

امکان سنجی تغییر آلیاژ پره‌های ردیف آخر توربین بخار نیروگاه رامین اهواز به منظور افزایش

عمر

فرزاد جعفری پور

کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران،
farzadjafaripour2@gmail.com

عباس رهی*

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران،
a_rahi@sbu.ac.ir

سید احمد مرتضوی

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران،
mortazavi70@gmail.com

سید محمد جعفری

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران،
m-jafari@sbu.ac.ir

چکیده

در این مقاله امکان سنجی تغییر آلیاژ پره‌های ردیف آخر توربین بخار نیروگاه رامین اهواز به منظور افزایش عمر آن با رویکرد ارتعاشات مورد مطالعه قرار گرفته است. بعد از وارد کردن مدل هندسی به محیط نرم افزار Ansys، تحلیل دینامیکی و تحلیل تنش بر روی مدل برای آلیاژ فولادی و آلیاژ تیتانیوم و نیز رشد ترک در مدل تک پره، انجام شده است. در تحلیل دینامیکی، نتایج نشان داد زمانی که جنس پره‌های توربین از آلیاژ تیتانیوم باشد، می‌توان شرایط ارتعاشی بهتری در پره‌های توربین ایجاد کرده و از بروز احتمالی پدیده تشدید جلوگیری کرد. همچنین در تحلیل تنش، زمانی که از آلیاژ تیتانیوم در پره استفاده می‌شود، تنش ون میسر به دست آمده تقریباً برابر با نصف تنش به دست آمده از آلیاژ فولادی می‌باشد. هنگامی که پره در قسمت ریشه دچار ترک شود، برای حالتی که پره توربین از جنس آلیاژ تیتانیوم باشد، مقدار ضریب شدت تنش محاسبه شده، حدود ۵۰ درصد کاهش داشته است.

واژه‌های کلیدی: پره توربین بخار؛ دیاگرام کمپبل؛ فرکانس طبیعی؛ تحلیل دینامیکی؛ آلیاژ تیتانیوم؛ امکان سنجی.

Feasibility study of using titanium alloy instead of steel alloy in the last row blade of Ahvaz Ramin power plant to increase the blade life

F. Jafaripour

Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

A. Rahi

Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

S. A. Mortazavi

Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

S. M. Jafari

Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Abstract

In this paper, it is possible to change the alloy of the blades of the last row of steam turbine blades of Ahvaz Ramin power plant in order to increase the life with the vibration approach. After entering the geometric model into the ANSYS, dynamic analysis and stress analysis are performed on the model for steel alloy and titanium alloy, as well as crack growth in the single-blade model. In the dynamic analysis, the results showed that when we consider the material of the turbine blades as titanium alloy, we can create better vibration conditions in the turbine blades and prevent the possible occurrence of resonance phenomenon. Also in stress analysis, when titanium alloy is used in the blade, the Von Mises stress obtained is approximately equal to half the stress obtained from the steel alloy. When the blade cracks at the root, the amount of stress intensity calculated in the turbine blade is reduced by almost 50% when the blade is made of titanium alloy.

Keywords: Steam turbine blade; Campbell diagram; Natural frequency; Dynamic analysis; Titanium alloy; Feasibility study.

اجباری باعث افزایش تنش‌ها شده و منجر به تخریب پره‌ها می‌شود، که به عنوان خستگی چرخه بالا شناخته می‌شود. در طول سال‌های اخیر محققان مطالعات متعددی، روی تاثیر تغییر آلیاژ پره‌های توربین بخار بر رفتار ارتعاشاتی پره توربین انجام داده‌اند، تا بتوانند خرابی‌های ناشی از ارتعاشات و تنش‌های ایجاد شده بر اثر عوامل مختلف را به حداقل برسانند، تا راندمان توربین‌های بخار را افزایش دهند. در سال ۲۰۱۵، هلووس و همکاران [۱]، برای کاهش تلفات انرژی و بالا بردن راندمان توربین از آلیاژ تیتانیوم در ساخت پره‌های آخرین مرحله از توربین بخار استفاده کردند. آنان در ابتدا آزمایشات زیادی بر روی خواص آلیاژ تیتانیوم انجام دادند. طبق این آزمایشات به این نتیجه رسیدند که آلیاژ تیتانیوم (Ti-6Al-4V) در مقابل فرسایش و خستگی چرخه‌ای بالا مقاومت خوبی از خود نشان می‌دهد. در سال ۲۰۱۳، سنو و همکاران [۲]، پره‌های ۵۰ و ۶۰ اینچی ساخته شده از آلیاژ تیتانیوم در آخرین مرحله توربین‌های بخار به منظور بهره برداری بالاتر از توربین‌های بخار را توسعه دادند. با استفاده از این پره‌ها توانستند، انرژی

