



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مکانیک

بررسی عددی و تجربی شکست پره های توربین گاز نیروگاه برق هسا

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک
گرایش طراحی کاربردی

سیده نسیمه نوربخش نیا

استاد راهنما

دکتر سعید ضیایی راد

آذرماه ۱۳۸۶

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
هشت	فهرست مطالب
۱	چکیده
	فصل اول : مقدمه
۲	پیشگفتار
۳	۱-۱ مروری بر کارهای انجام شده
۸	۲-۱ گسترش ترک
۹	۳-۱ نگاهی به نیروگاه برق هسا
۱۱	۱-۳-۱ کمپرسور فشار قوی
۱۲	۲-۳-۱ تاریخچه موارد شکست در نیروگاه هسا
۱۵	۴-۱ نگاهی به فصل‌های این رساله
	فصل دوم: مکانیزم تخریب خستگی سوهشی
۱۶	۱-۲ مقدمه
۱۶	۲-۲ مشخصه‌های خستگی سوهشی
۱۸	۳-۲ آزمون‌های خستگی سوهشی
۲۰	۴-۲ خستگی سوهشی در آلیاژهای تیتانیوم
	فصل سوم: مکانیک شکست الاستیک
۲۳	۱-۳ طراحی بر اساس علم مکانیک شکست
۲۳	۲-۳ انواع شکست در اجسام
۲۴	۱-۲-۳ شکست در اثر ناپایداری الاستیکی

۲۴	۲-۲-۳ شکست در اثر ناپایداری پلاستیک
۲۴	۳-۲-۳ تغییر شکل پلاستیک و شکست در اثر عبور از نقطه تسلیم
۲۴	۴-۲-۳ شکست در اثر خستگی
۲۴	۵-۲-۳ خوردگی و خوردگی تنش
۲۵	۶-۲-۳ خزش
۲۵	۷-۲-۳ شکست ترد
۲۶	۳-۳ انواع ترک از نظر شکل
۲۶	۴-۳ شکست نرم و شکست ترد
۲۶	۴-۳-۱ شکست نرم
۲۷	۴-۳-۲ شکست ترد
۲۸	۵-۳ تحلیل الاستیک خطی اجسام ترک دار
۳۰	۶-۳ روش‌های تحلیل شکست
۳۰	۶-۳-۱ معیار انرژی
۳۱	۶-۳-۲ روش ضرایب شدت تنش
۳۱	۶-۳-۷ تابع تنش
۳۳	۷-۳-۱ تحلیل نوع I: بازشدگی
۳۵	۷-۳-۲ تحلیل نوع II: سرخوردن
۳۶	۷-۳-۳ تحلیل نوع III: پارگی
۳۷	۷-۳-۴ برهم‌گذاری ضرایب شدت تنش
۳۸	۷-۳-۵ اثر محدود بودن ابعاد
۳۸	۸-۳ روش‌های تعیین ضریب شدت تنش

۳۹	۳-۸-۱ توابع پتانسیل موسخلیشویلی
۳۹	۳-۸-۲ توابع تنش وسترگارد
۳۹	۳-۸-۳ توابع وزنی بوکنر
۴۰	۳-۸-۴ محاسبه ضرایب شدت تنش از ضرایب تمرکز تنش
۴۰	۳-۸-۵ روش اجزای محدود
۴۰	۳-۹ ارتباط شدت تنش با انرژی
۴۱	۳-۱۰ معیارهای شکست اجسام
۴۱	۳-۱۰-۱ معیار حداقل تراکم انرژی کرنشی
۴۲	۳-۱۰-۲ معیار حداکثر تنش اصلی
۴۴	۳-۱۰-۳ استفاده از انتگرال ل به عنوان معیار شکست
۴۵	۳-۱۱ تاثیر اندازه ضخامت جسم بر روی مقاومت شکست (K)
۴۶	۳-۱۲ استفاده از مفاهیم خرابی
۴۶	۳-۱۳ ترک در بارگذاری خستگی
۴۷	۳-۱۳-۱ مرحله اول رشد ترک
۴۷	۳-۱۳-۲ مرحله دوم رشد ترک
۴۸	۳-۱۴ نرخ رشد ترک خستگی
۴۸	۳-۱۴-۱ مفهوم تفرانس خرابی
۵۰	۳-۱۴-۲ استفاده از ضریب شدت تنش معادل
۵۱	۳-۱۴-۳ استفاده از مفاهیم دانسیته انرژی کرنشی
فصل چهارم: روش اجزای محدود در مکانیک شکست	
۵۲	۴-۱ روش تغییر مکان با استفاده از المانهای غیرمنفرد

۵۴	۲-۴ روش تنش با استفاده از المانهای غیر منفرد
۵۴	۳-۴ روش المانهای نوک ترک یا المانهای منفرد
۵۸	۴-۴ روش حل در نرم افزار اجزای محدود ANSYS
۶۳	۵-۴ تئوری نرم افزار ANSYS در محاسبه ضرایب شدت تنش

فصل پنجم: شبیه سازی ترک ناشی از خستگی سوهشی در ریشه پره کمپرسور فشار قوی

۶۶	۱-۵ مقدمه
۶۶	۲-۵ تخمین نیروی آبرو دینامیک
۶۸	۳-۵ شبیه سازی دو بعدی شرایط حاکم بر پره
۶۹	۳-۵-۱ آنالیز تنش استاتیکی
۷۳	۳-۵-۲ آنالیز تنش دینامیکی (خستگی)
۷۴	۳-۵-۳ آنالیز شکست پره
۷۸	۴-۵ شبیه سازی سه بعدی پره و دیسک
۷۸	۴-۵-۱ آنالیز تنش
۸۰	۴-۵-۲ آنالیز شکست

