

## تحلیل فنی و اقتصادی نصب کولر تبخیری مدیا در نیروگاه سیکل ترکیبی فارس و ارائه نتایج تست عملکرد

محمد عامری حمیدرضا شهبازیان هادی حسین زاده مرتضی نبی زاده  
واحد تخصصی تولید همزمان برق و حرارت (CHP)  
دانشگاه صنعت آب و برق  
ایران

واژه های کلیدی: توربین گاز، سرمایش هوای ورودی، خنک کاری تبخیری، سیستم مدیا

### چکیده

قدرت تولیدی توربین های گاز، متاثر از دمای محیط می باشد و به طور تقریب با افزایش یک درجه سانتیگراد در دمای ورودی، توان خروجی، ۰/۷ درصد کاهش می یابد. یکی از روش های متداول خنک کاری هوای ورودی، روش سرمایش تبخیری است که مناسب با شرایط آب و هوایی گرم و خشک بوده و در ایران نیز، با توجه به استقرار تعداد قابل توجهی از نیروگاههای گازی در این مناطق، می توان از آن برای بهبود عملکرد توربین گازی بهره گرفت. در این مقاله روش های مختلف خنک کردن هوای ورودی به توربین های گاز برای شرایط آب و هوایی نیروگاه فارس معرفی شده و در نهایت از بین طرح های مختلف برای نصب سیستم سرمایش هوای ورودی به توربین های گاز سیکل ترکیبی نیروگاه فارس، طرح مناسب، سیستم کولر تبخیری مدیا با توجه به ارزیابی فنی و اقتصادی انتخاب گردیده است. کولر تبخیری

مدیا توسط پیمانکار خارجی طراحی، ساخته و در نیروگاه مذکور نصب شده است. تست های کارایی انجام شده در سایت، افزایش توان میانگین حدود ۱۱ MW معادل با ۱۴/۵ درصد را برای واحدهای گازی و ۲/۱ MW (۲/۶ درصد) برای واحد بخار سیکل ترکیبی پس از به مدار آمدن سیستم سرمایش مدیا را در فصل تابستان ۱۳۸۳ نشان می دهد.

### ۱- مقدمه

توربین های گازی نقش فراوانی در صنعت تولید برق، در ایستگاههای انتقال گاز و صنایع پتروشیمی ایفا می کند. عملکرد توربین های گاز متاثر از شرایط محیط به ویژه دما است. در روزهای گرم به خاطر اینکه چگالی هوا کم می شود دبی جرمی گذرنده از توربین نیز کم شده و لذا توان خروجی آن نیز افت می کند. از طرفی ساعات گرم تابستان، ساعات تقاضای بیشینه مشترکین، از برق شبکه است. به همین خاطر

### ب) روش فاگ

در روش فاگ آب توسط نازلها، با فشار بالا در هوای ورودی کمپرسور اسپری می شود. این نازلها، قطر ذرات آب را عموماً به کمتر از بیست میکرون می رسانند تا عموم قطرات تا رسیدن به پره‌های کمپرسور تبخیر گردند و سایش پره‌های کمپرسور حاصل نگردد. این قطرات با قطر بسیار کم، به دلیل بزرگی نسبت سطح به حجم ذره، سریع تبخیر شده و سبب افزایش رطوبت هوای ورودی و کاهش دمای آن می گردند. در این روش، میزان رطوبت هوای ورودی می تواند به حد اشباع (Saturated) یا حتی فوق اشباع (Over Saturated) برسد، همچنین میزان افت فشار این سیستم نیز بسیار ناچیز و قابل صرف نظر است.

از مزایای این روش، توانایی رساندن حباب خشک هوا به دمای حباب تر و همچنین افت فشار کم سیستم و هزینه اولیه پایین تر آن در مقایسه با روش های خنک کاری به کمک تبرید تراکمی و جذبی (سرمایش کویلی) می باشد.

هر چند این روش نیاز به تصفیه آب برای جلوگیری از خوردگی مجراهای نازل پاشش آب و عدم تشکیل رسوب روی پره‌های کمپرسور و هزینه برق مربوط به پمپ کردن آب به نازلها در فشار زیاد دارد، اما می تواند روش مناسبی برای کاهش دمای هوای ورودی به کمپرسور باشد. البته به شرط آنکه سیستم پاشش آب به طور صحیح طراحی شود، زیرا در غیر این صورت می تواند بر روی پره های ردیف اول کمپرسور اثرات مخرب داشته باشد.

### ۲- سیستم خنک کن Media

این سیستم که از یک ماده مدیا برای تبخیر آب استفاده می کند بطور گسترده ای در توربین های گازی به ویژه در مناطق خشک و گرم مورد استفاده قرار می گیرد. کارکرد این سیستم براین اساس است که آب برای تبخیر حدود  $2698 \text{ KJ/Kg}$  انرژی گرمایی مصرف می کند ( گرمای نهان تبخیر ) و این فرآیند دمای هوای محیط اطراف را خشک می کند.

خنک کردن هوای ورودی به توربین گاز یکی از انواع روش هایی است که می تواند توان خروجی واحد را بهبود بخشد

### روش های خنک کاری تبخیری هوای ورودی توربین گاز

حداکثر کاهش دما در این روش، رساندن دمای حباب خشک هوای ورودی، به دمای حباب تر (رطوبت نسبی صد در صد) می باشد، که برای مناطق گرم و خشک بسیار مناسب است.

