

## بررسی علت شکست دیسک ردیف دوم توربین واحد گازی ۳۲ مگاواتی نیروگاه ری

هادی نیری<sup>۱</sup>، علیرضا ترابی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس معاونت مهندسی شرکت مدیریت تولید برق ری

[nayeri@reypower.ir](mailto:nayeri@reypower.ir)

<sup>۲</sup> عضو هیات علمی گروه مهندسی هوافضا، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

[a\\_torabi@ut.ac.ir](mailto:a_torabi@ut.ac.ir)

**واژه های کلیدی:** توربین گازی، دیسک توربین، خزش، ترک، خستگی، شکست

### چکیده

کرد. مطالعات انجام شده در این تحقیق شامل مطالعات میدانی، بازرسی های چشمی و بررسی میکروسکوپی سطح شکست دیسک بود. دو مکانیزم تخریب اصلی برای دیسک مورد نظر متصور بود؛ یکی خزش به دلیل دمای بالای کاری دیسک و دیگری خستگی کم چرخه به دلیل روشن و خاموش کردن واحد. بازرسی های چشمی از سطح شکست نشان دهنده وجود ریز ترک های زیاد و نامنظم بر روی سطح بوده که غلبه مکانیزم تخریب خزشی را پیشنهاد می نمود. بعلاوه، هیچ نشانه ماکروسکوپی دال بر نقش جدی خستگی کم چرخه با چشم مشاهده نگردید. بنابراین، مطالعات میکروسکوپی از سطح شکست به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی (*SEM*) انجام شد. نتایج نشان داد که حفره های خزشی به وفور در سطح شکست دیسک مشاهده شده و ردپایی از خستگی

توربین گازی واحد ۳۱ نیروگاه ری که از واحدهای مدل فیات (*TG ۲۰ B۲*) می باشد، با توان اسمی ۳۲ مگاوات در حین کارکرد با بار پایه دچار سر و صدای غیرعادی و لرزش شدید شده و تریپ می کند. پس از بررسی های اولیه و بازکردن پوسته ها، مشاهده شد که روتور توربین از محل دیسک ردیف دوم دچار شکست شده و پره های متحرک و ثابت و سایر قسمتهای توربین نیز دچار تخریب شدید شده اند. بعلاوه، در پره های کمپرسور نیز خمیدگی و آسیب مشاهده شد. از آنجا که حوادث مشابه با این حادثه پیشتر نیز به دفعات برای سایر واحدهای *TG ۲۰* اتفاق افتاده بود، کمیته تحقیقات نیروگاه ری تصمیم به بررسی علت وقوع شکست دیسک توربین گرفت، تا به کمک آن بتوان از وقوع حوادث مشابه در آینده جلوگیری

مشاهده نشد. بنابراین، علت شکست دیسک ردیف دوم توربین مذکور، وقوع پدیده خزش در دمای بالای کاری بوده است.

## ۱- مقدمه

طراحی قطعاتی که تحت بار ثابت در دماهای پایین و زیر دمای خزشی کار می کنند، عموماً بر اساس استحکام تسلیم و استحکام کششی و با اعمال ضرایب اطمینان مناسب صورت می گیرد. در این شرایط، تغییر شکل قطعه و شکست آن وابسته به زمان نبوده و در نتیجه، زمان کارکرد در مورد این قطعات مفهومی نداشته و تا زمانی که تنش اعمال شده از تنشهای طراحی تجاوز ننماید، این قطعات بدون مشکل به کار خود ادامه خواهند داد. اما در مورد قطعاتی که در دماهای بالا کار می کنند و پدیده خزش در آنها اتفاق می افتد، تغییر شکل و شکست قطعات به زمان وابسته بوده و برای آنها حداکثر زمان کارکرد تعریف می شود. البته، تعاریف مختلفی در خصوص از کارافتادگی یک قطعه ارائه می شود. امروزه پیشرفت در تکنولوژی ساخت توربینهای گازی و تقاضا برای کارایی بیشتر، نیاز به موادی با قابلیت تحمل تنشها و دماهای بالاتر در زمان طولانی تر را ایجاد می کند. سوپر آلیاژها، جزء معدود موادی هستند که توانایی و قابلیت کارکرد در دمای بالا (بین ۶۲۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد) را داشته و برای استفاده در مسیر داغ توربین گازی گسترش یافته اند. این آلیاژها، بر پایه یکی از عناصر نیکل، کبالت و آهن بوده و به صورت کار شده و یا ریختگی می باشند.

