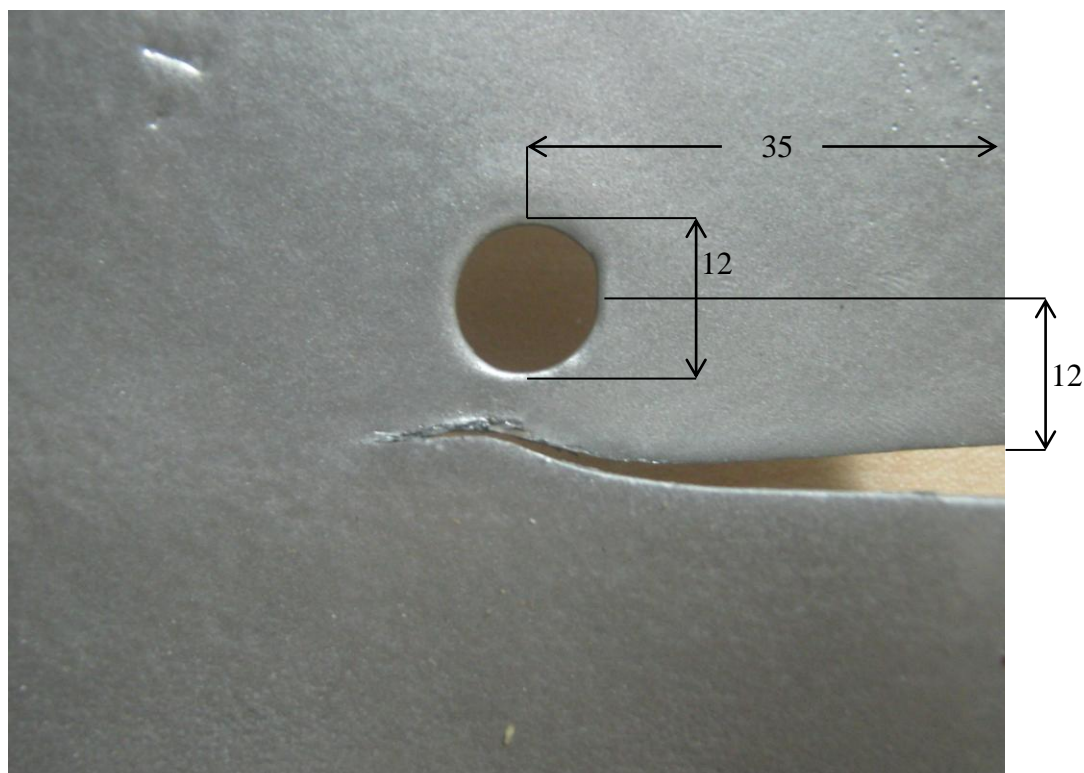
شکل ۴-۱۱ محل ایجاد ترک ثانویه در صفحه دارای دو گشودگی

۴-۷-۴- بررسی جنس و ضخامت صفحات

همانطور که قبل ذکر شد در این تحقیق رشد ترک در محدوده الاستیک بررسی می‌شود؛ لذا نباید حداکثر نیروی وارده در بارگذاری سیکلی از نیروی تسلیم قطعه بیشتر شود. با تغییر جنس قطعه مقدار نیروی بارگذاری و همچنین تنش تسلیم قطعه افزایش و یا کاهش می‌یابد. همچنین هرچقدر جنس ماده یکنواخت تر و از نظر متالورژیکی و ساختاری همگن تر باشد، مسیر رشد ترک در حالت تجربی به حالت عددی نزدیکتر می‌شود. در این قسمت به بررسی مسیر رشد ترک در ورق‌های از جنس SS304 با ضخامت ۱ میلی‌متر پرداخته می‌شود.

به دلیل کاهش ضخامت، نیروی تسلیم قطعه کاهش یافته و لذا در بارگذاری سیکلی، دامنه و میانگین نیرو کمتر می‌شود تا قطعه در محدوده الاستیک باقی بماند. به همین منظور در بارگذاری سیکلی، نیرو میانگین را به ۶/۷۵ کیلو نیوتن و مقدار دامنه را به ۶/۲۵ کیلو نیوتن تغییر می‌دهیم.

صفحه ای از جنس SS304 با ضخامت ۱ میلی‌متر و طول ۱۳۵ میلی‌متر و عرض ۱۰۰ میلی‌متر با ترک لبه ای به طول ۱۰ میلی‌متر و گشودگی به قطر ۱۲ میلی‌متر تهیه شده است. صفحه تحت بارگذاری سیکلی قرار داده شده و مسیر رشد ترک آن در شکل ۴-۱۲ مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۱۲ رشد ترک در صفحه SS304 با ضخامت ۱ میلی‌متر تحت بارگذاری سیکلی

همانطور که در شکل ۴-۱۲۹ نشان داده شده است، ترک تا قبل از رسیدن به گشودگی و محدوده میدان تمرکز تنش حاصل از گشودگی مسیر مستقیمی را ادامه می‌دهد. با نزدیک شدن ترک به گشودگی

و تاثیر میدان تمرکز تنش بر ناحیه تنش نوک ترک، مسیر رشد ترک به سمت گشودگی تغییر می کند. با ادامه رشد ترک و عبور از میدان تمرکز تنش گشودگی، رشد ترک به صورت مستقیم ادامه می یابد.