۱- مقدمه

پره‌ها اجزاء حیاتی در توربین‌ها هستند که نیروی ناشی از جریان بخار، که به پره‌ها اعمال می‌شود را بصورت نیروی دورانی به شفت منتقل می‌کنند. با این حال، شکست پره‌های توربین بخار به طور گسترده در نیروگاه‌ها مشاهده می‌شود که منجر به خاموشی واحدها می‌شود. مکانیسم شکست در پره‌ها ممکن است شامل خوردگی به علت ناخالصی موجود در بخار، خستگی چرخه کم ناشی از عملیات گذرا و خستگی چرخه‌ای بالا ناشی از ارتعاشات اجباری باشد. یکی از علل اصلی شکست‌های پره در توربین‌های بخار خستگی ناشی از لرزش می‌باشد. جریان بخار به طور کلی سبب ایجاد تنش در پره توربین می‌شود که ممکن است سبب ایجاد پدیده تشدید در شرایط کاری مختلف توربین شود. پره‌های توربین که تحت چندین منبع تحریک خارجی قرار دارند مستعد به ارتعاشات اجباری هستند، که ممکن است در فرکانس‌های طبیعی پره‌ها یا در نزدیکی آن‌ها رخ دهد. ارتعاشات

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: a_rahi@sbu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۰۰/۰۹/۲۴

تاریخ پذیرش: ۰۱/۰۵/۲۱

جنشی که به دلیل استفاده از پره‌های کوتاه‌تر از هدر می‌رفت را کاهش دهند و باعث بهبود بازده توربین تا ۲/۵ درصد شوند. در سال ۲۰۰۲ باگی و همکاران [۳] تاثیر سیم‌های مستهلک‌کننده بر رفتار دینامیکی پره‌های توربین بخار را مورد بررسی قرار دادند. آنان برای انجام این فرآیند پره‌های توربین را در دو حالت، یکبار همراه با سیم‌های مستهلک‌کننده و یکبار بدون سیم‌های مستهلک‌کننده مورد بررسی قرار دادند. در سال ۲۰۱۵، راوی و همکاران [۴] به تحلیل ارتعاشات پره توربین بخار کم فشار که دارای ترک بود، پرداختند. هدف آنان مقایسه ارتعاشات بین پره مرحله اول و پره مرحله آخر توربین بخار بود، بنابراین در ابتدا پره توربین را به عنوان تیر یکسرگردار فرض کردند و با استفاده از نرم افزار Ansys، پره‌های مرحله اول به عنوان تیرهای ضخیم و پره مرحله آخر به عنوان تیرهای نازک مدل‌سازی کردند. در سال ۲۰۰۳، داس و همکاران [۵] شکست پره‌های کم فشار توربین یک نیروگاه حرارتی ۲۲۰ مگاواتی که پره آن از فولاد ضد زنگ مارتنزیتی ساخته شده بود را مورد بررسی قرار دادند. بخشی از پره شکسته شده را برای انجام آزمایش های ریز ساختار مواد برش دادند. ریز ساختار مواد پره را با میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که ذرات خورنده مانند سیلیسیوم و کلر، سبب ایجاد حفره‌هایی بر روی سطح پره شده است که به مرور زمان با تمرکز تنش در این حفره ها، ترک ایجاد شده و سبب شکست پره گردیده است.

