مجله علمی ترویجی انجمن مهندسان مکانیک ایران
ISSN: 1605-9719
سال ۲۷، شماره ۱۲۱، صفحات ۳۶–۴۲

ارائه راهکار برای کاهش تغییر شکل پوسته توربین

محمد ولی‌زاده[۱ و *]، علیرضا شهرابی فراهانی[۲]
[۱] کارشناس واحد آیرودینامیک گروه کمپرسور، شرکت دانش بنیان توربو کمپرسور تک خاورمیانه (توربوتک)
[۲] مدیر گروه کمپرسور، شرکت دانش بنیان توربو کمپرسور تک خاورمیانه (توربوتک)
*مسئول مکاتبات: valizade.mo@gmail.com

چکیده

یکی از مشکلات جدی در نیروگاه‌های تولید توان، تغییر شکل پوسته توربین و به تبع آن ارتعاش موتور است که منجر به آسیب دیدن توربین و اجزای داخلی، توقف واحد و نیز افزایش هزینه تعمیرات می‌شود. با تغییر لقی نوک پره‌ها در اثر تغییر شکل پوسته، افت افزایش یافته و بازده توربین کاهش می‌یابد. تغییر شکل شدید پوسته، برهم‌کنش قسمت‌های ثابت و متحرک توربین را در بر می‌گیرد که مسبب آن تعدادی عامل‌های استاتیکی و دینامیکی می‌باشد. پوسته توربین از دو قسمت تشکیل شده که از طریق فلنج با پیچ به هم متصل می‌شوند. از آنجا که سازه پوسته در نقاط مختلف خود در تماس با جریان گاز اصلی و سیال خنک‌کاری می‌باشد، توزیع دما در سیال پیرامون تأثیر مستقیمی بر توزیع حرارت سازه خواهد داشت. دو قسمت بودن پوسته و وجود فلنج‌های ضخیم نسبت به پوسته جهت جلوگیری از نشتی، منشأ اصلی تغییر شکل پوسته در اثر بارهای حرارتی و فشاری اعمال شده می‌باشد. در مقاله حاضر دلایل مختلف تغییر شکل پوسته با تمرکز بر اثرات گرادیان دمایی و چگونگی آن بررسی شده است. در ادامه راهکارهای عملی جهت کاهش تغییر شکل پوسته ارائه شده است. راهکارهای مطرح شده برای پوسته‌های با هندسه پیچیده نیز که در اثر وجود گرادیان‌های دمایی بالا دچار تغییر شکل می‌شوند، کاربرد دارد.

واژگان کلیدی

توربین
تغییر شکل پوسته
گرادیان دما
راهکار

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۷/۰۳
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۲۶

۱ مقدمه

یکی از مشکلات توربین‌های صنعتی تغییر شکل[۱] پوسته[۲] است که به دلیل پاسخ توربین به تغییرات شرایط فشاری و دمایی در طول کارکرد توربین می‌باشد. پوسته کمپرسور و توربین از دو قسمت تشکیل شده که از طریق فلنج‌ها[۳] با پیچ به هم وصل می‌شوند [۱]. وجود گرادیان‌های دمایی بزرگ در پوسته‌های با هندسه پیچیده که تحت تأثیر بارهای سه‌بعدی قرار دارند، معمول است. وجود گرادیان دمایی در هندسه‌های پیچیده باعث ایجاد تغییر شکل قابل توجه در پوسته‌های داخلی و خارجی می‌گردد. با تغییر شکل پوسته، افت جریان در نوک پره‌ها و درزبندهای[۴] توربین افزایش یافته و بازده کاهش می‌یابد [۲]. بنابراین با توجه به اهمیت مسأله باید راهکارهایی برای به حداقل رساندن تغییر شکل پوسته به کار برده شود. از آنجا که بیش‌تر راهکارها جنبه تجربی داشته و تحقیقات محدودی در این زمینه منتشر شده [۲]، در این مقاله سعی شده راهکارهای عملی برای کاهش تغییر شکل پوسته ارائه شود. بدین منظور ابتدا دلایل و نحوه تغییر شکل پوسته بیان شده و در ادامه به بررسی راهکارهای عملی پرداخته شده است.

۲ تغییر شکل پوسته

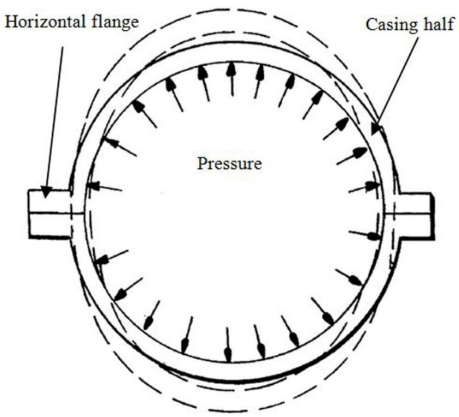
دلایل مختلف زیادی وجود دارد که باعث تغییر شکل پوسته می‌شوند. این دلایل را می‌توان به صورت زیر تقسیم‌بندی کرد:

- طراحی
- ساخت
- مونتاژ
- شرایط بهره‌برداری

از دلایل مربوط به طراحی می‌توان به ابعاد پوسته، پایداری ابعادی مواد استفاده شده، وجود یا عدم مفاصل افقی، طراحی پیچ‌ها، نگهدارنده‌های خارجی پوسته و هر قطعه داخلی که به پوسته متصل باشد، اشاره کرد. از جنبه ساخت می‌توان به بررسی دقت ابعادی ریخته‌گری، میزان عیوب عملیات ریخته‌گری، عملیات حرارتی ریخته‌گری (در صورت وجود)، دقت ماشین‌کاری و هرگونه جوش تعمیراتی پرداخت. در رابطه با مونتاژ می‌توان نگهداری پوسته برای مونتاژ و ترتیب پیچ‌بندی[۵] را در نظر گرفت. همچنین از دلایل تغییر شکل پوسته در شرایط بهره‌برداری می‌توان تعداد و شدت روشن و خاموش کردن توربین، نگهداری نامناسب سیستم خنک‌کاری پوسته و نگهداری نامناسب عایق[۶] روی پوسته (در صورت وجود) را بیان کرد [۳]. مطابق شکل ۱ با توجه به دو قسمت بودن پوسته، نابرابری جرم حرارتی[۷] پوسته نازک و فلنج‌های ضخیم منشأ اصلی تغییر شکل پوسته می‌باشد. نابرابری جرم حرارتی بدین معنی است که فلنج و پوسته با نرخ‌های متفاوتی گرم و سرد می‌شوند [۳]. به عبارتی جرم زیاد فلنج باعث می‌شود که پاسخ فلنج از لحاظ حرارتی آهسته‌تر از زمان لازم برای یکنواختی پوسته شود [۱]. تفاوت انبساط حرارتی این اجزا سبب ایجاد تنش و کرنش‌های حرارتی خواهد شد. بنابراین تنش‌ها و

[1] Distortion [2] Casing [3] Flange [4] Seal [5] Bolting sequence [6] Insulation [7] Thermal mass

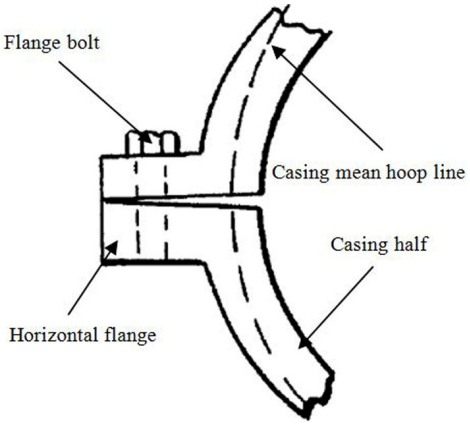
کرنش‌های حرارتی به وجود آمده باعث تغییر شکل پوسته می‌شوند [۳]. در مرجع [۲] بیان شده که وجود فلنج باعث ایجاد نیروهای ناشی از فلنج[1] شده که تغییر شکل بیضوی پوسته را به همراه خواهد داشت. علاوه بر جرم زیاد، گرادیان دمایی بزرگ در فلنج باعث تغییر شکل پوسته به سمت داخل به دلیل کرنش حرارتی محوری می‌شود. عموما فلنج افقی به دلیل جرم زیاد آن آهسته‌تر از سایر قسمت‌های پوسته به تنش‌های حرارتی پاسخ می‌دهد و در نتیجه فلنج‌های افقی در راستای شعاعی به سمت داخل منحرف می‌شوند [۱].



شکل ۱: تغییر شکل پوسته در اثر فشارهای داخلی [۱]

یکی دیگر از دلایل تغییر شکل پوسته که منشأ آن گرادیان دمایی در راستای شعاعی می‌باشد، عدم تقارن ضخامت فلز[2] در راستای محیطی پوسته است که در معرض جریان سیال بوده و ناشی از تغییرات اثر انبساط حرارتی است [۲].

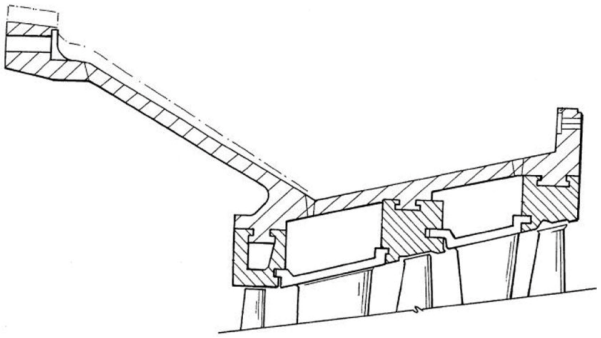
دلیل دیگر تغییر شکل، فشارهای داخلی پوسته می‌باشد. همان طور که در شکل ۲ دیده می‌شود به نظر می‌رسد یک افست[3] بین خط مرکزی سوراخ پیچ‌ها و خط میانگین حلقه پوسته[4] در فلنج‌ها وجود داشته باشد. به عبارت دیگر از آنجا که پیچ‌هایی که فلنج‌های افقی را به هم متصل می‌کنند بیرون از محدوده حلقه پوسته می‌باشد، یک افست بین خط مرکزی پیچ‌ها و خط حلقه میانی پوسته توربین به وجود می‌آید. به دلیل وجود این افست، توسط تنش محیطی منتقل شده از میان پیچ‌ها حالتی به وجود می‌آید که منجر به تغییر شکل پوسته در راستای شعاعی به سمت داخل می‌شود [۱].



شکل ۲: جابجایی فلنج‌های افقی به سمت داخل در اثر تغییر شکل پوسته [۱]

از طرف دیگر پوسته فقط در راستای شعاعی تمایل به تغییر شکل ندارد، بلکه گرادیان دمایی در راستای محوری باعث رل[5] شدن پوسته در صفحه نصف‌النهاری می‌شود. در صورت رل شدن پوسته با توجه به افزایش لقی[6] نوک پره‌های روتور عملکرد توربین به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد [۱]. در شکل ۳ خطوط خط چین، رل شدن پوسته را در صفحه نصف‌النهاری نشان می‌دهد.

میشل و همکاران [۳] یک تحلیل دو بعدی برای درک اتفاقی که برای پوسته به دلیل گرادیان دمایی در شرایط عملکردی، به ویژه روشن و خاموش شدن توربین می‌افتد، انجام دادند. مدل مورد نظر شامل یک پوسته نازک با فلنج‌های ضخیم بدون در نظر گرفتن پیچ‌ها و فیلت فلنج‌ها بود. آنها دو نوع تحلیل روی مدل انجام دادند. در مورد اول پوسته در حال گرم شدن، مدل‌سازی شده که در آن قسمت بالا و پایین پوسته به عنوان گرم‌ترین قسمت پوسته می‌باشد. یک شرایط مشابه این حالت ممکن است زمانی که خنک‌کاری پوسته در قسمت میانی باشد، اتفاق افتد که در این حالت طرفین پوسته سردتر از قسمت بالا و پایین پوسته می‌باشد. مورد دوم تحلیل مدل‌سازی شرایط خاموش شدن توربین است.