خنک کاری تبخیری خود بر دو نوع است:

#### الف) روش خنک کننده تبخیری مدیا

صفحات مدیا عموماً از سلول هایی شبیه لانه زنبور و به صورت موجدار ساخته می شود و در کنار یکدیگر یک کولر تبخیری مدیا را تشکیل می دهند. با پاشیدن آب بر روی این سلول ها و مرطوب کردن آنها، می توان به کمک روش تبخیر سطحی، هوا را خنک کرد. هرچه سطوح تماس آب و هوا زیادتر باشد، تبخیر سطحی سریعتر و بیشتر صورت خواهد گرفت. انتخاب این سلول ها به صورت مارپیچ و همچنین به شکل لانه زنبور، دقیقاً به منظور افزایش سطح تماس آب و هوا صورت گرفته است.

در انتخاب سیستم مدیا باید نکات مهم زیر در نظر گرفته شود:

افت فشار این سیستم نسبت به سایر سیستم های خنک کن تبخیری بیشتر است، هر چند که این افت فشار اثر محسوسی روی کاهش توان خروجی توربین گاز ندارد.

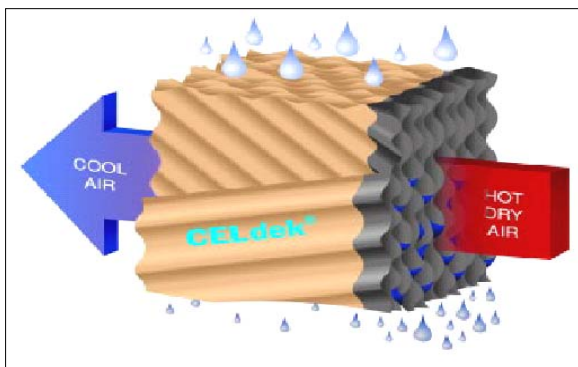
مصرف برق کمتری نسبت به سایر سیستم ها دارد.

آب با کیفیت بسیار بالا مورد نیاز نیست و می توان از آب چاه استفاده نماید، هر چند مصرف آب مقطر ترجیح دارد.

به واسطه نیاز به تعویض سلول ها به صورت دوره ای (هر ۳ الی ۴ سال یکبار)، عملیات نگهداری زیادی لازم دارد.

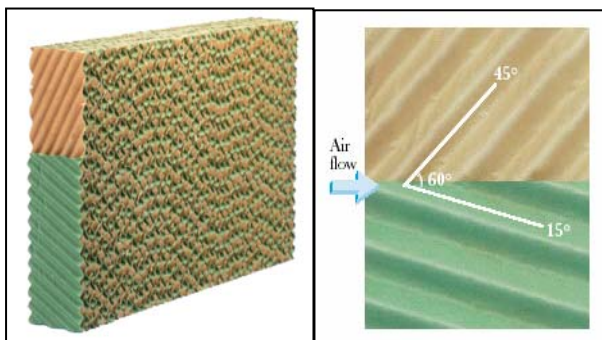
هزینه نصب سیستم نسبت به سایر سیستم های تبخیری بیشتر است. زمان توقف کار واحد در صورتیکه سیستم در اتاق فیلتر نصب شود، قابل تعمق است.

مکش سیالات دارند و آب در سطح مدیا پخش می شود و باعث می شود که نسبت سطح تبخیر ( $m^2$ ) در واحد حجم مدیا بیشتر شده و خنک کاری هوا بهتر انجام شود. همچنین جهت جلوگیری از پوسیدگی این صفحات آنها را توسط مواد شیمیایی مخصوصی آغشته می کنند، باید توجه شود که به این دلیل صفحات مدیایی سلولوزی بسیار اشتعالزا هستند (دقت شود صفحات مدیایی که از فایبرگلاس ساخته شده اند به این صورت نمی باشند).



شکل (۲) صفحات مدیا

تک تک این صفحات با زوایای مشخص و معینی در کنار یکدیگر یک کولر مدیا را تشکیل می دهند، این صفحات به صورت یکی در میان با زوایای  $15^{\circ}$  و  $45^{\circ}$  نسبت به افق کنار هم متصل می شوند تا سطح تماس هوا با آب موجود در صفحات را بیشتر کنند. شکل (۳) زاویه صفحات مدیای متصل به یکدیگر را به خوبی نشان می دهد. در این شکل جهت جریان هوا به صورت موازی با سطح افق نشان داده می شود.



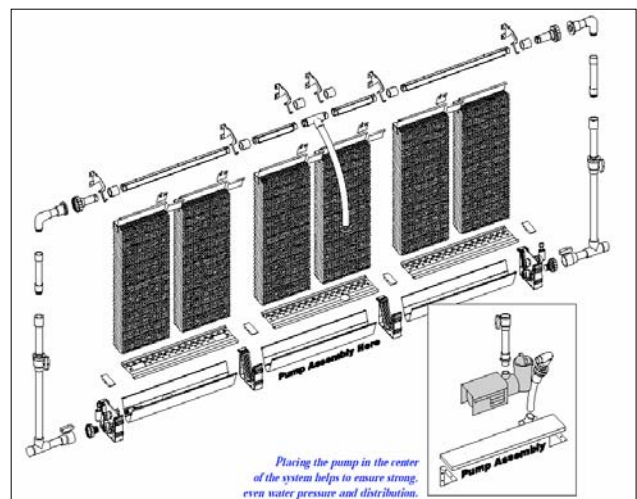
شکل (۳) صفحات مدیا و طرز اتصال آنها در زوایای مشخص [۳]

### تجهیزات سیستم مدیا

سیستم لوله کشی (Piping): جهت انتقال آب به سیستم کولر تبخیری و همچنین گردش آب در کولر تبخیری لوله کشی های معینی انجام می شود. جنس لوله ها متناسب با محل استفاده آنها می تواند از استینلس استیل یا PVC باشد.