در سال ۲۰۱۹، کانو و همکاران [۶] پره‌های مرحله آخر توربین بخار ۱۱۰ مگاواتی را مورد بررسی قرار دادند. مدل‌هایی از پره تهیه کردند و با استفاده از تحلیل عددی پره، مقدار تنش را به دست آوردند. نتایج نشان داد که نیروی گریز از مرکز باعث ایجاد آسیب‌هایی در پره‌ها شده است. آنان همچنین این احتمال را دادند که یکی از دلایل امکان ایجاد ترک در پره می‌تواند به دلیل خستگی در چرخه پایین باشد. در سال ۲۰۱۸، کوما و همکاران [۷] به بررسی تنش ایجاد شده در پره‌های توربین بخار کم فشار پرداختند. بوسیله مدل‌سازی ریاضی، معادلات دیفرانسیل حاکم بر لرزش جانبی در پره را به دست آوردند. در سال ۲۰۱۵، ساکسینا و همکاران [۸] به بررسی شکست پره‌های توربین بخار کم فشار که دارای ۸ ردیف پره بود، پرداختند. آنها آزمایش‌هایی برای تجزیه و تحلیل مواد پره‌های شکست خورده و بدون شکست انجام دادند و برای بررسی عمیق تر چگونگی شکست پره‌ها یک مدل هندسی از پره توربین ساختند و آن را با استفاده از روش المان محدود بررسی کردند. در سال ۲۰۰۹، مازور و همکاران [۹] پره‌های ردیف آخر در یک واحد توربین بخار ۲۸ مگاواتی که فرسایش و خوردگی علت شکست در پره ها بود را مورد بررسی قرار دادند. آنان به تجزیه و تحلیل متالوگرافی پره‌های ترک خورده، آنالیز فرکانس طبیعی و آنالیز تنش پره پرداختند. در سال ۲۰۱۱، مورانا و همکاران [۱۰] پره‌های ۴۸ اینچی ساخته شده از آلیاژ تیتانیوم را برای آخرین مرحله از توربین بخار را مورد مطالعه قرار دادند. آنها پره ۴۸ اینچی از آلیاژ تیتانیوم (Ti-6Al-4V)، که در برابر ارتعاشات ناشی از نیروی گریز از مرکز مقاومت خوبی داشت را طراحی کردند.

رهی و همکاران [۱۱] رفتار ارتعاشی پره‌های متحرک ردیف آخر توربین بخار نیروگاه حرارتی رامین اهواز را با استفاده از نرم‌افزار المان محدود بررسی کردند. آنها مشاهده کردند که در حالت شرایط طراحی،

در پره مشکل تشدید به وجود نمی آید اما با تغییر در آرایش پره‌های متصل به سیم‌های مستهلک کننده پره‌ها دچار ارتعاش در دور کاری می‌شوند. مامندی و رجبی [۱۲] شکست و تخمین عمر خستگی پره ترک‌دار بخش داغ توربین کمپرسور گاز را مورد مطالعه قرار دادند. آنها با استفاده از نرم‌افزار المان محدود، مقدار تنش در پره را تحت بارگذاری‌های حرارتی و مکانیکی شامل دوران، توزیع دما و فشار بر روی ایرفویل پره محاسبه کردند و سپس با مدل‌سازی ترک، رشد ترک خستگی در نواحی دارای تنش بالا را برآورد نمودند.

در این مقاله هدف امکان سنجی تغییر آلیاژ پره‌های ردیف آخر توربین بخار نیروگاه رامین اهواز به منظور افزایش عمر با رویکرد ارتعاشات می‌باشد. بدین منظور ابتدا یک مدل مناسب از پره ردیف آخر توربین بخار نیروگاه رامین اهواز تهیه شده است. در ادامه پره توربین بخار با استفاده از نرم افزار Ansys مورد تحلیل عددی قرار گرفته و برای پره در دو آلیاژ فولادی و تیتانیوم نمودار کمپیل ترسیم شده است و در آخر تاثیر تغییر آلیاژ، بر رفتار ارتعاشاتی پره توربین بخار مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین رشد ترک در پره برای دو آلیاژ فولادی و تیتانیوم بررسی شده است.

۲- تعریف مسئله و بیان شرایط مرزی

شکست بر اثر خستگی یکی از مشکلات رایج در پره‌های توربین بخار می‌باشد. شکل ۱، نمونه‌ای از شکست خستگی در پره نیروگاه رامین اهواز را نشان می‌دهد. پره‌های مرحله آخر به دلیل کاهش فشاری که در اثر تقطیر بخار اتفاق می‌افتد با قطرات ریز آب برخورد کرده و سبب ایجاد سایش در روی سطح پره شده که به مرور زمان سبب ایجاد حفره‌هایی بر روی سطح پره می‌شود. این حفره‌ها می‌توانند محل تمرکز تنش باشند که با گذشت زمان با افزایش بارهای دینامیکی این تنش‌ها افزایش یافته و محلی برای شروع ترک خستگی و در نهایت سبب شکست پره می‌شوند.