فصل ششم: نتایج و بحث

۸۵	۱-۶ نتایج تحلیل آبرو دینامیک ایرفویل پره
۸۷	۲-۶ نتایج آزمون های دو بعدی در نرم افزار Ansys
۸۷	۲-۶-۱ تحلیل تنش استاتیکی
۸۹	۲-۶-۲ آنالیز خستگی پره
۹۱	۲-۶-۳ آنالیز رشد ترک خستگی
۹۳	۳-۶ نتایج تحلیل سه بعدی پره

۹۳	۱-۳-۶ تحلیل تنش استاتیکی
۹۴	۲-۳-۶ نتایج تحلیل شکست پره
۱۰۳	۴-۶ نتایج آزمایشات متالورژیکی انجام شده بر روی پره
۱۰۸	۵-۶ جمع بندی و نتیجه گیری
۱۱۲	مراجع

چکیده

رساله حاضر مربوط به پروژه "بررسی علل شکست پره های کمپرسور فشار قوی توربین گازی نیروگاه برق هسا" می باشد که پس از بروز شکست های متوالی پره های توربین های گاز نیروگاه، تعریف و انجام شد. از آنجا که آخرین موارد شکست متعلق به ردیف نهم کمپرسور بوده و اطلاعات بیشتری از جمله پره های شکسته شده ردیف نهم در دست بود، پروژه حاضر بر روی پره های ردیف نهم از جنس آلیاژ Ti-6Al-4V متمرکز شده است.

جهت بررسی نیرویی پدیده شکست این پره ها از روش المان محدود و نرم افزار ANSYS استفاده گردید. در این بررسی ابتدا به تحلیل تنش دوبعدی و سه بعدی مجموعه پره و دیسک تحت نیروهای تماسی لبه تماس پره و دیسک، نیروی آیرودینامیک و گریز از مرکز پرداخته شد. در هر دو حالت، تمرکز تنش شدیدی در لبه تماس پره و دیسک مشاهده گردید که حاکی از جوانه زنی ترک در این محل است. لازم به ذکر است در این تحلیل نیروهای تماسی بین پره و دیسک نقش اساسی را در ایجاد تمرکز تنش لبه تماسی ایفا می کنند. علاوه بر این، توزیع تنش در هندسه ریشه ترک دار سه بعدی حضور تمرکز تنش شدید در طول پیشانی ترک را نشان داد. مقادیر عددی تنش در طول پیشانی ترک بیشتر از حد آستانه خستگی سوهشی برای آلیاژ Ti-6Al-4V بود که این پدیده، رشد ترک خستگی ایجاد شده در لبه تماس را تایید می کند. علاوه بر این مقادیر فاکتور شدت تنش در حالت سه بعدی نیز در طول پیشانی ترک های مختلف محاسبه شد. این مقادیر نشان دهنده آن هستند که اگرچه هر سه مود کششی، برشی و پارگی در شکست پره های ترک دار موثرند اما مود اول نسبت به مود دوم و سوم به مراتب قوی تر است و نقش اصلی را در شکست پره ها بر عهده دارد. در مرحله دیگر سطوح مقاطع شکست پره های ترک خورده مورد بررسی های مختلف متالورژیکی قرار گرفت. بر طبق این بررسی ها نقطه جوانه زنی ترک، نقطه ای واقع بر لبه تماس ریشه پره با دیسک و مکانیزم آن مکانیزم خستگی سوهشی تشخیص داده شد. این نقاط، همان متناظر با نقاط دارای تمرکز تنش در شبیه سازی های عددی بودند. بر این اساس پیش بینی های شکست تحلیل المان محدود با نتایج آزمایشات متالورژیکی تطابق خوبی داشته و آن ها را تایید می کند.

فصل اول

مقدمه

پیشگفتار

پدیده شکست در اجسام یکی از عمده‌ترین مسائلی است که انسان از زمان شناخت ساده‌ترین ابزار با آن روبرو بوده است و به دلیل پیشرفت تکنولوژی در عصر حاضر از اهمیت بیشتری نسبت به گذشته برخوردار می‌باشد. هر ساله صنایع مختلف، خسارات مالی و حتی انسانی گوناگونی را به دلیل شکست قطعات خود متحمل می‌شوند که در این میان می‌توان به شکست پره‌های توربین‌های گازی نیروگاه‌های برق اشاره نمود.

پس از شکست یک پره که عمدتاً با جوانه‌زنی یک یا چند ترک کوچک در ریشه دم چلچله‌ای¹ آن آغاز می‌شود، پره فوق در محفظه توربین رها شده و پس از برخورد به سایر پره‌های همان مرحله و یا دیگر مراحل توربین، باعث شکست آن‌ها و در نهایت متوقف شدن کار واحد تولید برق می‌شود. جهت راه‌اندازی مجدد واحد مربوطه لازم است کل توربین، باز شده و کلیه پره‌های معیوب با نمونه‌های سالم تعویض گردد که این امر، مستلزم صرف هزینه بالا و زمان زیاد می‌باشد.

از آنجا که شکست ناشی از ایجاد ترک در ریشه دم چلچله‌ای پره‌ها، رایج‌ترین نوع شکست نه تنها در نیروگاه‌های برق، بلکه در کلیه صنایع هوایی است این مسئله از اهمیت و حساسیت خاصی برخوردار بوده و تا کنون تحقیقات مختلفی بر روی آن صورت گرفته است.

¹ dovetail

بر طبق مطالعات مکانیکی و متالورژیکی انجام شده، شکست پره‌های توربین‌های گازی دارای علل گوناگونی است که رایج‌ترین آن‌ها شکست در اثر خستگی سوهشی^۱ شناخته شده است. این مکانیزم در شرایطی حاکم است که دو سطح در تماس با یکدیگر در معرض جابجائی نسبی بسیار کم (معمولاً کمتر از ۵۰ میکرون) و شرایط بارگذاری نوسانی قرار دارند.

اگرچه تا کنون مطالعات متالورژیکی زیادی در زمینه پدیده خستگی سوهشی در محل تماس بین دیسک و ریشه پره‌های توربین صورت گرفته است، در زمینه شبیه‌سازی مکانیکی این پدیده و بررسی نیرویی علل شکست، کارهای کمتری انجام شده و هنوز نیز مستلزم تحقیقات بیشتر می‌باشد.

