

اثر برداشتن ترک‌ها با ماشین کاری بر ضریب اطمینان روتورهای ترک‌دار توربین

سید ابراهیم موسوی ترشیزی

امیررضا مرتضی پور

دانشیار دانشکده مکانیک و انرژی

دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک

دانشگاه شهید بهشتی

دانشگاه شهید بهشتی

پردیس شهید عباسپور

پردیس شهید عباسپور

چکیده

یکی از بزرگترین معضلات در نیروگاه‌های کشور تصمیم‌گیری در خصوص بازنشسته کردن و یا ادامه‌ی بهره‌برداری از روتورهای ترک‌دار نیروگاهی می‌باشد. در صورت پیشروی این ترک‌ها و رسیدن به وضعیت بحرانی به دلیل سرعت دوران زیاد و وزن این روتور‌ها، ترک به صورت کنترل نشده رشد نموده و شکست نهایی به وقوع می‌پیوندد و موجب وقوع خسارات جانی و مالی هنگفتی می‌گردد. با توجه به این که اندازه‌گیری دقیق عمق ترک‌ها به راحتی میسر نیست، ادامه بهره‌برداری از این روتورهای ترک‌دار غیر مطمئن و در مواردی بسیار خطرناک می‌باشد ولی با انجام عملیات برداشتن ترک با تراشکاری:

- ضریب اطمینان روتور نسبت به حالت ترک‌دار افزایش می‌یابد.

- تمرکز تنش در محل ترک کم می‌شود.

- ضریب شدت تنش در انتهای ترک کاسته می‌شود و به همین دلیل سرعت پیشرفت ترک کم می‌شود.

از این رو می‌توان مدت زمان بهره‌برداری از روتور را افزایش می‌یابد. در این پژوهش حذف ترک‌ها با ماشین‌کاری روی روتور یک توربین ترک‌دار نیروگاه بخار به ازای عمق ترک‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با ماشین‌کاری و برداشتن ترک روتور واقع در حدفاصل چرخ کورتیس و دیسک مجاور می‌توان با ضریب اطمینان ایمن از روتور توربین استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: "روتور"، "ترک"، "کاهش قطر"، "ضریب اطمینان"

۱- مقدمه

را به تعویق بیندازند. تصمیم‌گیری در خصوص وضعیت این تجهیزات ترک‌دار نیازمند بررسی قسمت‌های بحرانی و مطابقت دادن با استانداردهای موجود می‌باشد. اکثر اجزا و تجهیزات مهم و حیاتی صنایع تولید برق ایران همانند روتور‌های نیروگاه‌های بخاری دارای عمر بیش از ۳۰ الی ۴۰ ساله هستند که البته این زمان نشان‌دهنده‌ی پایان

بسیاری از تجهیزات ترک‌دار نیروگاهی اگرچه از لحاظ تئوری به پایان عمر خود رسیده‌اند، اما با این وجود تعدادی از نیروگاه‌های تولید برق به دلیل هزینه‌ی بالای جایگزینی، به دنبال راه‌هایی هستند تا زمان از سرویس خارج کردن این تجهیزات

عمر طراحی و خروج از سرویس کاری آن ها می باشد. همچنین نیروگاه های تولید برق به دلیل هزینه های بالای جایگزینی اجزای ترک دار و مشکلات جانبی پیش آمده در فرایند تعویض، همواره به دنبال این بوده اند تا بازنشستگی این تجهیزات را به تعویق بیندازند و یا در صورت امکان به رفع مشکلات بپردازند.

یکی از مهمترین قسمت های نیروگاهی که همواره به دلیل تحمل تنش های مکانیکی و حرارتی بالا مورد توجه کارشناسان است، روتور توربین های بخار می باشد. روتور هابه دلیل قرار گیری در دمای بیش از ۵۰۰ درجهی سانتیگراد، تحمل تنش های حرارتی بالا، نیروی گریز از مرکز و پدیده هایی همچون خزش، خستگی و ... همواره جزو قطعات بحرانی در نیروگاه ها هستند. به دلیل درجه حرارت کاری بالا، کیفیت و خواص مکانیکی مواد روتور در گذر زمان تغییر کرده و به مرور به دلیل تنش های حرارتی ترک هایی در سطح آن ایجاد می شود که در نهایت سبب زوال روتور می شود [۶].

در همین راستا بسیاری از روتورهای توربین بخار کشور به دلیل بالا بودن دمای کاری، دچار کاهش خواص مکانیکی شده و ترک هایی بر روی سطح آن ها به دلیل تنش های حرارتی و مکانیکی ایجاد می گردد. در صورت پیشروی این ترک ها، پدیده ی شکست رخ داده که فجایع و خسارات جانی و مالی هنگفتی به همراه دارد.