بارهای دینامیکی از طریق عوامل زیادی افزایش می‌یابد، اما منشاء عمده این نیروها به دلیل عملکردی است که توربین بر اساس آن طراحی شده است. پره‌های ردیف آخر توربین بخار نیروگاه رامین بیشتر از سایر پره‌های ردیف‌های دیگر توربین مستعد شکست می‌باشند. برای تولید مدل هندسی پره توربین بخار به دلیل هندسه پیچیده از اسکن نوری استفاده شده است. از قسمت‌های دشوار در مدل‌سازی پره توربین قسمت ایرفویل پره می‌باشد.



شکل ۱- شکست پره از ریشه در ردیف آخر توربین بخار نیروگاه رامین از دشواری‌های مدل‌سازی ایرفویل پره توربین پیچش زیاد و تغییر در سطح مقطع است. بنابراین برای مدل‌سازی ایرفویل پره به سطح مقطع بیشتری نیاز است. برای اینکار، ابر نقاط توسط اسکن نوری بدست می‌آید، که از متصل نمودن این ابر نقاط توسط نمایه تبدیلی می‌توان ایرفویل پره توربین را بدست آورد. در ادامه برای مدل

ضریب پواسون	۰/۳	۰/۳۲
مقاومت تسلیم (Mpa)	۷۵۷	-
چقرمگی شکست ($\sqrt{m}MPa$)	۸۴	-

جدول ۲- خواص مکانیکی پره و سیم‌های مستهلک‌کننده برای آلیاژ تیتانیوم

ویژگی	پره	سیم مستهلک‌کننده
چگالی (kg/m^3)	۴۴۲۰	۴۶۲۰
مدول الاستیسیته (Gpa)	۱۱۱/۴	۹۶
ضریب پواسون	۰/۳۲	۰/۳۲
مقاومت تسلیم (Mpa)	۸۸۰	-
چقرمگی شکست ($\sqrt{m}MPa$)	۹۶	-

برای اعتبارسنجی، نتایج حاصل از آنالیز مودال تجربی و تحلیل عددی به روش اجزاء محدود در جدول ۳ با یکدیگر مقایسه شده اند. اختلاف خطای نسبی بین فرکانس‌ها ناچیز و نتایج حاصل از حل عددی با داده‌های تجربی هم‌خوانی خوبی دارند. بنابراین این نتایج مشخص می‌کنند که مدل به خوبی در نرم افزار المان محدود Ansys مدل سازی شده است.

جدول ۳- فرکانس‌های حاصل از تحلیل آزاد پره به روش آزمایش مودال تجربی و روش اجزاء محدود.

شماره فرکانس	فرکانس توسط آزمون مودال تجربی برحسب [۱۳] (HZ)	فرکانس توسط روش اجزاء محدود برحسب (Hz)	قدر مطلق خطای نسبی (درصد)
۱	-	۰	-
۲	۱۲۹/۸۱	۱۲۹/۷۷	۰/۰۳
۳	۲۴۹/۵۱	۲۵۹/۲۹	۳/۹۱
۴	۳۰۶/۷	۳۰۶/۹۶	۰/۰۸۴
۵	۵۴۰/۲۷	۵۳۲/۵۸	۱/۴۲
۶	۵۸۵/۸۱	۵۸۳/۸۸	۰/۳۳
۷	۶۹۱/۹۸	۶۸۴/۷۹	۱/۰۳

۳- تحلیل دینامیکی پره

نیروی گریز از مرکز ناشی از دوران روتور توربین یکی از عواملی اصلی در تحریک پره توربین بخار به حساب می‌آید. اگر شکل مود و فرکانس‌های طبیعی ذاتی سازه با فرکانس طبیعی نیروی تحریک کننده خارجی برابر باشد باعث ایجاد پدیده تشدید در سازه می‌شود. اگر سازه در چنین شرایطی کاری قرار گیرد، باعث شکست سازه می‌شود. در جدول ۴، ۱۰ مود فرکانس طبیعی در مدل ۶ تایی پره برای آلیاژ فولادی و آلیاژ تیتانیوم محاسبه شده است. همچنین در شکل ۴، ۶ شکل مود فرکانس طبیعی برای آلیاژ فولادی و آلیاژ تیتانیوم در دور پایایی ۳۰۰۰ دور بر دقیقه آورده شده است.