به منظور حصول راندمان بالاتر، امکان بهره برداری طولانی مدت و جلوگیری از حوادث در واحدهای توربین گازی، این واحدها در فواصل زمانی معینی مورد بازبینی قرار گرفته و تعمیرات اساسی دوره ای بر روی آنها انجام می گیرد. از آنجا که مکان های تمرکز تنش، کاندیدای مهمی برای جوانه زنی و رشد ترک ها و در نهایت شکست قطعات به شکل ناگهانی می باشند، این مکان ها به طور ویژه و معمولاً به کمک آزمایش های غیر مخرب، جهت آشکارسازی ترک های احتمالی مورد

بازبینی قرار می گیرند. از جمله مهم ترین مکان های تمرکز تنش در توربین های گازی، شیارها می باشند که به شکل های هندسی گوناگون و به تعداد بسیار زیاد وجود دارند. از این دسته می توان به شیارهای V شکل، U شکل، دایره ای و شیار دم چلچله ای (در محل اتصال پره های متحرک توربین به دیسک) اشاره نمود که پدیده شکست ترد در این متمرکز کننده های تنش تاکنون توسط محققین زیادی به صورت تجربی و تئوری مورد بررسی قرار گرفته است [۱-۸].

یکی از مهمترین بخش های توربین گازی مورد استفاده در نیروگاه ها، روتور توربین می باشد. مساله تعمیر و نگهداری توربین در واحدهای گازی از اهمیت زیادی برخوردار بوده و معمولاً پس از گذشت مدت زمان معینی از عمر آنها، واماندگی و شکست در پره ها، دیسک ها و دیگر قطعات جانبی آنها رخ می دهد. از آنجا که ارائه گزارش های علمی در مورد انواع تخریب های رخ داده در قطعات توربین های گازی موجب افزایش شناخت این حوادث برای مهندسين طراح توربین ها و پرسنل فنی نیروگاه ها شده و می تواند در کاهش یا جلوگیری از وقوع صدمات مشابه در آینده، در دیگر توربین ها موثر باشد، لذا، موارد نسبتاً زیادی از حوادث پیش آمده تاکنون در کشورهای مختلف جهان برای توربین های گازی، به خصوص بخش توربین، به صورت علمی گزارش شده اند.

با وجود بازرسی های منظم، تاکنون گزارش های متعددی از وقوع حوادث در بخش های مختلف توربین های گازی (به خصوص در نیروگاه ها) ارائه شده است. به عنوان مثال، در این رابطه می توان به مراجع [۹-۱۴] اشاره نمود که در آنها، واماندگی در دیسک و پره های توربین به روش های مختلف از جمله بازدید چشمی، تحلیل های مکانیکی، شکست نگاری میکروسکوپی و ماکروسکوپی مورد مطالعه قرار گرفته اند. Carter [۹] به بررسی عوامل تخریب متداول برای پره توربین گازی پرداخته است. Hou و همکاران [۱۰] تخریب ناشی از خستگی را برای پره های توربین یک موتور توربینی، به کمک

قسمتهای توربین نیز دچار تخریب شدید شده اند. بعلاوه، در پره های کمپرسور نیز خمیدگی و آسیب مشاهده شد. شکل های (۱)، (۲) و (۳) به ترتیب نمایی از روتور توربین حادثه دیده، محل شکست دیسک و نمایی نزدیک از محل شکست دیسک را نشان می دهند.



