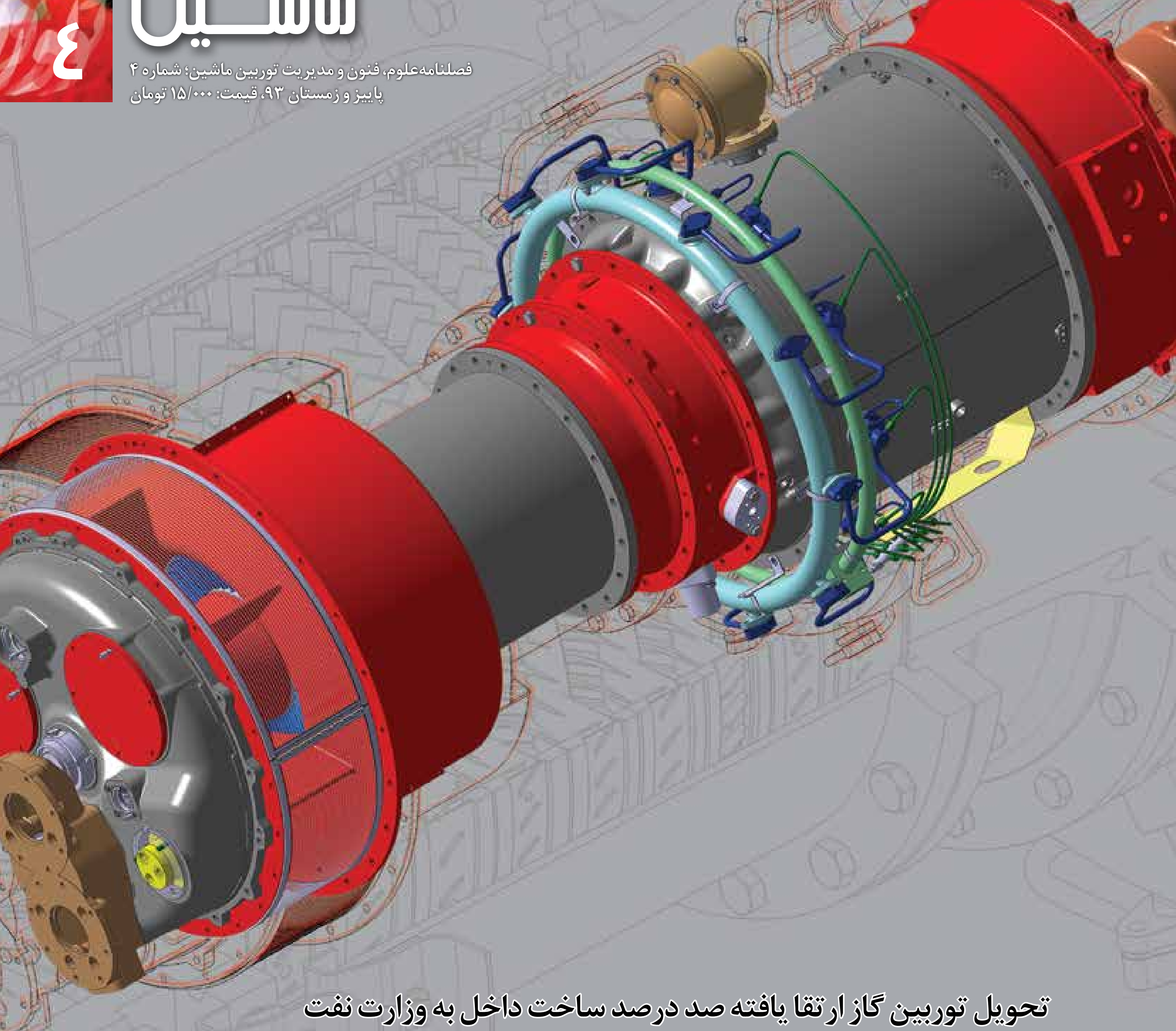
توربین ماشین

۴

فصلنامه‌علوم، فنون و مدیریت توربین ماشین؛ شماره ۴
پاییز و زمستان ۹۳، قیمت: ۱۵/۰۰۰ تومان

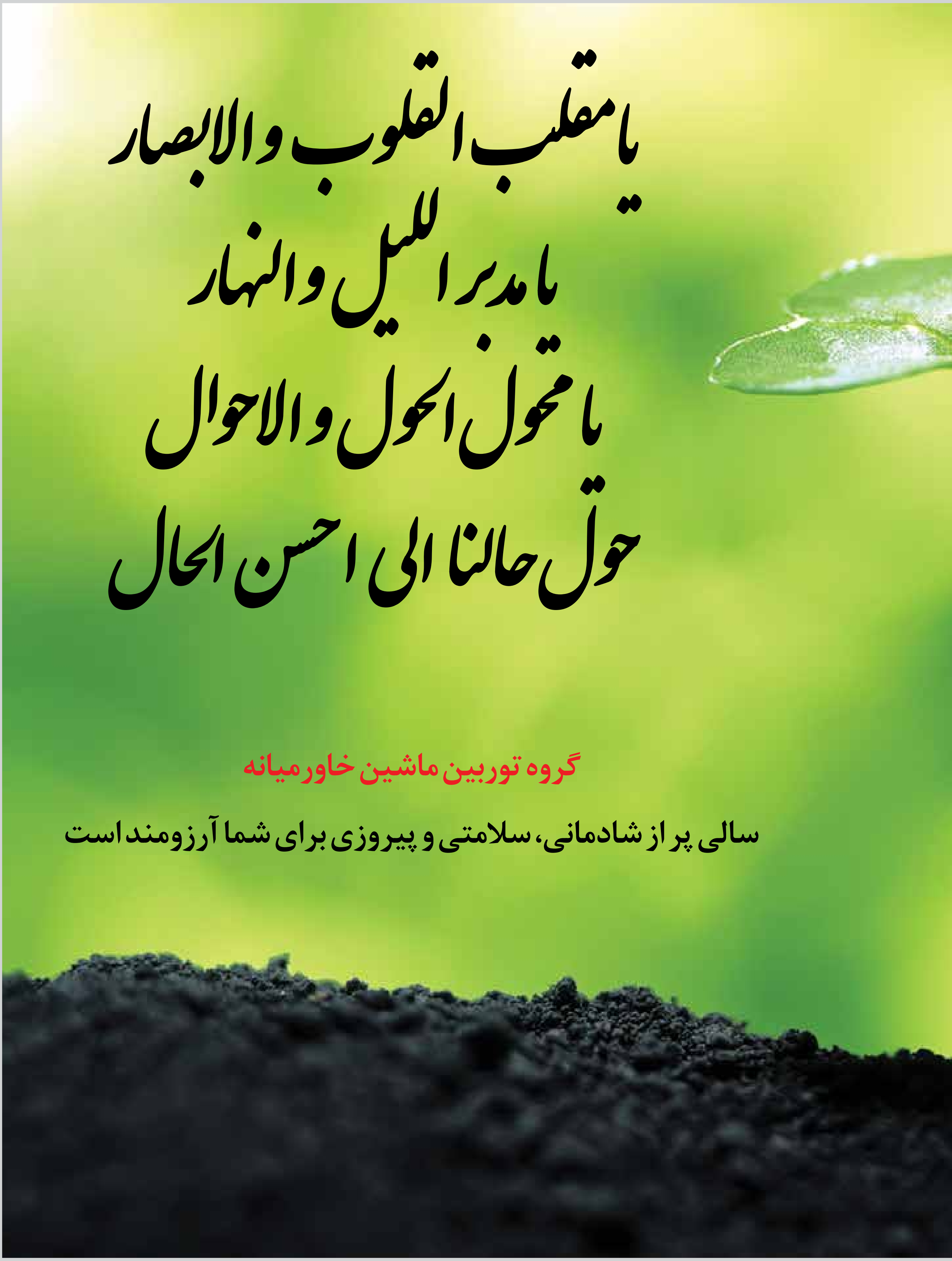


تحویل توربین گاز ارتقا یافته صد درصد ساخت داخل به وزارت نفت

ارتقای سیستم خنک کاری محفظه احتراق توربین گاز سولار سنتار

گزارش مراسم انتخاب چهره ماندگار صنعت، معدن و تجارت ایران

تولید اقتصادی آب شیرین با استفاده از توربین‌های گاز


یا مقلب القلوب و الابصار
یا مدبر اللیل و النهار
یا محول الحول و الاحوال
حول حالنا الی احسن الحال
گروه توربین ماشین خاورمیانه
سالی پر از شادمانی، سلامتی و پیروزی برای شما آرزومند است

بسم الله الرحمن الرحیم

سرمقاله

نقش هستی‌ساز باید
نقش برجا ماندنی
تا چو جان خود، جهان هم جاودان دارد تو را.../فریدون مشیری

آخرین شماره سال ۹۳ در پایان یک سال فعالیت مداوم کارکنان شرکت توربین ماشین خاورمیانه و انتشار چهارمین شماره نشریه علوم، فنون و مدیریت توربین ماشین پیش روی شماست. در روزهای سرد پاییز سال ۹۲، نشریه‌ای متولد شد که با اتکا به همت و تلاش گروهی، به سرعت در میان صنعت گران و تولید کنندگان عرصه صنعت نفت، گاز و پتروشیمی جایگاهی ممتاز و شایسته یافت و سریع تر از آن چه تصور می شد به نشریه‌ای شناخته شده و قابل اعتماد بدل گشت.
توسعه سریع نشریه علوم، فنون و مدیریت توربین ماشین مرهون اعتماد اهالی صنعت نفت، گاز، پتروشیمی و مخاطبان همیشگی آن بوده است که همواره با پیشنهادات و انتقادات سازنده، این مجموعه را از گرفتار شدن در منجلاب رکود و سکون رهانیده‌اند.
خلاقیت و نوآوری در محتوا و ظاهر نشریه از جمله عواملی است که «علوم، فنون و مدیریت توربین ماشین» را از بسیار مجلات دیگر صنعت ماشین‌های دوار متمایز ساخته است. رویکرد گردانندگان این رسانه به سوی ارائه مطلوب نیازهای ضروری صنعت ماشین‌های دوار بوده و طی چهار شماره‌ای که از انتشار آن گذشته، ارتقای مداوم محتوا و کیفیت بصری همواره در دستور کار آنان بوده است.
مدیر مسئول، سردبیر، هیات تحریریه و کلیه دست اندرکاران این نشریه امید دارند که به‌عنوان نماینده کوچکی از طلیعه‌داران و بانیان حرکت بومی‌سازی و ساخت داخل در حوزه ماشین‌های دوار که شانه به شانه با تکنولوژی روز دنیا در تنگناها و فراز و نشیب‌های حاکم بر فضای صنعتی و کسب و کار کشور در تلاشند، بتوانند در حوزه اطلاع‌رسانی، رسانه‌ای باشند برای انعکاس دستاوردهای ارزشمند فعالان صنعت کشور در زمینه ماشین‌های دوار که عمدتا مغفول مانده است.

ما همواره بر این باوریم که دست در دست یکدیگر می توانیم در عرصه این صنعت حساس و تکنولوژیک، همه با هم پیش بتازیم و هیچ سدّی از مشکلات و سختی‌ها یارای مقاومت در برابر موج خروشان همدلی و همکاری ما را ندارد و اینک به استقبال بهار می‌رویم، امید است بهاری پر از شکوفه‌های نو در عرصه توسعه پایدار میهن عزیزمان باشد.

من به هیات ما زاده شدم، به هیات پرشکوه انسان
تا در بهار گیاه به تماشای رنگین کمان پروانه بنشینم
غرور کوه را دریابم و هیبت دریا را بشنوم
و جهان را به قدر همت و فرصت خویش معنا دهم
انسان دشواری وظیفه است.../احمد شاملو

آخر سخن اینکه اگرچه پس از گذشت چهار شماره، همچنان نواقص و مشکلات موجود را رصد کرده و نهایت تلاش خویش را برای به حداقل رساندن آن به کار می گیریم، اما بی‌شک رهنمودهای شما مخاطبان همراه نشریه، در ارائه مجموعه‌ای کم‌نقص ضروری خواهد بود. چشم به راه راهنمایی‌ها و راه‌گشایی‌های شما دوستان هستیم و می‌دانیم سرمایه‌مان «خردِجمعی» است که ما را از هیچ تلاش و تکاپویی باز نمی‌دارد.

شورای سردبیری

TURBINE
Science,Technology & Management MACHINE

فصلنامه توربین ماشین
علوم، فنون و مدیریت
شماره ۴؛ پاییز و زمستان ۹۳
شماره پیاپی: ۴، قیمت: ۱۵/۰۰۰ تومان
صاحب امتیاز: توربین ماشین خاورمیانه
مدیر مسئول: حسن هلالی

زیر نظر شورای سردبیری
مدیر اجرایی: حسن مجیدپور
گروه اجرایی: سارا جوادزاده، حامد محدث دیلمی

همکاران تحریریه در این شماره:
امیر آگهی، ارشیا تافته، شفا حسینی‌نژاد، پدرام حنفی‌زاده،
محمد سیفی، جوانشیر فولادوند، کاوه قربانیان، مرتضی گرجی،
زهرا محمدی، زهرا مشایخی، قاسم مصیبی، شهاب میرآقائی،
الناز میرطاهری، مینا وحیدی، پریسه هدایتی، تقی هوشیاری

گرافیک و صفحه آرایی: خانه نو، تلفن: ۸۸۰۵۹۰۰۷
مدیر هنری: محمدرضا لری چی
چاپ: آئین چاپ

تلفکس: ۵-۸۸۵۶۲۲۹۴
کد پستی: ۸۳۷۴۱-۱۴۶۶۹
صندوق پستی: ۱۱۵۴-۱۴۶۶۵
آدرس: تهران، سعادت آباد، بلوار دریا، خیابان رامشه،
کوچه توحید ۵ غربی، پلاک ۱۱۸

ارسال مقالات:
از نویسندگان و پژوهشگران محترم تقاضا می‌شود مقالات خود در حوزه محتوایی نشریه را به آدرس الکترونیکی:
magazine@turbinemachine.com
ارسال کنند. بدیهی است که نشریه در انتخاب و تلخیص مطالب آزاد است.

اشتراک:
برای اشتراک فصلنامه توربین ماشین با شماره تلفن ۵-۸۸۵۶۲۲۹۴ تماس بگیرید و یا با آدرس پست الکترونیک
info@turbinemachinemagazine.com
مکاتبه فرمایید. همکاران ما نشریه را بلافاصله پس از انتشار در هر دوره برای شما ارسال خواهند کرد.

۴ ارتقای توربین گاز سولار ستار با بهره گیری از روش تزریق بخار
تقی هوشیاری، کاوه قربانیان

۱۲ مطالعه دینامیک روتور توربین بخار به کمک روش المان محدود
زهرا محمدی، امیر آگهی

۱۶ چرا شرکت‌های صنعتی باید از CHP استفاده کنند؟
پدرام حنفی‌زاده، جوانشیر فولادوند

۲۴ ارتقای سیستم خنک کاری محفظه احتراق توربین گاز سولار ستار
زهرا مشایخی، پریسه هدایتی، ارشیا تافته

۳۲ مدل‌سازی، صحت‌سنجی و بررسی پارامترهای موثر در شبیه‌سازی سه‌بعدی
قاسم مصیبی، مینا وحیدی

۴۲ جوش‌پذیری فولاد زنگ‌نزن 17-4PH در ساخت پروانه کمپرسور گریز از مرکز
مرتضی گرجی

۴۴ شرکت تامین کالای توربین ماشین خاورمیانه
شفاحسینی نژاد

۴۸ پوشش قطعات کمپرسور در توربین‌های گاز
الناز میرطاهری، شهاب میرآقائی

۵۶ بهبود سازگاری توربین توان با توجه به دمای محیطی
تقی هوشیاری، پریسه هدایتی، محمد سیفی، ارشیا تافته

۶۰ مصاحبه با جناب آقای مهندس نصرت‌الله سلیمانی
مجری پروژه‌های ساخت ماشین آلات فرآیندی شرکت مناطق نفت‌خیز جنوب

۶۳ گردهمایی دوره‌ای مدیران و کارکنان گروه توربین‌ماشین خاورمیانه
انجام تحلیل‌های مهندسی ارتقای توربین

۶۴ دستیابی به دانش فنی اعمال پوشش‌های آلومینایدی

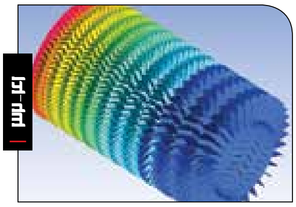
۶۵ چهره ماندگار صنعت، معدن و تجارت ایران
چهارمین کنفرانس بین‌المللی و هشتمین کنفرانس ملی مدیریت

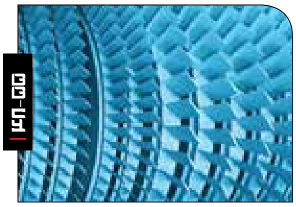
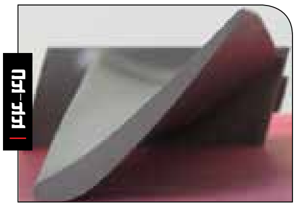
۶۶ رونمایی از کتاب و فیلم ۵۰۰۰ سال مهندسی ایران
گردهمایی در سالن کنفرانس پتروشیمی بندر امام

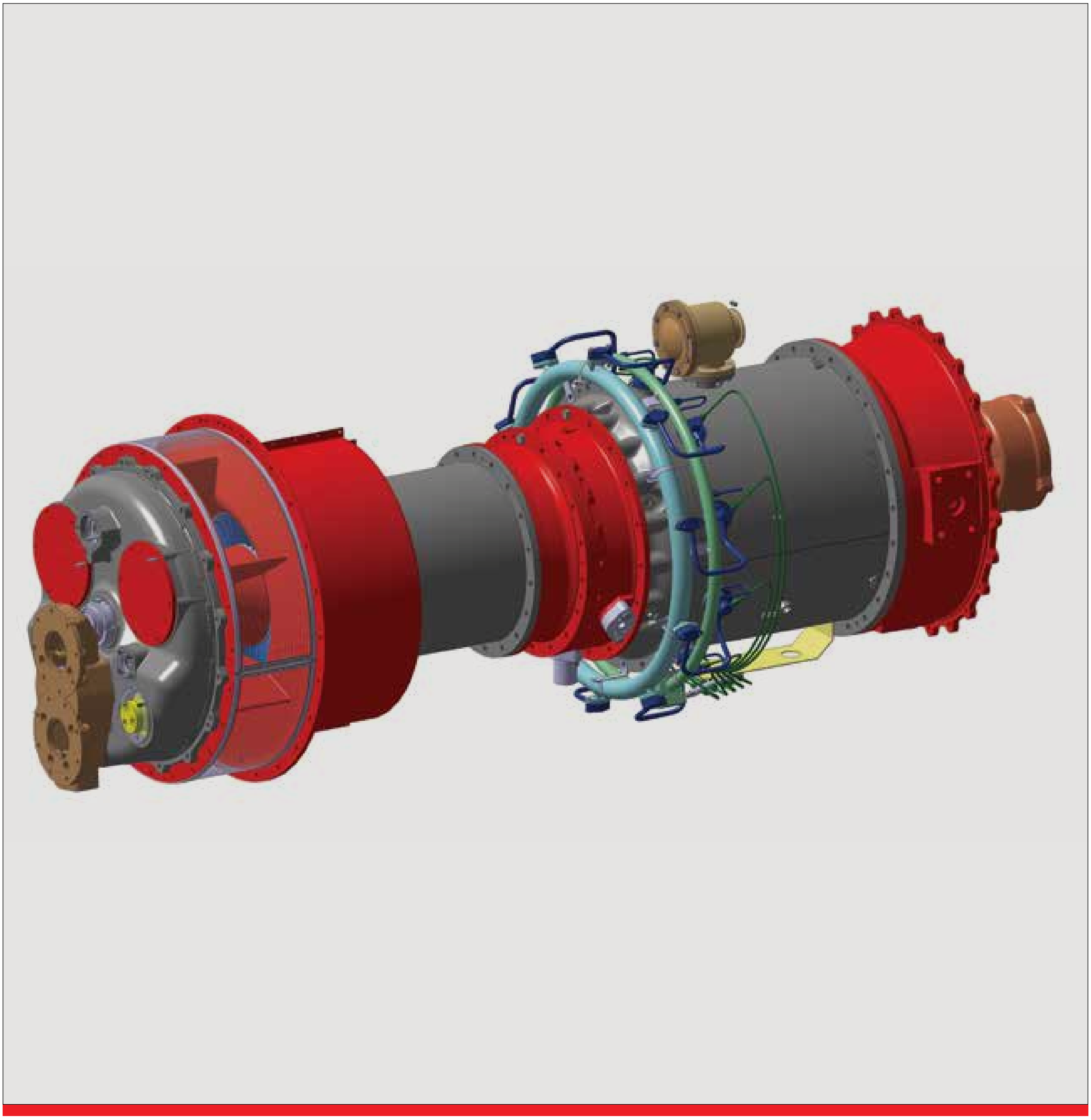
۶۷ یازدهمین نمایشگاه بین‌المللی انرژی کیش
بازدید از نمایشگاه ADIPEC 2014

۶۸ پانزدهمین نمایشگاه دستاوردهای پژوهش و فناوری ایران
ششمین نمایشگاه تخصصی صنعت نفت خوزستان

۶۹ تولید اقتصادی آب شیرین با استفاده از توربین‌های گاز
تدوین برنامه ۵ ساله بومی‌سازی تجهیزات مورد نیاز مناطق نفت‌خیز



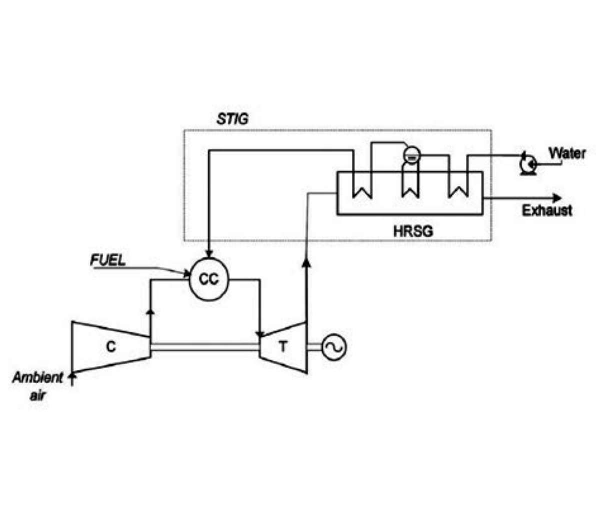


ارتقای توربین گاز سولار سنتار با بهره‌گیری از روش تزریق بخار

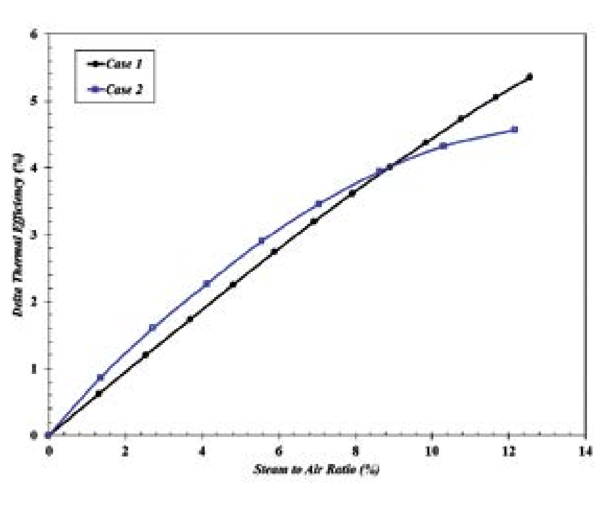
تقی هوشیاری[۱]، کاوه قربانیان[۲]

در حال حاضر راه حل‌های متفاوتی در زمینه افزایش بازدهی توربین گاز مطرح اســت و در صنعت از آن‌ها بهره گرفته می‌شود، اما براساس مطالعات انجام شده یکی از ساده ترین و کم هزینه‌ترین راه حل‌های موجود استفاده از تزریق بخار آب در توربین گاز است. در این روش با استفاده از گرمای گازهای خروجی، بخار آب تولید شده و به داخل مسیر اصلی جریان توربین گاز تزریق می‌شود. تزریق بخار موجب افزایش نسبت فشار سیکل، دبی جرمی و گرمای ویژه ســیال می شود، لذا توان خروجی را افزایش می‌دهد. همچنین سطح آلاینده اکسید نیتروژن را کاهش و کارایی خنک کاری در پره های توربین را افزایش می‌دهد. استفاده از تزریق بخار در توربین‌های گاز به عنوان روشی کارا برای افزایش توان خروجی و بازده ترمودینامیکی و همچنین کاهش سطح آلایندگی این موتورها مطرح است. شماتیک توربین گاز مجهز به سیستم تزریق بخار در شکل یک نشان داده شده است. در این سیستم آب به عنوان سیال کاری دوم، در ابتدای ورود به سیکل از یک پمپ عبور کرده که دبی مورد نیاز را تامین می کند. در ادامه آب فشرده شده وارد مبدل حرارتی شده و با جذب حرارت موجود در گازهای خروجی از توربین، به بخار فوق اشباع تبدیل می‌شود.

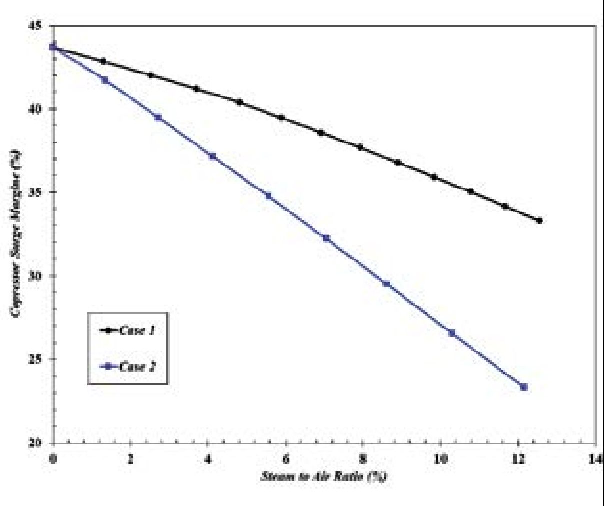
۱: تقی هوشیاری: واحد مهندسی توربین، شرکت مدیریت پروژه‌های توربین ارکان ایرانیان
۲: کاوه قربانیان: نائب رئیس هیات مدیره، شرکت توربین ماشین خاورمیانه



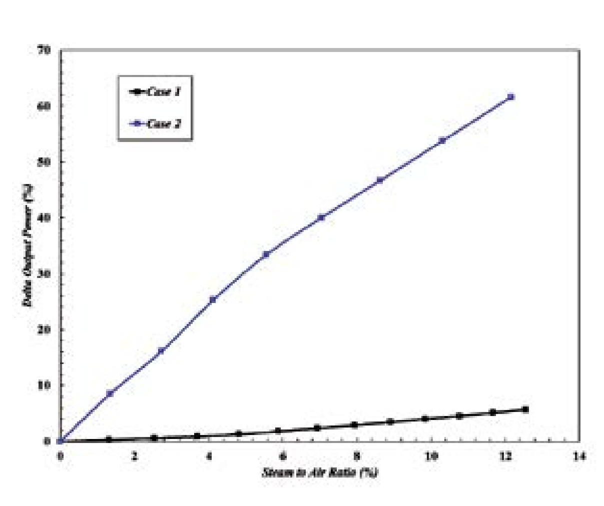
تصویر ۱. شماتیک توربین‌گاز به همراه سیستم تزریق بخار



تصویر ۲. تغییرات بازده ترمودینامیکی تحت اثر تزریق بخار



تصویر ۳. تغییرات محدوده پایداری کمپرسور تحت اثر تزریق بخار



تصویر ۴. تغییر توان تحت اثر تزریق بخار و با اعمال محدودیت بیشینه دما

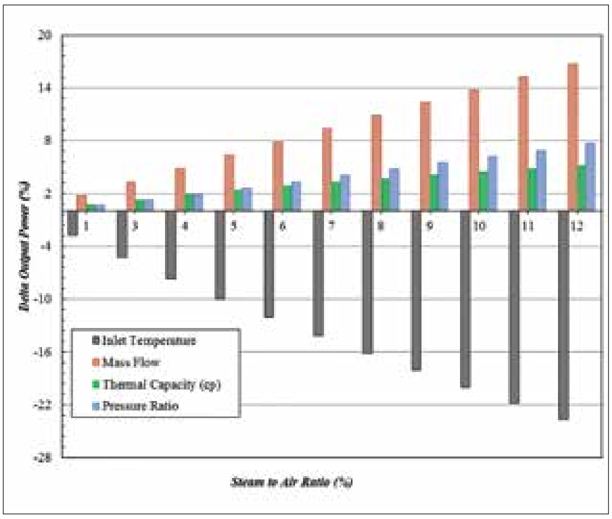
به منظور تزریق بخار در محفظه احتراق، لازم است تمهیداتی از جمله جانمایی و اضافه کردن نازل‌های تزریق بخار به داخل محفظه صورت پذیرد. نکته قابل توجه در این قسمت، نحوه چیدمان و همچنین الگوی پاشش نازل‌های تزریق بخار است. این موارد به‌گونه‌ای تعیین می‌شوند که پایداری شعله در محفظه را تحت تاثیر قرار نداده و در کنار آن موجب کاهش میزان آلاینده‌های تولیدی محفظه نیز بشوند. در مواردی نیز به جای تزریق مستقیم بخار، مخلوط بخار و سوخت را وارد محفظه می کنند. در این صورت وجود بخار آب در سوخت موجب کاهش دمای شعله و در نهایت کاهش تولید آلاینده اکسید نیتروژن در آن می‌شود.

در این مقاله به بررسی اثر استفاده از سیستم تزریق بخار به عنوان روشی به منظور ارتقای توربین گاز سولار سنتار پرداخته شده است. براساس طراحی انجام شده برای سیستم بازیاب حرارت توربین گاز سولار سنتار، این سیستم قادر است در هر ثانیه ۲/۷۸ کیلوگرم بخار فوق‌اشباع با دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد تولید کند. مشخصات این سیستم در جدول یک ارائه شده است. بخار فوق اشباع تولید شده در این سیستم کیفیت مورد نیاز برای تزریق در توربین گاز را داراست. بنابراین تمام یا بخشی از این بخار می‌تواند به داخل توربین گاز تزریق شود. در توربین گاز یک مقدار بیشینه برای دبی جرمی بخار تزریقی وجود دارد که بر اساس محدوده پایداری کمپرسور، بیشینه دور مجاز توربین مولد گاز در توربین گازهای دوشفت و همچنین محدودیت‌های مکانیکی تعیین می‌شود که در توربین‌های گاز مختلف، متفاوت است. در این راستا عملکرد سیکل توربین گاز سولار سنتار به همراه رفتار آیرو-ترمودینامیکی توربین محوری مورد بررسی قرار گرفته است.

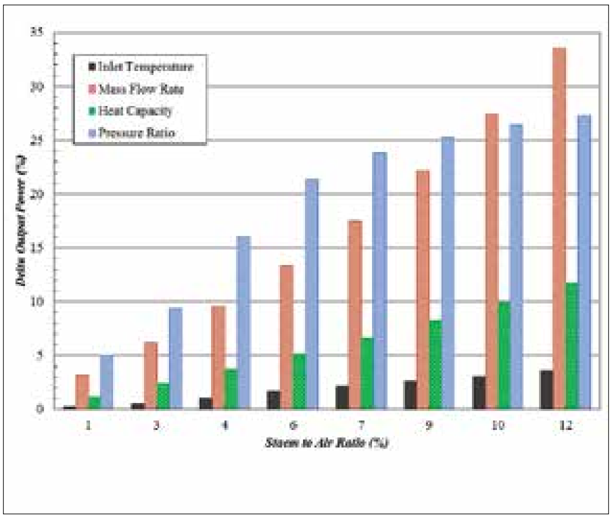
جدول ۱. مشخصات سیستم تولید بخار در توربین گاز سولار سنتار	
نرخ تولید بخار (kg/s)	۲/۷۸
دمای بخار (C°)	۱۸۰
فشار بخار (bar)	۱۰
دمای گاز خروجی (C°)	۱۳۳

تزریق بخار در توربین گاز سولار سنتار دوشفت

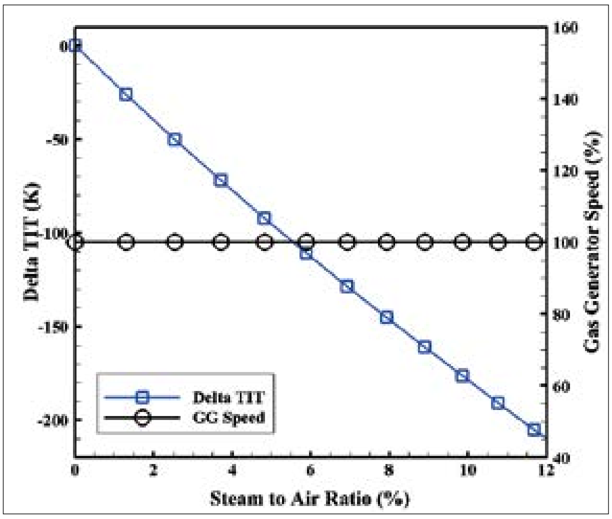
در توربین‌های گاز دو شفت، توربین توان به‌صورت مکانیکی به توربین مولد گاز متصل نشده است. بنابراین سرعت توربین مولد گاز برخلاف حالت تک‌شفت، به صورت مستقیم



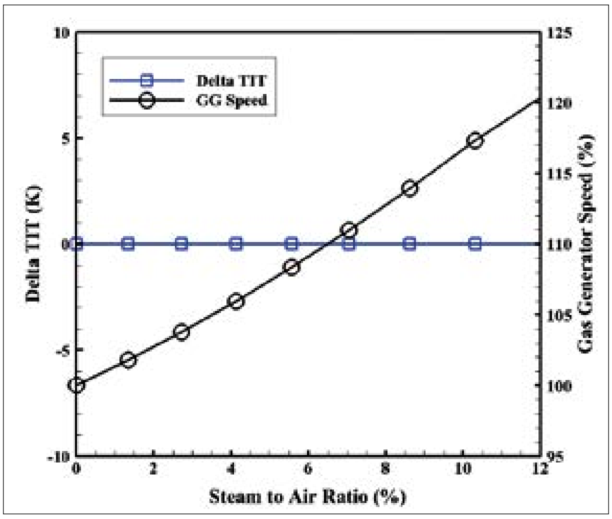
تصویر ۵.سهم پارامترهای موثر در تغییر توان با اعمال سناریوی اول



تصویر ۶.سهم پارامترهای موثر در تغییر توان با اعمال سناریوی دوم



تصویر ۷.تغییرات دمای ورودی به توربین و سرعت مولد گاز در سناریوی اول



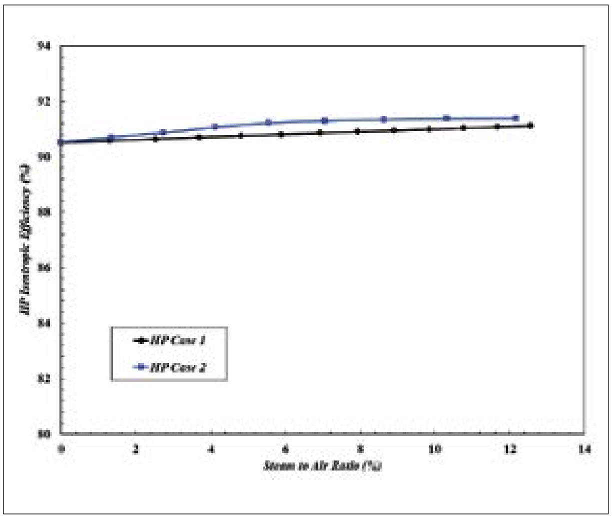
تصویر ۸.تغییرات دمای ورودی به توربین و سرعت مولد گاز در سناریوی دوم

سیستم کنترلی در توربین گاز سولار سنتار در هر لحظه دور موتور و دمای گاز خروجی از محفظه‌ی احتراق را تحت نظر دارد و اجازه عبور مقادیر این پارامترها را از مقدار مجاز تعیین شده نمی‌دهد

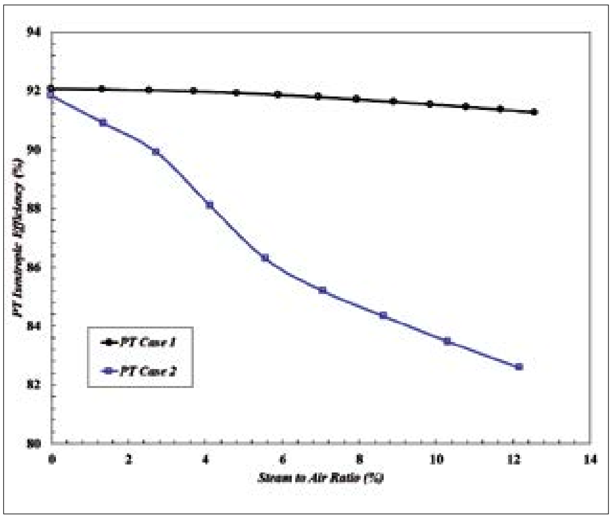
قابل کنترل نیست و بر اساس میزان بارگذاری روی موتور تعیین می‌شود. در صورتی که به توان خروجی بیشتر نیاز باشد، شیر کنترل سوخت اجازه می‌دهد که سوخت بیشتری وارد محفظه احتراق شود. این عمل موجب افزایش سرعت توربین مولد گاز و همچنین افزایش دمای خروجی محفظه احتراق می‌شود که در نهایت به بیشتر شدن توان خروجی توربین تولید توان می‌انجامد.

با توجه به محدودیت‌های مکانیکی و سازه‌ای، سرعت توربین مولد گاز و دمای گازهای خروجی از محفظه احتراق، دارای یک مقدار بیشینه هستند که تجاوز از آن‌ها در بلندمدت منجر به وارد آمدن صدمات به توربین می‌شود. نحوه اعمال این محدودیت‌ها بر عملکرد موتور به دمای محیط، بارهای جانبی و هندسه توربین (به طور خاص نازل اول توربین تولید توان) وابسته است. بر این اساس در شبیه‌سازی عملکرد توربین گاز، این دو پارامتر به عنوان پارامترهای محدودکننده درنظر گرفته شده‌اند. با درنظر گرفتن این دو محدودیت، دو سناریوی متفاوت به منظور تزریق بخار در توربین گاز درنظر گرفته شده است.

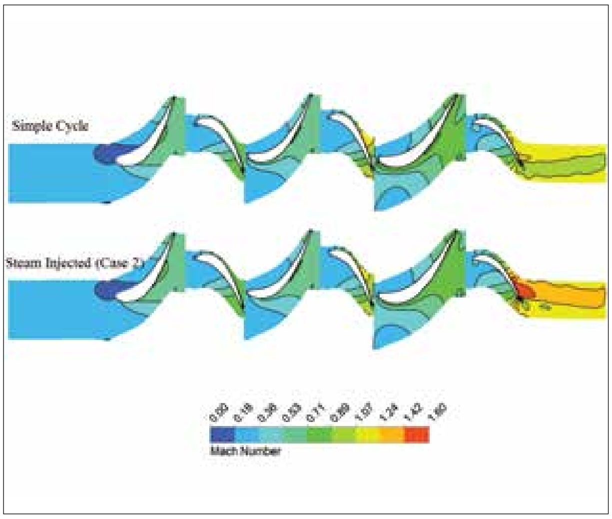
در سناریوی اول هر دو پارامتر محدودکننده به صورت همزمان در نظر گرفته شده‌اند. سیستم کنترلی در توربین گاز سولار سنتار در هر لحظه دور موتور و دمای گاز خروجی از محفظه احتراق را تحت نظر دارد و اجازه عبور مقادیر این پارامترها را از مقدار مجاز تعیین شده نمی‌دهد. با انجام شبیه‌سازی در قالب این سناریو، اثر تزریق بخار بر موتور واقعی بدون اعمال هیچ‌گونه تغییر در سیستم کنترلی یا هندسه اجزا مورد بررسی قرار گرفته است. در سناریوی دوم تنها دمای خروجی از محفظه احتراق به عنوان پارامتر محدود کننده در نظر گرفته شده است و از اعمال محدودیت در دور توربین مولد گاز صرف‌نظر شده است. با در نظر گرفتن این شرایط، پتانسیل تولید توان توربین گاز تحت اثر تزریق بخار



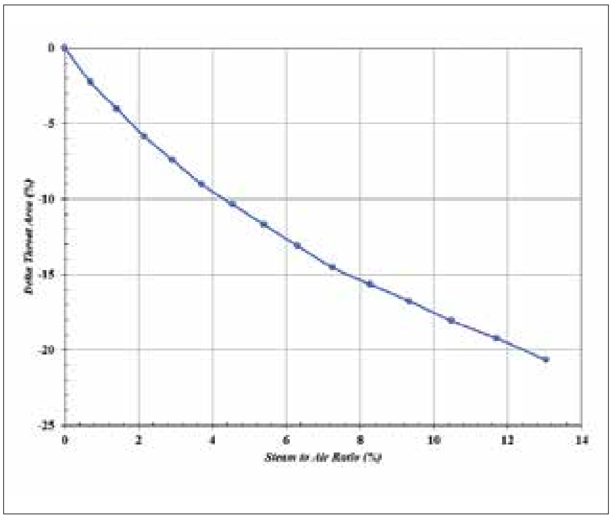
تصویر۹. تغییر بازده آیزنتروپیک توربین مولد گاز تحت اثر تزریق بخار



تصویر۱۰. تغییر بازده آیزنتروپیک توربین تولید توان تحت اثر تزریق بخار



تصویر۱۱. تغییرات عدد ماج جریان تحت اثر تزریق بخار



تصویر۱۲. تغییرات گلوگاه نازل توربین توان به منظور ایجاد سازگاری

و بدون اعمال تغییرات هندسی در اجزا قابل محاسبه است. در ادامه به بررسی اثر استفاده از سیستم تزریق بخار در توربین گاز سولار سنتار و اعمال این دو سناریو پرداخته شده است.

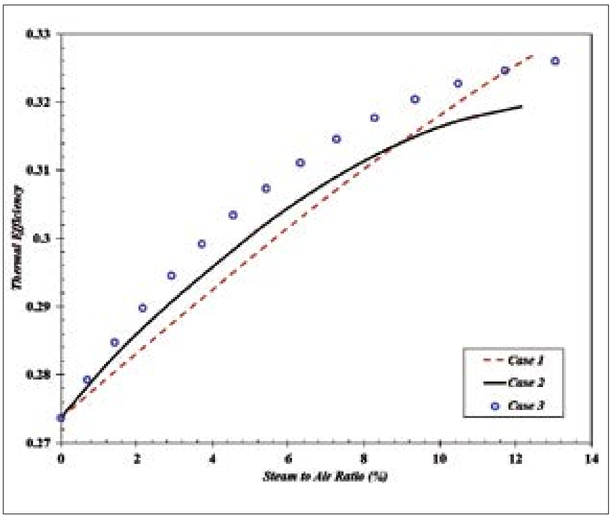
تحلیل پارامترهای عملکردی توربین گاز

چگونگی تغییر در بازده ترمودینامیکی توربین گاز تحت اثر تزریق بخار در نمودار شکل ۲ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با استفاده از تزریق بخار، بازده ترمودینامیکی افزایش می‌یابد و مقدار بخار تزریق شده در این افزایش اثر مثبت دارد. همچنین با انتخاب هریک از سناریوهای مختلف، افزایش بازده در محدوده یکسانی اتفاق می‌افتد. به عنوان مثال با تزریق بخار به میزان ۱۰ درصد دبی جریان اصلی، بازده ترمودینامیکی حدود ۴ درصد افزایش می‌یابد.

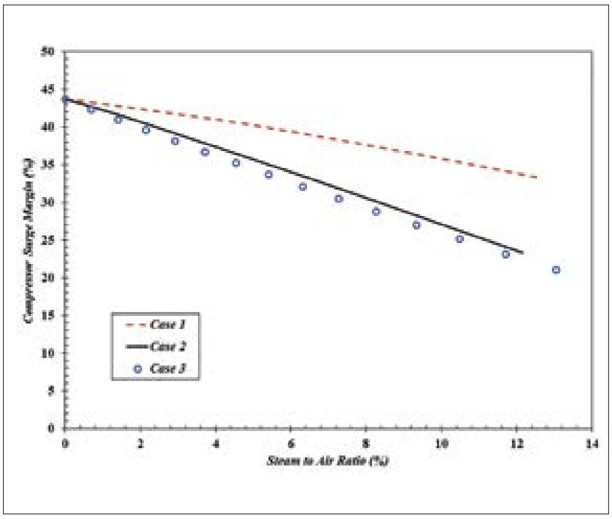
اثر تزریق بخار بر محدوده پایداری کمپرسور در شکل ۳ نشان داده شده است. بر این اساس در اثر تزریق بخار محدوده پایداری کمپرسور کاهش می‌یابد، اما با توجه به بزرگ بودن این محدوده در توربین گاز سولار سنتار، محدودیتی در زمینه ناپایداری کمپرسور تحت اثر تزریق بخار وجود نخواهد داشت و با تزریق تمامی بخار قابل تولید به داخل موتور، از حاشیه پایداری تنها حدود ۲۰ درصد کاسته می‌شود. البته محدوده ناپایداری کمپرسور با صرف نظر کردن از محدودیت سرعت توربین مولد گاز در سناریوی دوم نسبت به شرایط اعمالی در سناریوی اول کاهش بیشتری می‌یابد.

تغییرات توان خروجی بر اساس دبی بخار تزریقی در نمودار شکل ۴ ارائه شده است. بر این اساس تزریق بخار در توان خروجی توربین گاز اثر مثبت دارد. با این وجود تفاوت چشمگیری در تغییرات توان خروجی با اعمال دو سناریوی مختلف مشاهده می‌شود. این تفاوت به گونه‌ای است که با تزریق بخار به میزان، ۱۰ درصد دبی جریان هوا و اعمال شرایط سناریوی اول، توان

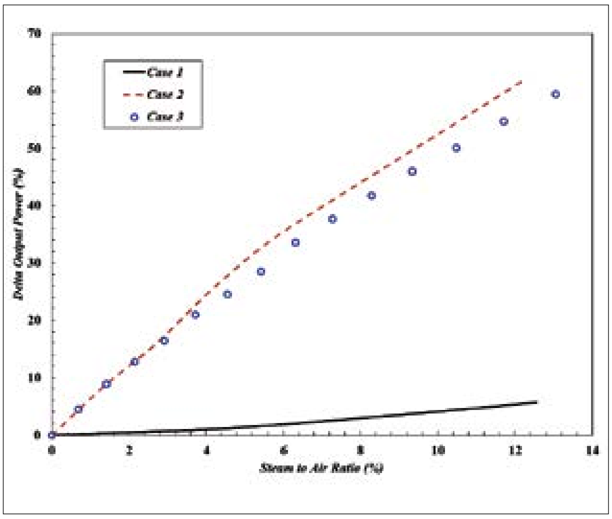
محدوده ناپایداری کمپرسور با صرف نظر کردن از محدودیت سرعت توربین مولد گاز در سناریوی دوم نسبت به شرایط اعمالی در سناریوی اول کاهش بیشتری می‌یابد



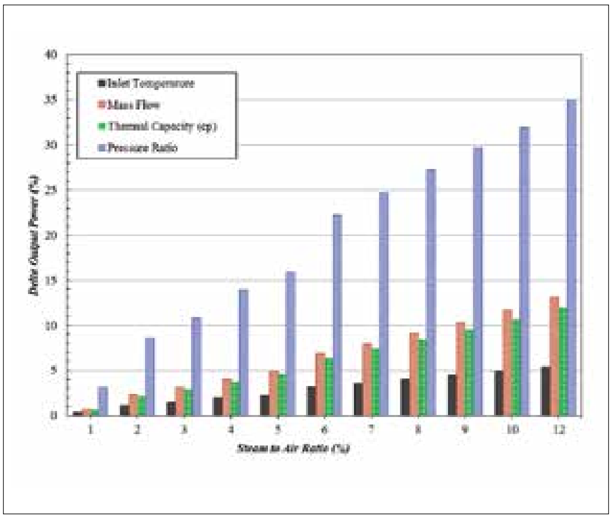
تصویر ۱۳. تغییر بازده ترمودینامیک توربین گاز تحت اثر تزریق بخار



تصویر ۱۴.تغییر در محدوده‌ی پایداری کمپرسور تحت اثر تزریق بخار



تصویر ۱۵. تغییر توان خروجی توربین گاز تحت اثر تزریق بخار و اعمال سازگاری



تصویر ۱۶. جزئیات تغییر توان خروجی توربین تحت اثر تزریق بخار و اعمال سازگاری

تغییرات دمای ورودی به توربین و همچنین دور توربین مولد توان تحت اثر تزریق بخار در شکل ۷ و شکل ۸ نشان داده شده است

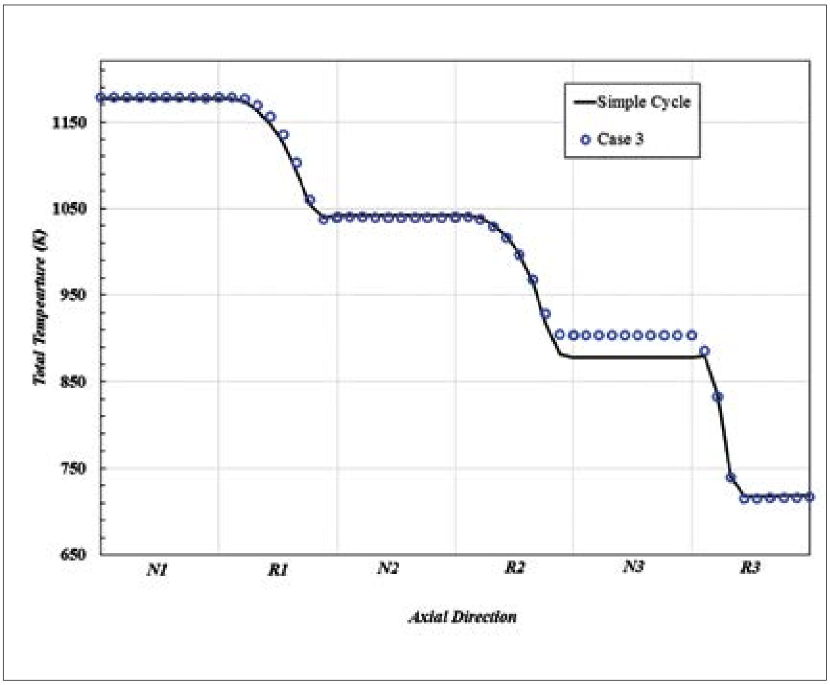
خروجی حدود ۴ درصد افزایش می‌یابد. اما با صرف نظر از محدودیت دور توربین مولد گاز و اعمال شرایط سناریوی دوم، افزایش توان خروجی بیش از ۵۵ درصد خواهد بود.