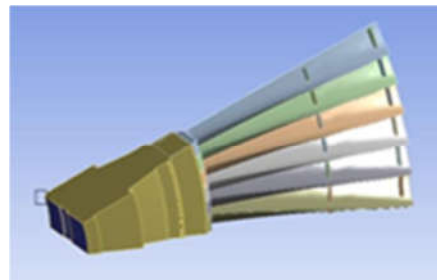
جدول ۴- فرکانس طبیعی مدل ۶ تایی پره توربین همراه با سیم های مستهلک کننده برای دو آلیاژ، فولادی و تیتانیوم.

آلیاژ تیتانیوم	آلیاژ فولادی	فرکانس (هرتز)
۱۰۴/۱	۹۹/۳	مود ۱
۱۸۴/۷۶	۱۷۳/۹۵	مود ۲
۱۸۴/۴۳	۱۸۷/۹۲	مود ۳
۲۰۵/۶۳	۲۰۶/۶۱	مود ۴

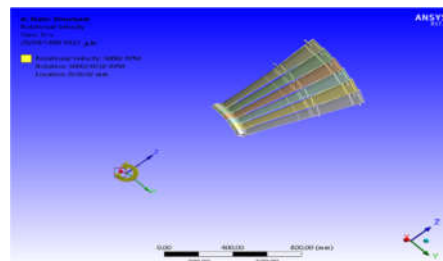
هندسی پره توربین بخار با استفاده از نرم افزار Ansys یکسری شرایط مرزی تعریف شده و مورد تحلیل عددی قرار گرفته و برای حالات مختلف اتصال سیم‌های مستهلک‌کننده پره، نمودار کمپیل ترسیم شده است. برای داشتن یک تحلیل صحیح در روش اجزای محدود نیاز به تعریف شرایط مرزی درست در مدل هندسی مورد نظر است. بنابراین این شرایط باید با دقت و متناسب با نیاز مسئله تعریف شوند. این شرایط می‌تواند در دقت و صحیح بودند تحلیل عددی نقش مهم و بسزایی داشته باشد. برای تحلیل عددی در این مقاله دو شرایط مرزی تعریف شده که در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است.

۱- تکیه گاه: برای اینکه نیروی بخار به نیروی دورانی روتور تبدیل شود، پره‌های توربین توسط پین و شاخک‌هایی در ریشه پره، بر روی دیسک متصل می‌شوند (شکل ۲).

۲- بارگذاری پره (نیروها): مهم‌ترین عامل در بارگذاری پره توربین، نیروی گریز از مرکز روی پره می‌باشد. این عامل به سرعت دورانی روتور بستگی دارد. نیروی دیگری که به پره وارد می‌شود، نیروی ناشی از بخار می‌باشد (شکل ۳).



شکل ۲- تعریف تکیه گاه ها برای پره



شکل ۳- تعریف بارگذاری روی پره

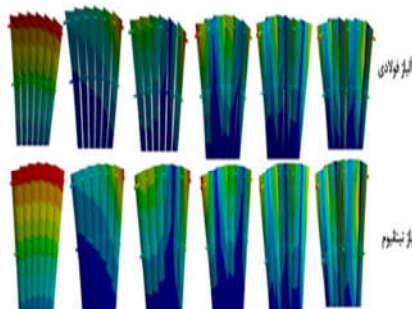
در مقاله حاضر المان مورد استفاده برای پره و سیم‌های مستهلک‌کننده از نوع SOLID187 (۱۰ گره ای) و برای سطوح تماس بین ایرفویل و سیم‌های مستهلک‌کننده از نوع CONTA174 (تماس سطحی ۸ گره ای) می باشد. تعداد المان‌های ایجاد شده در مدل تک پره ۵۹۰۴ عدد و در گروه ۶ تایی پره همراه با سیم‌های مستهلک‌کننده ۳۶۶۲۹ عدد می‌باشند.

در جدول ۱ و جدول ۲ خواص مکانیکی پره و سیم مستهلک-کننده، برای آلیاژ فولادی و آلیاژ تیتانیوم آورده شده است.

