



## شبیه سازی و تحلیل رشد ترک در پره ردیف اول توربین گازی به کمک نرم افزار Abaqus با روش المان محدود

عقیل شاولی پور<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> استادیار گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه ولایت، ایرانشهر ، shavalipour@velayat.ac.ir

### چکیده

امروزه استفاده از توربین های گازی در صنعت تقریباً امری ضروری است، به گونه ای که در بسیاری از صنایع نظیر نیروگاه های تولید برق، موتورهای محرکه هواپیما، صنایع دریایی کاربردهای فراوانی دارند. مکانیزم های آسیب تیغه های ثابت و متحرک این توربین ها شامل خزش، خستگی و یا تلفیقی از آن ها است که به جوانه زنی و رشد ترک منتهی می شوند. همان گونه که از نتایج تحقیقات پیشین مشخص است، خستگی، خوردگی و خزش از اصلی ترین علل شکست در پره ها به شمار می روند. در پژوهش حاضر پیش بینی و تحلیل رشد ترک در یک پره متحرک ردیف اول توربین گازی از جنس سوپر آلیاژ پایه نیکل (IN738LC) با استفاده از روش اجزاء محدود توسعه یافته توسط نرم افزار آباکوس انجام می گردد. نتایج نشان داد که اولاً هرچه زاویه ترک نسبت به افق به سمت قائم میل کند، ضریب شدت تنش در مود اول بزرگتر خواهد شد و اگر زاویه ترک به گونه ای باشد که نوک ترک از تکیه گاه دور تر شده باشد و به سمت نواحی آزاد پره میل کند، ضریب شدت تنش در قطعه بیشتر خواهد شد. همچنین مشاهدات نشان می دهند که فاصله اعداد در زوایای بالاتر، بیشتر است. یعنی روند افزایش (کاهش) مقدار  $K$  خطی نیست.

### واژه های کلیدی

رشد ترک – روش المان محدود توسعه یافته – روش اجزای محدود – رشد ترک – XFEM

### مقدمه

به طور کلی صنعت ساخت توربین بسیار حساس و گران قیمت می باشد، از طرفی ایمنی و کارکرد مقرون به صرفه این قطعات به ارزیابی دقیق امکان شکست آن ها بستگی دارد. در نتیجه طراحی این قطعات باید با دقت بالایی صورت گیرد. یکی از مسائلی مهم و روزمره این صنعت، وجود ترک در پره های توربین است. وجود ترک برای سازندگان و استفاده کنندگان این محصولات، بسیار مهم و مورد توجه می باشد. به طوری که اگر بتوان تحلیل درست و منطقی از ترک های موجود در پره توربین ارائه کرد، با اطمینان بیشتری می توان از آنها استفاده مجدد نمود. با داشتن این توانایی، فاصله زمانی بین تعمیرات افزایش و هزینه های تحمیلی ناشی از تعویض پره ها، به میزان قابل

توجهی کاهش می یابد. در نتیجه داشتن برآورد درست و صحیح از تحلیل ترک و تشخیص و قضاوت صحیح در مورد قابل استفاده بودن یا نبودن پره های گردان توربین گازی اهمیت فراوانی دارد. همچنین در دست داشتن همچنین تکنولوژی در سطح صنعت ملی می توان انتظار ورود به ساخت و طراحی قطعاتی با درصد کیفیت دو چندان، عمر بالاتر و در نتیجه صرفه جویی اقتصادی را داشت.