چگونگی ایجاد این تفاوت در توان خروجی با بررسی عوامل مؤثر در تولید توان قابل بررسی است. توان خروجی توربین با پارامترهای دمای ورودی به توربین، نسبت فشار، دبی جرمی گاز و ظرفیت گرمایی ویژه سیال ارتباط مستقیم دارد. تاثیر این پارامترها بر تغییرات توان تحت‌اثر تزریق بخار و اعمال سناریوهای اول و دوم به ترتیب در شکل ۵ و ۶ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، افزایش در دبی جریان و ظرفیت حرارتی گاز تحت اثر تزریق بخار، تاثیر مثبتی در توان خروجی دارند. همچنین به‌واسطه افزایش نسبت فشار کمپرسور، نسبت فشار موثر در توان خروجی توربین تولید توان نیز موجب افزایش توان خروجی می‌شود. با این وجود، در سناریوی اول تزریق بخار اثر دمای ورودی به توربین منفی است که یکی از عوامل کم بودن تغییرات توان در این شرایط است.

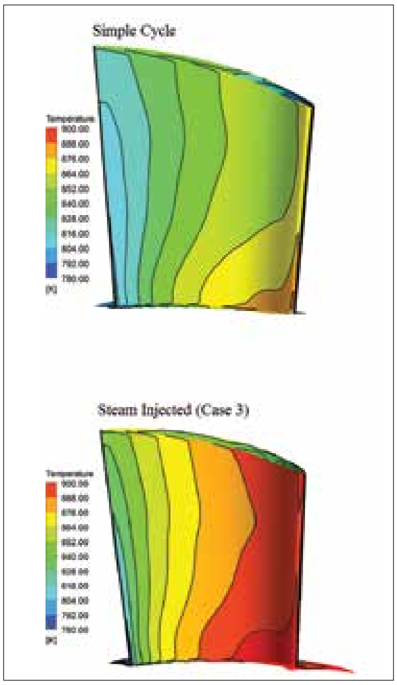
تغییرات دمای ورودی به توربین و همچنین دور توربین مولد توان تحت اثر تزریق بخار در شکل ۷ و ۸ نشان داده شده است. بر اساس نمودارهای ارائه شده، با اعمال سناریوی اول اگرچه محدودیت دور توربین مولد گاز حفظ می‌شود اما دمای ورودی به توربین به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. این کاهش دما علاوه بر اثرات منفی بر سیستم بازیاب حرارت و تولید بخار، موجب از دست رفتن بخشی از پتانسیل توربین گاز در تولید توان می‌شود. از طرفی با اعمال شرایط سناریوی دوم، دور توربین مولد گاز از مقدار مجاز بسیار بیشتر می‌شود و به‌عنوان محدودیتی در تزریق بخار با این سناریو مطرح است.

تحلیل بازده توربین محوری

با تزریق بخار، بازده توربین نیز تحت تاثیر قرار



تصویر ۱۷. نمودار توزیع دمای میانگین در توربین تحت اثر تزریق بخار و اعمال تصحیحات هندسی



تصویر ۱۸. تغییر دمای کاری نازل توربین تولید توان تحت اثر تزریق بخار

می‌گیرد. تغییرات ایجاد شـــده در بازده توربین با اعمال سناریوهای مختلف در شکل ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با اعمال شرایط تزریق بخار در سناریوی دوم، بازده توربین تولید تـــوان به میزان قابـــل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. این تغییر در بازده توربین تولید توان در حالی است که بازده توربین مولد گاز تغییر چندانی نمی‌کند.

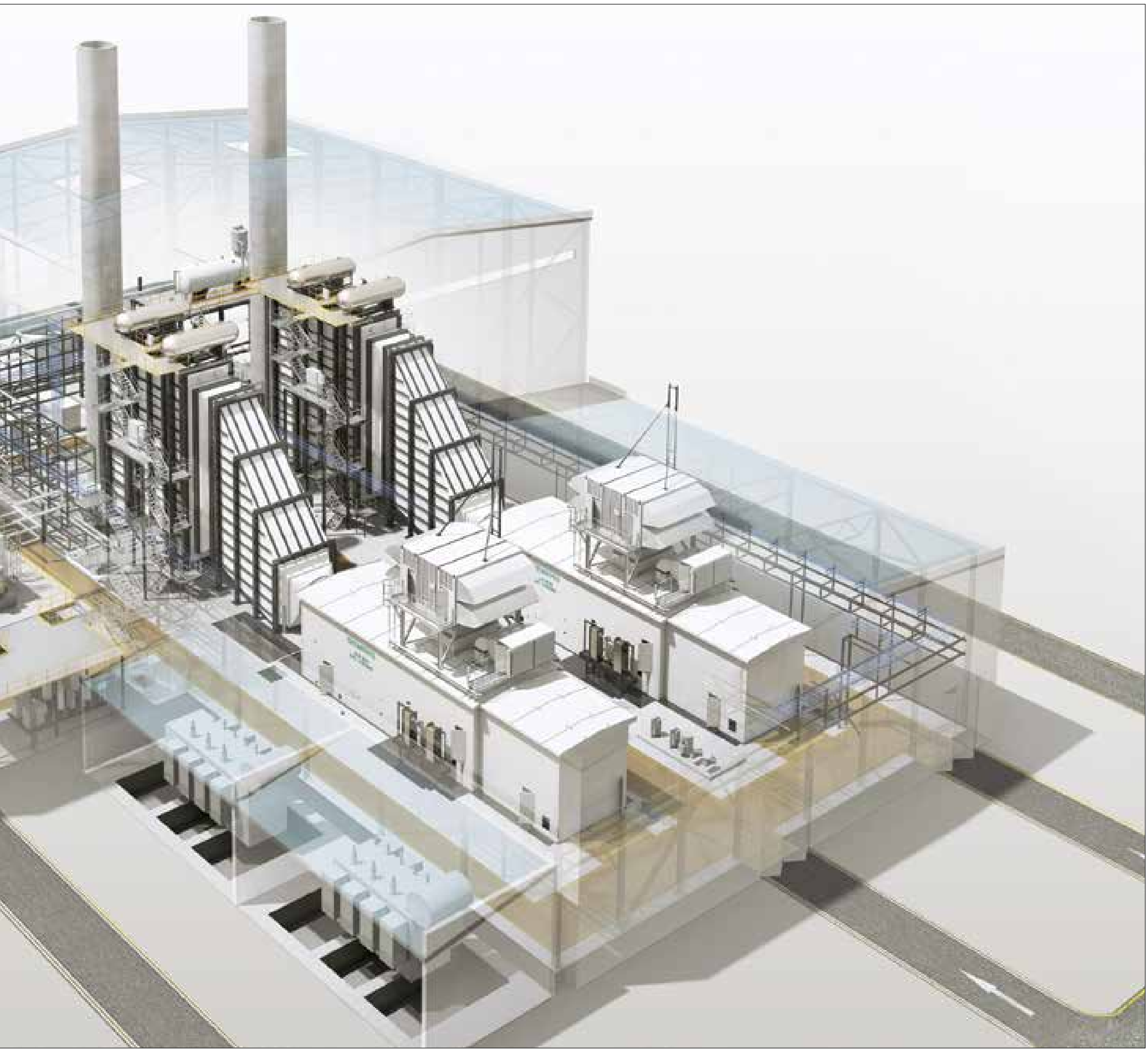
به منظور بررســـی عوامل مؤثـــر در کاهش بازده توربیـــن تولید توان، جزییات جریـــان عبوری از توربین تحت اثر تزریق بخار مورد بررســـی قرار گرفته اســـت که در شکل ۱۱ نشـــان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده در اثر تزریق بخار و اعمال سناریوی دوم، میانگین عدد ماخ در خروجی روتور توربین تولید توان حدود ۱۵درصد افزایـــش می‌یابد و در برخی نواحـــی عدد ماخ تا مقدار ۱/۵ می‌رسد. این امر موجب افزایش تلفات ناشی از انبساط فراصوتی در روتور توربین تولید توان می‌شود که عامل اصلی کاهش بازدهی این بخش است.

با توجه به نتایج بررسی‌های انجام شده، با اعمال هریک از ســـناریوهای تزریق بخار، توان و بازده توربین گاز بهبود می‌یابد. با این وجود در استفاده از هر سناریو محدودیت‌هایی وجود دارد. با اعمال تزریق بخار بر مبنای سناریوی اول، دمای ورودی به توربیـــن گاز کاهش می‌یابد کـــه در عملکرد سیســـتم بازیاب حرارت و تولید بخـــار اثر منفی دارد و همچنین موجب از دســـت رفتن بخشـــی از پتانســـیل توربین گاز در تولید توان می‌شود. از طرفی با اعمال ســـناریوی دوم، دور توربین مولد گاز از مقدار مجـــاز فراتر می‌رود و همچنین بازده توربین تولید توان نیز کاهش چشمگیری می‌یابد.

به منظور بررسی عوامل مؤثر در کاهش بازده توربین تولید توان، جزییات جریان عبوری از توربین تحت اثر تزریق بخار مورد بررسی قرار گرفته که در شکل ۱۱ نشان داده شده است

جدول ۲. اثر تزریق بخار در توربین گاز سولار سنتار

	سیکل ساده	تزریق سناریو ۱	تزریق سناریو ۲	تزریق سناریو ۳
نسبت دبی بخار به دبی هوا (درصد)	۰	۱۰	۱۰	۱۰
توان خروجی (درصد)	۱۰۰	۱۰۴	۱۵۶	۱۵۰
بازده توربین گاز (درصد)	۲۷/۴	۳۱/۸	۳۱/۷	۳۲/۳
تغییر محدوده ناپایداری کمپرسور (درصد)	۴۳	-۷	-۱۷	-۱۸
دبی جرمی هوا (درصد)	۱۰۰	۱۱۰	۱۲۳	۱۱۰
نسبت فشار کمپرسور	۹/۳	۹/۷	۱۱/۸	۱۰/۴
دور مولد گاز (درصد)	۱۰۰	۱۰۰	۱۱۷	۱۰۰
دمای ورودی به توربین (C)	۹۰۵	۷۲۹	۹۰۵	۹۰۵
تغییر زاویه نازل PT(°)	۰	۰	۰	۳/۴



بر اساس تحلیل‌های صورت گرفته، با تزریق بخار برمبنای هریک از سناریوهای عنوان شده، محدودیت‌هایی وجود خواهد داشت

تغییر سازگاری توربین تولید توان

بر اســاس تحلیل‌های صورت گرفته، با تزریق بخار بــر مبنای هریک از ســناریوهای عنوان شده، محدودیت‌هایی وجود خواهد داشت. لذا سناریوی دیگری تعریف شده است که علاوه بر دارا بودن مزایای هریک از دو ســناریوی قبل، محدودیت‌های آن‌ها را در بر نداشــته باشــد.
در توربین‌های گاز دوشفت، سازگاری توربین تولید تــوان و توربین مولد تاثیر بســزایی در عملکرد توربین گاز تحت اثر تزریق بخار دارد. با در نظر گرفتن این واقعیت، ظرفیت توربین تولید توان در شــرایط تزریق بخار تغییر داده شده است تا بهترین عملکرد در شرایط تزریق حاصل شود.
چگونگی اعمال تغییر ظرفیت توربین تولید توان در شرایط تزریق بخار با استفاده از کد یک‌بعدی تحلیل مورد بررســی قرار گرفته اســت. بدین منظور زاویه نصب نازل به عنوان پارامتر متغیر در یک حلقــه تکرار قرار گرفته اســت تا تغییر ظرفیت مورد نیاز با توجه به شبیه‌ســاز توربین گاز تامین شود.
بر اساس تحلیل‌های انجام شــده، برای تغییر ظرفیــت توربین تولید توان، مســاحت گلوگاه نازل ردیف اول توربین تولید توان بایدبا توجه به نمودار شکل ۱۲ تغییر کند. همانطور که مشاهده می‌شود به منظور دستیابی به شرایط مورد نظر، مساحت گلوگاه بایستی کاهش یابد.
با اعمال تغییر ظرفیت در توربین توان و تزریق بخار در توربین گاز، بازده ترمودینامیکی توربین گاز مورد بررســی قرار گرفته اســت. شکل ۱۳

با تغییر مساحت گلوگاه نازل و اعمال شرایط تزریق بخار، توان خروجی توربین تولید توان به صورت شکل ۱۵ تغییر می‌کند. همانطور که مشاهده می‌شود با تزریق بخار، توان خروجی افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. این افزایش توان در محدوده‌ی افزایش توان ایجاد شده تحت تزریق بخار در سناریوی ۲ است

تغییرات بازده توربین گاز را در شـرایط تزریق بخار با توجه به اعمال ســازگاری جدید نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با اعمال تغییر ظرفیت مناســب در توربین تولید توان، بازده ترمودینامیکی افزایش می‌یابد.

همچنین محدوده پایداری کمپرسور به عنوان پارامتر تاثیرگذار در تزریــق بخار مورد ارزیابی قرار گرفته اســت. همانطور که در شــکل ۱۴ نشــان داده شده اســت، با اعمال تزریق بخار و تغییر ظرفیت توربین تــوان، محدوده پایداری کمپرسور بیشــتر کاهش می‌یابد. اما با توجه به بزرگ بودن این محدوده برای توربین گاز مورد نظر، در بدترین شرایط نیز همچنان کمپرسور با حاشیه بیش از ۲۰ درصدی در محدوده پایداری قرار دارد.

با تغییر مســاحت گلوگاه نازل و اعمال شرایط تزریق بخار، توان خروجــی توربین تولید توان به صورت شکل ۱۵ تغییر می‌کند. همانطور که مشاهده می‌شــود با تزریق بخار، توان خروجی افزایش قابل ملاحظــه‌ای می‌یابد. این افزایش توان در محدوده افزایش توان ایجاد شده تحت تزریق بخار در سناریوی ۲ است.

چگونگی تغییرات توان خروجی در شــکل ۱۶ نشان داده شــده اســت. همانطور که مشاهده می‌شود، بیشترین تاثیر در تغییر توان خروجی به واســطه افزایش نسبت فشــار توربین اتفاق افتاده اســت. در واقع با تغییر سازگاری توربین تولید توان، نسبت فشار توربین مولد گاز کاهش می‌یابد و فشار مازاد تولید شده توسط کمپرسور در توربین توان صــرف تولید کار مفید خروجی می‌شود.

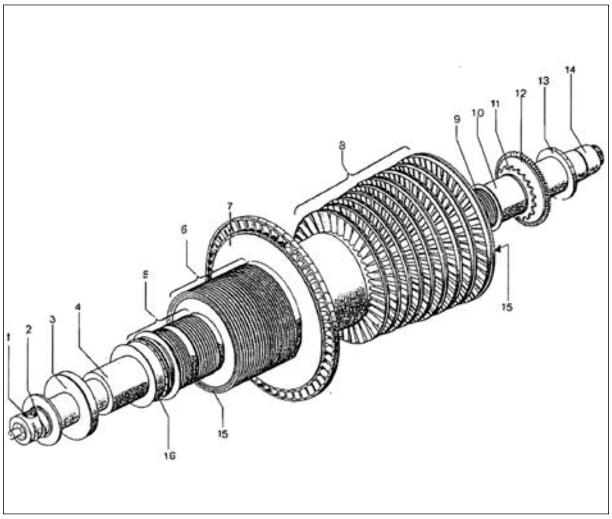
توزیع دمای میانگین در توربین تحت اثر تغییر دما و تغییر ظرفیت توربین تولید توان در شکل ۱۷ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با وجود ثابت بودن دما در طول توربین مولد گاز، دمای میانگین در ورودی توربین تولید توان حدود ۲۵ درجه افزایش می‌یابد.

این تغییر به واسطه تغییر نسبت فشار در توربین مولد گاز صورت گرفته و در اثر تصحیح سازگاری ایجاد شده است.

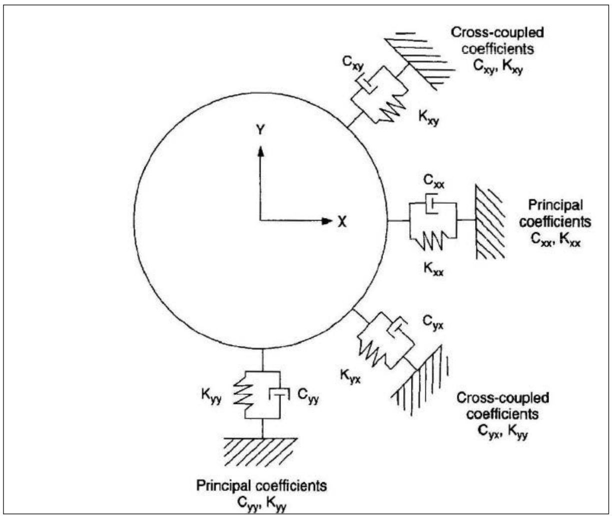
بیشــترین تغییر در دمای کاری نــازل توربین تولید توان دیده می‌شود که در شکل ۱۸ نشان داده شده است.

جمع‌بندی

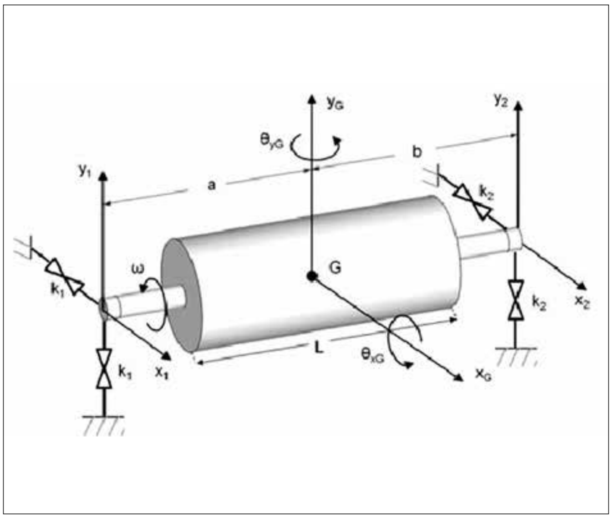
در این مقاله تاثیر اســتفاده از سیســتم تزریق بخار در بهبود عملکرد توربین گاز سولار سنتار دوشفت بررسی شــد. نتایج تحلیل‌های صورت گرفته بــرای تزریق بخار به میــزان ۱۰ درصد دبی جریان هوای اصلی در جدول ۲ آمده است. همانطور که مشاهده می‌شــود با تزریق بخار و اعمال ســازگاری جدید در توربین تولید توان، توان خروجی و بازده ترمودینامیکی توربین گاز بهبود می‌یابد.



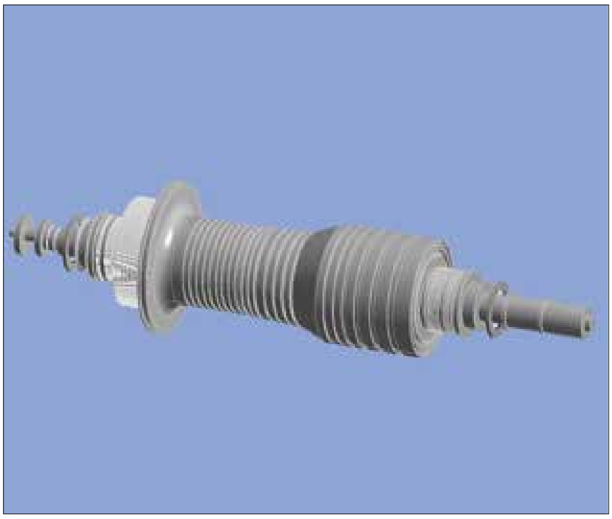
تصویر ۱. روتور توربین بخار زیمنس



تصویر ۲. مدل بیرینگ در صفحه عمود بر شفت



تصویر ۳. مدل شفت و دیسک با در نظر گرفتن دمپر در محل بیرینگ [API-684]



تصویر ۴. مدل شفت و بیرینگ در نرم‌افزار ANSYS

مطالعه دینامیک روتور توربین بخار به کمک روش المان محدود

زهرا محمدی[1]، امیر آگهی[2]

مقدمه

دینامیک روتور یکی از شاخه‌های مهم در مهندسی است که به بررسی ارتعاشات جانبی و پیچشی می‌پردازد. شفت، دیسک، پره، بیرینگ‌ها و آبندها از اجزای مهم در این سیستم دینامیکی هستند. اجزای دوار این سیستم شامل پره، شفت و دیسک است که در آنالیز دینامیکی روتور به بررسی رفتار ارتعاشاتی این اجزای چرخشی پرداخته می‌شود.

معرفی مسئله

هدف از انجام این پژوهش، یافتن سرعت بحرانی شفت توربین، آنالیز رفتار پره‌های هر ردیف در محدوده سرعت کاری و بررسی احتمال پدیده رزونانس در پره‌ها است. برای دستیابی به اهداف عنوان شده از آنالیز مدال بهره گرفته شده است.

آنالیز مودال رفتار دینامیکی و حرکات سازه مکانیکی که تحت تاثیر نیروهای محیطی دارای تغییر شکل و ارتعاش هستند را بررسی می‌کند. در این پژوهش برای یافتن سرعت بحرانی شفت، تحلیل رفتار پره‌ها و بررسی احتمال پدیده رزونانس در پره‌ها از آنالیز مودال استفاده شده است. تحلیل دینامیکی سازه‌های پیچیده بسیار دشوار می‌باشد. مدل‌ها بر پایه روش‌های عددی شامل اجزای محدود در این زمینه به خوبی می‌تواند کاربردی باشد. استفاده از نرم‌افزارهای اجزای محدود همانند ANSYS در انجام این گونه تحلیل‌ها می‌تواند بسیار کارآمد باشد.

توربین زیمنس 1100K

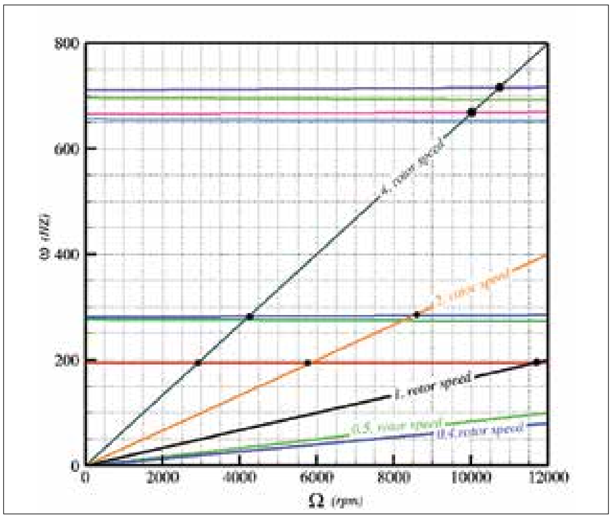
سرعت کاری این توربین حدود 7000 rpm که ماکزیمم مقدار آن برابر 8090 rpm است. در جدول زیر برخی از مشخصات توربین بخار زیمنس آورده شده است:

تحلیل روتور

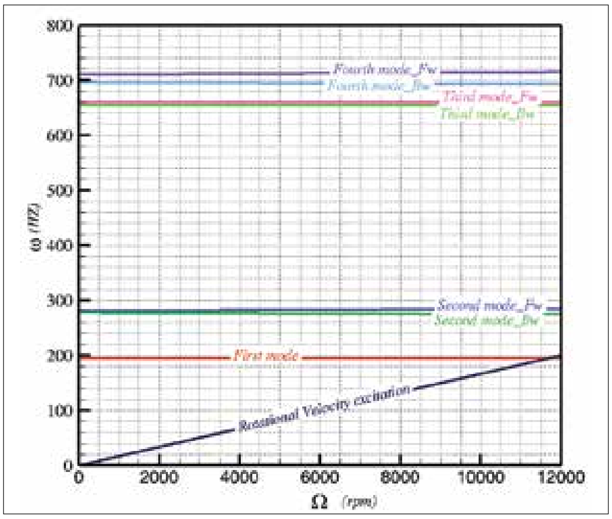
تحلیل شفت

برای بررسی دینامیک شفت مدل‌های متفاوتی ارائه

۱: زهرا محمدی: واحد مهندسی محصول، شرکت تامین کالای توربین ماشین خاورمیانه
۲: امیر آگهی: مدیر واحد مهندسی محصول، شرکت تامین کالای توربین ماشین خاورمیانه

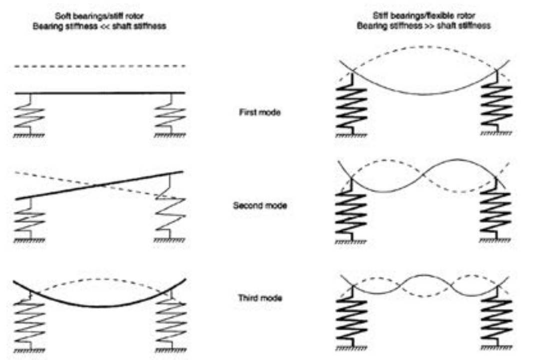


تصویر ۶.کمپل دیاگرام و نمایش تحریکات وارد بر شفت توربین



تصویر ۵. کمپل دیاگرام شفت با در نظر گرفتن بیرینگ هایی از نوع 4-Axial groove

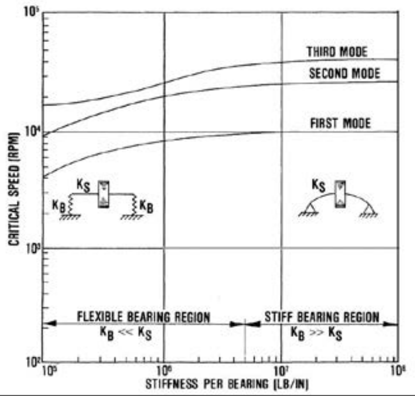
$$\left.\begin{matrix} K_{bearing} \ll K_{shaft} \\ 7.13e^{8} \ll 1.2e^{9} \end{matrix}\right\} \rightarrow soft \quad Bearing$$



تصویر ۸.شکل مودهای روتور در سه حالت مختلف [API 684]

$$K_s = \omega_{cr}^2 M_m$$

$$Shaft \quad Stiffness = 1214^2 \times \frac{1630}{2} = 1.2e^{9}$$



تصویر ۷. Undamped Critical Speed Map

اطلاعات روتور توربین بخار زیمنس			
نوع	K1100-2	فشار خروجی	0/186 Bar
سال ساخت	1996	دمای ورودی بخار	399°C
توان خروجی	8400 KW	وزن مجموعه توربین	10700 Kg
فشار بخار ورودی	5/40 Bar	وزن روتور توربین	1630 Kg

شد که در نهایت امروزه از مدل ساده و در عین حال دقیقی که در استاندارد API684 مطرح شده استفاده می‌شود. این مدل متفاوت از متدهای گذشته و با بهره گیری از تحقیقات جدید است. [۱]

دیاگرام کمپل گرافی است که سرعت توربین برحسب (r/min) روی محور افقی و فرکانس برحسب (cycles/sec) روی محور عمودی رسم می شود. در نمودار شکل ۵ دیاگرام کمپل به ازای ۵ شکل مود اول رسم شده است. محل تقاطع خط تحریک شفت با هر کدام از خطوط فرکانس طبیعی بیانگر سرعت بحرانی است. یافتن این سرعت از آنجا حایز اهمیت است که تاثیرات زیادی روی عمر و عملکرد ماشین می گذارد. [۲،۳،۴]

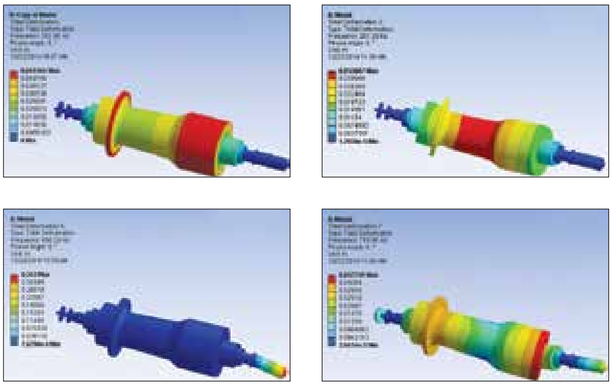
با توجه به کمپل دیاگرام بدست آمده از شفت سرعت بحرانی شفت حدود 11300 rpm است. همانگونه که مشاهده می‌شود اولین سرعت بحرانی در محل برخورد خط تحریک با فرکانس طبیعی اول شفت می‌باشد. از آنجا که فرکانس طبیعی اول کمترین تاثیر پذیری را از سختی بیرینگ دارد، می‌توان نتیجه گرفت سرعت بحرانی تا حدودی مستقل از سختی شفت می‌باشد. تحریک‌های مختلفی در سیستم روتور وجود دارد اما تمامی این اغتشاشات باعث ایجاد رزونانس نمی‌شود. برخی از این اغتشاشات که در سیستم روتور/بیرینگ می‌بایست مورد بررسی قرار گیرد به صورت جدول شماره یک می‌باشد.

با رسم اغتشاشات روی دیاگرام کمپل، سرعت‌هایی که به ازای آن‌ها پدیده‌ی رزونانس ایجاد می‌شود به دست می‌آید. به منظور بررسی هر کدام از شکل مودها و مقایسه سختی شفت و بیرینگ می‌بایست سختی روتور محاسبه شود. برای بدست آوردن سختی روتور از روش ارائه شده توسط Salomone استفاده می‌شود [۵]

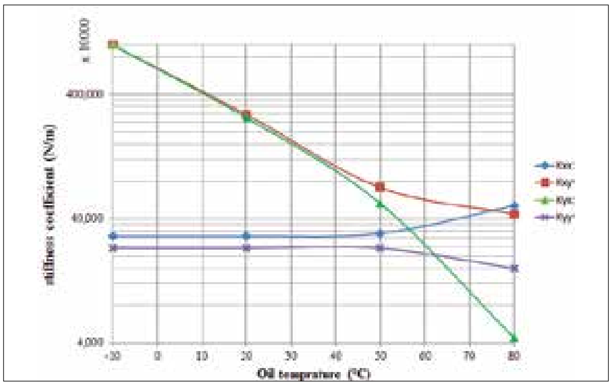
در شکل ۹ نشان داده شده است که اختلاف کم بین مقادیر سختی بیرینگ و روتور سبب شده شکل مودهای ایجاد شده در شفت، مابین دو حالت عنوان شده باشد.

بررسی اثر افزایش دمای روغن بیرینگ روی ضرایب بیرینگ

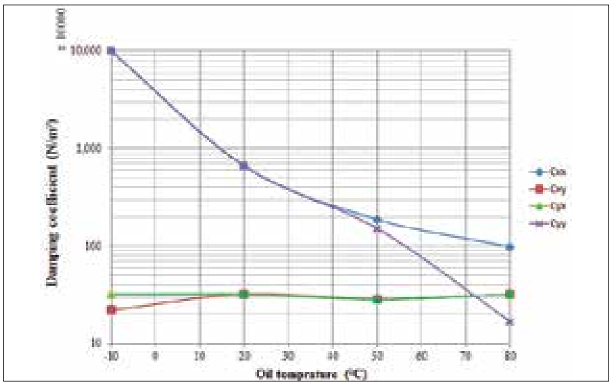
نیروی وارد شده از طریق شفت به بیرینگ توسط لایه هیدرودینامیکی فیلم روغن تحمل می‌شود بنابراین هیچ نیروی تماسی بین شفت و بیرینگ وجود ندارد. در این حالت ماشین می‌تواند در محدوده



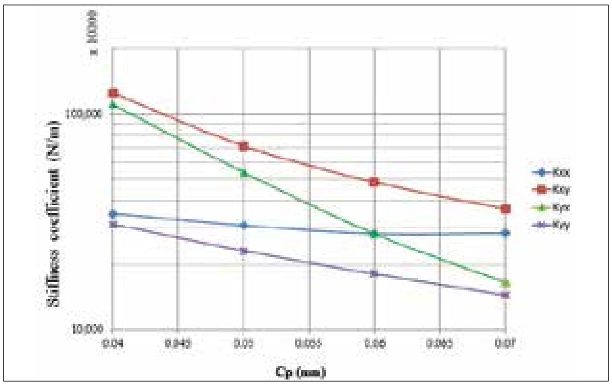
تصویر ۹. چهار شکل مد اول شفت



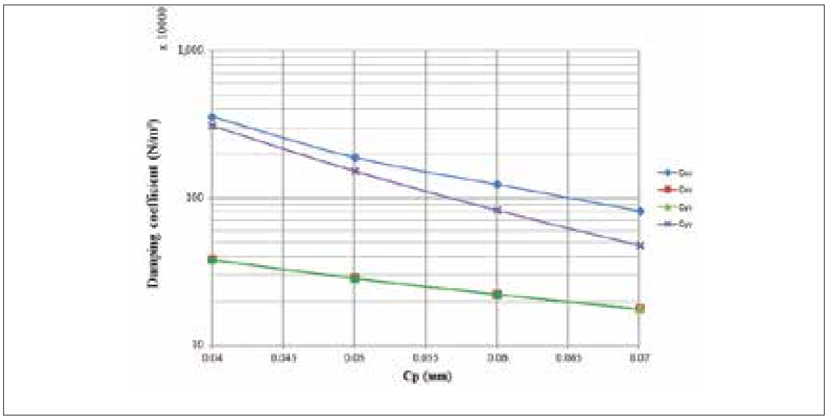
تصویر ۱۰. نمودار تغییرات ضریب سختی بیرینگ نسبت به تغییرات دمای فیلم روغن بیرینگ



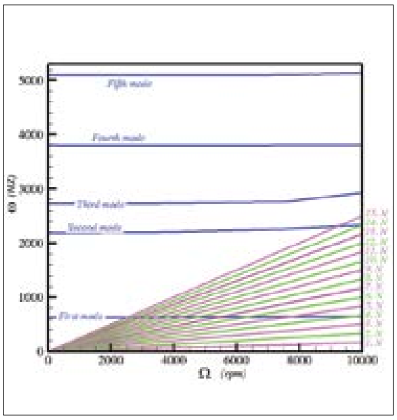
تصویر۱۱. نمودار تغییرات ضریب دمپینگ بیرینگ نسبت به تغییرات دمای فیلم روغن بیرینگ



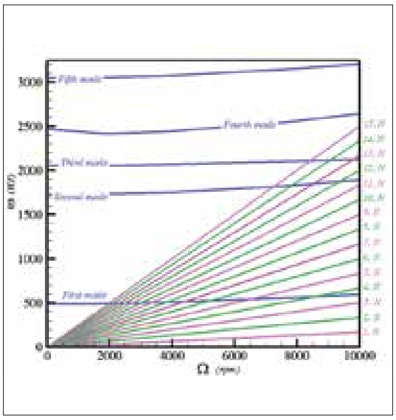
تصویر ۱۲. نمودار تغییرات ضریب سختی بیرینگ نسبت به تغییرات لقی ماشینکاری



تصویر۱۳.نمودار تغییرات ضریب دمپینگ بیرینگ نسبت به تغییرات لقی ماشینکاری



تصویر۱۴.کمپل دیاگرام پره ردیف بیست و دوم



تصویر۱۵.کمپل دیاگرام پره ردیف بیست و سوم

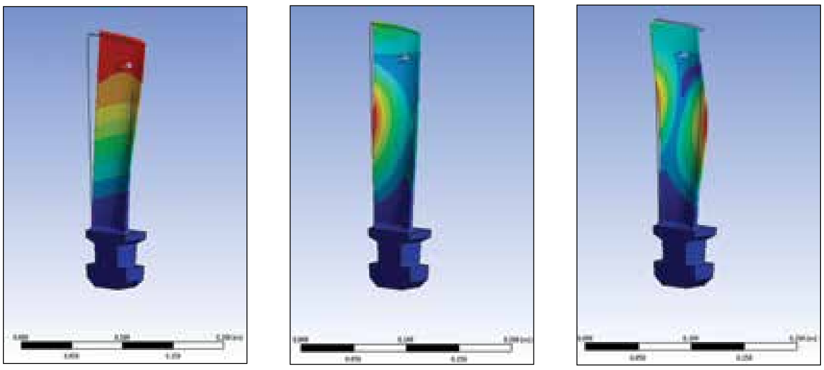
دینامیکی مطمئن از نظر پایداری و سرعت بحرانی کار کند. این اولین دلیل برای حساسیت فیلم روغن و اهمیت بررسی عوامل موثر بر آن است. مطابق شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که با افزایش دمای روغن داخل بیرینگ‌ها ضرایب سختی جانبی با شیب زیاد کاهش یافته و ضرایب سختی K_{yy} نیز با شیب کمتری کاهش می‌یابد. در شکل ۱۱ نشان داده شده است که ضرایب دمپینگ در راستای x و y نیز به شدت تابعی از دمای روغن داخل بیرینگ هستند و افزایش دمای روغن داخل بیرینگ می‌تواند سبب افت سریع این ضرایب شود. همان‌طور که از دو نمودار مشاهده می‌شود تغییرات دمای روغن داخل بیرینگ فاکتور مهمی در تغییرات ضرایب بیرینگ است.

بررسی اثر Cp (لقی ماشینکاری) روی ضرایب بیرینگ

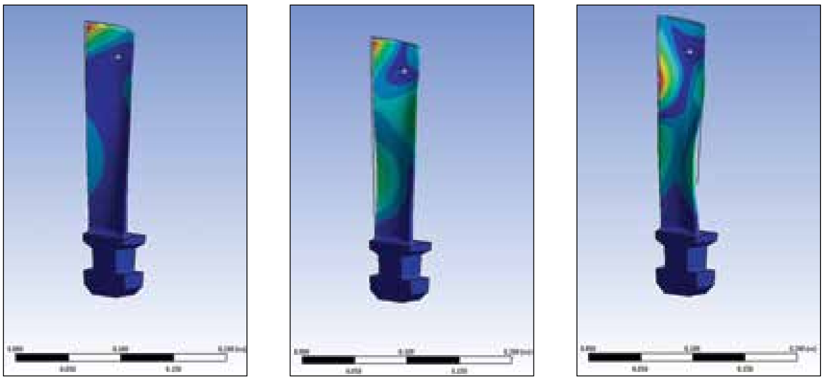
همانطور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، افزایش لقی بین بیرینگ و ژورنال باعث کاهش سختی بیرینگ در تمام جهات می‌شود و اثر این افزایش کاهش ضرایب دمپینگ را به دنبال خواهد داشت (شکل ۱۳).

تحلیل پره

در حین کارکرد توربین پره‌های توربین از چندین سرعت بحرانی عبور می کنند. در این نقاط پدیده رزونانس رخ می‌دهد که این پدیده می‌تواند منجر به کاهش عمر پره‌های توربین شود. در این بخش آنالیز مدال روی پره‌های ردیف بیست و دوم و بیست و سوم که بررسی آن‌ها به دلیل طول بلند و حساسیت بالا



تصویر ۱۶. شکل مودهای پره ردیف بیست و سوم



تصویر ۱۷. شکل مودهای پره ردیف بیست و سوم

جدول ۱: فرکانس های مختلف تحریک در سیستم روتور / بیرینگ (API-684)

Source	Exciting Frequency
Unbalance	rotor speed×1
Oil film instability	rotor speed×0.4-0.45
Internal rubs	rotor speed×0.5
(Blade, vane, nozzle, diffuser (passing	Number of elements×rotor speed
Coupling misalignment	rotor speed × 1,2,4
Aero cross coupling	rotor speed × 0.4-0.5

جدول ۲: آنالیز مودال پره ردیف بیست و دوم

Load step	Angular velocity (Rds)	Freq 1	Freq 2	Freq 3	Freq 4	Freq 5
1	0	628/4	2186/7	2718/7	3805/9	5102/6
2	400	630/09	2203	2725	3801/3	5098/7
3	800	637/1	2255/4	2758/4	3803/7	5108/3
4	1200	661/4	2379	3035/7	3813/1	5154/8

جدول ۳: آنالیز مودال پره ردیف بیست و سوم

Load step	Angular velocity (Rds)	Freq 1	Freq 2	Freq 3	Freq 4	Freq 5
1	0	486/2	1725	2050/9	2465/6	3043/5
2	400	504/3	1750	2065	2439	3068
3	800	554/3	1824	2102	2541	3143
4	1200	623	1933/4	2139/7	2703/2	3241/3

در منطقه کاری توربین از اهمیت بیشتری برخوردار است، پرداخته می‌شود. سه فرکانس تحریک در کمپل دیاگرام پره رسم می‌شود. این سه فرکانس تحریک مهم عبارت است از:

۱- Running speed or r/min excitation

۲- Nozzle passing frequency

۳- Partial admission excitation

فرکانس تحریک اول طبق دستورالعمل استاندارد API-612 خطوط تحریک سرعت تا ضریب ۱۵ می‌بایست رسم شود. از فرکانس‌های تحریک دسته دوم به علت نبود اطلاعات کافی از تعداد نازل‌ها صرف‌نظر می‌شود. سومین دسته از فرکانس‌های تحریک، فرکانس مکش جزیی نازل‌ها است که می تواند باعث ایجاد اندکی تحریک شود و این تحریک وابسته به تعداد و فاصله گروه نازل‌ها است که به دلیل ساده‌سازی مسئله از این مورد صرف‌نظر می‌شود. [۶]

پره ردیف بیست و دوم توربین

با توجه به شکل ۱۴ نقاط تداخل فرکانس طبیعی پره با فرکانس تحریک در سرعت‌های rpm 3000،4700 و 9800 است که در این نقاط احتمال وقوع پدیده رزونانس در پره ردیف بیست و دوم وجود دارد.

پره ردیف بیست و سوم توربین

با توجه به شکل ۱۵ نقاط تداخل فرکانس طبیعی پره با فرکانس تحریک در سرعت‌های، rpm 2400،3800، 8800و 9100 است که در این نقاط احتمال وقوع پدیده رزونانس در پره ردیف بیست و سوم وجود دارد.

نتیجه گیری و پیشنهادات

در پژوهش حاضر با استفاده از روش المان محدود و نرم‌افزار ANSYS به مدلسازی و اعمال شرایط کاری سیستم پرداخته شده است و در نهایت دیاگرام کمپل برای شفت و پره رسم شده. با توجه به مدلسازی صورت گرفته و محاسبه فرکانس تحریک در شرایط توربین بخار و رسم دیاگرام کمپل، مشخص شد ضمن اینکه هیچ گونه مشکل رزونانسی در پره‌ها به وجود نخواهد آمد، در محدوده شرایط کاری توربین شفت نیز دارای سرعت بحرانی نمی باشد. به منظور توسعه کار حاضر، صحه‌گذاری پروژه و بررسی نتایج حاصل از نرم‌افزار المان محدود انجام آنالیز تجربی می تواند بسیار مفید واقع شود.

[1] Erik Swanson, Chris D.Powell, Sorin Weissman. "A Practical Reviw of Rotating Machinery Critical Speeds and Modes", SOUND AND VIBRATION/MAY 2005

[2] Wilson, Vibration, Griffin (London) 1959, pp. 155–160

[3] API 684, August 20, 2005

[4] API 612, 1995, 4th Edition

[5] Salamone, D. J., "Journal Bearing Design Types and Their Application to Turbomachinery," Proceedings of the thirteenth Turbomachinery Symposium, Turbomachinery Laboratories, Texas A&M University, College Station, Texas, pp. 179-188 (1984).

[6] Heinz P. Bloch, Murari P. Singh. "Steam turbines Design, applications and re-rating", Mc-Graw Hill 2009.

چرا شهرک‌های صنعتی باید از CHP استفاده کنند؟

پدرام حنفی‌زاده[۱]، جوانشیر فولادوند[۲]

با توجه به پیشرفت سریع صنعت کشور و افزایش جمعیت، مصرف حامل‌های مختلف انرژی با افزایش چشمگیری روبه‌رو است. این افزایش به شکلی است که پیش‌بینی می شود تا سال ۱۴۰۰ مصرف انرژی ۴۰ درصد افزایش خواهد یافت. خاموشی‌های موقت، کاهش تولیدبرق، قطع سیستم‌های گرمایش و سرمایش و تعطیلی صنایع نتیجه عدم توجه به افزایش درخواست تولید انرژی است. از طرفی تولید، توزیع و انتقال انرژی به روش‌های مرسوم (تولید متمرکز)، آلودگی زیست محیطی و هدررفت زیاد منابع را به دنبال خواهد داشت. سوال اینجاست که ایران، چگونه می‌تواند با کمترین آلودگی محیط زیست و هدررفت انرژی بیشترین راندمان تولید انرژی را داشته باشد، تا بتواند صنعتی پویاتر را تجربه کند؟

۱: پدرام حنفی‌زاده: دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران
۲: جوانشیر فولادوند: دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران

شاید بهترین و جامع‌ترین تعریف تولید پراکنده برق را بتوان به این صورت عنوان کرد: منبع تولید انرژی الکتریکی که مستقیما به شبکه توزیع و یا مصرف‌کننده متصل است. همانطور که از تعریف این فناوری برمی‌آید، هزینه انتقال و توزیع و هدر رفتن در این نقل و انتقال بسیار اندک است

در جواب به این سوال شاید بهتر باشد در ابتدا واکنش کشورهای صنعتی و در حال توسعه دیگر را بررسی کنیم. در دهه ۷۰ میلادی در کشورهای صنعتی، با مطرح شدن مباحثی همانند بحران نفتی، مسائل زیست محیطی، افزایش چشمگیر جمعیت و مشکلات اقتصادی، تولید برق به صورت متمرکز در نیروگاه‌ها با رشد سالانه ۶ الی ۷ درصد به نظر جوابگوی نیازها نبود. علاوه بر این مشکلات، هزینه انتقال و توزیع برق بسیار افزایش یافت. این عوامل در کنار یکدیگر به همراه هدر رفتن زیاد انرژی تولید شده در هنگام انتقال، سبب شد که تولید متمرکز برق به نظر غیر اقتصادی باشد.

در این هنگام، فناوری تولید پراکنده برق معرفی شد. شاید بهترین و جامع‌ترین تعریف تولید پراکنده را بتوان به این صورت عنوان کرد: منبع تولید انرژی الکتریکی که مستقیما به شبکه توزیع و یا مصرف‌کننده متصل است. همانطور که از تعریف این فناوری برمی‌آید، هزینه انتقال و توزیع و هدر رفتن در این نقل و انتقال بسیار اندک است. در ضمن تولید پراکنده در جنبه‌های متعدد مانند بازده، اندازه، قابلیت گسترش و

هزینه راه اندازی انعطاف‌پذیرند که این ویژگی‌ها سبب شد این فناوری به سرعت گسترش یافته و طرفداران خاص خود را پیدا کند. این فناوری علاوه بر این ویژگی‌های مثبــت، آلودگی‌های زیست محیطی بسیار کمتری نسبت به سیستم متمرکز دارد.