فصل پنجم

مقایسه نتایج تحلیلی عددی و تجربی

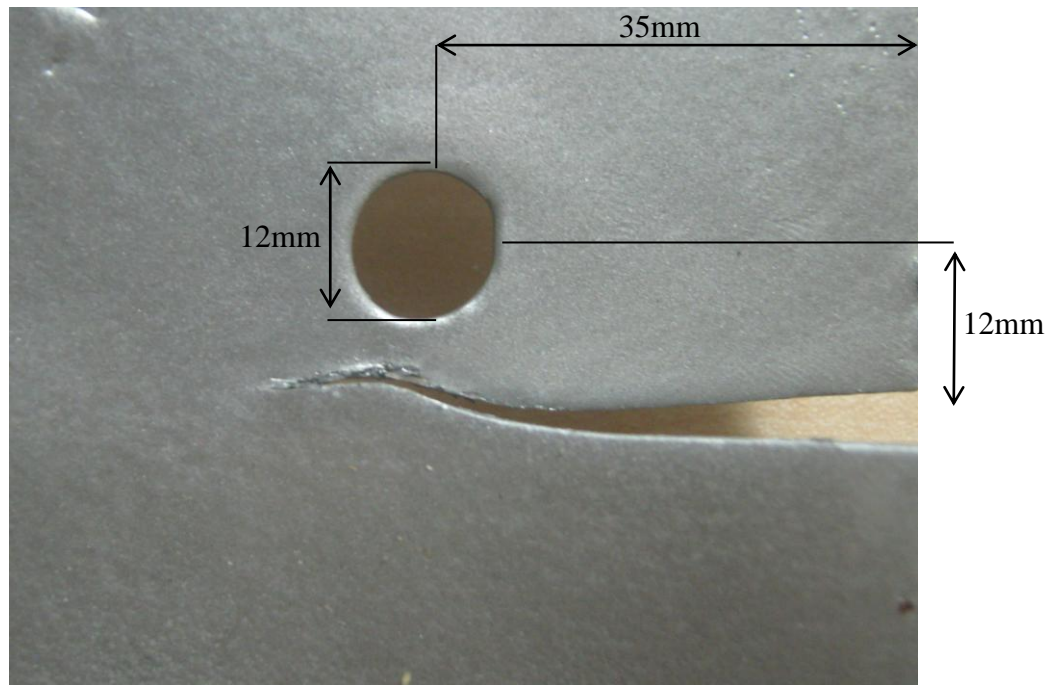
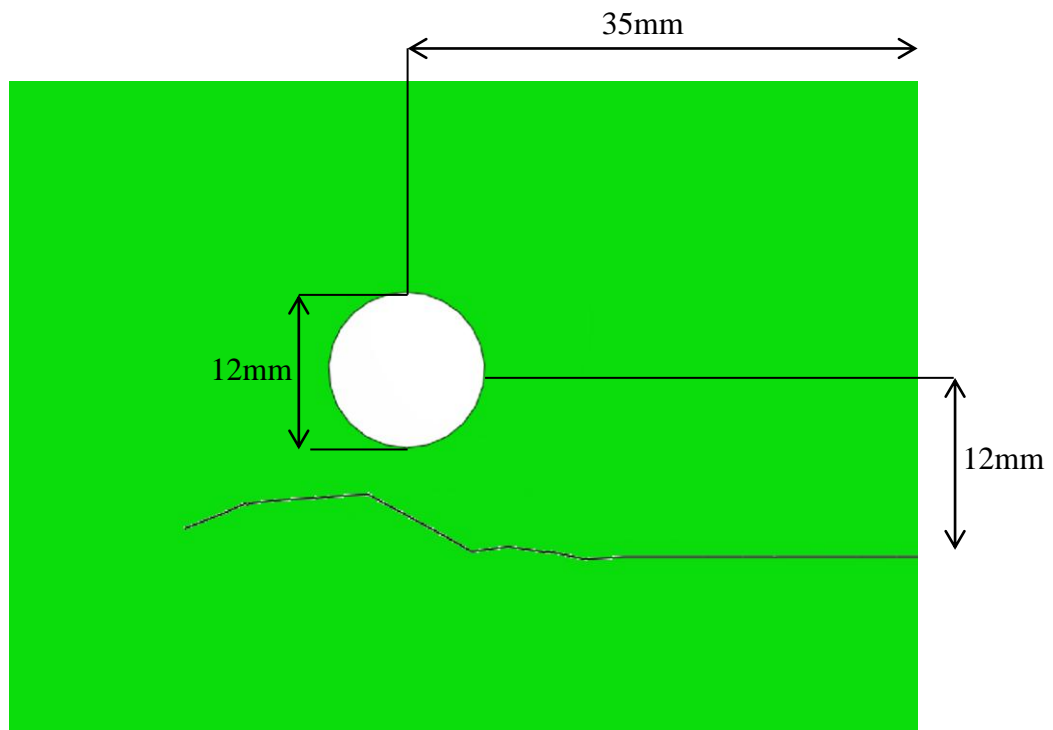
۵-۱- مقدمه

در این فصل به مقایسه اجمالی بین دو روش تحلیل عددی و تحلیل تجربی برای کنترل رشد ترک پرداخته شده است. البته این نکته قابل ذکر می‌باشد که بدلیل وابسته بودن رشد ترک به پارامترهای مختلف، نیازمند دقت بالایی در انجام آزمایشات تجربی می‌باشد. در ادامه به بررسی چند مورد از مقایسه تحلیل عددی و تجربی پرداخته شده است که انطباق قابل قبولی بین نتایج برقرار است.