تا به امروز، پژوهش های های فراوانی جهت بررسی و بهبود عملکرد توربین های گازی در برآورده کردن نیاز مقاومتی در برابر شکست در پره های توربین توسط محققان این حوزه پیشنهاد گردیده است. در سال ۲۰۰۳ میلادی، کمپانی دریس-رند در آمریکا تحقیقاتی در مورد خستگی پره های توربین گازی انجام داد و اثر وجود ترک در پره های توربین گازی را بر فرکانس طبیعی آن ها بررسی کرد [۱]. در سال ۲۰۰۸ خرابی و شکستگی پره های متحرک یک توربین گازی ۱۵۰ مگا واتی، بعد از ۱۸۰۰ ساعت کارکرد و ۶۵ بار خاموش و روشن شدن بررسی شد. شرکت سازنده ضمن توجه به کارکرد کم توربین، پس از آزمایشات متالوگرافی و نمایان سازی ترک علت خرابی را خستگی کم چرخه ناشی از ایجاد ترک در پین نگه دارنده پره ها به دیسک توربین اعلام کرد [۲]. در این سال نیز تحقیقاتی در همین زمینه بر روی توربین ۳۵۰ مگا واتی انجام گرفت [۳]. در سال ۱۳۹۷ خورشیدی پره توربین GE-F5 از جنس سوپر آلیاژ پایه نیکل اینکونل LC ۷۳۸ مورد بررسی قرار گرفت که پس از حدود ۶۵۰۰ ساعت سرویس در حین کارکرد دچار حادثه شده است. در اثر این حادثه، قسمت های متعددی از توربین دچار آسیب های شدید شدند. بازرسی چشمی، اندازه گیری سختی، آنالیز ترکیب شیمیایی، بررسی ریزساختار و بررسی متالورژیکی سطح شکست به منظور تشخیص علل اصلی شکست پره انجام گرفتند. بررسی ها نشان داد که حفره های قابل توجهی در سطح پره به وجود آمده و شواهد نشان از پیشرفت این حفره ها و ترک ها به دلیل وجود پدیده خستگی دارند. با بررسی سطح شکست مشخص شد ترک اولیه به دلیل پدیده خوردگی داغ ایجاد شده و با سازوکار خستگی از لبه حمله پره پیشروی کرده است که منجر به کاهش سطح مقطع شده و شکست رخ داده است [۴].

در این پژوهش به تحلیل و پردازش رشد ترک در یک پره متحرک ردیف اول توربین گازی از جنس سوپر آلیاژ پایه نیکل (IN738LC)

با توجه به شرایط کاری توربین ها، جنس پره ها از اهمیت بسیار ویژه ای برخوردار است. پره های توربین های گازی اصولاً از سوپر آلیاژهای پایه نیکل و پایه کبالت ساخته می شوند. اصلی ترین دلیل استفاده از این سوپر آلیاژ ها، مقاومت عالی این مواد در برابر حرارت است که باعث می شود از آن ها به عنوان یک ماده مناسب در ساخت اجزای مختلف توربین گازی بهره گرفت [۵ و ۶]. جنس پره مورد استفاده در این تحقیق، سوپر آلیاژ پایه نیکل انتخاب شده است که با نام اینکونل (IN738LC) شناخته می شود. آلیاژهای اینکونل، خانواده های از سوپر آلیاژ پایه آهن- نیکل هستند. مدول الاستیسیته ۲۰۰ گیگا پاسکال، ضریب پواسیون ۰/۲۹، استحکام تسلیم ۸۹۵ مگا پاسکال و استحکام نهایی سوپر آلیاژ مورد استفاده در شرایط کاری توربین، ۱/۱ گیگا پاسکال است.

یکی از مشخصه هایی که پره های متحرک توربین را از پره های ثابت متمایز می کند، وجود چلچله ای در انتهای پره می باشد که به صورت کشویی در جایگاه خود بر روی روتور توربین قرار می گیرد. اتصال این دو پینی است، که در زیر چلچله ای قرار میگیرد. درمورد شرایط تکیه گاهی مسئله می توان گفت، تمام قسمت چلچله ای به علاوه ی قسمت بالایی آن تا ابتدای ایرفویل، تماماً داخل شیار روتور قرار می گیرد و امکان جابجایی ندارند. بنابراین ما این قسمت را به عنوان تکیه گاه در نظر گرفتیم. مقدار نیروی وارد بر پره را برابر با در نظر می گیریم که این عدد از برآیند نیرو های وارده و ساده سازی های انجام گرفته نظیر زاویه اعمال نیرو و تاثیرات دمایی و... صورت گرفته است. مطابق شرایط حرارتی در اوج بار در این توربین گازی، دمای ایجاد شده توسط محفظه احتراق در سطوح ایرفویل، بیش از ۵۶۰ درجه سانتیگراد در لبه حمله و ۵۲۰ درجه سانتیگراد در لبه فرار بوده است. برخی ساده سازی ها و حذفیاتی که تاثیر زیادی در تحلیل مورد نظر ما ندارد می توان به مواردی اشاره کرد. به علت ساکن بودن پره نسبت به روتور مسئله را استاتیکی در نظر گرفتیم و از تحلیل ساده تری استفاده شده، در مورد شرایط دمایی، طبق تحقیقاتی که صورت گرفته اگر به میزان بار اعمالی درصدی اضافه کرد می توان از اثر بار گرمایی صرف نظر کرد هر چند که این بحث از حوصله بحث ما خارج است.