در ایــن فنـــاوری می‌تــوان از تکنولوژی‌های مختلف تولید انرژی از قبیل پیل‌های سوختی، توربین‌های گازی کوچــک، توربین‌های بادی، انرژی خورشــیدی، زمین گرمایی و... بهره برد. CHP ها یکــی از انواع این فناوری هســتند که بازده بســیار بالایی دارند. CHP به سیستم‌های تولید همزمــان برق و حرارت گفته می‌شــود. از لحــاظ ترمودینامیکی ایــن روش به معنی تولید همزمان دو شــکل معمــول انرژی یعنی الکتریکی و حرارتی، با استفاده از یک منبع انرژی اولیه می‌باشــد. انرژی گرمایی از بازیافت تلفات حرارتی این مولدهای مســتقل به‌دست می‌آید و این حرارت در بخش‌هــای مختلف صنعتی، تجاری و مسکونی به کار گرفته می‌شود. از طرفی الکتریسیته تولیدی توسط این فناوری به صورت محلی و مســتقل و غیر متمرکز بوده که این دو ویژگی در کنار یکدیگر، بازده مولدهای تولید برق را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. بازده سیســتم‌های معمول بــه روش متمرکز حدود ۲۷ تا ۵۵ درصد اســت کــه بیشــترین بازده مربوط به نیروگاه‌های سیکل ترکیبی می‌باشد در حالی کــه با بهــره گیری از فنــاوری تولید همزمان برق و حرارت به‌صورت مستقل، بازده انرژی این مولدها به حدود ۹۰ درصد نیز خواهد رســید. با توجه به این مزایا برای اســتفاده از CHP ها و ورود آن‌ها به عرصــه تولید انرژی در کشورهای دیگر برنامه‌ریزی‌های گسترده اتفاق افتاد.

از دیگر مزایای CHP ها می‌تــوان به حرکت به ســوی خصوصی‌ســازی و تولید غیرمتمرکز و مســتقل برق و حــرارت، جلوگیــری از تلفات توزیع و انتقال در شــبکه سراســری، افزایش کارآیی تبدیل انرژی و اســتفاده از آن، کاهش مصرف ســوخت و افزایش رقابت در تولید برق و توان نیروگاهی و کاهش آلاینده‌های زیســت محیطی بخصوص دی اکســید کربن و گازهای گلخانه‌ای اشــاره کرد. CHP دارای سیستم‌های مختلفی اســت که از مهم‌ترین این سیستم‌ها می‌توان به توربین‌های گاز، موتورهای پیستونی و میکروتوربین‌ها که همگی مجهز به سیســتم بازیافت حرارت هستند، اشاره کرد.

توربین‌های گاز قابلیــت اطمینان بالا، حرارت قابل استفاده با انرژی بالا، هزینه سرمایه‌گذاری نسبتا کم برای تولید واحد توان خروجی را دارا هستند. توربین‌های گاز می‌توانند در بارهای کم به طور دائم کار کنند. در این سیســتم‌ها امکان استفاده از سوخت‌های مختلف وجود دارد و حتی

وضعیت شهرک‌های صنعتی

آمار تا پایان خرداد ۱۳۸۸

ردیف	استان	تعداد شهرک‌های در حال واگذاری	امکانات زیر بنایی		میزان برق مورد نیاز (مگاوات)	
			برق	گازشهری	تأمین شده	کسری
۱	آذربایجان شرقی	۲۲	۲۰	۱۲	۱۴۴	۶۷۱
۲	آذربایجان غربی	۱۶	۱۵	۷	۷۶	۱۸۸
۳	اردبیل	۸	۸	۵	۶۳	۹۵
۴	اصفهان	۳۴	۳۵	۲۱	۴۲۹	۱۸۰
۵	ایلام	۷	۷	۰	۸۳	۵۶
۶	بوشهر	۸	۸	۰	۳۱	۱۴۴
۷	تهران	۱۱	۱۱	۷	۳۱۸	۴۱۵
۸	چهارمحال و بختیاری	۱۶	۱۷	۱۲	۷۷	۲۲۱
۹	خراسان جنوبی	۵	۵	۰	۴۷	۸۰
۱۰	خراسان رضوی	۲۱	۲۰	۹	۲۶۴	۱۲۲
۱۱	خراسان شمالی	۶	۴	۲	۳۱	۱۳۹
۱۲	خوزستان	۲۷	۲۶	۴	۱۴۸	۱۷۱۸
۱۳	زنجان	۱۰	۱۰	۲	۱۴۷	۴۲۰
۱۴	سمنان	۷	۸	۴	۱۷۷	۱۲۸
۱۵	سیستان و بلوچستان	۱۳	۱۳	۰	۱۰۳	۲۶
۱۶	فارس	۲۵	۲۴	۱۰	۲۲۴	۱۵۵۰
۱۷	قزوین	۵	۵	۲	۱۳۶	۷۴۷
۱۸	قم	۳	۳	۲	۸۵	۳۵۵
۱۹	کردستان	۷	۱۰	۶	۶۱	۶۵
۲۰	کرمان	۱۵	۱۵	۶	۲۰۳	۲۴۹
۲۱	کرمانشاه	۱۱	۱۲	۱	۱۶۲	۲۷۶
۲۲	کهگیلویه و بویراحمد	۶	۵	۵	۳۷	۳۷۹
۲۳	گلستان	۱۰	۱۱	۶	۷۵	۱۸۰
۲۴	گیلان	۱۷	۱۸	۱۲	۷۷	۱۸۶
۲۵	لرستان	۷	۷	۳	۴۰	۹۵
۲۶	مازندران	۲۴	۲۳	۳	۲۰۵	۲۶۸
۲۷	مرکزی	۱۴	۱۴	۷	۲۰۷	۴۲۱
۲۸	هرمزگان	۱۱	۱۱	۰	۵۹	۳۱۲
۲۹	همدان	۱۰	۱۱	۷	۹۳	۴۲
۳۰	یزد	۱۱	۱۰	۲	۱۴۶	۹۷۶
	جمع کل	۳۸۷	۳۸۶	۱۵۷	۳۹۴۴	۱۰۷۰۰

ممکن است یک واحد با چند سوخت کار کند اما در صورتی که واحد گازسوز باشد لازم است فشار گاز مورد استفاده بالا باشد.

موتورهای پیســـتونی موتورهایی هســـتند که مقداری از حرارت تولید شده در احتراق سوخت را به حرکت مکانیکی تبدیل کرده و با استفاده از یـــک ژنراتور توان الکتریکی تولید می‌شـــود. همچنین ایـــن موتورهـــا دارای مزیت‌هایی از قبیل امکان کار با گازهای فشـــار پایین و عمل کردن یک واحد با چند نوع ســـوخت هســـتند. میکروتوربین‌ها، سیســـتم‌های تولیـــد توان با ســـرعت بالایی‌اند که دارای توربین، کمپرسور و ژنراتور هستند. میکروتوربین‌ها از موتورهای پیســـتونی معمولی کوچکتر می باشند و هزینه نگهداری آنها نیز پایین تـــر و قابلیت اطمینان در آنها زیاد است. از دیگر مزایای این سیستم‌ها ســـادگی نصب، نیاز به نگهـــداری کمتر، اندازه کوچک، کم بودن صدای آنها و آلاینده‌های کم ولی قیمت نسبتا بالا می‌باشند. در کنار تمامی مزایایی که برای این فناوری ذکر شد، مشکلاتی برای استفاده و توسعه ی آن وجود دارد.

شاید بتوان این مشکلات را به شکل زیر بیان کرد:

۱.پیچیده تر شدن شبکه: این امر سبب می‌شود که حفاظت ایمنی و کنترل شبکه مشکل‌تر شود.

۲.اتصال DG ها و CHP ها به شـــبکه باعث ایجاد هارمونیک در شـــبکه و کاهش امپدانس اتصال کوتاه می‌شود. ضمنا اگر در هنگام خاموشی، DG متصل به شـــبکه به صورت جزیره ای کار کند، می‌تواند برای تعمیرکاران شبکه خطرناک باشد.

۳.نبود تجربه و اطلاعات کافی در شرکت‌های برق

۴.نبود قوانین مناسب و عملی

برای ایـــن مشـــکلات، راهکارهای زیر پیشنهاد می‌شود:

۱.توسعه اســـتانداردهای یکسان برای اتصال به شبکه

۲.پذیرش مراحل تســـت و تأییدیه برای وسایل اتصال به شبکه

۳.توســـعه تکنولوژی‌های کنترل توان تولیدات پراکنده

موتورهای پیستونی موتورهایی هستند که مقداری از حرارت تولید شده در احتراق سوخت را به حرکت مکانیکی تبدیل و با استفاده از یک ژنراتور توان الکتریکی تولید می‌کنند

فعالیت	۱۳۸۲	۱۳۸۳	۱۳۸۴	۱۳۸۵	۱۳۸۶	۱۳۸۷	۱۳۸۸	۱۳۸۹
صنایع مواد غذایی و آشامیدنی...	۱۴۸۴۷	۱۳۷۲۲	۱۴۹۹۷	۱۳۷۱۵	۱۵۵۴۶	۱۳۶۷۸	۱۲۹۳۸	۱۲۶۱۸
تولید محصولات از توتون و تنباکو...	۸۷	۱۲۸	۱۲۰	۱۳۳	۱۲۴	۱۳۱	۱۳۰	۱۴۴
تولید منسوجات...	۳۷۲۵	۳۶۳۱	۳۲۶۲	۳۴۵۹	۳۶۱۵	۳۷۰۸	۳۵۴۰	۳۲۵۴
تولید پوشاک....	۷۳	۶۸	۵۴	۴۵	۶۹	۷۸	۷۰	۶۸
دباغی و عمل آوردن چرم و ساخت کیف....	۱۱۳	۱۱۳	۱۳۲	۱۴۷	۱۴۵	۱۶۴	۱۳۲	۱۴۵
تولید چوب و محصولات چوبی و...	۳۴۸	۴۰۵	۳۳۴	۴۴۸	۴۵۹	۳۸۶	۳۸۷	۳۲۷
تولید کاغذ و محصولات کاغذی....	۱۶۸۶	۱۷۹۰	۱۷۳۴	۲۱۰۷	۱۶۵۵	۱۹۲۲	۲۰۳۸	۲۳۶۱
صنایع تولید مواد و محصولات شیمیایی...	۱۱۵۴۸	۲۰۱۷۳	۱۸۱۲۹	۲۰۸۲۴	۲۳۲۰۸	۳۰۴۰۲	۳۵۵۵۲	۳۹۸۴۱
تولید فلزات اساسی...	۳۲۰۰۰	۳۶۵۶۷	۳۷۸۵۲	۴۰۸۴۱	۳۹۳۶۸	۳۹۷۹۵	۴۴۴۹۹	۴۸۴۱۱
تولید مبلمان و سایر مصنوعات طبقه بندی...	۲۴۵	۲۳۲	۲۲۳	۳۱۲	۳۴۵	۳۴۲	۳۴۵	۴۷۳
بازیافت ضایعات فلزی و غیر فلزی...	۴	۳	۳	۴	۵	۶	۷	۶
کل صنعت	۱۳۵۶۱۸	۱۵۴۵۷۱	۱۵۸۱۰۱	۱۷۶۳۷۵	۱۸۳۳۲۱	۱۸۶۸۱۹	۱۹۸۹۹۸	۲۱۲۴۰۰

نوع مصرف	۱۳۸۲	۱۳۸۳	۱۳۸۴	۱۳۸۵	۱۳۸۶	۱۳۸۷	۱۳۸۸	۱۳۸۹
ماده اولیه	۲,۵	۲,۹	۱,۶	۲,۰	۰۲,۳	۲,۳	۳,۴	–
موتور برق	–	–	–	–	–	–	–	۰,۲
خط تولید	۷۸,۰	۸۰,۷	۸۰,۶	۸۱,۶	۸۱,۴	۸۱,۹	۸۰,۶	۸۱,۵
گرمایش و سمایش	۱۰,۶	۸,۴	۱۰,۲	۹,۷	۹,۹	۸,۵	۸,۵	۱۰,۴
حمل و نقل	۲,۳	۲,۳	۲,۲	۲,۴	۲,۲	۳,۰	۲,۵	۲,۳
روشنایی	۰,۹	۰,۸	۱,۰	۱,۲	۱,۱	۱,۰	۰,۸	۱,۶
سایر	۵,۷	۴,۸	۴,۴	۳,۲	۳,۱	۳,۳	۴,۲	۴,۰
کل صنعت	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰

بهترین و مناسب‌ترین بخش برای شروع به کار سیستم‌ها ی CHP شهرک‌های صنعتی هستند چون نیاز اصلی آن‌ها به گاز طبیعی و برق است

۴.پذیرش استاندارد تجاری برای احتیاجات شرکت‌ها و برای توافقات اتصال به شبکه
۵.توسعه وسایل برای شرکت‌ها به منظور دستیابی به مقدار و تأثیر توان پراکنده در هر نقطه از شبکه
۶.توسعه قوانین جدید
۷.تنظیم تعرفه مناسب
۸.تسریع مراحل تصمیم گیری و تصویب طرح‌های پیشنهادی

همانطور که در بالا گفته شد، می‌توانیم مشکلات پیش روی گسترش استفاده از سیستم‌های تولید همزمان را رفع کرد و این فناوری را در کشور گسترش داد. در کنار مزایای این سیستم‌ها که در بالا ذکر شد، می‌توان مزایا و دلایل دیگری نیز برای روی آوردن به این سیستم‌ها در کشور ایران به صورت خاص عنوان کرد.

۱.با افزایش استفاده از واحدهای کوچک تولید توسط مصرف کنندگان، صنعت برق عملا به تدریج خصوصی می‌شود و سرمایه‌های سرگردان را به سمت خود جذب می‌کند. این مسئله در

راستای قانون خصوصی‌سازی است، که یکی از اهداف مهم دولت است.
۲. استفاده از تولید پراکنده در پایدار نگه داشتن ولتاژ و بهبود کیفیت برق شبکه بسیار مؤثر است.
۳. استفاده از این روش کاهش قیمت تمام شده تولید و افزایش بازده را به همراه دارد.
۴. انرژی اولیه این سیستم‌ها که همان گاز طبیعی و یا دیگر سوخت‌های فسیلی است در کشورما ارزان و قابل دسترسی است.
۵. نصب تولید پراکنده در محل مصرف، افت جریان حاصل از جابه‌جایی را کاهش می‌دهد. در ضمن هزینه تولید، نصب، تعمیر و تعویض‌هادی‌ها، کابل‌ها و سایر تجهیزات در شبکه توزیع را کاهش می‌دهد. لازم به ذکر است با توجه به آمار وزارت نیرو از هر ۳ نیروگاه عظیم تولید برق در کشور، برق تولیدی یکی از آن‌ها صرف جبران افت ولتاژ شبکه می‌شود.
۶. با توجه به نیاز ۲۰ سال آینده کشور به بیش از ۷۰ هزار مگاوات مصرف پیک و در نظر گرفتن ضریب ذخیره تولید، بر مبنای گزارش مقدماتی صنعت برق ایران در سال ۱۴۰۰ بیش از ۹۰هزار مگاوات برق قابل تولید در نیروگاه‌ها و میزان سرمایه گذاری بالای ۲۰ میلیارد دلار خواهد بود. هرچه بتوان این سرمایه‌گذاری را از طریق واحدهای تولید پراکنده توسط مصرف‌کنندگان تأمین کرد، می‌توان از خروج ارز ناشی از فروش سرمایه‌های ملی ممانعت کرده و برای جوانان کشور ایجاد اشتغال کرد.
۷. با توجه به شرایط ویژه ایران در منطقه و جهان، تولید پراکنده سبب افزایش توان پدافند غیر عامل می‌شود و امنیت بخش انرژی کشور را بسیار افزایش می‌دهد.
با توجه به مزایایی که به صورت خاص برای کشور ایران عنوان شد، به نظر می‌رسد استفاده از این فناوری، طرحی به صرفه بوده و دارای توجیه اقتصادی است. در ضمن در بخش جمع‌آوری و متمرکز کردن سرمایه‌ها، خصوصی سازی، ایجاد اشتغال و مهمترین مسئله، پدافند غیر عامل می‌تواند بسیار راهگشا باشد.

حال سؤال این است، با توجه به قوانین تصویب شده توسط مجلس و همکاری‌های دولت اگر بخواهیم از سیستم‌های تولید همزمان استفاده کنیم از کدام بخش باید شروع کنیم؟
بهترین و مناسب‌ترین بخش برای شروع به کار سیستم‌های CHP به نظر شهرک‌های صنعتی هستند چون نیاز اصلی آن‌ها به حرارت و برق است. طبق آمار اعلام شده توسط سازمان آمار ایران برای کارگاه‌های صنعتی ۱۰ نفر کارکن و بیشتر، در سال ۱۳۸۹-۱۳۸۲ میزان مصرف انرژی برای حامل‌های مختلف ارائه شده است.
سوخت مصرفی CHPها می‌تواند گاز طبیعی باشد، لذا استفاده از این سیستم‌ها در شهرک‌های صنعتی به صرفه خواهد بود. می‌توان گفت اگر گاز مورد نیاز یک شهرک تأمین شود، با استفاده از CHP ها می‌توان برق مورد نیاز را نیز با کمترین هزینه تولید کرد.
از طرفی باید امکانات زیربنایی شهرک‌های صنعتی را در نظر بگیریم. هر شهرک صنعتی برای شروع به فعالیت و تولید، نیازمند امکانات زیربنایی و پایه‌ای است که سازنده شهرک (دولت و یا بخش خصوصی سازنده) باید این امکانات پایه را در اختیار تولید کننده قرار دهد. امکانات زیربنایی انرژی که برای تولید کننده حایز اهمیت است به صورت کلی برق و گاز شهری است. موجودیت این امکانات زیربنایی برای شهرک‌های صنعتی در حال واگذاری تا پایان سال ۱۳۸۸ مشخص شده است.
در کل ۳۸۷ شهرک صنعتی در حال واگذاری، حدود ۴۰ درصد دارای گاز شهری هستند که این امر نشان دهنده کمبود این امکان پایه در این شهرک‌ها است. از طرفی در شهرک‌های صنعتی که گاز وجود ندارد، صنایعی که نیازمند حرارت بالا هستند نمی‌توانند فعالیت کنند. از طرفی دیگر تمامی آن شهرک‌ها جز یک شهرک، دارای برق هستند، اما با توجه به اطلاعات این جدول برق موجود جوابگوی تمامی این نیازها نیست

سوخت مصرفی CHP ها می‌تواند گاز طبیعی باشد، لذا استفاده از این سیستم‌ها در شهرک‌های صنعتی به صرفه خواهد بود. می‌توان گفت اگر گاز مورد نیاز یک شهرک تأمین شود، با استفاده از CHP ها می‌توان برق مورد نیاز را نیز با کمترین هزینه تولید کرد

حامل انرژی	۱۳۸۲	۱۳۸۳	۱۳۸۴	۱۳۸۵	۱۳۸۶	۱۳۸۷	۱۳۸۸	۱۳۸۹
نفت‌سفید	۰٫۴	۰٫۳	۰٫۲	۰٫۳	۰٫۲	۰٫۲	۰٫۲	۰٫۱
گازوئیل	۷٫۸	۷٫۴	۶٫۸	۶٫۳	۶٫۳	۶٫۰	۴٫۷	۴٫۳
گاز مایع	۲٫۷	۱٫۸	۲٫۳	۲٫۲	۰٫۹	۰٫۸	۰٫۸	۰٫۵
گاز طبیعی	۵۰٫۹	۵۶٫۹	۵۹٫۱	۵۹٫۸	۶۱٫۸	۶۶٫۷	۶۷٫۷	۷۱٫۰
بنزین	۰٫۷	۰٫۶	۰٫۵	۰٫۶	۰٫۶	۰٫۶	۰٫۶	۰٫۴
نفت سیاه و نفت کوره	۲۷٫۹	۲۳٫۴	۲۱٫۶	۲۱٫۷	۲۰٫۲	۱۵٫۴	۱۶٫۱	۱۳٫۱
زغال سنگ و زغال چوب	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۲	۰٫۲	۰٫۰	۰٫۱
برق	۹٫۵	۹٫۵	۹٫۴	۹٫۱	۹٫۷	۱۰٫۱	۹٫۹	۱۰٫۴
کل صنعت	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰

برای مثال در شهرک صنعتی شمس آباد، برق مورد نیاز در بهره‌برداری کامل این شهرک ۴۱۲.۵ مگاوات می باشد که ۱۳۶ مگاوات آن تامین شده است. از طرفی در این شهرک صنایع مختلف تولید، ساخت و تراش انواع بتن، سنگ، شیشه، لاستیک و محصولات شیمیایی موجود است

و ۱۰۷۰۰ مگاوات کمبود برق این شهرک‌ها است، که عدد بزرگی محسوب می‌شود و از آنجایی که این شهرک‌ها در استان‌های مختلف پراکنده هستند، نمی‌توان به صورت متمرکز جوابگوی این نیازها بود. پس می‌توان نتیجه گرفت که امکانات زیربنایی انرژی این شهرک‌ها نیازمند بهبود و یک سیستم کمکی است. از طرفی ایران دارای ذخایر گسترده و لوله‌کشی گسترده گاز است که این امر می‌تواند سبب تسهیل در گازرسانی به این شهرک‌ها شود. با توجه به تمامی این موارد، استفاده از CHP به نظر راهی عملی به نظر می‌رسد. لازم به ذکر است این جدول تنها مربوط به شهرک‌های در حال واگذاری تا پایان سال ۱۳۸۸ بوده است و با در نظر گرفتن اثرات تحریم‌ها روی امکانات زیر بنایی کشور، علاقه‌مند نبودن بخش خصوصی برای سرمایه‌گذاری و شرکت در تولید و عوامل دیگری که در سال‌های اخیر مشکلات بسیاری را به وجود آورده‌اند، شاید دور از ذهن نباشد شهرک‌هایی که بعد از سال ۱۳۸۸ در حالت واگذاری قرار گرفتند از امکانات کمتری برخوردار باشند.

حال اگر بپذیریم که شهرک‌های صنعتی ایران نیاز به بهبود امکانات زیربنایی دارند، باید این بررسی انجام شود که کدام یک از امکانات دارای اولویت است. برای این کار باید به بررسی صنعت کشور و میزان مصرف انرژی در این بخش‌ها بپردازیم.

جدول آماری مصرف انرژی توسط صنایع به صورت تفکیک فعالیت آمده است.

همانطور که در نمودار مشخص است، تولید سایر محصولات کانی غیر فلزی بیشترین مصرف انرژی را بین صنایع داراست. در ادامه نیز مصرف کل انرژی در کارگاه‌های ۱۰نفر کارکن به تفکیک فعالیت آمده است.

لازم به ذکر است، اعداد معادل هزار بشکه نفت خام است. مصرف انرژی در بخش‌های تولید محصولات کانی غیر فلزی (کل تولیدات کانی غیر فلزی) و تولید فلزات اساسی بیشترین مصرف انرژی را به خود اختصاص داده اند.

از طرفی تولید مواد غذایی نیاز به مصرف انرژی بالایی ندارد، اما عموم تولید این مواد در شهرک‌های صنعتی رخ می‌دهد و انرژی تولیدی آن‌ها باید در این شهرک‌ها تأمین شود.

برای مثال در شهرک صنعتی شمس آباد، برق مورد نیاز در بهره‌برداری کامل این شهرک ۴۱۲,۵ مگاوات می‌باشد که ۱۳۶ مگاوات آن تامین شده است. از طرفی در این شهرک صنایع مختلف تولید، ساخت و تراش انواع بتن، سنگ، شیشه، لاستیک و محصولات شیمیایی موجود است. همچنین چند تولیدی مواد غذایی نیز در این شهرک وجود دارد. تمامی این صنایع نیازمند صرف حرارت بالا در خط تولید خود هستند. لازم به ذکر است عموم انرژی مصرفی در صنعت و در شهرک‌ها در خط تولید صرف می‌شود و محصولاتی همانند تولیدات شهرک صنعتی شمس آباد نیاز به انرژی بالایی دارند. از طرفی گاز این شهرک تأمین شده است. استفاده از CHP در این شهرک شاید بتواند مشکل گشای کمبود برق و انرژی گرمایی مورد نیاز خط تولید باشد.

حال که یک شهرک صنعتی را بررسی کردیم و به توجیه یا شاید ضرورت استفاده از CHPها پی بردیم، در انتها به بررسی مصارف انرژی به تفکیک بخش در کارگاه‌های صنعتی می‌پردازیم. درصد مصرف انرژی در بخش‌های مختلف برای یک کارگاه ۱۰ نفر کارکن و بالاتر در یک جدول مشخص شده است.

خط تولید بیشترین مصرف انرژی را به خود اختصاص داده است. رتبه دوم مصرف انرژی را گرمایش و سرمایش به خود اختصاص داده است که این فرآیند شامل گرمایش و سرمایش محیط و محصولات تولیدی می‌شود و می‌دانیم که این کار نیز همانند خط تولید، نیازمند حرارت و الکتریسیته است. استفاده از یک CHP مناسب می‌تواند تمام این انرژی را تأمین یا حداقل اصلاح کند.

لازم به ذکر است این تغییر در ۹۳,۵ درصد انرژی مصرفی تأثیر می‌گذارد. برای مثال در صنایع تولید ظروف و وسایل یکبار مصرف به حرارتی حدود ۸۰ درجه سانتی گراد، در صنایع نساجی نیاز به حرارتی حدود ۱۲۰درجه سانتی گراد و در صنایع شیشه‌سازی و آجرپزی نیاز به حرارت متمرکز بالاتر در کوره‌ها است. صنایع تولید کاغذ و نساجی نیازمند بخار با حرارت بالا هستند. در حالت معمول تأمین حرارت مورد نیاز برای تبخیر آب و فوق گرم کردن بخار حاصل، انرژی زیادی را در خط تولید این صنایع به خود اختصاص می‌دهد، حال آنکه CHPها حرارت لازم جهت انجام این قبیل کارها را به کمک سیستم بازیاب خود تأمین می‌کنند و هزینه‌ها را تا حد زیادی کاهش می‌دهند.

اگر به بررسی اطلاعات حامل‌های انرژی نیز بپردازیم، می‌توانیم نتایج به‌دست آمده از بالا را تأیید کنیم، درصد مصرف انرژی به تفکیک نوع حامل در کارگاه‌های ۱۰ نفر کارکن و بیشتر آمده است.

همانطور که از جدول تفکیکی نوع حامل انرژی مشخص است، با استفاده از سیستم‌های CHP در مصرف ۸۱,۴ درصد نوع حامل انرژی مصرفی در این کارگاه‌ها بهبود ایجاد می‌شود. پس شاید این نتیجه‌گیری کلی دور از ذهن نباشد.

با استفاده از CHP می‌توان تا بیش از ۸۰ درصد کل انرژی مصرفی یک شهرک صنعتی را تامین و بهینه کرد. در واقع این سیستم می‌تواند حداقل بخش قابل توجه این انرژی را با قیمت

مناسب‌تر، آلودگی کمتر و ایمنی بیشتر تأمین کند.

جمع‌بندی

در حالت کلی شـــهرک‌های صنعتی به واسطه دور بودن از منابـــع تولید بـــرق و مصرف بالا، نیاز به سیســـتم انتقال و توزیع برق گسترده‌ای دارند. این مسئله خود بسیار هزینه‌بر است و در ضمن باعث هدر رفتن مقدار بسیار زیادی انرژی می‌شـــود. در ضمن در عموم این شهرک‌ها نیاز به حرارت، چه برای گرمایش محیط و چه برای حرارت موضعی برای کارهـــای صنعتی وجود دارد. از طرفی همواره این شهرک‌ها آلودگی‌های فراوان محیط زیستی ایجاد می‌کنند و با توجه به اینکه کشور ایران، از کشورهای در حال رشد بوده و نیازمند توسعه شـــهرک‌های صنعتی و افزایش میزان تولید خود است، مسئله آلودگی محیط زیســـت مسئله و مشـــکل بسیار مهمی حســـاب می‌شـــود که امید می‌رود با استفاده از سیســـتم‌های تولید همزمان این آلودگی‌ها کاهش یابد.

درآخر شـــاید بتوان به این جمع‌بندی رسید که استفاده از سیستم‌های تولید همزمان به صورت گسترده در ابتدا شاید اندکی دشوار به نظر برسد، اما برای آینده کشـــور ایران، امری مهم اســـت که دارای صرفه اقتصادی بـــالا، دارای آلودگی محیط‌زیستی کم و ایمنی بالا است.

ارتقای سیستم خنک کاری محفظه احتراق توربین گاز سولار سنتار

زهرا مشایخی[۱]، پریسه هدایتی[۲]، ارشیا تافته[۳]

محفظه احتراق توربین گاز سنتار از نوع حلقوی[1] با ۱۰ سوخت‌پاش است. سرعت جریان پیش از ورود به محفظه در دیفیوزر کاهش پیدا می کند تا مناسب فرآیند احتراق باشد. جریان با برخورد به بدنه لاینر به سه بخش جریان کنارگذر بین شفت و لاینر داخلی، جریان کنارگذر بین پوسته محفظه و لاینر خارجی و جریان اصلی وارد شده به داخل لاینر تقسیم می‌شود. جریان‌های کنارگذر در ورود به فضای داخلی محفظه از طریق مجاری تعبیه شده روی دیواره، با ایجاد لایه‌ای از هوای نسبتا خنک از بدنه لاینر در برابر جریان محترق محافظت می کنند. در ارتقای انجام شده با تغییر طراحی مجاری خنک کاری، تقسیم‌بندی نسبت جریان خنک کن به گونه‌ای بهبود یافته است که از تعداد و دمای مناطق با وضعیت حاد دمایی روی بدنه لاینر کاسته شده است. در مدل پایه این محفظه، در مناطق یاد شده مقدار مطلق دما نسبت به میانگین دمای بدنه لاینر در نواحی اطراف به اندازه قابل توجهی بیشتر است. این امر باعث ایجاد تنش‌های حرارتی و آسیب دیدن تدریجی قطعات می‌شود. با انجام این ارتقا، به دلیل مرتفع شدن مشکل یاد شده، در کنار افزایش عمر محفظه و بازه‌های تعمیر و نگهداری آن، توانایی افزایش دمای خروجی از محفظه احتراق تا ۳۵ درجه سانتیگراد فراهم شده است که در نتیجه آن توان توربین گاز حدود ۱۵درصد افزایش پیدا می کند. شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان سرد و گرم و همچنین محاسبه مقدار ضرایب تخلیه در مجاری خنک کاری دیواره با استفاده از روش دینامیک سیالات عددی صورت پذیرفته است. به منظور مدلسازی اثرات متقابل جامد و سیال، محاسبات مربوط به مودهای انتقال حرارت و توزیع دما در بدنه لاینر به‌صورت همزمان در دیواره و جریان نزدیک آن انجام خواهد پذیرفت.

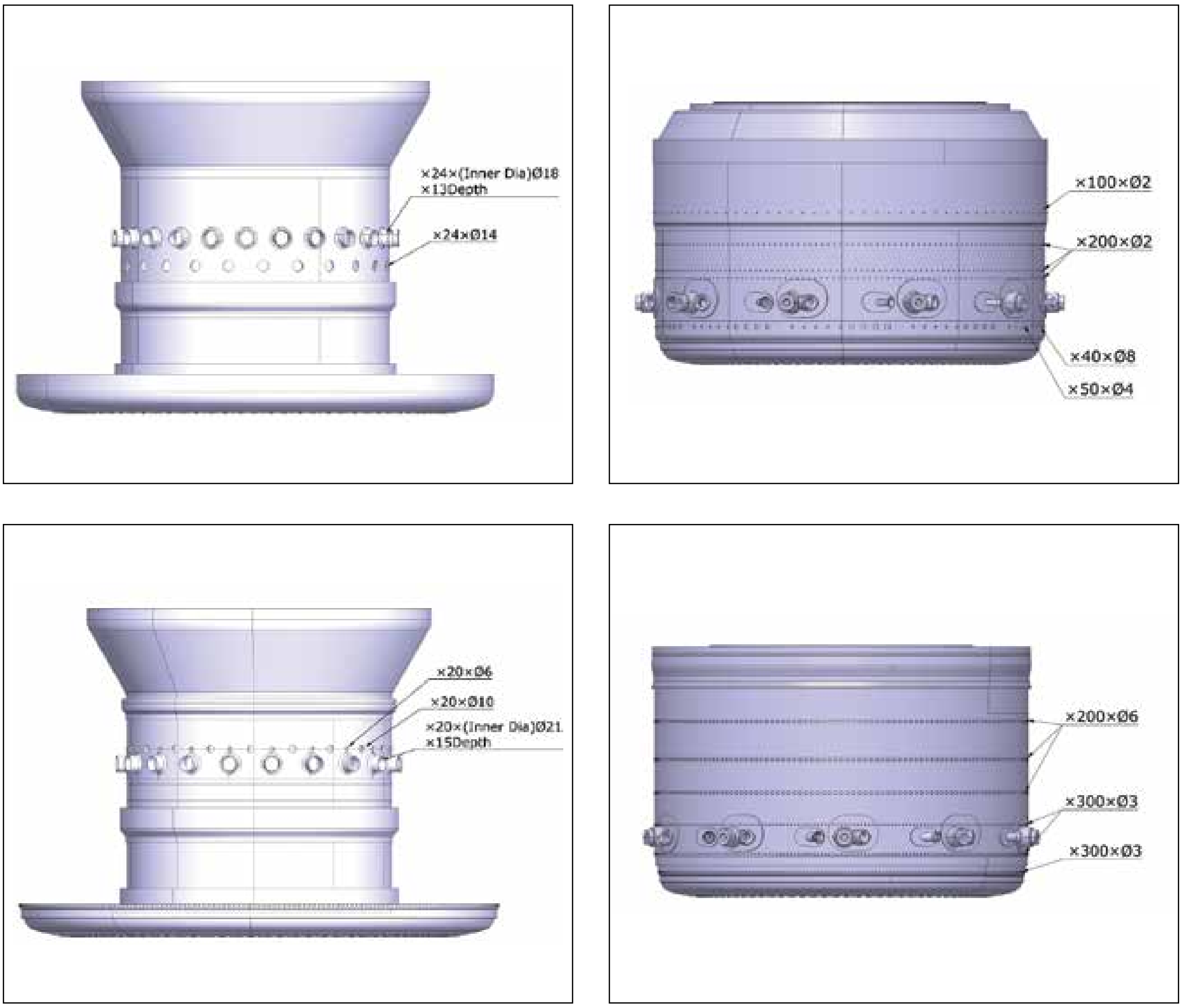
کاربرد روش دینامیک سیالات محاسباتی در تحلیل و طراحی محفظه احتراق

شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی محفظه احتراق توربین‌های گاز ابزاری حایز اهمیت در فرآیند طراحی و ارتقا است. در یک تقسیم‌بندی کلی، روش‌های حل عددی جریان در محفظه احتراق شامل دو دسته حل همزمان جریان کنارگذر و جریان داخلی و یا استفاده از نتایج تجربی در کنار کدهای مرتبه پایین حل جریان کنارگذر به منظور یافت دبی مجاری خنک کاری و اعمال آن‌ها به عنوان شرط مرزی حل جریان در داخل محفظه است. مک گوریک[2] و اسپنسر[3] در سال ۲۰۰۱، با مقایسه دو روش مذکور، به بررسی اهمیت کوپلینگ جریان در نزدیکی جت‌های ورودی به لاینر پرداختند. شبیه‌سازی CFD بر اساس روش حجم محدود روی قطاع سه‌بعدی محفظه احتراق مورد بررسی با شبکه‌بندی ساختار یافته و مدل آشفتگی k-ε رینولدز بالا به همراه توابع دیواره متداول و روش تصحیح فشار سیمپل، در دو حالت کوپل شده و غیر کوپل صورت پذیرفت. نتایج حاصل از حل CFD همزمان جریان داخل و خارج لاینر در مقابل پیش‌بینی‌های حل مجزای جریان داخل لاینر مورد مقایسه قرار گرفتند که تفاوت‌های چشمگیری در الگوی جریان نواحی بازچرخش و خروجی سوراخ‌ها و همچنین الگوی اختلاط کلی در خروجی محفظه احتراق، میان نتایج دو روش حل کوپل شده و حل جریان داخل لاینر به تنهایی مشاهده گردید.

کراکر[4] و همکاران، محاسبات CFD را برای یک محفظه احتراق مدل، از خروجی کمپرسور تا ورودی توربین انجام دادند. مدل مورد بررسی، اتمایزر هواپاش، گنبدی و دیواره‌های لاینر را به همراه سوراخ‌های رقیق‌سازی و پره‌های خنک کاری شامل می‌شد. مدل کوپل شده، تقسیم جریان‌ها و شرایط جریانی سوراخ‌های دیواره لاینر را مشخص کرد. بررسی‌ها، تأثیر غیریکنواختی‌های جریان بر توزیع فشار استاتیک اطراف دیواره‌های لاینر و اثر نهایی بر تقسیمات جریان و دمای دیواره لاینر را نشان می‌داد. در روند شبیه‌سازی فضای بیرون و درون یک محفظه احتراق حلقوی و دیفیوزر دامپ آن، توسط دارمی‌زاده و انصاری در سال ۱۳۹۱، تقسیم جریان در بین سوراخ‌ها و سوئیلر حاصل از حل عددی کل محفظه و دیفیوزر با نتایج حل عددی دیفیوزر و فضای حلقوی اطراف لاینر، همخوانی خوبی داشتند. این امر نشان دهنده آن است که با وجود آنکه جریان داخل لاینر از جریان کانال اطراف آن و شرایط آشفتگی و کیفیت جریان در سوراخ‌ها متأثر است، ولی جریان بیرونی تأثیر چندانی از جریان درون لاینر نمی‌پذیرد. در طراحی سیستم دیفیوزر و طی مراحل سعی و خطا می‌توان با اطمینان خاطر از تحلیل جریان درون لاینر صرف نظر کرد. اما اگر هدف، بررسی جریان درون لاینر باشد، جریان بیرون لاینر نیز می‌بایست به‌صورت همزمان و کامل تحلیل شود. لارجر[5] و همکاران در سال ۲۰۰۳، برخی پارامترهای هندسی صفحات لاینر محفظه احتراق از قبیل طول ناحیه سوراخ کاری شده، راستای زاویه و قطر سوراخ را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها همچنین با مقایسه مدل‌های مختلف توربولانسی، مدل RKE-ewt را مناسب برای استفاده در مسائلی که جریان در تمامی بخش‌های محفظه با شرایط متفاوت به صورت همزمان حل شود، توصیه کردند.

۱: زهرا مشایخی: واحد مهندسی توربین، شرکت مدیریت پروژه‌های توربین ارکان ایرانیان
۲: پریسه هدایتی: واحد مهندسی توربین، شرکت توربین ماشین خاورمیانه
۳: ارشیا تافته: مدیر مهندسی توربین، شرکت مدیریت پروژه‌های توربین ارکان ایرانیان

1.Annular
2.McGurik
3.Spencer
4.Crocker
5.Larger



تصویر ۱. تفاوت‌های ابعاد و تعداد سوراخ‌های خنک‌کاری تعبیه شده بر لاینرهای داخلی و خارجی؛ بالا مدل اولیه، پایین مدل ارتقا یافته

مدل آشفتگی Realizable k-ε، در برخی موارد نتایج دقیق‌تری حتی نسبت به مدل تنش رینولدز حاصل کرده است.

روند شبیه‌سازی جریان در محفظه احتراق توربین گاز ستار

در انجام شبیه‌سازی‌های عددی ارتقا، جریان به طور همزمان در لاینر، پوسته و دیفیوزر دو محفظه احتراق حلقوی با ابعاد یکسان و چیدمان خنک‌کاری متفاوت مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. در این بررسی، مدل رینولدز بالای Realizable k-ε به همراه تابع دیواره استاندارد، برای مدل‌سازی آشفتگی مورد استفاده قرار گرفته است. هدف از انجام این تحلیل، دستیابی به الگوی کمّی و کیفی جریان و انتقال حرارت در فضای بیرون و درون محفظه احتراق، از خروجی کمپرسور تا ورودی توربین و ارزیابی مقایسه‌ای مشخصه‌های اصلی در محفظه، پیش و پس از ارتقا می‌باشد. در این شبیه‌سازی، فضای دیفیوزر و استرات‌های درون آن، کانال حلقوی اطراف محفظه احتراق، مجاری خنک‌کاری محفظه، سوخت‌پاش و چرخاننده‌ها در ناحیه محاسباتی در نظر گرفته شده‌اند. به‌منظور کاهش زمان محاسبات و افزایش نرخ همگرایی، ابتدا جریان سرد بدون در نظر گرفتن احتراق شبیه‌سازی شده است. در مرحله بعد، با فعال‌سازی مدل احتراق غیرپیش‌آمیخته و استفاده از نتایج حل جریان سرد به عنوان شرط اولیه، جریان گرم در محفظه احتراق شبیه‌سازی شده است. همچنین تغییر مشخصه‌های جریان و انتقال حرارت، از قبیل افت فشار، توزیع دبی هوا در سوراخ‌های لاینر و همچنین توزیع دما در سرتاسر دیواره و خروجی لاینر مورد بررسی قرار گرفته است.

ارتقای عملکرد توسط افزایش دمای خروجی از محفظه

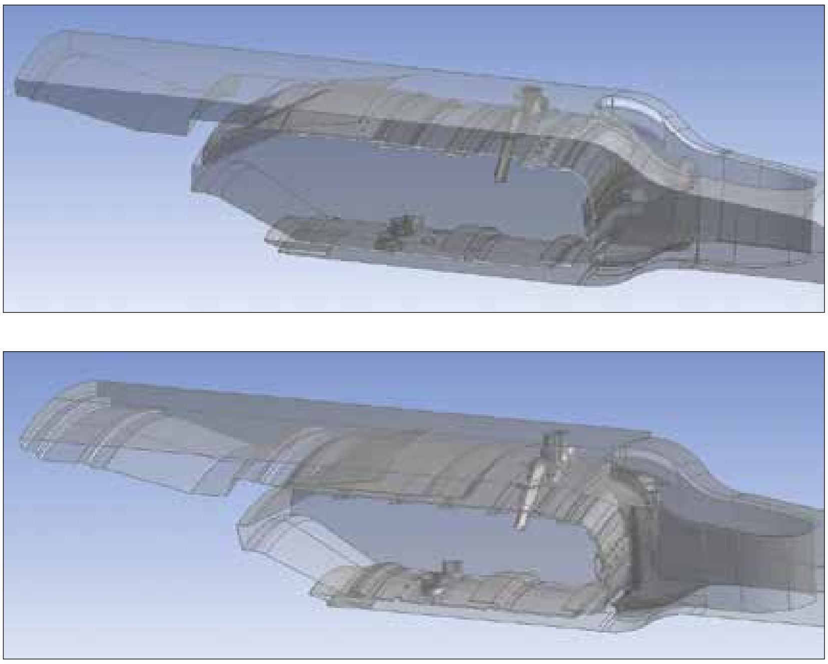
افزایش دمای خروجی از محفظه روش موثری برای بهبود عملکرد و بازدهی توربین گاز است. از سوی دیگر افزایش دمای کاری باعث ازدیاد تنش‌های حرارتی بر پوسته لاینر و پره‌های توربین می‌شود. با استفاده از روش‌های خنک‌کاری مناسب می‌توان

در انجام شبیه‌سازی‌های عددی ارتقا، جریان به طور همزمان در لاینر، پوسته و دیفیوزر دو محفظه احتراق حلقوی با ابعاد یکسان و چیدمان خنک‌کاری متفاوت مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است

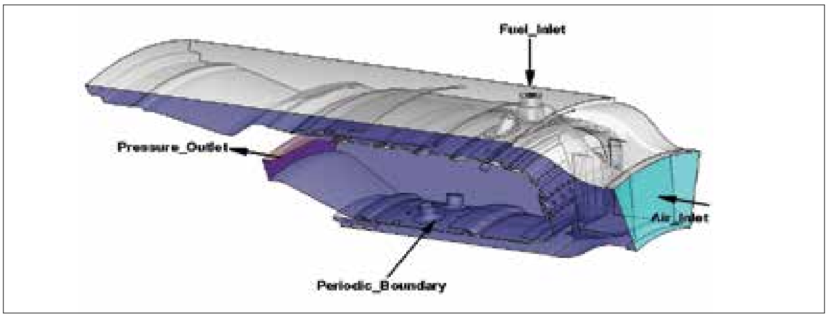
سوئیلر، عامل ایجاد چرخش جریان مخلوط سوخت و هوا و محصولات احتراق حول محور محفظه احتراق است و نقش بسزایی در پایداری شعله ایفا می‌کند

جدول ۱. تغییر شرایط کاری توربین گاز سولار سنتار پس از ارتقا

توان [hp]	۴۳۹۰	۳۸۳۰
دمای خروجی از محفظه [F]	۱۶۶۰	۱۶۰۰
دبی هوا [lb/s]	۳۷/۶	۳۸/۰
دبی سوخت [lb/s]	۰/۴۷	۰/۳۰
نسبت فشار	۹/۶	۹/۰



تصویر ۲. قطاع سه‌بعدی ناحیه محاسباتی محفظه احتراق؛ بالا مدل پایه، پایین مدل ارتقا یافته



تصویر ۳. شماتیک موقعیت مرزها در ناحیه محاسباتی

از ازدیاد این تنش‌ها جلوگیری کرد و بازدهی را افزایش داد. به منظور بررسی و اصلاح طراحی خنک‌کاری لاینر، به علت وجود پیچیدگی‌های موجود در جریان و انتقال حرارت محفظه احتراق، دینامیک سیالات محاسباتی ابزاری ضروری به‌نظر می‌رسد. در فرآیند بازطراحی محفظه احتراق توربین گاز سنتار، مشخصه‌های محفظه احتراق ارتقا یافته عبارتند از:

- تغییر طراحی خنک‌کاری لاینر محفظه احتراق به منظور کنترل دمای دیواره
- بهینه‌سازی پروفیل دمای شعاعی محفظه احتراق به منظور احراز الزامات پره توربین
- بهبود آب‌بندهای محفظه احتراق برای کاهش هوای تخلیه کمپرسور از گذرگاه محفظه احتراق
- بهبود فاکتور الگو[1]
- افزایش متوسط دمای خروجی از محفظه

در جدول یک، تغییر شرایط کاری توربین گاز سولار سنتار در اثر افزایش دمای خروجی از محفظه مشاهده می‌شود.

