

## تأثیر ترتیب جا زدن و فاصله بین پین‌ها بر توزیع تنش پسماند و رشد ترک لبه‌ای در نمونه‌های تک حفره‌ای

حامد بازوندی

اسماعیل پورسعیدی\*

مهدی مرادیان

دانشجوی دکترا، دانشگاه زنجان، دانشکده مهندسی مکانیک، زنجان، ایران

استاد، دانشگاه زنجان، دانشکده مهندسی مکانیک، زنجان، ایران

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه زنجان، دانشکده مهندسی مکانیک، زنجان، ایران

### چکیده

تأثیر ترتیب نصب و فاصله مرکز به مرکز بین پین‌ها بر توزیع تنش‌های پسماند و رشد ترک لبه‌ای، نمونه‌های تک حفره‌ای تحت بارگذاری خستگی بررسی شده است. ترک‌های لبه‌ای حفره‌ای در برخی از قطعات صنعتی همانند پوسته توربین گاز مشاهده می‌شوند. توزیع تنش‌های پسماند ایجاد شده در حفره‌های سه بعدی تحلیل و توزیع دوباره تنش پسماند در حفره‌های هم‌جوار بررسی شده است. تحلیل المان محدود روی نمونه‌های از چدن داکتیل مشابه پوسته توربین گاز انجام گرفته و رفتار ماده الستیکی - پلاستیکی کامل فرض شده است. رشد ترک خستگی مکانیکی با استفاده از نرم افزار و کد مکانیک شکست زینکرک پیش بینی شده است. نتایج نشان می‌دهد که عمر خستگی مکانیکی به وسیله تغییر در ترتیب جا زدن و فاصله بین پین‌ها تحت تأثیر قرار می‌گیرد. هنگام جا زدن پین دوم، به دلیل تسلیم مجدد ایجاد شده به وسیله انبساط حفره دوم آزاد سازی تنش پسماند در اطراف حفره اول رخ می‌دهد، این توزیع مجدد تنش پسماند سبب کاهش عمر خستگی در اطراف حفره اول می‌شود. سر انجام نتایج عددی بدست آمده با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است.

واژه‌های کلیدی: توزیع مجدد تنش پسماند، عمر خستگی مکانیکی، نمونه‌های تک حفره‌ای، حفره‌های هم‌جوار.

## The effect of Installation Sequence and Distance between Pins on Distribution of Residual stress and Edge Crack Growth in Single Hole Specimens

H. Bazvandi

E. Poursaeidi

M. Moradian

Department of Mechanical Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

Department of Mechanical Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

Department of Mechanical Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

### Abstract

The effect of installation sequence and center-to-center distance between pins on distribution of residual stresses and edge crack growth of single hole specimens under the fatigue loading are investigated. Hole edge cracks are observed in some industrial components similar to gas turbine casing. Residual stresses distribution induced in three-dimensional holes analyzed and redistribution of residual stress in adjacent holes are investigated. Finite element (FE) analysis on specimens similar to gas turbine casing of ductile cast iron were conducted and the behavior of material was assumed elastic-perfectly plastic. Mechanical fatigue crack growth is predicted by using Abaqus software and Zencrack fracture mechanics code. The results show that the mechanical fatigue life affected by variations in the installation sequence and distance between pins. When the second pin is installed, a residual stress relaxation process occurs near the first hole due to the secondary yielding produced by the expansion of the second hole, this redistribution of residual stress caused a decrease of fatigue life near first hole. Consecutively, the results from the numerical predictions were compared with the experimental data.

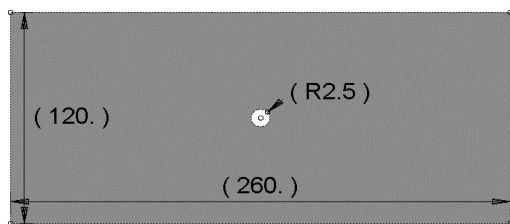
**Keywords:** Residual Stress Redistribution, Mechanical Fatigue Life, Single Hole Specimens, Adjacent Holes.