### معادلات مسئله و حل دستی

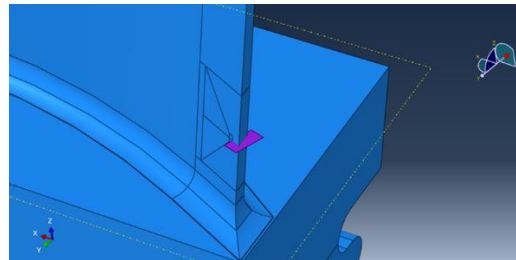
طبق بررسی هایی که در محل ایجاد شده ی ترک انجام شده، جهت محاسبه تنش نرمال سطح ترک می توان آن قسمت پره را به صورت یک صفحه در نظر گرفت و فرمول های صفحه را برای محاسبه تنش منظور کرد. به همین ترتیب ابتدا به محاسبه مساحت مؤثر خواهیم پرداخت. در نتیجه تنش برابر است با:

$$\sigma_{zz} = \frac{P}{A} \quad (1)$$

با استفاده از روش اجزاء محدود توسعه یافته توسط نرم افزار آباکوس انجام می گردد. مدل هندسی پره از طریق نرم افزار Catia شبیه سازی شده و ترک مستطیل شکلی به طور عمود در منطقه بحرانی آن اعمال می گردد. تحلیل ترک این پره به روش غنی سازی المان ها XFEM، و حلگر استفاده شده در این تحلیل Abaqus Standard است.

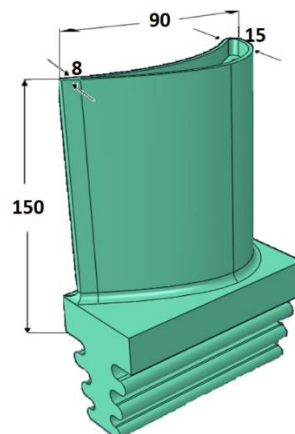
### تعریف مسئله و بیان فرضیات

تحقیق پیش رو به بررسی رفتار ترک، در یک نوع پره متحرک ردیف اول توربین گازی پرداخته است که به منظور این کار، نواحی بحرانی قطعه را (از نظر تنش وارده) شناسایی کرده و احتمال بروز خرابی و ترک را در نقاط مذکور حائز اهمیت دانستیم. بنابراین ترک مستطیل شکلی با طول ۱۲ میلی متر (جلو) و ۸ میلی متر (پشت) و به عمق ۱۸ میلی متر طراحی و در لبه ی فرار ایرفویل روی سطح قطعه ایجاد کردیم. ترک را عمود بر سطح پره و در صفحه XY و حول محور Z با زاویه ۲۰° ساعتگرد انتخاب کردیم.



شکل ۱: موقعیت ترک ایجاد شده

پره ها بر حسب نوع کاربرد گازی و یا بخار، در توربین ها متفاوت اند. همچنین در توربین گازی مورد مطالعه ما برحسب ردیف پره، طول و شکل آن متفاوت خواهد بود. در پره متحرک ردیف اول پیش رو، ارتفاع کل پره ۲۰۰ میلی متر، عرض پره ۹۰ میلی متر، حداکثر فاصله روی مقطع ایرفویل ۱۵ میلی متر، حداقل آن ۸ میلی متر و فاصله از انتهای قسمت دم چلچله ۱۵۰ میلی متر می باشد.