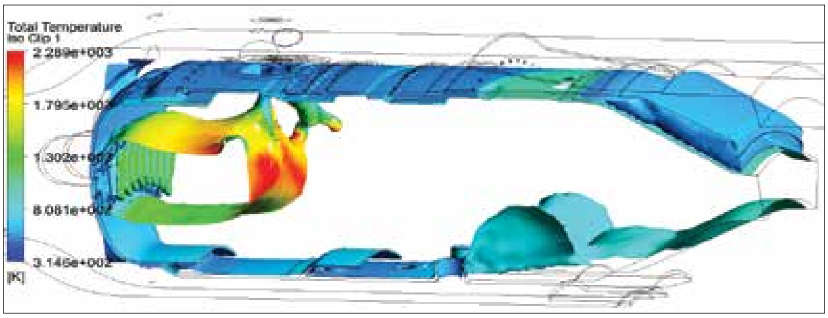
تغییرات هندسی با هدف بهبود خنک‌کاری

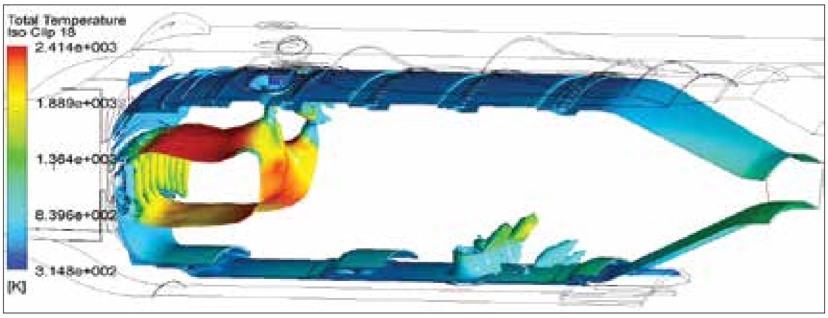
با وجود ثابت ماندن ابعاد اصلی محفظه احتراق پس از ارتقا، تفاوت‌هایی در موقعیت، تعداد و چیدمان سوراخ‌های خنک‌کاری و رقیق‌سازی، سوئیلرهای هوا و فضای حلقوی خارجی ایجاد شده است. این اختلاف‌ها به طور خلاصه شامل افزایش تعداد ردیف سوراخ‌های خنک‌کاری در لاینر خارجی، داخلی و گنبدی، همچنین تغییر در تعداد سوراخ‌های رقیق‌سازی و موقعیت آن‌ها می‌شود. سوئیلر، عامل ایجاد چرخش جریان مخلوط سوخت و هوا و محصولات احتراق حول محور محفظه احتراق است و نقش بسزایی در پایداری شعله ایفا می‌کند. در مدل ارتقا یافته، سوئیلرهای

1 Pattern Factor

جدول ۲. مقدارهای مرزی برای حل جریان گرم محفظه احتراق ارتقا یافته توربین گاز ستنتار

	خروجی	ورودی سوخت	ورودی هوا
دبی جرمی [kg/s]	۱/۷۳	۰/۰۲۳۵	۱/۷۰۶۹
فشار کل [kPa]	۹۱۶	۹۵۰	۹۶۲/۵
شدت آشفتگی [%]	۵	۵	۷
دما [K]	–	۳۱۵	۵۹۳/۰۶





تصویر ۴. صفحات با سرعت محوری صفر در محفظه احتراق؛ بالا مدل پایه، پایین مدل ارتقا یافته

جدول ۳. مقایسه توزیع هوا برای اهداف مختلف در محفظه احتراق

کاربرد هوای ورودی		درصد دبی جرمی: پایه	درصد دبی جرمی: ارتقا یافته
هوای خنک‌کاری	خنک‌کاری دیواره خارجی	۱۹/۸ درصد	۳۶/۶ درصد
	خنک‌کاری دیواره داخلی	۹/۲۵ درصد	۱۴/۷ درصد
	خنک‌کاری گنبدی	۲۲/۰ درصد	۱۹/۵ درصد
هوای رقیق‌سازی		۳۷/۵ درصد	۲۱/۱ درصد

تحقیقات انجام شده در زمینه استراتژی‌های مختلف انتخاب ناحیه محاسباتی و حل جریان در آن، نشان می‌دهد که مدل‌سازی لاینر به تنهایی و صرف‌نظر از فضای حلقوی اطراف آن، سبب ایجاد خطا در پیش‌بینی عددی می‌شود

هوا در مجاورت سوخت پاش‌ها، به صورت دولایه بوده و لایه بیرونی، فیلم هوای خنک‌کاری روی لایه داخلی ایجاد کند.

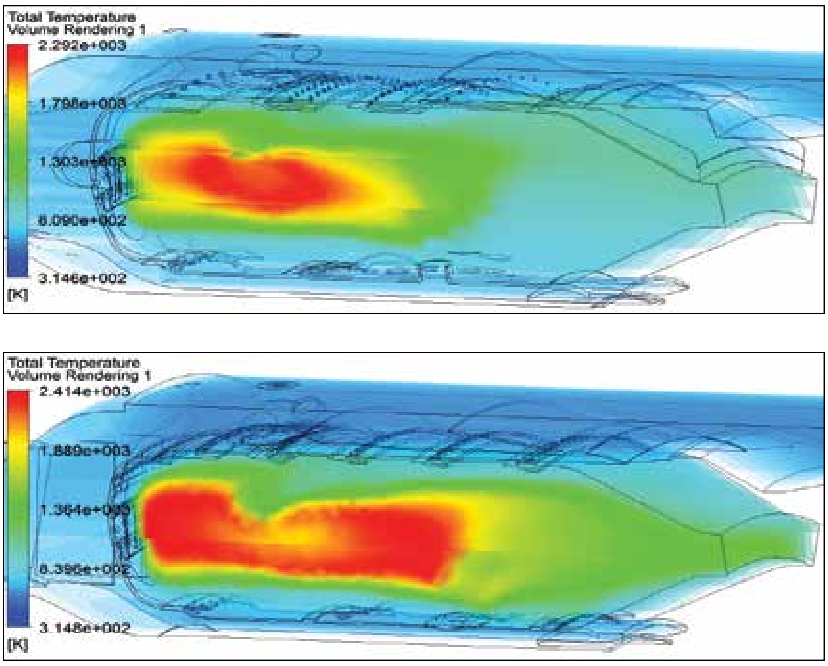
ناحیه محاسباتی و شبکه‌بندی

تحقیقات انجام‌شده در زمینه استراتژی‌های مختلف انتخاب ناحیه محاسباتی و حل جریان در آن، نشان می‌دهد که مدل‌سازی لاینر به تنهایی و صرف‌نظر از فضای حلقوی اطراف آن، سبب ایجاد خطا در پیش‌بینی عددی می‌شود. در این راستا، در حال حاضر گرایش به سمت شبیه‌سازی با در نظر گرفتن فضای اطراف محفظه احتراق افزایش یافته است. در واقع، بهترین و دقیق‌ترین روش در شبیه سازی محفظه احتراق توربین گاز، حل هم‌زمان و کوپل‌شده جریان در فضای بیرون و درون محفظه احتراق است. اگر محاسبات CFD برای یک مدل کامل کوپل‌شده محفظه احتراق، از خروجی دیفیوزر کمپرسور تا ورودی توربین لحاظ شود، دو هدف مهم زیر قابل دستیابی هستند:

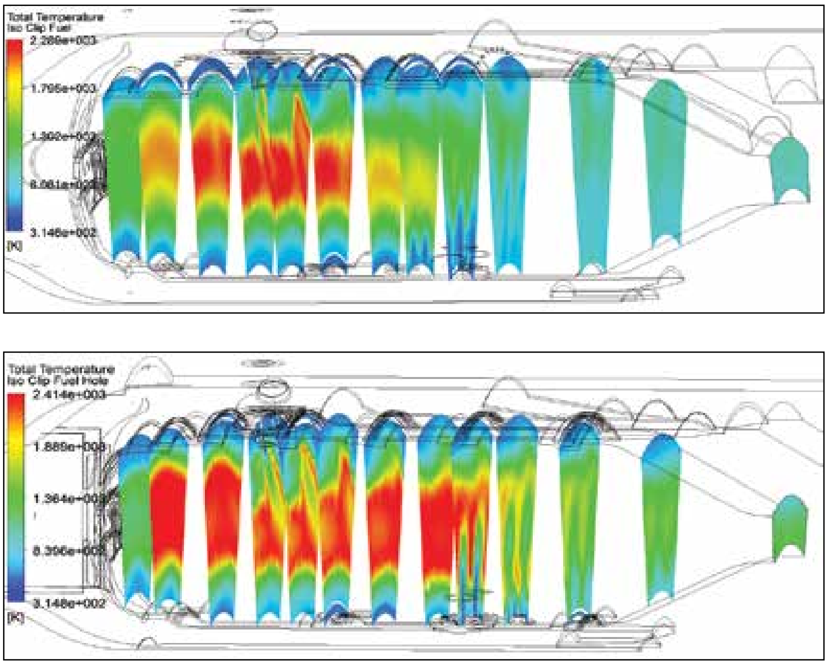
۱- تعیین ضمنی توزیع‌های جریان و شرایط جریانی سوراخ‌ها به درون لاینر محفظه احتراق

۲- پیش‌بینی دقیق دما روی دیواره لاینر با توجه به تأثیر توزیع هوای ورودی بر پارامترهای خروجی در این نوع محفظه احتراق، نیاز به اتخاذ روشی دقیق برای تعیین توزیع جرم از طریق مجاری ورودی جریان به درون محفظه وجود دارد. از این رو، برای مدل‌سازی این محفظه احتراق، از میان گزینه‌های موجود در انتخاب ناحیه محاسباتی، فضای بیرون و درون محفظه احتراق، از خروجی کمپرسور تا ورودی توربین در نظر گرفته شده است.

شبکه‌بندی این ناحیه محاسباتی در نرم‌افزار ANSYS Meshing 14.5 با استفاده از سلول‌های



تصویر ۵. کانتور سه‌بعدی دما در محفظه احتراق؛ بالا مدل پایه، پایین مدل ارتقا یافته



تصویر ۶. کانتورهای توزیع دما در مقاطع عرضی مختلف محفظه احتراق؛ بالا مدل پایه، پایین مدل ارتقا یافته

چهار وجهی، به صورت بی‌سازمان انجام گرفته است. در نزدیکی دیواره‌ها و موقعیت‌های با گرادیان شدید پارامترهای جریان و انتقال حرارت، کنترل سایز شبکه به صورت محلی انجام پذیرفته و تعداد شبکه مورد استفاده حدود ۵ میلیون سلول چهار وجهی است. در شکل ۲، نمای مدل سیال استفاده شده برای محاسبات عددی این محفظه نمایش داده شده است.

الگوریتم عددی

به منظور مدل‌سازی جریان تراکم‌پذیر آشفته محترق گاز طبیعی و هوا در محفظه احتراق، معادله‌های پیوستگی، اندازه حرکت، انرژی، معادله‌های مربوط به مدل‌سازی اغتشاش و معادله انتقال اجزای شیمیایی و احتراق غیر پیش‌آمیخته (انتقال کسر مخلوط و واریانس کسر مخلوط) در شکل متوسط‌گیری‌شده حل می‌شوند. تنظیمات حل عددی، برای حل پایا و حل‌گر مبتنی بر فشار[1]، همبستگی فشار - سرعت کوپل، به صورت شبه گذرا[2] صورت گرفته است. معیار همگرایی نهایی حل، علاوه بر کاهش مقدار باقیمانده‌ها تا حدود 10^{-6}، پایدار شدن مقدار برخی متغیرهای مانیتور شده در خروجی محفظه و برخی مقاطع با گرادیان بالا لحاظ گردیده است.

شرایط مرزی

از مزایای حل هم‌زمان ناحیه بیرون و درون محفظه احتراق، کاهش تعداد مرزها و تقریب‌های وارد شده در حل در اثر مقداردهی به این مرزها است. در این شبیه‌سازی مرز ورودی شامل ورودی هوا و ورودی سوخت است و خروجی محفظه احتراق تنها مرز خروجی ناحیه محاسباتی است.

برای مرزهای ورودی هوا و سوخت، شرط مرزی دبی ورودی و خروجی محفظه احتراق، شرط مرزی فشار خروجی در نظر گرفته شده است. افت فشار در محفظه احتراق، به منظور تعیین فشار خروجی حدود ۵ درصد از فشار ورودی فرض شده است. در شکل ۳ و جدول ۲، به ترتیب نمای شماتیک از موقعیت مرزهای ناحیه محاسباتی و مقدارهای مرزی مدل ارتقا یافته ارائه شده است. با توجه به پریودیک بودن هندسه محفظه، تنها از یک قطاع ۳۶ درجه به منظور شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است.

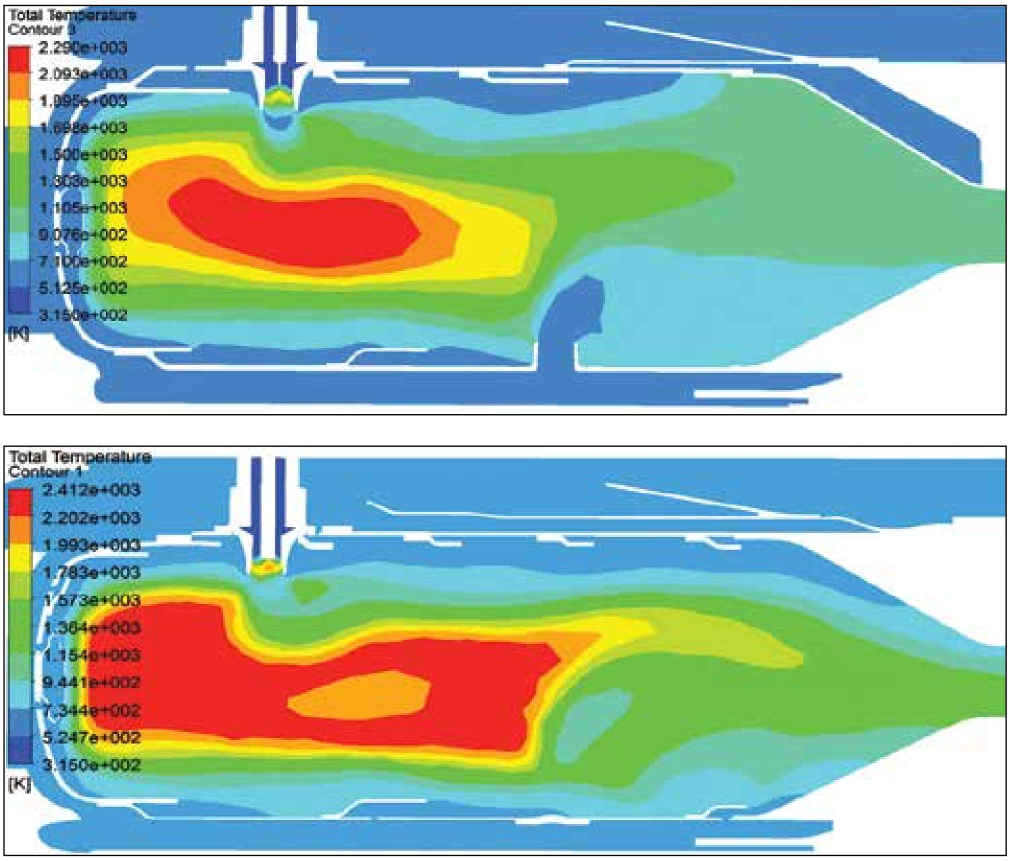
نواحی بازچرخش

در ادامه، ارزیابی مقایسه‌ای روی نتایج شبیه‌سازی عددی محفظه احتراق توربین‌های گاز سولار، مدل سنتار پیش و پس از ارتقا انجام شده است. در این ارزیابی تلاش بر این است که پی‌آیندهای تغییرات در هندسه و شرایط کاری دو مدل محفظه احتراق مورد بررسی روی پارامترهای مؤثر در عملکرد محفظه بحث و تفسیر شوند. کانتورهای سرعت محوری صفر، مرزهای نواحی بازچرخش در میدان جریان چرخشی را تعیین می‌کنند. بازچرخش داخلی در اثر گرادیان‌های فشار محوری و شعاعی ایجاد شده توسط جریان چرخشی به وجود می‌آیند. بازچرخش گازهای داغ احتراق درون این ناحیه، احتراق پایدار گازهای سردتر نسوخته و کاهش تولید NOx از طریق کاهش دمای شعله را منجر شود. ناحیه بازچرخش اصلی در محفظه احتراق، ناحیه بازچرخش ایجاد شده در مرکز محفظه است که به شدت تحت تأثیر چرخش در ورودی می‌باشد. برای ارائه نمای دقیق‌تر از مرز نواحی بازچرخش، نمایش سه‌بعدی صفحات با سرعت محوری صفر به همراه توزیع دما روی آن‌ها در شکل ۴ آورده شده است. از مقایسه این صفحات، تغییر در موقعیت و محدوده ناحیه بازچرخش، به خصوص در ناحیه رقیق‌سازی مدل ارتقا یافته کاملا مشهود است.

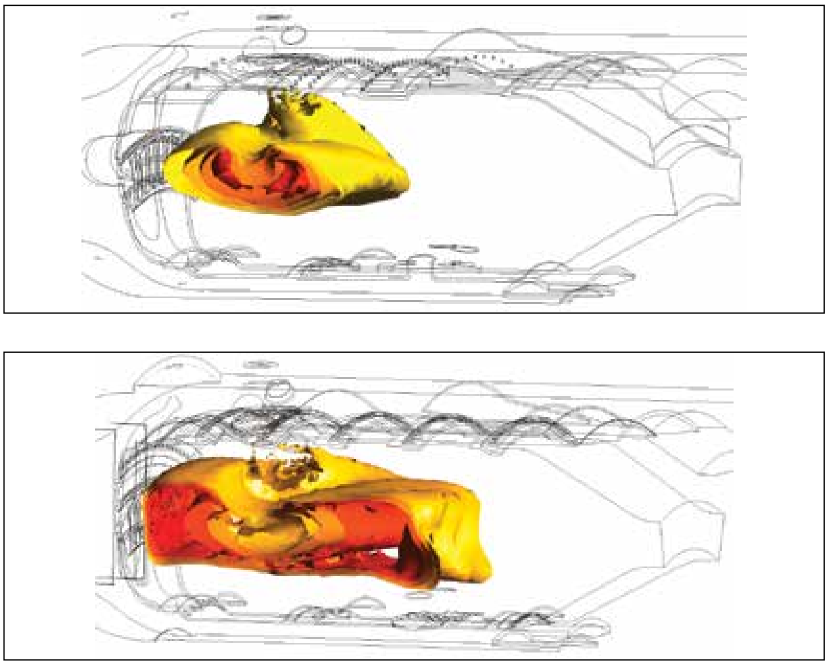
توزیع هوا

در محفظه احتراق سولار، مدل سنتار، سوراخ‌هایی که جریان خروجی از آن‌ها به صورت مستقیم وارد نواحی مرکزی محفظه نمی‌شوند و جریان هوای

1 Pressure-based
2 Pseudo Transient



تصویر ۷. کانتور توزیع دما در مقطع طولی محفظه احتراق؛ بالا مدل پایه، پایین مدل ارتقا یافته



تصویر ۸. صفحات هم‌دما در محفظه احتراق؛ بالا مدل پایه ۲۲۰۰–۱۹۰۰ کلوین، پایین مدل ارتقا یافته ۲۴۰۰–۲۱۰۰ کلوین

تصویر ۹. سوختگی قسمت‌هایی از سوخت‌پاش و ورودی سوخت و هوا در محفظه احتراق تحت بررسی

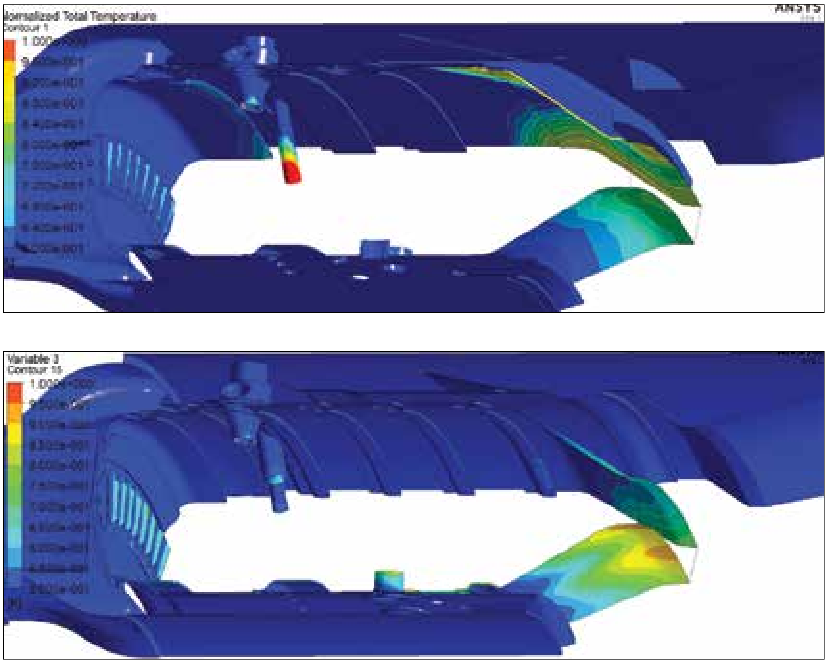
خروجی در اثر برخورد با سطح تیغه و یا لبه‌ای به صورت لایه نازک محدوده‌ای از دیواره محفظه را پوشش می‌دهد، سوراخ‌های با هدف خنک‌کاری فیلمی هستند. درصد هوای ورودی از سوراخ‌های خنک‌کاری در محفظه احتراق پایه، ۵۱ درصد و این پارامتر در محفظه احتراق ارتقا یافته، ۷۱ درصد محاسبه شده است. افزایش سهم سوراخ‌های خنک‌کاری در مدل ارتقا یافته، با وجود افزایش تعداد آن‌ها در دیواره‌های گنبدی و لاینر خارجی و داخلی دور از انتظار نیست. افزایش دبی سوخت و دمای ماکزیمم و در نتیجه متوسط دمای سیال عامل درون محفظه احتراق، نیاز به خنک‌کاری بیشتر و وسیع‌تر دیواره‌ها را مشخص کند. هوای خروجی از سوراخ‌های رقیق‌سازی، علاوه بر مشارکت در تکمیل احتراق، به کاهش دمای محصولات احتراق و یکنواختی توزیع دما در خروجی کمک می‌کنند. توزیع هوا در محفظه احتراق ارتقا یافته به گونه‌ای بوده است که سهم سوراخ‌های رقیق‌سازی در آن نسبت به مدل پایه، حدود ۱۶ درصد کاهش یافته است.

توزیع دما

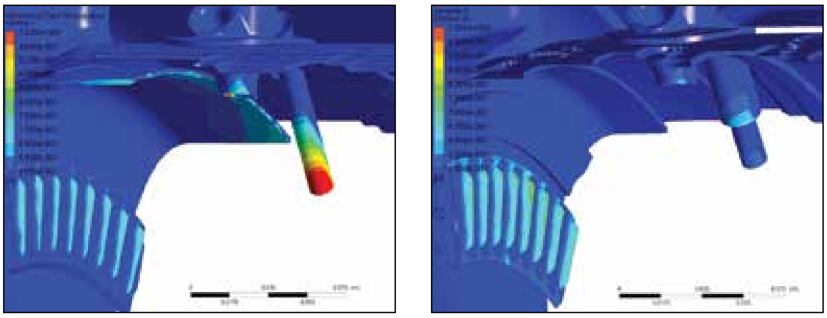
در مبحث ارتقای توربین‌های گاز، یکی از مهم‌ترین موارد، افزایش متوسط دمای خروجی از محفظه احتراق است. در این راستا، تغییر نسبت سوخت

به هوا و در نتیجه افزایش نسبت تعادل سوخت به هوای واقعی بر سوخت به هوای استوکیومتریک ضروری به نظر می‌رسد. این امر با تغییر دبی سوخت ورودی به محفظه احتراق و تنظیم هوای مورد استفاده در فرآیند احتراق با تغییر در نحوه توزیع هوا برای مصارف مختلف محفظه احتراق امکان‌پذیر می‌شود.

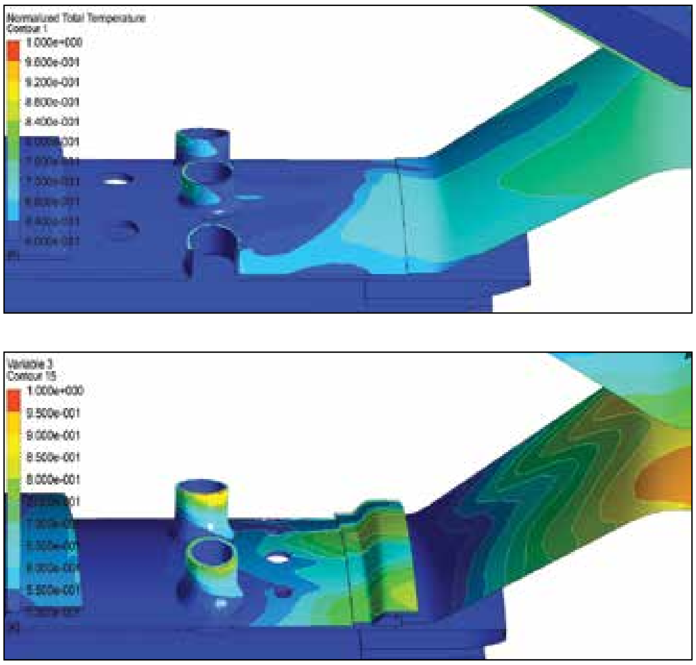
نتایج شبیه‌سازی عددی جریان گرم دو محفظه احتراق نشان می‌دهد که دمای ماکزیمم شعله، از ۲۲۹۳/۴ کلوین در مدل پایه، به ۲۳۰۳/۹ کلوین در مدل هندسی پایه، با شرایط کاری مدل ارتقا یافته و در نهایت، به ۲۴۱۵/۴ کلوین در مدل هندسی ارتقا یافته با شرایط کاری جدید افزایش پیدا کرده است.
مقدار هوایی که وارد ناحیه اولیه محفظه احتراق می‌شود، نسبت هم‌ارزی سوخت و هوا را کنترل می‌کند. افزایش دمای ماکزیمم شعله، از ۲۳۰۳/۹ کلوین در مدل اولیه به ۲۴۲۱/۸ کلوین در مدل ارتقا یافته، نشان از افزایش نسبت تعادل سوخت به هوای واقعی بر سوخت به هوای استوکیومتریک دارد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی عددی، درصد هوای ورودی به ناحیه اولیه محفظه احتراق، صرف‌نظر از هوای خنک‌کاری، از ۱۲/۴ درصد در مدل پایه، به حدود ۸ درصد در مدل ارتقا یافته کاهش یافته است و در نتیجه آن، نسبت سوخت به هوا افزایش می‌یابد. در شکل ۷، کانتور توزیع دما در مقطع طولی محفظه احتراق، محدوده شعله و نحوه پوشش لایه هوای خنک‌کاری روی دیواره‌های لاینر نمایش داده شده است. همانطور که از مقایسه کانتورها مشخص است، پوشش‌دهی



تصویر ۱۰. کانتور توزیع دمای بی‌بعد سیال در مجاورت دیواره؛ بالا مدل پایه، پایین مدل ارتقا یافته



تصویر ۱۱. کانتور توزیع دما در دیواره‌های سوخت‌پاش، سوئیلر هوا و شیارهای ورودی هوا در گنبدی محفظه احتراق؛ چپ مدل پایه، راست مدل ارتقا یافته



تصویر ۱۲. کانتور توزیع دمای دیواره لاینر داخلی محفظه احتراق؛ بالا مدل پایه، پایین مدل ارتقاء یافته

جدول ۴. جمع‌بندی تغییرات در مقادیر پارامترهای اصلی محفظه احتراق سنتار در فرآیند ارتقا

پارامترها	مدل پایه	مدل ارتقا یافته
ماکزیمم دمای شعله [K]	۲۲۹۶/۷۷	۲۴۱۵/۳۸
ماکزیمم دمای خروجی محفظه [K]	۱۰۰۸/۸۴	۱۳۱۱/۴
متوسط دمای خروجی [K]	۹۵۲/۸۴	۱۱۵۰/۴۵
ماکزیمم دمای دیواره [K]	۲۱۴۷/۵	۲۲۷۵/۵
هوای خنک‌کاری	۵۱/۰۳ درصد	۷۰/۷۵ درصد
هوای رقیق‌سازی	۳۷/۴۶ درصد	۲۱/۱۰ درصد

فیلم خنک‌کاری در مدل ارتقا یافته، به خصوص در لاینر خارجی و گنبدی، بهبود یافته است.
دماهای محلی در محدوده شعله دارای بیشترین مقدار هستند. خنک‌کاری لاینر محفظه احتراق و هوای اضافی، دمای گاز را به دمای قابل قبول در خروجی محفظه احتراق می‌رسانند. در شبیه‌سازی‌ها، مقدار T3 (متوسط دمای خروجی از محفظه احتراق) در مدل پایه، ۱۱۴۴/۳ کلوین و برای محفظه احتراق ارتقا یافته، ۱۱۷۷/۶ کلوین محاسبه شده است که با مدارک موجود همخوانی قابل قبولی دارد.

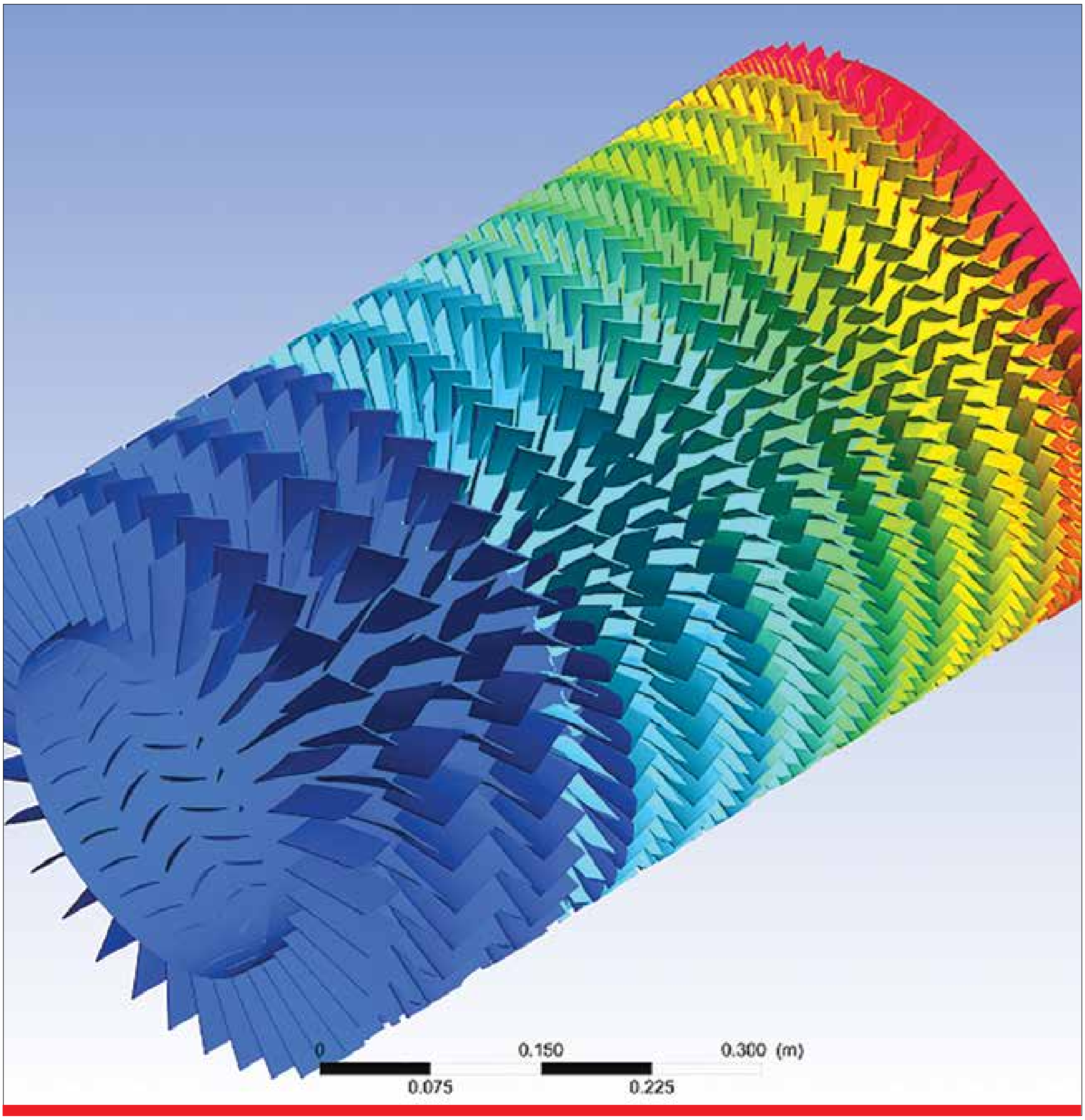
توزیع دمای دیواره لاینر

در طراحی محفظه احتراق توربین گاز، لاینر باید دارای مقاومت حرارتی کافی برای تحمل دمای بالای سیکلی و پیوسته باشد. این موارد با به‌کارگیری مواد مقاوم در برابر حرارت و جریان خنک‌کاری مؤثر قابل دستیابی است. دمای دیواره‌های محفظه احتراق، یکی از اصلی‌ترین محدودیت‌ها در ارتقای عملکرد توربین گاز است، زیرا افزایش دمای گاز خروجی از محفظه متضمن تولید گاز بیشتر خواهد بود. خنک‌کاری در محفظه احتراق مورد بررسی، از طریق ایجاد فیلم هوای خنک‌کننده روی سطح داخلی دیواره لاینر، با استفاده از روش Splash Cooling Ring انجام می‌شود. در واقع یک لایه محافظ از هوای خنک بین دیواره و گازهای داغ احتراق ایجاد می‌شود. این لایه خنک به تدریج در اثر اختلاط متلاطم با جریان گاز داغ حاصل از احتراق تخریب می‌شود. بنابراین به‌منظور تداوم این لایه، ردیف سوراخ‌های متوالی با فاصله در طول لاینر تعبیه می‌شود. در واقع، هوای ورودی از سوراخ‌های مربوط به خنک‌کاری لایه‌ای، دمای متوسط و دمای دیواره را تعیین می‌کند.
در فرآیند ارتقای توربین گاز، در بخش محفظه احتراق، محاسبه توزیع دمای روی دیواره محفظه از اهمیت بالایی برخوردار است. بر اساس این توزیع دما، شناسایی رگه‌ها و نقاط داغ روی دیواره و مناطقی که تحت پوشش جریان‌های خنک‌کاری قرار نمی‌گیرند، امکان‌پذیر می‌شود. این اطلاعات در جهت انتخاب نوع پوشش مورد نیاز روی دیواره‌های لاینر و اصلاح تعداد و چیدمان سوراخ‌های خنک‌کاری مورد استفاده قرار می‌گیرند.
از مواردی که در فرآیند ارتقا لحاظ می‌شود، اصلاح عوامل ایجاد معایب و نقایص مدل پایه است. این معایب، شامل سوختگی و ترک‌های ناشی از تنش‌های حرارتی شدید در دیواره‌های محفظه احتراق می‌شوند که نشان‌دهنده وجود نقص و نارسایی در سیستم خنک‌کاری دیواره‌ها است. بدین معنا که چیدمان سوراخ‌های خنک‌کاری و فواصل بین آن‌ها در آن مناطق مناسب نبوده و فیلم هوای خنک‌کاری، آن نواحی از دیواره محفظه را تحت پوشش قرار نمی‌دهند. در مدل پایه، موارد سوختگی و ترک مشاهده شده روی توربین‌های کارکرده، شامل قسمت‌های انتهایی سوخت‌پاش و سوئیلر هوا و نیز محل اتصال نازل خروجی محفظه به لاینر خارجی می‌شود.
در فرآیند ارتقای محفظه احتراق ستنار، در جهت رفع این نقایص، تعداد ردیف سوراخ‌های خنک‌کاری افزایش و در نتیجه فواصل سوراخ‌ها کاهش داده شده‌اند. به این ترتیب پوشش فیلم هوای خنک‌کاری روی دیواره و موقعیت رگه‌های داغ بهبود یافته است. همچنین، دیواره سوئیلر هوا که در معرض جریان گازهای داغ محترق دچار سوختگی‌های شدید می‌شد، با افزودن لایه ثانویه روی آن و عبور فیلم هوای خنک از فاصله میان دو لایه، عایق حرارتی روی آن ایجاد شده و از سوختگی آن تا حد زیادی جلوگیری به عمل آمده است. بر اساس کانتورهای توزیع دمای سیال مجاور دیواره، خنک‌کاری فیلمی دیواره، با بازطراحی فرآیند خنک‌کاری لاینر بهبود یافته است و مناطق و رگه های داغ روی دیواره کاهش یافته است. در واقع، کاهش قابل توجه گرادیان‌های دمایی دیواره در مدل ارتقا یافته، به خصوص در دیواره‌های لاینر خارجی کاملا مشهود است. همچنین لایه ثانویه روی سوئیلر در مدل ارتقا یافته، با ایجاد لایه هوای خنک روی انتهای دیواره آن، موجب کاهش گرادیان‌های دمایی بر روی این ناحیه شده است.
در مدل پایه، حدود ۳۰ درصد از هوای خروجی کمپرسور به خنک‌کاری دیواره‌های لاینر خارجی و داخلی اختصاص یافته است، در حالی که، در مدل ارتقا یافته، سهم خنک‌کاری به ۵۰ درصد افزایش داده شده است. محل اتصال قطعات و جوش آن‌ها از نقاط حساس و بحرانی در برابر دمای بالای سیال کاری مجاور هستند. افزوده شدن دو ردیف سوراخ خنک‌کاری در انتهای لاینر داخلی و خارجی، موجب پوشش محل اتصال و جوش به وسیله هوای خنک‌کاری و کاهش دمای دیواره در این موقعیت‌ها شده است. کانتورهای توزیع دما در دیواره‌های محفظه احتراق در شکل ۱۲، اثباتی بر صحت این مدعاست.

جمع‌بندی

با افزایش قابلیت تحمل دمایی دیواره‌های لاینر و نازل توربین در مقابل افزایش ناچیز دمای خروجی مشعل و محفظه احتراق، امکان افزایش توان توربین، به میزان بالایی فراهم می‌شود. در این مقاله، تأثیر بهبود سیستم خنک‌کاری دیواره‌های محفظه احتراق توربین گاز ستنار، در ارتقای عملکرد محفظه، با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی، مورد بررسی قرار گرفته است. ارزیابی مقایسه‌ای بین شبیه‌سازی عددی جریان گرم در محفظه احتراق ستنار، پیش و پس از ارتقا به منظور بررسی تأثیر تغییرات هندسی و شرایط کاری بر الگوی جریان، دما و پارامترهای عملکردی محفظه احتراق صورت پذیرفته است.

با افزایش قابلیت تحمل دمایی دیواره‌های لاینر و نازل توربین در مقابل افزایش ناچیز دمای خروجی مشعل و محفظه احتراق، امکان افزایش توان توربین، به میزان بالایی فراهم می‌شود

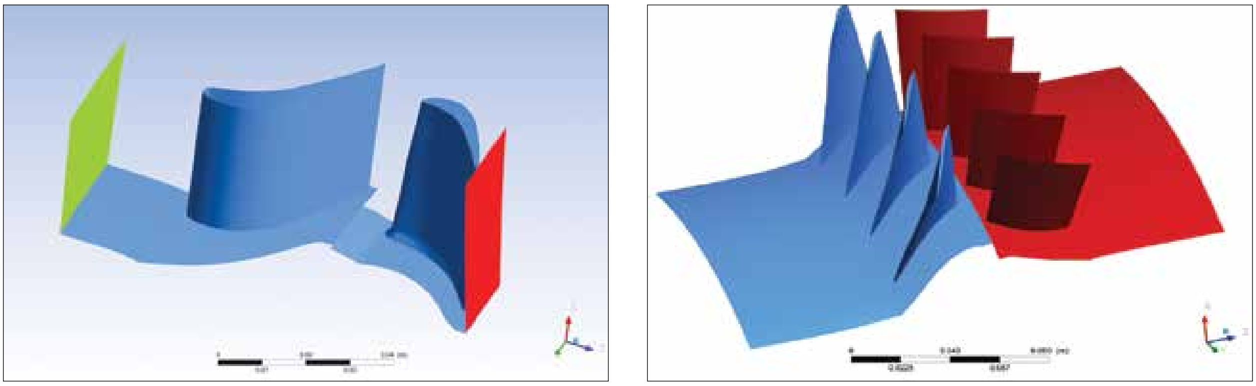


مدل‌سازی، صحت‌سنجی و بررسی پارامترهای موثر در شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان در توربوماشین‌ها

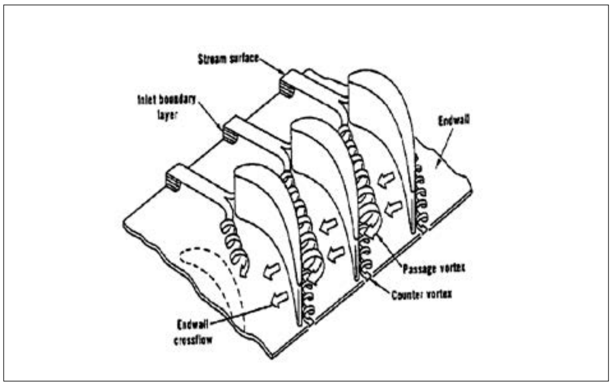
قاسم مصیبی،[1] مینا وحیدی[2]

در این مقاله به بررسی پارامترهای مؤثر در شبیه‌سازی عددی جریان در توربوماشین‌های محوری پرداخته شده است. بسته به نوع ماشین، پدیده‌های فیزیکی و اثرات هندسی متفاوتی در این ماشین‌ها دیده می‌شود. از آن جمله می‌توان ناپایا بودن جریان، جدایش لایه مرزی، گذر از جریان آرام به آشفته، سه‌بعدی بودن، اثرات ناشی از نشت جریان و جریان‌های ثانویه را نام برد. با توجه به اینکه روش عددی باید از فیزیک حاکم در میدان جریان پیروی کند، لازم است تا قبل از شروع شبیه‌سازی تعیین شود که کدام پدیده‌ها روی نتایج مورد نیاز تأثیر می‌گذارند. در این راستا پارامترهای تولید شبکه در لایه مرزی آشفته و همچنین میزان تفکیک شبکه در میدان حل عنوان شده است و معیارهای انتخاب پارامترها بیان شده‌اند. همچنین مدل‌های آشفتگی دومعادله‌ای k-ε، k-ω و SST به صورت مجزا مورد بررسی قرار گرفته‌اند. روش‌های مرتبه اول و دوم گسسته‌سازی معادلات جریان نیز بررسی شده‌اند تا در نهایت بهترین مدلی که نتایج تجربی را تضمین می‌کند انتخاب گردد. برای ارزیابی نتایج از اطلاعات موجود برای یک کمپرسور و توربین مرجع استفاده شده است و نتایج حاصل با مقادیر تجربی مقایسه شده‌اند. این مقایسه‌ها تأثیر هر یک از پارامترهای فوق در پیش‌بینی دقیق پارامترهای عملکردی توربوماشین‌ها را نشان می‌دهد.

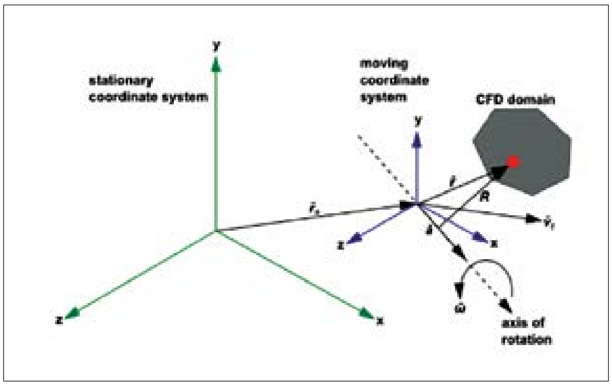
۱: قاسم مصیبی: واحد مهندسی توربین، شرکت مدیریت پروژه‌های توربین ارکان ایرانیان
۲: مینا وحیدی: واحد مهندسی توربین، شرکت مدیریت پروژه‌های توربین ارکان ایرانیان



تصویر۱.مدل طبقه کمپرسور (سمت راست) و توربین (سمت چپ) مورد بررسی



تصویر۲. تصویر شماتیک جریان دیواره انتهایی و گردابه‌های شکل گرفته در گذرگاه پره‌ها



تصویر۳.دستگاه مختصات متحرک و حرکت جسم نسبت به دستگاه مختصات ثابت

بسته به نوع ماشین ممکن است پدیده‌های فیزیکی و اثرات هندسی متفاوتی در توربوماشین‌ها دیده شود. چند نمونه از پیچیدگی‌های موجود در این جریان‌ها شامل ناپایا بودن جریان، جدایش جریان لایه مرزی، گذر از جریان آرام به آشفته، اثرات سه‌بعدی، اثرات ناشی از نشت جریان و جریان‌های ثانویه است. در دو دهه اخیر ابزار CFD توسط صنایع برای ارزیابی عملکرد طراحی‌های جدید بسیار مورد توجه قرار گرفته است. توسعه سخت‌افزارهای کامپیوتری قدرتمندتر، ایجاد مدل‌های ریاضی دقیق‌تر از جریان‌های پیچیده و متدهای سریع‌تر برای حل معادلات باعث شده است تا روش‌های شبیه‌سازی ابزاری کارآمد جهت استفاده در توربوماشین‌ها باشند. برای انجام یک شبیه‌سازی موثق و ارزشمند لازم است در ابتدا به دقت روی اتفاقات فیزیکی و اثرات آن در میدان جریان تأمل کرد تا از بهترین مدل با کمترین هزینه، بیشترین دقت حاصل شود. به عنوان مثال برای شبیه‌سازی جریان آشفته در توربوماشین‌ها یک مدل منفرد برای استفاده در همه مسائل وجود ندارد. مدل‌های مرتبه بالاتر آشفتگی دقت بهتری را در شبیه‌سازی جریان‌های پیچیده ارائه می‌دهند، اما زمان و هزینه محاسبات را افزایش می‌دهند. از طرفی استفاده از مدل‌های مرتبه پایین‌تر، نظیر مدل‌های یک‌معادله‌ای و دومعادله‌ای در شرایط مختلف محدودیت‌هایی را به همراه دارند. از این‌رو مهندسان مختلف رویکردهای گوناگونی را در این باره برگزیده‌اند.

یکی از کاربردهای جدید روش‌های عددی طراحی و بهینه‌سازی است. به عنوان مثال در روش‌های بهینه‌سازی عددی اتوماتیک، هندسه پره‌ها برای ارضای یک هدف طراحی از قبل تعیین شده، با استفاده از نتایج CFD اصلاح و بهینه می‌شوند. در ادامه این مقاله به هر یک از مسائل موجود در شبیه‌سازی جریان پرداخته شده و نمونه‌هایی جهت صحت‌سنجی مدل‌های ارائه شده آمده است. در این تحقیق جهت بررسی میزان اعتبار موارد بیان شده در شبیه‌سازی توربوماشین‌ها یک طبقه کمپرسور محوری گذرصوتی و یک طبقه توربین محوری مورد تحلیل قرار گرفته است. مدل مورد نظر طبقه کمپرسور گذرصوتی ناسا ۳۷ است. مدل توربین مورد نظر نیز شامل یک ردیف نازل و یک ردیف روتور از یک توربین گاز صنعتی می‌باشد. در شکل یک هندسه این مدل‌ها نشان داده شده است. تحلیل‌های انجام شده با استفاده از نرم‌افزار ANSYS CFX 14.5 صورت گرفته است.

تاریخچه استفاده از روش‌های عددی در مطالعه توربوماشین‌ها

استفاده از روش محاسبات عددی در روند طراحی آیرودینامیکی، کلید اصلی در افزایش سرعت چرخه طراحی و کاهش زمان تست است،

یکی از کاربردهای جدید روش‌های عددی طراحی و بهینه‌سازی است. به عنوان مثال در روش‌های بهینه‌سازی عددی اتوماتیک، هندسه پره‌ها برای ارضای یک هدف طراحی از قبل تعیین شده، با استفاده از نتایج CFD اصلاح و بهینه می‌شوند

محققان در اواسط دهه ۸۰ پی بردند که اثرات لزج می تواند اهمیت بسیاری به خصوص در جریان‌های با تداخل شوک با لایه مرزی داشته باشد. همچنین بسیاری پدیده‌های کلیدی مانند جریان لقی سر پره تنها می‌تواند با مدل‌های ویسکوز شبیه‌سازی شود

از این رو سرمایه‌گذاری در این روش ضروری به نظر می‌رسد. علاوه بر این CFD با فراهم کردن تست‌های محاسباتی، بینشی از فیزیک جریان را ارائه می‌کند.

کدهای آنالیز محاسبات عددی، معادلات جریان سیال را با سطوح متفاوتی از دقت حل می‌کنند. این کدها در فرآیند طراحی برای بهینه‌سازی هندسه‌ی قطعات و به‌دست آوردن سطح مطلوب عملکرد مورد استفاده قرار می‌گیرند. اولین کاربردهای محاسبات عددی در طراحی مربوط به دهه ۶۰ میلادی است.