سیستم کنترل و تجهیزات اندازه گیری: کنترل مراحل خنک کنندگی هوای ورودی توربین و کارکرد پمپها و نیز حفاظت های سیستم با استفاده از یک سیستم کنترل PLC صورت می گیرد. همچنین این سیستم دارای یک ایستگاه هوا شناسی محلی جهت اندازه گیری دمای هوا و رطوبت محیط بوده و اینترلاک های لازم با سیستم کنترل توربین را دارا می باشد. حداقل تجهیزات اندازه گیری در نظر گرفته شده برای آن یک Pressure Switch، یک Level Switch، یک گیج فشار در خروجی پمپ، کنتور آب در ورودی پمپ و نمایشگرهای محلی دما و رطوبت می باشد.

هدرهای توزیع کننده آب: این هدرها آب را به طرف بالشتک توزیع در بالای صفحات مدیا رها می کند.



شکل (۱) نمونه یک کولر تبخیری مدیا به همراه اجزای سیستم

صفحات مدیا: صفحات مدیا از جنس فیبر سلولوزی بوده و بصورت موج دار ساخته می شوند. یک مجموعه از این صفحات در کنار یکدیگر، تشکیل یک کولر تبخیری مدیا که بصورت لانه زنبوری است می دهند. شکل (۲) صفحات مدیا را نشان می دهد. این سطوح خاصیتی مشابه خاصیت فتیله در

دیوار عقب می برند و پس از نصب صفحات و یا تعویض و تعمیرات آنها، دوباره به سمت جلو هدایت می کنند. در این حالت اجزا مدیا به طور محکمی به یکدیگر فشرده می شوند و این فشردگی برای جلوگیری از نشت آب بین اجزا بسیار مفید است.

**پنجره مشاهده:** بین صفحات مدیا و قطره گیر، در دیوار محفظه خنک کن پنجره ای نصب می شود تا مشاهده هوای خارج شده از خنک کن را ممکن سازد. مقادیر زیاد آب ترک کننده از صفحات مدیا، یک وضع آشفته را نشان می دهد که باید بررسی شود. مقطع کانال در قسمت قبل و بعد از صفحات مدیا باید دارای پنجره هایی برای مشاهده باشند، تا امکان بازدید و بررسی وضعیت موجود در قسمت قبل از صفحات مدیا از لحاظ وجود لکه های بزرگ بر روی صفحات مدیا و در قسمت بعد از صفحات مدیا از لحاظ Carry over را فراهم سازد.

**ترموترها:** برای نمایش اثر خنک کاری، در قبل و بعد از صفحات مدیا تعبیه شده است.

**فلومتر و ولو جریان آب مصرفی:** برای نمایش و تنظیم جریان آبی که به سمت هدر می رود، استفاده می شود.

**نمایشگر جریان آب:** یک دستگاه هشدار دهنده جهت جلوگیری از قطعی آب مصرفی صفحات مدیا تعبیه شده است و در صورتیکه در پیوستگی جریان آب خنک کن مشکلی ایجاد شود، به اپراتور اخطار می دهد.

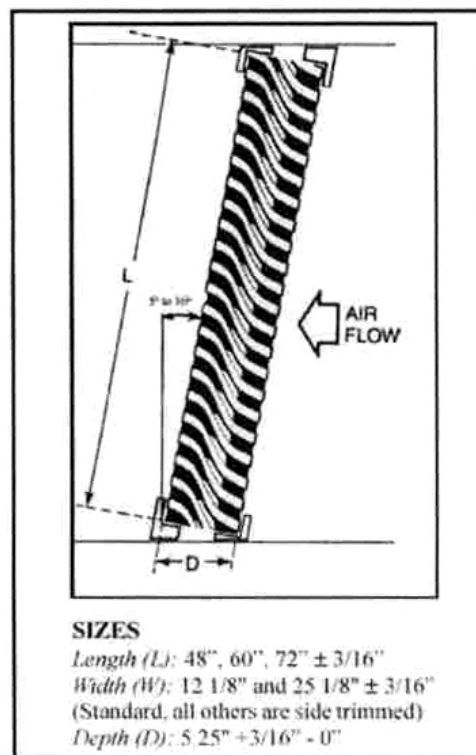
**پمپ Circulation:** جهت به گردش در آوردن آب روی صفحات مدیا بکار برده شده و بیرون سیستم خنک کن نصب می گردد.

**تانک ذخیره آب:** جهت جمع آوری آبهای خارج شده از صفحات مدیا در زیر صفحات، مخزن ذخیره ای نصب شده است و آبهای مصرف نشده در آن جمع آوری می شود و توسط پمپ سیرکوله می گردد.

**سیستم Blow Down:** این سیستم جهت تخلیه آبهای غیر قابل مصرف مدیا در صورت دارا نبودن کیفیت لازم نصب شده است [۲].

### جاذب رطوبت یا قطره گیر (Mist Eliminator):

جاذب رطوبت یا قطره گیرها در قسمت بعد از صفحات مدیا قرار می گیرد. این وسیله، قطرات آب همراه هوا را در خروج از خنک کن جدا می کند. قطره گیرها باید قطراتی با قطر بزرگتر از ۱۰۰ میکرون را حذف کند، یعنی راندمان جدا سازی آنها برای قطرات ۱۰۰ میکرون و بالاتر باید ۹۹/۹ درصد باشد [۳].