بنابراین یکی از مهمترین چالش های موجود در نیروگاه ها، بررسی امکان ترمیم روتورهای ترک دار با روش های مختلف بوده که از جمله رایج ترین این روش ها، خالی کردن اطراف ترک و جوش کاری آن می باشد که البته این امر بستگی به میزان پیشروی ترک در عمق روتور دارد [۱].

از دیگر روش هایی که می توان برای حل این معضل از آن بهره جست، کاهش قطر روتور با برداشتن ترک با ماشینکاری در محل ایجاد ترک می باشد. زیرا اکثر این روتور ها دارای ترک محیطی بوده و می توان با حذف ترک از طریق کاهش قطر، از پیشروی آن جلوگیری به عمل آورده و به عمر کاری روتور افزود. البته این موضوع نیازمند بررسی تمامی جوانب می باشد که در صورت بازگشت روتور به سرویس کاری می توان جلوی خسارت زیاد ناشی از تعویض و جایگزینی را گرفت.

ترک در سطح مشکلی است که عموماً در روتورهای HP به وجود می آید و مربوط به خستگی های حرارتی ناشی از گرم و سرد شدن آن می باشد [۵]. ترک ها عموماً در شیارهای حرارتی و در نواحی پلکانی در شعاع کم در طول روتور اتفاق می افتند. این ترک ها عموماً کم عمق بوده و در اکثر موارد می

توان آنها را با ماشینکاری حذف نمود (لایه برداری سطحی). به محض اینکه ترک ها مجدداً در سرویس نمایان شدند، فرآیند لایه برداری سطحی تکرار می گردد، تا جاییکه لایه برداری سطحی دیگر عملی و ممکن نباشد. جوانه زنی ترک در محلی به وقوع می پیوندد که تمرکز تنش نسبت به نواحی اطراف آن بیشتر باشد که به منظور جلوگیری از بوجود آمدن مجدد ترک ها، شعاع ماشینکاری را افزایش می دهند.

تحقیقاتی در سال ۱۹۹۰ در آمریکا توسط موسسه EPRI انجام گردید که نشان داد، نزدیک به ۲۰۰ روتور در صنایع تولید برق امریکا به پایان عمر طراحی خود رسیده اند که البته بسیاری از آن ها به دلیل ایجاد ترک و بحرانی شدن شرایط استفاده از آن ها، از رده خارج شده اند. البته در صورت عدم خروج از سرویس این روتور ها ۶۰۰ میلیون دلار صرفه جویی در صنایع تولید برق انجام می شده است [۴]. بدین ترتیب می توان شرایط مشابهی را نیز برای روتورهای ترک دار در ایران متصور شد.

تنش های مختلفی بر روی روتور اثر می گذارند. یکی از این تنش های اعمالی، تنش مکانیکی خمشی است که این تنش ناشی از وزن خود روتور میباشد. هنگامی که روتور بین دو تکیه گاه و یا یاتاقان قرار گرفته است، بدلیل وزن خود دچار خمش میشود. در هر شرایطی روتور همانند یک تیر عمل می کند که به دلیل وزن خود دچار خمش میشود. در هر لحظه از زمان نقاط سطح بالای روتور تحت فشار هستند در حالی که سطح پایین روتور تحت کشش میباشند. اثر این تنش در زمانی که تمرکز تنش وجود دارد مخصوصاً هنگامی که سطح مقطع روتور تغییر می کند یا در هر مکان دیگری که خرابی مکانیکی یا شیمیایی وجود دارد افزایش چشمگیری می یابد. این افزایش تنش و تمرکز آن در روتور سبب شروع ترک در آن محل می گردد. این تمرکز تنش ها معمولاً هنگامی که روتور در حال چرخش می باشد بسیار نگران کننده است زیرا در این شرایط ترک ترد میتواند به وقوع پیوندد [۶].

یکی دیگر از تنش هایی که روتور توربین با آن مواجه می باشد، تنش ناشی از پیچش است. روتور توربین در هنگام چرخش گشتاور پیچشی را تحمل می کند که این گشتاور پیچشی از ابتدای روتور تا انتهای آن که در واقع محل کوپلینگ با شفت روتور ژنراتور می باشد افزایش می یابد. این گشتاور ناشی از برخورد جریان بخار با پره های توربین می باشد که توسط ردیف پره ها به شفت روتور منتقل می شود.

در پژوهش حاضر ابتدا با استفاده از اطلاعات داده های نیروگاهی و شرایط بهره برداری از توربین بخار، نیروهای

دیسک به همراه ردیف پره‌ها می باشد که مرحله توربین گفته می شود.