### ۱- مقدمه

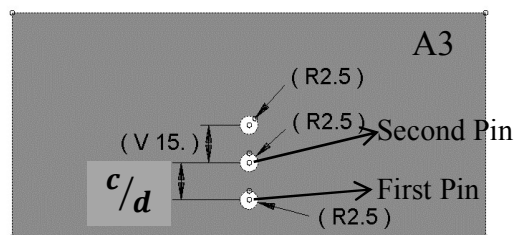
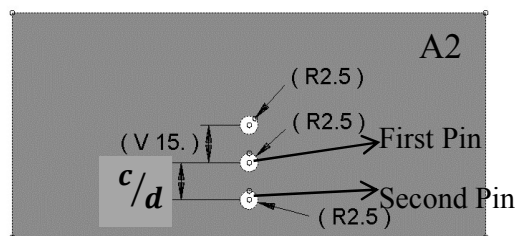
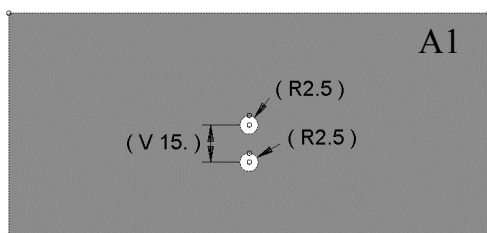
تقریباً استوانه‌ای شکل دارد قرار می‌گیرند. در برخی از قطعات صنعتی همانند پوسته توربین‌های گاز، ترک‌های لبه‌ای حفره‌ای قابل مشاهده هستند [۱]. پوسته توربین‌های گاز در محل پین خارج از مرکز را می‌توان همانند یک نمونه تک حفره‌ای در نظر گرفت. پوسته توربین‌های گاز تحت بارگذاری حرارتی قرار دارند که سبب ایجاد تنش‌های حرارتی شدید اطراف ترک‌ها و دیگر عیوب می‌شود. تمرکز تنش اطراف این عیوب اغلب منجر به واماندگی قطعات می‌شود. واماندگی‌های حرارتی به خاطر کاربرد صنعتی به طور وسیع مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۲]. تکنیک‌های مختلفی برای بهبود عمر خستگی وجود دارد. توقف ترک به وسیله ایجاد حفره در نوک ترک که سبب از بین رفتن تکینگی نوک ترک می‌شود [۳]. استفاده از تکنیک فروری که به وسیله تنش‌های پسماند ایجاد شده در جلوی ترک مانع

توربین‌های گاز به عنوان سامانه‌های مهمی در امر تولید قدرت مکانیکی مطرح می‌باشند، از تولید انرژی برق گرفته تا پرواز هواپیماهای مافوق صوت همگی مرهون استفاده از این وسیله سودمند می‌باشند. ظهور توربین‌های گاز باعث پیشرفت زیادی در رشته‌های مهندسی مکانیک، متالورژی و سایر علوم مربوطه گشته به همین علت امروزه به تکنولوژی توربین‌های گاز تکنولوژی مادر گفته می‌شود. توربین خود از قسمت‌های مختلفی تشکیل شده ردیف‌های پره‌های ثابت و متحرک در داخل توربین قرار دارند پره‌های ثابت جریان گازهای داغ را در مسیر مناسب هدایت و سرعت و فشار آن را تنظیم می‌کنند، انرژی گازهای داغ در اثر تماس با پره‌های متحرک به صورت انرژی مکانیکی تبدیل می‌شود. مجموعه قطعات توربین داخل پوسته‌ی توربین که ساختاری

با الگوهای مختلف به سه شیوه A1-A3 انتخاب شده‌اند. در الگو A1 یک پین و در الگوهای A2 و A3 دو پین با ترتیب جا زدن مختلف استفاده شده است (شکل ۲).



شکل ۱- هندسه نمونه اصلی



شکل ۲- الگوهای مختلف شبیه سازی شده

نرم افزار المان محدود آباکوس [۱۲] و کد مکانیک شکست زینکرک [۱۳] برای مدلسازی استفاده شده است. برای مش بندی نمونه‌ها از المان‌های C3D8R استفاده شده این المان‌ها دارای ۸ گره می‌باشند و هر گره دارای ۳ درجه آزادی می‌باشد. جهت اطمینان از این نکته که اندازه‌ی المان‌ها به گونه‌ای انتخاب شده است که اولاً جواب‌ها از دقت کافی برخوردارند و ثانیاً زمان محاسبات مناسب است، نمونه‌های مورد بررسی به چند حالت با اندازه‌ی مش بندی مختلف، مش زده شد و مورد تحلیل قرار گرفت. از حدود ۵۵۰۰۰ المان به بعد تغییرات جواب‌ها قابل نظر بود (شکل ۳). فایل داده‌های آباکوس برای حالت مش بدون ترک، به وسیله زینکرک خوانده و پردازش می‌شود این کد پیشرفته قابلیت مدلسازی و تحلیل هندسه‌های پیچیده با انواع ترک‌های سه بعدی را دارا می‌باشد. پس از اعمال شرایط اولیه و