۱-۱- مروری بر کارهای انجام شده

در سال ۱۹۸۵، بادینگتون^[۱] روش المان محدود دوعدی را برای بررسی شرایط تنشی یک اتصال دم‌چلچله‌ای به کار گرفت. سپس کنی^[۲] در سال ۱۹۹۱ از یک روش تحلیل تنش عددی-فوتوالاستیک دوعدی برای بررسی شرایط نیرویی اتصالات دم‌چلچله‌ای استفاده کرد. در سال ۱۹۹۸، پاپانیکوس^۴ و همکارانش^[۳] یک تحلیل المان محدود غیرخطی سه‌بعدی برای اتصالات دم‌چلچله‌ای پره-دیسک در موتورهای هواپیما انجام دادند و در آن به عامل اصطکاک در محل تماس توجه نمودند. در سال ۲۰۰۰ جیانفو هو^۵ و همکارانش^[۴] به بررسی شکست پره‌های توربین گاز پرداختند. آن‌ها در تحقیق خود از روش المان محدود غیر خطی جهت تعیین علل احتمالی شکست استفاده کردند. استفان ایسلر^۶ و ابرهارد روس^[۵] در سال ۲۰۰۲، جهت بررسی شکست خستگی و خزش در اتصالات پره و دیسک از آنالیز المان محدود غیر الاستیک استفاده کردند.

در سال ۲۰۰۳، خواجوی^۸ و شریعت^[۶] انواع مختلف خوردگی‌های پره‌های توربین گاز را مورد مطالعه قرار دادند و به عنوان نمونه، پره‌های مرحله اول توربین گاز GE-F5 را تحلیل نمودند. در سال ۲۰۰۴، مازور^{۱۰} و همکارانش^[۷] به بررسی شکست پره مرحله اول توربین گاز ۷۰ MW از جنس آلیاژ نیکل پرداخته و در تحلیل خود به هر دو جنبه متالورژیکی و مکانیکی توجه کردند. پس از آن در سال ۲۰۰۴، کارتر^[۸] به بررسی شکست‌های مکانیکی، شکست در دماهای بالا، شکست خزش و خستگی و شکست ناشی از خوردگی پره‌های توربین گاز پرداخت. جف کلکتر^{۱۲} و سمیر نابولسی^[۹] در سال ۲۰۰۵، پدیده سایش ناشی از تماس بین ریشه پره و دیسک توربین‌ها را مورد بررسی قرار دادند و به منظور تحقیق درستی نتایج آزمایشات تجربی خود به تحلیل نیرویی یک مدل دو بعدی با استفاده از روش المان محدود و نرم‌افزار ANSYS پرداختند. در این تحلیل جنس پره و دیسک به ترتیب از آلیاژ TI-6AL-4V و آلیاژ

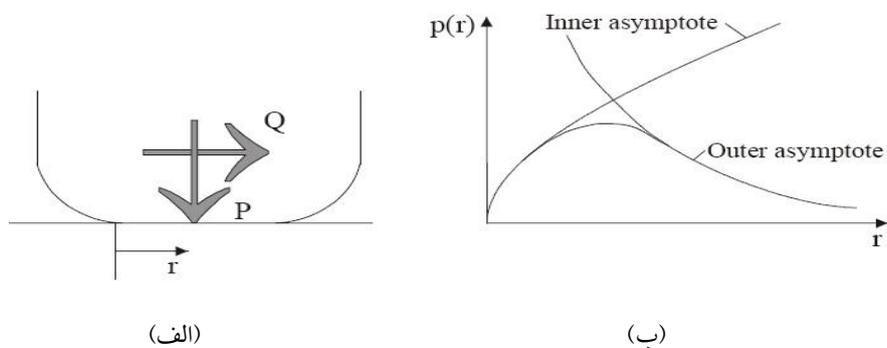
1 Fretting Fatigue
2-Boddington
3 Kenny
4 Papanikos
5 Jianfu Hou
6 Stephan Issler
7 Eberhard Roos
8 Khajavi
9 Shariat
10 Mazur
11 Carter
12 Jeff Calcaterra
13 Samir Nabolsi

فولاد و مدل ماده، الاستیک انتخاب شده است لازم به ذکر است که در این تحلیل هیچ گونه اثر حرارتی لحاظ نشده و نتایج شبیه‌سازی تطابق خوبی با نتایج تجربی دارد. در تحقیقی دیگر در سال ۲۰۰۵، ناول^[۱۰] به بررسی اهمیت اندازه تماس و مقایسه بین خستگی سوهشی و خستگی در شیارها پرداخت و به نتایج زیر رسید:

۱- در محل تماس بین دیسک و پره، تمرکز و گرادین‌های تنش شدیدی وجود دارد که مقادیر آنها در مقایسه با شیارها و سوراخ‌ها به میزان زیادی بیشتر است.

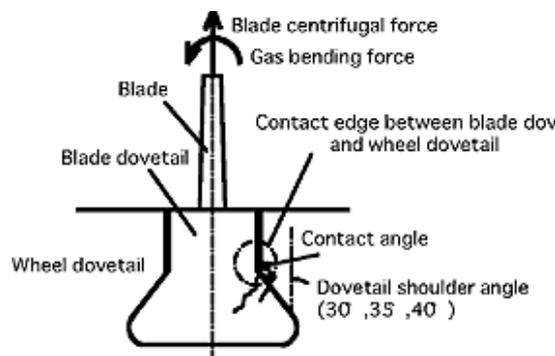
۲- چنانچه بارهای خارجی با نسبت‌های مشخص تغییر داده شوند، نیروهای تماسی با همان نسبت تغییر نمی‌کنند که این امر به طبیعت غیر خطی بودن اصطکاک برمی‌گردد.