شکل ۳: رل شدن پوسته در صفحه نصف‌النهاری [۱]

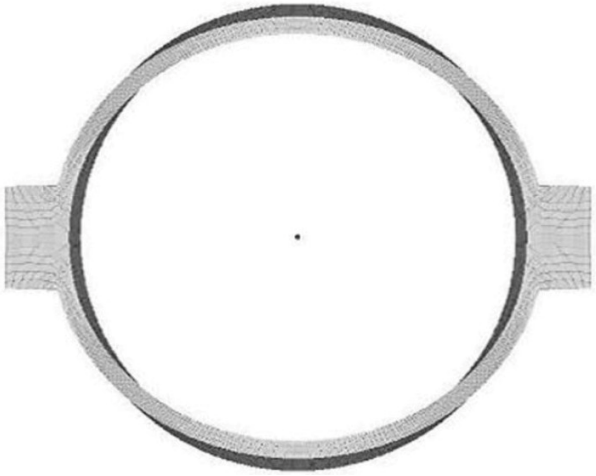
در مورد اول زمانی که قسمت بالا و پایین پوسته گرم‌ترین بخش آن باشد، پوسته در پاسخ به دماهای بالاتر در راستای قسمت بالایی و پایینی منبسط می‌شود. این انبساط باعث می‌شود که مطابق شکل ۴ پوسته در راستای افقی بیضی شکل شود.

با مدل کردن شرایط خاموش شدن توربین، می‌توان تغییر شکل پوسته را در طول خنک‌شدن آن تحلیل کرد. پوسته نازک خیلی سریع‌تر از فلنج افقی ضخیم خنک می‌شود. نتایج نشان داد زمانی که پوسته سرد می‌شود، پوسته منقبض شده در حالی که فلنج‌ها هنوز گرم و منبسط می‌باشد. این مسأله باعث می‌شود که مطابق شکل ۵ پوسته در قسمت فلنج‌ها در راستای شعاعی به سمت داخل انحراف پیدا کند. در شکل ۴ و شکل ۵ حلقه پر رنگ، پوسته را در نسخه اصلی نشان می‌دهد. همچنین تحلیل‌ها بدون در نظر گرفتن فشار داخلی انجام شده است.

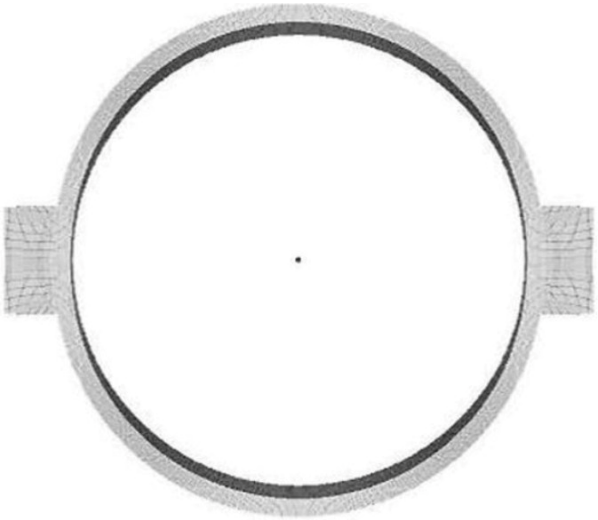
نتایج تحلیل تنش مرجع [۳] نشان داد که پوسته می‌تواند در راستای افقی یا عمودی بیضی شکل شود. در طول روشن شدن و یا زمانی که در طول کارکرد قسمت بالا و پایین پوسته بسیار گرم شود، مطابق شکل ۴ پوسته در راستای افقی بیضی شکل می‌شود (کوچک‌ترین قطر بیضی در راستای عمودی

[1]Flange Pulling (FP) [2]Metal Thickness Asymmetry (MTA) [3]Offset [4]Casing mean hoop line [5]Roll [6]Clearance

می‌باشد). در حالی که در اثر سرد شدن متفاوت پوسته و فلنج‌ها در طول خاموش شدن، مطابق شکل ۵ پوسته در راستای عمودی بیضی شکل می‌شود (کوچک‌ترین قطر بیضی در راستای افقی می‌باشد). نتایج مذکور با تحلیل تنش‌های انجام شده توسط جنرال الکتریک، سازگار است و نشان می‌دهد که دلیل این تغییر شکل‌ها غیریکنواختی دمای پوسته و فلنج‌ها می‌باشد [۳].



شکل ۴: جابجایی پوسته در صورتی که دمای قسمت‌های بالا و پایین بیشتر از طرفین باشد [۳]



شکل ۵: جابجایی پوسته در صورت خاموش شدن [۳]

پورسعیدی و همکاران [۴] به بررسی اثر گرادیان دمایی بر پوسته کمپرسور پرداختند. توربین گازی مطالعه شده، توربین فریم ۶ شرکت جنرال الکتریک با حدود ۱۰ سال کارکرد بود. نتایج تحقیق آنها نشان داد که بیشتر شکست‌ها در پوسته در ابتدای فصول سرد سال به دلیل توزیع غیر یکنواخت دما روی پوسته که باعث تغییر شکل آن می‌شود اتفاق می‌افتد. در واقع تغییر شکل پوسته، لقی بین پره‌های ردیف اول کمپرسور و پوسته را کاهش می‌دهد. در این حالت ممکن است در اثر ارتعاشات بین قسمت‌های ثابت و متحرک برخورد رخ داده و باعث آسیب دیدن اجزای داخلی و پوسته شود. آنها برای جلوگیری از بروز این مشکل اصلاح فرآیند خنک‌کاری پوسته را مطرح کردند.