از رشد بیشتر ترک می‌شود [۴]. تعمیر ترک خستگی به وسیله شاخه شاخه کردن ترک که سبب کاهش رشد ترک می‌شود [۵]. تعمیر به وسیله ایجاد حفره‌های توقف ترک و قرار دادن پین در آن‌ها که سبب تغییر جهت رشد ترک و توقف ترک می‌شوند [۶]. توقف ترک خستگی به روش لیزر-پنین [۷] و استفاده از حفره‌های اضافی [۸] از جمله روش‌های مورد استفاده جهت توقف ترک می‌باشند. این مطالعات نشان داده است؛ یکی از روش‌های توقف رشد ترک، ایجاد حفره‌های توقف ترک و قرار دادن پین در آن‌ها می‌باشد [۹، ۱۰]. در مطالعات قبلی تأثیر نصب پین بر عمر خستگی برای ترک‌های مختلف بررسی شده است اما این مطالعات مختلف به طور کلی تأثیر ترتیب جا زدن و فاصله بین پین‌ها را بر توزیع تنش پسماند و عمر خستگی مکانیکی در نظر نگرفته‌اند. در این مقاله تأثیر ترتیب جا زدن و فاصله بین پین‌ها بر توزیع تنش پسماند و رشد ترک خستگی مکانیکی در نمونه‌های تک حفره‌ای که کاربرد زیادی در صنعت دارند مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۱- تحلیل المان محدود

در این مقاله نمونه‌های از جنس چدن نرم مشابه پوسته توربین‌های گاز استفاده شده است. چدن‌های نرم نسبت به سایر چدن‌های مشابه از مقاومت بیشتری نسبت به پدیده‌ی خستگی برخوردارند. آنالیز شیمیایی و خواص مکانیکی نمونه‌ها به ترتیب در جدول ۱ و ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱- آنالیز شیمیایی چدن نرم ASTM-A395 [11]

عنصر	نماد شیمیایی	درصد وزنی
آهن	Fe	بالانس
کبالت	Co	۰.۳۳
تیتانیوم	Ti	۰.۳۸
منیزیم	Mg	۰.۵۷
کروم	Cr	۰.۱۲
وانادیوم	V	۰.۴۴
نیکل	Ni	۰.۸۲
مس	Cu	۰.۳۵۱
آلومینیوم	Al	۰.۱۶
منگنز	Mn	۰.۱۳۶
سیلیسیوم	Si	۰.۲۷
کربن	C	۰.۳۴۴

جدول ۲- خصوصیات مکانیکی چدن نرم ASTM-A395 [11]

سختی برینل	استحکام نهایی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	نرخ پواسون
۱۶۷	۴۶۱	۳۲۹	۱۶۹	۰.۲۹

نمونه‌ی اصلی (O1) دارای یک حفره مرکزی به قطر 5 میلی متر در مرکز می‌باشد طول، عرض و ضخامت نمونه به ترتیب ۱۲۰، ۲۶۰ و ۵ میلی متر می‌باشد (شکل ۱). یک روش فنی برای بهبود عمر خستگی نمونه اصلی به وسیله بکار بردن پین استفاده شده است. پین‌ها

می‌گردد سپس بلوک‌های مش بندی شده با بالاترین کیفیت المان‌های مش بندی شده که حاوی ترک مورد نظر می‌باشند به داخل این بلوک‌ها نگاشت می‌شوند. مرز مشترک المان‌های این بلوک‌ها به صورت قید به المان‌های اطراف گره زده شده و ترک ایجاد شده در این روش تنها ملزم به رشد در داخل این بلوک‌ها می‌باشد. در روش استاندارد، روش مدنظر در این مقاله در ابتدا نمونه مورد نظر مش بندی می‌گردد در انجام این مش بندی از المان‌های مکعب مستطیل استفاده می‌شود در مرحله بعد شکل جبهه ترک مورد نظر از کنار هم قرار گیری بلوک‌های ترک که به داخل المان‌های نمونه مش خورده نگاشت می‌شوند پدید می‌آید. همچنین از تئوری نرخ آزاد سازی انرژی بیشینه برای پیش‌بینی جهت رشد ترک استفاده شده است که از معیار گریفیس تبعیت می‌کند. با توجه به معیار گریفیس ترک در جهتی رشد خواهد داشت که نرخ آزادسازی انرژی بیشینه است. در این روش تعدادی از نقاط روی جبهه ترک منظور می‌گردد سپس بر خط مماس در هر نقطه، صفحه‌های عمود در نظر گرفته می‌شود، فرض می‌شود که در اثر رشد ترک هر کدام از گره‌ها در این صفحه تغییر مکان می‌دهند، مقادیر نرخ‌های آزاد سازی انرژی کرنشی همان طور که در قسمت‌های قبل توضیح داده شد در جهات مختلف محاسبه می‌گردد، با این کار نرخ آزاد سازی انرژی ماکزیمم و زاویه متناظر با آن بدست خواهد آمد این زاویه جهت رشد ترک را مشخص می‌کند.