شکل ۱-۱ الف و ۱-۱ ب که توسط ناول ارائه شده‌اند به ترتیب وضعیت تماس در ریشه دم چلچله‌ای پره و دیسک و نمودار فشار در لبه تماس بر حسب r را نشان می‌دهند.

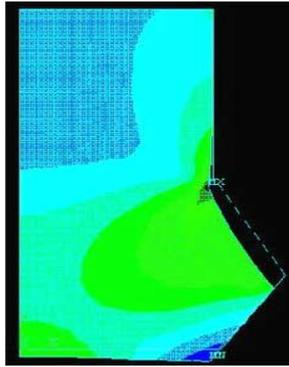


شکل ۱-۱ الف) شمای وضعیت تماس در ریشه دم چلچله‌ای پره و دیسک، ب) نمودار فشار در لبه تماس بر حسب r [۱۰]

در همان سال، یوشیمورا^۲ و همکارانش [۱۱] به بررسی پدیده خستگی سوهشی در ناحیه ریشه دم چلچله‌ای موتور هواپیما هواپیما از جنس آلیاژ Ti-6Al-4V پرداختند و در نتایج شبیه‌سازی خود تمرکز تنش در لبه تماس را مشاهده کردند. شکل ۲-۱ شرایط تست خستگی آنها و شکل ۳-۱ تمرکز تنش در لبه تماس را نشان می‌دهد.

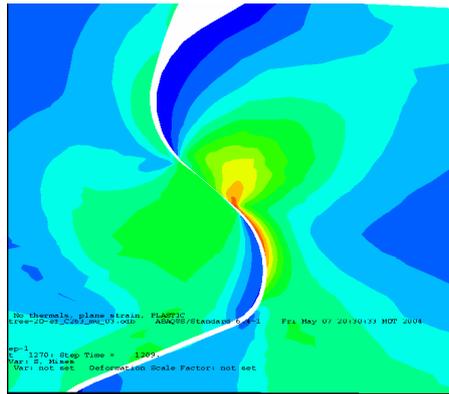


شکل ۲-۱ شرایط تست خستگی برای ریشه پره در آزمایش یوشیمورا و همکارانش [۱۱]

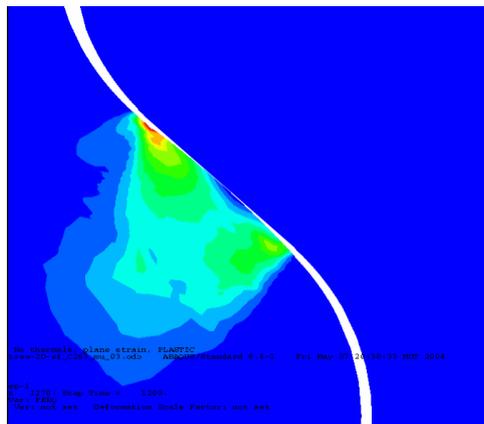


شکل ۱-۳- تمرکز تنش در ریشه پره [۱۱]

آریتا^۱ و همکارانش [۱۲] در تحقیقی دیگر در سال ۲۰۰۵ به بررسی فاکتورهای موثر بر آسیب ناشی از خستگی سوهشی در مجموعه دیسک و پره‌های توربین گاز پرداختند و با استفاده از روش آنالیز المان محدود دو بعدی، تماس بین دیسک و پره را به عنوان مهمترین عامل ایجاد خستگی سوهشی بررسی کردند. در این مطالعات، توجه ویژه‌ای بر خصوصیات ماده پره و عکس العمل سطح (ضریب اصطکاک و شرایط تماس) مبذول شد و در نهایت جهت پیش‌بینی شکست، از معیارهای خستگی چند محوری دانگ وان^۲ و همکارانش استفاده گردید. پره و دیسک مورد بررسی آن‌ها هر دو از آلیاژ آلایژ نیکل ساخته شده بودند. ماده دیسک، آلیاژی با استحکام بسیار بالا بود. در حالی که ماده پره، حد شکست بسیار پایین‌تری داشت. در این تحلیل، یک مدل المان محدود دوبعدی جهت به دست آوردن توزیع تنش و کرنش در ناحیه اطراف محل تماس بین دیسک و پره مورد استفاده قرار گرفته و در آن از وضعیت کرنش صفحه‌ای جهت تحلیل استفاده شده است. با توجه به هندسه و بارگذاری متقارن، تنها نیمی از پره و دیسک شبیه‌سازی شده اند. جهت بررسی تأثیر ضریب اصطکاک بر عمر خستگی سوهشی، محاسبات با مقادیر مختلف ضریب اصطکاک در محدوده ۰ تا ۰/۹ انجام شده است. شکل ۱-۴ توزیع تنش در لبه تماسی مجموعه را به ازای ضریب اصطکاک ۰/۳ نشان می‌دهد. به وضوح مشخص است که بیشترین تمرکز تنش این ناحیه در لبه تماس است. توزیع تغییر شکل پلاستیک نیز در شکل ۱-۵ مشاهده می‌شود. روشن است که در اینجا هم بزرگترین مقدار کرنش پلاستیک در محل تماس است.

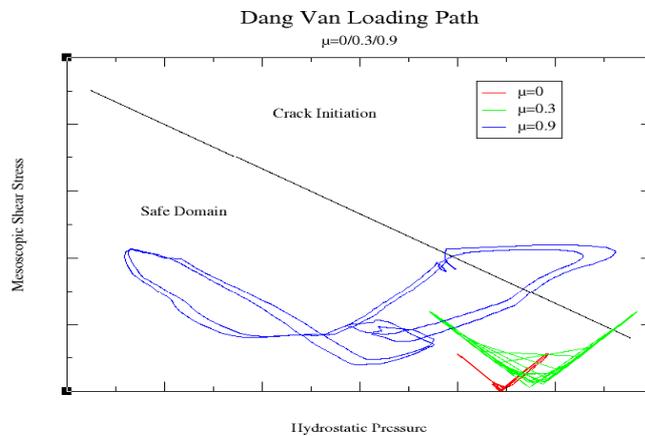


شکل ۴-۱ توزیع تنش در محل تماس دیسک و ریشه پره [۱۲]