۵-۲- بررسی و مقایسه نتایج تحلیل عددی و تجربی

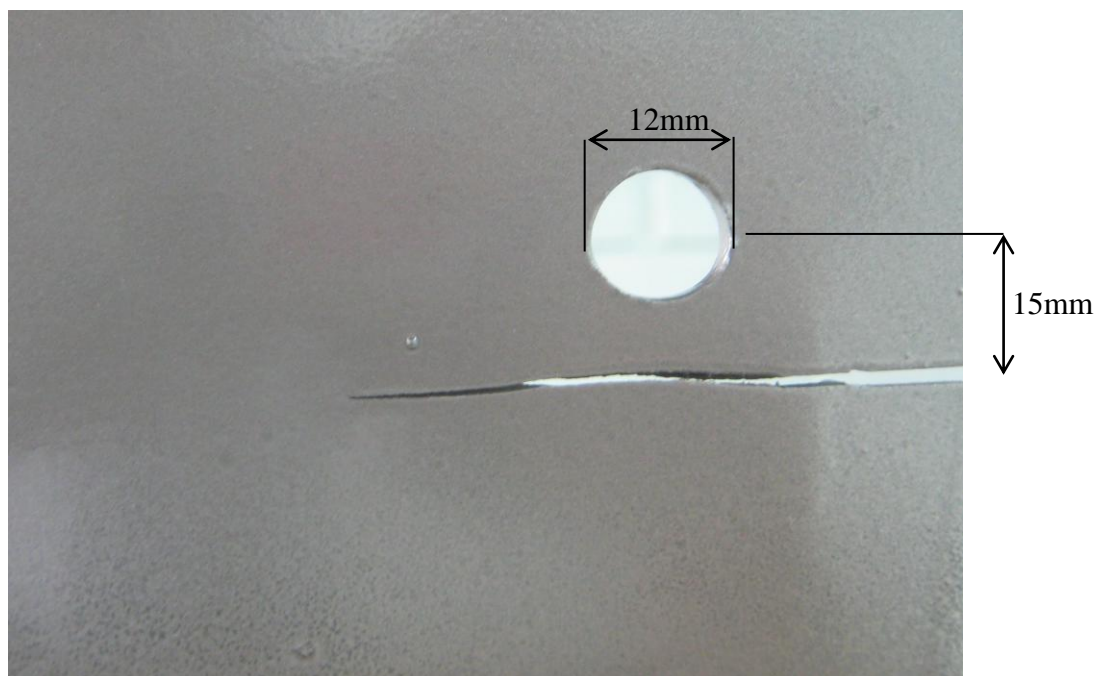
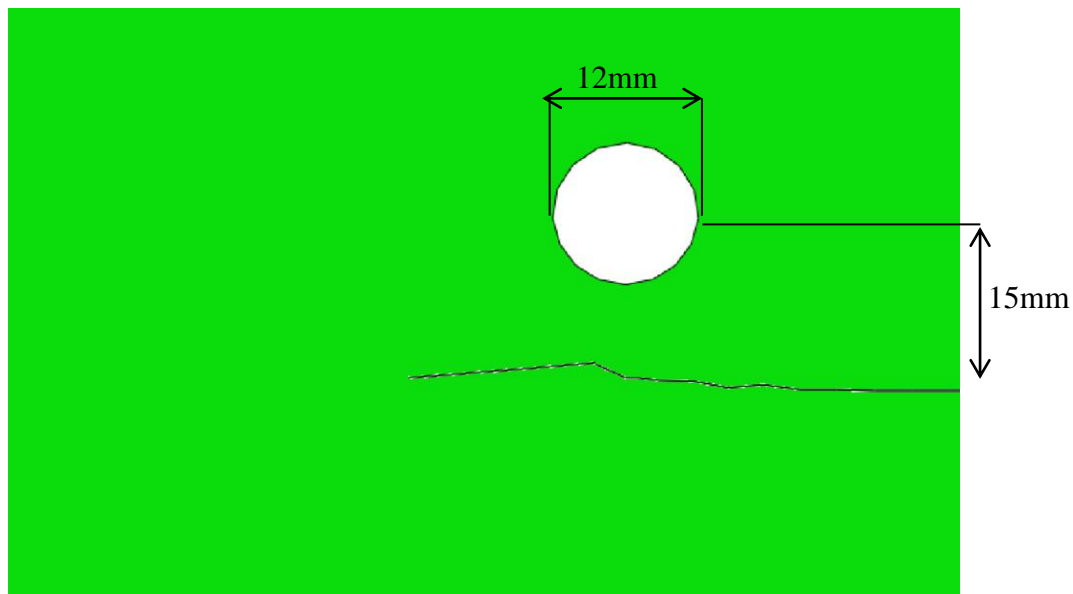
شکل ۵-۱ تحلیل تجربی و عددی صفحه مستطیل شکل SS304 به ضخامت ۱ میلی متر با گشودگی به قطر ۱۲ را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، تحلیل عددی انجام شده بسیار نزدیک به تحلیل تجربی می‌باشد.

همانطور که در شکل ۵-۱ مشاهده می‌شود، مسیر رشد ترک تا قبل از رسیدن به گشودگی مستقیم بوده و با رسیدن به محدوده گشودگی، بر اثر میدان تمرکز تنش گشودگی به سمت گشودگی منحرف شده و پس از عبور از محدوده گشودگی دوباره تغییر مسیر می‌دهد.



