

# طراحی سیستم Anti-Icing در سیستم هوای ورودی واحد گازی

## GE-F9 نیروگاه سیکل ترکیبی شهید رجایی

محمد تاجیک منصوری، مهدی ریاضت

پژوهشکده تولید نیرو

پژوهشگاه نیرو

تهران، ایران

mtajik@nri.ac.ir

مطالعه در بهره‌برداری بهینه از واحدهای گازی می‌باشد. یکی از مهمترین موضوعاتی که در بهره‌برداری توربین‌های گازی در فصول سرد می‌بایست مدنظر قرار داد، جلوگیری از تشکیل یخ در سیستم هوای ورودی این توربین‌ها است. تشکیل یخ در توربین‌های گازی منجر به بروز پدیده خفگی در سیستم هوای ورودی شده و یا می‌تواند در Bellmouth یا IGV اتفاق بیفتد که خطر ورود جسم خارجی به کمپرسور و آسیب به پره‌های آن (FOD) را بدنبال دارد.

روش‌های مختلفی جهت جلوگیری از تشکیل یخ (Anti-icing) در ورودی کمپرسورها وجود دارد که با نصب تجهیزاتی از خطر یخ‌زدگی در سیستم‌های ورودی توربین گاز جلوگیری می‌کند. در این مقاله، بررسی فنی و اقتصادی برای اضافه نمودن سیستم آنتی آیسینگ بر روی واحد گازی GE-F9 در نیروگاه سیکل ترکیبی شهید رجایی قزوین مورد بررسی قرار گرفته و سیستم مناسب طراحی و مشخصات فنی آن ارائه گردیده است.

چکیده — مطالعه عوامل و شرایط محیطی در بهره‌برداری واحدهای گازی یکی از مهمترین موضوعات مطالعه در بهره‌برداری بهینه از واحدهای گازی می‌باشد. یکی از مهمترین موضوعاتی که در بهره‌برداری توربین‌های گازی در فصول سرد می‌بایست مدنظر قرار داد، جلوگیری از تشکیل یخ در سیستم هوای ورودی این توربین‌ها است که موجب عملکرد نامناسب سیستم و توقف اجباری و یا آسیب به پره‌های کمپرسور می‌گردد. در این مقاله، راههای متداول جلوگیری از تشکیل یخ در سیستم هوای ورودی واحدهای گازی جهت بکارگیری بر روی واحد گازی GE-F9 در نیروگاه سیکل ترکیبی شهید رجایی قزوین مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین بر اساس شرایط محیطی و نیاز سیستم، سیستم مناسب Anti-icing طراحی و مشخصات فنی آن ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی — سیستم هوای ورودی، Anti-Icing توربین

گازی GE-F9، نیروگاه شهید رجایی

## ۲. پدیده یخ‌زدگی در سیستم هوای ورودی

### توربین گاز

مقدار آب مایع موجود در هوا یکی از پارامترهای مهم در بررسی مکانیزم تشکیل یخ می‌باشد که با دما تغییر می‌کند. این پارامتر، مقدار آبی را که می‌تواند در هوا یخ بزند مشخص می‌کند. از سوی دیگر اندازه‌گیری این پارامتر مشکل می‌باشد. در دمای کم مقدار قطرات یخ در هوا بیشتر از

### ۱. مقدمه

امروزه در کشور واحدهای گازی در شرایط محیطی گوناگونی بهره‌برداری می‌شوند که هر یک از این مناطق، شرایط بهره‌برداری اقلیمی خاص آن منطقه را به تجهیزات واحد تحمیل می‌کنند لذا مطالعه عوامل و شرایط محیطی در بهره‌برداری واحدهای گازی یکی از مهمترین موضوعات

### ۳. روش‌های جلوگیری از یخ‌زدگی در توربین‌های گازی

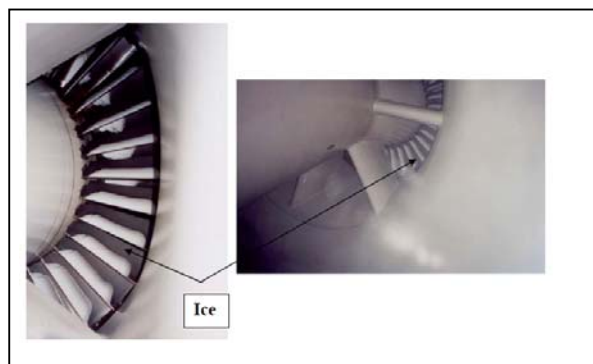
پیش مهم‌ترین روش‌های مختلفی جهت جلوگیری از تشکیل یخ در سیستم هوای ورودی کمپرسورها وجود دارد که با نصب تجهیزاتی از خطر یخ‌زدگی در سیستم‌های ورودی توربین گاز جلوگیری می‌کند. هدف اولیه سیستم حفاظت یخ‌زدگی جلوگیری یا محدود کردن تشکیل یخ در طی سیستم مکش توربین گازی است. پیچیدگی‌های سیستم ورودی برای کاربردهای مختلف توربین گاز ساکن اغلب باعث می‌شود که نیل به یک سیستم ورودی عاری از یخ‌زدگی محدود شود. همواره در بحث سیستم‌های حفاظت یخ‌زدگی دو مورد مطرح می‌شود: Anti-Icing و De-Icing. سیستم حفاظت Anti-icing شامل همه روشهای حفاظت یخ‌زدگی می‌شود که از تشکیل یا نفوذ یخ در اجزای سیستم ورودی هوا جلوگیری می‌کند. از طرف دیگر سیستم‌های De-icing روشهایی از حفاظت یخ‌زدگی را شامل می‌شود که اجازه می‌دهد یخ تشکیل و سپس قبل از اینکه به درجه زیان‌آور و خسارت بار برسد، آن را از بین می‌برد. سیستم‌های حفاظت یخ‌زدگی با توجه به تکنیک حفاظت یخ‌زدگی به سیستم‌های زیر تقسیم می‌شوند:

- سیستم‌های حرارتی شامل:
- سیستم گرمایش ورودی
- سیستم گرمایش ورودی کمپرسور با زیرکش
- سیستم ری سیرکولاسیون آگروز
- سیستم بازیافت حرارتی
- مبدل حرارتی بخارگرمایش اجزاء
- سیستم الکتروترمال
- هوای فشرده کمپرسور
- سیستم شیمیایی
- سیستم مکانیکی
- سیستم اینرسی

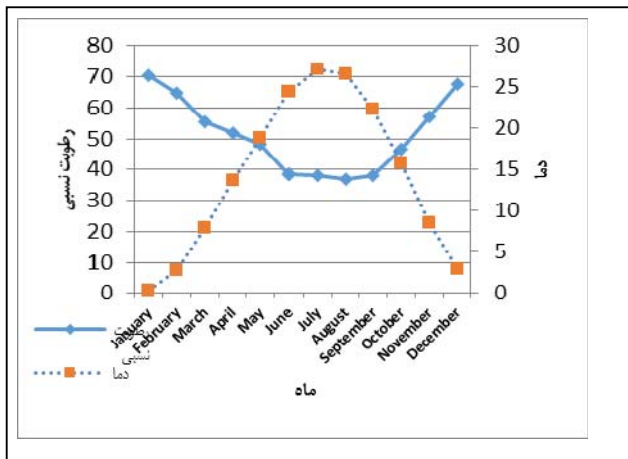
قطرات مایع است. مقدار قطرات آب موجود در هوا در دمای منفی ۲۵ درجه سانتیگراد کم می‌باشد در حالیکه در دمای منفی ۴۰ درجه سانتیگراد تقریباً قطره آب مایع درهوا وجود ندارد و تمام بخار آب به قطرات جامد تبدیل شده است [۱].

بطور کلی می‌توان گفت دو نوع یخ‌زدگی وجود دارد: یخ‌زدگی رسوبی و یخ‌زدگی چگالشی [۲]

یخ‌زدگی رسوبی در واقع همان وجود آب در هوا چه به صورت مایع و چه به صورت جامد می‌باشد که به سطح زمین می‌رسد. این نوع یخ‌زدگی می‌تواند به فرم‌های مختلف از جمله قطرات آب فوق سرد وجود داشته باشد. قطرات آب فوق سرد وقتیکه به داخل سیستم ورودی کمپرسور بلعیده می‌شوند می‌توانند ایجاد خطر کنند. این قطرات به سطح جامد می‌چسبند و تبدیل به یخ می‌شوند. قطرات یخ زده به عنوان هسته‌های تشکیل یخ عمل کرده و باعث می‌شوند بخار آب موجود در هوا در دما انجماد شروع به یخ زدن کند. به عبارت دیگر ماکزیمم پتانسیل برای تشکیل یخ را قطرات فوق سرد بزرگ با دمای کمی کمتر از صفر دارند. یخ چگالشی در شرایط اتمسفری وجود ندارد اما می‌تواند در شرایط خاص در توربین گاز به وجود بیاید. این نوع یخ وقتیکه جریان در bellmouth سرعت زیادی می‌گیرد به وجود می‌آید. در این شرایط، هوا به هوای اشباع تبدیل می‌شود و بخار آب در هوا شروع به چگالش بر روی سطح می‌کند. اگر دمای سطح پایینتر از دمای نقطه شبنم هوای ورودی و پایینتر از نقطه انجماد باشد، یخ بر روی سطح تشکیل می‌شود. این نوع یخ برای کمپرسور بسیار خطرناک است زیرا به سطح می‌چسبد.