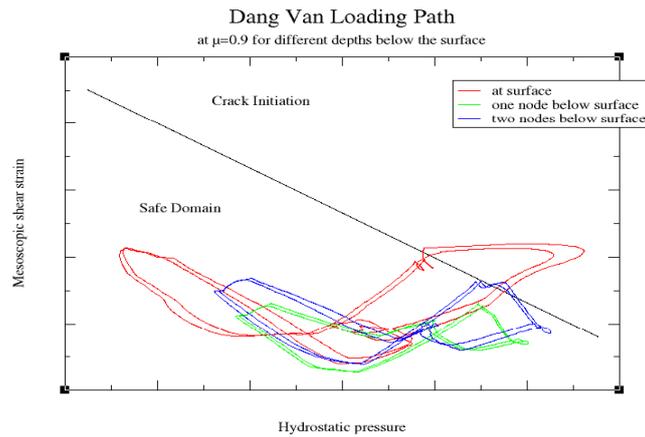


شکل ۵-۱ توزیع تغییر شکل پلاستیک [۱۲]

شکل ۶-۱ مسیرهای بارگذاری دانگ وان را روی موقعیت‌های بحرانی دیسک برای مقادیر μ بین صفر تا 0.9 نشان می‌دهد. واضح است که به ازای $\mu = 0$ هیچ شروع ترکی نخواهیم داشت. نمودار فوق برای حالتی که عمق عمود بر سطح نیز در نظر گرفته شود، بسط داده شده و در شکل ۷-۱ آمده است. موقعیت‌های بحرانی مشخص شده با معیار دانگ وان، روی لبه انتهایی تماس قرار گرفته است.

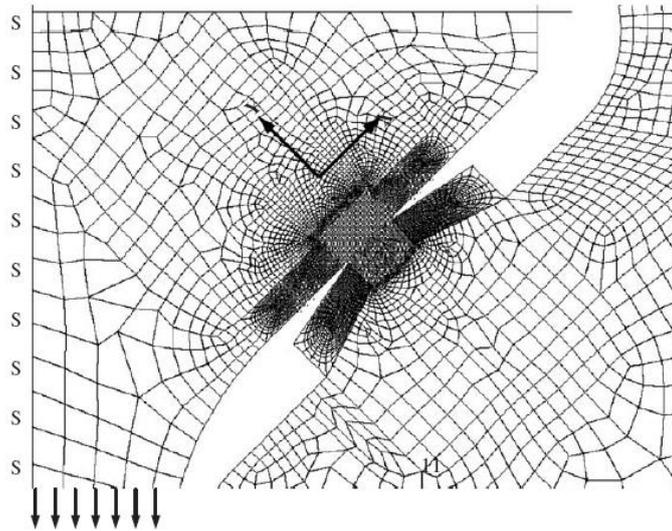


شکل ۶-۱ معیار دانگ وان برای پیش-بینی شروع ترک [۱۲]



شکل ۱-۷ خط دانگ وان برای عمق‌های مختلف [۱۲]

اخیراً در سال ۲۰۰۶ گولدن^۱ و کلکتر^۲ [۱۳] نیز به بررسی پدیده خستگی سوهشی برای آلیاژ Ti6Al4V پرداختند. آنها در مطالعات خود پس از برآورد نیروهای تماسی وارد بر قطعه با استفاده از روش المان محدود و محاسبه فاکتور شدت تنش در لبه تماسی، رشد یک ترک کوچک صفحه‌ای فرضی را بررسی کردند. این تحلیل با استفاده از نرم‌افزار ANSYS، به صورت کرنش صفحه‌ای و با المان‌های ۴ گره‌ای و نیز المان‌های تماسی سطح به سطح شبیه‌سازی شده است (شکل ۱-۸). در اطراف محل تماس از مش ریز تری استفاده شده و شرایط مرزی بر روی خط مرکزی قطعه و فیکسچر به صورت متقارن است. فیکسچر ثابت است و قطعه از قسمت پایینی تحت نیروی متناوب قرار دارد. ضریب اصطکاک μ استفاده شده در تحلیل، مقدار لغزشی حالت پایدار و در محدوده بین ۰/۱۶ و ۰/۳۴ است که این اعداد از مشاهدات تجربی به دست آمده‌اند و البته ممکن است مقدار μ به صورت موضعی و در محل لغزش خیلی بیشتر از این مقدار استفاده شده باشد. بر روی مدل دو چگالی شبکه بندی المان تماسی وجود دارد: شبکه درشت شامل المان‌هایی با طول $40\mu\text{m}$ و تعداد ۳۵ المان و شبکه ریز، شامل ۱۳۳ المان و با طول حدود $10\mu\text{m}$ است. در این تحلیل نیز پس از محاسبه فشار و تنش برشی در طول خط تماس، به پیش‌بینی عمر پرداخته شده است.



شکل ۸-۱ شبکه بندی المان محدود در ناحیه تماس

۲-۱ گسترش ترک

مازور و همکارانش در تحقیقات خود، از رابطه ۱-۱ که به رابطه پاریس معروف است جهت پیش بینی نرخ گسترش ترک استفاده کردند [۱۴]

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \text{ (mm/cycle)} \quad (1-1)$$

جهت شبیه سازی اندازه و جهت رشد ترک ناشی از خستگی نیز تا کنون معیارهای گوناگونی ارائه شده اند. در سال ۱۹۶۳، اردوگان^۱ و سیه^۲ [۱۵] معیار تنش مماسی ماکزیمم را برای مودهای شکست اول و دوم ارائه کردند. بر طبق این معیار ترک در جهتی عمود بر جهت ماکزیمم تنش مماسی رشد خواهد کرد. پس از آن در سال ۱۹۷۴ سیه [۱۶]، معیار چگالی انرژی کرنشی برای مود اول و دوم را پیشنهاد داد. بر طبق این معیار ترک در جهتی رشد می کند که در آن چگالی انرژی کرنشی کمترین مقدار است، این معیار انطباق خوبی با نتایج آزمایش موادی مانند آلومینیم دارد.