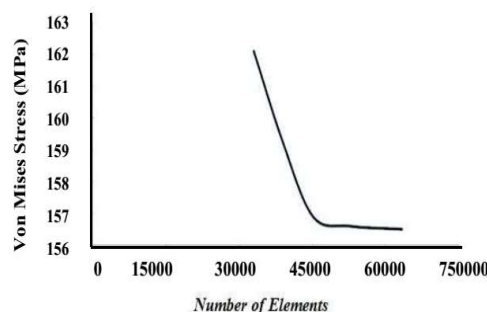
## ۲- تحلیل توزیع تنش پسماند

جهت ایجاد تنش پسماند در جلوی نمونه‌ها، یک حفره توقف ترک به قطر پنج میلی متر در فاصله ۱۵ میلی متر از مرکز حفره اصلی اعمال شده است (الگوی A1). پین‌های از جنس فولاد ۴۳۴۰ با قطر ۵/۰۵ میلی متر داخل حفره توقف ترک جا زده شده است (جدول ۳). شکل ۶ توزیع تنش پسماند ایجاد شده در اثر جا زدن پین را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود توزیع تنش پسماند در اطراف حفره فشاری است و مقدار تنش پسماند محیطی از شعاعی بزرگ‌تر می‌باشد و در یک فاصله مشخص تنش پسماند پایدار می‌شود.

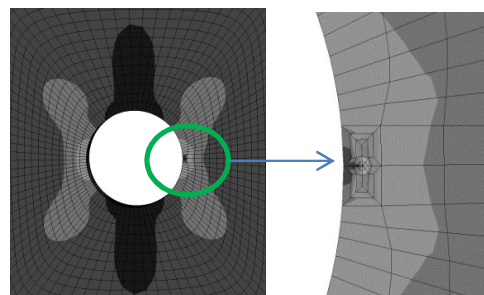
جدول ۳- خصوصیات مکانیکی آلیاژ فولاد ۴۳۴۰ [11]

نرخ پواسون	مدول الاستیسیته (GPa).	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	سختی برینل
۰.۳	۲۱۰	۴۷۰	۷۴۵	۲۱۷

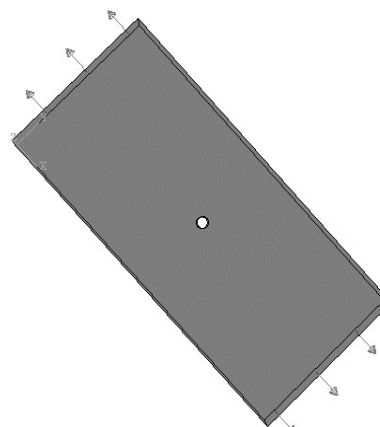
شرایط مرزی توسط آباکوس با انجام کدنویسی مرتبط با هندسه، نوع ماده به کار رفته در ساخت قطعه، نوع ترک، قوانین مربوط به رشد ترک و محاسبه مؤلفه‌های مکانیک شکست و نیز عوامل متعدد دیگر، رشد ترک مورد نظر توسط نرم افزار زینکرک تحلیل شده و در این مرحله ترک‌های لبه‌ای در نمونه‌ها شبیه‌سازی می‌شوند (شکل ۴). نمونه‌ها تحت بارگذاری مکانیکی با نرخ تنش  $R=0$  قرار داده شده و بارهای مکانیکی به صورت تنش‌های دور دست به انتهای نمونه‌ها اعمال شده است (شکل ۵).



شکل ۳- مقادیر تنش در یک نقطه در موضع حفره مرکزی بر حسب تعداد المان‌های مش بندی.