لازم به توضیح است در این مدل سازی چرخ کورتیس به صورت دو ردیف پره مجزا مدلسازی گردیده است. دیسک و ردیف پره ۱ و ۲ همان چرخ کورتیس می باشند.

شماره گذاری ردیف پره ها نیز مطابق شکل ۱ از سمت چپ به سمت راست می باشد.

تعداد مرحله توربین و ردیف پره در این پژوهش به شرح جدول ۲ می باشد.

جدول ۲: مرحله توربین و ردیف پره

شماره مرحله	۱	۲	۳	۴	۵	۶
تعداد ردیف پره در هر مرحله	۶	۵	۴	۲	۱	۱

مشخصات مکانیکی روتور توربین: جنس روتور توربین مورد بررسی از نوع 1Cr-1Mo-0.25V می باشد که خواص مکانیکی آن به شرح جدول ۳ می باشد.

جدول ۳: خواص مکانیکی روتور توربین مورد بررسی

استحکام کششی نهایی	۷۵ Kg/mm ² حداقل
استحکام تسلیم	۶۰ Kg/mm ² حداقل
تغییر طول [درصد]	۱۳ %
کاهش سطح مقطع	۳۰ % حداقل

به منظور به دست آوردن تنش حد تحمل در خستگی از ضرایب تصحیح جدول ۴ بر روی تنش حد تحمل نمونه صیقل کاری شده در شرایط آزمایشگاه (که معادل نصف تنش نهاییست)، استفاده شده است.

جدول ۴: ضرایب تصحیح [۳و۲]

مشخصات	ضریب تصحیح
ماشین کاری شده	۰.۷۷
شرایط سطح	
قطر محور	۰.۵۸
۴۳۲.۳ میلی متر	
نوع بارگذاری	۱
خمشی و پیچشی	
دما	۰.۸۳
۸۵۰ درجه فارنهایت	
ضریب اطمینان	۰.۷۰
٪۹۹.۹۹	

اعمالی بر شفت روتور بدست آمده است و با فرض عمق ماشین کاری (لایه برداری) متفاوت از ۲ تا ۱۲ میلی متر و حالت بدون ترک (بدون لایه برداری)، تنش فون مایز ماکزیمم در این بخش بدست آمده و سپس ضریب اطمینان با روتور توربین بدون ترک مقایسه گردیده است.

۲- معرفی مسئله

در بخش اول از مدلسازی این پژوهش، ترک به عمق ۱۲ میلی متر بر روی روتور بین ردیف پره دوم و سوم (حد فاصل چرخ کورتیس و دیسک اول) در نظر گرفته شده است که با ماشین کاری با عمق ۱۲ میلی متر این ترک برداشته شده است. سپس با مدل سازی هندسی، به معرفی هندسه مورد نظر که یک روتور توربین نیروگاهی به همراه دیسک‌های متصل به آن می باشد پرداخته شده است.



پیش از معرفی مسئله لازم است اصطلاحات به کار رفته در این پژوهش معرفی شوند:

دیسک: در این پژوهش منظور همان دیسک هایی است که از یک طرف به شفت روتور متصل شده است و به صورت یکپارچه با روتور می باشد و از طرفی دیگر پره های توربین به آن متصل شده است. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می شود دیسک ها به صورت یکپارچه با روتور در نظر گرفته شده اند.

ردیف پره: منظور مجموعه ای از پره ها می باشند که بر روی دیسک های روتور نصب شده اند و گشتاور پیچشی را به شفت روتور وارد می کند.

روتور: منظور مجموعه ی شفت روتور به همراه دیسک های متصل به آن می باشد.

مرحله توربین: حدفاصل ورودی و خروجی بخار به منظور دریافت انرژی مکانیکی در هر بخش توربین، شامل تعدادی

با استفاده از اطلاعات موجود در نقشه ابعادی روتور توربین، ارتفاع پره ها در هر ردیف پره به صورت جدول ۶ می باشد.

جدول ۶: ارتفاع پره ها

شماره ردیف پره	ارتفاع پره (mm)	شماره ردیف پره	ارتفاع پره (mm)
۱	۸۳	۱۱	۱۲۱
۲	۱۲۱	۱۲	۱۴۳.۵
۳	۶۸	۱۳	۱۶۲.۵
۴	۶۸	۱۴	۱۵۱.۵
۵	۷۴	۱۵	۱۸۰
۶	۷۹	۱۶	۲۴۱
۷	۸۲	۱۷	۳۰۴
۸	۹۹	۱۸	۵۸۱
۹	۱۰۰	۱۹	۷۰۰
۱۰	۱۰۹		

گام دوم: در این پژوهش به منظور ساده سازی مدل روتور توربین بخار، پره ها و دیسک روتور توربین به صورت دیسک-های یکپارچه در نظر گرفته شده اند. در این ساده سازی به منظور در نظر گرفتن فواصل خالی بین پره ها در ردیف پره های روتور توربین که به صورت توپر در نظر گرفته شده است و همچنین منظور کردن مرکز جرم ردیف پره ها، چگالی پره ها با استفاده از تناسب هندسی کاهش پیدا کرده است.