شکل ۵-۱ مقایسه تحلیل عددی و تجربی SS304 با ضخامت ۱ میلی‌متر و گشودگی با قطر ۱۲ میلی‌متر تحت بارگذاری سیکلی

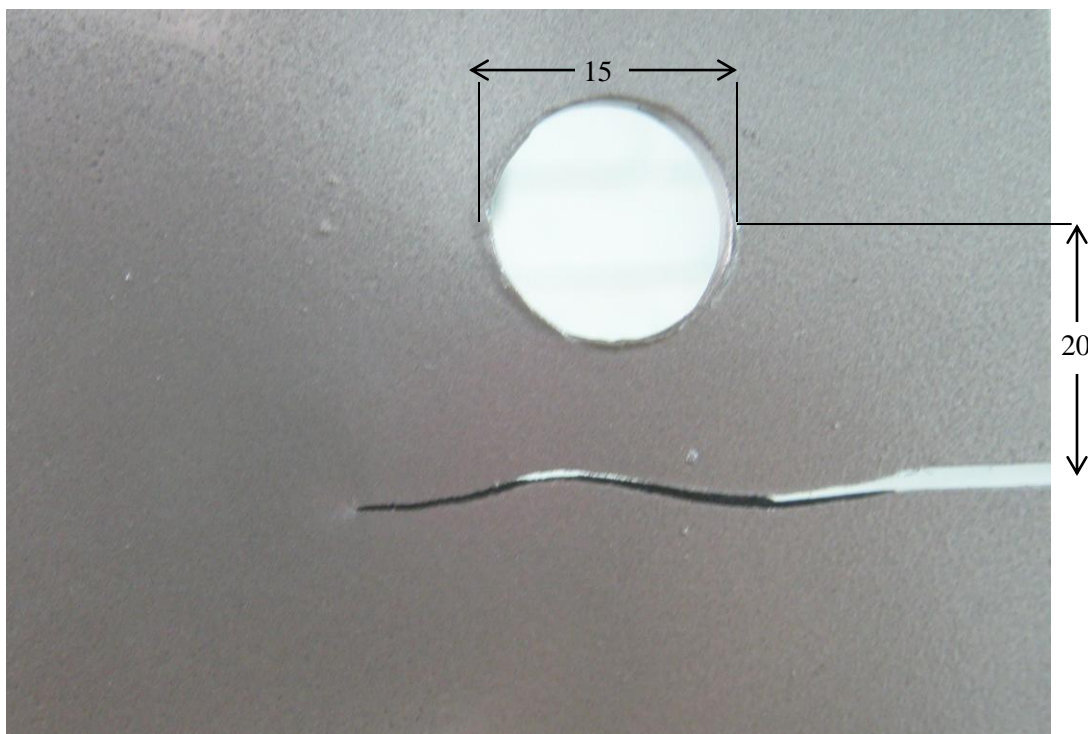
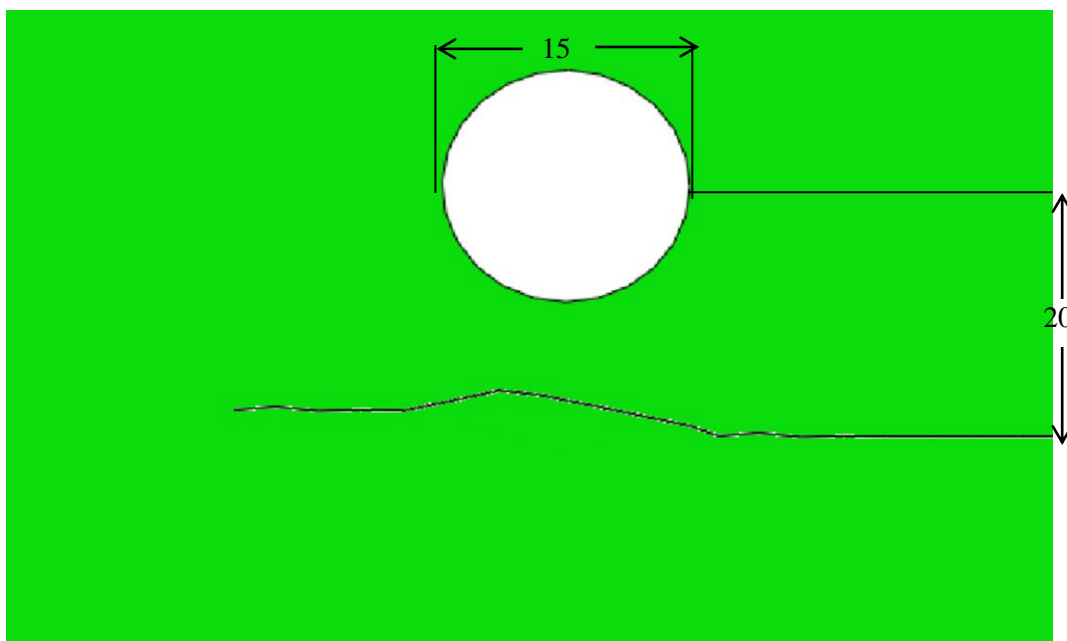
در شکل ۵-۲ به بررسی ورقه مستطیل شکلی St37 به ضخامت ۲ میلی‌متر و گشودگی با قطر ۱۲ میلی‌متر پرداخته شده است.