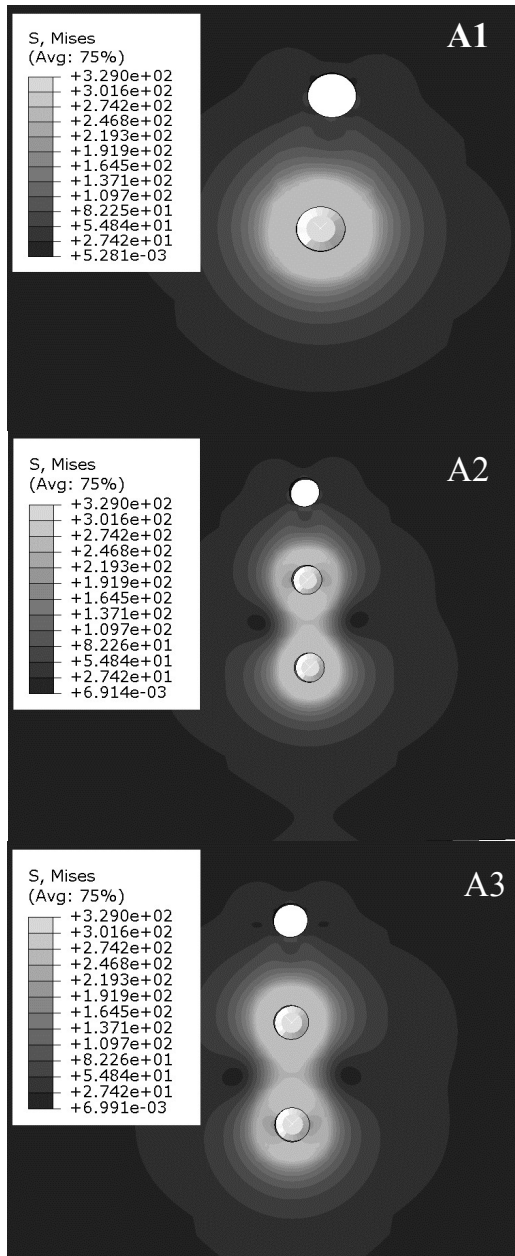


شکل ۴- ترک خستگی شبیه سازی شده در نمونه‌ها



شکل ۵- بارگذاری مکانیکی اعمال شده

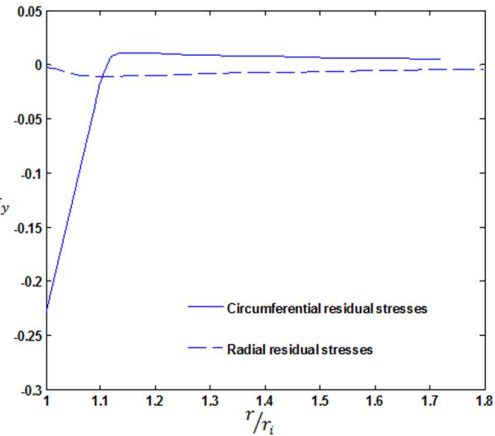
نرم افزار زینکرک دارای دو شیوه درشت و استاندارد جهت تعریف ترک می‌باشد. جهت مدل‌سازی ترک به روش درشت، بلوک‌هایی به شکل مکعب مستطیل در موضع ترک برای نرم افزار زینکرک تعریف



شکل ۷- کانتور توزیع تنش پسماند برای الگوهای A1-A3

### ۵- آزمایشات تجربی

به منظور اعتبار سنجی معیارهای پیشنهاد شده از نتایج آزمایشگاهی بدست آمده برای مقدار تنش پسماند استفاده شده است. در نمونه‌های آزمایش شده مقدار تنش پسماند در اثر ترتیب جا زدن متفاوت پین‌ها در یک فاصله مشخص استخراج شده است.



شکل ۶- توزیع تنش پسماند در اطراف حفره توقف ترک

### ۳- تأثیر ترتیب جا زدن و فاصله بین پین‌ها بر توزیع تنش پسماند

در این قسمت توزیع تنش پسماند ایجاد شده به وسیله پین در حفره‌های هم‌جوار بررسی شده و تأثیر فاصله مرکز به مرکز بین حفره‌ها ( $c/d$ ) و ترتیب جازدن پین‌ها بر توزیع تنش پسماند مطالعه شده است. برای این منظور در جلوی حفره اصلی دو حفره توقف ترک به قطر پنج میلی متر در فاصله ۱۰ میلی متری ( $c/d = 2$ ) و ۱۵ میلی متری ( $c/d = 3$ ) اعمال شده است (شکل ۲). پین‌های مورد نظر به صورت صلب و یک درصد بزرگتر از حفره‌ها شبیه سازی شده و ماده صفحه به صورت الاستیک- پلاستیک کامل فرض شده است. برای مش بندی از المان‌های هشت گره ای C3D8R استفاده شده و در طی فرایند شبیه سازی به طور خودکار تغییرات شرایط سطوح تماسی به صورت شرایط مرزی اعمال شده است. ضریب اصطکاک بین پین‌ها و سطوح حفره‌ها برابر با  $0/3$  در قسمت تعریف سطوح اعمال شده است. شکل ۷ کانتور توزیع تنش پسماند را در اطراف حفره‌های محل نصب پین‌ها، برای الگوهای A1-A3 در حالت  $c/d = 3$  را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود توزیع تنش پسماند در اطراف حفره دوم بیشتر از حفره اول می‌باشد. شکل ۸ کانتور توزیع تنش پسماند را در اطراف حفره‌های محل نصب پین‌ها برای الگوی A3 در حالت‌های  $c/d = 2$  و  $c/d = 3$  نشان می‌دهد.