در ابتدا شفت روتور به همراه دیسک های متصل به آن در نرم افزار مدل سازی گردیده است و پس از در نظر گرفتن چگالی فولاد معادل 7850 kg/m^3 ، وزن شفت روتور به همراه دیسک های متصل به آن 11864 کیلوگرم حاصل می شود.

در داده های نیروگاه، وزن کل روتور به همراه دیسک ها و پره های متصل به آن 15000 کیلوگرم می باشد که در این صورت وزن تمامی پره های روتور که حاصل تفریق وزن شفت روتور و دیسک های متصل به آن از وزن کل روتور به همراه پره ها می باشد 3136 کیلوگرم می شود ($15000 - 11864 = 3136$).

بنابراین وزن مجموع ردیف پره ها 3136 کیلوگرم می شود. سپس حجم هر یک از ردیف پره های توپر را به حجم کل ردیف پره های توپر تقسیم کرده و با ضرب نسبت بدست آمده در وزن کل ردیف پره ها (3136 کیلوگرم) وزن معادل هر ردیف پره را محاسبه نمود.

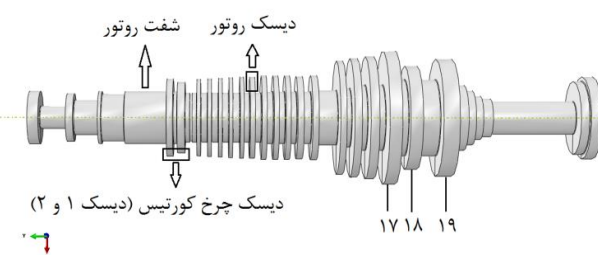
$$S_e = 0.5 \times S_{ut} \times 0.77 \times 0.58 \times 1 \times 0.83 \times 0.70 = 101 \text{ MPa}$$

پیکر بندی های متفاوتی برای روتورها وجود دارد. روتور مدنظر در این پژوهش از نوع یکپارچه می باشد. روتورهای یکپارچه روتورهایی هستند که در آنها دیسک ها و شفت به صورت یک پارچه از یک قطعه آهنگری شده (فرج شده) ساخته شده و سپس تراشکاری می شوند. روتورهای یکپارچه ی ساخته شده توسط سازندگان، دارای سوراخ مرکزی هستند.

گام اول: با توجه به عدم وجود اطلاعات دقیق ابعادی، وزن پره ها و دیسک ها، به منظور مدلسازی روتور توربین و دیسک های متصل به شفت روتور از تناسب هندسی برای محاسبه وزن و ارتفاع ردیف پره ها استفاده شده است. در نقشه های موجود ضخامت دیسکهای روتور مطابق جدول ۵ می باشد.

جدول ۵: ضخامت دیسک های روتور

شماره دیسک	ضخامت دیسک (میلی متر)	شماره دیسک	ضخامت دیسک (میلی متر)
۱	۵۸.۴۵	۱۱	۴۶.۷۶
۲	۷۰.۱۴	۱۲	۵۸.۴۵
۳	۳۵.۰۷	۱۳	۵۸.۴۵
۴	۳۵.۰۷	۱۴	۵۸.۴۵
۵	۳۵.۰۷	۱۵	۷۰.۱۴
۶	۳۵.۰۷	۱۶	۸۱.۸۳
۷	۳۵.۰۷	۱۷	۱۱۶.۹
۸	۴۶.۷۶	۱۸	۱۱۶.۹
۹	۴۶.۷۶	۱۹	۱۵۱.۹۷
۱۰	۴۶.۷۶		



شکل ۱: روتور مدلسازی شده بدون پره

جدول ۷: وزن ردیف پره ها

وزن ردیف پره (kg)	شماره ردیف پره	وزن ردیف پره (kg)	شماره ردیف پره
۳۶	۱۱	۲۸	۱
۵۳	۱۲	۴۷	۲
۵۴	۱۳	۱۳	۳
۷۴	۱۴	۱۳	۴
۱۱۲	۱۵	۱۵	۵
۱۸۷	۱۶	۱۶	۶
۳۷۷	۱۷	۱۷	۷
۷۱۵	۱۸	۲۸	۸
۱۲۹۰	۱۹	۲۹	۹
		۳۲	۱۰