شکل ۲: ابعاد پره

بنابراین فرمول بصورت زیر ساده می شود:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi c}$$

برای محاسبه مقدار ضریب شدت تنش مود اول، پس از ساده سازی و استفاده از جدول کتاب مقاومت مصالح بورسی به فرمول زیر می رسیم:

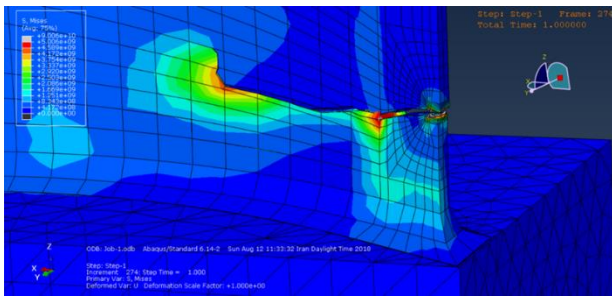
$$K_I = 1.12 \times \sigma_{zz} \sqrt{\pi a}$$

$$K_I = 1.12 \times 6.213 \times 10^2 \times \sqrt{1.194 \times \pi}$$

$$K_I = 1.347 \times 10^3 \text{ Mpa} \sqrt{\text{mm}}$$

### نتایج و تحلیل نرم افزاری

پس از پایان موفقیت آمیز حل، وارد بخش پس پردازش شده و نتایج را استخراج می کنیم. اولین نتیجه و ملموس ترین آنها مشاهده پیشروی ترک و کانتور تنش به صورت رنگ بندی است. با کلیک بر روی گزینه Plot Contours on Deformed Shape کانتور تنش نمایان می شود.



شکل ۳: کانتور تنش و پیشروی ترک

مشاهده می شود که تنش در نوک تک و محل هایی که پیشروی اتفاق افتاده بیشتر است. همچنین، قسمتی المان هایی که دچار تخریب کلی شده اند و اتصال آنها قطع شده، زیر بار فشار نیستند و این امری طبیعی است. تنش در انتهای ترین المان ( به شماره کلی ۱۸۰۸) تخریب شده برابر  $6.167 \times 10^8$  است.

جهت محاسبه ضرایب شدت تنش در مود های اول، دوم و سوم، در آغاز باید دانست که ضرایب شدت تنش فقط در صورتی قابل محاسبه هستند که هیچ المانی دچار تخریب یا شکست نشوند، بنابراین دو راه پیشنهاد می شود. اول اینکه تعریف ترک را از روش Contour Integral انجام داد و راه دوم که مورد استفاده در این پژوهش بوده باید به ماژول Interaction رجوع کرد و از قسمتی که تعریف ترک را انجام دادیم، تیک مربوط به اجازه پیشروی ترک را برداریم.

اکنون وارد ماژول Visualization شده و از Result وارد History Output می شویم. در پنجره باز شده مشاهده می شود که برای  $K_I$  تعداد زیادی جواب وجود دارد. این جواب ها همان ۵ کانتوری که در ماژول Step درخواست داده بودیم است. علاوه بر آن، این کانتور

برای محاسبه مقدار  $A$ ، اندازه های اضلاع شکل نامنتظمی که تنش به آن سطح وارد می شود را از طریق نرم افزار بدست آورده و مساحت آن را محاسبه می کنیم. به دلیل نامنتظم بودن شکل، از یک مستطیل مکمل برای محاسبه راحت تر و تقسیم آن به مثلث های قائم الزاویه استفاده کردیم و به این ترتیب مساحت ناحیه مذکور  $11.266$  میلی متر مربع بدست آمد. که برای استفاده در فرمول آن را به متر مربع تغییر واحد می دهیم. مقدار عددی  $P$  همان نیرویی است که به پره وارد می شود. حال خواهیم داشت:

$$A = 11.266 \text{ mm}^2 = 11.266 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$P = 7 \times 10^6 \text{ N}$$

$$\sigma_{zz} = \frac{P}{A} = \frac{7 \times 10^6}{11.266 \times 10^{-6}}$$

$$\sigma_{zz} = 0.6213 \times 10^{12} \text{ Pa}$$

$$\sigma_{zz} = 6.213 \times 10^2 \text{ Mpa}$$

در حالت کلی اگر یک نقطه مشخص به مختصات  $\theta, r$  در اطراف نوک ترک در نظر بگیریم تنش ها در این نقطه تنها به  $\sigma$  (تنش وارده به جسم دور از محل ترک) و  $a$  (طول ترک) بستگی دارد. لذا ضریب  $K_I$  که میزان شدت تنش در هر نقطه خاص را نشان می دهد را بصورت کلی زیر نشان می دهند.