### ۴- رشد ترک خستگی تحت بارگذاری مکانیکی

در این قسمت تأثیر نصب پین و ترتیب جا زدن پین‌ها بر عمر خستگی نمونه‌هایی که تحت بارگذاری مکانیکی قرار دارند بررسی شده است. شکل ۹ منحنی رشد ترک خستگی را برای الگوهای A1-A3 با تعداد و ترتیب جا زدن مختلف پین‌ها در حالت  $c/d = 3$  را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد در این موارد طولانی‌ترین عمر خستگی برای الگوی A3 حاصل می‌شود.

تأثیر ترتیب جا زدن و فاصله بین پین‌ها بر توزیع تنش پسماند ...

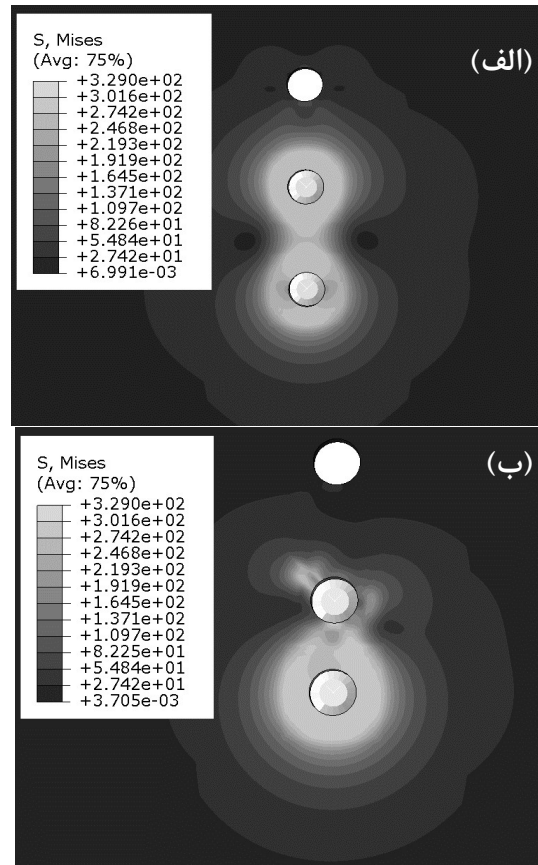
صافی سطح های متفاوت بودند بنابراین بر روی نمونه ها عملیات پولیش انجام گرفت تا صافی سطح یکسانی داشته باشند. خواص مکانیکی نمونه ها با استفاده از تست کشش مطابق استاندارد ASTM E8 بدست آمد (جدول ۴). آنالیز شیمیایی نمونه ها به روش طیفسنجی پراش پرتو ایکس انجام گرفته است (جدول ۵).

جدول ۴- نتایج تست کشش نمونه ها

مدول الاستیسیته (GPa)	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)
۱۶۷	۳۲۹	۴۷۲

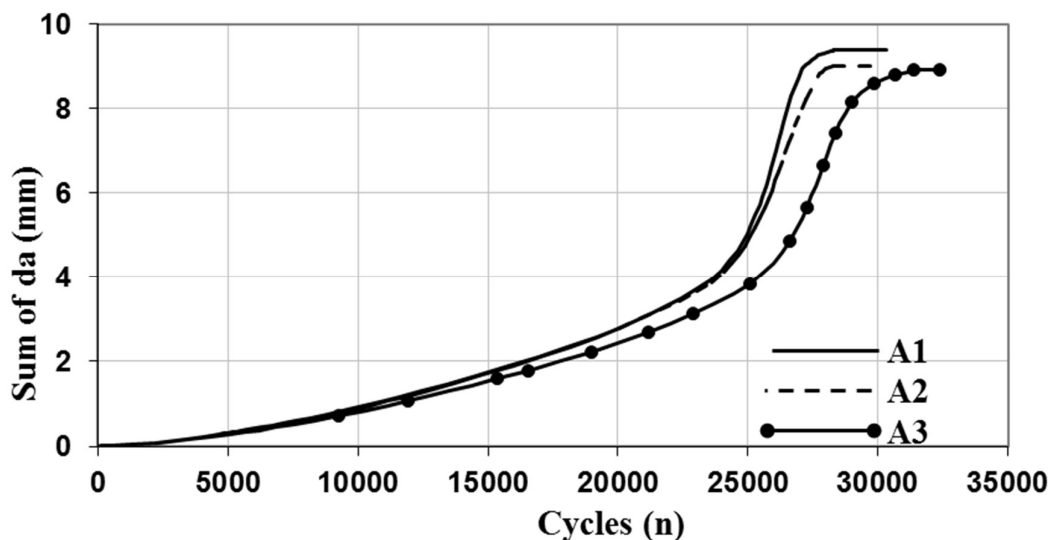
جدول ۵- نتایج آنالیز شیمیایی نمونه ها

درصد وزنی	نماد شیمیایی	عنصر
	Fe	آهن
۰.۳۳	Co	کبالت
۰.۳	Ti	تیتانیوم
۰.۵۷	Mg	منیزیم
۰.۱۲	Cr	کروم
۰.۳۶	V	وانادیوم
۰.۸۲	Ni	نیکل
۳.۵۲	Cu	مس
۰.۱۸	Al	آلومینیوم
۰.۱۳۶	Mn	منگنز
۲/۷	Si	سیلیسیوم
۳/۳۸۴	C	کربن