گشتاور پیچشی: توربین این نیروگاه که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است، دارای توان ۸۲.۵ مگا وات می باشد. یکی از بارهای اعمالی بر روتور توربین، گشتاور پیچشی ناشی از عبور بخار از بین پره ها و دوران روتور می باشد. گشتاور پیچشی در یک روتور با افزایش شعاع پره ها و حجم بخار، افزایش می یابد که این بدان معنا است که پره های موجود در قسمت HP گشتاور کمتر و پره های موجود در قسمت LP گشتاور بیشتری را به شفت روتور اعمال می کنند. به منظور محاسبه گشتاور پیچشی اعمالی بر روتور با استفاده از داده های موجود در نیروگاه که شامل آنتالپی، فشار، دما و دبی بخار در هر مرحله از توربین می باشد، می توان این مقادیر را با استفاده از قوانین ترمودینامیک بدست آورد.

در مرحله اول توربین، فشار بخار ورودی ۱۲۵۰ psig، آنتالپی مخصوص ۱۴۵۲ btu/lbm، دبی بخار ۷۱۶ klb/hr، راندمان ایزونتروپیک ۸۵٪ (راندمان ژنراتور ۹۵٪) و فشار بخار خروجی ۴۷۳ psig می باشد. با توجه به اطلاعات موجود و استفاده از نرم افزار Steam Calculator توان خروجی در هر مرحله به صورت جدول شماره ۵ بدست می آید.

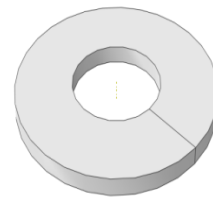
پس از استخراج توان خروجی در هر مرحله توربین با استفاده از فرمول $P = T \times \omega$ (در این فرمول P توان خروجی بر حسب MW، T گشتاور بر حسب N.mm و ω سرعت دورانی بر حسب rad/s می باشد)، می توان گشتاور پیچشی اعمال شده در هر مرحله توربین را محاسبه و سپس با تقسیم گشتاور بر تعداد ردیف پره در آن مرحله از توربین، گشتاور اعمالی توسط هر ردیف پره را به دست آورد. در جدول ۸ گشتاور های بدست آمده بر اساس روش فوق نشان داده شده است.

جدول ۸: گشتاور و توان خروجی هر مرحله توربین

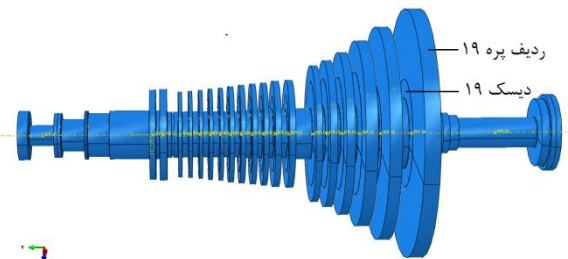
گشتاور ردیف پره (N.mm)	تعداد پره در هر مرحله	گشتاور مرحله (N.mm)	توان (MW)	شماره مرحله
۱۰۹۳۵۱۹۱	۶	۶۵۶۱۱۱۴۶	۲۰.۶۰	۱
۷۶۷۱۵۲۸	۵	۳۸۳۵۷۶۴۳	۱۲.۰۴	۲
۱۱۴۹۵۰۶۳	۴	۴۵۹۸۰۲۵۴	۱۴.۴۳	۳
۱۶۱۶۱۹۴۲	۲	۳۲۳۲۳۸۸۵	۱۰.۱۴	۴
۳۶۳۰۹۲۳۵	۱	۳۶۳۰۹۲۳۵	۱۱.۴۰	۵
۵۱۲۲۵۱۵۹	۱	۵۱۲۲۵۱۵۹	۱۶.۰۸	۶

با استفاده از فرمول $\rho = \frac{m}{h \times \pi \times (r_2^2 - r_1^2)}$ که در آن، ρ چگالی، m وزن ردیف پره ها، h ضخامت ردیف پره (برابر با ضخامت دیسک)، r_2^2 شعاع خارجی ردیف پره و r_1^2 شعاع داخلی ردیف پره می باشد، می توان چگالی پره های روتور در حالت توپر را محاسبه کرد. در این حالت مقدار چگالی ردیف پره ها 2150 kg/m^3 بدست می آید.

با توجه به مقادیر بدست آمده در بالا شکل روتور مدلسازی شده با ردیف پره به همراه نمونه ردیف پره توپر در شکل ۲ نشان داده شده است.