شکل (۱): روتور توربین حادثه دیده.



شکل (۲): محل شکست دیسک ردیف دوم توربین حادثه دیده.



شکل (۳): نمایی نزدیک از محل شکست دیسک ردیف دوم توربین حادثه دیده

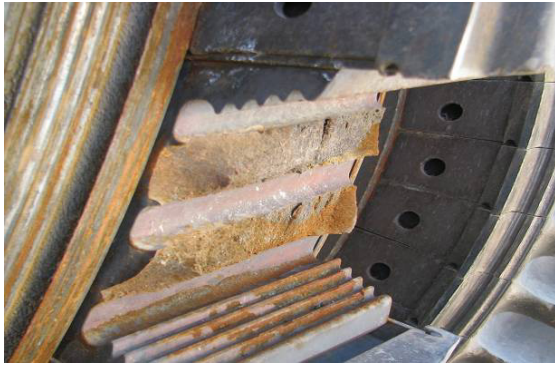
شکل (۴) روتور کمپرسور واحد حادثه دیده را نشان می دهد.

تحلیل های مکانیکی مورد بررسی قرار دادند. خواجهی و شریعت [۱۱] تخریب پره های ردیف اول توربین گازی را مورد بررسی قرار داده و علت تخریب را خزش و خوردگی داغ تعیین کردند. بررسی تخریب پره های متحرک یک توربین گازی ۱۵۰ مگاواتی توسط *Kubiak* و همکاران [۱۲] انجام شده و خوردگی داغ به عنوان مکانیزم های غالب تخریب معرفی شدند. تحلیل شکست دیسک های توربین توسط *Shlyannikov* و همکاران [۱۳] انجام شده و چندین تصمیم عملیاتی برای مواجهه با این نوع شکست ها برای استفاده کاربران پیشنهاد شده است. پورسعدی و همکاران [۱۴] تحلیل تخریب پره ردیف دوم توربین یک واحد گازی را انجام داده و علت تخریب را خستگی پرچرخه ناشی از وقوع پدیده رزونانس در پره تشخیص دادند.

در این پژوهش، سطح شکست دیسک ردیف دوم توربین گازی یک واحد ۳۲ مگاواتی در نیروگاه ری مورد بررسی ماکروسکوپی و میکروسکوپی قرار گرفته و به کمک آن، علت شکست دیسک، وقوع پدیده خزش در دمای بالا برای دیسک تشخیص داده شد. بر اساس یافته های این پژوهش، کمیته تحقیقات نیروگاه ری در نظر دارد که در آینده نزدیک، تحلیل های مکانیکی- متالورژیکی جامعی بر روی دیسک مذکور با هدف تخمین عمر باقیمانده برای واحدهای مشابه در نیروگاه ری انجام دهد، تا به کمک آن بتوان نسبت به جوان سازی دیسک ها (در صورت تشکیل نشدن ترک در آنها) و یا بازنشستگی آنها پیش از وقوع حادثه تصمیم گیری نمود.

## ۲- شرح حادثه و مشاهدات میدانی

توربین گازی واحد ۳۱ نیروگاه ری که از واحدهای مدل فیات (*TG ۲۰ B ۲*) می باشد، با توان اسمی ۳۲ مگاوات در حین کارکرد با بار پایه دچار سر و صدای غیرعادی و لرزش شدید شده و تریپ می کند. پس از بررسی های اولیه و بازکردن پوسته ها، مشاهده شد که روتور توربین از محل دیسک ردیف دوم دچار شکست شده و پره های متحرک و ثابت و سایر



شکل (۵): نمای کناری دیسک. شروع ترکها از یک محل بر روی ناحیه دم چلچله ای رخ داده و ترکها به صورت موازی رشد نموده اند.



شکل (۴): پره های روتور کمپرسور واحد حادثه دیده.