در تحقیقی دیگر پورسعیدی و همکاران [۵] تأثیر غیریکنواختی توزیع دما روی پوسته توربین موتور فریم ۹ را بررسی کردند. آنها ابتدا به تحلیل تنش پوسته ناشی از بارهای حرارتی در سه حالت مختلف کاری پرداختند. سپس نتایج عددی بدست آمده را با داده‌های تجربی حاصل از ترموگرافی پوسته مقایسه کردند. آنها محل‌هایی از پوسته که دارای تمرکز تنش بالا بوده و ترک‌های به وجود آمده را نشان دادند. پس از شناسایی می‌بایست این محل‌ها با یکی از راهکارهای موجود اصلاح شده تا از تغییر شکل خارج از تلرانس پوسته و ترک خوردن آن جلوگیری شود.

همان طور که اشاره شد اختلاف دما در داخل و بین قسمت‌های مختلف توربین به دلیل روشن شدن، خاموش شدن، تغییر بار و نیز کارکرد در حالت پایا به وجود می‌آید. این اختلاف دما با طراحی و عملیات درست می‌تواند کاهش یابد ولی جلوگیری از آن به طور کلی تقریبا ناممکن است. برای اطمینان از صحت کارکرد توربین در همه شرایط لازم است که تغییر شکل حرارتی به دقت در فرآیند طراحی تحلیل شود. دست کم گرفتن تغییر شکل حرارتی می‌تواند باعث نشتی مفاصل و نیز سایش بین قطعات استاتور و روتور شده و بر لقی محوری و شعاعی تأثیر بگذارد [۶]. در توربین‌های صنعتی عوامل مختلفی بر مقدار لقی شعاعی تأثیر می‌گذارد [۵]:

- اختلاف حرارتی پره‌های روتور و استاتور نسبت به پوسته یا شفت به دلیل سریع‌تر گرم شدن
- تغییر شکل پوسته به دلیل اختلاف دمای پوسته و فلنج‌های افقی (بیضی شکل شدن پوسته)
- تغییر شکل پوسته به دلیل اختلاف دمای قسمت بالایی و پایینی پوسته
- تغییر شکل ناشی از دینامیک روتور
- تلرانس‌های ساخت و مونتاژ

در طول شرایط گذرای توربین، تغییر دمای پره‌ها نسبت به پوسته و شفت سریع‌تر است. نتیجه‌ی تفاوت انبساط حرارتی در راستای شعاعی تغییر در مقدار لقی می‌باشد. لازم به ذکر است برای افزایش الاستیسیته حرارتی، توربین صنعتی با یک پوسته خارجی که حامل پوسته درونی و نگهدارنده پره‌ها می‌باشد طراحی می‌شود. غیریکنواختی انبساط حرارتی قسمت‌های بالا و پایین پوسته باعث تغییر شکل پوسته در راستای عمودی و جابجایی اتصالات می‌شود. بسته به طراحی پوسته توربین، تغییرات لقی در راستای شعاعی می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر توربین صنعتی بگذارد [۶].

لازم به ذکر است تغییر شکل پوسته که در شکل‌های ۱ تا ۵ نشان داده شده به صورت اغراق‌آمیز ترسیم شده است. همان طور که اشاره شد تغییر شکل پوسته باعث تغییر لقی شده که ممکن است منجر به برخورد اجزای ثابت و متحرک شود. در اینجا منظور از مقدار لقی، حدود ۱ mm یا کمتر می‌باشد. لقی بین پره‌های روتور تا پوسته نیز معمولا حدود ۱ تا ۲ درصد کرد[1] پره می‌باشد. بنابراین با توجه به مقدار لقی‌ها و تغییر آن در اثر تغییر شکل پوسته در مقیاس ذکر شده، می‌توان پی برد که تغییر شکل پوسته با دید چشمی محسوس نمی‌باشد. در شکل ۶ نمونه‌ای از تغییر شکل پوسته کمپرسور یک توربین گاز نشان داده شده است. به دلیل گرادیان دمایی خارج از تلرانس، پوسته تغییر شکل داده و بین پوسته بالایی و پوسته پایینی لقی ایجاد شده است. مطابق شکل ۶ لقی به وجود آمده را با فیلر زدن بین فلنج‌هامی‌توان

[1] Chord

تشخیص داد. این تغییر شکل پوسته باعث نشتی جریان شده و افت عملکرد کمپرسور را به دنبال خواهد داشت.

شکل ۶: شناسایی تغییر شکل پوسته کمپرسور یک توربین گاز با فیلرزنی

۳ ارائه راهکار

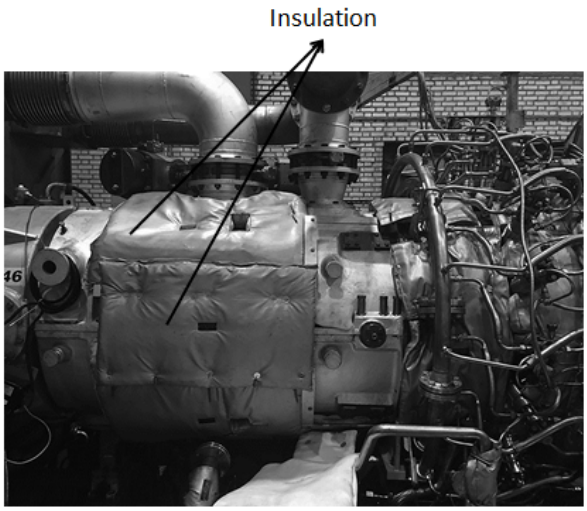
در این بخش از مقاله چندین راهکار و روش عملی برای کاهش تغییر شکل پوسته ارائه شده است. لازم به ذکر است راهکارهای ارائه شده برای پوسته‌های با هندسه پیچیده نیز که در اثر وجود گرادیان دمایی دچار تغییر شکل شده‌اند، کاربرد دارد.

۱.۳ استفاده از عایق (پتویی)

استفاده از عایق (پتویی) روی پوسته توربین برای کنترل کردن لقی نوک پره‌های روتور بسیار کاربردی است. عایق به عنوان یک سپر حرارتی در برابر شرایط مرزی متغیر و ناشناخته عمل می‌کند. همچنین عایق، نایکنواختی حرارتی پوسته (و یا روتور) را بهبود می‌بخشد [۱].