$$K_I = \alpha \sigma \sqrt{\pi a}$$

همانطور که از زیر نویس  $I$  مشخص است این رابطه برای حالت مود شکست برقرار بوده و  $a$  طول اولیه ترک و ضریب تصحیح  $\alpha$  با توجه به شکل هندسه جسم و نحوه قرار گرفتن ترک و نوع بار گذاری اعمال شده برای اجسام مختلف دارای ترک متفاوت می باشد. در این پژوهش که محل ترک بصورت صفحه است برای  $\alpha$  و در نتیجه فرمول مطابق زیر خواهد بود:

$$K_I = \sqrt{\pi c} (\sigma_m f_m + \sigma_b f_b)$$

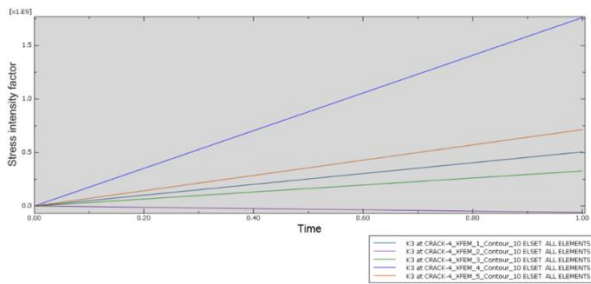
که در اینجا  $c$  طول ترک است و  $\sigma_m$  و  $\sigma_b$  به ترتیب مولفه های تنش خم کردن جسم و تنش پوسته خواهد بود. برای مقادیر این دو رابطه زیر برقرار است:

$$\sigma = \sigma(u) = \sigma_m + \sigma_b \left( 1 - \frac{2u}{t} \right) \quad \text{for } 0 \leq u \leq t$$

همچنین مقادیر  $\sigma_m$  و  $\sigma_b$  از جدول زیر برای  $u=0$  (A) و  $u=t$  (B) استخراج می شود:

جدول ۱: مقادیر  $\sigma_m$  و  $\sigma_b$

$f_m^A$	$f_b^A$	$f_m^B$	$f_b^B$
1.000	1.000	1.000	-1.000

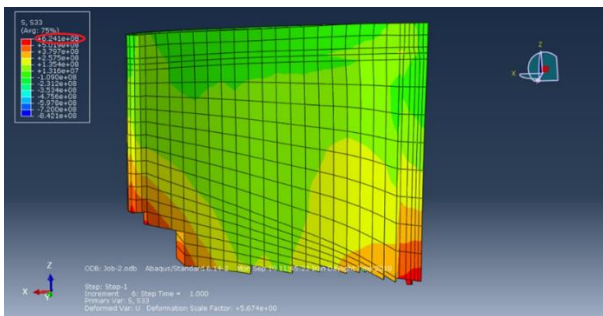


شکل ۶: نمودار  $K_3$

مجددا جهت پیدا کردن مقدار  $K_3$ ، از مقادیر نهایی آمده میانگین می گیریم، که برابر است با:

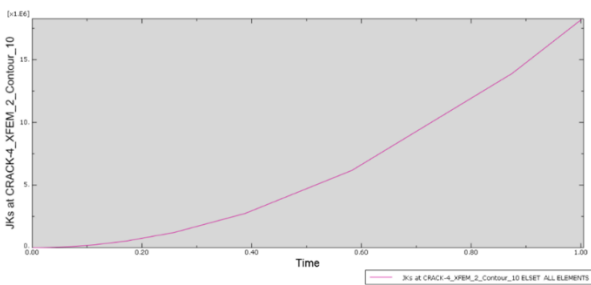
$$K_3 = 6.49824 \times 10^8$$

تنش وارده در جهت عمود بر صفحه ترک که به عبارتی عمود بر صفحه  $Z$  می باشد. در شکل زیر کانتور تنش و مقدار عددی ماکسیمم آن را نشان می دهد که به مقدار عددی  $10^2 \times 6.241$  MPa ختم می شود.