### ۳- تعیین جنس دیسک و مطالعه میکروسکوپیک سطح شکست

#### ۳-۱- تعیین جنس دیسک

به منظور تعیین جنس دیسک، قطعه ای از دیسک حادثه دیده جدا شده و مورد آزمایش کوانتومتری قرار گرفت. آنالیز شیمیایی جنس دیسک در جدول (۱) ارائه شده است. بر اساس درصد عناصر شیمیایی موجود در نمونه آزمایشی، جنس دیسک، فولاد آلیاژی  $20NiCrMoV$  تشخیص داده شد.

جدول (۱): نتایج آزمون کوانتومتری از نمونه دیسک توربین

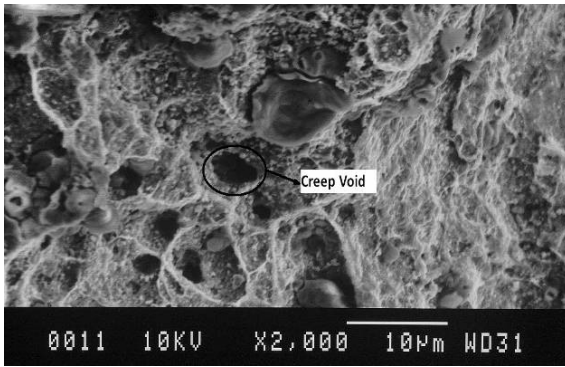
|    |        |    |         |    |         |
|----|--------|----|---------|----|---------|
| Fe | Base   | Al | ۰.۰۴۰۵  | As | ۰.۰۰۸۹  |
| C  | ۰.۲۷۱  | Co | ۰.۰۷۸۴  | Zr | ۰.۰۰۱۱  |
| Si | ۰.۰۶۳  | Cu | ۰.۱۰۷   | Ca | ۰.۰۰۰۷۶ |
| Mn | ۰.۲۵۵  | Nb | ۰.۰۰۰۲۵ | Sb | <۰.۰۰۰۵ |
| P  | ۰.۰۰۶۴ | Ti | ۰.۰۰۲۵  | Ta | ۰.۰۰۱۷  |
| S  | ۰.۰۰۷  | V  | ۰.۱۳۳   | B  | ۰.۰۰۱۴  |
| Cr | ۱.۸۲   | W  | ۰.۰۰۷۹  | Zn | ۰.۰۰۱۷  |
| Ni | ۲.۵۵   | Pb | ۰.۰۰۵۸  |    |         |
| Mo | ۰.۴۶۳  | Sn | ۰.۰۰۵۵  |    |         |

مشاهده چشمی (ماکروسکوپیک) سطح شکست دیسک که از محل شیار دم چلچله ای (اتصال پره های متحرک توربین به دیسک) رخ داده بود (شکل (۳) را ببینید)، نشان داد که ترک های بسیار ریز با توزیع نامنظم در سطح دیده می شود که این ریز ترک های نامنظم بر روی سطح شکست قطعه از خصوصیات ذاتی تخریب خزشی می باشد. بعلاوه، مشاهده از نمای کناری دیسک حادثه دیده نشان داد که هر دو محل شکستگی در پائین ترین شیار دم چلچله ای متصل به دیسک قرار داشته، شروع ترک ها از یک نقطه مشخص بر روی شیار بوده و مسیر رشد ترک ها و وقوع شکست نیز با یکدیگر موازی بوده اند (شکل (۵)). دلیل وقوع شکست از محل شیار پائینی را می توان بر اساس توزیع تنش ها در یک دیسک دوار توجیه کرد. مطابق با انتظار، به دلیل وجود تمرکز تنش در اطراف شیارها، این مکان ها مستعد برای جوانه زنی ترک ها می باشند. اما، دلیل شروع ترک از شیار پائینی این است که فاصله این شیار از مرکز دیسک نسبت به شیارهای بالایی (دندانه های دم چلچله ای) کمتر است، چرا که در یک دیسک دوار، هر قدر فاصله از مرکز دیسک بیشتر باشد، تنش محیطی (که تنش اصلی در دیسک است) کاهش می یابد. بدیهی است، به منظور تحلیل کمی توزیع تنش ها در دیسک می بایست تحلیل های اجزای محدود برای دیسک انجام گیرد. این مهم در یک پروژه تحقیقاتی در آینده نزدیک انجام خواهد شد.