شکل ۵-۲ مقایسه تحلیل عددی و تجربی St37 با ضخامت ۲ میلی‌متر و گشودگی با قطر ۱۲ میلی‌متر تحت بارگذاری سیکلی

همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش فاصله عمودی مرکز گشودگی نسبت به امتداد ترک، تاثیر گشودگی نسبت به شکل ۱-۵ کاهش یافته است. این مساله را می‌توان هم در تحلیل تجربی و هم در تحلیل عددی که در شکل ۲-۵ نشان داده شده است، مشاهده کرد. کاهش شعاع گشودگی میدان تمرکز تنش ناشی از گشودگی کوچکتر می‌شود و تاثیر کمتری بر ناحیه شدت تنش نوک ترک می‌گذارد.

در شکل ۳-۵ به بررسی افزایش شعاع گشودگی پرداخته شده است، که تحت شرایط یکسان با شکل ۲-۵ و فقط با افزایش گشودگی می‌توان به مقایسه این حالت پرداخت. همانطور که در شکل ۳-۵ مشاهده می‌شود، تغییر مسیر رشد ترک نسبت به شکل ۲-۵ به دلیل افزایش شعاع گشودگی افزایش یافته است. این موضوع را می‌توان هم در تحلیل عددی و هم در تحلیل تجربی مشاهده کرد. که همچنین دو تحلیل عددی و تجربی از نظر شباهت به یکدیگر نزدیک می‌باشند. همانطور که در شکل ۳-۵ مشاهده می‌شود با نزدیک شدن ترک به گشودگی ترک تغییر مسیر می‌دهد و با عبور از محدوده گشودگی، مسیر رشد ترک بدون تاثیر از گشودگی یکنواخت و مستقیم می‌شود.



شکل ۵-۳ تاثیر افزایش شعاع گشودگی در تحلیل عددی و تجربی برای صفحه St37

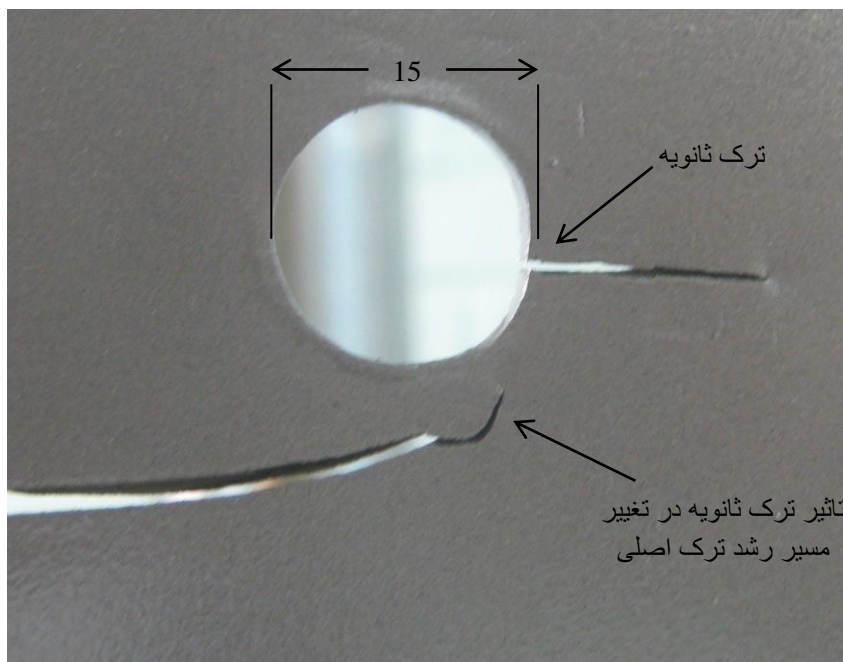
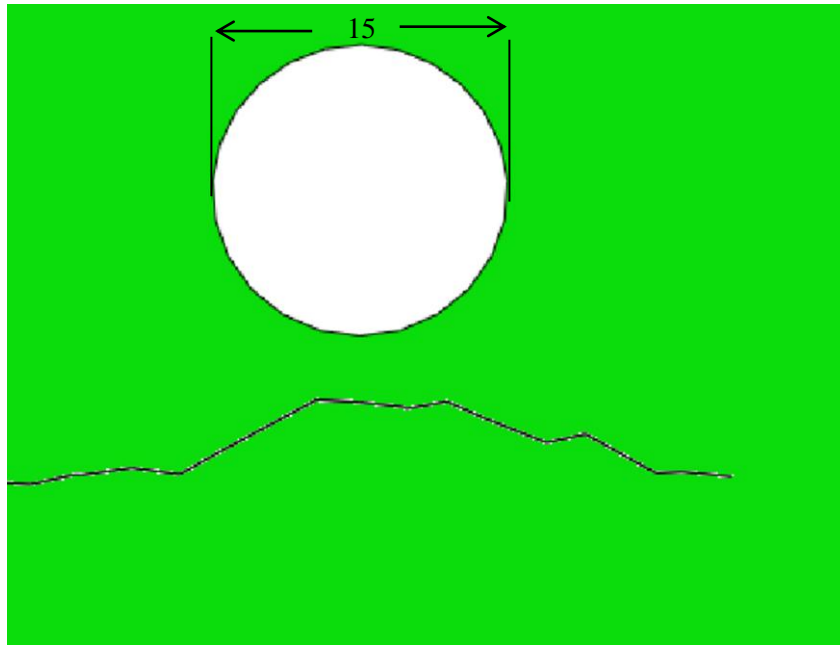
(ابعاد بر حسب میلی متر)

البته همانطور که در شکل ۳-۵ مشاهده می‌شود، در تحلیل تجربی به دلیل آنکه نوک ترک ایجاد دارای زاویه اندکی نسبت به افق می‌باشد، ابتدای مسیر رشد ترک دارای تفاوت اندکی با تحلیل عددی می‌باشد که در ادامه این مسیر اصلاح شده است.