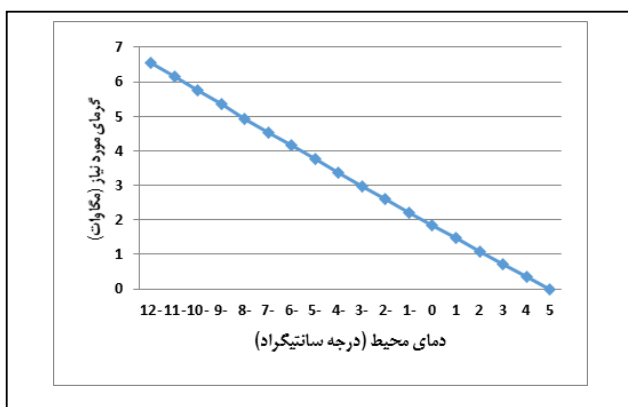
شکل ۱: نحوه تشکیل یخ بر روی IGV [۱]



شکل ۲: نمودار دما و رطوبت نسبی میانگین ماهانه

## ۶. محاسبه میزان بار گرمایش مورد نیاز

برای محاسبه‌ی این بار گرمایشی، می‌بایست دبی ورودی کمپرسور توربین گاز، دمای ورودی به آن و دمای نهایی مشخص باشد. برای به دست آوردن دبی هوای ورودی کمپرسور، واحد گازی مورد بررسی در نرم‌افزار Thermoflow و در شرایط سایت مورد بررسی (ارتفاع از سطح دریا برابر ۱۲۸۰ متر) و دمای هوای ورودی از ۲۰- تا ۵ درجه سانتیگراد مدل گردیده است. برای اطمینان از عدم یخ‌زدگی، نیاز است تا دمای ورودی ساکن به مقدار ۵ درجه سانتیگراد برسد. لذا میزان حرارت مورد نیاز برای گرم کردن هوا برای دماهای مختلف بدست می‌آید.



شکل ۳: نمودار تغییرات حرارت مورد نیاز برحسب دمای محیط

## ۴. سیستم هوای ورودی توربین گاز در نیروگاه

### شهید رجایی

هوای ورودی به کمپرسور توربین گازی GE-F9 از طریق یک ساختمان ۳ طبقه تأمین می‌شود. در هر طبقه تعدادی المان فیلتر (فیلتر کارتریجی) وجود دارد که هوا از آنها عبور کرده و ذرات معلق در هوا توسط این فیلترها گرفته می‌شود. سپس هوای تمیز وارد یک اتاقک می‌شود. در این اتاقک سیستم پاشش آب و سایلنسر قرار دارند. هوا بعد از عبور از سایلنسر وارد داکت همگرایی می‌شود و سرعتش افزایش می‌یابد. در انتهای داکت، پره‌های هدایت جریان (IGV) قرار دارند که بعد از عبور از آنها، هوا وارد اولین مرحله کمپرسور می‌شود.

## ۵. بررسی شرایط محیطی سایت نیروگاه شهید

### رجایی

به منظور بررسی ضرورت بکارگیری سیستم آنتی آیسینگ در نیروگاه و نیز برآورد بار گرمایشی مورد نیاز در این سیستم، می‌بایست وضعیت آب و هوایی در سایت مورد نظر مورد ارزیابی قرار گیرد. بدین منظور، اطلاعات مربوط به وضعیت دما و رطوبت نسبی مورد ارزیابی قرار گرفته گردیده است [۳و۴]. با قرار دادن میانگین رطوبت نسبی در کنار نمودار تغییرات میانگین دما، می‌توان گفت که در طول ماههای ژانویه، فوریه و دسامبر، احتمال یخ‌زدگی در سیستم هوای ورودی و در نتیجه احتمال در مدار قرار گرفتن سیستم آنتی آیسینگ از سایر ماه‌ها بیشتر است. می‌توان نتیجه گیری نمود که با توجه به اینکه در بازه زمانی قابل توجهی از سال، دمای پایین محیط و رطوبت نسبی بالای محیط بطور همزمان رخ می‌دهد، نصب سیستم ضد یخ‌زدگی برای حفاظت از واحدهای گازی و پیشگیری از بروز آسیب در واحدهای گازی، امری ضروری است.

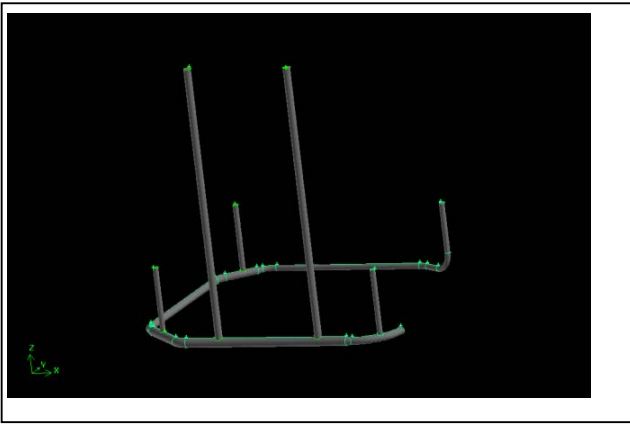
## ۷. بررسی فنی روش‌های مختلف و انتخاب روش

### مناسب

همانطور که پیشتر اشاره گردید، گزینه‌های مختلفی برای تأمین گرمایش مورد نیاز برای سیستم هوای ورودی در هنگام نیاز می‌توان در نظر گرفت. در این میان، با توجه به شرایط نیروگاه، این راهکارها برای واحد مورد بررسی، شامل موارد ذیل است:

### ۷.۱. برداشت هوای داغ از خروجی کمپرسور

آمارهای موجود از طرح‌های اجرا شده سامانه Anti-icing (با استفاده از انشعاب کمپرسور) در بین سازندگان توربین حکایت از این دارد که معمولاً در بکارگیری این سامانه به روش برداشت هوای داغ از انتهای کمپرسور حدوداً ۵ درصد از توان خروجی کاسته می‌شود. برای طراحی سیستم آنتی آیسینگ با استفاده از هوای گرم کمپرسور به داده‌های فراوانی نیاز است. یکی از این داده‌ها میزان برداشت از کمپرسور خواهد بود که تابعی از دمای هوای محیط است. با توجه به آنکه برای دماهای مختلف میزان حرارت مورد نیاز حساب شده است، فقط کافی است تا این میزان حرارت برابر با انتقال حرارت هوای کمپرسور تا دمای مطلوب (۵ درجه سانتیگراد) شود. بر اساس محاسبات صورت گرفته، میزان دبی مورد نیاز از مقدار یک کیلوگرم بر ثانیه برای دمای ۴ درجه سانتیگراد تا مقدار ۱۰.۵ کیلوگرم بر ثانیه برای دمای ۵- درجه سانتیگراد متغیر است. بنابراین، طراحی سیستم می‌بایست بر اساس حداکثر دبی مورد نیاز صورت گیرد. با توجه به عدم تعبیه مسیر برداشت هوای فشرده از خروجی کمپرسور جهت سیستم آنتی آیسینگ، می‌بایست از امکان برداشت این میزان هوا از سیستم اطمینان حاصل نمود. یکی از موقعیت‌هایی که امکان برداشت هوای فشرده از آن وجود دارد، برداشت از هدر هوای فشرده است. هوای فشرده از محوطه احتراق، توسط چهار فلنج برداشت گردیده و هر یک با اتصال به خط سه اینچ وارد یک هدر هوای فشرده می‌گردد. همانطور که در شکل دیده می‌شود، قطر این هدر در قسمتهای مختلف متفاوت بوده و با ورود هر یک از خطوط برداشت هوا از محوطه احتراق، تغییر می‌کند. با توجه به موارد گفته شده، باید گفت که اضافه نمودن خط برداشت به هدر موجود، با توجه به تغییراتی که در سرعت جریان هوا در هدر ایجاد می‌کند، به سادگی امکانپذیر نبوده و برای تعیین تأثیر برداشت هوای فشرده در سرعت هوای عبوری در خطوط و هدر هوای فشرده، می‌بایست شبیه‌سازی جریان در آنها صورت پذیرد.



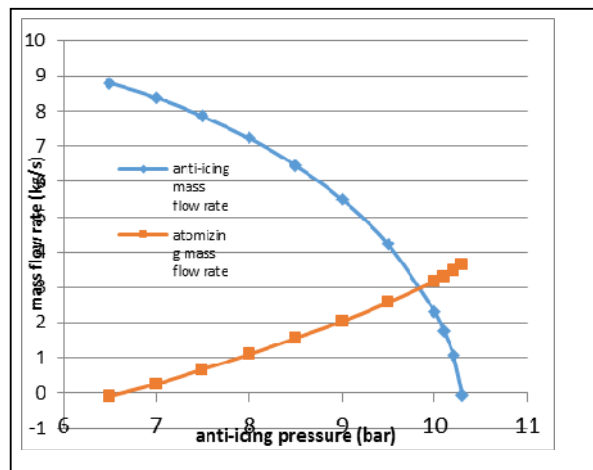
شکل ۴: شکل هدر و خط برداشت هوای فشرده برای سیستم آنتی آیسینگ

برای شبیه‌سازی کامل هدر و به دست آوردن بیشترین دبی قابل استحصال از این قطعه، فشار قسمت خروجی اتمایزینگ باید مشخص شود. بر این اساس، شبیه‌سازی، یکبار در شرایط موجود انجام گرفته است. بر اساس دبی حجمی کمپرسور اتمایزینگ و با تقریب دما و فشار هوای فشرده قبل از ورود به کمپرسور اتمایزینگ می‌توان میزان دبی جرمی عبوری از خط اتمایزینگ را به دست آورد. با استفاده از این دبی جرمی و تطابق دادن آن با دبی‌های به دست آمده از شبیه‌سازی عددی هدر می‌توان تقریب مناسبی از میزان فشار خروجی خط اتمایزینگ به دست آورد. برای محاسبه‌ی فشار هوا با توجه به آنکه نسبت فشار کمپرسور اتمایزینگ برابر با ۱.۲ است، می‌توان انتظار داشت تا فشار خروجی خط اتمایزینگ در بازه‌ی بین ۸.۷ تا ۱۰.۴ bar باشد. با توجه به اینکه میزان چگالی بین ۶.۲ تا ۱۲.۴ متغیر است، دبی جرمی عبوری از خط اتمایزینگ برابر با ۱.۰ تا ۳.۵ کیلوگرم بر ثانیه است. حال با دانستن دبی اتمایزینگ می‌توان فشار معادل با این دبی را به دست آورد. برای به دست آوردن این مقدار، نیاز به شبیه‌سازی‌های فراوانی وجود دارد؛ بدین صورت که فشار خط اتمایزینگ را مقادیر مختلف قرار داده و دبی متناظر با آن به دست می‌آید. بر اساس محاسبات مذکور می‌توان نتیجه گرفت که در صورتیکه دبی برداشتی از خط اتمایزینگ ۱ کیلوگرم بر ثانیه باشد، فشار اتمایزینگ برابر با ۱۰.۳۵ bar و در دبی ۳.۵ کیلوگرم بر ثانیه، فشار اتمایزینگ برابر با ۹.۹ bar می‌باشد. شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در هر دو حالت مذکور نشان می‌دهد که بیشترین دبی عبوری از سیستم (با شرط منفی نشدن دبی خروجی از اتمایزینگ) برابر ۸.۸ کیلوگرم بر ثانیه است که با مقدار ۱۰.۳۴ کیلوگرم بر ثانیه (مقدار مورد نیاز برداشت هوا در دمای ۵- محیط) فاصله دارد. به عبارت دیگر، دبی مذکور پاسخگوی نیاز