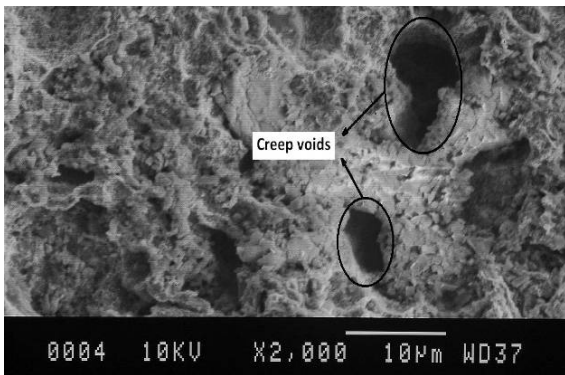
### ۳-۲- مطالعه میکروسکوپی سطح شکست

گرچه علائم ظاهری سطح شکست (مشاهدات ماکروسکوپی) و دمای بالای کاری دیسک ردیف دوم توربین حاکی از نقش غالب پدیده خزش دما بالا در تخریب دیسک بود، لیکن، به منظور صحت گذاری بر مشاهدات میدانی، مطالعه سطح شکست دیسک در مقیاس میکروسکوپی (شکست نگاری میکروسکوپی) ضروری است. بنابراین، نواحی شکست دیسک با دقت کافی از دیسک جدا شده و پس از تمیزکاری سطح قطعات جدا شده به کمک روشهایی از قبیل آلتراسونیک و غیره، تحت بررسی به روش میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) قرار گرفتند. شکل های (۶) تا (۹) تصاویر میکروسکوپ الکترونی گرفته شده از سطح شکست دیسک را نشان می دهند.

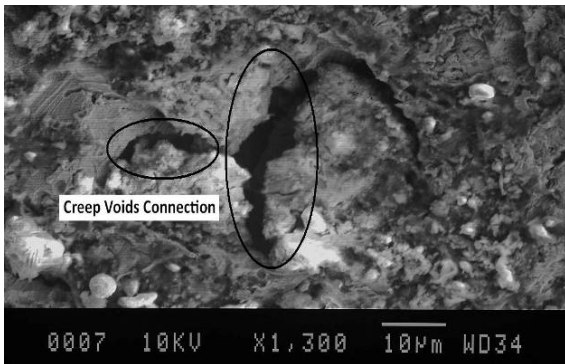
حفره های سیاه رنگ که در شکل (۶) ملاحظه می شوند، به وضوح بیانگر حفره های ایجاد شده در اثر پدیده خزش می باشند، چراکه شروع ترک ها در تخریب خزشی بر اثر تشکیل حفره های میکرونی در مرز دانه ها و اتصال آنها به یکدیگر صورت می گیرد. در شکل (۷) نیز حفره های مشابهی با اندازه های مختلف مشاهده می شوند. شکل (۸) نمایی واضح از اتصال حفره های خزشی در مرز دانه ها را نشان می دهد که این اتصال حفره ها در نهایت منجر به شکل گیری ترک های میکرونی شده و نهایتاً از اتصال این ترک های میکرونی به یکدیگر، ترک های ماکروسکوپی (قابل مشاهده با چشم) تشکیل شده و رشد ترک ها منجر به شکست نهایی قطعه می شود. شکل (۹) ایجاد ترک ناشی از خزش را در مرز دانه ها به وضوح نشان می دهد. همانطور که ملاحظه می شود، مرز دانه ها تقریباً موازی با یکدیگر می باشند، چرا که روش ساخت دیسک توربین به صورت فورج می باشد که در این روش، دانه ها در امتداد خاصی جهت گیری می نمایند.