شکل ۸- کانتور توزیع تنش پسماند برای الگوی A3 در حالت های (الف)  $c/d = 2$  (ب)  $c/d = 3$

نمونه های مورد آزمایش مشابه الگوهای عددی A1، A2 و A3 برای حالت  $c/d = 3$  از جنس چدن داکتیل ساخته شده اند. به دلیل اینکه نمونه های آماده شده بعد از عملیات ماشین کاری دارای



شکل ۹- منحنی عمر خستگی مکانیکی برای الگوهای A1-A3



اولین حفره توقف ترک (MPa)

الگوها	مقادیر عددی	مقادیر آزمایشگاهی
A1	۲۳/۰۳	۲۲/۵۷
A2	۱۷/۴۴	۱۷/۴۱
A3	۳۰/۵۵	۲۹/۸۵

#### ۶- نتایج

در این مقاله تأثیر ترتیب جا زدن و فاصله بین پین‌ها بر توزیع تنش پسماند و رشد ترک لبه‌ای، نمونه‌های تک حفره‌ای تحت بارگذاری خستگی مکانیکی بررسی شد. همان طور که از شکل ۶ مشاهده شد توزیع تنش پسماند در اطراف حفره‌ها فشاری است و مقدار تنش پسماند محیطی از شعاعی بزرگ‌تر می‌باشد و در یک فاصله مشخص تنش پسماند پایدار می‌شود. نتایج نشان داد که ترتیب جا زدن پین‌ها و فاصله بین آن‌ها بر توزیع تنش پسماند تأثیر دارد. در صورتی که فاصله بین محل نصب پین‌ها به اندازه کافی نباشد و ماده بین آن‌ها به طور کامل دچار تغییر فرم پلاستیک شود به دلیل جا زدن پین دوم، انبساط حفره و تسلیم مجدد سبب آزاد سازی تنش پسماند در اطراف حفره اول می‌شود. از طرفی کاهش تنش پسماند در حالت  $c/d = 2$  بیشتر از حالت  $c/d = 3$  بود (شکل ۸). در واقع در حالت  $c/d = 3$  به علت وجود ماده الاستیک به اندازه کافی بین حفره‌ها آزادسازی تنش پسماند در اطراف حفره اول کمتر است. بنابراین در هنگام جا زدن پین‌های دوخت سرد علاوه بر اهمیت ترتیب جا زدن باید به فاصله بین حفره‌ها نیز دقت نمود و متناسب با جنس صفحه و درجه کار سرد فاصله بهینه را مشخص کرد. نتایج حاصل از تحلیل عمر خستگی نشان داد که بیشترین عمر خستگی برای نمونه ی A3 می‌باشد (شکل ۹). نمونه ای که دارای بهینه ترین توزیع تنش پسماند در جلوی ترک در اثر رعایت ترتیب جا زدن پین‌ها می‌باشد دارای بیشترین عمر خستگی بود. برای اعتبار سنجی نتایج، تست های آزمایشگاهی جهت اندازه گیری تنش پسماند و تاثیر ترتیب جا زدن پین‌ها بر توزیع تنش پسماند روی الگوهای مختلف انجام گرفت از نتایج عددی و آزمایشگاهی حاصل شده می‌توان فهمید که افزایش توزیع تنش پسماند در اثر جا زدن مناسب پین‌ها عمده‌ترین دلیل افزایش عمر خستگی مکانیکی نمونه‌های تک حفره‌ای می‌باشد.

#### ۷- مراجع

- [1] Poursaeidi E., Fatigue crack growth prediction in a gas turbine casing, *International Engineering Failure Analysis*, Vol.44, pp. 371-381, 2014.
- [2] Jayadevan K. R., Critical stress intensity factors for cracked hollow pipes under transient thermal loads, *Journal of Thermal Stresses*, Vol.25, pp. 951-968, 2002.
- [3] Shin C. S., Wang C. M., Song P. S., Fatigue damage repair: a comparison of some possible methods, *International Journal of Fatigue*, Vol. 18, pp. 535-46, 1996.
- [4] Song P. S., Sheu G. L., Retardation of fatigue crack propagation by indentation technique, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 79, pp. 725-733, 2002.
- [5] Pavlou D. G., Vlachakis N. V., Pavlou M. G., Vlachakis V. N., Estimation of fatigue crack growth retardation due to crack branching, *computational Materials Science*, Vol. 29, pp. 446-452, 2004.
- [6] Hou P. F., Jiang H. Y., and Li Q. H., Three-Dimensional Steady-State General Solution for Isotropic Thermoelastic