۳-۵- تاثیر نقاط ضعف در گشودگی

بدلیل وجود ناصافی و خراشیدگی‌های کوچک حاصل از سوراخکاری در محیط گشودگی‌ها، امکان ایجاد ترک‌های ثانویه از این نقاط وجود دارد. ایجاد ترک ثانویه مسیر رشد ترک اولیه را تغییر می‌دهد و یا رشد ترک اولیه را متوقف می‌کند. در شکل ۴-۵ این موضوع نمایش داده شده است.

در شکل ۴-۵ محل ایجاد ترک ثانویه بر اثر ناصافی‌های محیطی گشودگی و همچنین محل تغییر مسیر رشد و توقف رشد ترک اولیه نشان داده شده است. همانطور که قبلاً هم ذکر شد، این ناصافی‌ها در فرایند ساخت گشودگی ایجاد شده و در هنگام بارگذاری باعث ایجاد ترک ثانویه می‌شود.



شکل ۴-۵ تأثیر ناصافی و خراشیدگی‌های حاصل از سوراخکاری در محیط گشودگی بر مسیر رشد ترک و ایجاد ترک ثانویه (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

فصل هشتم

نتایج و پیشنهادات

۶-۱- نتایج

با توجه به انجام آزمایش‌های تجربی بر روی صفحات دارای ترک دارای گشودگی تحت بارگذاری سیکلی و همچنین مقایسه این نتایج با تحلیل‌های عددی که با استفاده از نرم افزار آباکوس انجام شده است، نتایج زیر استخراج شده است:

۱- میدان تمرکز تنش حاصل از گشودگی بر ناحیه تنش نوک ترک در صورت برخورد تاثیر گذاشته و باعث تغییر مسیر رشد ترک می‌شود.

۲- با افزایش شعاع گشودگی، شعاع میدان تمرکز تنش افزایش می‌یابد و پیرو آن تاثیر این میدان بر مسیر رشد ترک افزایش می‌یابد و تغییرات مسیر رشد ترک بیشتر می‌شود.

۳- با افزایش فاصله عمودی مرکز گشودگی نسبت به راستای ترک، تاثیر میدان تمرکز تنش گشودگی بر روی ناحیه تنش نوک ترک کاهش می‌یابد و پیرو آن تغییر مسیر رشد ترک کاهش می‌یابد.

۴- ایجاد گشودگی با شعاع کمتر دارای نتایج بهتری نسبت به شعاع بزرگتر می‌باشد، زیرا در شعاع‌های بزرگتر، گشودگی خود دچار نقاط ضعف می‌شوند که محلی برای ایجاد ترک‌های ثانویه می‌باشد.

۵- آزمایش‌های تجربی انجام شده نشان می‌دهد، ایجاد ترک ثانویه در اطراف گشودگی، باعث تغییر غیر قابل پیش بینی در مسیر رشد ترک اولیه می‌گردد و در بعضی موارد باعث متوقف شدن رشد ترک اولیه می‌شود.

۶- نمودارهای بدست آمده توسط تحلیل عددی نشان می‌دهد که میزان تنش اطراف گشودگی با فاصله گشودگی تا نوک ترک رابطه عکس دارد و با رشد ترک، میزان تنش میدان گشودگی

تغییر می‌کند. در صورت کاهش فاصله نوک ترک تا گشودگی میزان تنش میدان گشودگی افزایش می‌یابد و بالعکس.

۶-۲- پیشنهادات

در این تحقیق به بررسی کنترل مسیر رشد ترک در یک صفحه تحت بارگذاری سیکلی توسط گشودگی پرداخته شده و تحلیل های عددی و تجربی انجام شده با یکدیگر مقایسه شده است. با توجه به اینکه تاکنون تحقیقی در این مورد انجام نشده است، پیشنهاداتی در زمینه ادامه این تحقیق در زیر آورده شده است:

۱- همانطور که مشاهده شد، خراشیدگی های موجود در محیط گشودگی ها باعث ایجاد ترک ثانویه در محل گشودگی می شد که ایجاد ترک ثانویه باعث توقف ترک اولیه و یا تغییر مسیر ترک اولیه می گردد. به همین منظور در نحوه ایجاد گشودگی می توان از تجهیزات با دقت بالاتر همانند لیزر یا وایرکات استفاده کرد، تا گشودگی های ایجاد شده شامل نقاط ضعف نباشند.

۲- می توان از گشودگی غیر از دایره استفاده کرد، دایره یکنواخت ترین گشودگی به لحاظ میدان تمرکز تنش می باشد. به همین منظور در صورت استفاده از اشکال دیگر برای ایجاد گشودگی می توان از غیر یکنواختی میدان تمرکز تنش گشودگی استفاده کرد و میدان تمرکز تنش گشودگی را در چند شکل خاص به ترک وارد کرد.