شکل ۷: کانتور تنش  $\sigma_Z$  یا  $S_{33}$

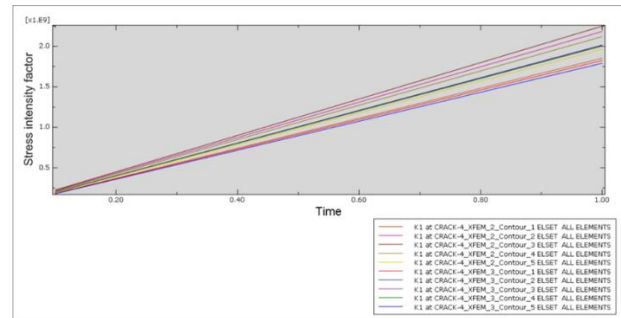
انتگرال مسیر  $J$  معمولا در مسائل شبه استاتیکی و مستقل از نرخ استفاده می شود و نشان دهنده انرژی آزاد شده در اثر رشد ترک می باشد.



شکل ۸: نمودار انرژی آزاد شده  $J$

مطابق نمودار  $JK_s$  روند آزاد سازی انرژی طی رشد ترک مطابق جدول زیر است که به مقدار نهایی  $8.76964 \times 10^7$  ختم می شود.

ها برای تعدادی XFEM حل شده است که این XFEM ها تعداد گره های (در جهت عمق ترک) است. حال برای  $K_1$  و  $K_2$  و  $K_3$  هر کدام به صورت جداگانه نمودار کانتور را Plot می کنیم.

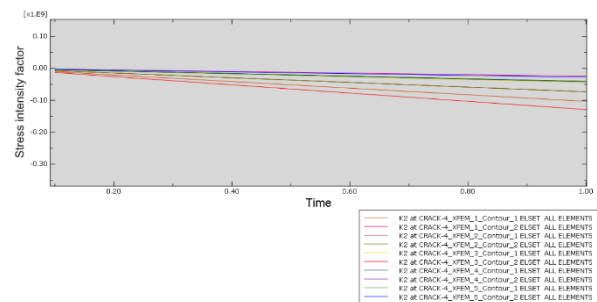


شکل ۴: نمودار  $K_1$

توضیح اینکه علت پراکندگی نمودار در گره اول و آخر، توخالی بودن، مشبک بودن و روی سطح بودن این گره ها است و در ادامه برای بدست آوردن مقدار واحد  $K_1$  باید میانگین این مقادیر را لحاظ کرد. میانگین این مقادیر برابر است با:

$$K_1 = 1.5753 \times 10^9$$

مود ۲ یا مود برشی، تغییر مکان های سطوح ترک نسبت به صفحات  $XY$  و  $XZ$  است. در این مود، دو سطح ترک نسبت به هم در جهت عمود بر خط نوک ترک می لغزند. نمودار مود دوم ضریب شدت تنش مطابق زیر است.



شکل ۵: نمودار  $K_2$

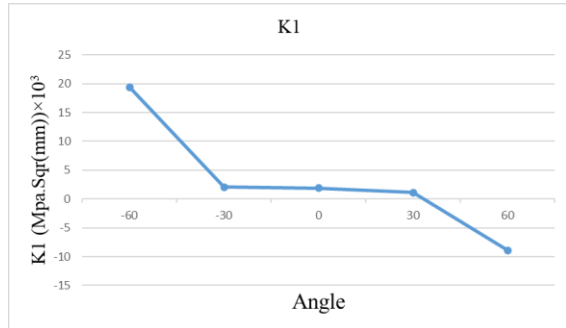
لذا جهت پیدا کردن مقدار یکتای آن، از مقادیر نهایی آنها میانگین می گیریم برابر است با:

$$K_2 = -5.8776 \times 10^7$$

مود ۳ یا مود پارگی نیز معرف تغییر شکل سطوح ترک به صورت پاد متقاربت نسبت به هر دو صفحه  $XY$  و  $XZ$  می باشد. در این مود، لغزش دو صفحه در جهتی به موازات خط پروفیل ترک اتفاق می افتد. نمودار مود سوم ضریب شدت تنش مطابق زیر است.



دهند که فاصله اعداد در زوایای بالاتر، بیشتر است. یعنی روند افزایش (کاهش) مقدار  $K$  خطی نیست.