سیستم نخواهد بود. همچنین با افزایش برداشت از هیدر توسط سیستم آنتی آیسینگ، میزان دبی خروجی از مسیر اتمایزینگ کاهش می‌یابد.



شکل ۶: موقعیت نصب کابل های حرارتی بر روی توری ها



شکل ۵: دبی خط اتمایزینگ و آنتی آیسینگ بر حسب فشار خط آنتی آیسینگ

## ۷.۲. استفاده از سیستم گرمایش الکتریکی در سیستم

### هوای ورودی

حالت دوم، با فرض قرارگیری کابلها بر روی یک شبکه فرضی در بالا دست جریان عبوری از فیلترها بررسی شده است. این گزینه یک مزیت و یک نقطه ضعف دارد. مزیت آن این است که در این موقعیت از داکت بدلیل کمتر بودن سرعت هوا فرصت انتقال حرارت بیشتری بین کابل و هوای ورودی فراهم میاید و در مقابل نقطه ضعف آن این است که اجرای چنین شبکه ای از کابلهای حرارتی در این موقعیت کار ساده‌ای نبوده و عملیات بهره برداری (نظیر تعویض فیلترها) را با مشکل مواجه می‌کند. از سوی دیگر در دسترس بودن کابلی با درجه حرارت ۳۰۰ درجه سانتیگراد به اپراتور و احتمال سوختگی بدن اپراتور را نیز می‌بایست در نظر گرفت. مساحت پوشش داده شده برای این کار، سطح قرمز رنگ نشان داده شده در تصویر زیر، منهای سطح مقطع فیلترها می‌باشد.

با توجه به چیدمان فیلترها در هر طبقه، میتوان محاسبه نمود در این حالت (نصب کابل بین فیلترها) تقریباً به ۱۰۱۰ متر کابل نیاز است. با مراجعه به کاتالوگ کابل حرارتی میتوان دریافت هر یک متر کابل حرارتی از مدل انتخاب شده در حدود ۱۶۰ وات توان مصرف خواهد کرد در نتیجه برای ۱۰۱۰ متر از کابل تقریباً در حدود ۱۶۱،۶ کیلووات توان نیاز خواهد بود.

در بررسی بکارگیری این سیستم، فرض بر این گذاشته شده است که بتوان کابلهای حرارتی بر روی سازه مناسبی در موقعیت های مختلفی از مسیر هوای ورودی نصب کرد. از این رو ادامه این بخش در دو حالت انجام شده است. در حالت اول کابلهای حرارتی بر روی توریهای موجود در پایین دست فیلترها وجود دارد نصب شده اند چرا که کابلهای حرارتی را میتوان توسط بست هایی بر روی این توریها نصب نمود و نیاز به تعبیه نمودن سازه دیگری بدین منظور نیست. در حالت دوم این کابلها بر روی یک شبکه فرضی که در بالا دست فیلترها قرار دارد نصب خواهند شد.

با توجه به چیدمان کابلها و اعمال حداقل شعاع خمش، میتوان دریافت در هر متر مربع از سطح تقریباً ۱۱ متر کابل قابل نصب است. با توجه به سطح کل محاسبه شده برای کل توریها در سه طبقه (تقریباً ۴۰ متر مربع) میتوان نتیجه گیری کرد در این حالت (نصب کابل روی توریها) به ۴۴۰ متر کابل نیاز است. با مراجعه به کاتالوگ کابل حرارتی میتوان دریافت هر یک متر کابل حرارتی از مدل انتخاب شده در حدود ۱۶۰ وات توان مصرف خواهد کرد در نتیجه برای ۴۴۰ متر از کابل تقریباً در حدود ۷۰،۴ کیلو وات توان نیاز خواهد بود.