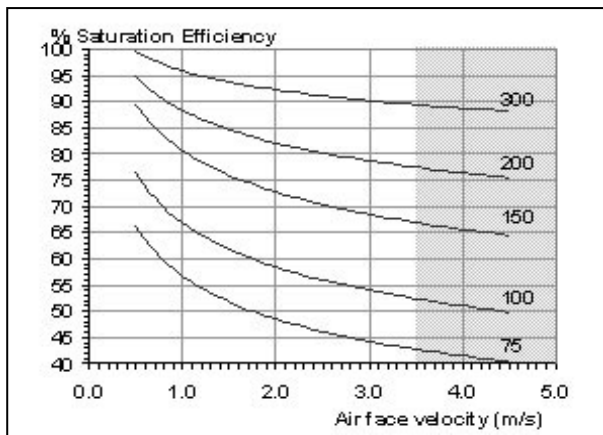


شکل (۴) نمای یک رطوبت گیر به همراه ابعاد وزاویه استقرار آن

**نگهدارنده های صفحات مدیا:** سطوحی هستند که بسته صفحات مدیا را در محفظه اش نگه می دارند. معمولاً در این مورد یک واشر از جنس نئوپروتن تماس صفحات مدیا را با این نگهدارنده ها برقرار می کند، تا به همراه هوای خروجی از مدیا، آب حمل نشود یا به عبارتی Carry Over رخ ندهد.

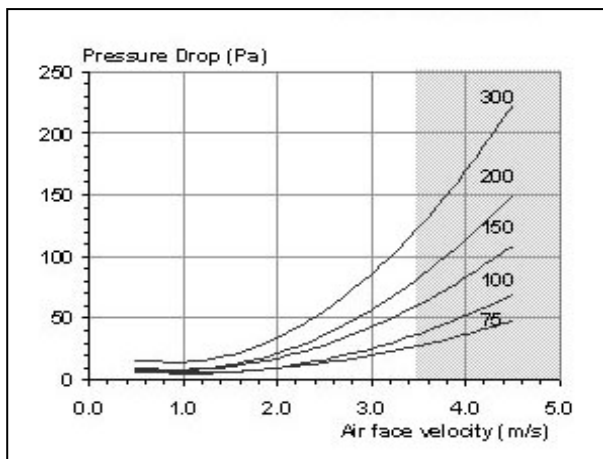
**دیوار قابل حرکت در پوسته مدیا:** این دیوار به طور قابل ملاحظه ای انتقال و نصب مدیا را آسان می کند. بدون آن، نصب مدیا بسیار مشکل خواهد بود و غالباً به صفحات مدیا آسیب می رسد. برای انتقال صفحات مدیا، آنها را توسط

کاهش راندمان کولر را برای صفحات مدیای نوع Celdek در ضخامتهای مختلف برحسب سرعت هوای ورودی نشان می‌دهد [۴].



شکل (۶) منحنی کاهش راندمان کولر تبخیری مدیا بر حسب سرعت هوای ورودی برای ضخامتهای مختلف مدیا (mm) [۴]

از طرفی دیگر با افزایش سرعت هوای ورودی پدیده افت فشار در سیستم نیز افزایش چشمگیری دارد. در شکل (۷) میزان افزایش افت فشار در کولر تبخیری مدیا را برای صفحات مدیای نوع Celdek در ضخامتهای مختلف برحسب سرعت هوای ورودی نشان می‌دهد.

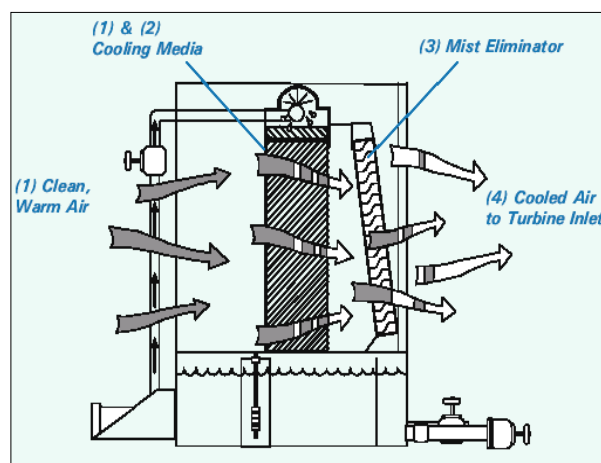


شکل (۷) منحنی افزایش افت فشار در دو طرف صفحات مدیا بر حسب سرعت هوای ورودی برای ضخامتهای مختلف مدیا (mm) [۴]

با توجه به دو نمودار بالا ملاحظه می‌شود که در سرعت‌های بالا، هم کاهش راندمان کولر تبخیری و هم افت فشار زیادتری خواهیم داشت به همین منظور داکت ورودی هوا در

### نحوه عملکرد سیستم کولر تبخیری مدیا

شکل (۵) نحوه عملکرد سیستم مدیا را نشان می‌دهد. در این سیستم آب توسط پمپ از تانک پایین کولر به هدر توزیع کننده آب در بالای کولر پمپاژ می‌شود و سپس بین صفحاتی که از مواد الیافی موجدار درست شده‌اند توزیع شده و پس از عبور و خیس کردن آنها در پایین کولر جمع و به تانک ذخیره تخلیه می‌گردد. این صفحات که از آنها به عنوان صفحات مدیا (Media) نام برده می‌شود معمولاً دارای ضخامت ۸ اینچ یا بیشتر بوده و تمامی سطح مقطع داکت ورودی هوا یا اتاق هوا را می‌پوشانند. هوای ورودی به کمپرسور نیز از میان صفحات مدیا عبور کرده و تا حد اشباع، آب موجود را تبخیر می‌کند. آب باقیمانده برای پرژ پیوسته و خروج مواد دیگر از سطوح مدیا به کار می‌رود. مقدار آب چرخشی باید حداقل ۲ الی ۳ برابر آب تبخیر شده باشد.