شکل ۹: ضریب شدت تنش در مقابل زاویه شکست

### پیشنهاد برای کارهای آینده

با توجه به نتایج بدست آمده در این پژوهش، کارهای آینده را می توان با در نظر گرفتن فاکتورهای زیر انجام داد:

- ۱- بررسی فاکتورهای ضریب شدت تنش در مودهای دوم و سوم شکست.
- ۲- بررسی فاکتورهای ضریب شدت تنش نسبت به تغییر طول ترک و محل های تمرکز تنش پره.
- ۳- تغییر جنس ماده و استفاده از مواد کامپوزیتی و بررسی فاکتورهای مهم.
- ۴- اعمال شرایط دمایی و محاسبه مجدد پارامترها.

### منابع

- [1] Singh D., Mattheus T., "Fatigue damage of steam turbine blade by frequency" DRESSE-RAND company USA, 2003.
- [2] Kubiak J., Urquiza G., "failure analysis of the 150MW Gas turbine blade" state university of morelos, Engineering Failure Analysis, pp. 1794–804, 2008 .
- [3] Kubiak J., Segura J., "Failure analysis of the 350 MW. Steam turbine" state university of morelos, Engineering Failure Analysis, pp.1270-81, August 2008
- [4] بنزاده، ر.، ریاحی، م.، آیینیه روایی، م.، "بررسی علل شکست یک پره توربین گازی از جنس سوپر آلیاژ اینکونل LC ۷۳۸" دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران، امور فنی و مهندسی مکانیک، شرکت تعمیرات نیروگاهی ایران، البرز، ایران. (نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر)، دوره ۵۰، شماره ۱، سال ۱۳۹۷، صفحات ۱۰۳ تا ۱۱۲.
- [5] C.R. Brooks, Heat treatment, structure, and properties of non-ferrous alloys, American Society for metals, 1982.
- [6] C. Sims, N. Stoloff, W.C. Hagel, Superalloys II: High Temperature Materials for aerospace and Industrial Power. 1987, NY: John Wiley & Sons

جدول ۲: تغییرات انرژی

Time	$JK_s$
0.1	876964
0.2	3.50785E+006
0.35	1.07428E+007
0.575	2.89946E+007
0.9125	7.30209E+007
1	8.76964E+007

### مقایسه نتایج دستی و نرم افزاری

با توجه محاسبات تنش بدست آمده توسط حل دستی و نرم افزاری، تفاوت چندانی در مقادیر جواب ها مشاهده نمی شود لذا وجود اندک آن، بسیار بدیهی است. همچنین مقادیر بدست آمده برای فاکتورهای ضریب شدت تنش نیز مقدارری تفاوت وجود دارد. لازم به یادآوریست که هر دو روش نرم افزاری و تئوری، بر پایه محاسبات عددی المان محدود (FEM) است و در هر بار از محاسبات، ممکن است جواب هایی با اندکی تفاوت حاصل شود. بنابراین، نتایج بدست آمده بسیار مناسب و قابل قبول هستند.

جدول ۳: مقایسه تنش نرم افزاری و دستی

Stress (Mpa)	Theory	FEM	Tolerance
$\sigma_{yy}$	6.213E+02	6.241E+02	0.028

جدول ۴: مقایسه ضرایب شدت تنش نرم افزاری و دستی

SIF	Theory	FEM
$K_I$	$1.1347 \times 10^3$	$1.5753 \times 10^3$
$K_{II}$	0	-58.776
$K_{III}$	0	64.982

### نتیجه گیری

با توجه به اهمیت بالای ضریب تمرکز تنش در مود اول به محاسبه نرم افزاری این مود در زوایای مختلف نسبت به افق پرداختیم که در زیر نتایج آن را بیان می نماییم. طبق نمودار رسم شده مشاهده می شود که اولاً هرچه زاویه ترک نسبت به افق به سمت قائم میل کند، ضریب شدت تنش در مود اول بزرگتر خواهد شد. نتیجه دیگری که می توان گرفت این است که اگر زاویه ترک به گونه ای باشد که نوک ترک از تکیه گاه دور تر شده باشد و به سمت نواحی آزاد پره میل کند، ضریب شدت تنش در قطعه بیشتر خواهد شد. همچنین مشاهدات نشان می