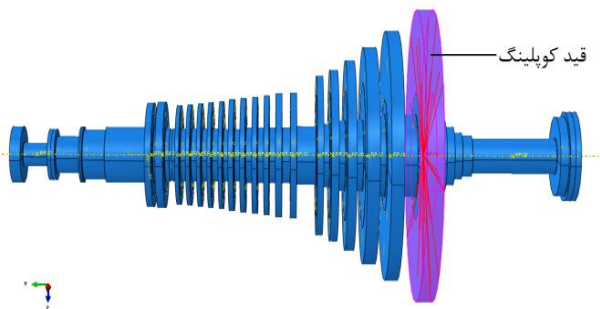
شکل ۲-۱: نمونه ردیف پره توپر



شکل ۲-۲: روتور توربین مدلسازی شده

در ادامه به معرفی نیروها و گشتاورهای اعمالی به روتور توربین پرداخته می شود.

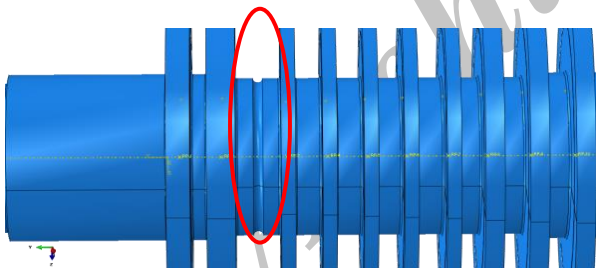
گشتاور پیچشی به نقاط مرجع، بار مورد نظر به ردیف پره ها اعمال می شود.



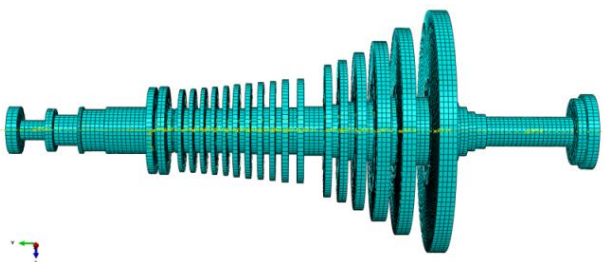
شکل ۴: اعمال قید کوپلینگ

مش بندی: ابعاد طولی روتور توربین حدود ۵ متر می باشد، در حالی که مقطع ماشینکاری شده مورد نظر برای تحلیل (که بین ردیف پره دوم و سوم است) مطابق شکل ۵-۱ (که بین ردیف پره دوم و سوم است) مطابق شکل ۵-۱ نسبت به کل روتور بسیار کوچکتر می باشد. از طرفی به دلیل ابعاد بزرگ روتور، امکان مش بندی با دقت بالا و مش-های ریز وجود ندارد به همین دلیل از روش مدل سازی زیر استفاده شده است. بدین منظور ابتدا کل روتور با استفاده از مش بندی درشت حل شده و سپس از نتایج این تحلیل برای حل زیر مدل استفاده شده است.

همچنین در شکل ۵-۲ مش بندی کل روتور با استفاده از مش های ۳۰ میلی متری نشان داده شده است.



شکل ۵-۱: مقطع ماشین کاری شده



شکل ۵-۲: مش بندی کل روتور

ممان خمشی: چنان که گفته شد این ممان ناشی از وزن خود روتور می باشد. معمولا این تنش ها دارای مقدار اندکی بوده ولی هنگامی که تمرکز تنش و یا تغییر مقطع وجود داشته باشد، می تواند افزایش چشمگیری پیدا نماید. در این پژوهش نیز با توجه به کاهش قطر روتور و ایجاد تمرکز تنش، می تواند اثر قابل توجهی بر روی تنش در ناحیه مورد نظر داشته باشد. به منظور اعمال گشتاور خمشی، نیروی جاذبه 9.81 m/s^2 به کل مدل روتور توربین اعمال شده است.