جدول ۱- خواص مکانیکی پره و سیم‌های مستهلک‌کننده برای آلیاژ فولادی

ویژگی	پره	سیم مستهلک‌کننده
چگالی (kg/m^3)	۷۸۰۰	۴۶۲۰
مدول الاستیسیته (Gpa)	۲۰۰	۹۶

۵-مود	۲۴۳/۴۶	۲۵۵/۴۸
۶-مود	۳۰۵/۶۸	۳۳۷/۵
۷-مود	۳۳۹/۴۱	۳۴۳/۲
۸-مود	۳۷۰/۹	۴۱۱/۶۵
۹-مود	۴۱۱/۹۷	۴۴۸/۳۴
۱۰-مود	۴۴۷/۷۶	۴۵۴/۷۳

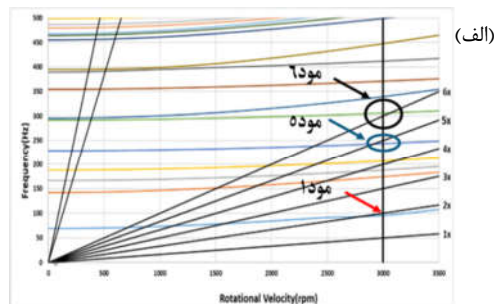


شکل ۴- شش شکل مود فرکانسی از چپ به راست، برای آلیاژ فولادی و آلیاژ تیتانیوم.

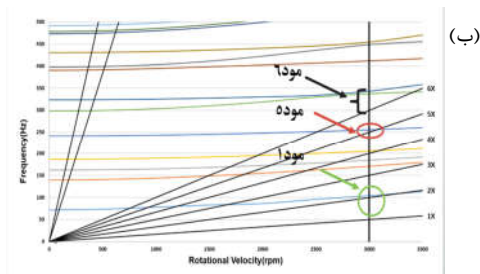
۴- دیاگرام کمپل

برای به دست آوردن فرکانس‌هایی که سبب تشدید در سازه (پره) می‌شوند از نمودار کمپل استفاده می‌شود. برای اینکه یک نمودار کمپل صحیح داشته باشیم باید تحلیل دینامیکی مدل، با افزایش - تدریجی سرعت دورانی مدل انجام شود. در نمودار کمپل یکسری خطوط از مبدا مختصات نمودار با شیب یکسان ترسیم می‌شود، که از یک برابر دورکاری روتور توربین رسم می‌شوند که خط هارمونیک اول روتور نامیده می‌شود. برای به دست آوردن تحریک‌های مرتبه پایین‌تر روتور، شیب خطوط را می‌توان دو، سه، چهار و چند برابر کرد.

در شکل ۵، نمودار کمپل پره‌های توربین همراه با دو سیم مستهلک‌کننده، برای آلیاژ فولاد و آلیاژ تیتانیوم ترسیم شده است. در شکل ۵-الف، همانطور که در شکل دیده می‌شوند مدهای فرکانسی شماره ۱، ۵ و ۶ با خطوط هارمونیک، قبل از دور کاری توربین (۳۰۰۰ دور بر دقیقه) تداخل دارند. این مدهای فرکانسی می‌تواند در اثر شرایط کاری یا خطای محاسباتی سبب ایجاد پدیده تشدید گردد و سبب شکست پره‌های توربین شود. ولی در شکل ۵-ب، که برای آلیاژ تیتانیوم رسم شده است، مشاهده می‌شود که مدهای فرکانسی شماره ۱، ۵ و ۶، در مقایسه با مدهای فرکانسی شکل ۵-الف در شرایط ارتعاشی بهتری قرار دارند، بطوری که مدهای فرکانسی در شکل ۵-ب، فاصله قابل ملاحظه‌ای با خطوط هارمونیک دارند. در نتیجه زمانی که



(الف)



(ب)

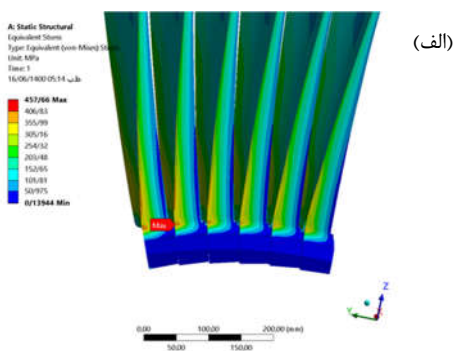
شکل ۵- نمودار کمپل، الف) آلیاژ فولادی، ب) آلیاژ تیتانیوم

جنس پره را آلیاژ تیتانیوم در نظر بگیریم، احتمال اینکه پدیده تشدید در اثر شرایط کاری مختلف ایجاد شود به طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد.