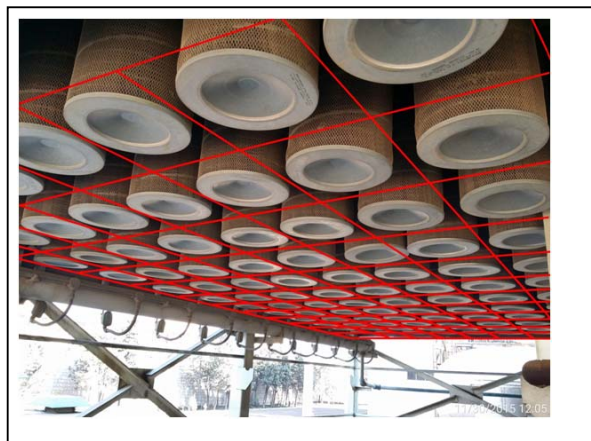
۵- بررسی امکان نصب مبدل در نظر گرفته شده بر روی سازه موجود

جدول ۱: نتایج خروجی نرم‌افزار ASPEN HTFS+ برای طراحی مبدل بخار

در سیستم هوای ورودی

Air-Cooled Heat Exchanger Specification Sheet

1	Company:			
2	Location:			
3	Service of Unit:	Our Reference:		
4	Item No.:	Your Reference:		
5	Date:	Rev No.:	Job No.:	
6	Size & Type	1652.4 / 8153.4	Type	Number of Bays
7	Surf/Unit-Finned Tube	56.7	m <sup>2</sup>	Bare tube area / bundle
8	Heat exchanged	1308.5	kW	MTD, Eff
9	Transfer Rate-Finned	128.9	Bare, Service	128.9 Clean
10	PERFORMANCE DATA - TUBE SIDE			
11	Fluid Circulated	steam		In/Out
12	Total Fluid Entering	kg/s	0.6086	Density, Liq
13				kg/m <sup>3</sup>
14	Temperature	°C	235 / 179.3	Specific Heat, Liq
15	Liquid	kg/s	/ 0.6086	kJ/kg K
16	Vapor	kg/s	0.6086 /	Specific Heat, Vap
17	Noncondensable	kg/s	/	kJ/kg K
18	Steam	kg/s	/	Therm Cond, Liq
19	Water	kg/s	/	W/m K
20	Molecular wt, Vap		/	0.623 / 0.678
21	Molecular wt, NC		/	Therm Cond, Vap
22	Viscosity, Liq	mPa s	0.123 / 0.164	W/m K
23	Viscosity, Vap		0.018 / 0.015	0.038 / 0.034
24	PERFORMANCE DATA - AIR SIDE			
25	Air Quantity, Total	kg/s	130.3667	Latent heat
26	Air Quantity/Fan	m <sup>3</sup> /s		kJ/kg
27	Static Pressure	Pa	94	Inlet pressure (abs)
28	Face Velocity	m/s	4.46	bar
	Bundle velocity	kg/s/m <sup>2</sup>	21.65	Pres Drop Allow/Calc
				1 / 0.00158
				Fouling resistance
				m <sup>2</sup> /KW
				Altitude
				m
				Temperature In
				°C
				Temperature Out
				°C
				Design Ambient
				°C



شکل ۷: شبکه فرضی از کابلهای حرارتی در بین فیلترها

با توجه به توان حرارتی مورد نیاز برای گرمایش هوای ورودی، نتیجه می‌شود که بکارگیری سیستم گرمایش الکتریکی با توجه به محدودیتهای پیش‌گفته، پاسخگوی نیاز گرمایش هوای ورودی نمی‌باشد.

### ۷.۳. استفاده از مبدل بخار در سیستم هوای ورودی

بر اساس مطالعات صورت گرفته نمونه‌هایی از استفاده از مبدل حرارتی در سیستم هوای ورودی برای جلوگیری از یخ‌زدگی بر روی فیلترها و نیز بر روی سایر قسمتهای سیستم هوای ورودی وجود دارد [۱]. در واحد گازی مورد بررسی، با در نظر گرفتن میزان بخار مورد نیاز، اصلی‌ترین منبع بخار، استفاده از بخار بویلر کمکی (با دمای ۲۳۵ درجه سانتیگراد و فشار 9 barg) می‌باشد. با توجه به بخار موجود از بویلر کمکی و با لحاظ کردن نیاز به افزایش دمای هوای ورودی از ۵- به ۵، ساینزینگ مبدل حرارتی مورد نیاز در نرم‌افزار ASPEN HTFS+ با استفاده از ماژول AeroTRAN انجام گرفته است که نتایج برای مبدل در نظر گرفته شده برای یک طبقه از سیستم هوای ورودی بصورت جدول ۱ می‌باشد.