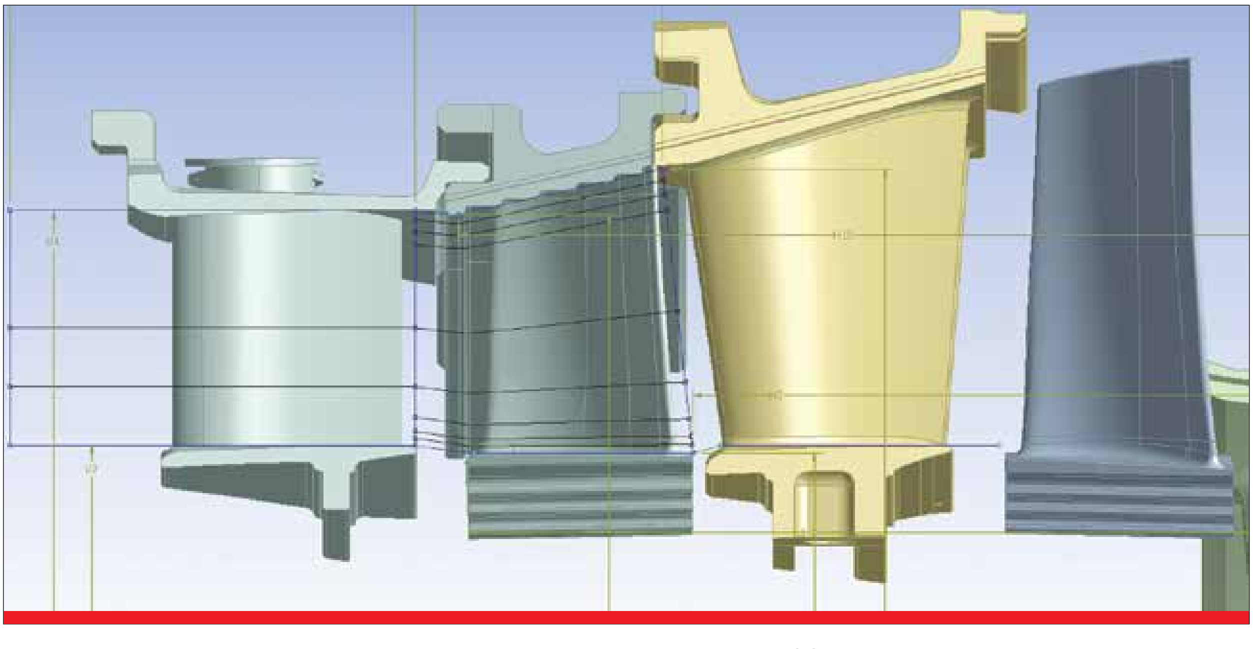
در کدهای اولیه مورد استفاده در دهه‌های ۶۰ و ۷۰ برای تعیین هندسه و تحلیل جریان توربوماشین‌ها از روش انحنای خط جریان، روش تابع جریان و روش تابع پتانسیل استفاده شده است. روش انحنای خط جریان دارای قابلیت پیش‌بینی عملکرد کلی توربوماشین‌ها در حالت طراحی و همچنین در حالت خارج از طراحی می‌باشد. هرچند این روش نیازمند تعریف رابطه اثرات واقعی جریان برای افت‌ها و انحراف‌ها است. فرمولاسیون تابع جریان محدود به جریان دو بعدی می‌باشد. فرمول‌بندی تابع پتانسیل قادر به پیش‌بینی شوک ناشی از فرم غیربقایی گسسته شده معادلات اصلی نمی‌باشد. این موانع در اواخر دهه ۷۰ با معرفی روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی بر مبنای معادلات اویلر حل شد. از آن زمان به بعد کدهای CFD برای شبیه‌سازی تمام جریان‌های دو بعدی استفاده شد. با این وجود جریان در ماشین‌های شعاعی، مخلوط و با بارگذاری زیاد سه‌بعدی می‌باشد. در اواخر دهه ۷۰، حلگر جریان سه بعدی غیرلزج گسترش داده شد. در همان دوره نیاز به ابزاری برای شبیه‌سازی جریان ناپایا وجود داشت. به این منظور کدهای عددی مخصوص شبیه‌سازی جریان تراکم‌پذیر ناپایا گسترش داده شد تا وسیله چهار منبع اصلی ناپایداری مدل گردد: گردابه برهمکنش روتورها، برهمکنش پتانسیل (اثر متقابل پره‌های ردیف مجاور)، ریزش گردابه‌ها، لرزش (نوسان پره‌ها).

محققان در اواسط دهه ۸۰ پی بردند که اثرات لزج می‌تواند اهمیت بسیاری به خصوص در جریان‌های با تداخل شوک با لایه مرزی داشته باشد. همچنین بسیاری پدیده‌های کلیدی مانند جریان لقی سر پره تنها می‌تواند با مدل‌های ویسکوز شبیه‌سازی شود. دو رویکرد برای مدل کردن ویسکوزیته معرفی می‌گردد: روش تداخل جریان لزج و غیرلزج و همچنین میانگین‌گیری رینولدز از معادلات ناویر-استوکس (RANS) با مدل توربولانسی مناسب برای جریان‌های دوبعدی و سه‌بعدی. مدل‌های RANS رایج ترین مدل مورد استفاده در کنار مدل‌های گذرا و آشفتگی هستند. پس از تمام پیشرفت‌های محاسباتی حاصل شده در CFD که به آن‌ها اشاره شد، اکنون انتخاب مدل توربولانسی ویژگی کلیدی در کیفیت شبیه‌سازی می‌باشد.

رایج‌ترین مدل توربولانسی که در حوزه توربوماشین استفاده می‌شود بلدوین-لومکس و است که مدل دوم پیچیده‌تر است اما نتایج بهتری دارد.

نحوه کارکرد یک نرم‌افزار حل عددی معادلات جریان سیال

کدهای CFD بر پایه الگوریتم‌های عددی تهیه می‌شوند که می‌توانند برای حل مسائل جریان‌های سیال به کار گرفته شوند و تمامی آن‌ها شامل سه مرحله اصلی می‌باشند:



تصویر ۴. نمایی از پره‌ها در مرحله‌ی تولید دامنه‌ی حل در محیط Design Modeler

۱. پیش پردازنده

پیش‌پردازنده شامل ورود یک مسئله جریان به کمک یک برنامه CFD و آماده‌سازی آن در یک شکل مناسب برای استفاده در یک حلگر است.

فعالیت‌هایی که در مرحله پیش پردازنده انجام می‌گیرد شامل موارد زیر می‌باشد:

- تعیین هندسه ناحیه مورد بررسی: حوزه حل
- تولید مش: تقسیم‌بندی دامنه محاسباتی به تعداد نواحی کوچکتر
- انتخاب پدیده فیزیکی و شیمیایی که نیاز به مدل کردن آن است
- تعیین خواص سیال
- مشخص کردن شرایط مرزی لازم در سلول‌هایی که در مرز حوزه حل قرار دارند
- اعمال پارامترهای کنترل حل عددی

۲. حلگر

هر بسته نرم افزاری CFD دارای یک برنامه است که معادلات عددی را برای مسائل تحت بررسی حل می کند. این برنامه باید تمام اطلاعات مناسب را که به‌وسیله پیش پردازنده تعریف شده است دریافت کند. برای انتقال اطلاعات بین برنامه‌ها، پیش پردازنده فایل‌های اطلاعاتی را تولید می کند که برنامه حلگر قادر است آن‌ها را بخواند. روش‌های عددی که پایه حلگر را شکل می‌دهند، شامل مراحل زیر هستند:

- تقریب متغیرهای ناشناخته جریان به وسیله توابع ساده
- جداسازی متغیرها به وسیله جانشینی تقریب‌ها در معادلات جریان سیال
- حل معادلات جبری

به طور کلی سه روش مختلف برای حل عددی مسائل سیالاتی وجود دارد:

- اختلاف محدود
- المان محدود
- روش‌های طیفی

۳. پس پردازنده

برنامه پس‌پردازنده برای نشان دادن نتایج حاصل از حل به کار می‌رود. عکس‌های معمول به دست آمده با پس‌پردازنده می‌توانند شامل یک بخش شبکه همراه با نمودارهای برداری میدان سرعت یا نمودارهای کانتوری متغیرهای اسکالر مانند فشار باشند. برخی از توانایی‌های گرافیکی پس پردازنده نرم افزارهای تجاری CFD به شرح زیر است:

- نمایش هندسه و مش حوزه حل
- نمودارهای برداری
- نمودارهای کانتوری خطی و سایه روشن
- نمودارهای سطحی دو بعدی و سه بعدی
- ردیابی ذرات
- انیمیشن
- فیزیک جریان در گذر از پره‌های توربوماشین‌ها

برای جلوگیری از سایش بین روتور و محفظه اطراف آن در توربوماشین‌ها باید یک فاصله کوچک بین آن‌ها در نظر گرفت. به خاطر اختلاف فشار بین دو سطح یک پره، در این فاصله کوچک یک جریان نشتی از سمت سطح فشار به سمت مکش ایجاد می‌شود که به صورت یک گردابه نشتی در نوک پره است. در طبقه‌های آخر کمپرسور به منظور رسیدن به سطح فشار کل دلخواه و هدایت درست جریان، سطح مقطع آن کمتر می‌شود و نسبت ریشه به نوک پره‌ها بیشتر می‌شود. بنابراین درصد نشتی نوک در ارتفاع پره بیشتر شده که می‌تواند حاشیه واماندگی، نسبت فشار و بازده را تحت تأثیر قرار دهد. در حالت کلی

برای جلوگیری از سایش بین روتور و محفظه اطراف آن در توربوماشین‌ها باید یک فاصله کوچک بین آن‌ها درنظر گرفت. به خاطر اختلاف فشار بین دو سطح یک پره، در این فاصله کوچک یک جریان نشتی از سمت سطح فشار به سمت مکش ایجاد می‌شود که به صورت یک گردابه نشتی در نوک پره است

1 $$\partial\rho/\partial t+\nabla.(\rho\vec{v}_r)=0$$

2 $$\partial(\rho\vec{v}_r)/\partial t+\nabla.(\rho\vec{v}_r\,\vec{v}_r)+\rho(۲\vec{\omega}\times\vec{v}_r+\vec{\omega}\times\vec{\omega}\times\vec{r}+\vec{\alpha}\times\vec{r}+\vec{a})=-\nabla p+\nabla.\bar{\bar{\tau}}_r+\vec{F}$$

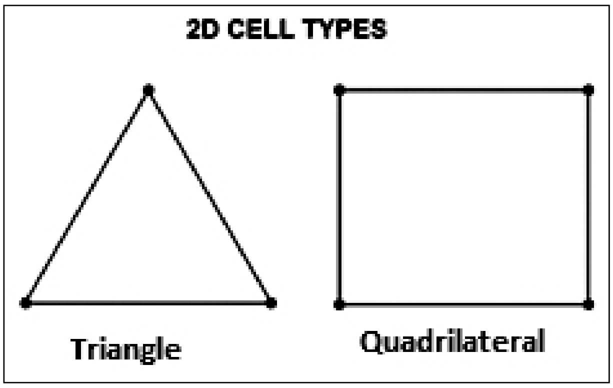
3 $$\partial(\rho E_r)/\partial t+\nabla.(\rho\vec{v}_r\,H_r)=\nabla.(k\nabla T+\bar{\bar{\tau}}_r.\vec{v}_r)+S_h$$

4 $$E_r=h-\frac{p}{\rho}+\frac{۱}{۲}(v_r^۲-u_r^۲)\quad,\quad H_r=E_r+\frac{p}{\rho}\quad,$$

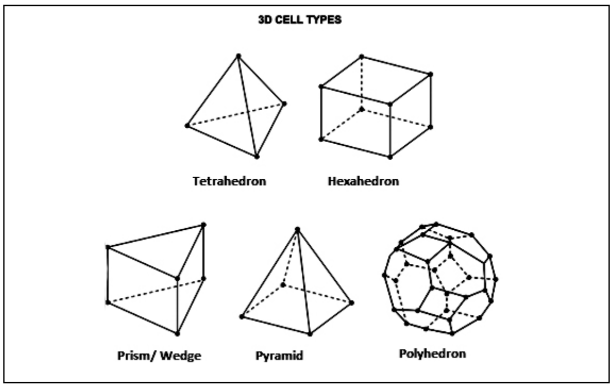
5 $$d=y^+\upsilon/u_\tau$$

جدول ۱. تعداد تقریبی سلول‌های مناسب برای شبیه‌سازی میدان جریان اطراف یک پره سه‌بعدی یا مقطع پره

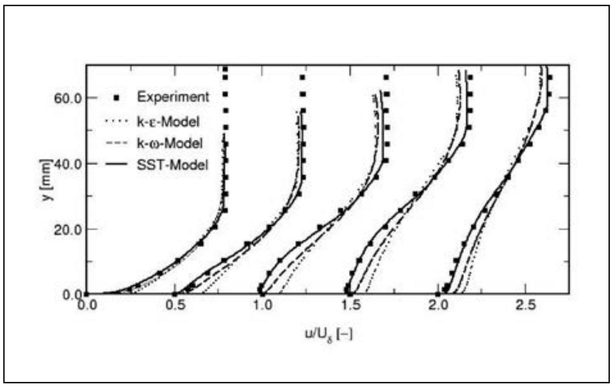
نوع مسأله تعداد ابعاد	غیرلزج	آشفته با استفاده از توابع دیوار		آشفته با مدل‌های رینولدز پایین
دوبعدی	۳۰۰۰	۲۰۰۰۰		۵۰۰۰۰
سه‌بعدی	۴۰۰۰۰	برای بدست آوردن پارامترهای طراحی	۱۰۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰۰
		جهت آشکارسازی جریان‌های ثانویه	۴۰۰۰۰۰	



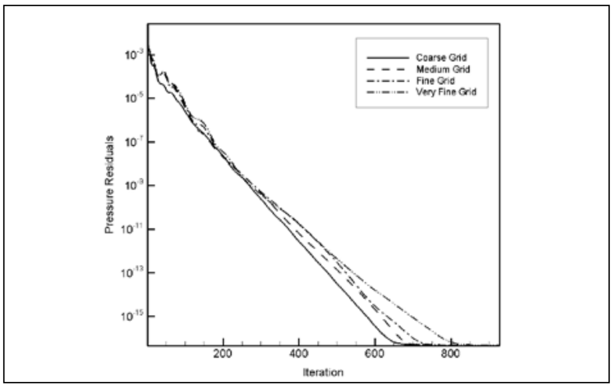
تصویر ۵. انواع شبکه بندی دوبعدی



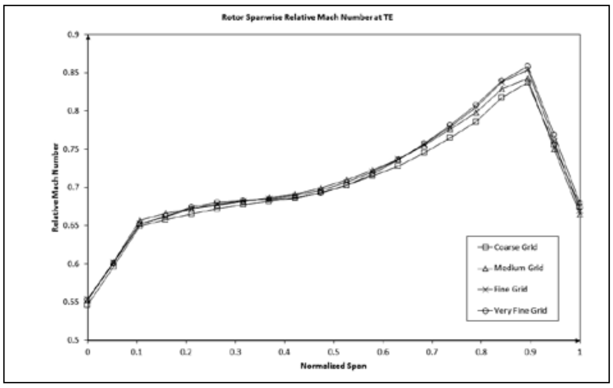
تصویر ۶. انواع شبکه بندی سه‌بعدی



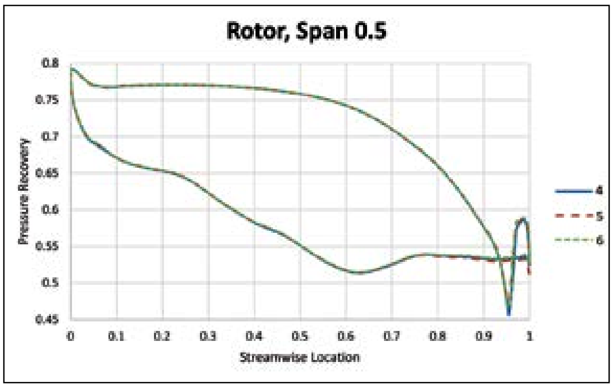
تصویر ۷. پروفیل‌های سرعت برای جریان در یک پخش‌کن تقارن محوری با مدل‌های مختلف آشفتگی



تصویر ۸. مقایسه همگرایی در شبکه‌های مختلف طبقه کمپرسور



تصویر ۹. پروفیل تغییرات عدد ماخ نسبی در راستای پره کمپرسور



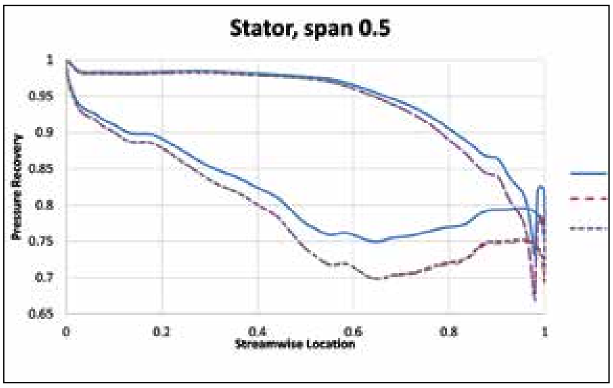
تصویر ۱۰. توزیع فشار حول استاتور توربین در مقطع میانی

یک درصد افزایش در نسبت نشتی نوک پره، یک تا دو درصد کاهش در بازده و دو تا چهار درصد کاهش نسبت فشار و سه تا شش درصد کاهش حاشیه واماندگی را به دنبال خواهد داشت. در جریان عبوری از ردیف پره‌ها، جریان‌های ثانویه از مهمترین عوامل کاهش بازده هستند. این جریان‌ها تحت تأثیر لایه مرزی توپی داخلی یا پوسته خارجی ایجاد می‌شوند. در شکل ۲ جریان عبوری از بین پره‌ها براساس مشاهدات تجربی به صورت شماتیک نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد لایه مرزی ورودی با نزدیک شدن به دیواره انتهایی از سطح جدا شده و یک گردابه نعل اسبی را شکل می‌دهد. وجود گردابه‌های نعل اسبی در جریان باعث کاهش بازده توربین می‌شود. اثر مخرب گردابه‌های نعل اسبی روی جریان بسیار مهم است. برای کاهش این تأثیر مخرب و افزایش بازده توربین، شکل محل اتصال ریشه پره را در لبه حمله تغییر می‌دهند و پره را به صورت شیب‌دار به محل توپی متصل می‌کنند. در نتیجه استفاده از نبشی در لبه حمله باعث کاهش تولید گردابه نعل اسبی و کوچکتر شدن آن می‌شود و در نتیجه اثرات آن کمتر می‌شود.

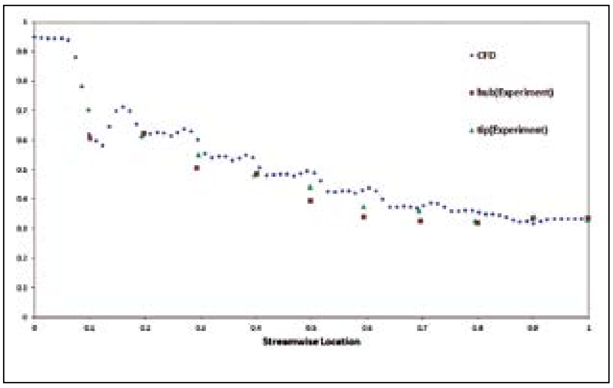
شبیه‌سازی جریان در توربوماشین‌های محوری به سبب فیزیک پیچیده نیازمند تمهیدات خاصی برای رسیدن به همگرایی می‌باشد، در این میان فرمول‌بندی جریان آشفته مسأله چالش برانگیزی است. تفاوت اصلی در مدل‌های مختلف بیشتر در محدوده دیواره انتهایی متمرکز شده است که تأثیر بسزایی را در محاسبه عملکرد توربوماشین خواهد داشت.

فرمول‌بندی مسائل توربوماشینی و معادلات حاکم

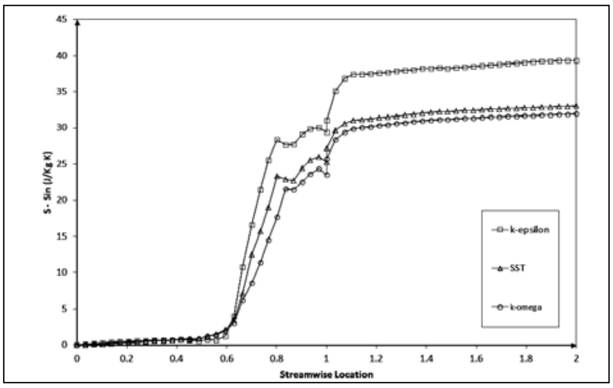
زمانی که معادلات حرکت سیال در دستگاه مختصات متحرک حل می‌شود، شتاب حرکت سیال به واسطه جملات اضافی موجود در معادلات مومنتوم افزایش می‌یابد. اگر از سرعت نسبی به عنوان متغیر مستقل استفاده کنیم، فرمول‌بندی معادلات حاکم به فرم زیر خواهد بود که در این روابط، $\vec{V}_r$ سرعت نسبی (سرعتی که از دستگاه متحرک مشاهده می‌شود) است. علاوه بر این $a = d\vec{V}_t/dt$ و $\alpha = d\vec{\omega}/dt$ است که $\vec{V}_t$ و $\vec{\omega}$ همانند شکل ۳ به ترتیب سرعت چرخش



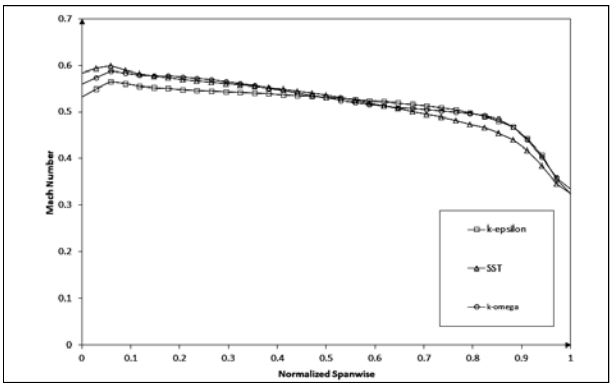
تصویر ۱۱. توزیع فشار حول روتور توربین در مقطع میانی



تصویر ۱۲.مقایسه فشار استاتیک در CFD و نتایج تجربی



تصویر ۱۳. پروفیل افزایش آنتروپی در مدل‌های مختلف آشفتگی



تصویر ۱۴. پروفیل تغییرات شعاعی عدد ماخ در لبه فرار استاتور

میدان و سرعت حرکت آن می‌باشند. در این حالت معادلات مومنتوم شامل چهار جمله اضافی برای شتاب است که جملات اول و دوم مربوط به شتاب کوریولیس و مرکزگرا است و جملات سوم و چهارم به‌واسطه تغییر سرعت دستگاه مختصات متحرک ایجاد می‌شود. ترم‌های لزج در این معادلات همانند معادلات دستگاه ساکن است، با این تفاوت که در آن مشتقات سرعت‌های نسبی مورد استفاده قرار می‌گیرد. معادلات انرژی داخلی و آنتالپی کل نیز که در دستگاه مختصات متحرک نوشته شده‌اند به نام معادله روتالپی نامیده می‌شوند که متغیرهای آن به صورت فرمول های ارائه شده تعریف می‌شود.

تولید هندسه

جهت مدل‌سازی پره در نرم افزار Ansys Workbench دو روش وجود دارد. مدل‌سازی در محیط Bladegen که عموما برای طراحی پره از آن استفاده می‌شود و مدل‌سازی پره در محیط Design Modeler است که دارای دقت بالاتری نسبت به حالت اول است. تفاوت این دو روش در این است که در حالت اول می‌توان یک پره را از مراحل اولیه طراحی کرد و یا اینکه اطلاعات هندسی پره را از نرم‌افزارهای دیگر وارد کرده و آن را برای استفاده در نرم‌افزارهای مدلسازی آماده کرد اما در حالت دوم از هندسه تولید شده در نرم افزارهای طراحی سه بعدی مانند CATIA استفاده شده و دامنه حل توسط کاربر مشخص می‌شود.

شکل ۴ نمایی از پره‌ها را در مرحله تولید دامنه حل در محیط Design Modeler نشان می‌دهد. در این محیط ورودی و خروجی جریان، ریشه و نوک هر پره و همچنین مرزهای پریودیک مشخص می‌گردد. با مشخص کردن تعداد پره‌ها در هر ردیف و مسیر جریان، محدوده حل برای هر پره به‌خوبی مشخص می‌شود. هندسه مدل شده شامل یک استاتور و یک روتور از هر طبقه است.

تولید شبکه

از آنجا که حل عددی، حل دقیقی از معادلات حاکم بر مسئله (مانند معادله بقای جرم، ممنتوم) نبوده و از گسسته‌سازی این معادلات به دست می‌آید، از این‌رو باید خطاهایی که در حل عددی وجود دارد تا حد امکان کوچک شوند تا جواب به‌دست آمده به جواب واقعی نزدیک شود. یکی از عوامل مهم در افزایش دقت جواب‌ها تولید شبکه با کیفیت می‌باشد.

در توربوماشین‌ها معمولا از انواع شبکه‌های شش‌وجهی با کیفیت جهت تولید شبکه در مسیر جریان استفاده می‌شود. در هندسه‌های پیچیده که امکان ایجاد شبکه باسازمان شش‌وجهی وجود ندارد از شبکه بی‌سازمان چهاروجهی استفاده می‌شود. انواع شبکه‌بندی در شکل ۵ و شکل ۶ نشان داده شده است. شبکه‌های مثلثی و چهارضلعی در مدل‌های دوبعدی و شبکه‌های چهاروجهی، شش وجهی،

از آنجا که حل عددی حل دقیقی از معادلات حاکم بر مسئله (مانند معادله بقای جرم، ممنتوم) نبوده و از گسسته‌سازی این معادلات به دست می‌آید، از این‌رو باید خطاهایی که در حل عددی وجود دارد تا حد امکان کوچک شوند تا جواب به‌دست آمده به جواب واقعی نزدیک شود

منشوری (گوه‌ای)، هرمی و چندوجهی در مدل‌های سه‌بعدی استفاده می‌شود.

در طول شبکه شش‌وجهی ایجاد شده، تشکیل یک شبکه لایه‌مرزی نیز لازم است تا بتوان مقدار مورد نیاز در نزدیکی دیوار برای شبیه‌سازی آشفتگی را تامین کرد. در برخی موارد بهتر است از یک شبکه ترکیبی استفاده کرد. یعنی برای بخشی از میدان شبکه با سازمان و برای بخشی دیگر از شبکه بی‌سازمان استفاده کرد.

تعریف یک اندازه شبکه برای حل جریان، با توجه به ارتباط نزدیک آن به هدف شبیه‌سازی امکان‌پذیر نیست. با این وجود در جدول یک تعداد تقریبی مناسب برای تعداد سلول‌های مورد نیاز در حالت‌های مختلف جهت شبیه‌سازی جریان در اطراف یک پره به صورت خلاصه آورده شده است.

موردی که در شبیه‌سازی جریان آشفته باید به آن توجه کرد تولید شبکه لایه‌مرزی است. در استفاده از مدل‌های توابع دیوار در جریان آشفته، مقدار برای اولین ردیف سلول‌ها باید عددی مابین ۳۰ تا ۳۰۰ باشد زیرا توابع دیوار در زیرلایه لزج معتبر نخواهند بود. به طور کلی شبکه لایه مرزی باید طوری باشد که از قرار گرفتن اولین ردیف سلول کنار دیوار در محدوده لایه هم‌پوشانی خودداری شود. البته این مرزها یک مرز دقیق نیستند و در مراجع مختلف این محدوده‌ها کمی متفاوت هستند.

در مقابل در حالت‌های رینولدز پایین باید مقدار بیشینه تا حد امکان کوچک (در حدود یک) باشد. برای ردیف‌های بعدی سلول‌ها در نزدیکی دیوار می‌توان از یک ضریب رشد ۱/۲۵ برای شبکه‌های رینولدز پایین استفاده کرد که در این‌صورت چیزی حدود ۴۰ سلول در لایه‌مرزی قرار می گیرد.

درحالی که برای شبکه‌های مورد استفاده در مدل‌های توابع دیوار حدود بیشتر از ۱۰ سلول مورد نیاز نیست. برای تخمین اینکه اولین ردیف شبکه تا دیوار چقدر فاصله داشته باشد تا مقدار مورد نظر به‌دست آید می‌توان از روابط تخمینی موجود استفاده کرد. برای محاسبه فاصله اولین ردیف سلول‌ها تا دیوار با استفاده از تعریف می‌توان نوشت:

در رابطه فوق است که در آن مقدار می‌تواند براساس عدد رینولدز و از طریق روابط مهندسی

جدول ۲. مقایسه پارامترهای بدست آمده طبقه کمپرسور با نتایج آزمایشگاهی

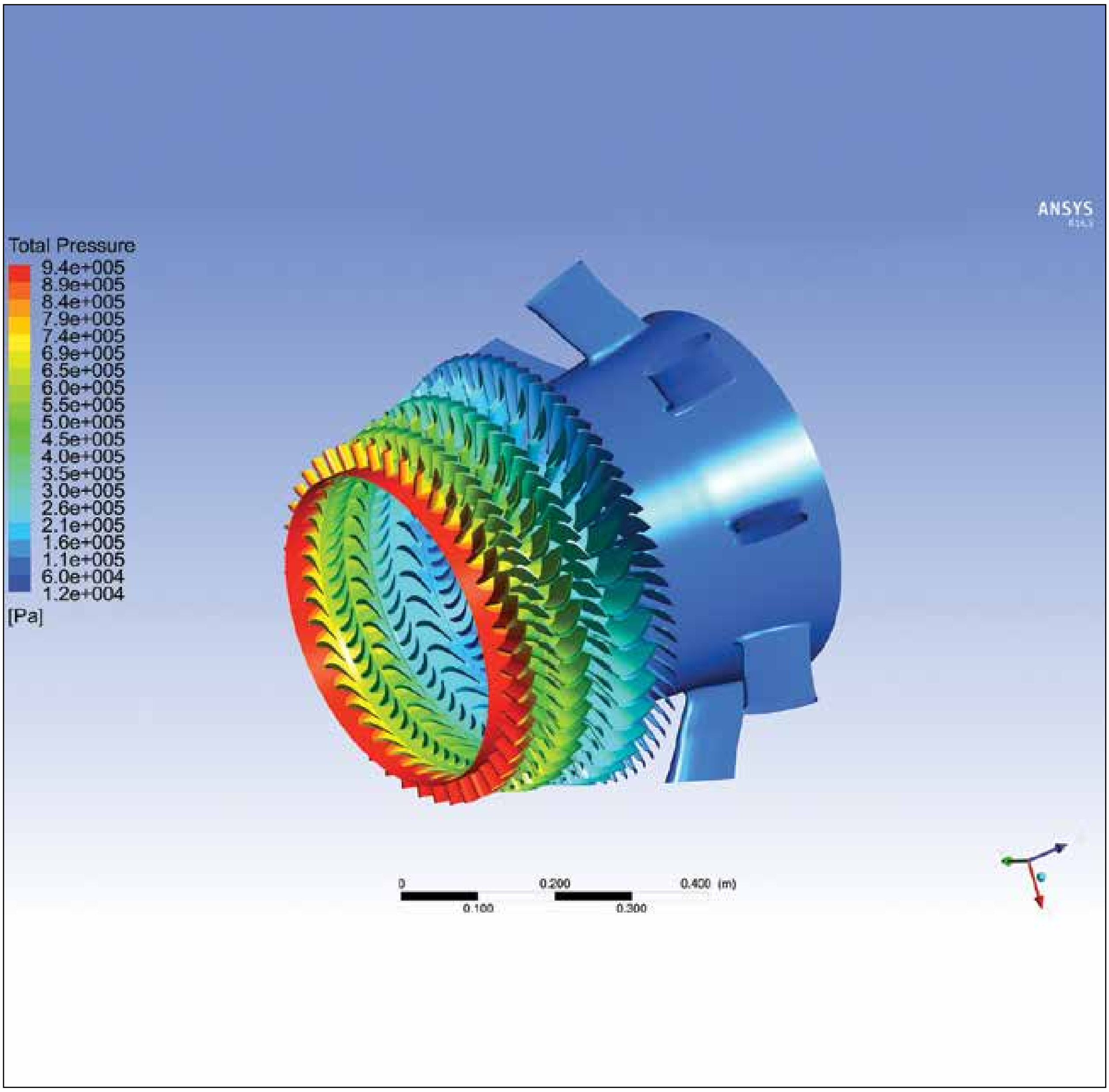
پارامتر	شبکه درشت	شبکه متوسط	شبکه ریز	شبکه خیلی ریز	نتایج تجربی	خطا نسبت به شبکه ریز
تعداد سلول	۵۶۴۰۰	۹۹۲۰۰	۱۷۳۴۰۰	۲۹۱۰۰۰	--	--
شار جرمی	۲۰/۶۰	۲۰/۶۵	۲۰/۷۱	۲۰/۷۵	۲۰/۷۰	۰/۰۵
نسبت فشار کل	۱/۹۹	۱/۹۹	۲/۰۰	۲/۰۰	۲/۰۰	۰/۰
نسبت دمای کل	۱/۲۶	۱/۲۶	۱/۲۶	۱/۲۶	۱/۲۶	۰/۰
بازده آیزنتروپیک	۸۳/۸	۸۴/۶	۸۴/۸	۸۴/۹	۸۴/۰۰	۱/۰۰

جدول ۳. شبکه‌های مورد استفاده در مدلسازی طبقه توربین

مؤلفه	استاتور		
شبکه	درشت (۱)	متوسط (۲)	ریز (۳)
تعداد سلول	۱۰۰۰۰۰	۱۷۰۰۰۰	۲۴۰۰۰۰
مؤلفه	روتور		
شبکه	درشت (۴)	متوسط (۵)	ریز (۶)
تعداد سلول	۱۹۸۰۰۰	۲۲۸۰۰۰	۳۴۰۰۰۰

جدول ۴. مقایسه مدل‌های مختلف آشفتگی در پیش‌بینی پارامترهای کلی طبقه کمپرسور

مدل	شار جرمی	بازده آیزنتروپیک	نسبت فشار کل
k-epsilon	۲۰/۲۹	۸۱/۷	۱/۹۹
k-omega	۲۰/۷۱	۸۴/۸	۲/۰۰
SST	۲۰/۴۳	۸۴/۳	۲/۰۰



محاسبه شود.
محاسبات موفق در جریان‌های آشفته نیاز به توجه به شبکه تولید شـــده دارد. از این‌رو که آشفتگی یک نقش غالـــب را در انتقال مومنتوم میانگین و دیگر پارامترها بازی می‌کند باید مطمئن شد که کمیت‌های آشـــفتگی در جریان‌های پیچیده به دقت کافی آشکارسازی شوند. به خاطر اندرکنش جریان میانگین و آشـــفتگی، نتایج عددی برای جریان‌های آشفته تمایل بیشتری برای وابستگی به شبکه نسبت به جریان آرام دارند.

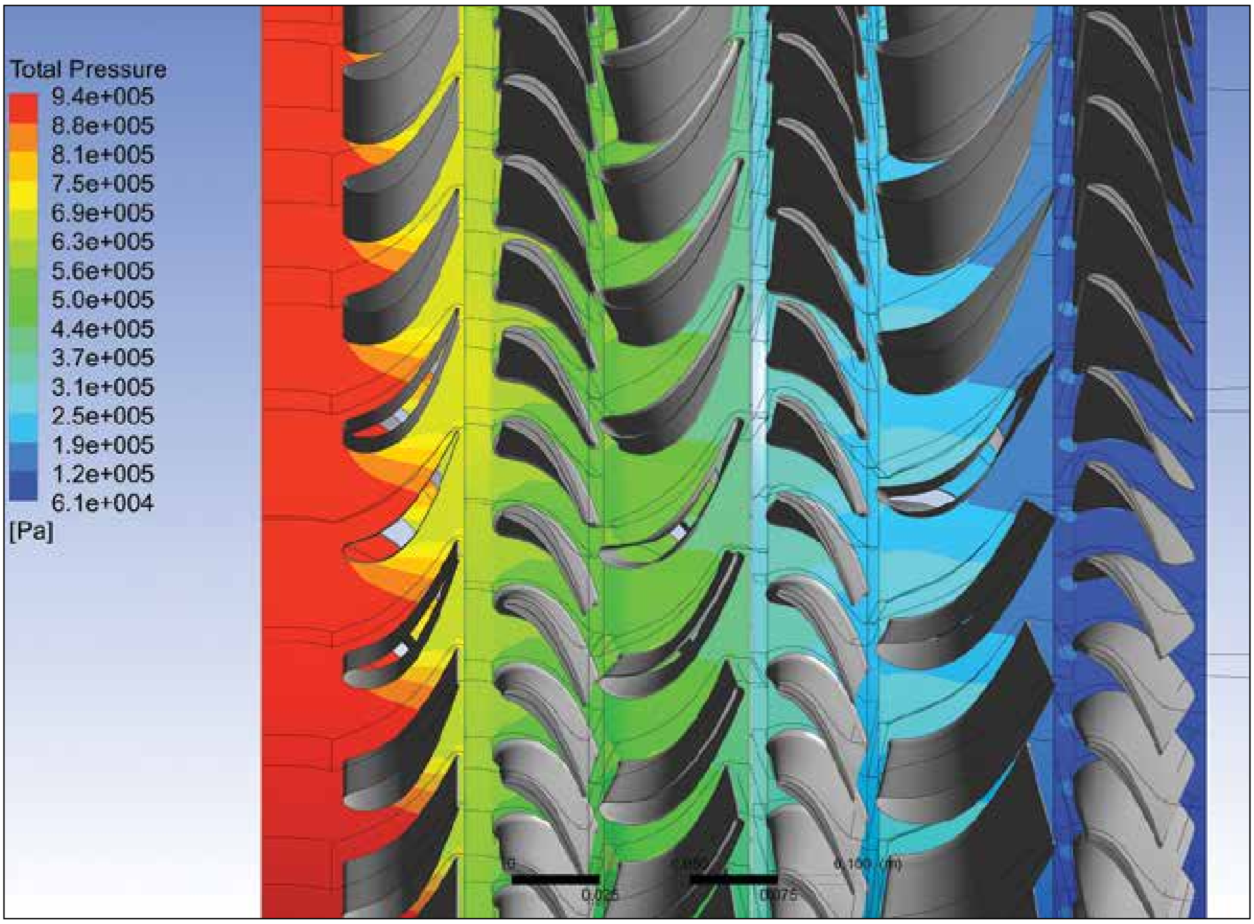
مدل‌های آشفتگی

در اغلب شبیه‌ســـازی‌های توربوماشینی بستن معادلات آشـــفتگی با مدل ادی- ویســـکوزیته انجام می‌شـــود. یکی از مزیت‌هـــای آن هزینه محاسباتی متوسط در اجرای مدل است. علاوه بر آن مدل‌های ادی- ویسکوزیته از نظر عددی در شرایط مختلف ورودی بسیار مقاوم هستند. در شکل ۷ مقایسه‌ای بین پروفیل سرعت در آزمایش یک پخش کن تقارن محوری با مدل‌های مختلف آشفتگی آورده شده است.

همان‌طور که مشـــاهده می‌شود سه مدل نتایج متفاوتی را در پیش‌بینی جدایش ارائه می‌دهند اما مدل SST پاسخ دقیق‌تری را برای میدان سرعت در گرادیان فشار اعمال شـــده در دیفیوزر تولید می‌کند. نکته مهم در مدل‌سازی آشفتگی نقاط نزدیک دیوار است.

به طور کلی دو روش برای مـــدل کردن نواحی نزدیک دیوار وجود دارد. در روش اول ناحیه تحت اثر لزجت به کمک یک سری از فرمول‌های نیمه تجربی، که به آن توابع دیـــوار می‌گویند، به لایه کاملا آشفته مربوط می‌شود. اســـتفاده از توابع دیوار نیـــاز به اصلاح مدل‌های آشـــفتگی را رفع می‌کند.

در اغلب شبیه‌سازی‌های توربوماشینی بستن معادلات آشفتگی با مدل ادی- ویسکوزیته انجام می‌شود. یکی از مزیت‌های آن هزینه محاسباتی متوسط در اجرای مدل است



در معادلات دیفرانسیل، مسائل مقدار مرزی معادله دیفرانسیلی با یک سری قیود است که به آنها شرایط مرزی گفته می‌شود. یک حل برای مسائل مقدار مرزی، یک حل برای معادله دیفرانسیلی است که شرایط مرزی را نیز ارضا می‌کند

در روش دوم با حل جریان تا لبه دیوار، مدل‌های آشفتگی طوری اصلاح می‌شوند که بتوانند ناحیه‌های تحت اثر لزج را شبیه‌سازی کنند، که مدل‌های نزدیک دیوار نامیده می‌شوند. برای شبیه‌سازی‌های لازم در نزدیکی نقاط طراحی معمولا استفاده از یک مدل تابع دیوار که گرادیان فشار در جهت جریان را ارضا می‌کند، کافی به نظر می‌رسد.

البته برای شبیه‌سازی‌های خارج از نقطه طراحی یا شبیه‌سازی‌هایی که شامل جریان‌های ثانویه پیچیده یا جدایش‌های بزرگ می‌شود اغلب لازم است تا از یک مدل رینولدز پایین استفاده شود. علاوه بر این موارد، در مدل‌های دومعادله‌ای آشفتگی، دو مقدار متفاوت نیز در ورودی می‌بایست مشخص شود. یکی از معمول‌ترین راه‌ها مشخص کردن سطح آشفتگی و طول مشخصه در ورودی است.

بهترین روش، استفاده از تخمین‌هایی بر پایه تجربیات مشابه است. برخی اوقات مناسب‌تر است تا به جای مشخص کردن طول مقیاس ورودی از نسبت لزجت ادی‌ها استفاده کنیم. در توربوماشین‌ها این نسبت از حدود ۱۰ در اجزای با شدت آشفتگی پایین نظیر فن‌ها تا حتی ۱۰۰۰ در موارد با شدت آشفتگی بسیار بالا نظیر توربین‌های پرفشار تغییر می‌کند.

شرایط مرزی

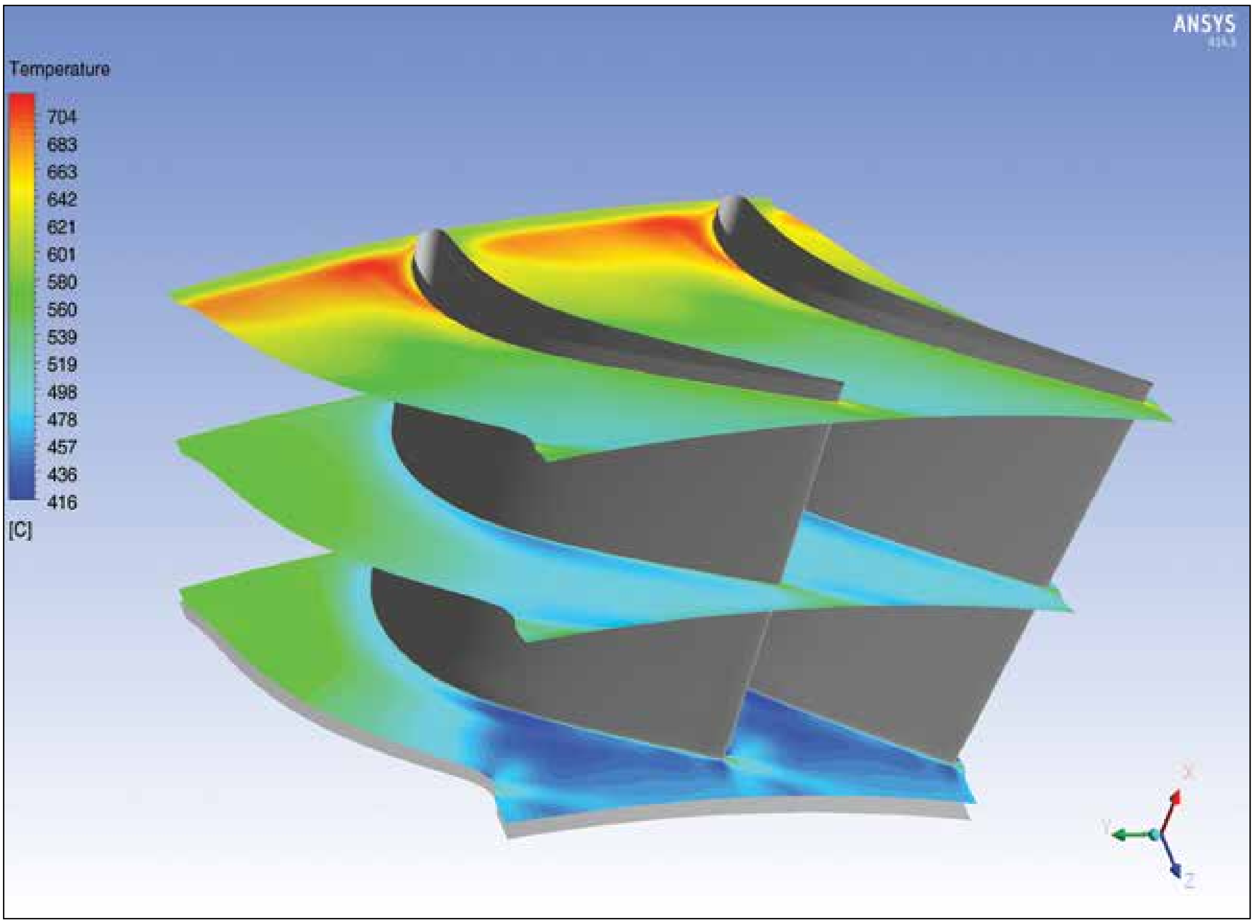
در معادلات دیفرانسیل، مسائل مقدار مرزی معادله دیفرانسیلی با یک سری قیود است که به آنها شرایط مرزی گفته می‌شود. یک حل برای مسائل مقدار مرزی، یک حل برای معادله دیفرانسیلی است که شرایط مرزی را نیز ارضا می‌کند. تمام مسائل CFD با مقدار اولیه و شرایط مرزی تعریف می‌ شوند. شرایط مرزی متغیرهای جریان و دمایی را روی مرزهای مدل فیزیکی معین می‌کند.

بنابراین شرایط مرزی اجزای بحرانی شبیه‌سازی هستند و مهم است که کاربر آن‌ها را با دقت انتخاب کند و نقش آن‌ها را در الگوریتم حل عددی بداند. در مسائل مختلف نوع شرط مرزی و قیدهایی که برای حل مسئله در نظر گرفته می‌شود متفاوت است.

به عنوان مثال در مسئله شبیه‌سازی کمپرسور شرایط مرزی در نظر گرفته شده فشار و دمای سکون ورودی و فشار استاتیک خروجی است.

در این مطالعه به دلیل نبودن اطلاعات دقیق از شرایط خروجی کمپرسور مانند سرعت و دبی جرمی از شرط فشار استاتیک در خروج استفاده شده است.

هر نقطه از منحنی عملکرد مربوط به یک نقطه کاری از کمپرسور است و فشار خروجی نیز در آن



نقطه کاری متفاوت است. بنابراین در هر بار اجرای مسئله و با قرار دادن یک فشار استاتیک خروجی فرضی یک نقطه از منحنی عملکرد کمپرسور (در یک دور ثابت) به دست می‌آید. می‌توان در مسئله شبیه‌سازی توربین از شرایط مرزی دبی جرمی و فشار کل در ورود و فشار استاتیک در خروج استفاده نمود.

نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی‌ها

برای حصول اطمینان از استقلال نتایج شبیه‌سازی‌ها از شبکه محاسباتی، نتایج در شبکه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در جدول ۲ مقایسه نتایج طبقه کمپرسور مورد نظر در شبکه‌های مختلف با نتایج تجربی آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج شبیه‌سازی تطابق خوبی را با نتایج تست تجربی نشان می‌دهد.

در جدول ۳ نیز شبکه‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی طبقه توربین بیان شده است. در شکل ۸ مقایسه روند همگرایی برای شبکه‌های مختلف در شبیه‌سازی کمپرسور آورده شده است. در شکل ۹ مقایسه پروفیل عدد ماخ نسبی در راستای طول پره در لبه فرار روتور نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در شبکه‌های ریز و بسیار ریز نتایج اختلافی ندارند. البته اختلاف نتایج در نقاط نزدیک به نوک پره بیشتر دیده می‌شود.

تعداد سلول‌های شبکه ریز با آنچه در جدول ۱ بیان شده است نزدیک است. در شکل ۱۰ و شکل ۱۱ توزیع فشار در سطح استاتور و روتور آمده است. برای استاتور شبکه متوسط و ریز نتایج یکسانی داشته‌اند که نشان می‌دهد تفکیک میدان با این تعداد سلول کافی است، اما در روتور نتایج در همه حالات یکسان بوده است که نشان می‌دهد تعداد سلول‌های گرفته شده در شبکه درشت نیز مناسب می‌باشد. در شکل ۱۲ توزیع فشار استاتیک بی‌بعد شده که از روش CFD به دست آمده با نتایج تجربی موجود مقایسه شده است.