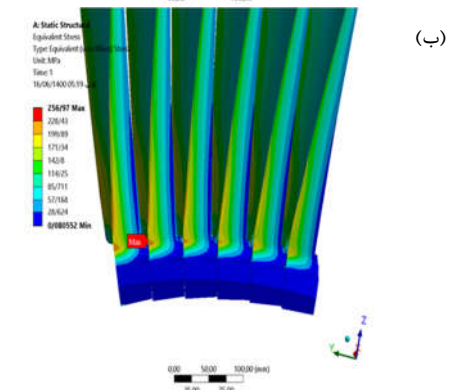
۵- تحلیل تنش

شایع‌ترین خرابی پره‌های توربین‌های کم‌فشار را می‌توان به خستگی آنها اختصاص داد. دو ردیف آخر در یک توربین کم‌فشار تحت تأثیر خرابی و خستگی قرار می‌گیرند.

یکی از عواملی که در ایجاد تنش در پره نقش بسزایی دارد نیروی گریز از مرکز می‌باشد. در شکل ۶، مقدار تنش ون میسر در ریشه پره ناشی از نیروی گریز از مرکز برای آلیاژ فولادی و آلیاژ تیتانیوم آمده است. طبق نتایج به دست آمده بیشترین تنش در ریشه پره مشاهده می‌شود. طبق شکل ۶-الف، مقدار تنش برای زمانی که جنس پره را آلیاژ پایه (فولادی) در نظر می‌گیریم، عدد ۴۵۷/۶۶ مگاپاسگال و نیز طبق شکل ۶-ب، زمانی که جنس پره را آلیاژ تیتانیوم باشد عدد ۲۵۶/۹۷ مگاپاسگال را نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)

شکل ۶- تنش ون میسر در ریشه پره ناشی از نیروی گریز از مرکز: الف) آلیاژ فولادی، ب) آلیاژ تیتانیوم.

کاهش داد و از شکست پره جلوگیری نمود، این امر مزیت استفاده از آلیاژ تیتانیوم در ساخت پره‌های توربین را نشان می‌دهد.

(۳) مقادیر ضریب شدت تنش در پره توربین زمانی که جنس پره از آلیاژ تیتانیوم باشد، تقریباً ۵۰٪ کاهش داشت. در نتیجه با کاهش ضریب شدت تنش (K)، تنش‌های نرمال و برشی در پره کاهش پیدا می‌کند.

۸- مراجع

- [1] Hlous J. and Partners, Development of a new titanium 54 inch LSB- static and dynamic assessment, *Turbine Technical Conference and Exposition*, Vol. 7, pp. 15-19, 2015.
- [2] Senoo S. and colleagues H., Titanium 50-inch and 60-inch Last-stage Blades for Steam Turbines, Based on research into publically available information as conducted by Hitachi, Vol. 62, 2013.
- [3] Bagi I., Voros G. and Vizvary Z., Dynamic Analysis of a Turbine Blade Using the Finite Element Method, *Gepeszet*, pp. 595-598, 2002.
- [4] Ravi Prakash Babu K., Raghu Kumar B. and Rao K.M., Vibration Analysis of Low Pressure Steam Turbine Blades with Crack, *Canadian Journal of Basic and Applied Sciences*, Vol. 3, pp. 18-28, 2015.
- [5] Das G., Ghosh Chowdhury S., Kumar Ray A., Kumar Das S. and Kumar Bhattachary D., Turbine blade failure in a thermal power plant, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 10, pp. 85-91, 2003.
- [6] Cano S., Rodríguez J.A., Rodríguez J.M., García J.C., Sierra F.Z., Casolco S.R. and Herrera M., Detection of damage in steam turbine blades caused by low cycle and strain cycling fatigue, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 97, pp. 579-588, 2019.
- [7] Kumar Bhagi L., Rastogi V., Gupta P. and Pradhan S., Dynamic Stress Analysis of L-I Low Pressure Steam Turbine Blade: Mathematical Modelling and Finite Element Method, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, pp. 28117-28126, 2018.
- [8] Saxena S., Pandey J.P., Singh Solanki R., Gupta G. K. and Modi O.P., Coupled mechanical, metallurgical and FEM based failure investigation of steam turbine blade, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 52, pp. 35-44, 2015.
- [9] Mazur Z., García-Illescas R. and Porcayo-Calderón J., Last stage blades failure analysis of a 28MW geothermal turbine, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 16, pp. 1020-1032, 2009.
- [10] Murata Y. and His colleagues, Development of 60 Hz titanium 48-inch last stage blade for steam turbine, *ASME power conference*, Vol. 1, pp. 695-700, 2011.