هرچند با توجه به ملاحظات ذیل، عملاً امکان بکارگیری این سیستم وجود ندارد:

۱- بوجود آمدن افت فشار دائمی در مسیر هوای ورودی به کمپرسور

۲- بررسی امکان مانور بهره‌برداری و استارت مکرر بویلر کمکی

۳- ملاحظات بهره‌برداری

۴- عدم پاسخگویی سریع سیستم

### ۷.۴. استفاده از هوای داغ کوبه لود

برای استفاده از هوای گرم کوبه لود، راه حل اول استفاده مستقیم از هوای داخل محفظه و راه حل دوم استفاده از هوای گرم محفظه جهت استفاده در مبدل حرارتی می‌باشد. با توجه به اطلاعات به دست آمده، در توربین گاز نیروگاه شهید رجایی، در قسمت کوبه لود میزان نشی بسیار بالا است. در صورت نشی گاز داغ در قسمت کوبه لود، دمای هوای این قسمت از حد مجاز بالاتر می‌رود. مشخص بودن این دما برای طراحی سیستم آنتی آیسینگ نیاز است. در صورتی که میزان دما و میزان حرارت نشی مشخص نیست. همچنین در صورت برداشت از این قسمت، میزان نشی به علت کم شدن فشار افزایش می‌یابد. علاوه بر این میزان برداشت از کوبه لود در شرایط مختلف محیطی متغیر است. بنابراین به دلیل نبود اطلاعات کافی از میزان حرارت اتلافی در این قسمت طراحی غیر ممکن و غیر قابل اطمینان خواهد بود. همچنین در صورت استفاده غیر مستقیم از گازهای نشی کوبه لود به علت آنکه مبدل حرارتی، گاز-گاز خواهد بود و به دلیل آنکه اینگونه مبدل‌ها بازده پایینی دارند، ساخت این مبدل عملاً غیر ممکن خواهد بود. لذا با توجه به موارد ذکر شده به عنوان محدودیت در طراحی سیستم Anti-Icing بر اساس حرارت کوبه لود، این طرح امکانپذیری اجرا نخواهد داشت.

## ۸. بررسی فنی بکارگیری کوره هوای گرم

با توجه به اینکه امکان بکارگیری گزینه‌هایی که تا کنون مورد بررسی قرار گرفته است به دلایل فنی وجود ندارد، در این قسمت، بکارگیری کوره هوای گرم در تأمین حرارت مورد نیاز مورد ارزیابی و امکانسنجی قرار گرفته است.

کوره‌های هوای گرم معمولاً در پاره‌ای از واحدهای صنعتی جهت تسهیل و انجام واکنش‌های شیمیایی و فیزیکی به کار می‌روند. با توجه به نیاز به تأمین گرمای مورد نیاز برای گرمایش هوای ورودی، می‌توان از این تجهیز بدین منظور استفاده نمود. کوره های هوای گرم، دارای انواع مختلفی می باشند. این تجهیزات بر حسب نوع سوخت مصرفی شامل گازسوز و گازوئیل سوز و نیز بر حسب شیوه گرمایش به دو صورت مستقیم و غیر مستقیم می‌باشند.

با توجه به اینکه ضریب انتقال حرارت در سیستم غیر مستقیم بسیار پایین می باشد، عملاً استفاده از سیستم غیر مستقیم امکانپذیر نبوده و سیستم مستقیم برای این کاربرد مناسب‌تر می‌باشد. عمده مزایای بکارگیری این سیستم را می توان به صورت ذیل برشمرد:

عدم تداخل با عملکرد سیستم موجود و در نتیجه عدم تأثیر بر کارایی واحد

عدم ایجاد افت فشار دائم در مسیر هوای ورودی

عدم ایجاد اختلال در بهره‌برداری از واحد در فصول گرم

سرعت پاسخگویی مناسب

عدم دشواری در بهره‌برداری و خارج کردن سیستم از مدار و نیز بازدهی و قابلیت اطمینان مناسب

بنابراین در این روش ابتدا توسط دستگاه مشعل گاز سوز در محفظه کوره فرآیند احتراق با مخلوط شدن هوای محیط و سوخت گاز طبیعی صورت می پذیرد و در ادامه فرآیند اختلاط هوای داغ تولید شده با هوای محیط که از طریق یک دستگاه فن سانتریفوژ تأمین می گردد، صورت خواهد پذیرفت بگونه ای که دمای هوای خروجی از هیتر هوای داغ مستقیم حدود ۳۰۰ درجه سانتیگراد حاصل گردد و در نهایت این هوای داغ از طریق سیستم کانال کشی با ایزولاسیون مناسب به مقاطع هوای ورودی در ساختمان فیلتراسیون هدایت و تحویل خواهد گردید. بر اساس بررسی

صورت گرفته و جهت تأمین گرمای مورد نیاز در سیستم هوای ورودی، مشخصات فنی سیستم منتخب به صورت ذیل می باشد.