توربین ممکن است به دلیل عایق‌بندی حرارتی ناکافی پوسته و یا عایق‌بندی ضعیف در سایر نواحی دارای گرادیان دمایی باشد. مسبب اتلاف حرارتی عایق، می‌تواند عایق‌بندی ضعیف در اتصالات بین مفصل‌ها و لوله‌ها به پوسته به ویژه در ناحیه پایین توربین باشد. برای مثال عایق‌بندی ضعیف در پایین پوسته می‌تواند باعث ایجاد یک گرادیان دمایی از بالا به پایین پوسته شود که در اثر آن، پوسته دچار تغییر شکل شود. بنابراین عایق‌بندی پوسته حتما باید به صورت دقیق به ویژه در جاهای حساس‌تر به درستی انجام شود. سازندگان توربین یک گرادیان دمایی قابل قبول برای پوسته تعریف می‌کنند که نباید از یک حدی بیش‌تر شود [۷].

عایق روی پوسته معمولا دارای چندین لایه می‌باشد. لایه اصلی که به عنوان عایق حرارتی عمل می‌کند از جنس پشم سنگ است که با پارچه ضخیم پوشانده می‌شود. آن قسمت از پشم سنگ که رو به پوسته است با یک پارچه فایبرگلاس مقاوم به حرارت بالا پوشانده می‌شود. سمت دیگر لایه نیز با یک پارچه سیلیکونی از محیط جدا می‌شود. در بخش توربین با توجه به حرارت بالاتر نسبت به کمپرسور، معمولا یک ورق فلزی نیز روی عایق بسته می‌شود. لازم به ذکر است ضخامت لایه‌های عایق و نوع پشم سنگ بسته به شرایط کاری و محل به کارگیری ممکن است متفاوت باشد. شکل ۷ عایق روی پوسته کمپرسور یک توربین گاز را نشان می‌دهد.



شکل ۷: عایق پوسته

۲.۳ گرم کردن الکتریکی

در توربین‌های صنعتی هر چه پوسته بزرگ‌تر باشد اعوجاج ناشی از حرارت بیش‌تر و اثرگذارتر خواهد بود. توربین بخار به دلیل داشتن پوسته بزرگ و ضخیم اثرات حرارتی و به تبع آن تغییر شکل‌های قابل توجهی را تجربه می‌کند به طوری که سازندگان توربین‌های بخار در طول طراحی و همین طور بهره‌برداری به آن توجه ویژه‌ای دارند. در توربین‌های بخار در طول روشن شدن سرد، ورودی با بخار پیش گرم می‌شود. بنابراین با توجه به انتقال حرارت رسانشی، پوسته بالایی نسبت به پوسته پایینی گرم‌تر می‌شود. بعد از پیش گرم شدن، شیرهای کنترل باز شده و بخار با دبی جرمی پایین وارد مسیر پره‌های توربین می‌گردد. با خروج بخار و کارکرد توربین در بارهای پایین، تمایل به افزایش اختلاف دما در قسمت خروجی بیش‌تر می‌شود. با بستن خروجی، بخار مجبور می‌شود که از پوسته بالایی عبور کند که منجر به انتقال حرارت قابل توجه در پوسته بالا نسبت به پوسته پایین می‌شود. وقتی که توان خروجی مورد نظر از توربین گرفته شد، خط خروجی باز شده و اختلاف دماها کاهش می‌یابد. همچنین اختلاف دما در طول خنک‌کاری بعد از خاموش شدن نیز مشاهده می‌شود. از این طریق پوسته پایینی به دلیل انتقال حرارت لوله‌های خروجی که به پوسته پایین متصل‌اند، سریع‌تر خنک می‌شود. راهکار ارائه شده در این زمینه گرم کردن الکتریکی پوسته پایین می‌باشد که امکان کم کردن اختلاف دما را تا حدودی امکان‌پذیر می‌کند [۶].

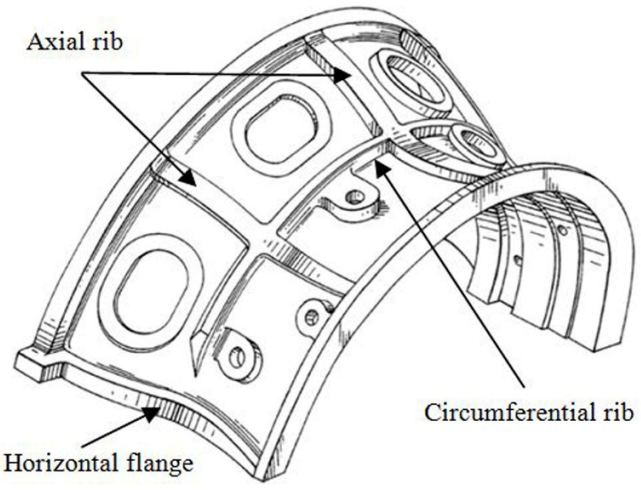
۳.۳ تقویت پوسته با تیغه‌های محیطی و محوری

لازم به ذکر است که به طور کلی با افزایش فشار، دمای گاز بالا می‌رود. بنابراین در جایی که فشار بالا به پوسته اعمال می‌شود به تبع با ایجاد گرادیان دمایی بالاتر مشکلات ناشی از دما نیز بیش‌تر خواهد بود. همان طور که در شکل ۸ نشان داده شده یک راهکار برای کنترل پاسخ حرارتی در طول روشن

و خاموش کردن توربین و کاهش تغییر شکل پوسته ناشی از فشارهای داخلی، استفاده از تیغه[1] محیطی می‌باشد.