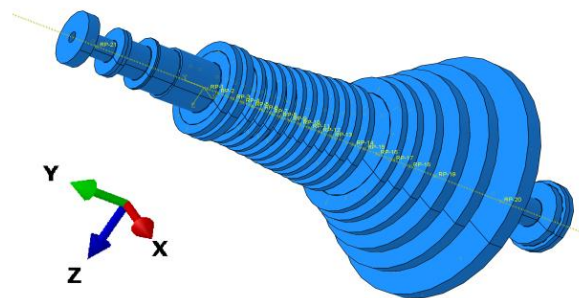
شرایط مرزی: روتور توربین بر روی یاتاقان هایی از نوع ژورنال بیرینگ قرار گرفته است. به منظور اعمال شرایط مرزی بر تکیه گاه روتور می بایست درجات آزادی در محل ژورنال بیرینگ را تعیین نمود. قسمت راست روتور توربین به ژنراتور متصل شده است و قسمت چپ آن محل ورود بخار می باشد. محورهای مختصات در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به این جانمایی درجات آزادی طرفین روتور به شرح ذیل در نظر گرفته شده است:

شرایط مرزی قسمت چپ روتور

$$U_x=U_y=U_z=U_{R_x}=U_{R_z}=0, U_{R_y}=\text{free}$$

شرایط مرزی قسمت راست روتور

$$U_x=U_z=U_{R_x}=U_{R_y}=U_{R_z}=0, U_y=\text{free}$$



شکل ۳: محور مختصات مدل

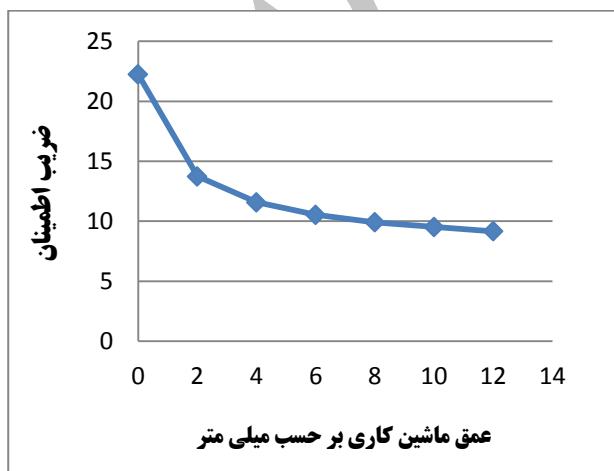
نحوه اعمال گشتاور و شرایط مرزی: به منظور اعمال گشتاور و شرایط مرزی در این پژوهش از نقاط مرجع استفاده شده است. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می شود، ابتدا در حد فاصل هر دیسک نقاط مرجعی انتخاب شده است و سپس این نقاط با استفاده از قید کوپلینگ به ردیف پره ها متصل شده است. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می شود نقطه مرجع در وسط دیسک آخر با قید کوپلینگ که با رنگ بنفش نشان داده شده، به ردیف پره آخر کوپل شده است. بدین صورت با اعمال

ضرایب اطمینان: با توجه به نتایج حاصل شده در تحلیل روتور به ازای عمق ماشینکاری های متفاوت و همچنین محاسبه استحکام خستگی، می توان از تقسیم تنش حد تحمل در خستگی بر تنش های ایجاد شده در عمق منطقه- های ماشینکاری شده با عمق متفاوت ضرایب اطمینان را محاسبه نمود. در جدول ۹ ضرایب اطمینان به ازای عمق ماشین کاری های متفاوت، نشان داده شده است.

جدول ۹: ضرایب اطمینان محاسبه شده به ازای تراشکاری با عمق های متفاوت

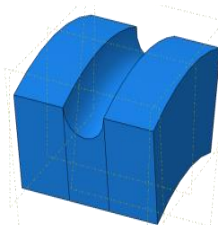
عمق ماشینکاری (mm)	تنش بیشینه (MPa)	ضریب اطمینان
۱۲	۱۱.۰۲	۹.۱۶
۱۰	۱۰.۶	۹.۵۲
۸	۱۰.۱۹	۹.۹۱
۶	۹.۵۹	۱۰.۵۳
۴	۸.۷۲	۱۱.۵۸
۲	۷.۳۵	۱۳.۷۴
۰	۴.۵۴	۲۲.۲۴

همانطور که در نمودار ۲ نشان داده شده است، با افزایش عمق ترک ضرایب اطمینان کاهش پیدا کرده و از ۱۳.۷۴ در عمق ۲ میلیمتر به ۹.۱۶ در عمق ۱۲ میلیمتر کاهش می- یابد. همچنین ضریب اطمینان در این مقطع از روتور در حالت بدون ترک و بدون ماشینکاری ۲۲.۲۴ می باشد.