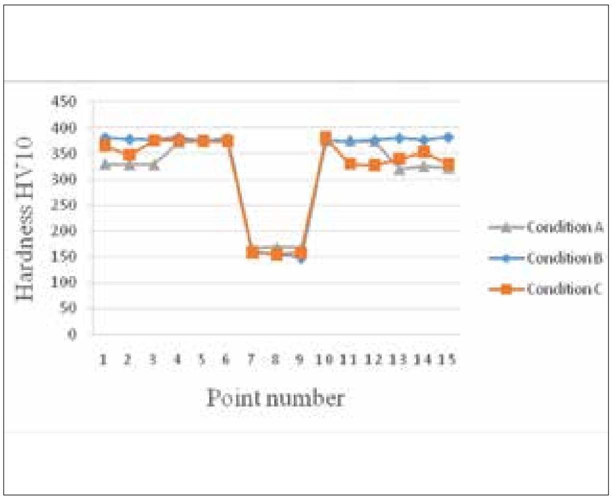
پس از این بررسی، در ادامه مقایسه مدل‌های آشفتگی دومعادله‌ای k-ω، k-ε و SST در پیش‌بینی پارامترهای طبقه کمپرسور بررسی شده است. در شکل ۱۳ افزایش آنتروپی پیش‌بینی شده توسط مدل‌های مختلف آشفتگی آورده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج مدل‌های k-ω و SST به یکدیگر نزدیک است، در حالی که مدل k-ε اختلاف زیادی را نسبت به نتایج این دو مدل نشان می‌دهد. هم‌چنین در شکل ۱۴ تغییرات عدد ماخ در راستای پره در لبه فرار استاتور نشان داده شده است.

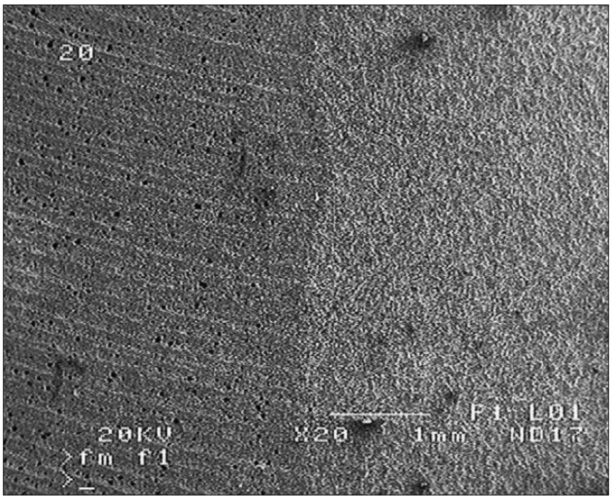
همان‌طور که دیده می‌شود مدل‌های k-ω و SST در نواحی نزدیک ریشه پره که سرعت کمتر است نیز نتایج نزدیکتری را داشته‌اند.

با توجه به این نتایج دیده می‌شود که در جریان‌های با کاهش سرعت و گرادیان فشار معکوس مدل k-ω و SST نسبت به مدل k-ε نتایج بهتری را خواهند داد. با توجه به قدرت بالای روش k-ω در انتگرال گیری معادلات به سمت دیوار به نظر می‌رسد این روش در پیش‌بینی پارامترهای جریان‌های داخلی و محصور نتایج بهتری را ارائه می‌دهد. روش SST نیز دارای ساختار کلی شبیه k-ω است که تصحیحاتی روی آن انجام شده است. این کار با استفاده از به کارگیری یک تابع آمیختگی برای استفاده از قابلیت‌های مدل k-ε در نواحی دور از دیوار، انجام تغییراتی در تعریف ویسکوزیته آشفته و بهبود ثوابت مورد استفاده در مدل صورت گرفته است. به همین علت به نظر می‌رسد نتایج به نسبت بهتری را به‌دست آورد.

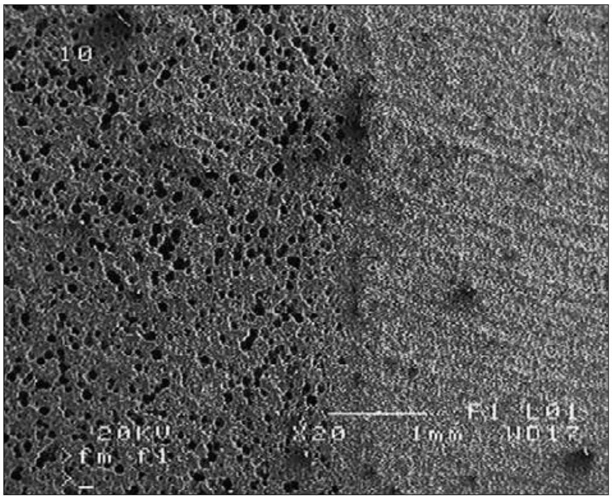
اما به همان نسبت زمان همگرایی جواب را نیز افزایش خواهد داد. البته در توربوماشین‌ها اثرات مربوط به دوران سیستم و انحنای خطوط جریان نیز وجود دارد که تنها معادلات انتقال تنش رینولدز به صورت خودکار می‌توانند این اثرات را در نظر بگیرند.



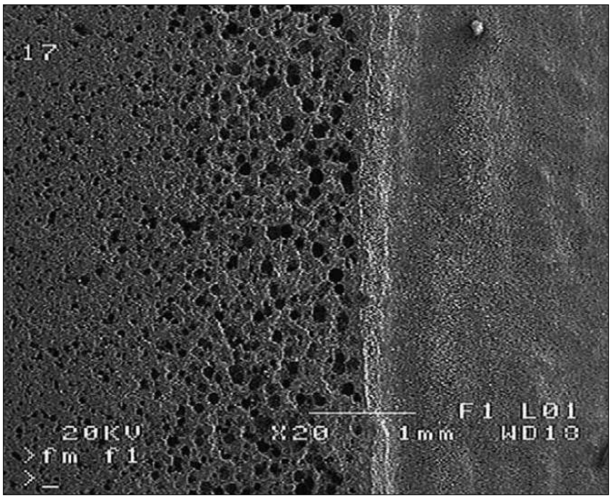
تصویر ۱. نتایج سختی سنجی نمونه‌ها



تصویر ۲.تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)
منطقه جوش نمونه عملیات شده در حالت C



تصویر ۳.تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)
منطقه جوش نمونه عملیات شده در حالت B



تصویر ۴. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)
منطقه جوش نمونه عملیات شده در حالت A

جوش‌پذیری فولاد زنگ‌نزن 17-4PH در ساخت پروانه کمپرسور گریز از مرکز

مرتضی گرجی[1]

نوسازی، تعمیر و نگهداری قطعات متحرک کمپرسور گریز از مرکز در صنایع پتروشیمی و شیمیایی یکی از پیچیده‌ترین مراحل تولید از لحاظ فنی و ساختی بوده که نیازمند هزینه‌های قابل توجهی است. پروانه کمپرسور گریز از مرکز از لحاظ تکنولوژی ساخت، تلرانس ابعادی و شرایط کاری یکی از پیشرفته‌ترین اجزای کمپرسور محسوب می‌شود. امکان اتصال دهی اجزای پروانه کمپرسور گریز از مرکز به عنوان مهم‌ترین عنصر در این ماشین‌ها در نظر گرفته می‌شود. بنابراین در این مقاله جوش‌پذیری فولاد ضدزنگ 17-4PH در ساخت پروانه کمپرسور گریزازمرکز که به روش جوشکاری شیاری ساخته می‌شوند،مطرح می‌شود. بدین منظور به بررسی تأثیر نوع عملیات حرارتی پس از جوشکاری بر خواص خوردگی و کشش دمای اتاق فولاد ضدزنگ 17-4PH می‌پردازیم.

فولاد 17-4PH

فولادهای ضدزنگ رسوب سخت شده (PH)، استحکام و مقاومت به خوردگی را همزمان فراهم می‌کنند. وجود کروم بالا موجب مقاومت به خوردگی شده و استحکام آن از رسوب سختی توسط رسوب‌های بسیار کوچک میکروسکوپی که هنگام پیرسازی در دمای بالا ایجاد می‌شوند، به‌دست می‌آید. فولادهای PH براساس ساختار به سه دسته مارتنزیتی، شبه آستنیتی و آستنیتی طبقه بندی می‌شوند. فولاد ضدزنگ 17-4PH از نوع مارتنزیتی است و می‌توان طیف گسترده‌ای از خواص مکانیکی را توسط عملیات حرارتی مناسب در محدوده دمایی °621-482 از آن بدست آورد. جوشکاری فولادهای ضدزنگ PH بسیار شبیه به جوشکاری متداول فولادهای ضد زنگ آستنیتی و

[1]: مرتضی گرجی: واحد مهندسی، شرکت توربین کمپرسور آسیا

مارتنزیتی است و نیاز به کنترل فرآیند برای پایین نگه داشتن گرمای ورودی و در نتیجه رسیدن به بهترین داکتیلیتی و چقرمگی می‌باشد. بسته به خواص مورد نیاز از جوش هم می‌توان از فلز پرکننده با ترکیب مشابه زمینه استفاده کرد و هم پرکننده با استحکام پایین (نظیر 308L). جوش با ترکیب مشابه می‌تواند استحکامی در حد زمینه داشته باشد. جوش‌پذیری فولاد ضدزنگ 17-4PH با وجود شباهت آن‌ها به فولادهای ضدزنگ سری AISI 400 بسیار عالی گزارش شده است، به طوری که نیازی به پیش گرمایش برای جلوگیری از ایجاد ترک نمی‌باشد و همچنین می‌توان به روش‌های مختلفی جوشکاری کرد. فولاد ضدزنگ 17-4PH را بسته به ضخامت و سطح مقاومت قطعه، می‌توان در حالت محلول و یا فراپیر شده (پیر شده در محدوده بالای دمای پیرسازی) جوشکاری کرد. به عبارت دیگر توصیه می‌شود این نوع فولاد در حالت پیر شده در دمای پایین (سختی بالا) جوشکاری نشود. همچنین زمانی که در حالت محلول جوشکاری می‌شود، مقدار قابل محسوسی رسوب تشکیل نخواهد شد، زیرا زمان گرم شدن حین جوشکاری بسیار کم است.

روش آزمایش

باتوجه به بهره‌برداری از نتایج در تحلیل و ساخت پروانه‌های کمپرسور گریز از مرکز، نمونه‌های آزمایش مشابه با پروانه از جنس 17-4PH انتخاب شده و به روش تیگ (GTAW) جوشکاری شد. ترکیب شیمیایی فولاد 17-4PH استفاده شده در این بررسی در جدول یک آمده است. همچنین فلز پرکننده از نوع E309LMo می‌باشد که ترکیب شیمیایی آن در جدول ۲ درج شده است.

پس از جوشکاری نمونه‌ها تحت سیکل‌های متفاوتی که در جدول ۳ ذکر شده، عملیات حرارتی می‌شوند. سپس آزمون‌های متالوگرافی، کشش، ضربه، سختی سنجی ویکرز و تست خوردگی در محلول HNO3 50% در دمای ۳۸۸ کلوین و مدت ۱۴۴ ساعت روی نمونه‌ها انجام می‌شود.

جدول ۳ حالتهای مختلف عملیات حرارتی پس از جوشکاری نمونه‌ها

Condition	Heat Treatment
A	Stress Reliving 893/2h/Air cool
B	Saturating 1313 K/2h/Air cool, ageing 823 K/2h/Air cool
C	Saturating 1313 K/2h/Air cool, ageing 893 K/2h/Air cool

نتایج آزمون‌ها

نتایج خواص مکانیکی اتصال در جدول ۴ و شکل یک ارائه شده است. همانطور که نتایج نشان می‌دهند، خواص مکانیکی به شدت متأثر از نوع عملیات حرارتی پس از جوشکاری می‌باشد. با توجه به مجموعه‌ای بهینه از خواص که برای پروانه کمپرسور گریزازمرکز در نظر گرفته می‌شود و نتایج به‌دست آمده از آزمون‌ها، مناسب‌ترین عملیات حرارتی پس از جوشکاری، نوع C است.

جدول ۴ نتایج آزمون کشش

Conditions of the heat treatment	Rm(MPa)	A5(%)
A	620	8.0
B	590	8.8
C	680	8.2

بدون در نظر گرفتن نوع عملیات حرارتی، ریز ساختار تمامی نمونه‌های در ناحیه HAZ و فلز پایه می‌بایست مارتنزیت تمپر شده همراه با رسوبات باشد و در ناحیه جوش باید ساختاری فریتی-آستنیتی داشته باشد. نتایج آزمون خوردگی و بررسی متالوگرافی ناحیه اتصال پس از خوردگی در شکل‌های ۲ تا ۴ و جدول ۵ آمده است.

جدول ۵ میزان کاهش وزن ناشی از آزمون خوردگی

	Conditions of the heat treatment		
	A	B	C
Mass Decrement, mg/cm2	61	83	46

جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولاد 17-4PH استفاده شده در این بررسی

C	0.02
Mn	0.45
P	0.025
S	0.001
Si	0.16
Cr	15.50
Ni	4.50
Cu	3.22
Nb+Ti	0.20

جدول ۲ ترکیب شیمیایی سیم جوش E309LMo استفاده شده در این بررسی

C	0.02
Mn	1.3
Si	0.70
Cr	23
Ni	12.90
Mo	1.5
Ferrite content	16-24

با مشاهده تغییرات ایجاد شده ناشی از آزمون خوردگی در می‌یابیم:

خوردگی از ناحیه HAZ شروع شده و خوردگی حفره ای در این ناحیه به مراتب بیشتر از دیگر نواحی می‌باشد.

خوردگی در ناحیه فلز جوش بسیار کمتر مشاهده می‌شود.

نتایج نشان می‌دهند مقدار خوردگی (درصد حفرات) برحسب نوع عملیات حرارتی پس از جوشکاری، به‌ترتیب C، A و B افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر اعمال دوباره سیکل محلول سازی و همچنین دمای پیرسازی بر مقاومت به خوردگی مؤثرند و تأثیر دمای پیرسازی به مراتب بیشتر می‌باشد. به بیانی دیگر نمونه عملیات شده در حالت B که نسبت به حالت C فقط در دمایی پایین‌تری پیر شده دارای بیشترین میزان خوردگی است.

نتیجه‌گیری

از آنجایی که جوش پذیری فولاد ضدزنگ 17-4PH در ساخت پروانه کمپرسور گریز از مرکز بررسی می‌شود، جوشکاری این فولاد بسیار متأثر از انتخاب فلز پرکننده می‌باشد. همانطور که مشخص شد استفاده از فلز پرکننده آستنیتی برای جوشکاری باعث می‌شود جوش مقاومت به خوردگی بسیار بالایی داشته باشد. همچنین برای رسیدن به خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی مطلوب در شرایط کاری پروانه، اعمال دوباره سیکل محلول سازی و انتخاب دمای بالا برای پیر سازی مورد نیاز است.

شرکت تامین کالای توربین ماشین خاور میانه

بخش اول – مدیریت زنجیره تامین

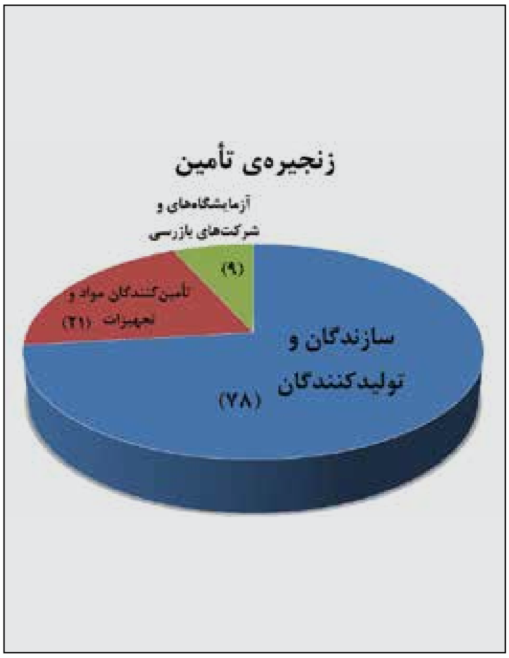
شفا حسینی نژاد[1]

۱: شفا حسینی‌نژاد: مدیر عامل، شرکت تامین کالای توربین ماشین خاور میانه

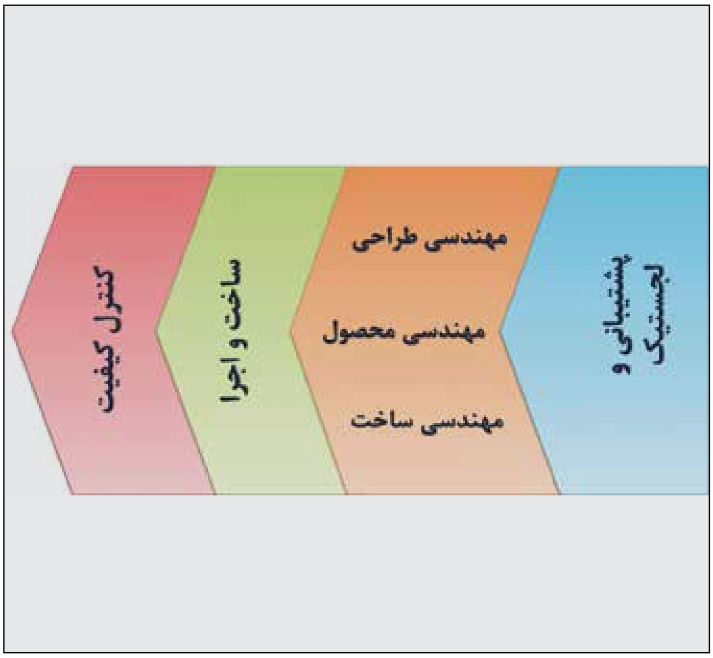
T.M.C
T.M.P

مدیریت زنجیره تأمین در شرکت تامین کالای توربین ماشین خاورمیانه

چرخه همکاری شرکت تامین کالای توربین ماشین خاورمیانه



زنجیره‌ی تامین ایجاد شده برای ساخت قطعات ماشین‌های دوار

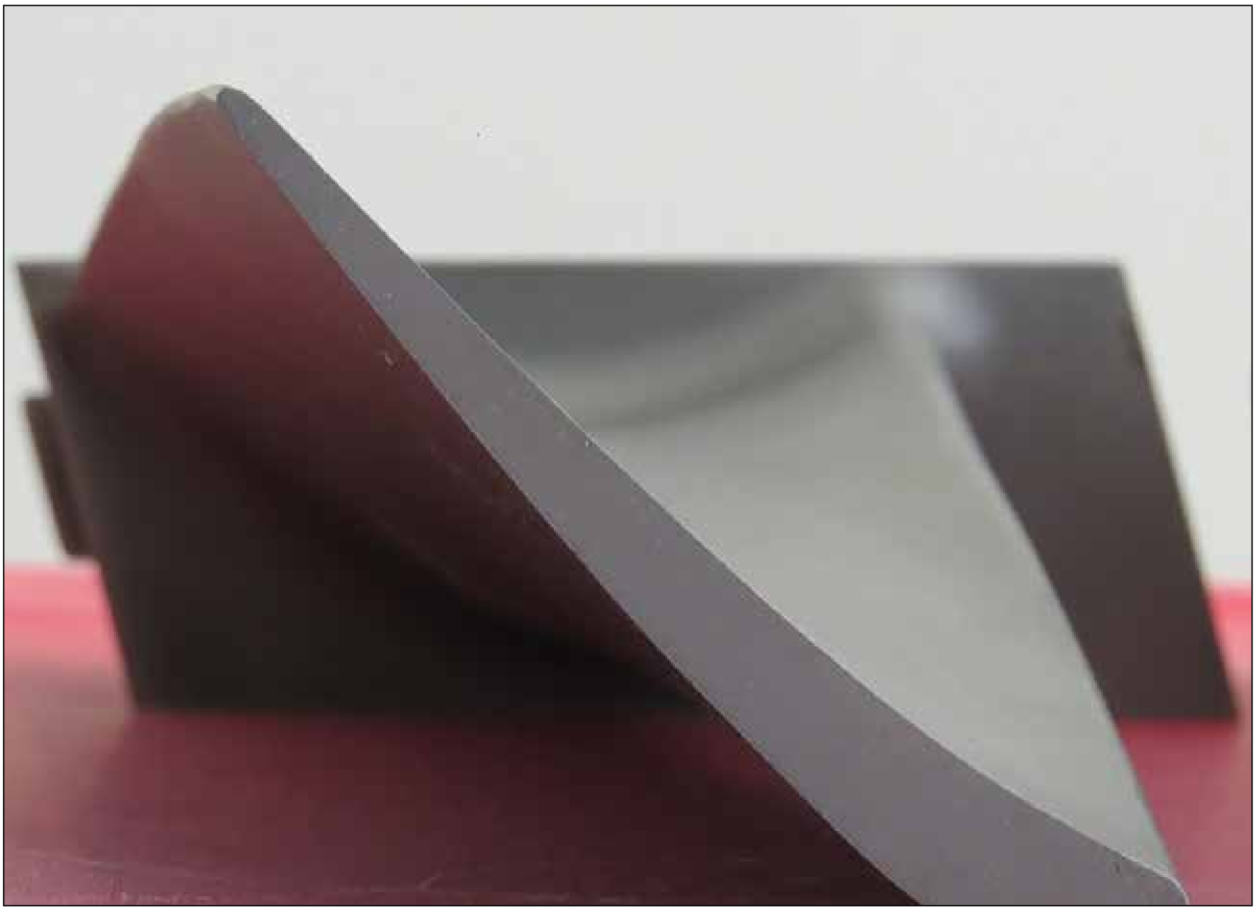


واحدهای شرکت تامین کالای توربین ماشین خاورمیانه

در رقابت‌های جهانی موجود در عصر حاضر، باید محصولات و قطعات متنوع را با توجه به درخواست مشتری، در دسترس وی قرار داد. تمایل مشتری بر کیفیت بالا و خدمت رسانی به‌موقع، موجب افزایش فشارهایی شده است که در نتیجه آن شرکت‌ها نمی‌توانند به تنهایی از عهده تمامی فعالیت‌های مرتبط برآیند. در بازار رقابتی موجود، بنگاه‌های اقتصادی و تولیدی علاوه بر پرداختن به سازمان و منابع داخلی، خود را به مدیریت و نظارت بر منابع و ارکان مرتبط خارج از سازمان نیازمند یافته‌اند. علت این امر در واقع دستیابی به مزیت یا مزایای رقابتی از قبیل سرعت عمل بالا، انعطاف پذیری زیاد و قیمت پایین با هدف کسب سهم بیشتری از بازار است. بر این اساس، فعالیت‌هایی نظیر خدمات فنی و مهندسی، تهیه و تأمین مواد، خدمات آزمایشگاهی، ساخت قطعات و خدمات نگهداری کالا که قبلا همگی در سطح شرکت انجام می‌شده اینک به شرکت‌های بیرون از سازمان انتقال پیدا کرده است که این نگرش باعث ایجاد زنجیره تأمین و مدیریت آن در شرکت‌های پیشرفته دنیا شده است.

مسئله کلیدی در یک زنجیره تأمین، مدیریت و کنترل هماهنگ تمامی این فعالیت‌هاست. مدیریت زنجیره تأمین (Supply Chain Managment) پدیده‌ای است که این کار را به طریقی انجام می‌دهد که مشتریان بتوانند خدمت قابل اطمینان و سریع یا محصولات با کیفیت را در حداقل هزینه دریافت کنند. در حالت کلی زنجیره تأمین از دو یا چند سازمان تشکیل می‌شود که رسما از یکدیگر جدا هستند و به وسیله جریان‌های مواد، اطلاعات و جریان‌های مالی به یکدیگر مرتبط می‌شوند. این سازمان‌ها می‌توانند بنگاه‌هایی باشند که مواد اولیه، قطعات، محصول نهایی و یا خدمات فنی/بازرسی را تولید یا ارائه می‌کنند.

ارتباط هدفمند، مداوم و سازماندهی شده با تأمین کنندگان برای مدیریت موثر زنجیره تامین



ضروری است. این امر یعنی جریان سریع اطلاعات در میان مشتری (مدیریت زنجیره تأمین) و تأمین کنندگان، بعضی از شرکت‌ها را قادر می سازد که زنجیره‌های تأمین بسیار کارآمدی را ایجاد کنند به گونه‌ای که فرآیند تجاری‌سازی تولید محصولات را در سطحی انجام دهند که رضایت کارفرمایان را به بهترین وجه ممکن فراهم کنند. یکی دیگر از نیازهای اساسی تأمین کنندگان و مدیریت زنجیره تأمین جهت دست‌یابی به اهداف تعیین شده، اعتماد متقابل در عرصه‌های فنی و اجرایی است که برای دستیابی به آن نحوه رویه‌های اجرا شده توسط مدیریت زنجیره شامل تولید و نشر دانش فنی و نحوه تعاملات اجرایی، باید از هوشمندی کامل برخوردار باشد.

مدیریت زنجیره تأمین دارای سه فرآیند عمده است که عبارت‌انداز:

۱ .مدیریت اطلاعات (مدیریت گردش مناسب و انتقال صحیح اطلاعات)

۲ . مدیریت لجستیک (مدیریت فرآیندهای حمل و نقل، سفارش دهی و ساخت، تغییرات سفارش، زمان‌بندی تولید، برنامه های لجستیک و عملیات انبارداری)

۳. مدیریت روابط (مدیریت ارتباط مطمئن با پیمانکاران در زنجیره، به گونه‌ای که پیمانکاران اطلاعات لازم را در زمان مناسب دریافت کرده و متقابلا مدیریت زنجیره را از روند اجرا در زمان‌های معین، مطلع کنند.)

به طور کلی مزایای زنجیره تامین عبارت است از :

۱. رقابت پذیری

۲. حداقل کردن هزینه ساخت

۳ . استفاده از تجارب و خرد جمعی

۴ . افزایش سرعت ساخت

۵ . تخصصی سازی فرآیندهای خدماتی و ساخت

با توجه به نکات مذکور، شرکت تأمین کالای توربین ماشین خاورمیانه با مأموریت ایجاد یک زنجیره تأمین قطعات و مجموعه‌های ماشین‌های دوار مبتنی بر دانش مدیریت زنجیره تأمین، تأسیس شده و فعالیت‌های خود مبتنی بر مهندسی و تولید این نوع قطعات برای گروه توربین ماشین خاورمیانه را از نیمه دوم سال ۹۰ آغاز کرد.

شرکت تأمین کالای توربین ماشین خاورمیانه در انتهای سال چهارم فعالیت خود با زنجیره‌ای بالغ بر ۱۱۰ کارگاه صنعتی و شرکت‌های تولیدی و بازرگانی در دوره اول برنامه استراتژیک شرکت، گام بزرگی را در جهت ایجاد کنسرسیوم تولیدکنندگان قطعات و مجموعه‌های ماشین‌آلات دوار با محوریت شرکت توربین ماشین خاورمیانه برداشته است.

این شرکت جهت بهره گیری بهینه از توانمندی سازندگان و شرکت‌های ارائه‌دهنده خدمات فنی داخلی، استراتژی ایجاد زنجیره تامین گسترده و کارآمد را مبتنی بر فعالیت‌های ذیل در دستور کار خود قرار داد:

۱ . شناسایی تامین کنندگان توانمند اعم از سازندگان، فروشندگان و ارائه دهندگان خدمات فنی

۲ . تکمیل فرم‌های مربوط به ارزیابی توانمندی تأمین کنندگان

۳ . ارزیابی و پایش اولیه تأمین کنندگان، امتیازدهی و درجه‌بندی توانمندی آنان

۴ . مدیریت قراردادها و انعقاد تفاهم‌نامه‌های همکاری بلندمدت

۵ . گروه‌بندی و تعیین کد اختصاصی برای آنان

۶ . مدیریت روابط تأمین کنندگان بر اساس منافع دو طرف و ایجاد اعتماد

۸ . ارزیابی دوره‌ای تأمین کنندگان

۹ . تزریق و ارتقای دانش فنی و تقویت بنیه مالی

در حال حاضر شرکت تأمین کالای توربین ماشین خاورمیانه ضمن ایجاد و تثبیت یک زنجیره تأمین هوشمند، عملیات شناسایی و ارزیابی دوره‌ای پیمانکاران را به همراه توانمندسازی مجریان مستعد، به طور مستمر در دست انجام دارد. روشن است که در این حالت محصولی که به مشتری می رسد نتیجه تلاش جمعی تامین کنندگان در طول راه بوده و در شرکت تامین کالای توربین ماشین خاورمیانه هدف، تضمین بالاترین سطح کیفیت محصول نهایی با اطمینان از اینکه بهترین مواد اولیه و تامین کنندگان برای هر پروژه انتخاب شده‌اند، است.

پوشش قطعات کمپرسور در توربین‌های گاز

الناز میرطاهری[۱]، شهاب میرآقائی[۲]

حفظ خواص مکانیکی و پایداری ابعادی اجزای کمپرسور در توربین گازی مولد نیرو، به ویژه پره‌های ثابت و متحرک، نقشی کلیدی در عملکرد کل توربین دارد. بروز آسیب‌های سطحی روی پره‌های کمپرسور راندمان آن را تا بیش از ۳ درصد کاهش می‌دهد و در صورت تداوم این شرایط افت خواص مکانیکی و در نهایت شکست ناگهانی قطعات اجتناب ناپذیر است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که حدود ۲۰ درصد از موارد تخریب توربین‌های گاز ناشی از شکست ناگهانی پره‌های کمپرسور است. مهم‌ترین عوامل تخریب سطح پدیده‌های خوردگی و اکسیداسیون، سایش و فرسایش و زبرشدن سطح و رسوب ذرات است. با توجه به شرایط کار در محیط‌های صنعتی خورنده و فرساینده و استفاده از فولادهای زنگ‌نزن در ساخت اجزای کمپرسور، استفاده از پوشش‌های محافظ به منظور افزایش عمر قطعات و راندمان کمپرسور، مهمترین و در بسیاری از موارد تنها روش بهبود عملکرد توربین است.

تاریخچه

برای اولین بار در دهه ۱۹۵۰ پوشش‌های مقاوم به خوردگی نیکل-کادمیم در کمپرسور توربین گاز به‌کار گرفته شد و آبکاری نیکل-کادمیم تا دهه ۱۹۷۰ یکی از پرکاربردترین روش‌ها برای پوشش‌دهی اجزای کمپرسور بود. این پوشش‌ها به دلیل عملکرد مناسب و هزینه کم تولید، تا دهه ۱۹۸۰ و بروز محدودیت‌های زیست محیطی، کاربرد گسترده‌ای داشت و پس از آن به تدریج استفاده از آن‌ها کاهش یافت و در اوایل دهه ۱۹۹۰ متوقف شد.

در دهه ۱۹۶۰ دو جایگزین برای پوشش‌های نیکل-کادمیم در توربین‌های هوایی معرفی شدند؛ پوشش‌های آلومینایدی دما پایین و پوشش‌های آلومینیوم-سرامیک. پوشش‌های آلومینایدی با نفوذ کنترل شده آلومینیوم به درون زیرلایه ایجاد می‌شوند و پس از آن ممکن است به منظور افزایش کیفیت سطحی و اصطلاحا آب‌بندی پوشش، یک پوشش تبدیلی نیز روی قطعات اعمال شود. این نوع پوشش دارای مقاومت به فرسایش و خوردگی مناسبی است. با این وجود، به دلیل عملکرد بهتر پوشش‌های آلومینیوم-سرامیک در این بخش از توربین‌های هوایی، استفاده از پوشش‌های آلومینایدی دما پایین چندان توسعه نیافت و به اجزای خاصی در کمپرسورهای ساخت شرکت

۱: الناز میرطاهری: کارشناس ارشد مهندسی مواد، واحد تحقیق و توسعه شرکت توربین ماشین خاورمیانه
۲: شهاب میرآقائی: استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه و مشاور علمی شرکت توربین ماشین خاورمیانه

Pratt & Whitney محدود شد. پوشش‌های آلومینیوم- سرامیک شامل یک لایه پلیمر غیرآلی و شیشه‌ای است که ذرات آلومینیوم درون آن جای گرفته‌اند. به منظور بهبود کیفیت سطحی این پوشش‌ها و همچنین آب‌بندی آن‌ها از یک لایه روکشی نیز استفاده می‌شود. این لایه روکشی همچنین عملکرد پوشش را در مقابل خوردگی و فرسایش بهبود می‌بخشد. در سال‌های اخیر به منظور تامین نیازهای مشخص در هر کمپرسور خاص و با توجه به شرایط عملکردی آن، پوشش‌های آلومینیوم- سرامیک بسیار متنوعی ایجاد است. پوشش‌های ناحیه کمپرسور از دیدگاه مقاومت در برابر انواع پدیده‌های مخرب و ماهیت به گونه‌های مختلف قابل تقسیم اند که در ادامه به هر یک از آن‌ها پرداخته شده است.

۱- پوشش‌های مقاوم به خوردگی

پوشش‌های مقاوم به خوردگی به دو دسته کلی قابل تقسیم اند؛ پوشش‌های سدکننده و پوشش‌های فداشونده. هدف از به‌کارگیری پوشش‌های سدکننده توقف و یا به تعویق انداختن خوردگی از طریق ایجاد یک سد فیزیکی میان زیرلایه و محیط خورنده است. این پوشش ها معمولا از موادی ساخته می‌شوند که در مقابل خوردگی مقاوم اند و تا زمانی که یکپارچه و بدون نقص روی سطح باقی بمانند به خوبی از آن محافظت می‌کنند. پوشش‌های آلومینایدی از جمله پوشش‌های سدکننده مقاوم به خوردگی هستند.

پوشش‌های فداشونده به گونه‌ای طراحی شده‌اند که به‌طور ترجیحی به‌جای زیرلایه خورده شوند. لذا این پوشش‌ها معمولا بیش از زیرلایه‌ای که قرار است از آن محافظت کنند از نظر گالوانیکی فعال اند. مزیت نسبی پوشش‌های فداشونده در مقایسه با پوشش‌های سدکننده آن است که برای حفظ مقاومت به خوردگی مهم نیست پوشش، بدون نقص باقی بماند. انواع پوشش‌های آلومینیوم- سرامیک نمونه بسیار متنوع و پرکاربردی از پوشش‌های فداشونده مقاوم به خوردگی است.

پوشش‌های نیکل- کادمیم

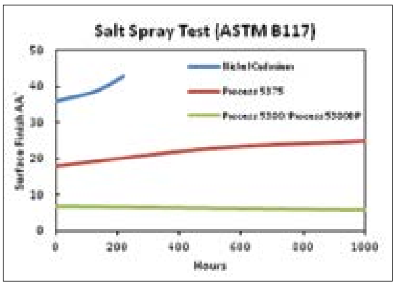
در این پوشش‌ها لایه‌هایی از نیکل و کادموم به ترتیب توسط آبکاری الکتریکی روی سطح زیرلایه اعمال می‌شوند. این پوشش‌ها مقاومت بسیار خوبی در برابر خوردگی در محیط‌های نمکی با pH خنثی از خود نشان می‌دهند. محافظت در برابر خوردگی به واسطه حضور کادمیم فداشونده روی سطح تامین شده و وجود لایه سخت نیکل زیرین علاوه بر مقاومت به خوردگی به واسطه ایجاد لایه سدکننده، باعث ایجاد مقاومت به فرسایش نیز می‌شود. لایه نیکل همچنین به عنوان یک لایه بین‌نفوذی برای پوشش کادمیم خارجی عمل می‌کند. وجود لایه سدکننده نیکل با ضخامت مناسب از آن جهت ضروری است که از بروز تردی فلز مایع در فولادهای پراستحکام ناشی از تماس با کادمیم جلوگیری می‌کند. پس از تخریب لایه کادمیم، در صورت بروز عیب در لایه نیکل و مواجهه سطح فلز پایه با محیط، خوردگی و تخریب در فلز پایه آغاز می‌شود. مشکل دیگر پوشش‌های نیکل-کادمیم امکان ایجاد خوردگی حفره‌ای زیر لایه پوشش است که به صورت ظاهری قابل تشخیص نیست. با تنظیم پارامترهای فرآیند لایه‌هایی از نیکل و کادمیم به ترتیب با ضخامت‌های ۱۵۰-۱۳۰ میکرون و ۵۰-۲۵ میکرون روی سطح ایجاد می‌شوند. پس از تکمیل دو مرحله آبکاری نیکل و کادمیم، قطعات در دمای 630°C تحت عملیات حرارتی قرار می‌گیرند تا امکان نفوذ متقابل لایه‌های نیکل و کادمیم در یکدیگر فراهم شود.

پوشش‌های آلومینایدی دما پایین

این پوشش‌ها در دسته پوشش‌های نفوذی قرار می‌گیرند زیرا لایه پوشش از طریق تغییر ترکیب شیمیایی زیرلایه ناشی از نفوذ درون سوی آلومینیوم از سطح تشکیل می‌شود. از این منظر پوشش‌های آلومینایدی دما پایین با پوشش‌های نفوذی دما بالا که روی قطعات ناحیه گرم توربین اعمال می‌شوند تشابه دارند. در قطعات کمپرسور، پوشش شامل یک لایه نسبتا نازک از فلز سخت زمینه بوده که از آلومینیوم غنی شده است. اعمال پوشش‌های آلومینایدی دما پایین به روش سمانتاسیون پودری و در دمای حدود 480°C صورت می‌گیرد. در این دما اجزای مخلوط پودری پوشش‌دهی با یکدیگر واکنش داده و تولید هالیدهای آلومینیوم می‌کنند که عامل انتقال آلومینیوم به سطح قطعات فولادی هستند. در نهایت آزاد شدن آلومینیوم روی سطح امکان نفوذ آن به درون زیرلایه و تشکیل پوشش را فراهم می‌کند.

پوشش‌های آلومینایدی نفوذی مقاومت مناسبی در برابر اکسیداسیون در دمای بالا دارند، اما

در دهه ۱۹۶۰ دو جایگزین برای پوشش‌های نیکل-کادمیم در توربین‌های هوایی معرفی شدند؛ پوشش‌های آلومینایدی دما پایین و پوشش‌های آلومینیوم-سرامیک



تصویر ۱- مقایسه سطح نهایی پوشش‌ها پس از تست مه نمک

تصویر ۲. شماتیک ساختار چند لایه پوشش‌های ضد رسوب

تصویر ۳. پره‌های ردیف اول ایمپلر با پوشش ضدرسوب الکترولس نیکل پس از ۵ سال کار بدون تجمع رسوب

در این پوشش ها لایه‌هایی از نیکل و کادمیم به ترتیب توسط آبکاری الکتریکی روی سطح زیرلایه اعمال می‌شوند. این پوشش‌ها مقاومت بسیار خوبی در برابر خوردگی در محیط‌های نمکی با PH خنثی از خود نشان می‌دهند

مقاومت در برابر خوردگی آنها نسبت به پوشش های نیکل-کادمیم و پوشش‌های آلومینیوم-سرامیک کمتر است. از سوی دیگر پوشش های آلومینایدی دما پایین سختی نسبتا بالایی دارند و مقاومت مناسبی در برابر فرسایش نشان می‌دهند.

پوشش‌های آلومینیوم- سرامیک

پوشش‌های آلومینیوم- سرامیک از یک زمینه پلیمری غیرآلی شیشه‌ای و منسجم تشکیل می‌شوند که ذرات آلومینیوم درون آن پراکنده اند.

پوشش‌های اعمالی بلافاصله پس از پخت حاوی حدود ۷۰ درصد وزنی آلومینیوم اند ولی از نظر الکتریکی رسانا نیستند. پس از پخت، معمولا سطح پوشش به روش‌های مکانیکی از قبیل بلاست خشک و کم‌فشار توسط ساینده‌های مختلف پرداخت می‌شود. این فرآیند منجر به حذف مواد از سطح نشده ولی باعث رسانا شدن پوشش و فعالیت گالوانیکی آن می‌شود. هرچه فعالیت گالوانیکی پوشش نسبت به زیر لایه بیشتر باشد، قابلیت فداشوندگی آن و در نتیجه قدرت محافظت از سطح در محیط‌های خورنده بیشتر است.

باید در نظر داشت که پس از عملیات پرداخت زبری سطح پوشش افزایش یافته که می‌تواند بر عملکرد آیرودینامیکی کمپرسور تاثیر منفی داشته باشد. فعالیت گالوانیکی پوشش‌های آلومینیوم- سرامیک نسبت به کادمیم آبکاری شده کمتر و از پوشش آلومینایدی بیشتر است.

بنابراین، این پوشش‌ها مقاومت بسیار خوبی در برابر خوردگی ایجاد کرده و علاوه بر آن مقاومت مناسبی نیز در برابر دمای بالا و فرسایش دارند. شکل یک تغییر زبری سطح پوشش‌های مختلف آلومینیوم - سرامیک در مقایسه با پوشش نیکل- کادمیم در اثر قرار گرفتن در محیط خورنده تست مه نمک را نشان می‌دهد.

پوشش‌های آلومینیوم- سرامیک توسط شرکت سرماتک توسعه یافته اند و در انواع مختلف تجاری تحت عنوان پوشش‌های سرمتل عرضه می‌شوند. پوشش سرمتل (۵۳۷۵)، سرمتل

تصویر ۴. پوشش آلومینیوم – سرامیک با یک لایه روکش پلیمری

تصویر ۵. پوشش نیترید تیتانیم روی پره‌های ثابت و متحرک کمپرسور

این پوشش‌ها در دسته پوشش‌های نفوذی قرار می‌گیرد زیرا لایه پوشش از طریق تغییر ترکیب شیمیایی زیرلایه ناشی از نفوذ درون سوی آلومینیوم از سطح تشکیل می‌شود. از این منظر پوشش‌های آلومینایدی دما پایین با پوشش‌های نفوذی دما بالا که روی قطعات ناحیه گرم توربین اعمال می‌شوند، تشابه دارند

(۹۶۲) و سرمتل (W) از پوشش‌های آلومینیوم–سرامیک مورد استفاده در قطعات کمپرسور توربین گاز است. در انواع پیشرفته‌تر این پوشش ها از یک لایه خارجی سرامیکی استفاده شده است. این لایه‌ها نقش آب‌بند را ایفا کرده و با نام تجاری سری سرماسیل، از قبیل سرماسیل (570A)، توسط شرکت سرماتک ارائه شده‌اند. در ادامه به توضیح مختصری از عملکرد این نوع از پوشش‌های آلومینیوم – سرامیک پرداخته شده است.

پوشش آلومینیوم– سرامیک روکش‌دار

لایه روکش اعمال شده روی پوشش‌های آلومینیوم– سرامیک نقش آب‌بند و یا پوشش سدکننده روی لایه فداشونده زیرین را ایفا می‌کند. این روکش سدکننده حفره‌های موجود در سطح را پر کرده و صافی سطح را بهبود می بخشد و چون این پوشش در برابر خوردگی رسوبات سولفات یا کلرید نسبتا تاثیر ناپذیر است، مقاومت در برابر آسیب‌های محیطی را افزایش می‌دهد.

بنابراین، عملکرد کلی این سیستم پوشش‌دهی در زمینه مقاومت به خوردگی بسیار مناسب بوده و نیز به دلیل بهبود کیفیت سطحی، در مقایسه با پوشش‌های فاقد روکش، عملکرد آیرودینامیکی سطح نیز بهبود یافته است. این پوشش‌ها ضخامتی حدود ۷۵-۱۳ میکرون و استحکام کششی پیوند بیش از psi8000 (بر اساس استاندارد ASTM-C633) دارند.

پوشش‌های آلومینیوم–سرامیک روکش‌دار که دارای عملکرد فداشونده هستند، مقاومت به خوردگی بهتری نسبت به پوشش‌های آبکاری نیکل–کادمیم، پوشش‌های نفوذی آلومینیوم و پوشش‌های آلومینیوم– سرامیک بدون روکش از خود نشان می‌دهند. در آزمون مه نمک، بر اساس استاندارد ASTM-B117، فولاد با پوشش آلومینیوم– سرامیک آب‌بندی شده، پس از ۲۵۰۰ ساعت آزمون، هیچ اثری از لکه‌های قرمز زنگ‌زدگی نشان نمی‌دهد. از طرف دیگر لایه آب‌بند رویی باعث می‌شود که صافی سطح قطعه پس از قرار گیری در محیط خورنده و تحت شرایط کاری حفظ شود. لازم به ذکر است که

پوشش‌های آلومینیوم-سرامیک توسط شرکت سرماتک توسعه یافته اند و در انواع مختلف تجاری تحت عنوان پوشش‌های سرمتل عرضه می‌شوند. پوشش سرمتل (۵۳۷۵)، سرمتل (۹۶۲) و سرمتل (W) از پوشش‌های آلومینیوم-سرامیک مورد استفاده در قطعات کمپرسور توربین گاز است

پوشش‌های آلومینیوم-سرامیک، به دلیل کمتر بودن سختی ذاتی پوشش، در مقایسه با پوشش‌هایی که مشخصا به منظور افزایش مقاومت به فرسایش طراحی شده‌اند، محافظت کمتری در برابر فرسایش نشان می‌دهند. با این وجود در مواردی که مقاومت پوشش در برابر فرسایش حائز اهمیت است، می‌توان با ایجاد تغییراتی در لایه روکش، مقاومت به فرسایش مورد نیاز را فراهم کرد.

همانطور که می‌دانیم، صافی سطح در قطعات کمپرسور و رندمان آنها تاثیر بسزایی دارد. در بیشتر پوشش‌های مورد استفاده در کمپرسور، از جمله پوشش آلومینیوم- سرامیک بدون روکش، صافی سطح نهایی در محدوده ۶۰-۳۰ میکرواینچ است که این مقدار در پوشش‌های آلومینیوم- سرامیک روکش‌دار حدود ۲۰-۱۰ میکرواینچ است.

پوشش‌های پیشرفته‌ای از قبیل سرمتل (۵۳۸۰DP) در این دسته قرار دارند. بررسی‌های انجام شده توسط شرکت جنرال الکتریک نشان می‌دهد که پس از ۴۸۰۰۰ ساعت کارکرد، تقریبا در ۸۰ درصد از پره‌های کمپرسور سطح دارای پوشش سرمتل (۵۳۸۰DP) بدون تغییر باقی مانده و ۲۰ درصد دیگر هنوز توسط لایه پوشش زیرین محافظت می‌شوند و خوردگی حفره‌ای در هیچ قسمتی مشاهده نشده است. این در صورتی است که پره‌ها در شرایط بدون پوشش و همچنین با پوشش نیکل-کادمیم پس از گذشت کمتر از ۲ سال دچار خوردگی حفره‌ای شده‌اند. از انواع تجاری این پوشش می‌توان به سرمتل (۵۳۷۵) و سرمتل (۱۱۴۱) اشاره کرد.

۲- پوشش‌های ضدرسوب

در حالت کلی، ایجاد رسوب در کمپرسور توربین‌های گاز صنعتی نسبت به کمپرسورهای گریز از مرکز و محوری مورد استفاده در صنایع شیمیایی کمتر است.

با این وجود، به دلیل آلودگی‌های موجود در محیط‌های صنعتی، تجمع رسوب روی قطعات کمپرسور می‌تواند عملکرد آن را به شدت تحت تاثیر قرار دهد.

این پدیده در واقع تجمع و چسبیدن ذرات آلی روی سطح پره در قسمت‌های ناهموار است. بنابراین برای مقابله با آن، پوشش مورد استفاده باید دارای صافی سطح بسیار بالا، صیقلی و لغزان باشد، به‌طوری که احتمال چسبیدن مواد روی آن کم شود. موادی از قبیل PTFE (تفلون) برای این کاربرد مناسب اند.

همانطور که گفته شد، پوشش‌های آلومینیوم- سرامیک آب‌بند شده دارای صافی سطح بسیار بالایی هستند که می‌تواند در برابر نشستن رسوب روی سطح به خوبی مقاومت کند.

پوشش‌های مقاوم در برابر ایجاد رسوب توسط شرکت‌های متخصص از قبیل شرکت سرماتک (سری پوشش‌های سرمالون) توسعه داده شده اند. لایه خارجی این پوشش‌ها از تفلون

تشکیل شده است و سطحی بسیار صیقلی داشته و مانع از چسبیدن و رسوب ذرات روی سطح می‌شود. این پوشش‌ها شامل سه لایه است؛ لایه خارجی محافظ تفلون، لایه محافظ میانی و لایه داخلی فداشونده آلومینیوم- سرامیک. شکل ۲ شماتیک ساختار چند لایه پوشش‌های ضد رسوب را نشان می‌دهد. لایه میانی مانع خوردگی لایه داخلی شده و مهم‌تر اینکه چسبندگی مناسب لایه خارجی به سطح را فراهم می‌کند.