در سال ۱۹۷۴ هوسین^۳ و همکارانش [۱۷] معیار نرخ آزادسازی انرژی برای مود اول و دوم را ارائه کردند. آنها یک عبارت به عنوان نرخ آزادسازی انرژی به دست آوردند که بر پایه یک روش الاستیسیته قوی بود.

در سال ۱۹۹۶ تانگ^۴ و همکارانش [۱۸] حد خستگی در مودهای شکست اول تا سوم را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که عیوب اولیه مانند v-notch و pre-crack بر روی حد آستانه خستگی ماده تاثیر می گذارد. پس از آن در سال ۱۹۹۶ یاتس^۵ و محمد^۶ [۱۹] روشی برای پیش بینی نرخ رشد ترک خستگی تحت شرایط بارگذاری مودهای اول و سوم ارائه کردند. روش آنها بر اطلاعات نرخ رشد ترک مود اول، حد رشد ترک خستگی مود اول، مدل حد خستگی

1 Erdogan F
2 Sih GC
3 Hussain MA
4 Tong J
5 Yates JR
6 Mohammed RA

مود ترکیبی و فاکتورهای شدت تنش مودهای ترکیبی استوار بود. در سال ۱۹۹۷ هسای^۱ و همکارانش [۲۰] به مطالعه در مورد اثر اصطکاک بر رفتار شکست در مود ترکیبی اول و سوم پرداختند. در سال ۲۰۰۱ سوه^۲ [۲۱] با استفاده از مرز الاستو پلاستیک فون میز معیار تنش مماسی ماکزیمم و فاکتور انرژی کرنشی را اصلاح نمود. نتیجه این اصلاحات تطابق بهتر پیش‌بینی‌های معیار جدید با نتایج آزمایشات را به دنبال داشت. در همین سال بینر^۳ [۲۲] معیار تنش مماسی ماکزیمم و چگالی انرژی کرنشی را برای بررسی جهت رشد ترک و مقایسه با داده‌های آزمایش به کار گرفت. در سال ۲۰۰۲ نالا^۴ و همکارانش [۲۳] حدود خستگی برای حالت مود ترکیبی آلیاژ Ti-6Al-4V را ارائه کردند. آنها حدود خستگی مود اول و دوم را برای نسبت تنش‌های مختلف و ترک‌های کوچک و بزرگ بررسی کردند. لازم به ذکر است که اگرچه معیارهای فوق تا حدی قادر به پیش‌بینی رفتار شکست ماده هستند اما هنوز یک معیار مناسب برای حالت ترکیبی سه مود ماده در دست نیست [۲۴].

۱-۳- نگاه به نیروگاه برق هسا

نیروگاه برق هسا توان تولیدی ۳۶,۴ MVA الکتريسته را دارد و مجهز به سیستم کنترل، چرخ دنده راه انداز^۵ و تجهیزات کمکی می باشد. توربین گاز شامل یک تولید کننده گاز است که گازهای داغ را تولید و یک توربین آزاد که انرژی گازهای داغ را به انرژی مکانیکی تبدیل می نماید.

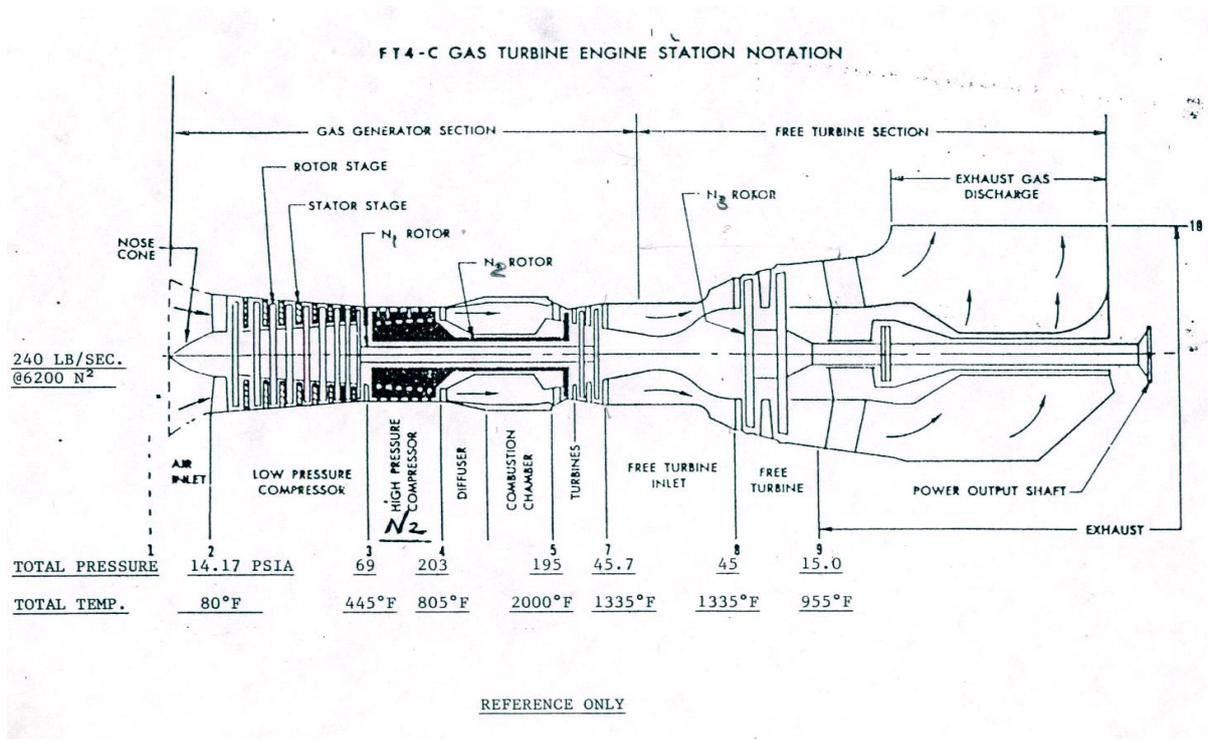
بخش‌های اصلی واحد تولید برق عبارتند از:

ژنراتور گازی، توربین آزاد، محرک کمکی گیربکس، کمپرسور فشار ضعیف، کمپرسور فشار قوی، محفظه احتراق، بخش توربین و محفظه خروجی. تصویر واقعی این ژنراتور گازی و توربین آزاد آن در شکل ۱-۹-الف و شمای بخش‌های مختلف آن به همراه آگروز توربین در شکل ۱-۹-ب نشان داده شده اند.