تیغه محیطی روی پوسته از دو طرف تقریبا تا نزدیک فلنج افقی امتداد یافته است. با استفاده از تیغه محیطی روی قسمت بالایی و پایینی پوسته، تغییر شکل ناشی از فشار داخلی به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. تیغه محیطی در برابر انحراف فلنج‌های افقی به طرف داخل مطابق شکل ۲ (به دلیل افست خط مرکزی پیچ‌ها از خط مرکز پوسته) مقاومت می‌کند. در واقع تیغه محیطی اثر افست خط مرکزی پیچ‌ها و جابجایی به طرف داخل در راستای شعاعی را به حداقل می‌رساند. نتایج نشان داده است که با به کارگیری یک تیغه محیطی در یک صفحه شعاعی (به ویژه روی محل پره‌های روتور)، لقی نوک پره‌ها در شرایط گذرای حرارتی کاهش می‌یابد. همچنین تیغه در برابر رل شدن پوسته مطابق شکل ۳ در صفحه نصف‌النهاری مربوط به شرایط گذرای حرارتی ایجاد شده در اثر فشار بالای اطراف پوسته مقاومت می‌کند. در توربین این حالت که در اثر فشار و دمای محفظه احتراق اعمال می‌شود، به صورت تنش محیطی به تیغه انتقال پیدا کرده و باعث کاهش رل شدن پوسته می‌شود [۱].

به علاوه مطابق شکل ۸ می‌توان از یک یا چند تیغه محوری روی پوسته استفاده کرد. این تیغه‌های محوری، تعادلی در سختی[2] و مقدار جرم حرارتی فلنج افقی ایجاد می‌کنند. با توجه به سوراخ‌های موجود در فلنج افقی برای بستن پیچ، کرنش در فلنج افقی کاهش می‌یابد. این مسأله باعث می‌شود که بتوان تیغه‌های محوری را کوچک‌تر (به عبارتی با جرم کمتر) از فلنج افقی طراحی کرد. با توجه به وجود تعدادی سوراخ در فلنج افقی، سختی آن در راستای شعاعی کاهش یافته است. بنابراین تنها لازم است که در سختی شعاعی فلنج افقی تعادل ایجاد شود [۱].



شکل ۸: تیغه محیطی و محوری روی پوسته [۳]

از این منظر که تنش‌های حرارتی اعمال شده در پوسته کمپرسور به اندازه تنش‌های حرارتی پوسته توربین نیست، نیازی به استفاده از تیغه محیطی در پوسته کمپرسور نمی‌باشد، اگر چه برای کنترل تغییر شکل محیطی در پوسته کمپرسور می‌تواند به کار برده شود. این در حالی است که استفاده از یک یا چند تیغه محوری در پوسته کمپرسور معمول است. توضیحات مربوط به سختی و کاهش اندازه و یا جرم تیغه محوری همانند کاربرد آن در پوسته توربین می‌باشد [۱].

۴.۳ پتوی فلزی

برای کاهش تغییر شکل ناشی از عدم تقارن ضخامت فلز می‌توان یک ورق فلزی برای دیوار بیرونی پوسته به عنوان پتوی فلزی[3] به کار برد. لازم به ذکر است که با توجه به پیچیدگی هندسه پوسته و تغییرات گرادیان دمایی در راستای شعاعی در مسیر جریان، این روش کار دشواری می‌باشد. با این حال در مرجع [۲] راهکار ارائه شده به این صورت می‌باشد که تغییر شکل روی دیواره داخلی پوسته در راستای محیطی، با تغییر مقیاس به عنوان پتوی فلزی روی دیواره خارجی پوسته به کار برده شود.

۵.۳ اصلاح پوسته

معمولا فلنج افقی برای بستن پیچ‌های مناسب جهت جلوگیری از نشتی، بسیار ضخیم طراحی می‌شوند. در این قسمت برای کاهش تغییر شکل پوسته در اثر نیروهای ناشی از فلنج از دو روش اصلاحی به صورت همزمان استفاده می‌شود.

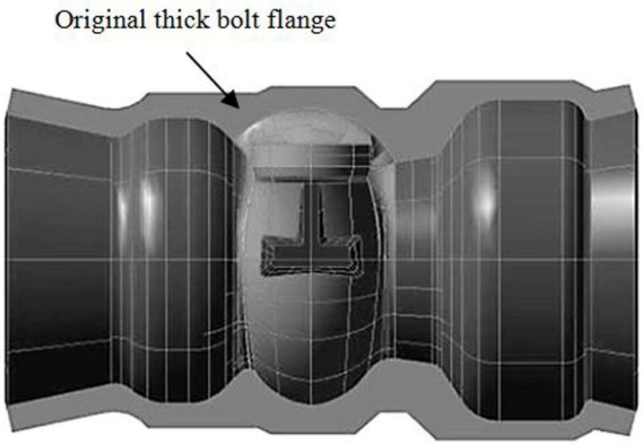
در روش اول ضخامت فلنج را تا جایی که ممکن است کم می‌کنند تا در راستای محوری یکنواخت شود. در واقع ماده بین پیچ‌ها برای کاهش کرنش در فلنج حذف شده و مقدار ماده کمتری برای ساخت پوسته استفاده می‌شود. در روش دوم در فلنج بریدگی‌هایی[4] برای آزاد کردن نیروهای ناشی از فلنج ایجاد می‌شود.

طراحی این بریدگی‌ها نیازمند تعدادی آزمون سعی و خطا است. محل و مقدار عمق بریدگی‌ها دو پارامتر مهم در این روش است که بستگی به طراحی پوسته و بارهای حرارتی اعمال شده دارد. قابل توجه است در صورتی که محل بریدگی‌ها و یا عمق آنها نادرست باشد، با عوض شدن نحوه تغییر شکل پوسته، این روش اثر معکوس خواهد داشت. همچنین باید دقت شود که این بریدگی‌ها محل تمرکز تنش نشود.