[۱۱] رهی ع.، سموات ب. و روحانی بسطامی ع.، بررسی آرایش‌های مختلف برای اتصال پره‌های توربین بخار نیروگاه رامین اهواز به منظور کاهش ارتعاشات. *مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۴۶، ش. ۴، ص ۱۳۷-۱۴۲، ۱۳۹۶.

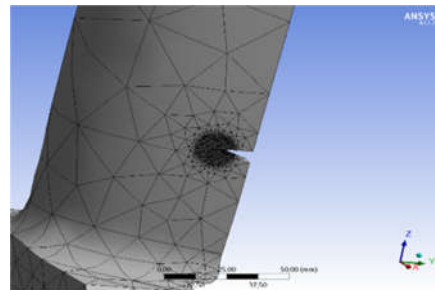
[۱۲] مامندی ا. و رجبی م.، تحلیل مکانیک شکست و تخمین عمر رشد ترک خستگی پره توربین گاز با استفاده از روش المان محدود. *مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۴۶، ش. ۲، ص ۱۲۵-۱۳۹، ۱۳۹۵.

[۱۳] فتحی م.، تحلیل شکست پره های توربین بخار نیروگاه رامین، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز، سال ۱۳۹۰.

در نتیجه زمانی که از آلیاژ تیتانیوم در پره استفاده می‌شود، تنش ون میسر نصف تنش به دست آمده از آلیاژ فولادی است. این امر مزیت استفاده از آلیاژ تیتانیوم در ساخت پره‌های توربین را نشان می‌دهد.

۶- بررسی رشد ترک

برای بررسی رشد ترک در حالت تک پره در نزدیکی ریشه ترکی ایجاد شده است، سپس اطراف ترک، همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است، مش بندی صورت گرفته است. در ادامه شرایط مرزی به پره اعمال شده است و توسط نرم افزار Ansys، پره مورد تحلیل قرار گرفته است و مقادیر ضریب شدت تنش برای مودهای مختلف ترک برای آلیاژ پایه و آلیاژ تیتانیوم، به دست آمده است.



شکل ۷- نمایی از مش بندی اطراف ترک در پره

در جدول ۵، مقادیر ضریب شدت تنش، برای سه مود بارگذاری ترک، برای آلیاژ پایه و آلیاژ تیتانیوم نسبت به چقرمگی شکست محاسبه شده است. ضریب شدت تنش در مود اول، مود دوم و مود سوم به ترتیب با نمادهای، K_{III} ، K_{II} ، K_I نشان داده شده است.

جدول ۵- مقادیر ضریب شدت تنش برای آلیاژ پایه و آلیاژ تیتانیوم

نوع آلیاژ	ضریب شدت تنش بر حسب $MPa\sqrt{m}$		
	K_I	K_{II}	K_{III}
آلیاژ پایه	۱۵۶/۱۵	۵۲/۸	۳۶/۸۲
آلیاژ تیتانیوم	۷۵/۹	۲۶/۵۸	۱۸/۲۸

طبق مقادیر شدت تنش به دست آمده برای دو آلیاژ در جدول ۵، زمانی که جنس پره از آلیاژ تیتانیوم در نظر گرفته شود، ضریب شدت تنش کمتری به دست آمده و در نتیجه با کمتر شدن این ضریب، تنش نرمال و برشی کمتری به محل اعمال ترک در ریشه پره اعمال می‌شود.

۷- نتیجه گیری و جمع بندی

در این مقاله، مزیت استفاده از آلیاژ تیتانیوم به جای آلیاژ فولاد در جنس پره‌های آخرین مرحله توربین بخار نیروگاه رامین به منظور افزایش عمر پره بررسی شد. در ابتدا مدل هندسی از پره توربین تهیه شد و سپس توسط نرم افزار Ansys مورد تحلیل قرار گرفت. در ادامه برخی از نتایج حاصل از این مطالعه آورده شده است.

(۱) طبق نتایج به دست آمده در تحلیل دینامیکی، زمانی که جنس پره آلیاژ تیتانیوم در نظر گرفته شود، شرایط ارتعاشاتی بهتری در پره ایجاد می‌شود.

(۲) در تحلیل تنش، زمانی که از آلیاژ تیتانیوم در پره استفاده می‌شود، تنش ون میسر به دست آمده تقریباً برابر با نصف تنش به دست آمده از آلیاژ فولادی می‌باشد. در نتیجه می‌توان با استفاده از آلیاژ تیتانیوم مقدار تنش ایجاد شده در پره بر اثر نیروی گریز از مرکز را