1 Hsai KJ
2 Suh AK
3 Biner SB
4 Nalla RK
5 Switch gear



شکل ۱-۹-الف تصویر واقعی توربین گازی نیروگاه هسا شامل بخشهای ژنراتور و توربین آزاد



شکل ۱-۹-ب شمای کلی توربین گازی نیروگاه هسا شامل بخش های ژنراتور و توربین آزاد

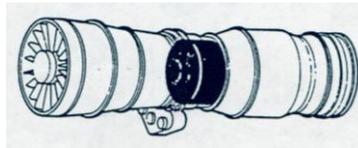
کلیه شکست‌های گزارش شده در پره‌های توربین گاز این نیروگاه، متعلق به پره‌های بخش کمپرسور فشار قوی آن بوده‌اند. از این رو در ادامه، مروری اجمالی بر کمپرسور فشار قوی نیروگاه شده است.

۱-۳-۱ کمپرسور فشار قوی

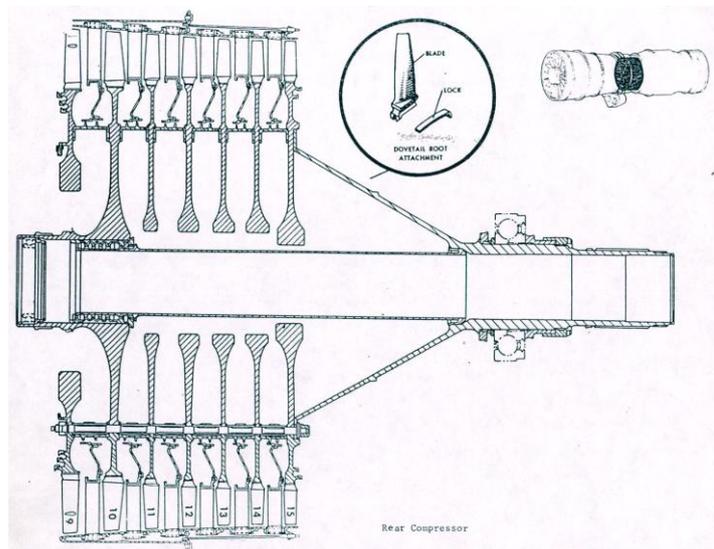
کمپرسور فشار قوی^۱ (HP) یک کمپرسور جریان محوری با ۷ مرحله است که روتور آن به پره های ردیف اول توربین متصل بوده و توسط توربین فشار قوی به حرکت در آورده می شود. سرعت کمپرسور تابعی از افت فشار در طول توربین فشار بالاست. سرعت این کمپرسور به میزان قابل ملاحظه ای بالاتر از سرعت کمپرسور فشار کم است و قسمتهای اصلی آن عبارتند از: محفظه دیفیوزر، ۷ ردیف پره متحرک و متعلقات دیسک، ۶ ردیف پره ثابت (استاتور) و یک مجموعه استاتور مرحله ۱۵ که درون محفظه دیفیوزر مونتاژ شده اند. علاوه بر این، در محفظه دیفیوزر مجموعه راهگاههای سوخت و برینگهایی که کمپرسور فشار قوی را نگاه می دارند، قرار داده شده است.

کمپرسور فشار قوی، هوا را از کمپرسور فشار ضعیف گرفته و مجدداً متراکم می کند. هوای خروجی از کمپرسور فشار قوی، از استاتور پانزدهم درون محفظه دیفیوزر گذشته و سپس وارد محفظه احتراق و در آنجا با سوختی که از راهگاههای چندگانه برای احتراق آورده می شود ترکیب می گردد.

شکل ۱-۱۰ موقعیت و نمای بیرونی کمپرسور فشار قوی را بر روی مجموعه توربین گازی و شکل ۱-۱۱ نمای درونی این کمپرسور را نشان می دهد.

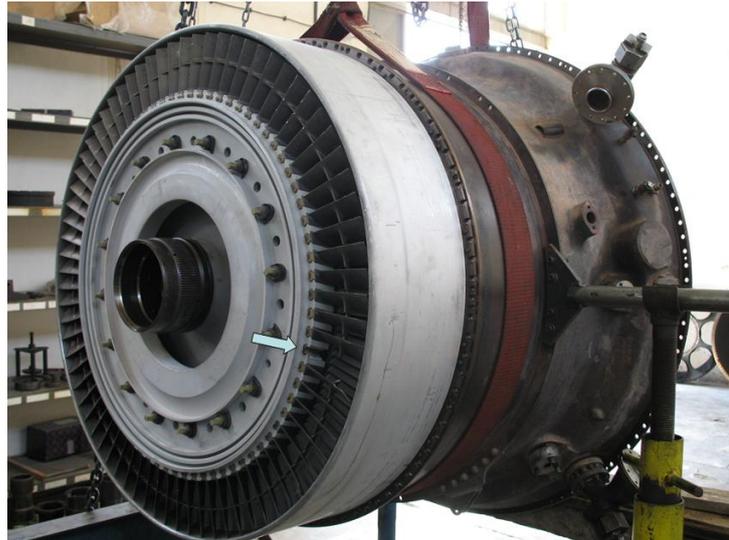


شکل ۱-۱۰ نمای بیرونی کمپرسور فشار قوی



شکل ۱-۱۱ نمای برش خورده داخلی کمپرسور فشار قوی

تصویر کمپرسور فشار قوی یکی از توربین های نیروگاه در مرحله اورهال در شکل (۱-۱۲) آمده است. پره شکسته شده در تصویر به فلش مشخص شده است.