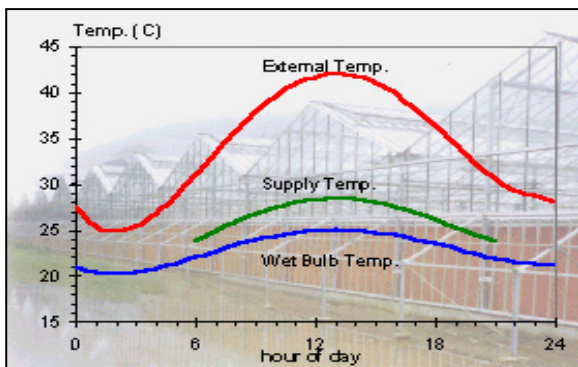
شکل (۵) نحوه عملکرد سیستم مدیا

سرعت هوای عبوری از روی این صفحات نباید از حد معینی بالاتر باشد، چرا که ممکن است در سرعت‌های بالا قطرات آب از روی سطوح جدا شده و باعث خرابی پره‌های کمپرسور گردند. البته بعد از سیستم کولر تبخیری، هوای سرد شده از یک جاذب رطوبت عبور می‌کند تا قطرات احتمالی آب جذب شوند. همچنین در سرعت‌های بالا راندمان کولر تبخیری مدیا بسیار افت پیدا می‌کند، بطوری که هر چه سرعت هوای ورودی به صفحات مدیا بیشتر شود راندمان خنک کاری سیستم کمتر خواهد شد. در شکل (۶) میزان



کمپرسور با دمای هوای ورودی رابطه مستقیم دارد). از این جهت توان خالص دریافتی از توربین گاز افزایش می‌یابد.

۳- کاهش دمای هوای ورودی موجب کاهش دمای آگزوز توربین گاز می‌شود به همین علت سیستم کنترل توربین به منظور کاهش سیگنال خطای ایجاد شده ناشی از دمای آگزوز و set point آن، وارد عمل شده و دبی سوخت مصرفی را زیاد می‌کند. افزایش دبی سوخت، افزایش توان خروجی توربین گاز را به همراه خواهد داشت.



شکل (۹) میزان خنک‌کاری هوای ورودی در اثر کولر تبخیری مدیا در یک شبانه روز

میزان افزایش دقیق توان خروجی توربین گاز با این روش، بستگی به نوع توربین گاز، ارتفاع سایت و شرایط هوای محیط دارد. در سیستم تبخیری، اصلی ترین عامل محدود کننده در کاهش دما، میزان رطوبت موجود در هوا می‌باشد. بطوریکه این سیستم ها در هوای با رطوبت بسیار بالا تقریباً کارایی خود را از دست می دهند. بطور معمول سیستم مدیا در هوای گرم با رطوبت پایین، خروجی توربین را حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد و در رطوبت بالا حدود ۱۰ درصد افزایش می‌دهد.

### میزان آب مصرفی

سازندگان خنک‌کن های تبخیری برای نصب سیستمهای خنک‌کن با ارتفاع بیشتر از ۱/۵ متر، نرخ جریان آبی بین ۱-۲ Gal/min به‌ازا هر فوت مربع از مساحت بالشتک توزیع و برای خنک‌کن های با ارتفاع بالاتر از ۴ متر، ۳-۱/۲۵ Gal/min توصیه می‌کنند. تجربه نشان داده است که

این کولر تبخیری به صورت دیفیوزر ساخته می‌شود تا در حد امکان سرعت هوای ورودی به مدیا را کاهش دهند. (البته قابل ذکر است که افت فشار بسیار ناچیز است).



شکل (۸) داکت عبوری هوا در سیستم مدیای نصب شده در نیروگاه سیکل ترکیبی فارس

نقطه کار کولر تبخیری براساس دمای محیط روی کنترل کننده کولر قابل تنظیم می‌باشد. کولر در دماهای بالاتر از این نقطه فعال خواهد بود. نقطه کار نباید در دماهای پایین تنظیم گردد، چرا که اگر سیستم دما را بیش از حد کاهش دهد، امکان تشکیل یخ وجود خواهد داشت. اگر دمای محیط به زیر صفر برسد، کل سیستم تبخیری برای جلوگیری از اثرات یخ زدگی از آب تخلیه می‌گردد. یخ زدگی باعث ایجاد ترک در سطوح مدیا می‌شود.

### چگونگی تاثیر کولر تبخیری مدیا بر میزان خنک کاری

#### هوای ورودی به کمپرسور و افزایش توان توربین گاز

با کاهش دمای هوای ورودی از طریق سیستم خنک‌کن مدیا می‌توان به صورت زیر باعث افزایش توان خروجی شد:

۱- کاهش دمای هوای ورودی به کمپرسور باعث افزایش چگالی هوا شده و دبی جرمی به توربین گاز را زیاد کرده و از این طریق قدرت خروجی افزایش می‌یابد.

۲- کاهش دمای هوای ورودی باعث افت توان مورد نیاز کمپرسور جهت فشرده سازی هوا شده (توان مورد نیاز

تا در محدوده مشخصی باشد. اگر در رابطه با میزان کیفیت آب دقت کافی نشود، روی صفحات مدیا لایه‌ای از رسوب تشکیل خواهد شد، (که البته این امر در دراز مدت و حدود ۲ سال اتفاق می افتد)، در نتیجه خرابی، از کارافتادگی سطوح مدیا، امکان نفوذ ذرات رسوب به هوا و آسیب رساندن به قطعات دوار توربین و کمپرسور و کاهش راندمان سیستم را به همراه خواهد داشت [۶].