شکل (۶): حفره های خزشی متعدد در سطح شکست دیسک.



شکل (۷): حفره های خزشی پراکنده در سطح شکست دیسک.



شکل (۸): حفره های خزشی متصل به هم در مرز دانه ها.

از مطالعه میکروسکوپی سطح شکست چنین نتیجه گیری می شود که در اثر پدیده خزش، حفره های میکرونی در مرز دانه ها تشکیل شده و از اتصال آنها به یکدیگر، ترک های میکرونی به وجود می آیند. از اتصال ترک های میکرونی در مرز دانه ها، ترک های میلیمتری حاصل شده و با رشد این ترک ها، دیسک توربین نهایتاً دچار شکست شده است.



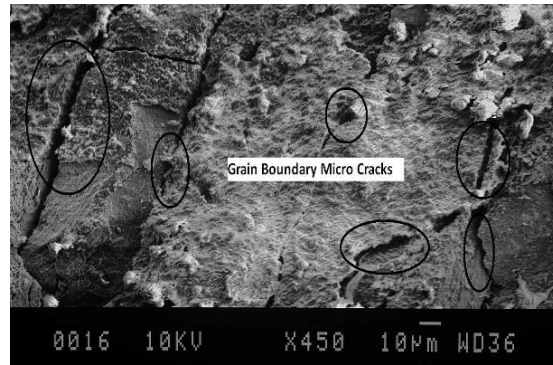
تعیین علت دقیق شکست دیسک، شکست نگاری میکروسکوپی به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) انجام گردید. نتایج شکست نگاری بیانگر ایفای نقش غالب پدیده خزش در تخریب دیسک بود. با توجه به اینکه عمر کارکرد واحدهای مشابه در نیروگاه ری بسیار زیاد بوده و حوادث مشابه دیگری از این نوع در نیروگاه ری و برخی دیگر از نیروگاه های کشور به وقوع پیوسته است، کمیته تحقیقات نیروگاه ری در حال تدوین یک پروژه تحقیقاتی با هدف محاسبه عمر باقیمانده برای واحدهای مشابه است تا به کمک نتایج این پروژه بتوان نسبت به ادامه بهره برداری از واحدها تا زمان معین، جوان سازی دیسک ها و عمردهی آنها و یا بازنشستگی دیسک و تعویض آن قبل از وقوع شکست تصمیم گیری نمود.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله مراتب تشکر و قدردانی خود را از مدیریت محترم عامل نیروگاه ری، جناب آقای مهندس شجاعی، معاونت محترم مهندسی و برنامه ریزی نیروگاه ری، جناب آقای مهندس سلطانی و مسئول ساخت داخل نیروگاه ری، جناب آقای مهندس غیائی پور به خاطر حمایت های همه جانبه مادی و معنوی ایشان از این پژوهش ابراز می دارند.

### مراجع

1. **Strandberg M., Fracture at V-notches with contained plasticity, Eng. Fract. Mech., ۶۹(۲۰۰۲) ۴۰۳-۱۵**
2. **Shin C.S., Smith R.A., Fatigue crack growth from sharp notches, Int. J. Fat., ۷(۱۹۸۵) ۸۷-۹۳**
3. **Lazzarin P., Tovo R., G. Meneghetti G., Fatigue crack initiation and propagation phases near notches in metals with low notch sensitivity, Int. J. Fat., ۱۹(۱۹۹۷) ۶۴۷-۵۷**
4. **Aratani M., Knott J.F., The growth of short fatigue cracks ahead of a notch**



شکل (۹): اتصال حفره های خزشی در مرز دانه ها و تشکیل ترک های میکرونی.