همانطور که ذکر شد، پوشش‌های حاوی تفلون با نفوذناپذیر کردن سطح در برابر محیط خورنده، مقاومت بسیار مناسبی در برابر تجمع رسوب ایجاد می‌کند. از سوی دیگر خاصیت عدم چسبندگی ذرات موجب می‌شود که اتصال این ماده به سطح قطعه نیز با مشکل همراه باشد. برای حل این مشکل از مخلوط تفلون و رزین استفاده می‌شود. در این حالت استحکام چسبندگی پوشش بهبود یافته اما از خاصیت ضدرسوب بودن آن کاسته می‌شود.

بنابراین با انتخاب رزین مناسب و بهینه کردن میزان تفلون در لایه خارجی می‌توان عملکرد پوشش را در برابر تجمع رسوب بهبود داد. باید توجه داشت که در صورت استفاده از این نوع پوشش‌ها دمای کاری مجاز قطعه کاهش پیدا می‌کند.

با استفاده از پوشش حاوی تفلون حداکثر دمای قابل تحمل برای کمپرسور به 260°C محدود می‌شود.

بنابراین در استفاده از این پوشش‌ها برای ردیف‌های میانی کمپرسور به بعد محدودیت وجود دارد. در شکل‌های ۳ و ۴ به‌کارگیری پوشش‌های مختلف به منظور افزایش مقاومت در برابر تجمع رسوب نشان داده شده است.

۳- پوشش‌های مقاوم در برابر فرسایش

از دیدگاه مقاومت مواد در مقابل فرسایش رفتار آن‌ها به دو دسته نرم و ترد قابل تقسیم است. برای مواد نرم بهترین مقاومت به فرسایش در زاویه برخوردهای زیاد اتفاق می‌افتد و در زاویه‌های کم حذف ماده از سطح اتفاق می‌افتد. در مواد ترد مقاومت به فرسایش و

از دیدگاه مقاومت مواد در مقابل فرسایش رفتار آن‌ها به دو دسته نرم و ترد قابل تقسیم است

پوشش‌های ناحیه کمپرسور در توربین‌های گاز

نام قطعه	محل دارای پوشش	نوع پوشش	هدف از اعمال پوشش	سطح در تماس
پره‌های ثابت و متحرک	سطوح ایرفویل	کاربید تنگستن، نیترید تیتانیوم، کاربید کروم	ایجاد مقاومت در برابر فرسایش ناشی از وجود ذرات جامد	جریان هوا
		آلومینیوم-سرامیک	ایجاد مقاومت در برابر خوردگی	
		آلومینیوم-سرامیک روکش‌دار	ایجاد مقاومت در برابر خوردگی و نشستن رسوب، ایجاد سطح صاف و یکنواخت	
		آلومináید نفوذی	ایجاد مقاومت در برابر خوردگی و اکسیداسیون تا دمای 550°C	
بلیسک (پره و دیسک یکپارچه)	سطوح ایرفویل	آلومینیوم-سرامیک‌روکش‌دار	ایجاد مقاومت در برابر نشستن رسوب، خوردگی و اکسیداسیون	-
پوسته کمپرسور، دیفیوزر و ژنراتور گاز	کل سطح پوسته	آلومینیوم-سرامیک آلومینیوم-سرامیک روکش‌دار	ایجاد مقاومت در برابر خوردگی و اکسیداسیون تا دمای 550°C	جریان هوا
دیسک و هاب کمپرسور	بیشتر نواحی	آلومینیوم-سرامیک آلومینیوم-سرامیک‌روکش‌دار آلومینایدنفوذی	ایجاد مقاومت در برابر خوردگی و اکسیداسیون تا دمای 550°C	ریشه پره‌ها شفت کمپرسور
اسپیسر کمپرسور	بیشتر نواحی	آلومینیوم-سرامیک آلومینیوم-سرامیک روکش‌دار	ایجاد مقاومت در برابر خوردگی و اکسیداسیون تا دمای 550°C	جریان هوا
آب‌بند کمپرسور	مسیر عبور گاز و نواحی غیر تماسی	آلومینیوم-سرامیک آلومینیوم-سرامیک روکش‌دار	ایجاد مقاومت در برابر خوردگی و خوردگی داغ دما پایین	-
حلقه‌های کمپرسور	مسیر عبور گاز و نواحی غیر تماسی	آلومینیوم-سرامیک	ایجاد مقاومت در برابر خوردگی، نشستن رسوب و خوردگی داغ	-
نواحی دیفیوزر، ایمپلر	سطوح پره	کاربید تنگستن، نیترید تیتانیوم	ایجاد مقاومت در برابر فرسایش ناشی از وجود ذرات با ایجاد حداقل عیب خستگی	جریان هوا
پره‌های IGV و VGV	سطوح ایرفویل	آلومینیوم-سرامیک روکش‌دار	ایجاد مقاومت در برابر خوردگی و ایجاد سطح کاملا صاف و یکنواخت (آئرودینامیک)	-
شفت	سطوح داخلی و خارجی	آلومینیوم-سرامیک	ایجاد مقاومت در برابر خوردگی و اکسیداسیون تا دمای 550°C	روغن‌های داغ و سیال هیدرولیک

در حالت کلی، ایجاد رسوب در کمپرسور توربین‌های گاز صنعتی نسبت به کمپرسورهای گریز از مرکز و محوری مورد استفاده در صنایع شیمیایی کمتر است. با این وجود، به دلیل آلودگی‌های موجود در محیط‌های صنعتی، تجمع رسوب روی قطعات کمپرسور می‌تواند عملکرد آن را به شدت تحت تاثیر قرار دهد

سایش به کمانه کردن ذرات از سطوح سخت‌تر آنها بستگی دارد.

بنابراین، بهترین مقاومت به فرسایش در این مواد در زاویه برخوردهای کوچک اتفاق می‌افتد و در زوایای بزرگتر در اثر برخورد و محدودیت قابلیت این مواد به جذب انرژی ضربه، ترک خوردگی و بهم پیوستن ترک‌ها می‌تواند باعث جدا شدن ماده از سطح شود.

در قطعات کمپرسور به ویژه پره‌ها، مکانیزم غالب فرسایش برخورد ذرات با سطح در زاویه کم است. بنابراین به منظور بهبود مقاومت به فرسایش از موادی با سختی بالا استفاده می‌شود. از پوشش‌هایی که در برابر فرسایش مقاوم اند می توان به پوشش‌های آلومینیوم- سرامیک روکش دار سخت و پوشش‌های نیترید تیتانیوم (TiN)، کاربید تنگستن (WC) و کاربید کرم اشاره کرد. شکل ۵ نمونه‌ای از اعمال پوشش نیترید تیتانیوم را در پره‌های ثابت و متحرک کمپرسور نشان می‌دهد.

در انتخاب پوشش مناسب جهت افزایش مقاومت در برابر فرسایش پره‌های کمپرسور باید نکات زیر را در نظر داشت؛

- وزن؛ استفاده از پوشش هایی که افزایش وزن قابل توجهی در پره‌های کمپرسور ایجاد می کنند مجاز نیست.
- صافی سطح؛ پوشش‌های مقاوم در برابر فرسایش نباید به‌گونه‌ای باشند که پروفیل آیرودینامیکی پره را تغییر دهند و نیز نباید منجر به افزایش زبری سطح شوند، زیرا تاثیر مخربی بر راندمان آیرودینامیکی خواهند داشت.
- مقاومت در برابر خوردگی؛ پوشش مورد استفاده علاوه بر مقاومت در برابر فرسایش باید در برابر محیط خورنده شرایط سرویس مقاومت خوبی داشته باشد تا دچار تخریب ناشی از خوردگی نشود.
- خواص خستگی؛ افزایش مقاومت در برابر فرسایش پوشش نباید به قیمت افت مقاومت به خستگی در اثر افزایش احتمال جوانه زنی ترک و یا تغییر قابل توجه در فرکانس‌های تشدید پرده حاصل شود.

با در نظر گرفتن این پارامترها، پوشش‌های مقاوم به فرسایش مناسب و قابل استفاده در کمپرسور توربین‌های گازی عبارتند از:

- پوشش‌های آلومینیوم- سرامیک با لایه روکش سخت؛ همانطور که ذکر شد، پوشش‌های آلومینیوم- سرامیک می‌توانند مقاومت در برابر خوردگی سیستم را تامین کنند و نیز به عنوان لایه میانی برای اعمال یک لایه پوشش آلومینای سخت جهت افزایش مقاومت در برابر فرسایش

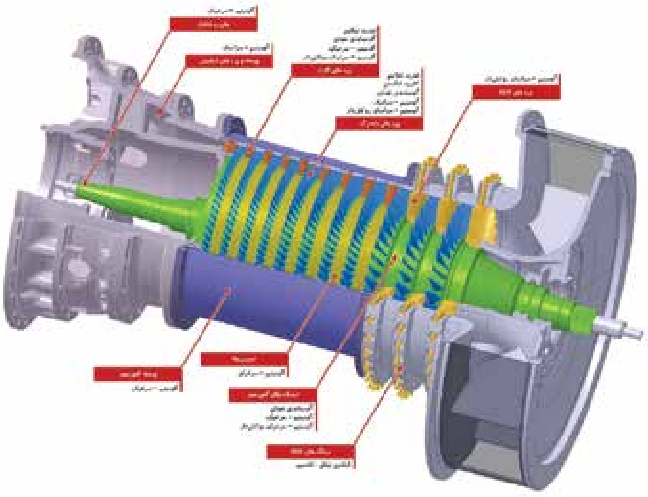
عمل کنند. این لایه آلومینا می‌تواند به روش اسپری پلاسمایی و در ضخامت‌های ۱۰۰-۵۰ میکرون روی قسمت‌هایی از سطح که در معرض فرسایش قرار دارد، اعمال شود.

■ پوشش نیترید تیتانیوم؛ پوشش نیترید تیتانیوم را می‌توان به روش رسوب فیزیکی بخار (PVD) و رسوب شیمیایی بخار (CVD) روی سطح پره‌های کمپرسور اعمال کرد.

با این روش‌ها می‌توان پوشش‌هایی با ضخامت کم ایجاد کرد که تغییرات ابعاد و وزن پره‌ها در اثر اعمال پوشش را به حداقل می‌رساند.

در میان پوشش‌های به کار رفته در قطعات کمپرسور، پوشش‌های آلومینیوم-سرامیک روکش‌دار به دلیل سهولت اعمال و دارا بودن مجموعه خواص مطلوب بیشترین و متنوع‌ترین کاربرد را دارند.

در این پوشش‌ها با انتخاب روکش مناسب خواص متنوعی از جمله مقاومت در برابر تجمع رسوب، مقاومت به فرسایش و همچنین مقاومت به خوردگی و حتی ترکیبی از آن‌ها قابل دستیابی است.



جمع بندی

پوشش‌های محافظ در کمپرسور توربین‌های گاز علاوه بر ایجاد مقاومت در برابر خوردگی و اکسیداسیون و مقاومت به فرسایش به منظور ایجاد صافی سطح مناسب در مسیر عبور هوا روی سطوح قطعات مختلف اعمال می‌شوند.

دستیابی به صافی سطح مناسب و حفظ آن، زمان کارکرد قطعات را افزایش داده و منجر به کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات می‌شود. همانطور که در جدول زیر نشان داده شده است، به منظور دستیابی به ویژگی مورد نظر در قسمت‌های مختلف کمپرسور توربین گاز از پوشش‌های مختلفی استفاده می‌شود.

بهبود سازگاری توربین توان با توجه به دمای محیطی

تقی هوشیاری[۱]، پریسه هدایتی[۲]، محمد سیفی[۳]، ارشیا تافته[۴]

توربین‌های گاز دو شـفت قابلیت تامین توان خروجی در بازه‌های سـرعت شـفت نسبتا وسـیعی را دارند. این ویژگی در کاربردهای با سرعت شفت ثابت اهمیت چندانی ندارد اما در کاربردهای تولید توان مکانیکی اهمیت پیدا می‌کند. از جمله کاربردهای این دسـته توربین‌ها می‌توان به تولید توان مکانیکی در راه‌اندازی پمپ‌ها و کمپرسورها اشاره کرد که در صنایع استخراج و پالایش نفت و گاز به صورت عمده استفاده می‌شـوند. در توربین‌های گاز دو شفت پارامترهایی نظیر سرعت شفت، فشار جریان در خروجی کمپرسور، دمای خروجی از محفظه و دمای خروجی از توربین به عنوان قیدهای کنترلی محدود کننده عملکرد مطرح هستند. توان خروجی توربین گاز دو شفت سنتار در شرایط سرد آب و هوایی، توسط سرعت شفت کمپرسور محدود می‌شود. اما در دماهای بالای محیطی، مقدار دمای خوانده شده توسط سنسور نصب شده در نازل توربین توان، محدود کننده میزان پاشش سوخت و به تبع آن توان تولیدی است. در این صورت می‌توان با اعمال تغییر سازگاری بین توربین توان و هسته توربین گاز، نحوه اثرگذاری این دو پارامتر را بر توان خروجی تنظیم کرد. در تعداد انگشت‌شماری از توربین‌های گاز زمینی، نازل توربین توان به گونه‌ای طراحی شده است که قابلیت تغییر زاویه را به منظور بهینه‌سازی توان، به صورت دائم در حین عملیات دارا هستند. توربین سنتار دارای دو طبقه توربینِ کمپرسور و یک طبقه توربین توان با هندسه ثابت است که با تغییر مساحت گلوگاه نازل آن در حین تعمیرات توربین، می‌توان نقطه تلاقی قیود حداکثر سرعت شفت و بیشینه دمای مجاز را در نمودار (دمای محیط - توان شفت) تغییر داد.

روش انجام محاسبات

تغییر زاویه نصب نازل و به تبع آن مساحت گلوگاه توربین توان، منجر به تغییر ظرفیت آیرودینامیکی آن می‌شـود کـه توسـط اعمال یـک ضریب خطی در منحنی عملکرد مدل‌سـازی می‌شود. به منظور مدلسـازی تغییر رفتار منحنی توان در دماهای محیطی مختلف، از روش تحلیل سیکل ترمودینامیکی استفاده شـده است. همچنین با اسـتفاده از تحلیل یک‌بعدی توربین محوری، اثر تغییر زاویه نصب نازل توربین توان بر ظرفیت آن شناسایی شـده و به این ترتیب زاویه و مساحت مناسـب گلوگاه برای دسـتیابی به رفتار سازگار دلخواه استخراج می‌شود.

نحوه سازگاری اجزا در توربین گاز دو شفت

با قرار گرفتن کمپرسور، توربین مولد گاز و توربین قدرت در کنار یکدیگر، هر یک قیدهایی بر عملکرد سیستم اعمال می‌کنند و سبب ایجاد تعامل بین اجزا می‌شوند. این تعامل به گونه‌ای درنظر گرفته شده اسـت که اجزا علاوه بر شـرایط طراحی، در شرایط خارج از طراحی نیز در نزدیکی نقطه بیشینه بازدهی با یکدیگر کار کننـد. از جمله مهم‌ترین قیدهای فیزیکی که اجزای توربین گاز بر سیستم اعمال می‌کنند، می‌توان موارد زیر را عنوان کرد:

- سرعت کمپرسـور برابر با سرعت توربین مولد گاز است.
- دبی جرمی توربین برابر مجمـوع دبی جرمی کمپرسور و دبی سوخت است.
- مجموع توان کمپرسور و افت‌های مکانیکی برابر با توان توربین مولد گاز است.
- فشار بعد از توربین مولد گاز باید به میزانی باشد که مومنتوم جریان به منظور عبور از توربین تولید توان را تامین کند.

در توربین‌های گازی دو شفت معمولا نازل ردیف اول توربین مولـد گاز و نازل توربین تولید توان در شـرایط خفگی کار می‌کننـد. در این حالت دبی جرمی عبوری از توربین بر اساس رابطه زیر محاسبه خواهد شد.

$$W = \frac{P_t}{A^*}\sqrt{\frac{\gamma}{RT_t}}\left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{-\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}$$

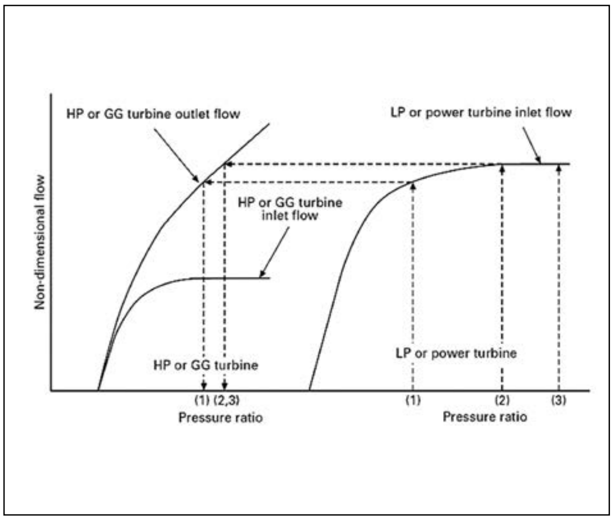
با توجه به رابطه (۱)، دبی جرمی عبوری از توربین در شرایط خفگی، تابعی از فشار و دمای گاز ورودی به توربین مولد گاز، ترکیب گاز و هندسه نازل خواهد بود. بر اساس رابطه (۱) برای یک توربین مشخص که با یک سیال کاری ثابت کار می‌کند، مقدار دبی جرمی تصحیح شده ثابت خواهد بود. (رابطه (۲)) این مقدار در توربین‌های محوری با عنوان ظرفیت توربین شناخته می‌شود.

$$\frac{W\sqrt{T_t}}{P_t} = const.$$

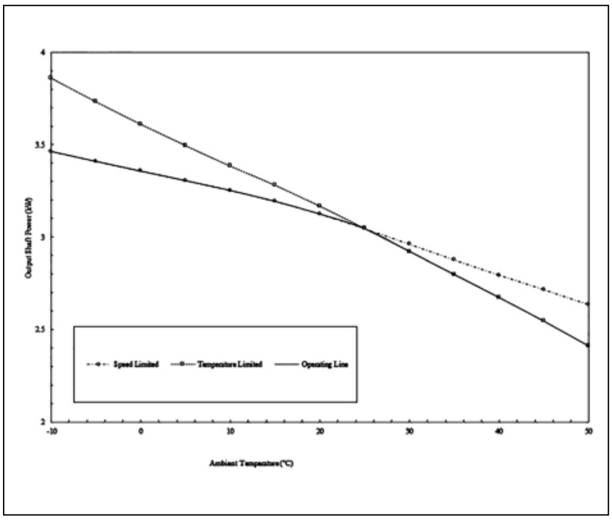
شـکل یک ارتباط عملکرد توربین تولید توان با توربین مولد گاز را نشان می‌دهد. بر این اساس زمانی که توربین تولید توان به شرایط خفگی نرسیده است (نقطه یک)، نسبت فشار توربین مولد گاز به گونه‌ای تنظیم می‌شود که شرایط حاکم بر سازگاری بین توربین‌ها و کمپرسور تامین شود. در مقابل زمانی که توربین تولید توان در شرایط خفگی کار کند، (نقاط ۲ و ۳) نسبت فشـار توربین مولد گاز ثابت خواهد شد. این نسبت فشار بر اساس میزان دبی عبوری از توربین تولید توان مشخص می‌شود.

تاثیر دمای محیط بر عملکرد توربین گاز دو شفت

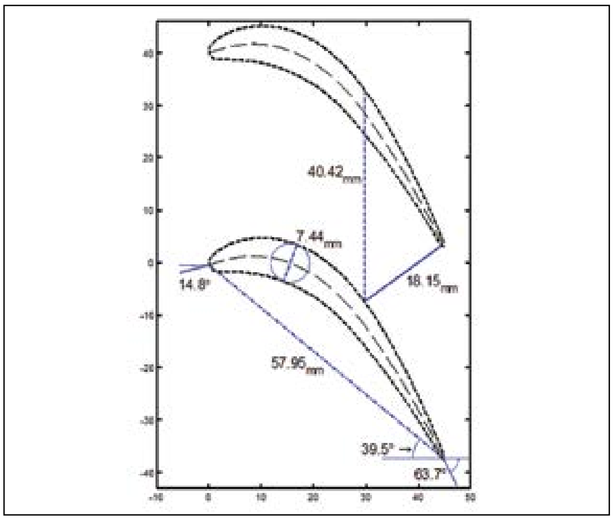
۱: تقی هوشیاری: واحد مهندسی توربین، شرکت مدیریت پروژه‌های توربین ارکان ایرانیان
۲: پریسه هدایتی: واحد مهندسی، شرکت توربین ماشین خاورمیانه
۳: محمد سیفی: واحد تعمیرات، شرکت توربین ماشین خاورمیانه
۴: ارشیا تافته: مدیر مهندسی توربین، شرکت مدیریت پروژه‌های توربین ارکان ایرانیان



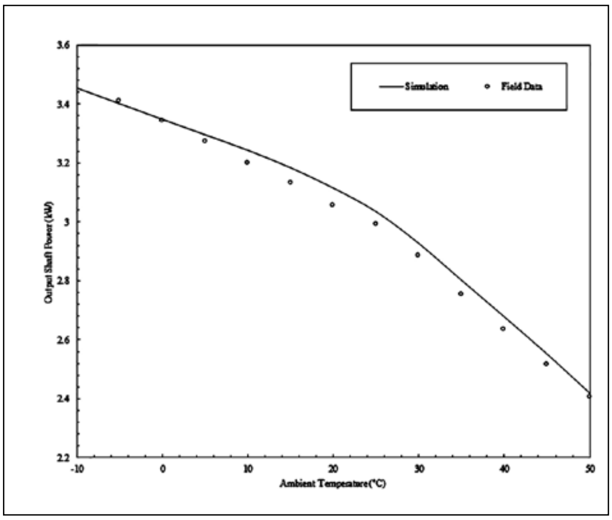
تصویر۱. ارتباط عملکرد توربین تولید توان با توربین مولد گاز در پیکره‌بندی دو شفت



تصویر۲. چگونگی اعمال محدودیت دور موتور و TIT بر توان خروجی بر اساس تغییرات دمای محیط



تصویر۳. مقطع ردیف پره‌های نازل توربین تولید توان



تصویر۴. مودار تغییرات توان خروجی بر اساس دمای محیط

در توربین‌های گاز دو شفت، توربین توان به صورت مکانیکی به توربین مولد گاز متصل نشــــده است. بنابراین ســـرعت توربین مولد گاز بر خلاف حالت تک‌شفت، به صورت مستقیم قابل کنترل نیست و بر اساس میزان بارگذاری روی موتور تعیین می‌شود. در صورتی که به توان خروجی بیشتر نیاز باشد، شیر کنترل سوخت اجازه می‌دهد که سوخت بیشتری وارد محفظه احتراق شود. این عمل موجب افزایش سرعت توربین مولد گاز و همچنین افزایش دمای خروجی محفظه احتراق می‌شـــود که در نهایت به بیشتر شـــدن توان خروجی توربین تولید توان می‌انجامد.

با توجـــه به محدودیت‌های مکانیکی و ســـازه‌ای، ســـرعت توربین مولد گاز و دمای گاز خروجی از محفظه احتراق دارای یک مقدار بیشینه هستند که عبور از آن منجر به وارد آمدن صدمات بلندمدت به توربین می‌شود. نحوه اعمال این محدودیت‌ها بر عملکرد موتور به دمای محیط، بارهای جانبی و هندسه توربین، به طور خاص نازل اول توربین تولید توان وابسته است.

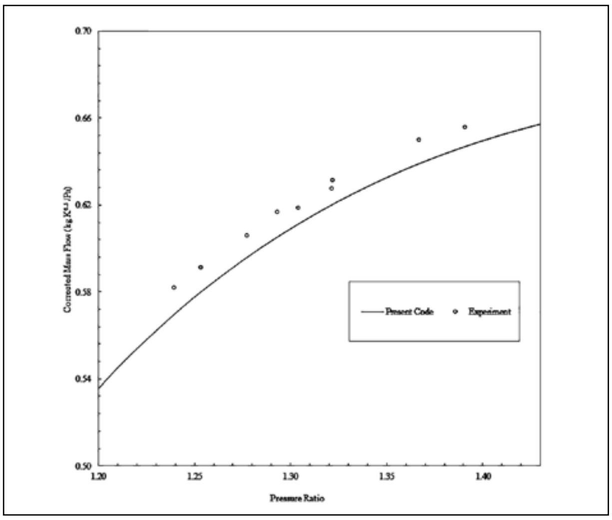
چگونگی اعمال این دو محدودیت بر توان خروجی توربین گاز در دماهای مختلف در شـــکل ۲ نشان داده شده است. در دماهای پایین محیط پارامتر دور توربین مولد گاز محدودکننده توان خروجی موتور است. اما در دماهای بالا، دمای خروجی از محفظه توان شفت را محدود می‌کند. بر این اساس دمای سازگاری، دمای محیطی است که به ازای آن هر دو محدودیت در بیشترین مقدار ممکن خود هستند.

همانطور که در شکل یک نشان داده شد، نازل اول توربین تولید توان، نسبت فشار توربین تولید توان را برای عبور مقدار مشخصی دبی تعیین می‌کند. از طرفی این نازل نسبت فشار قابل دسترس برای توربین مولد گاز را نیز مشخص می‌کند. اگر توربین مولد گاز با استفاده از این نسبت فشار مشخص شده، قادر به تامین توان مورد نیاز کمپرسور نباشد، دور توربین مولد گاز و در نهایت دبی جرمی عبوری از توربین تولید توان کاهش می‌یابد. این اتفاق موجب کاهش نسبت فشـــار مورد نیاز توربین تولید توان می‌شود و در نهایت نسبت فشار بیشتری در اختیار توربین مولد گاز، به منظور تامین توان کمپرسور قرار می‌گیرد.

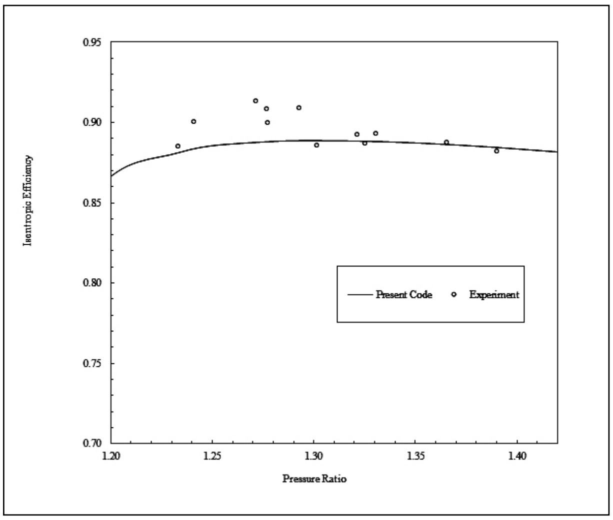
بر این اساس، نحوه سازگاری در توربین‌های گاز دو شـــفت با تغییر خواص جریان در نازل اول توربین تولید توان قابل تغییر است. با باز کردن دهانه، دبی بیشتری از این نازل عبور می‌کند و مقاومت توربین تولید توان در برابر عبور جریـــان کاهش می‌یابد. بنابراین دور توربین مولد گاز دیرتر به مقدار بیشینه خود می‌رسد و دمای سازگاری افزایش می‌یابد.

تغییر زاویه خروجی نازل توربین تولید توان

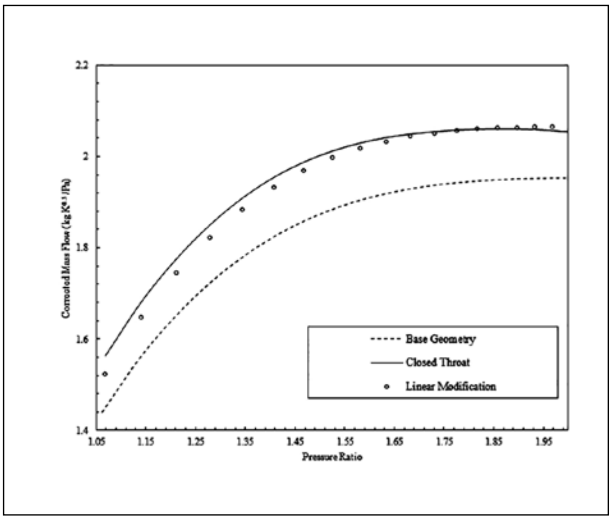
با استفاده از ارتباط مساحت نازل اول توربین تولید توان می‌توان دمای سازگاری توربین‌های گاز موجود را به منظور استفاده در دماهای محیطی متفاوت، تغییر داد. شکل ۳ نمونه‌ای از مقطع ردیف پره‌های نازل در یـــک توربین محوری را نشـــان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، گلوگاه این نازل به عنوان کمترین مساحت عبور جریان، در انتهای آن



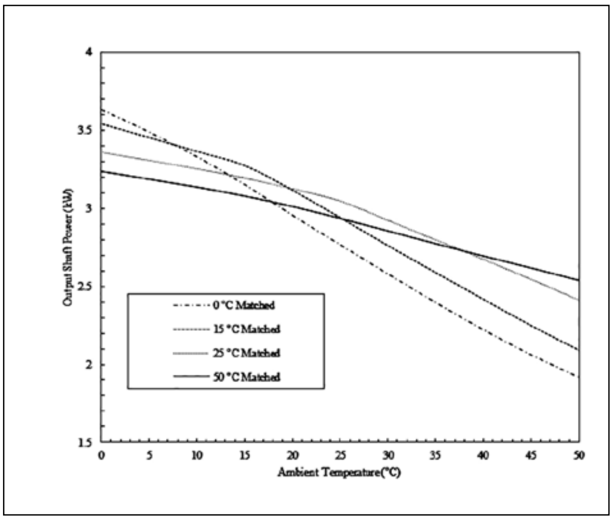
تصویر ۵. نمودار تغییرات دبی جرمی بر اساس نسبت فشار



تصویر ۶. نمودار تغییرات بازده بر اساس نسبت فشار



تصویر ۷. اثر تغییر دهانه‌ی نازل ردیف اول بر عملکرد توربین محوری



تصویر ۸. نمودار توان خروجی توربین گاز بر اساس تغییرات دمای محیط

قرار دارد. لذا با تغییر زاویه بخش انتهایی نازل، این مساحت قابل تغییر است. در نتیجه میزان تغییر این مساحت با استفاده از یک شبیه‌ساز سیکل توربین گاز در کنار یک شبیه‌ساز یک‌بعدی توربین محوری قابل محاسبه است.

شبیه‌ساز سیکل توربین گاز

به منظور تحلیل عملکرد توربین گاز در دماهای محیطی متفاوت از یک شبیه‌ساز عملکرد استفاده شده است. این شبیه‌ساز با در نظر گرفتن سیکل واقعی برایتون و روابط ترمودینامیکی حاکم، عملکرد توربین گاز را در نقطه طراحی محاسبه می‌کند. همچنین با در نظر گرفتن معادلات سازگاری، عملکرد در شرایط خارج از نقطه طراحی محاسبه می‌شود. به‌منظور بررسی صحت نتایج این شبیه‌ساز از اطلاعات مربوط به توربین سولار سنتار استفاده شده است. نتایج این بررسی برای تغییرات توان خروجی بر اساس تغییر دمای محیط در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود خروجی‌های نرم‌افزار با نتایج موجود تطابق قابل قبولی دارند.

استفاده از کد تحلیل یک‌بعدی

به منظور ایجاد ارتباط بین شبیه‌سازی عملکرد و هندسه واقعی، از کد تحلیل یک‌بعدی توربین محوری توسعه یافته در شرکت توربین ماشین خاورمیانه استفاده شده است.

این نرم‌افزار بر اساس مدل‌های تجربی افت فشار ارائه شده توسط اینلی-ماتیسون و بر مبنای روش تحلیل در خط میانی توسعه داده شده است که در آن ضریب افت کل طبق رابطه ۳ تعریف می‌شود.

$$Y = \frac{P_{t,LE} - P_{t,TE}}{P_{t,TE} - P_{TE}}$$

این پارامتر به ضرایب افت پروفیل، جریان ثانویه، جریان نوک پره، جریان لبه فرار، افت انبساط و شوک می‌شکند. (رابطه ۴) این مقادیر در ابتدا فرض می‌شوند و در ادامه با فرآیند آزمون و خطا با توجه به رابطه انتروپی و افت فشار، مقادیر نهایی می‌گردند.

$$Y = Y_P + Y_S + Y_{CL} + Y_{TE} + Y_{EX} + Y_{SH}$$

در روش استفاده شده، دبی جرمی در ورودی جریان به عنوان پارامتر ورودی داده می‌شود و در ادامه فشار طبقات به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که دبی عبوری از هر طبقه با دبی ورودی تعیین شده برابر شود.

$$\dot{m}_i = f(P_{i-1}, P_i)$$

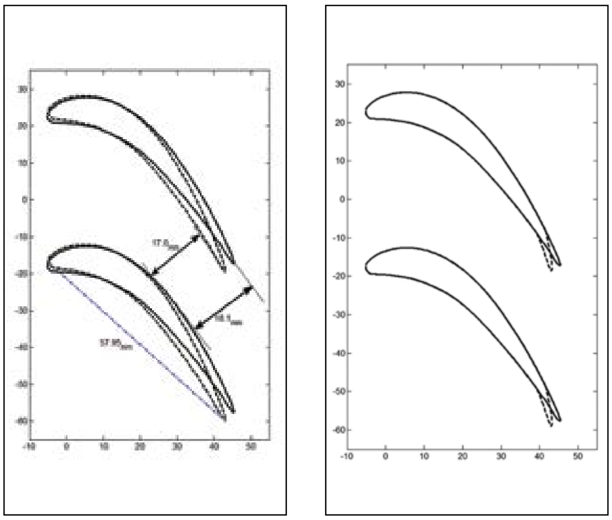
با دیفرانسیل گرفتن از رابطه ۶ خواهیم داشت:

$$d\dot{m}_i = \frac{\partial \dot{m}_i}{\partial P_{i-1}} dP_{i-1} + \frac{\partial \dot{m}_i}{\partial P_i} dP_i$$

با توجه به برابری دبی جرمی در طبقات، دیفرانسیل فشار در هر طبقه طبق رابطه ۷ محاسبه می‌شود:

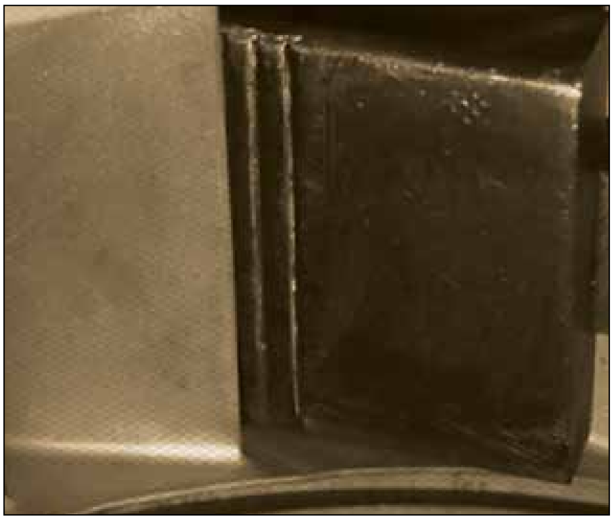
$$dP_{i-1} = \frac{d\dot{m}_i - \frac{\partial \dot{m}_i}{\partial P_i} dP_i}{\frac{\partial \dot{m}_i}{\partial P_{i-1}}}$$

صحت عملکرد این نرم‌افزار با استفاده از اطلاعات تجربی مربوط به یک توربین محوری یک‌طبقه مورد ارزیابی قرار گرفته است که نتایج آن در شکل ۵ و

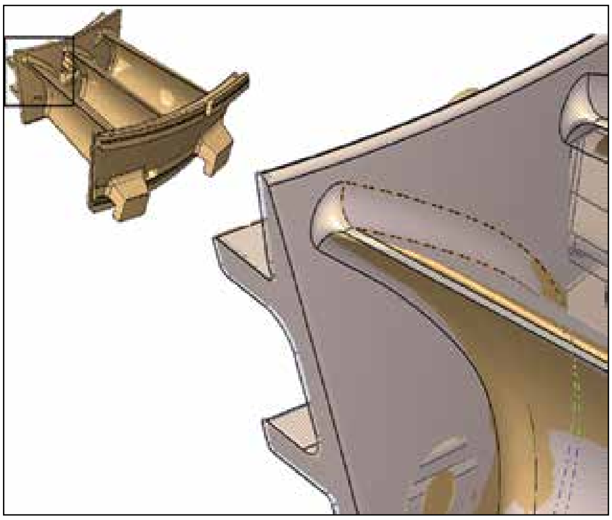


تصویر۹. مقایسه مقطع میانی نازل پس از خم کردن انتهای نازل (سمت راست) و ماشین‌کاری شرود (سمت چپ)

تصویر۱۰. ابزار طراحی شده به منظور تغییر زاویه پره در محل لبه فرار



تصویر۱۱. گوِه مدرج شده برای اندازه‌گیری مساحت گلوگاه



تصویر۱۲. مقایسه ابر نقاط سگمنت نازل توربین توان سولار سنتار، حالت اولیه (خاکستری) و پس از خم کردن (قهوه‌ای)

شکل ۶ نشان داده شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از نرم‌افزار توسعه‌یافته تطابق قابل قبولی با اطلاعات تجربی موجود دارد.

اثر تغییر ظرفیت توربین بر دمای سازگاری

با تغییر مساحت نازل ردیف اول در توربین تولید توان توربین گازی سولار سنتار، نقشه عملکردی توربین به صورت نشان داده شده در شکل ۷ تغییر می‌کند. همانطور که مشاهده می‌شود، در اثر افزایش مساحت گلوگاه نازل، نقشه عملکردی توربین به صورت خطی جابه‌جا می‌شود. با توجه به این ویژگی در توربین‌های محوری، می‌توان اثر تغییر مساحت نازل را در قالب یک ضریب اعمالی بر نقشه عملکرد در نظر گرفت.

با اعمال اثر تغییر ظرفیت بر نقشه عملکردی و استفاده از شبیه‌ساز عملکرد توربین گازی، نمودار توان خروجی توربین گاز بر اساس تغییرات دمای محیط به صورت شکل ۸ نمودار توان خروجی توربین گاز بر اساس تغییرات دمای محیط خواهد بود. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش مساحت نازل اول توربین تولید توان، دمای سازگاری توربین گازی افزایش می‌یابد. با استفاده از این ویژگی می‌توان در دماهای محیطی بالا به توان خروجی بالاتری دست یافت.

در ادامه میزان تغییر مورد نیاز در مساحت نازل اول توربین تولید توان با استفاده از کد تحلیل توربین محاسبه شده است. بدین منظور زاویه نصب نازل به عنوان پارامتر متغیر در یک حلقه تکرار قرار گرفته است تا تغییر ظرفیت مورد نیاز با توجه به شبیه‌ساز توربین گازی تامین شود. نتایج حاصل از این تحلیل برای توربین گازی سولار سنتار دو شفت در شکل ۸ آمده است. توجه می‌شود که با اعمال تغییرات جزیی در نازل توربین توان، امکان تغییر دمای سازگاری میسر خواهد بود.

توربین گازی سنتار با دمای سازگاری ۲۵ درجه سانتی‌گراد در دمای طراحی توانی معادل ۳۰۴۵ کیلووات تولید می‌کند. حال اگر از این توربین گازی در محیطی با دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شود، توان خروجی آن تا ۲۴۱۰ کیلووات کاهش خواهد یافت. اما اگر مساحت نازل اول توربین تولید توان به منظور رسیدن به دمای سازگاری ۵۰ درجه سانتی‌گراد، به میزان ۴ درصد افزایش یابد، توان خروجی در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد معادل ۲۵۳۹ کیلووات خواهد بود که به معنای افزایش ۵/۳ درصدی توان خروجی توربین گازی است.

اعمال تغییر مساحت نازل در کارگاه

در حین تعمیرات توربین، اصلاح مورد نظر بر نازل توربین توان به منظور انطباق با دمای محیط قابل انجام است. در صورتی که سگمنت‌های نازل از نوع تک پره باشند، می‌توان با ماشین‌کاری شرود، زاویه نشست نازل و به تبع آن مساحت گلوگاه را تغییر داد.

در صورتی که نازل از سگمنت‌های چند پره تشکیل شده باشد، تنها با استفاده از ابزار خاص طراحی شده برای تغییر شکل پره می‌توان مساحت گلوگاه نازل توربین توان را به صورت نصب شده بر توربین تغییر داد.

مصاحبه با آقای مهندس نصرت الله سلیمانی

مجری پروژه‌های ساخت ماشین آلات فرآیندی شرکت مناطق نفت‌خیز جنوب

مهندس نصرت‌الله سلیمانی دارای بیش از ۳۵ سال تجربه در ارتباط با ماشین‌های دوار در صنعت نفت و گاز در حوزه‌های مختلف بهره‌برداری، تعمیرات و نگهداری و همچنین مدیریت ارشد این دو حوزه هستند که در کنار دانش حاصله از اجرای پروژه‌های مختلف مربوط به ماشین‌های دوار از متخصصان شناخته‌شده این صنعت به شمار می‌آیند. ایشان در حال حاضر به عنوان مجری پروژه‌های ساخت ماشین‌آلات فرآیندی در شرکت مناطق نفت‌خیز جنوب متولی چندین پروژه مهم ساخت تجهیزات دوار همچون توربین‌های گاز هستند. دراین میان پروژه‌ها، پروژه ارتقای توربین گاز سولار سنتار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که در این رابطه و سایر موارد در حوزه ساخت داخل این نوع از تجهیزات با ایشان به گفت‌وگو نشسته‌ایم.

به عنوان اولین سوال خواهشمندم بفرمایید اهمیت پروژه ارتقای توربین گاز را چگونه ارزیابی می‌کنید؟

بسم الله رحمن الرحیم. در پاسخ به سوال جنابعالی باید عرض کنم اهمیت ارتقا را از دو جنبه باید ارزیابی نمود. اول از همه از آنجا که توربین احتراقی گاز عمدتا در صنعت نفت محرک کمپرسورهای فرآیندی گاز و تلمبه‌های انتقالی نفت مورداستفاده است با تغییر در وضعیت مخازن و به تبع آن تغییر در شرایط گاز و همچنین تغییرات دمایی محیط در فصول مختلف و تغییر در جرم ملکولی گاز به توان بیشتری نیاز می‌شود. در ارتباط با تلمبه‌ها که ماموریت جابه‌جایی و انتقال نفت و میعانات نفتی را عهده‌دار است با افزایش تولید توان بیشتر محرک را به دنبال خواهد داشت و لذا ارتقای توان توربین دسترسی به توان بیشتر را میسر می‌گرداند. دوم اینکه با دستیابی به دانش ارتقا یک توربین گاز پایه‌های دانش طراحی، ساخت و تولید توربین‌های گاز مختلف نیز ایجاد خواهد شد. به دلیل ضرورت این نیاز و اهمیت توسعه دانش در این حوزه، پروژه ارتقای توربین گاز و بومی‌سازی آن تعریف شده و شرکت توربین ماشین خاورمیانه به عنوان یک شرکت دانش بنیان با سابقه خوب در انجام پروژه های ساخت توربین های گاز جهت انجام این پروژه انتخاب شد. که خوشبختانه از ابتدای شروع پروژه تا کنون پیشرفت مناسبی در پروژه داشته‌اند که در صورت حفظ این سرعت در پیشرفت پروژه امیدوارم اولین توربین گاز ارتقا یافته بومی‌سازی شده به‌زودی تحویل گردد.

به عنوان سوال دوم آیا به نظر شما انجام این کار (ساخت داخل این تجهیزات) اقتصادی است؟

پاسخ به این سوال را از چند جنبه باید مورد ارزیابی قرار داد:

اولا با ساخت داخل تجهیزات پیشرفته بالاخص ساخت توربین گاز به عنوان یک تجهیز بسیار پیچیده، کاهش وابستگی به بیگانه را به دنبال خواهد داشت و در صورت دستیابی به فناوری بومی‌سازی و ساخت کامل توربین و ماشین‌های فرایندی از این قبیل، استقلال صنعتی را در این زمینه به دنبال خواهد داشت.

دوم اینکه این عمل یعنی ساخت توربین در داخل کشور باعث کارآفرینی و اشتغال‌زایی می‌گردد. ضمن اینکه خرید و تامین تجهیزاتی از این دست باعث خروج میلیون‌ها دلار ارز می‌شود. لذا اگر توانمندی ساخت در کشور مهیا گردد، مانع خروج این میزان ارز به خارج از کشور می‌گردد.

و نهایتا با توسعه توان ساخت در کشور و دسترسی آسان به سازنده و بهره جستن از قطعات یدکی ساخته‌شده توسط ایشان، عملیاتی بودن توربین (OPERATIVE) و در نتیجه تداوم تولید را با ثبات‌تر خواهد نمود که از نظر اقتصادی بسیار مقرون به صرفه است.

به عنوان کسی که سابقه طولانی در صنایع نفت و گاز آن هم در شرکت مناطق نفت‌خیز جنوب به عنوان بزرگترین تولیدکننده نفت کشور دارد و تجربه کار با شرکت‌های خارجی و داخلی سازنده این تجهیزات را نیز در کارنامه دارد چه مقایسه‌ای می‌توانید بین شرکت‌های داخلی و خارجی انجام دهید؟

شرکت‌های خارجی چون خود صاحب صنعت بودند لذا با پشتوانه تجربه چند ۱۰ ساله صنعتی کالاهای عرضه‌شده آنان دارای کیفیت مطلوب بوده؛ به عنوان مثال آنان ساخت تجهیزاتی همچون توربین را از حدود یک قرن پیش آغاز و طی این مدت با ارتقای دانش فناوری و امثالهم و ضعف‌های خویش را در تولید و ساخت کالا

مطلوب و کیفی در سال‌های متمادی برطرف نمودند. از طرفی در مملکت نوپای ما از نظر صنعت ساخت توربین که هنوز گام‌های اولیه را بر می‌دارد لذا فاصله زیادی با شرکت‌های خارجی دارد اما بدین معنی نیست که سازندگان داخلی نتوانند به آن تکنولوژی و کیفیت دست یابند. نمونه بارز آن شرکت توربین ماشین خاورمیانه است که به دانش ساخت پس از سال‌ها تلاش و کوشش دست یافته و قطعات ساخته‌شده توسط این شرکت با کیفیت مطلوب روی توربین‌های عملیاتی شرکت نفت نصب و به‌حول و قوه الهی تا چند ماه دیگر شاهد ساخت کامل توربین با برند ملی توسط این شرکت خواهیم بود.

چالش‌های توسعه ساخت تجهیزات پیچیده همانند توربین و کمپرسور را در داخل کشور چه می‌دانید؟

نه تنها در صنعت توربین بلکه در بسیاری از صنایع بزرگ و مادر با چالش‌های بسیار جدی و البته مشابه مواجه هستیم. دلایل متعددی برای عدم موفقیت در این بخش وجود دارد که رفع همه آن‌ها در کنار هم می‌تواند زمینه‌ساز رشد و بالندگی در این صنعت گردد که سعی خواهم کرد به بعضی از آن‌ها اشاره کنم.

نکته اول اینکه دولت می‌بایست یک نگاه استراتژیک به تولید داشته باشد و اولویت‌های تولیدی به سمت صنایعی متمایل نگردد که در صورت عدم تولید آن‌ها در داخل کشور و در شرایط بحرانی مانند جنگ یا تحریم‌های اقتصادی به راحتی و به روش‌های مختلف و از کشورهای متفاوتی می‌توان نیاز داخل را تامین نمود، حال آنکه کمبود تجهیزاتی همچون توربین سبب می‌گردد صنایع مهمی چون تولید برق نیروگاه‌ها، تولید نفت، صنعت حمل و نقل و بسیاری از بخش‌های مهم دیگر زمین گیر شود.

نکته دوم، نگاه غیر کارشناسانه بعضی از مدیران دولتی به این صنعت است. از آنجا که قریب به یک قرن از صنعت توربین‌سازی در کشورهای پیشرفته دنیا می‌گذرد، شرکت نوپای داخلی توان رقابت کیفی و کمی با رقیبان خارجی خود در بدو تاسیس را ندارند. از آنجا که معمولا مدیران دولتی سعی دارند در دوره مدیریت خود این اقدام را به سرانجام رسانده و به عنوان بخشی از افتخارات مدیریتی خود به آن ببالند و با توجه به عمر کوتاه مدیریت در کشور و بالاخص پست‌های سیاسی و مدیریتی به‌جای یک نگاه دراز مدت سازنده با نگرش عجولانه خود سبب تولید محصولات بی کیفیت گشته و موجبات حذف شرکت‌های نوپای داخلی را فراهم می‌آورند. همچنین گاها با تغییر ساختار دولت، نگرش به امر تولید و بالاخص در این صنعت (توربین) بطور کامل عوض گردیده و همین امر سبب عدم اطمینان سرمایه گذاران و تولید کنندگان شده است.