کیفیت این آب بر اساس مطالعات انجام شده به شرح زیر می باشد [۶]:

هدایت و رسانایی آب	$50-400 \mu s/cm$
میزان سختی	۴۵-۱۷۰ ppm
میزان خاصیت قلیایی	۴۵-۱۷۰ ppm
درصد کلر	کمتر از ۵۰ ppm
PH آب	بین ۷ تا ۹
میزان مواد نامحلول	کمتر از ۵۰۰ ppm
میزان جامدات سوسپانسیون	کمتر از ۵ ppm

### حمل آب توسط هوا (Carry Over)

اگر طراحی، اندازه، نصب، بهره برداری و نگهداری به طور صحیح صورت گرفته باشند، Carry Over آب قابل صرف نظر است. Carry Over آب به وسیله پارامترهای زیادی تغییر می کند.

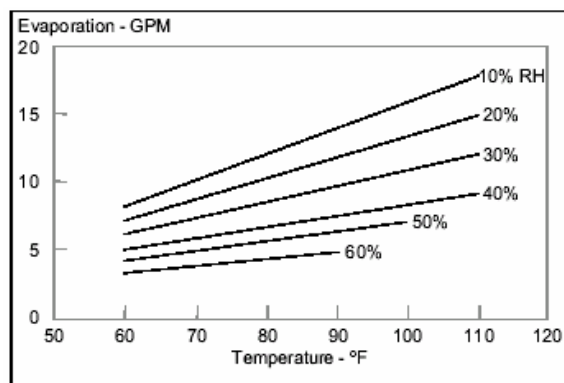
در هر صورت توصیه می شود تا قطره گیرها برای آب حمل شده استفاده شود. قطره گیرهای نوع پره‌ای بعد از صفحات مدیا نصب شده و از طریق توربین گاز تغذیه می شود. حتی با وجود قطره گیرها هنوز باید قطرات احتمالی ترک شده را بررسی و به حداقل رسانید چرا که راندمان قطره گیرها هیچگاه به ۱۰۰ درصد نمی رسد.

عوامل زیر میتواند باعث Carry Over آب می شود:

۱- صفحات مدیای معیوب: معمولاً صدمات وارده به لبه های مدیا زمانی رخ می دهد که در هنگام قرار گرفتن اجزای مدیا در موقعیت خودشان نیروی اضافی وارد شود. این موضوع باعث عدم تطبیق مناسب اجزای سیستم شده و ترکهای نسبتاً زیادی را ایجاد می کند. همچنین زمانی که

دبی جریان در حدود یک گالن بر دقیقه بر واحد سطح بالشتک توزیع برای سیستمهای خنک کن بلندتر از ۱/۵ متر به طور رضایت بخشی کار می کند. به همین ترتیب دبی ۱/۲۵ برای خنک کن های ۲ تا ۳/۵ متری پیشنهاد می شود. دبی جریان بالاتر، این امتیاز را دارد که میزان تشکیل رسوب بر روی سطح مدیا را حداقل می کند.

اما نرخ جریان پایین تر احتمال حمل آب (Carry Over) را حداقل می کند. در عمل باید با در نظر گرفتن دو اثر فوق، نرخ جریان را بهینه کرد شکل (۱۰) میزان آب تبخیر شده در دماهای مختلف را برای توربین گازی مدل MS8001 نشان می دهد. بطور معمول برای چنین توربین های گازی با دبی جرمی هوای حدود  $9.9/9 \text{ Kg/s}$ ، نسبت آب تبخیر شده حدود ۲۰۰ تا ۸۰۰ گالن بر ساعت (که تابعی از رطوبت هوای محیط است) می باشد [۵].



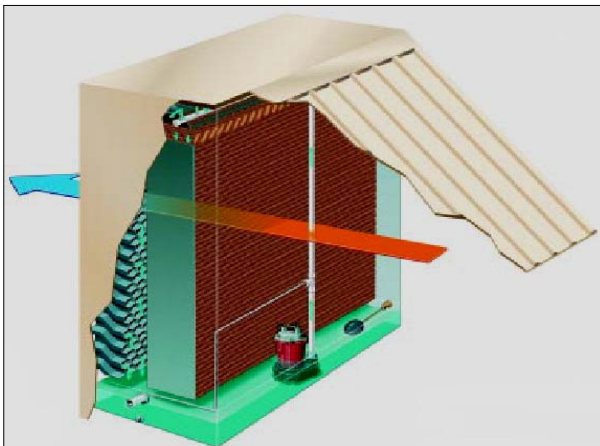
شکل (۱۰) نرخ آب تبخیر شده در دماهای مختلف

### کیفیت آب مورد نیاز در سیستم مدیا

همان طور که ذکر شد بطور معمول برای توربین های گازی صنعتی با دبی جرمی هوای حدود  $9.9/9 \text{ Kg/s}$ ، آب تبخیر شده حدود ۲۰۰ تا ۸۰۰ گالن بر ساعت (که تابعی از رطوبت هوای محیط است) می باشد. از این جهت کیفیت آب بسیار مهم است. بنابراین بطور پیوسته، درصدی از آب بصورت بلودان Blow Down از تانک ذخیره آب گرفته شده و غلظت مواد موجود در آن کنترل می شود. برای بررسی کیفیت آب مورد نیاز پارامترهایی از قبیل میزان سختی، میزان قلیایی بودن، میزان مواد نامحلول و PH آن باید بررسی شود

### محل نصب سیستم مدیا

محل نصب کولرهای تبخیری مدیا نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این محل با توجه به طراحی شرکت سازنده در قبل و یا بعد از فیلتر خشک می‌باشد. شکل (۱۱) یک نمونه کولر تبخیری را نشان می‌دهد.