نتایج بدست آمده از تست کشش و آنالیز شیمیایی نشان می‌دهد جنس نمونه‌ها با چدن داکتیل ASTM-A395 تطابق کامل دارند. پین‌های از جنس فولاد ۴۳۴۰ با قطر ۵/۰۵ میلی متر داخل حفره توقف ترک جا زده شده‌اند. برای اندازه گیری تنش پسماند حبس شده در داخل قطعه در اثر جا زدن پین‌ها از روش معمول Hole-drilling strain gauge استفاده شده است. بنابراین در این صورت می‌توان کرنش آزاد شده را اندازه گرفت به طور خلاصه مراحل انجام آزمایش با استفاده از استاندارد ASTM E837 به صورت؛ نصب کرنش سنج‌های سه المانی بر روی قطعه کار و در فاصله مشخص، ارتباط شبکه‌های سیمی کرنش سنج با قسمت نشان دهنده کرنش، نصب بوش راهنمای دقیق سوراخ کاری در مرکز دستگاه کرنش سنج، ایجاد سوراخ کوچک بر روی قطعه کار بعد از صفر کردن و بالانس کردن دستگاه، خواندن کرنش آزاد شده مربوط به تنش پسماند داخل قطعه کار و استفاده از روابط موجود و بدست آوردن تنش نسبت به گنج‌های کرنش سنج انجام گرفت. این روش یک روش نیمه مخرب است زیرا سوراخ ایجاد شده کوچک است و تأثیر چندانی بر روی مقاومت و استحکام قطعه کار ندارد. ایجاد سوراخ بر روی قطعه کار باعث آزاد شدن تنش پسماند در ناحیه ایجاد سوراخ می‌گردد. دلیل آزاد شدن تنش این است که تنش‌های نرمال و برشی عمود بر سطح سوراخ صفر است و حذف این تنش‌ها در سطح سوراخ ایجاد شده باعث تغییرات در میزان تنش در نواحی اطراف سوراخ می‌گردد و این تغییرات تنش باعث ایجاد کرنش در این نواحی می‌گردد. سوراخ ایجاد شده ته بسته می‌باشد که عمق و قطر آن تقریباً برابر و عمق سوراخ در مقایسه با ضخامت قطعه کار کوچک ترمی باشد. با اندازه گیری این کرنش‌ها و داشتن رابطه تنش کرنش میزان تنش آزاد شده بدست آمد. شکل ۱۰ وضعیت نصب کرنش سنج‌ها را روی قطعه کار بعد از ایجاد سوراخ را نشان می‌دهد. نتایج بدست آمده برای تنش‌های پسماند محیطی و شعاعی در یک نقطه در فاصله ۱ میلی متری از لبه پین در جدول ۶ نشان داده شده است همان طور که از نتایج مشاهده می‌شود بین نتایج آزمایشگاهی و عددی هم‌خوانی نزدیکی وجود دارد.



شکل ۱۰- اندازه گیری تنش پسماند به روش آزمایشگاهی

جدول ۶- مقادیر تنش پسماند در فاصله یک میلی متری از لبه

- Materials with Applications I: General Solutions, *Journal of Thermal Stresses*, Vol. 36, pp. 727-747, 2013.
- [7] Huang S., Zhou J. Z., Sheng J., Luo K. Y., Lu J. Z., Xu Z. C., *et al.*, Effects of laser peening with different coverage areas on fatigue crack growth properties of 6061-T6 aluminum alloy, *International Journal of Fatigue*, vol. 47, pp. 292-299, 2013.
- [8] Shafiul Md., Ferdous M., Chobin S. R., Muhammed, and M. Tatsujiro, Improving the fatigue strength of a multiple hole specimen by applying additional holes or notches, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 18, pp. 75-87, 2011.
- [9] Acquisto L., Pasta S., On the Measurement and Prediction of the Out-of-Plane Displacement Surrounding Cold-Expanded Holes, *Experimental Mechanics*, Vol. 51, pp. 11-22, 2011.
- [10] Ghfiri R., Shi H. J., Guo R., Mesmacque G., Effects of expanded and non-expanded hole on the delay of arresting crack propagation for aluminum alloys, *Mater Sci Eng*, pp. 244-9, 2000.
- [11] ASM International Handbook Committee, Edition Metals Handbook., 1998.
- [12] ABAQUS/standard User's Manual. Version 6.1. HKS Inc, 2000.
- [13] ZENCRACK user manual, issue 6, Zentech Inc; 1999.