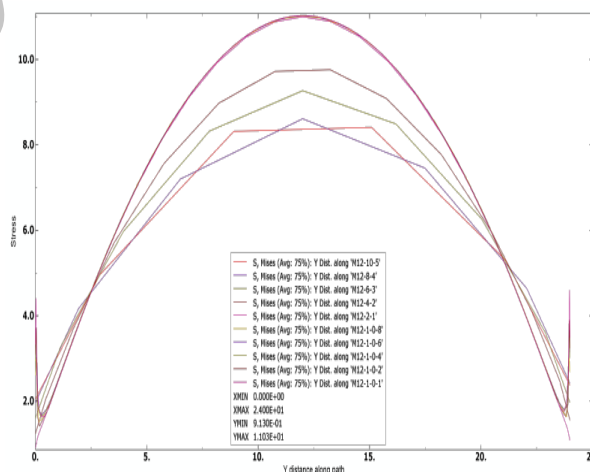
نمودار ۲: تغییرات ضریب اطمینان بر حسب عمق ماشین کاری

به منظور تحلیل زیر مدل مطابق شکل ۶ قطاعی ۳۰ درجه از قسمت بالای روتور در محل ماشینکاری شده مورد استفاده قرار گرفته است. سپس محل ماشینکاری شده به عمق ۱۲ میلی متر با استفاده از مش ۱۰ میلی متر تا ۰.۱ میلی متر مورد تحلیل قرار گرفته است.



شکل ۶: نمونه قطعه ماشین کاری شده روتور

به منظور تایید صحت نتایج حاصل شده، تنش در مسیری بر روی محل ماشین کاری شده به عمق ۱۲ میلی متر، به ازای ابعاد مش مختلف آورده شده است. همانطور که در نمودار ۱ مشاهده می شود به ازای ابعاد مش کمتر از ۰.۸ میلی متر، جواب ها مستقل از ابعاد مش و همگرا بوده که نشان دهنده صحت تنش ها می باشد.



نمودار ۱: تغییرات تنش بر روی مسیر دلخواه به ازای عمق ماشین کاری ۱۲ میلی متر

در ادامه تمامی مراحل قبل به ازای عمق ماشینکاری ۱۰، ۸، ۶، ۴ و ۲ میلی متر انجام شده و تنش های بیشینه در هر بخش بدست آمده است. نتایج تنش بیشینه در جدول ۸ آورده شده است.

[1] Counter, L., D.R. Fewkes, K.T. Fuentes, and R.E. Munson, "Weld Repair of a Low Pressure Turbine Rotor Subject to Torsional Loading," EPRI Welding and Repair Technology for Fossil Plants, Williamsburg, VA, March 1994.

[2] Joseph E . Shigley , Mechanical Engineering Design , 9nded , 2011 .

[3] Joseph E . Shigley , Charles R . Mischke , “ Standars Hand Book of Machine Design “ , 2nded , 1996 .

[4] Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Tokyo "Steam Turbine Rotor Life Assessment" March, 1994.

[5] R.Viswanathan , “Damage Mechanisms and Life Assessment of High - Temperature Components ” , ASM International , september . 1995 .

[6] William P . Sanders P , “ Turbine Steam Path “ , 2004 .

[۷] دکتر داوود توکلی ، سید رضا شمشیرگران ، " توربین های بخار و گاز " ، انتشارات دانشگاه صنعت آب و برق ، چاپ دوم ، ۱۳۸۹ .

روتور توربین نیروگاه بخار جزو حساس ترین سازه های دوار می باشد که در معرض تنش های بالایی قرار می گیرد. و سلامت این روتورها از اهمیت بالایی برخوردار است و در هنگام بازدیدهای دوره ای می بایست به دقت مورد بررسی قرار گیرند. یکی از عواملی که سبب بروز خسارات سنگین در نیروگاه ها می گردد، بهره برداری از روتور ها بدون توجه به وجود ترک بر روی آنها می باشد. تنش بالایی که در نوک ترک وجود دارد در صورتی که به حد بحرانی برسد سبب شکست ناگهانی و انهدام مجموعه توربین می شود. بنابراین برای حل این مشکل می توان این ترک ها را از روی روتور با ماشین کاری حذف نمود. همانطور که نتایج این پژوهش نشان می دهد با حذف ترک هایی از عمق ۲ تا ۱۲ میلی متر ضریب اطمینان از ۱۳.۷۴ تا ۹.۱۶ کاهش می یابد، که این محدوده قابل قبول می باشد. لازم به توضیح است که این لایه برداری سطحی در نقاط بحرانی روتور و در نزدیکی اتصال به ژنراتور به دلیل تنش های پیچشی بالا بایستی با دقت و بررسی های لازم انجام گردد.

تشکر و قدردانی

نگارندگان مقاله بر خود لازم میدانند از همکاری صمیمانه مدیریت محترم و کارشناسان نیروگاه بعثت به ویژه آقای مهندس سعیدی و مدیریت محترم و کارشناسان شرکت تعمیرات نیروگاهی ایران به ویژه آقای مهندس مروج که اطلاعات لازم را در اختیار قرار دادند صمیمانه سپاسگزاری نمایند.