شکل (۱۱) یک نمونه کولر تبخیری

نصب کولر قبل از فیلتر بدلائل زیر توصیه می‌شود:

- این کولرها خود مانند فیلتر عمل کرده و حدود ۸۷٪ ذرات با قطر بالاتر از ۱۰ میکرون را جذب خواهند نمود. در نتیجه عمر مفید فیلتر خشک افزایش پیدا کرده و هزینه های تعمیرات و نگهداری آن کاهش می یابد.
- نصب تجهیزات مکانیکی و سرمایه گذاری آن پایین تر است. اما از معایب این روش عدم کنترل سرعت هوای ورودی به سیستم مدیا می‌باشد.

سازندگان کولرهای تبخیری محل مناسب برای نصب این کولرها را بعد از فیلتر هوای خشک پیشنهاد می‌کند. دلایل آنها بصورت زیر است [۷]:

- نصب آسان طرح خاص و انحصاری این شرکت برای کولرها و عدم نیاز به عملیات جوشکاری برای نصب
- استفاده گسترده از کنترل کننده های الکتریکی و الکترونیکی و کاهش ابزار مکانیکی
- افت فشار بسیار کم در هوای ورودی، حدود ۰/۴ - ۰/۳ یا ۰/۶ - ۰/۵ اینچ ستون آب بر حسب نوع مدیای مورد استفاده
- استفاده از قطعات و تجهیزات از جنس مواد ضد زنگ

صفحات مدیا روی زمین قرار می‌گیرد و سپس بالا برده می‌شود، ممکن است در اثر برخورد به زمین خسارت ببیند به همین علت بیشترین میزان Carry Over آب در همین نقاط صدمه دیده رخ می‌دهد.

۲- تطبیق نامناسب اجزا مدیا: عدم تطابق بیش از اندازه ۳/۴ اینچ یا بیشتر، می تواند باعث Carry Over آب شود، به علاوه نباید بین اجزاء مدیا ترکهای باز وجود داشته باشد که در این حالت نیز امکان ورود ذرات آب به هوا وجود دارد.

۳- محکم نشدن صفحات مدیا در داخل نگهدارنده‌ها: صفحات مدیا باید در درون نگهدارنده‌ها (که لبه های مدیا را در بالا و پایین سیستم نگه می‌دارند) محکم شده باشد.

۴- جریان آب بیش از اندازه: اگر دبی آب ورودی به هدر زیاد باشد، مدیا را غرق خواهد کرد و موجب Carry Over آب می‌شود. نرخ جریان آب نباید بیش از حد لازم برای مرطوب کردن همه سطوح داخلی مدیا باشد.

۵- توزیع ناهموار آب از هدر: در اثر مسدود شدن سوراخهای هدر ممکن است توزیع آب به سمت مدیا ناهموار شود، در نتیجه یک لبه خنک‌کن آب بسیار بیشتری دریافت می‌کند و احتمال Carry Over آب خواهد بود.

۶- نامناسب بودن جهت جریان هوا از صفحات مدیا: اگر کانالهای هدایت هوا بطور نامناسب طراحی شده باشند احتمال بوجود آمدن Carry Over آب خواهد بود. کانالهای ورودی باید طوری طراحی شوند که توزیع جریان هوا درست ترین حالت ممکن را داشته باشد.

۷- ایجاد رسوب بر روی مدیا: اگر سیستم خنک‌کن مدیا برای مدت طولانی کار کند، بر روی سطح مدیا رسوب ایجاد می‌شود که باعث Carry Over آب می‌شود.

۸- مدیای غیر اشباع: ممکن است با استارت توربین قبل از اینکه مدیا اشباع شود، مقداری آب حمل شود. معمولاً حمل آب در این حالت ناچیز است زیرا مدت زمان کوتاهی (در حد چند دقیقه) مورد نیاز است تا صفحات مدیا به اشباع برسد.



مگاوات و با سوخت گازوئیل ۹۷/۹ تا ۱۰۷ می باشد. با توجه به نیاز شبکه و مشکل کمبود برق در سالهای اخیر بهینه سازی این واحدها مدنظر قرار گرفت. لذا به منظور جبران ظرفیت از دست رفته واحدهای مذکور در فصول گرم سال طرح نصب و راه اندازی سیستم خنک کن هوای ورودی به روش مدیا بر روی واحدهای ۱ و ۲ نیروگاه فارس به اجرا در آمد.

همچنین با توجه به آمارهای هواشناسی ارائه شده برای درجه حرارت خشک و رطوبت نسبی هوا در فصول گرم سال در نیروگاه فارس شرایط طراحی سیستم خنک کن برای پارامترهای مذکور به ترتیب ۳۵ درجه سانتی گراد و ۲۰٪ در نظر گرفته شده است.