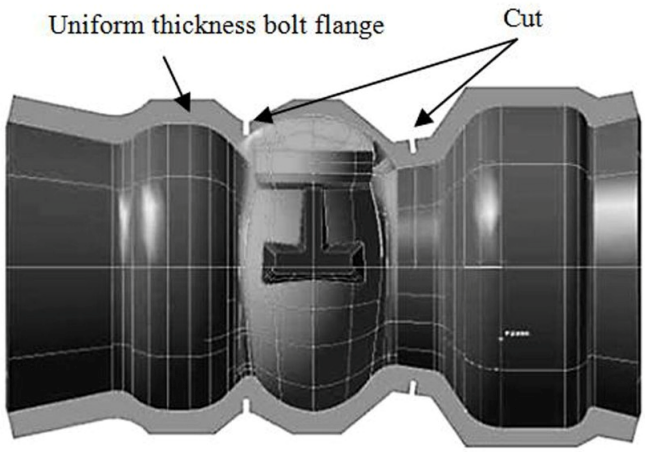
لازم است که جهت حفظ جزئیات محل و عمق، بریدگی‌ها با شعاع بزرگ طراحی شوند. شکل ۹ پوسته یک توربین بخار را قبل و بعد از اعمال اصلاحات فلنج نشان می‌دهد. این روش بسیار کارآمد بوده و برای پوسته‌های داخلی توربین‌های بخار شرکت آلستوم به کار برده شده است. مزیت آن متعادل کردن نیروهایی است که باعث کرنش می‌شوند، بنابراین به عنوان راه حل مناسبی به کار برده می‌شود [۲]. در حالی که این روش تغییر شکل پوسته را کاهش می‌دهد، ممکن است مشکلاتی مانند نشتی فلنج را به همراه داشته باشد. در نتیجه به دلیل فشارهای داخلی زیاد، این روش باید با دقت بالا به کار برده شود [۱].

پورسعیدی و همکاران [۵–۸] نیز در محل‌هایی از پوسته فریم ۹ که دارای تمرکز تنش حرارتی بالا بود را اصلاح کردند. آنها در پوسته در محل‌های مورد نظر چند سوراخ ایجاد کرده و با پین پر کردند. با این کار توانستند از رشد ترک‌ها در پوسته و تغییر شکل آن جلوگیری کنند.

[1] Rib [2] Stiffness [3] Metal blanket [4] Cut



(الف) پوسته اصلی با فلنج افقی ضخیم [۲]



(ب) اصلاح پوسته با یکنواخت کردن ضخامت فلنج افقی و ایجاد بریدگی‌ها [۲]

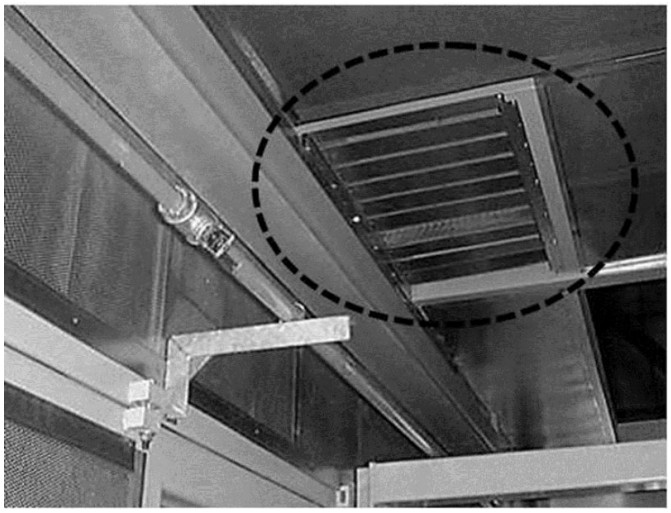
شکل ۹: اصلاح فلنج برای کاهش تغییر شکل پوسته [۲]

۶.۳ کاهش فاصله بین خط مرکزی پیچ و خط میانگین حلقه پوسته

روش دیگر برای کنترل تغییر شکل پوسته، کاهش فاصله بین خط مرکزی پیچ و خط میانگین حلقه پوسته می‌باشد. این روش حالتی را که به دلیل وجود فلنج به وجود آمده کاهش می‌دهد ولی نیازمند افزایش مقدار قابل توجهی ماده به فلنج می‌باشد. این افزایش ماده، افزایش جرم حرارتی فلنج را به همراه خواهد داشت که با پاسخ آهسته‌تر فلنج نسبت به سایر بخش‌های پوسته منجر به تنش‌های حرارتی خواهد شد. همچنین این روش به دلیل ماده اضافه و ماشین‌کاری‌های قابل توجه هزینه‌بر است. در این روش با توجه به گرادیان حرارتی بزرگ در ماده اضافه شده باید بسیار دقت شود که فلنج در اثر کرنش‌های ایجاد شده در راستای شعاعی به طرف داخل تغییر شکل ندهد [۱].

۷.۳ تغییر زاویه لوور

در بعضی از واحدهای توربین گاز شرکت زیمنس[1] ، بعد از این که توربین در بار کامل تریپ می‌خورد دامنه‌ی ارتعاشات در حین راه‌اندازی گرم افزایش می‌یابد و بعد از برقراری شرایط پایای حرارتی ارتعاشات به حالت عادی باز می‌گردد. از آنجا که در اوایل خاموش شدن توربین دمای قسمت بالایی پوسته نسبت به قسمت پایینی اختلاف زیادی دارد، باعث ایجاد عدم تقارن دمای پوسته در محل درزبند می‌شود که به نوبه خود سبب سایش بین قسمت ثابت و چرخان می‌گردد [۹]. شرکت زیمنس تغییر زاویه لوورها را به عنوان راهکار ارائه داده است. در شکل ۱۰ محل لوور در اتاق یک توربین گاز نشان داده شده است. با توجه به دمای بیش‌تر قسمت بالایی پوسته نسبت به قسمت پایین، در واقع زاویه لوورها[2] را به گونه‌ای تنظیم می‌کنند که هوای ورودی به اتاق از طریق لوورها، به قسمت بالایی پوسته برخورد کند. با این کار دمای قسمت بالای پوسته تا حدودی کاهش یافته و اختلاف دمایی آن با قسمت پایین کم می‌شود.