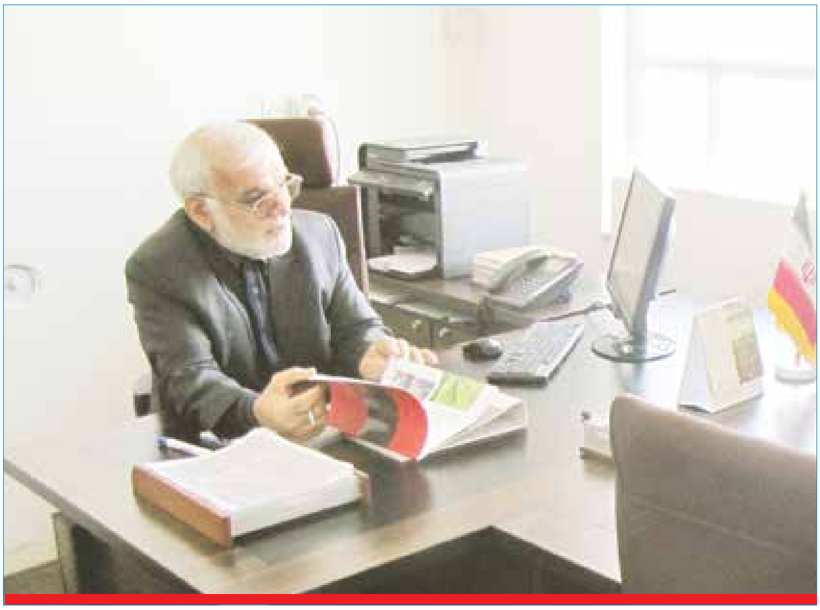
یکی دیگر از عوامل اصلی اثرگذار بر ماندگاری یک صنعت قیمت تمام‌شده آن در مقایسه با محصولات مشابه خارجی است. با توجه به هزینه بالای اولیه تولید، تامین مواد اولیه بخصوص به دلیل محدودیت‌های تحریم بازار تقاضای کاملا داخلی و محدوده و عدم هر گونه حمایت منطقی سیستم بانکی از تولیدات داخلی لذا قیمت تمام‌شده محصول در بدو امر ممکن است گران‌تر از نمونه مشابه خارجی باشد.

مساله بعدی تضمین بازگشت سود برای سرمایه‌گذاران است. با توجه به اینکه بازار فروش این محصول عمدتا در بدنه دولت تامین می‌گردد و معمولا مشتری بخش خصوصی برای خرید توربین بسیار محدود خواهد بود لذا به فرض مناسب بودن همه شرایط تولیدکننده می‌بایست اطمینان کافی از بازگشت سرمایه خود پس از سرمایه‌گذاری و تولید را کسب نماید. این اطمینان می‌تواند از انعقاد قراردادهای دراز مدت خرید و خدمات پس از فروش محصول فراهم گردد. بدین ترتیب سرمایه‌گذار فرصت مناسب برای تولید محصولات با کیفیت بالاتر و نیز ارتقای دانش فنی خود و کاهش هزینه‌های تولید را خواهد داشت.

یک مساله مهم دیگر عدم توجه جدی اساتید دانشگاه و بدنه علمی جامعه به مقوله تولید تجهیزاتی از این دسته است. دانشکده‌های مهندسی در رشته‌هایی مانند مهندسی متالورژی مهندسی مکانیک مهندسی برق و .... که اساس دانش ساخت ماشین‌آلات دوار را تشکیل می‌دهند نگاه خود را بیشتر به صنایع دفاعی و تولید خودرو معطوف نموده‌اند و همین امر سبب عقب ماندگی علمی در این زمینه شده‌است.

نکته مهم بعدی اصلاح ساختار قوانین است. در حالی که به فرموده مقام معظم رهبری حرکت جدی به سمت تولیدات داخلی و اقتصاد مقاومتی از اولویت‌های جدی نظام می‌باشد اما قوانین مرتبط با بازرگانی، تجارت و مناقصات مرتبط با خرید کالا و خدمات و همچنین قوانین کار همچنان بر اساس شرایط عادی و عمدتا به ضرر تولیدکننده برقرار بوده و نیازمند تحول جدی در این زمینه هستیم.

در طول سال‌های تحریم و محدودیت‌های اقتصادی، حتی به ضرورت اجبار، فضای کار برای پذیرش محصولات داخلی باز تر شد. اکنون که به حمدالله تلاش‌های زیادی



برای عادی‌سازی روابط با سایر کشورها در جریان است، چه اقداماتی بایستی صورت گیرد تا از دستاوردهای صنایع داخلی که خوب بعضا هنوز در حال رشد بوده و قابلیت رقابت با شرکت‌های بزرگ خارجی را ندارد صیانت کرد؟

با توجه به تجربه چندین دهه بعد از انقلاب و رفتارهای کشورهای غیر حامی انقلاب اسلامی در صورت عادی‌سازی روابط با آنان بسیار ساده‌لوحی است که تصور کنیم برقراری روابط سیاسی و اقتصاد به خصوص در زمینه صنعتی بدون وابستگی بدان‌ها به آسانی حاصل می‌گردد؛ لذا سیاست دولت حمایت از سازندگان داخلی است و باید به گونه‌ای برنامه‌ریزی و راهبری نمایند که شرکت‌هایی را که توان مالی مناسب و مطلوب را ندارند، حمایت نموده و در این ارتباط به گونه‌ای تعدیل برقرار کنند که سازندگان ضعیف هم با ارائه توانمندی خویش بالاخص ارتقای کیفی محصول خویش که البته نیازمند سرمایه مناسب است، در بازار رقابت باقی بمانند.

اخیرا مقام عالی وزارت نفت دستور پیگیری ساخت داخل ده گروه کالای استراتژیک صنعت نفت را صادر کرده‌اند. در این خصوص چه فعالیت‌هایی آغاز شده و چه موانعی را برای تحقق این خواسته‌ها متصور هستید؟

استحضار دارید وفق ابلاغیه اخیر وزیر محترم نفت در ارتباط با کالاهای ده‌گانه توسط معاون محترم پژوهش و فناوری کمیته‌های تخصصی برای گروه خانواده‌های کالا مرتبط با نیازهای کارگروه معین (مناطق نفت‌خیز، معین سه نوع کالا از جمله توربین) و انجام جلساتی متعدد در تهران توسط شرکت‌های تابعه وزارت نفت و مناطق نفت‌خیز منعقد و موارد مربوطه را پیگیری نموده است؛ ضمن اینکه باید اشاره داشته باشم فضای بوجود آمده در ارتباط با بومی‌سازی نیازهای صنعت نفت در صورت راهبری و هدایت صحیح برکات خوبی را به دنبال خواهد داشت و باید از این فضای بوجود آمده کمال بهره‌وری سالم و پویا را کنیم. از اقدامات انجام گرفته می‌توان اشاره کرد به:

۱-استخراج فهرست اقلام و تجهیزات مورد نیاز هر شرکت مشمول ۱۰ گروه کالای ابلاغی و تهیه و تنظیم تقاضاهای خرید با ذکر تعداد (که این مهم توسط کارگروه‌های معین انجام و ارائه گردید) .

۲-تهیه و تنظیم شرح نیاز خدمات ساخت (RFP) جهت هر یک از کارگروه‌های خانواده‌های کالا شامل:

۲-۱ ارائه مشخصات فنی کالای مورد نیاز

۲-۲ تعیین استانداردها و الزامات موردنیاز

۲-۳ ارائه دستورالعمل‌های تست و تحویل گیری کالا (ITP) که اینکار در حال انجام است. در این ارتباط قاعدتا نباید موانعی در مسیر انجام کار واقع گردد مگر تامین اعتبار چرا که بیشتر تعلل و عقب‌افتادگی در ارتباط با پروژه‌های ساخت تجهیزات عدم پرداخت به موقع و تغذیه مالی به سازندگان است که امید است بحول و قوه الهی با توجه به پیگیری توسط کارگزاران در سطح کلان کشور راه هموار گردد.

اهمیت پروژه‌های داخلی‌سازی این گروه‌های ده گانه در صنعت نفت را چگونه ارزیابی می‌کنید؟

اقتدار و بالندگی و توانمندی هر کشور در نگاه اول عدم وابستگی که نشات‌گرفته از خودکفایی در زمینه‌های اقتصادی، فرهنگی، سیاسی و داشتن تکنولوژی به روز است. تجربه جاری و ساری به ما این نکته را گوشزد می‌نماید که وابستگی در هر زمینه‌ای بالاخص در زمینه صنعتی می‌تواند استقلال آن کشور را با چالش مواجه نماید، چراکه در صنعت نفت که تا قبل از انقلاب توسط خارجیان هدایت و مدیریت و رهبری می‌گردید ناباوران به انقلاب بر این عقیده بودند که صنعت عظیم نفت که تمامی تجهیزاتش حتی از یک پیچ و مهره گرفته تا یک ماشین فرآیندی از خارج وارد می‌شد از پای خواهد افتاد اما دیدیم که همت و تلاش کارگزاران و دست‌اندرکاران و نیروهای کاردان و با تجربه مانع قطع صادرات نفت گردید، اما مع الاسف نتوانستیم به نحوی از فضای به وجود آمده در راستای ساخت تجهیزات در درون مملکت استفاده کنیم و زمان را از دست دادیم.

اما باید بر این باور باشیم که هر کجا جلوی ضرر را بگیریم نفع است حال که مملکت در تحریم بسر می‌برد بهترین فرصت است که پروژه‌های داخلی سازی ماشین آلات را با یک نقشه راه صحیح بومی‌سازی کنیم اهمیت موضوع ساخت داخل جایگاه خویش را به خوبی یافته است و لذا اگر در ارتباط با پروژه‌های ملی بتوانیم ساخت داخل را پشتیبانی نمائیم به اهداف مهمی دست خواهیم یافت.

گردهمایی دوره‌ای مدیران و کارکنان گروه توربین‌ماشین خاورمیانه

گردهمایی مدیران و کارکنان گروه توربین ماشین خاورمیانه در تاریخ ۹۳/۹/۱۸ در محل آمفی‌تئاتر پژوهشکده مهندسی برگزار شد. در این گردهمایی که به صورت دوره‌ای برگزار می‌شود، مدیر عامل و اعضای هیات مدیره شـرکت توربین ماشـین خاورمیانه، مدیران عامل شرکت‌های تامین کالای توربین ماشین خاورمیانه، توربین کمپرسور آسیا، مدیریت پروژه‌های توربیـن ارکان ایرانیان و نیز بیش از یکصد نفر از مدیران و کارکنان شاغل در گروه توربین‌ماشین خاورمیانه حضور داشتند. در ابتدای این نشسـت آقـای مهندس صدیق (مدیرعامل شـرکت مدیریت پروژه های توربین ارکان ایرانیان) در خصوص ساختار شرکت و اسناد بالادستی آن مطالبی ارائه کرد و پس از ایشان آقای دکتر قربانیان (عضو هیات مدیره شرکت توربین ماشین خاورمیانه) به سـخنانی درمورد جایگاه دانش طراحی و ساخت توربین گاز در کشورهای توسعه یافته و اهمیت نقش شرکت توربین ماشین خاورمیانه در ورود به این عرصه ایراد نمود.
در ادامه این مراسـم آقای مهندس هلالی، مدیر عامل شرکت توربین ماشـین خاورمیانه، ضمن ارایه مطالبی در خصوص ویژگی‌های یک سازمان متعالی، اسـتراتژی توسعه شرکت و چالش‌های پیش روی آن را برای حاضـران تبیین نمود. در این گردهمایی همچنیـن، از ۱۹ نفر از مدیران و کارکنان گروه توربین ماشـین خاورمیانه که شایستگی خود را در زمینه‌های مختلف به نمایش گذاشته بودند، قدردانی شده و به آنها جوایزی اهدا گردید. در پایان این گردهمایی جلسه پرسش و پاسـخی با حضور مهندس هلالی برگزار شده و حاضران،برخی از مشکلات کاری و پرسنلی خود را به صورت مستقیم با مدیر عامل شرکت در میان گذاشتند.

انجام تحلیل‌های مهندسی ارتقای توربین

پروژه بومی‌سـازی دانش فنی و سـاخت توربین گاز ارتقا یافته برای شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب به عنوان کارفرمای این پروژه پژوهشـی، توسط گروه توربین ماشین خاورمیانه در حال انجام است. در این پروژه مسئولیت و وظیفه تحلیل‌های مهندسی شامل محاسبات و تحلیل سیکل و عملکرد موتور و همچنین سیستم کنترل آن، تحلیل‌های آیرودینامیک و ترمودینامیک مجموعه کمپرسور و توربین، محاسـبات و تحلیل جریان سرد و گرم در محفظه احتراق، تحلیل‌هـای مربوط به مواد و پوشش‌دهی و محاسبات انتقال حرارت و همچنین تحلیل‌های مکانیک و ارتعاشات مجموعه روتور و قطعات ثابت به شرکت مدیریت پروژه‌های توربین ارکان ایرانیان واگذار گردیده که با هدف دستیابی به روند و چگونگی انجام ارتقای این توربین صورت می‌گیرد.
از بررسـی‌ها و تغییرات صورت گرفته می‌توان به اعمال پوشـش‌دهی‌های جدید و تغییر آلیاژهای قطعات حساس به منظور افزایش عمر مفید آن‌ها اشاره کرد.استفاده‌از پوشش‌های جدید در دیسک‌ها و پره‌های کمپرسور توربین ارتقا یافته باعث افزایش مقاومت به خوردگی قطعات کمپرسور می‌گردد. این افزایش مقاومت به خوردگی علاوه بر افزایش عمر کاری قطعات، می‌تواند فواصـل زمانی لازم برای بازرسی و یا تعویض آن‌ها را بیشتر کرده و در نتیجه باعث کاهش هزینه‌های تعمیرات و نگهداری توربین شود.
در قطعات حساس ناحیه داغ از جمله دیسک‌ها، جنس قطعات به سـوپر آلیاژهـای جدید تغییر کرده است که در دمای کاری این توربین از لحاظ عمر گسـیختگی، مقاومت در برابر خسـتگی و خواص اسـتحکامی برتـری دارد. همچنین به علت حضور عناصر نیوبیوم و مقدار بیشتر کروم، قطعات از اسـتحکام و مقاومت بـه خوردگی در پره‌های ناحیه داغ بالاتری نسبت به نمونه قبلی برخوردارند. در این راسـتا، جایگزینی آلیاژ پایه نیکل IN-738LC باعث ارتقای خواص مواد از لحاظ خواص گسیختگی و کششی و مقاومت بیشتر در برابر خستگی، خزش، سولفیداسیون و خوردگی در پره‌های ناحیه داغ شده است.
از سوی دیگر با بازطراحی مسیرهای خنک کاری محفظه احتراق، میزان سهم هوای تخصیص یافته به منظور خنـک‌کاری دیواره‌های لاینر افزایش یافته که منجر به ایجاد پتانسـیل افزایش دمای خروجی از محفظه و در نتیجه ارتقای توان شده است و با افزایش نسبت سوخت به هوا در محفظه، دمای خروجی از آن از ۱۶۰۰ درجه فارنهایت به ۱۶۶۰ درجه افزایش یافته و توان تولیدی حدود ۱۵ درصد بهبود می‌یابد. با توجه به تغییر دمای کاری و جنس قطعات ناحیه داغ، تنظیم فواصل جدید پره‌ها با سـطوح مجاور بـا توجه به تغییر شرایط انبساطی قطعات، با استفاده از نرم‌افزارهای عددی محاسبه شده و در مونتاژ توربین ارتقا یافته اعمال می‌شود.
فعالیت‌های مذکور برای اولین بار در کشور توسط کارشناسان و متخصصان شرکت مدیریت پروژه‌های توربین ارکان ایرانیان و تحت نظارت و هدایت گروه توربین ماشین خاورمیانه با موفقیت در حال انجام است.
با انجام موفقیت‌آمیز این پروژه که مراحل پایانی خود را سپری می‌کند، برای نخستین بار در کشور ارتقای توربین گاز کلاس ۴ مگاوات با افزایش توان حدود ۵۰۰ اسب بخار انجام می‌گیرد.

دستیابی به دانش فنی اعمال پوشش‌های آلومینایدی

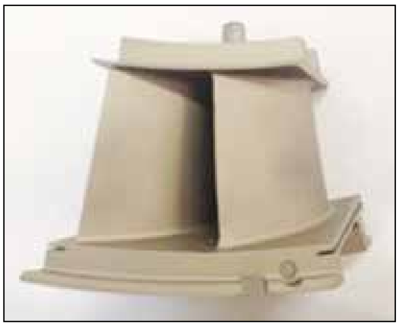
روی قطعات ناحیه گرم توربین در شرکت توربین‌ماشین خاورمیانه

با توجه به شرایط حاد ناحیه داغ توربین، پوشش‌دهی قطعات این ناحیه با هدف محافظت از آن‌ها در برابر آسیب‌های ناشی از شرایط کاری، از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. انتخاب و اعمال پوشش متناسب با شرایط کاری، ضمن افزایش قابل توجه عمر کاری قطعات، می‌تواند میزان آسیب‌های واردشده به آن‌ها را در یک دوره کاری به میزان زیادی کاهش دهد. از سوی دیگر، ایجاد پوشش نامناسب می‌تواند باعث افت خواص و آسیب جدی قطعات در شرایط سرویس شود. پوشش‌های مرسوم قطعات ناحیه داغ توربین به‌طور کلی به دو گروه پوشش‌های روکشی و پوشش‌های نفوذی دسته‌بندی می‌شوند که اعمال هریک از آنها بسته به شرایط کارکرد،روی قطعه اصلی میسر است. پوشش آلومینایدی یکی از انواع پوشش‌های نفوذی است که به روش‌های مختلف از جمله سمانتاسیون پودری، رسوب شیمیایی بخار و پوشش‌دهی دوغابی بر روی سطح قطعات اعمال می‌شود. آلومینایزینگ قطعات ناحیه گرم توربین باعث افزایش محافظت از سطح قطعات در مقابل پدیده‌های مخربی مانند اکسیداسیون دمای بالا و خوردگی داغ می‌شود.

با توجه به فراوانی و تنوع قطعات دارای پوشش آلومینایدی که در شرکت توربین‌ماشین خاورمیانه تولید و یا بازسازی می‌شوند و نیاز به اعمال پوشش‌های با کیفیت بالا روی آنها، تدوین دانش فنی اعمال این پوشش‌ها در قالب یک پروژه در دستور کار واحد مهندسی این شرکت قرار گرفت. این پروژه در سه فاز تحقیقاتی، نیمه‌صنعتی و صنعتی انجام شد و در نهایت در خرداد ماه سال ۱۳۹۳ با موفقیت به پایان رسید. در این پروژه با توجه به بررسی‌های صورت گرفته از میان روش‌های موجود، روش سمانتاسیون پودری برای آلومینایزینگ قطعات انتخاب شد. همچنین پارامترهای پوشش‌دهی از قبیل دما، زمان، تعداد سیکل‌های عملیات و ترکیب شیمیایی مخلوط پودری بر اساس یافته‌های آزمایشگاهی در مقیاس صنعتی بهینه شد. ضمن اینکه تجهیزات صنعتی لازم برای اعمال این پوشش‌ها متناسب با هندسه و ابعاد قطعات و ویژگی‌های متالورژیکی مواد به‌کاررفته در آن‌ها در واحد بازسازی شرکت، ساخته و راه‌اندازی گردید. در حال حاضر و با تکیه بر دستاوردهای این پروژه، پوشش‌های آلومینایدی روی نازل‌های ردیف اول، دوم و سوم توربین سولار- سنتار و دیگر قطعات مشابه به صورت صنعتی در شرکت توربین‌ماشین خاورمیانه اعمال می‌شوند. لازم به ذکر است قطعات پوشش داده شده در این پروژه هم‌اکنون تحت سرویس بوده و زمان کارکرد آنها از ۳۵۰۰ ساعت گذشته است.

شایان ذکر است دانش فنی اعمال پوشش‌های قطعات ناحیه گرم توربین در دنیا در انحصار شرکت‌های معدودی است و اطلاعات مربوط به آن در اختیار دیگر شرکت‌ها قرار نمی‌گیرد. از این رو دستیابی به فناوری اعمال پوشش‌های آلومینایدی در شرکت توربین ماشین خاورمیانه تماما به اتکای دانش و تجربیات مهندسان و پژوهشگران این شرکت محقق شده‌است.

نمونه‌هایی از نازل‌های توربین های گازی زیر ۱۰ مگاوات که در شرکت توربین‌ماشین خاورمیانه پوشش‌دهی شده‌اند



دستیابی به فناوری اعمال پوشش‌های آلومینایدی در شرکت توربین ماشین خاورمیانه تماما به اتکای دانش و تجربیات مهندسان و پژوهشگران این شرکت محقق شده‌است

چهره ماندگار صنعت، معدن و تجارت ایران

مهندس حسن هلالی به عنوان چهره ماندگار صنعت، معدن و تجارت ایران معرفی شد.

در هشتمین جشنواره ملی مدیران و تولید کنندگان جوان با حضور معاون محترم ریاست جمهور، معاون محترم وزیر نفت، استاندار تهران، ریاست سازمان استاندارد، قائم مقام مدیر عامل مناطق ویژه و آزاد تجاری کشور و روسای خانه صنعت، معدن و تجارت و جوانان و بیش از ۵۰۰ نفر از فعالان بخش خصوصی، نشان ویژه چهره ماندگار امسال به آقای مهندس هلالی مدیرعامل شرکت توربین‌ماشین خاورمیانه و سه نفر دیگر از فعالان صنعت در طی مراسمی اهدا گردید.

همچنین در این مراسم با اهدای لوح تقدیر و تندیس جشنواره از تعدادی از واحدهای تولیدی فعال در حوزه طراحی، ساخت و تولید در بخش صنعت معدن و تجارت نیز تقدیر و تشکر به عمل آمد.

برگزیدگان این مراسم بر اساس معیارهای ویژه هیات داوری خانه صنعت و معدن و با همکاری و اشراف سازمان Unido با محوریت کارآفرینی، ابتکار، خلاقیت، نوآوری، کاهش هزینه‌های تولیدی و صنعتی، مدیریت بحران، پردازش ایده‌های جدید و دیگر فعالیت‌های علمی و صنعتی و پژوهشی انتخاب و برگزیده شده‌اند.

مهندس حسن هلالی مدیرعامل شرکت توربین ماشین خاورمیانه به عنوان چهره ماندگار صنعت معدن و تجارت ایران معرفی شد

از کتاب و فیلم ۵۰۰۰ سال مهندسی ایرانی رونمایی شد

به نقل از سایت دانشگاه تهران،به مناسبت هشتادمین سالگرد تاسیس دانشکده فنی دانشگاه تهران با حضور اندیشمندان داخلی و خارجی از کتاب و فیلم ۵۰۰۰ سال مهندسی ایرانی رونمایی شد. دکتر محمود نیلی احمدآبادی، سرپرست دانشگاه تهران در این مراسم با اشاره به محل برگزاری مراسم گفت: سالن شهید چمران دانشکده فنی دانشگاه تهران که به نام یکی از پرافتخارترین فارغ‌التحصیلان این دانشکده نام‌گذاری شده اســت، همواره شاهد رویدادهای بسیاری بوده و امشب هم چنین است چرا که قرار است تاریخ ۵ هزار ساله مهندسی را به ایرانیان و جهانیان عرضه کند.

گردهمایی در سالن کنفرانس پتروشیمی بندر امام

پیرو توانمندی گروه توربین‌ماشـین خاورمیانه در خصوص ماشـین‌آلات دوار بـه ویژه صنایع نفت، گاز و پتروشـیمی، در مورخه ۹۳/۱۰/۳۰ گردهمایی در سـالن کنفرانس شرکت محترم پتروشیمی بندرامام با حضور مدیریت بازرگانی، روسای تعمیرات، مهندسان و کارشناسان ارشد واحد تعمیرات از شـرکت محترم پتروشـیمی بندر امام، فرآورش، کیمیا، خوارزمی و آب‌نیرو و اعضای هیات مدیره، مدیر بازرگانی و کارشناسان گروه توربین ماشین خاورمیانه برگزار شد که در این نشسـت اعضای گروه توربین‌ماشین پس از بازدید از واحدهای عملیاتـی و انبارهای آن شرکت محترم و بررسـی موارد مورد همکاری به معرفی توانمندی‌های ساخت داخل در زمینه ماشـین‌آلات دوار از جملـه توربین‌های گاز و بخار و کمپرسـورهای گریز از مرکز پرداختند و در ادامـه تعاملات مفیـدی در زمینه انتقال تجربیات صورت پذیرفت که با استقبال مدیران محتـرم پتروشـیمی در رابطه با اسـتفاده از توانمندی‌های سـاخت داخل و بهینه‌سـازی ماشین‌آلات واحدهای عملیاتی با هدف کاهش هزینه‌هـای تولید و رقابتی کـردن محصولات پتروشیمی بندرامام در بازارهای جهانی، زمینه همکاری‌های آتی دو شرکت هموار شد.

یازدهمین نمایشگاه بین‌المللی انرژی کیش

یازدهمین نمایشگاه بین‌المللی انرژی کیش به‌عنوان جایگاه معرفی توانمندی کشور در زمینه نفت، گاز، برق، آب و انرژی‌های نو از تاریخ ۲۲ لغایت ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳ در مرکز نمایشگاه‌های بین‌المللی کیش برگزار گردید.

در یازدهمین نمایشگاه بین‌المللی انرژی کیش از ۱۵۰ شرکت داخلی و ۶۰ شرکت خارجی نمایندگی از کشورهای چین، کره، ایتالیا، آلمان، ترکیه، فرانسه، هلند و هند در فضایی به وسعت ۱۸۰۰۰ متر مربع در بخش‌های مختلف نمایشگاه، خدمات و کالاهای خود را به معرض نمایش قرار دادند. بر اساس اطلاعات موجود در دهمین دوره، خریداران و تجار از کشورهای حوزه خلیج فارس، آسیای میانه، افغانستان، عراق و همچنین مدیران، متخصصان، صاحبان صنایع، مراکز علمی و دانشگاهی خارج از کشور و بازدیدکنندگان خارجی حضور داشتند.

گروه توربین‌ماشین خاورمیانه شامل شرکت‌های مدیریت پروژه‌های توربین ارکان ایرانیان و شرکت تامین کالای توربین‌ماشین خاورمیانه نیز همچون سال‌های گذشته در این نمایشگاه شرکت کرده و شرکت‌های پتروشیمی و نفتی چون شرکت پارس جنوبی، شرکت بهره‌برداری نفت و گاز گچساران، انتقال گاز ایران، شرکت گاز ایران، پتروشیمی مارون، شرکت نفت و گاز پارس POGC، شرکت نفت فلات قاره و آب و برق کیش از غرفه این شرکت بازدید به‌عمل آوردند.

این شرکت پروژه تحویل دو پکیج کامل کمپرسور سانتریفیوژ با طراحی مجدد شرکت توربین‌ماشین خاورمیانه را بعد از طراحی، ساخت، نصب و راه اندازی برای دو دستگاه توربین Elliot به شرکت بهره‌برداری نفت و گاز گچساران به‌طور رسمی تحویل داده و گزارشات فنی آن نیز در محیط نمایشگاهی با مسئولان ذی‌ربط به بحث و ارائه گذاشته شد.

هدف ثانی از شرکت در این نمایشگاه معرفی پکیج‌های آب شیرین کن بر پایه توربین‌های گاز تولیدی با دانش ۱۰۰ درصد بومی شده توسط شرکت توربین‌ماشین خاورمیانه بود.

این تجهیزات تولید در پکیج‌های کوچک بدون آنکه آسیب زیست محیطی به خلیج فارس وارد کنند، قابل بهره‌برداری در حاشیه شمالی خلیج فارس هستند. هریک از بسته‌های تولید همزمان برق و آب می‌توانند حداکثر تا ظرفیت ۱۵۰۰۰ متر مکعب در روز آب قابل شرب را تامین کنند.

در یازدهمین نمایشگاه بین‌المللی انرژی کیش از ۱۵۰ شرکت داخلی و ۶۰ شرکت خارجی نمایندگی از کشورهای چین، کره، ایتالیا، آلمان، ترکیه، فرانسه، هلند و هند در فضایی به وسعت ۱۸۰۰۰ متر مربع در بخش‌های مختلف نمایشگاه، خدمات و کالاهای خود را در معرض نمایش قرار دادند

بازدید از نمایشگاه ADIPEC ۲۰۱۴

نمایندگان شرکت توربین ماشین خاورمیانه از نمایشگاه ADIPEC 2014 بازدید نمودند. این نمایشگاه که به عنوان یکی از بزرگترین گردهمایی‌ها در صنعت نفت و گاز خاورمیانه است امسال در تاریخ ۱۳-۱۰ نوامبر در ابوظبی برگزار شد. گفت و گوها و مذاکرات متعدد فنی و بازرگانی درخصوص توسعه بازار برای ایجاد ارتباط گسترده با شرکت‌های بین‌المللی انجام شد که در فعالیت‌های آتی شرکت نقش سازنده‌ای خواهد داشت.

پانزدهمین نمایشگاه دستاوردهای پژوهش و فناوری ایران

پانزدهمین نمایشگاه دستاوردهای پژوهش و فناوری ایران از تاریخ ۲۳ الی ۲۶ آذرماه در محل نمایشگاه بین‌المللی تهران برگزار شد.
گروه توربین‌ماشین خاورمیانه با دو محصول موتور توربوژنراتور در غرفه شماره ۳۹ و روتور توربین ۵ مگاوات در غرفه شماره ۴۴ (غرفه فناوری‌های منتخب) در این نمایشگاه حضوری فعال داشت.

ششمین نمایشگاه تخصصی صنعت نفت خوزستان

ششمین نمایشگاه تخصصی صنعت نفت خوزستان در آذرماه سال جاری برگزار گردید و گروه توربین‌ماشین خاورمیانه با توجه به حوزه فعالیت خود در صنایع نفت، گاز، پالایش و پتروشیمی در این نمایشگاه حضور یافت و با توجه به دستیابی این مجموعه به تکنولوژی ساخت روتور کمپرسور گریز از مرکز بورسیگ فشار بالا، روتور ساخته شده توسط این شرکت در غرفه شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب، توسط جناب آقای مهندس جوادی مدیرعامل محترم شرکت ملی نفت ایران رونمایی شد.
کمپرسورهای بورسیگ اشاره‌شده ساخت کشور آلمان بوده و از نظر عملکردی با توان کاری ۱۰ مگاوات و فشار افزایی تا ۲۰۰ بار جهت تزریق گاز در سایت CS600 شرکت بهره‌برداری نفت و گاز آغاجاری در حال سرویس‌دهی می‌باشد و آخرین تکنولوژی کمپرسورهای موجود در سطح شرکت ملی نفت محسوب می‌شود که مورد بازدید و استقبال بهره‌برداران محترم از شرکت‌های ملی نفت ایران، شرکت ملی گاز، شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب، پتروشیمی‌های بندر امام، رازی، مارون، فن‌آوران و دیگر شرکت‌های تابعه وزارت نفت قرار گرفت.
همچنین در این نمایشگاه معاونت محترم نیروی انسانی و روابط عمومی وزارت نفت و مدیریت محترم شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب شرکت ملی حفاری ایران از غرفه این گروه صنعتی بازدید به‌عمل آوردند.
لازم به ذکر است در این نمایشگاه پکیج کامل ساخت داخل توربین‌های تولیدی گروه توربین ماشین خاورمیانه مورد بازدید مدیران و کارشناسان محترم صنایع نفت و انرژی قرار گرفت و نقش مهم و استراتژیک این تجهیز به عنوان قلب تپنده صنعت نفت و گاز و انرژی توسط بهره‌برداران و متقاضیان این توربین‌ها مورد تاکید قرار گرفت.

تولید اقتصادی آب شیرین با استفاده از توربین‌های گاز

تمــام مراحل شناســایی، مهندســی، طراحی معکوس، بازطراحی و ســاخت اجزا و قطعه‌های توربین گاز بدون هیچ‌گونه کمک فنی از ســوی شرکت‌های خارجی صورت گرفته است.

مدیر دفتــر مطالعه‌ها و بهــره‌وری منابع تولید سازمان بهره‌وری انرژی ایران (ســابا) از تولید اقتصادی آب شیرین با اســتفاده از توربین‌های گاز خبر داد. مهندس غلامرضا بیاتی در گفت‌وگو با پایگاه اطلاع‌رسانی وزارت نیرو (پاون)، اظهار داشــت: توربین گازی به‌عنوان محرک اصلی، مهم‌ترین بخش یک مولد همزمان برق و حرارت است که ساخت و بومی‌ســازی این مولدها در کشــور، بزرگ‌ترین گام در توسعه فناوری‌های تولید انرژی و سامانه‌های تولید همزمان است.

وی بــا بیــان اینکه تمــام مراحل شناســایی، مهندسی، طراحی معکوس، بازطراحی و ساخت اجزا و قطعه‌های این توربین گاز بدون هیچ‌گونه کمک فنی از سوی شرکت‌های خارجی صورت گرفته اســت، گفت: دانش فنــی، فرآیندهای مهندسی تدوین‌شده و زنجیره تامین شکل گرفته در آن، نیاز بخش‌های مختلف کشــور از جمله وزارت‌خانه‌های صنایع، نیــرو و نفت در زمینه توربین‌های گاز و تجهیزات دوار مشــابه را رفع خواهد کرد.

وی ادامــه داد: یکــی از راهکارهای اساســی در گســترش منابع آب شــیرین، اســتفاده از ســامانه‌های آب شیرین‌کن و اســتحصال آب شــیرین از آب دریا اســت که در زمان حاضر بســیاری از واحدهــای آب شــیرین‌کن مورد استفاده در داخل کشور از سامانه غشایی (RO) اســتفاده می‌کنند که این روش توان الکتریکی بالایی نیــاز دارد و محدودیت‌های تامین حجم بالای برق از شبکه سراســری، توسعه استفاده از این آب شیرین‌کن‌ها را با مشکل مواجه کرده است.

مدیر دفتر مطالعه‌ها و بهره‌وری منابع تولید سابا یکی از روش‌های مناســب افزایش منابع آب را اســتفاده از حرارت اتلافی واحدهای گازی در سامانه‌های تولید همزمان آب و برق با ظرفیت پایین و به‌طور پراکنده عنوان کرد و گفت: در این سامانه به‌منظور تامین انرژی موردنیاز واحد آب شیرین‌کن، از مولدهای (مصرف‌کننده سوخت فســیلی) تولید برق در مجاورت آن اســتفاده شده است که افزون‌بر امکان بهره‌برداری جهت تامین برق به‌صورت مستقل از شبکه، از تلفات حرارتی مولد در سامانه آب شیرین‌کن حرارتی نیز استفاده می‌شــود. وی یادآور شــد: نتایج بررسی‌های دوجانبه در شرکت توربین ماشین خاورمیانه و سابا نشان می‌دهد که اقتصادی‌ترین گزینه برای تولید آب شیرین، استفاده از توربین گاز ملی است.

تدوین برنامه ۵ ساله بومی‌سازی تجهیزات مورد نیاز مناطق نفت‌خیز

مدیر تــدارکات و امور کالای شــرکت ملی مناطــق نفت خیز جنوب گفت: به‌منظور بومی‌ســازی بخش عمده‌ای از تجهیزات اســتراتژیک مورد نیاز این شــرکت برنامه پنج ساله‌ای تدوین شده است.

مهندس ناصر خردمند افزود: این برنامه به‌گونه‌ای تهیه شــده اســت تا مهم‌ترین قطعــات و تجهیزات مورد اســتفاده مانند توربین‌ها، کمپرسورها و پمپ‌های فرآیندی به ترتیب اولویت، بومی‌سازی شود. وی اظهار کرد: در سال‌های گذشته نسبت به بومی‌ســازی برخی قطعات توربین‌ها و پمپ‌ها اقداماتی صورت گرفت که اکنون برای ســاخت تمام مجموعــه توربین و پمپ گام‌های مهمی برداشته شده است.

مهندس خردمند گفت: سال گذشته در مورد پمپ BB3 به نتایج قابل قبولی دســت یافتیم و یک ســازنده توانمند داخلی برای ساخت آن در نظر گرفته شد که امیدواریم ساخت آن را در مدت یک‌سال به انجام برســاند. مدیر تدارکات و امور کالای شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب گفت: در خصوص کمپرســورهای فرآیندی نیز این روند را پیگیری کردیم و خوشــبختانه نتیجه خوبی گرفتیم و در آینده نزدیک، مجموعه کامل توربین گازی ساخته خواهد شد.

وی افزود: در سال‌جاری یکی از اقلام پیچیده توربین‌های گازی که تا یک سال پیش هیچ تولیدی از آن نداشتیم بومی‌سازی شد که در نمایشــگاه تخصصی تجهیزات صنعت نفت خوزستان در آذرماه امسال رونمایی می‌شود.

مهندس خردمند با اشاره به افزایش تلاش‌های این شرکت برای بومی‌سازی تجهیزات صنعت نفت در سال‌های اخیر گفت: طی دهه ۸۰ حدود ۱۸۵۰ قلم کالا داخلی سازی شده بود، اما از سال ۹۰ تاکنون بیــش از ۱۰ هزار قلــم کالا و تجهیز مهم در داخل کشور ساخته شده و در حال ساخت است.

چهارمین کنفرانس بین‌المللی و هشتمین کنفرانس ملی مدیریت

چهارمین کنفرانس بین‌المللی و هشتمین کنفرانس ملی مدیریت فناوری روز دوشنبه دهم آذر ماه ۱۳۹۳ در مرکز همایش‌های بین‌المللی کیش آغاز به کار کرد. نمایندگان شرکت توربین‌ماشین خاورمیانه به عنوان سازنده توربین گاز ۴ مگاوات با بهره‌گیری از دانش ایجادشده طی سال‌ها فعالیت و تجربه و براساس روش‌های نوین مدیریت فناوری، در این همایش که به مدت دو روز با محورهای نقش شبکه بنگاه‌های کوچک، متوسط، بزرگ و دانش‌بنیان در تجاری‌سازی دانش و فناوری، مدیریت نوآوری در شبکه بنگاه‌های فوق‌الذکر، نقش یکپارچه‌کننده‌های دانش و فناوری در شبکه بنگاه‌های کوچک، متوسط، بزرگ و دانش‌بنیان،دیپلماسی فناوری درخدمت توسعه و انتقال دانش و فناوری و بسترهای ملی لازم برای تجاری‌سازی دانش و فناوری (در کشورهای در حال توسعه) برگزار گردید، حضور یافتند.

کوهپیمایی اعضای شرکت توربین ماشین خاورمیانه به همراه مدیرعامل

You Will Read

Solar Centaur Performance Improvement Using Steam Injection

Steam Injection is one of the most effective methods to improve the performance and decrease the emission of gas turbine engines. In this study, the effect of using steam injection system on the performance of Solar Centaur gas turbine engine was simulated and output power, thermal efficiency, compressor surge margin, velocity field in axial turbine and turbine isentropic efficiency was examined. In two-shaft engines, turbine inlet temperature and gas generator spool speed are two parameters which limit the output power. On the other hand, matching between compressor turbine and power turbine is a significant phenomenon that affects the performance of engine under steam injection condition. Based on these parameters, three different scenarios for steam injection in the engine were established and, the performance of gas turbine under the condition of these scenarios was simulated. According to the results, there is a new matching point which maximizes the output power and efficiency of gas turbine engine under steam injection.

Rotor Dynamic Analysis of a Steam Turbine By Using Finite Element Method

Rotor Dynamics is one of the main branch of mechanical engineering that scrutiny lateral and torsional vibration. The most important parts, which influence on dynamic systems are include: Disc, shaft, blade, bearing and seal.
The purpose of this study is to find the critical speed of the turbine shaft, analysis of each row blades and possibility of resonance phenomena in the blades. To achieve this goal, modal analysis has been used.

Why Industrial Estates should use CHP in Iran?
What infrastructure is required for this use?Element Method

Due to centralization of different industries in Industrial Estates, the consumption of electricity power is high. Most of these estates are far away from power plants which cause huge waste of power in a transmission system (distribution grid). In addition, because of the existence of a variety of industries in these estates, the possibility of heating energy and cooling energy usage during the whole of the year have increased. As a result, power generation at Industrial Estates will reduce the transmission waste and also, with recovering energy from the initial stimulus, they can be used in heating and cooling systems which is a great advantage for CHP/CCHP systems. At last, the requirement of processed viper in industries will be another competitive advantage for these systems.

Solar Centaur Combustion Chamber Cooling Design Upgrade

The combustor liner of the Solar Centaur is of annular type with 10 fuel injectors. The compressor outlet flow is divided into three streams being the bypass flow between the outer liner and the combustor case, the main flow entering the liner and the flow passing the channel between the shaft and the inner liner. The bypassing flows further make cold air film, protecting the inner and outer liner walls from hot combustion gases. The cooling air holes were redesigned in a fashion to reduce temperature gradients and the number of points with high metal temperature. The new design is superior to the base model in both life time and performance, where burner exit temperature is increased by 35 degrees of Fahrenheit and shaft power is 15% higher. Three dimensional simulation of hot and cold flows were done using CFD for both base and upgraded models and the resulting discharge coefficients and air fractions were compared.

Modeling, Validation and Parameter Study of Three Dimensional Turbomachinery Flows Simulation

This paper presents the parameters required to simulate axial turbomachinery flows. Turbomachines may be involved several physical phenomena and geometrical effects such as unsteady flow, boundary layer separation, transition to turbulence, tip leakage and secondary flows. Because of the method of simulation must follow the physics of flow field, before starting turbomachinery simulation it should be determined what phenomena affect the results. By using several simulations, a method is described for steady state flow simulation of turbomachinery stage. Turbulent boundary layer grid generation parameters and domain mesh resolution is introduced and best method for parameter selection is stated. Two equation turbulence models (k-ε, k-ω and SST) have been chosen. Finally, flow equations discretization methods are compared to select the best model to ensure the experimental results. To validate the different models, CFD results of reference compressor stage and turbine compared with experimental results. This comparison demonstrates the effects of these parameters on CFD simulation for turbomachinery performance parameters prediction.

Weldability of 17-4 PH stainless steel in manufacturing centrifugal compressor impeller

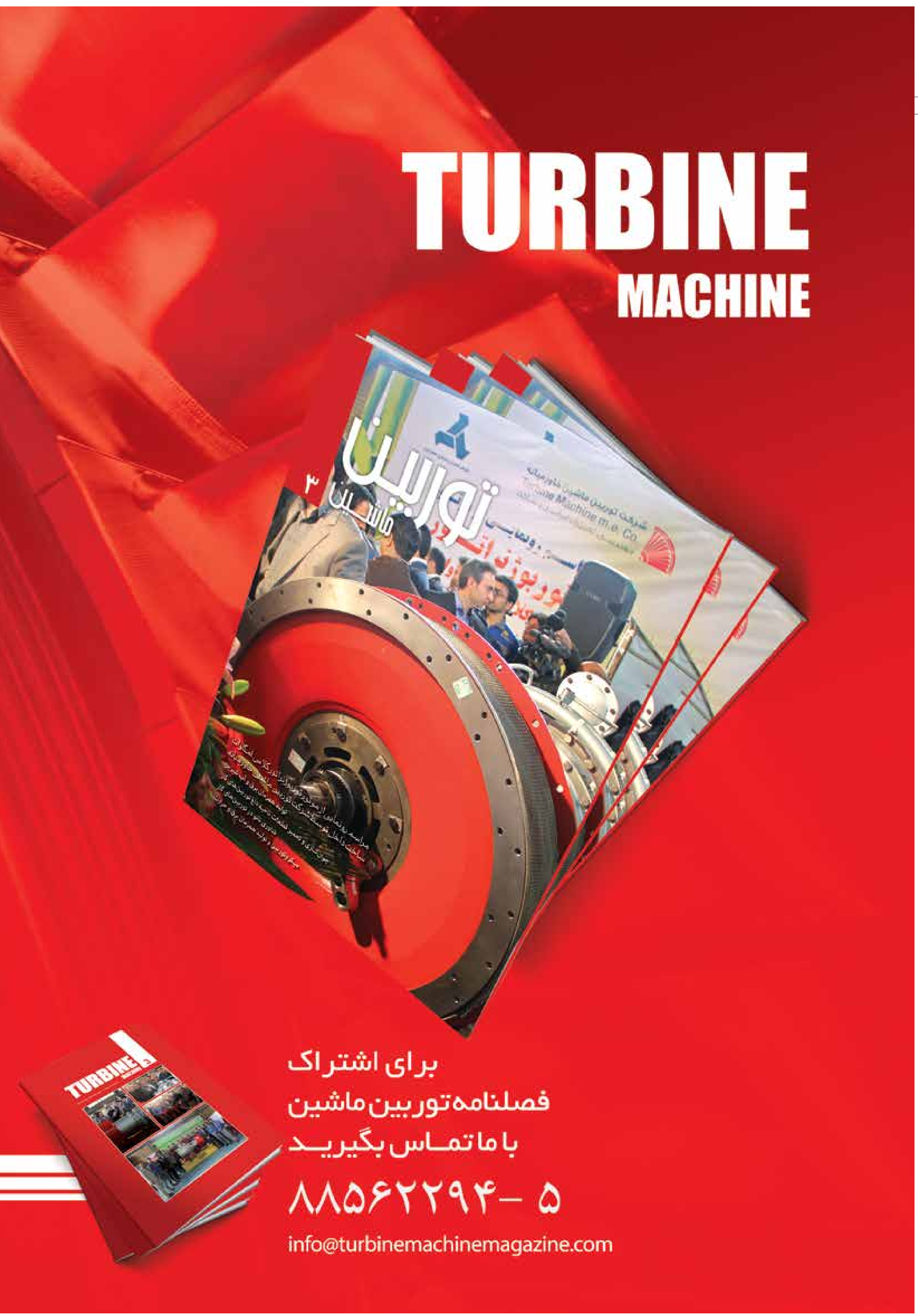
Weldability of 17-4PH stainless steel for centrifugal compressor impeller was considered. Welding test were carried out on the precipitation hardened steel of the 17-4 PH type. As well as following heat treatment have been considered. The best result: high tensile strength and high corrosion resistance were obtained for solution the sample welded in temperature 1313 K followed by ageing in 893 K.

Protective Coatings for Compressor Components in Gas Turbines

The dimensional and mechanical integrity of the compressor parts of a gas turbine play a critical role in the performance and availability of the system as a whole. Due to a variety of mechanisms serving to deteriorate the surface condition of compressor parts, significant losses in efficiency, up to 3%, can occur as a result of increased aerodynamic drag. If left unchecked, these damage mechanisms can ultimately compromise mechanical strength, which can then potentially lead to catastrophic failure. Industry-wide estimates indicate that catastrophic compressor blade failures account for approximately 20% of the total damage occurring in industrial gas turbines. The primary mechanisms causing compressor parts surface deterioration are corrosion/oxidation, wear/erosion and roughness/fouling. Given the relatively corrosive/erosive operating environment of a modern industrial gas turbine compressor section, and the predominant usage of stainless steels as materials of construction for compressor components, it is clear that the use of protective coatings could maximize component life and increase compressor efficiency.

Temperature Matching of Solar Centaur by Modifying The Throat Area of The Power Turbine

The maximum continuous power of a gas turbine engine is often governed by parameters such as compressor discharge pressure and temperature, spool speed and exhaust gas temperature. The performance of the two-shaft gas turbine studied here is limited by either gas producer spool speed or power turbine rotor inlet temperature, based on working condition. In all ambient temperatures lower than the match day, the turbine runs at full load speed limited and as a result, at lower than rated firing temperature. On the other hand, all ambient hotter than the matching temperature tend the turbine to run rated temperature limited, hence at lower than nominal gas producer speed. Ambient matching can be accomplished by altering the flow capacity of the power turbine so that rated speed and maximum firing temperature occur simultaneously at full load in an ambient temperature of choice. A method utilizing combination of off-design thermodynamic cycle calculations and mean-line analysis of the flow passing through power turbine nozzle was developed in order to relate optimal matching temperature to throat area. The approach was further used to compare the performance of four different temperature matched cases. Finally some suggestions with regard to applying the modification in a repair facility were made.


TURBINE
MACHINE
برای اشتراک
فصلنامه توربین ماشین
با ما تماس بگیرید
۸۸۵۶۲۲۹۴ - ۵
info@turbinemachinemagazine.com

TURBINE MACHINE

4

SCIENCE,TECHNOLOGY & MANAGEMENT