شکل ۱-۱۲ تصویر کمپرسور فشار قوی یکی از توربین های گازی نیروگاه هسا در مرحله اورهال. ریشه بر جای مانده پره شکسته شده ردیف نهم با فلش مشخص شده است

۱-۳-۲- تاریخچه موارد شکست در نیروگاه هسا

در مجموع پنج مورد شکست زود هنگام در ناحیه پرفشار کمپرسور توربینهای گازی نیروگاه هسا رخ داده است که به طور خلاصه در جدول ۱-۱ آورده شده اند. اطلاعات فوق از بررسی کلیه فرمهای بهره برداری واحدهای مختلف نیروگاه در محدوده زمانی سالهای ۱۳۷۶ تاکنون و برای توربینهای واحدهای مختلف تهیه شده است. همچنانکه دیده می شود ساعت کاری معادل اندازه گیری شده در هر مورد شکست، بسیار کمتر از اندازه آن در طراحی یعنی معادل ۲۵۰۰۰ ساعت است که این امر مؤید زودرس بودن تخریب ها می باشد. بنا به گزارشات مکتوب در نیروگاه، قبل از هر تخریب صداهای غیر عادی و ارتعاشات نسبتاً شدید گزارش شده اند که پس از بررسی های انجام شده، علت آنها را شدن پره شکسته شده در محفظه توربین و برخورد آن به سایر پره ها شناخته شده است.

جدول ۱-۱: اطلاعات مربوط به رخداد های شکست زودرس پره های کمپرسور در نیروگاه هسا.

ردیف	تاریخ وقوع	واحد	ناحیه شکست	تعداد استارت موفق	کل ساعات معادل کارکرد
۱	۷۶/۱/۲۳	۲	ردیف دوازدهم	۱۳۴۲	۴۷۷۵
۲	۷۶/۱۲/۱۸	۳	ردیف نهم	۱۳۲۳	۴۶۹۸
۳	۸۱/۱۱/۵	۳	ردیف دهم	۱۹۸۷	۶۵۶۹
۴	۸۴/۱۲/۲۴	۱	ردیف نهم	۱۷۸۰	۷۶۵۳
۵	۸۵/۲/۳۰	۱	ردیف نهم	۱۳۵۹	۷۶۶۹

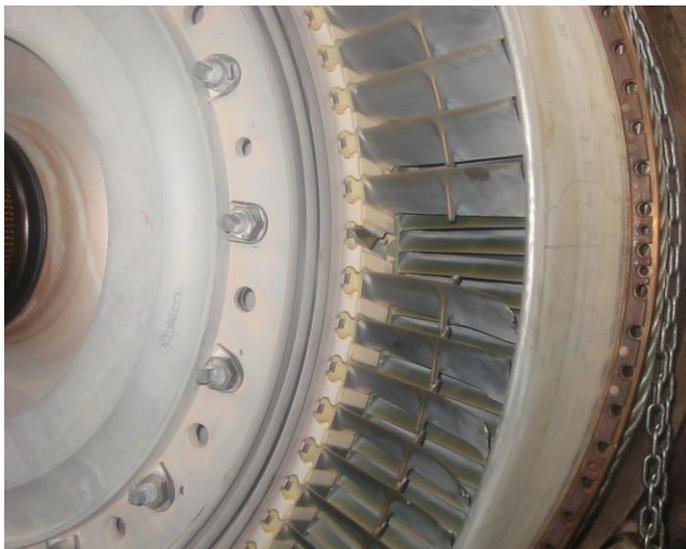
شکل ۱۳-۱ نمونه هایی از پره های تخریب شده در اثر برخورد پره شکسته شده با آنها در دومین شکست گزارش شده را نشان می دهد. شکل ۱۴-۱ به شکست سوم و شکل های ۱۵-۱ تا ۱۷-۱ به چهارمین شکست اتفاق افتاده در کمپرسور فشارقوی مربوط هستند.



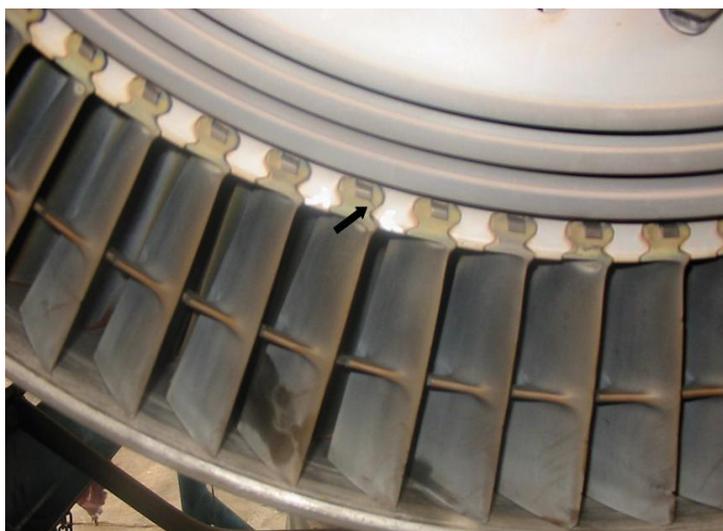
شکل ۱۳-۱ پره های تخریب شده ردیف نهم کمپرسور HP در شکست دوم.



شکل ۱۴-۱ ردیف دهم کمپرسور HP در شکست سوم



شکل ۱-۱۵ بخشی از ردیف نهم کمپرسور شامل ریشه پره به جای مانده در دیسک در شکست چهارم.



شکل ۱-۱۶ بخشی از ردیف نهم کمپرسور شامل پره ترک خورده در شکست چهارم. ترک موجود در ریشه با فلش مشکی رنگ مشخص شده است.