شکل ۱۰: تغییر زاویه لوورها [۹]

۸.۳ تغییر لاجیک شیر تخلیه

با توجه به مشکل مطرح شده در بخش ۷.۳، یکی دیگر از راهکارهای ارائه شده توسط زیمنس تغییر لاجیک شیر تخلیه می‌باشد. در واقع پیشنهاد شده است که شیر تخلیه در اوایل خاموش شدن توربین باز شود [۹]. همان طور که اشاره شد دمای قسمت بالای پوسته نسبت به قسمت پایین بیش‌تر می‌باشد. باز کردن شیر تخلیه باعث می‌شود که هوا از درون کویتی (فشار بالا) پوسته عبور کند. با توجه به موقعیت خروجی شیر در قسمت بالایی پوسته، سرعت خروج هوا در پوسته بالایی بیش‌تر می‌باشد. بنابراین ضریب انتقال حرارت در پوسته بالایی بیش‌تر بوده و نسبت به قسمت پایین بیش‌تر خنک می‌شود. از این طریق تا حدودی اختلاف دمای بین قسمت بالا و پایین پوسته کاهش یافته و گرادیان دمایی کم می‌شود.

۹.۳ تغییر روش ساخت پوسته

سازه تولید شده با روش فورجینگ به مراتب بهتر از روش ریخته‌گری می‌باشد. از جمله مزیت‌های فورجینگ نسبت به ریخته‌گری خلل و فرج کمتر به ویژه در سطوح، مقاومت تنشی بالاتر، ساختار دانه‌ای بهتر، مقاومت خستگی بهتر و قابلیت چکش‌پذیری بیش‌تر می‌باشد. با توجه به گرادیان‌های دمایی بالا در

[1]Siemens Gas Turbine-600 (SGT-600) [2]Louver

پوسته‌های توربین، شرکت سولزر[1] تحقیقاتی در رابطه با ساخت پوسته‌های توربین با کیفیت بسیار بالا و مقاوم در برابر خزش برای جایگزینی با پوسته‌های ریخته‌گری جهت افزایش عمرانجام داده است. همچنین تأکید کرده‌اند که نبود سیستم خنک‌کاری مناسب برای پوسته‌های توربین، باعث تغییر شکل ناگهانی و زود هنگام، ایجاد ترک و شکست خواهد شد. با توجه به ایجاد ناهمگنی در فرآیند ریخته‌گری، در پوسته‌های ریخته‌گری شده تعداد زیادی ترک و تغییر شکل قابل توجه دیده شده است. بنابراین تصمیم گرفته شد که برای کاهش تغییر شکل، پوسته از چند قطعه تولید شده با روش فورج، ساخته شده و با جوش آرگون به هم متصل شوند [۱۰].

۴ جمع‌بندی

در توربین‌های صنعتی عوامل مختلفی می‌تواند باعث تغییر شکل پوسته و به تبع آن ارتعاش موتور گردد که منجر به آسیب دیدن توربین و اجزای داخلی می‌شود. آسیب دیدن توربین با محدود کردن تولید برق و افزایش هزینه تعمیرات، اغلب باعث ایجاد مشکلات جدی می‌شود. در واقع دست کم گرفتن تغییر شکل حرارتی می‌تواند باعث نشتی مفاصل و نیز سایش بین قطعات استاتور و روتور شده و بر لقی محوری و شعاعی تأثیر بگذارد. افزایش لقی و نشتی در توربین باعث افزایش افت شده و عملکرد توربین را کاهش می‌دهد. بنابراین لازم است که راهکارهایی برای کاهش تغییر شکل پوسته ارائه شود. در مقاله حاضر به بررسی عوامل مختلف تغییر شکل پوسته با تمرکز بر اثرات گرادیان دمایی ایجاد شده پرداخته شد. با توجه به تجربی بودن راهکارها و کمبود مراجع در این زمینه، راهکارهای عملی برای کاهش تغییر شکل پوسته جمع‌بندی گردید.

مراجع

[1] Burdgick, Steven S, Hess, John R, Mercer, Gary D, Crum, Gregory A, Cencula, James E, and Eastman, John A. Casing distortion control for rotating machinery, February 25 1997. US Patent 5,605,438.

[2] McElhaney, John. Distortion compensation by shape modification of complex turbine geometries in the presence of high temperature gradients. in *ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea, and Air*, pp. 91–102. American Society of Mechanical Engineers, 2008.

[3] Mitchell, Ryan D, Bernstein, Henry L, and Talley, Peggy L. Casing distortion of ge frame 3 gas turbines. in *ASME Turbo Expo 2003, collocated with the 2003 International Joint Power Generation Conference*, pp. 119–127. American Society of Mechanical Engineers, 2003.

[4] Poursaeidi, E, Ghaemi, H, and Charmchi, M. Effects of temperature gradient on compressor casing in an industrial gas turbine. *Case Studies in Thermal Engineering*, 3:35–42, 2014.

[5] Poursaeidi, E, Taheri, M, and Farhangi, A. Non-uniform temperature distribution of turbine casing and its effect on turbine casing distortion. *Applied Thermal Engineering*, 71(1):433–444, 2014.

[6] Hesse, Christian, Schoene, Sophie, Gampe, Uwe, Kober, Juergen, and Fogt, Hannes. Semi-analytical procedure for prediction of radial clearances in industrial steam turbines. in *ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea, and Air*, pp. 2119–2126. American Society of Mechanical Engineers, 2010.

[7] Shamoradi, Farshad, Mohammadi, Naser, Kahkesh, Mahdi Heidari, et al. Steam turbine rotor vibration failures: Causes and solutions. *Power*, 157(4):62–+, 2013.

[8] Bazvandi, H and Poursaeidi, E. Improving the transient thermal fatigue life of a gas turbine casing by drilling stop holes and inserting pins into them. *AUT Journal of Mechanical Engineering*, 1(1):67–74, 2017.

[9] Petersson, L. Sgt-600 field experience. *Siemens Industrial Turbomachinery AB*, 2009.

[10] Timmermans, G. Manufacturing of power turbine casings. *SULZER TECHNICAL REVIEW*, pp. 17–19, 2002.

[1] Sulzer