۳- در این تحقیق به بررسی کنترل مسیر رشد ترک پرداخته شده است، به عبارتی در صفحه شامل ترک به کنترل رشد ترک به مسیر دلخواه پرداخته شده است. می توان در صفحه بدون ترک اولیه این موضوع را بررسی کرد و محل ایجاد ترک اولیه در اطراف گشودگی به عنوان نقاط دارای تمرکز تنش را پیش بینی کرد و مسیر آن را به سمت مسیر بهینه کنترل کرد.

۴- در این تحقیق به بررسی رشد ترک در صفحات پرداخته شده است. می‌توان رشد ترک را در انواع

پوسته‌ها و اشکال دیگر بررسی کرد و با تحلیل عددی مقایسه کرد

۵- همانطور که قبلاً ذکر شد، تحلیل ترک شامل ۳ قسمت می‌باشد: جوانه زنی ترک، رشد ترک،

شکست. در این تحقیق به کنترل مسیر رشد ترک پرداخته شده است و تنها قسمت دوم را شامل

می‌شود. به همین علت در انجام تحلیل عددی از رابطه پاریس استفاده شده است. می‌توان

قسمت‌های دیگر را مورد بررسی قرار داد و از روابط دیگری برای تحلیل عددی استفاده کرد و

نتایج تحلیل عددی فوق را با تحلیل تجربی مقایسه کرد.

۶- می‌توان رشد ترک در بارگذاری‌های دیگر انجام شود و با تحلیل عددی مقایسه شود. در این

تحلیل فقط به بررسی رشد ترک تحت بارگذاری خستگی تک محوره پرداخته شده است و

می‌توان انواع بارگذاری‌های از جمله کششی، خمشی، پیچشی و ترکیبی از بارگذاری‌های ذکر

شده را مورد بررسی قرار داد و نتایج به دست آمده را با تحلیل عددی مقایسه کرد.

فہرست مراجع

- [1] G.M. Boyd, (1969), "*Fracture Design Practices for Ship Structures*", Vol. 5, pp. 383-470
- [2] M.E.Shank, (1953), "*A Critical review of Brittle Failure in carbon Plate steel Structures Other than Ships*", Ship structure committee Report, Serial No.SSc-65, National Academy of Sciences-National Research Council, Washington, D.C.
- [3] E.R.Parker, (1957), "*Brittle Behavior of Engineering Structures* ", Prepared for the Ship Structure Committee under the General Direction of the Committee of Ship Steel-National Academy of Sciences- National Research Council, John Wiley, New York
- [4] H.O Fuchs& R.I.Stephens, (1980)," *Metal Fatigue in Engineering*" john Wiley & sons
- [5] G.M.Body , (1969),"*Fracture Design Practices for Ship Structures*"In Fracture Edited by .Libowitz.Academic Press New York, pp.383-470
- [6] W.K Wilson, (1967)," *Stress intensity Factors For compact Tension Specimens.*" Research memorandum 67- id6-BTLFR-MI , Westinghouse Research laboratories Pittsburgh.
- [7] S.A Maguied J.Acoufopands, (1986),"*Elasto-plastic finit element study of the effect of residual stress upon double edge-crack plate*". Eng. Fracture mech 23, pp.735-744
- [8] X. Zhang, A.S.L.Chan and G. A. O. Davied, (1992), "*Numerical simulation of fatigue crack growth under complex loading sequences*" Engineering fracture mechanics Vol. 42, No. 2, pp.305-321
- [9] Franz O. Riemelmoser , Peter Gumbsch , Reinhard Pippan, (2000), "*Plastic deformation at short edge cracks under fatigue loading*" , Engineering fracture mechanics 66, pp. 357-374.
- [10] W.K Wilson."*Stress intensity Factors For Compact Specimens used to determine Fracture Mechanics Parameters Research*", Report 73-1e7- FMPWR Westinghouse.
- [11] Koichi Kasaba , Takahiro Sano , Souichi Kudo ,Tetsuo Shoji , Kazumune Katagiri Tadashi Sato (*a* Department of mechanical engineering, Iwate university, ueda 4 –3-5 Morioka, Japan *b* research institute for fracture technology tohoku university, Aramaki-Aza –Aoba sendai, Japan), (1999) , "*Fatigue crack growth under compressive loading*" Journal of nuclear materials, pp.258-263.

[۱۲] جاویدراد ف ، (۱۳۸۳) " مکانیک شکست و کاربردهای آن در مهندسی " چاپ اول، انتشارات صنایع هوا فضا، تهران