جدول ۲: مشخصات فنی کوره هوای گرم جهت بکارگیری به عنوان سیستم آنتی آیسینگ

مشخصات فنی	مقدار	واحد
میزان سوخت مصرفی	۴۰۵	m <sup>3</sup> /hr
میزان هوای مورد نیاز احتراق در مشعل	۴۵۵۰	m <sup>3</sup> /hr
میزان هوای اختلاط شونده با محصولات احتراق	۴۰۲۰۰	m <sup>3</sup> /hr
میزان دبی فن سانتریفوژ	۴۰۲۰۰	m <sup>3</sup> /hr
توان مصرفی فن سانتریفوژ	۱۸،۵	kw

## ۹. نتیجه گیری

با توجه به مطالب ارائه شده در این گزارش، موارد زیر به عنوان جمع - بندی ارائه می گردد:

۱- با توجه به بررسی دما و رطوبت در نیروگاه شهید رجایی در بازه - های زمانی مختلف، در ماههای دسامبر، ژانویه و فوریه (آذر، دی و بهمن) احتمال بروز پدیده یخ‌زدگی در سیستم هوای ورودی وجود دارد.

۲- در روشهای متعددی که در این بررسی مورد ارزیابی قرار گرفت، نتایج ذیل بدست آمد:

در روش بکارگیری جریان داغ کمپرسور، انشعابات موجود در این توربین برای مصرف هوای کمپرسور در سیستم Atomizing بوده و با توجه به شبیه‌سازی صورت گرفته، هرگونه برداشت از هدر هوای فشرده، مستقیماً بر میزان دبی اتمایزینگ تأثیرگذار خواهد بود. از سوی دیگر با توجه به چیدمان کنونی اجزاء و نیز دبی مورد نیاز (حدوداً به میزان ۱۲ کیلوگرم بر ثانیه برای افزایش دمای هوای ورودی از ۵- به ۵)، امکان برداشت این میزان هوا در سیستم موجود، وجود ندارد.

فارغ از مسایل اجرایی و اقتصادی، بکارگیری سیستم الکتریکی کابل ها و هیترهای الکتریکی) بعنوان سیستم آنتی آیسینگ عملاً در هیچ یک از موقعیت های یاد شده از سامانه هوای ورودی جوابگوی حل مسئله نبوده و بسته به موقعیت نصب، تنها قادر به افزایش درجه حرارت قسمتی از جریان به ترتیب به میزان ۴ و ۵ درجه سلسیوس هستند، لذا راه حل مناسبی برای این مسئله نخواهند بود.



در بکارگیری هوای داغ موجود در کوپه لود، در صورت نشستی گاز داغ، از سویی دمای هوای این قسمت از حد مجاز بالاتر می‌رود و از سوی دیگر، عدم اطمینان در مقدار صحیح این دما را بوجود می‌آورد. لذا با توجه به اینکه برای طراحی سیستم نیاز به اطمینان از میزان دمای هوای داغ می‌باشد، بکارگیری این سیستم دچار چالش می‌باشد. همچنین در صورت برداشت از این قسمت، میزان نشستی به علت کم شدن فشار افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، به علت استفاده از سوخت گازوئیل در فصول سرد که به طور همزمان با نیاز با بکارگیری سیستم ضد یخ‌زدگی می‌باشد، هوای نشستی در کوپه لود، محیطی مستعد اسیدی شدن را ایجاد می‌کند. این محیط می‌تواند باعث خوردگی اجزای سر راه خود شده و نیز موجب کاهش عمر فیلترها گردد.

در بکارگیری مبدل حرارتی، ملاحظاتی نظیر بوجود آمدن افت فشار دائمی در مسیر هوای ورودی به کمپرسور، عدم امکان استارت مکرر بویلر کمکی، ملاحظات بهره‌برداری مانند هواگیری خط در هنگام استارت و نیز تخلیه سریع خط پس از خروج سیستم از مدار (به دلیل امکان بروز یخ‌زدگی) و نیز عدم پاسخگویی سریع سیستم با توجه به طبیعت کند سیستم‌های حرارتی می‌بایست در نظر گرفته شوند که با توجه به این موضوع بکارگیری این سیستم مناسب نخواهد بود.

با توجه به عدم امکان بکارگیری گزینه‌های مورد بررسی در این مطالعه، سیستم هوای داغ نیز مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به راندمان بسیار پایین استفاده از گرمکن هوای غیر مستقیم، مناسب است تا از سیستم مستقیم برای کاربرد مورد بررسی استفاده گردد. با توجه به بررسی صورت گرفته استفاده از کوره هوای گرم مستقیم در این واحد گزینه مناسبی می‌باشد و بر این اساس، استعلام تجهیزات و برآورد هزینه‌های مربوط صورت گرفت.

### قدردانی

مقاله حاضر نتایج پروژه اجرا شده در پژوهشگاه نیرو با کارفرمایی شرکت مدیریت تولید برق شهید رجایی طی قرارداد شماره ۹۴/۶۷/م/ن می‌باشد. نویسندگان از همکاران نیروگاه شهید رجایی کمال تشکر را دارند.

### منابع

[1] Sammak M. Anti icing in gas turbines. MSc thesis, Lund University; 2006.

[2] Chappell M. S. & Grabe W. Icing Problems on Stationary Gas Turbine Power plants, ASME, 1974.

[۳] اطلاعات هواشناسی دریافتی از نیروگاه شهید رجایی

[۴] سایت اداره کل هواشناسی قزوین (<http://qazvinmet.ir>)