### ۴- نتیجه گیری

از آنجا که تعیین علت شکست یک قطعه، گامی ابتدایی و ضروری برای پیشگیری از رخداد های مشابه است، در این پژوهش، علت شکست دیسک ردیف دوم توربین یک واحد توربین گازی ۳۲ مگاواتی در نیروگاه ری مورد بررسی قرار گرفت. به طور کلی، تعیین علت شکست یک قطعه (از جمله دیسک توربین) با مجموعه ای از مطالعات میدانی، شکست نگاری میکروسکوپی و اطلاعات بهره برداری از قطعه صورت می گیرد. لذا، این سه عامل در فرآیند تعیین علت شکست دیسک توربین طی شده و نتیجه لازم بدست آمد. مطالعه میدانی نشان داد که شکست در دیسک از محل پائین ترین شیار دم چلچله ای رخ داده که بیانگر طبیعی بودن شکست است، چرا که انتظار می رود به دلیل وجود شیار و نزدیکی شیار حادثه دیده به مرکز دیسک، حداکثر تنش در این منطقه رخ دهد. بعلاوه، وقوع دو شکست در کنار یکدیگر و در دو شیار مشابه از یک ناحیه، بیانگر توزیع یکنواخت بار بر روی دیسک بود. اطلاعات بهره برداری از واحد نیز نشان داد که هیچگونه ارتعاش یا نشانه خاص دیگری در طول دوره بهره برداری که بیانگر توزیع غیر یکنواخت بار بر روی دیسک باشد، وجود نداشته است. دمای کاری دیسک در حالت کارکرد پایدار در محدوده ای قرار دارد که پدیده خزش در تخریب آن فعال است. دو مکانیزم تخریب برای دیسک متصور بود، یکی خستگی کم چرخه و دیگری خزش دما بالا. بنابراین، برای

۱۴. Poursaeidi E., Aieneravaie M., Mohammadi M.R., Failure analysis of a second stage blade in a gas turbine engine, *Eng. Fail. Anal.*, ۱۵ (۲۰۰۸) ۱۱۱۱-۱۲۹
۱۵. Ayatollahi M.R., Torabi A.R., A criterion for brittle fracture in U-notched components under mixed mode loading, *Eng. Fract. Mech.*, ۷۶ (۲۰۰۹) ۱۸۸۳-۹۶
۱۶. Ayatollahi M.R., Torabi A.R., Determination of mode II fracture toughness for U-shaped notches using Brazilian disc specimen, *Int. J. Solids Structs*, ۴۷(۲۰۱۰) ۴۵۴۳-۴۵
۱۷. Ayatollahi M.R., Torabi A.R., Brittle fracture in rounded-tip V-shaped notches, *Mater Design*, ۳۱(۲۰۱۰) ۶۰-۷
۱۸. Ayatollahi M.R., Torabi A.R., Investigation of mixed mode brittle fracture in rounded-tip V-notched components, *Eng. Fract. Mech.*, ۷۷(۲۰۱۰) ۲۰۸۷-۱۰۳
۱۹. Carter T.J., Common failures in gas turbine blades, *Eng. Fail. Anal.*, ۱۳(۲۰۰۵) ۲۳۷-۴۷
۲۰. Hou J., Wicks B.J., Antoniou R.A., An investigation of fatigue failures of turbine blades in a gas turbine engine by mechanical analysis, *Eng. Fail. Anal.*, ۹(۲۰۰۳) ۳۰۱-۱۱
۲۱. Khajavi M.R., Shariat M.H., Failure of first stage gas turbine blades, *Eng. Fail. Anal.*, ۱۱(۲۰۰۳) ۵۸۹-۹۷
۲۲. Kubiak J., Urquiza G., Rodriguez J.A., Gonzalez G., Rosales I., Castillo G., et al., Failure analysis of the ۱۵۰ MW gas turbine blades, *Eng. Fail. Anal.*, ۱۶(۲۰۰۹) ۱۷۹۳-۸۰۳
۲۳. Shlyannikov V.N., Ilchenko B.V., Stepanov N.V., Fracture analysis of turbine disks, computational-experimental background of the operational decisions, *Eng. Fail. Anal.*, ۸(۲۰۰۱) ۳۶۱-۷۵