- [13] Elber W, (1970), “*Fatigue Crack Growth Closure Under Cyclic Tension*”, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 2, pp.37-45
- [14] Wheeler O, (1972), “*Spectrum Loading and Crack Growth*” Journal of Basic Engineering, Transaction, ASME, Series D , pp.181-186
- [15] Simandijuntak S., Alizadeh H., Smith D.J., Parviz M.J., (2006), “*Three Dimensional Finit Element Prediction of Crack Closure and Fatigue Crack Growth Rate for a Corner Crack*”, International Journal of Fatigue, Vol 28, pp.335-345.
- [16] Feng M., Ding F., Jiang Y., (2005), “*A Study of Crack Growth Retardation due to Artificially Induced Crack Surface Contact*”, International Journal of Fatigue, Vol.27, pp.1319-1327.
- [17] Fawaz S.S., Andersson B., (2004), “*Accurate Stress Intensity Factor Solution for Corner Crack of the Hole*”, Engineering Fracture Mechanics, pp. 1235-1254.
- [18] Alegre J.M., Gutierrez-Solana F., Aragon A., (2004), “*A Finite Element Simulation Methodology of the Fatigue Behavior of Punched and Drilled Plate Components* ”, Engineering Failure Analysis, Vol.11, pp.737-750
- [19] Ritchie R.O., (1977) “*Influence of Microstructure on Near-Threshold Fatigue-Crack Propagation in Ultra-High Strength Steel*”, Metal Science, pp.368–381.
- [20] Radhakrishnan V.M., (1979), “*Parameter Representation of Fatigue Crack Growth*”, Engineering Fracture Mechanics, pp.359–372.
- [21] Spagnoli A., (2005) “*Self-Similarity and Fractals in the Paris Range of Fatigue Crack Growth*”, Mechanics of Materials, pp.519–529
- [22] Erdogan F. Sih G.C., (1963), “*On the Crack Extension in Plates Under Plane Loading and Transverse Shear*”. J Basic Engng, pp.519-527.
- [23] Sih G.C., (1974) “ *Strain-Energy-Density Factor Applied to Mixed Mode Crack Problems*”, Int J Fract, pp.305-321.
- [24] Theocaris P.S. Andrianopoulos N.P., (1982), “*The Tcriterion applied to Ductile Fracture*” ,Int J Fract, pp.125-130.
- [25] Kong X.M., Schluter N. Dahl W.,(1995), “ *Efect of Triaxial Stress on Mixed-Mode Fracture*”,Engang Fract Mech, pp.379-388

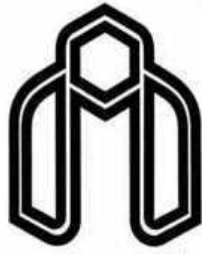
[۲۶] سیفی رحمان، محمدی مهدی، داوودآبادی سعید، (۱۳۸۷)، بررسی مسیر رشد ترک در مقطع عرضی یک سد وزتی به کمک تحلیل عددی، شانزدهمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک

- [27] G.J.Williams., (1989), "*Fracture Mechanics of Anisotropic Materials*", Chapter 1, Application of Fracture MECHANICS TO composite Materials, Edited by K.Friedrich, Elsevier Science Publishers, B.V.
- [28] A.A. Griffith, (1920), "*The Phenomena of Rupture and Flow in Solids*", Transactions, Royal Society of London, A-221
- [29] T.K. Hellen, (1975), "*On The Method of Virtual Crack Extensions*", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.9, pp.187-207.
- [30] جدیدی مود سعید، علیدوست حامد، (۱۳۹۰)، "بررسی پدیده رشد ترک در نمونه استاندارد شکست مود ۱ به کمک روش XFE"، نوزدهمین همایش سالانه مهندسی مکانیک.
- [31] Belytschko T, Black T, (1999), "*Elastic Crack Growth in Finite Elements with Minimal Remeshing*", International Journal for Numerical Methods in Engineering., pp.601-620.
- [32] Moes N, Dolbow J, Belytschko T, (1999), "*A Finite Element Method for Crack Growth Without Remeshing*", International Journal for Numerical Methods in Engineering ,pp. 131-150.
- [33] Sukumar N, Mos N, Moran B, Belytschko T, (2000), "*Extended Finite Element Method for Three Dimensional Crack Modelling*", International Journal for Numerical Methods in Engineering, pp. 1549-157.
- [34] Moes N, Belytschko T, (2002), "*Extended Finite Element Method for Cohesive Crack Growth*", Engineering Fracture Mechanics, pp.813-833
- [35] Zi G, Belytschko T, (2003), "*New Crack-Tip Elements for XFEM and Applications to Cohesive Cracks*", International Journal for Numerical Methods in Engineering, pp.2221-2240
- [36] Instron Model 8802,8803,8804,8805 and 8806, Reference Manual-Pre-Installation.
- [37] AK Steel 304/304L Stainless Steel Product Description.
- [38] Shigley J.E., (2006), "*Shigley's Mechanical Engineering Design*", Eighth Edition, McGraw- Hill, pp. 266.

Abstract

In this study numerical and experimental analysis of fatigue crack growth in a plate under uniaxial loading . Numerical analysis of the research conducted using software Abaqus and the fatigue loading in this study, is simulated using the Paris law. The maximum tangential stress criterion to predict crack growth path is used. This criterion is the most comprehensive measure in the field. Based on this criterion, the crack growth direction is along the maximum tangential stress. Crack growth factors have been investigated by numerical analysis and Guidelines for the control of crack growth is expressed then The results of numerical analysis are compared with experimental results. This experimental study was conducted using a servo hydraulic 8802. Numerical and experimental results are close to each other well. Rectangular sheets, length and width of 100 mm and 150 mm respectively and material of sheet is St37 with a thickness of 2 mm and SS304 with a thickness of 0.9 mm and holes created in this plate is Circular shaped.

Keywords: Cyclic loading, Crack growth, Paris law, Hole, Plate



Shahrood University of Technology
Department of Mechanical Engineering

Numerical and experimental analysis of control of the fatigue crack growth path in a plate under uniaxial cyclic loading by creating holes

Thesis

Submitted in Partial Fulfillment of the
Requirement for the Degree of Master of Science (M.Sc.)
in Mechanical Engineering, Applied Design

By :

Hadi Dastani

Supervisors:

Dr. Mahmoud Shariati

Summer 2013