شکل (۱۲) نمایی از سیستم کولر تبخیری مدیا در نیروگاه سیکل ترکیبی فارس

### ارزیابی فنی و اقتصادی استفاده از سیستم سرمایه‌گذاری

#### هوای ورودی Media

عملیاتی که در سیستم های خنک کن تبخیری بر روی هوا صورت میگیرد، سرد کردن هوا فقط با رطوبت زنی می باشد که این یک تحول آدیباتیک محسوب می شود. در طول این فرایند دمای مرطوب هوا ثابت باقی می ماند. شکل (۱۳) نمودار این فرایند را به طور شماتیک در دیاگرام سایکرومتریک نشان میدهد.

$$1. \text{شرایط اولیه } T_{DB2} < T_{DB1}$$

$$2. \text{شرایط نهایی } w_2 > w_1$$

$$Rm_2 > Rm_1$$

$$3. \text{شرایط اشباع آدیباتیک } h_2 = h_1$$

به طور کلی، در یک سیستم هوای ورودی توربین گاز توصیه می شود خنک کن تبخیری بعد از فیلتر هوای ورودی قرار گیرد نه قبل از آن، این نوع نصب، مدیا را از غبار و دیگر آلاینده های موجود در هوا حفظ می کند. خنک کن های تبخیری نوع مدیا برای راندمان فیلتر کردن آزمایش نشده اند، اما مشخص است که آنها می توانند مقداری قابل توجهی از ذرات هوا را بگیرند.

#### مزایا و معایب سیستم کولر تبخیری مدیا

در مورد مزایای سیستم می توان به موارد زیر اشاره نمود:

- افزایش قدرت خروجی توربین
  - بهبود راندمان حرارتی
  - بازگشت سریع سرمایه
  - قیمت سرمایه گذاری پایین
  - هزینه های تعمیر و نگهداری سالیانه کم
  - افزایش عمر فیلتر خشک (در صورت نصب قبل از آن)
  - کاهش شدید مقدار  $NO_x$  تولیدی
  - سادگی سیستم و تجهیزات
  - میرایی اغتشاشات جریان
- این سیستم دارای معایبی نیز هست که بصورت زیر می باشند:

- سرعت هوا هنگام عبور از سطوح مدیا باید پایین باشد  
- در مناطق با رطوبت بالا، محدودیت افزایش قدرت وجود دارد.

- در سیستم های تبخیری متداول بدلیل پایین بودن راندمان و کاهش زیاد افت فشار هوا، هرگز حداکثر خنک کاری انجام نمی شود.

### ۳- نتایج حاصل از اجرای سیستم سرمایه‌گذاری مدیا بر

#### روی واحدهای گازی ۱ و ۲ نیروگاه فارس

این واحدها هر یک به ظرفیت نامی ۱۲۳/۴ مگاوات (در شرایط ایزو) در سال ۷۴ نصب و راه اندازی شده اند. ارتفاع نیروگاه از سطح دریا ۱۵۳۰ متر می باشد و قدرت خروجی واحدها در ارتفاع سایت با سوخت گاز از ۹۹/۳ تا ۱۰۹

با توجه به اینکه سایت نیروگاه فارس در ارتفاع ۱۵۳۰ متری از سطح دریا واقع است و با منظور کردن جداول تصحیح ارتفاع و نمودار توان خروجی بر حسب دمای ورودی موجود برای واحدهای GE-F9 نیروگاه فارس مقدار توان بازیافت شده به صورت زیر خواهد بود: [۸]:

میزان توان خروجی توربین گاز در نقطه طراحی  $MW_1=79.13$  MW بوده و پس از به مدار آمدن سیستم مدیا  $MW_2=90.18$  MW خواهد شد، بنابراین حداکثر توان قابل بازیافت بر حسب مگاوات برابر ۹۰.۱۸-  $79.13=11.05$  و بر حسب درصد برابر  $13.96=11.05/79.13 \times 100$  می شود.

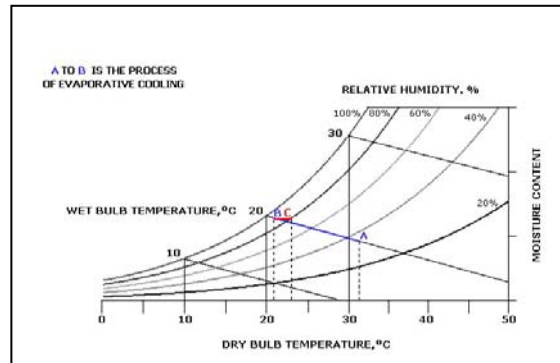
یکی از مهمترین فاکتورهایی که در امکان سنجی یک پروژه بایستی مدنظر قرار داده شود اقتصادی بودن آن است. بنابر این طرح خنک کردن هوای ورودی توربین گاز بایستی از لحاظ اقتصادی نیز مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد.

در مورد سیستم مدیا ارزیابی انجام شده میزان سرمایه گذاری اولیه را برای هر کیلو وات توان خالص بازیافت شده بواسطه کاربرد سیستم خنک کن حدود ۵۰ تا ۵۵ دلار نشان میدهد. هزینه های مربوط به تعمیر و نگهداری (O & M) نیز حدود ۳ تا ۵ درصد هزینه اولیه می باشد [۹].

در شرایط طراحی سیستم (دمای خشک ۳۵ درجه سانتیگراد و دمای تر ۱۷/۸۶ درجه سانتیگراد برای محیط) و با فرض کارایی ۹۰ درصد برای فرایند سرمایه گذاری افزایش مگاوات تولیدی حدود ۱۲/۵۶ درصد خواهد بود.

هزینه سرمایه گذاری را حدود ۵۵ \$/KW در نظر می گیریم. بنابراین برای هر واحد نیروگاه فارس با در نظر گرفتن افزایش ۱۰ مگاواتی توان خروجی، هزینه سرمایه گذاری اولیه برحسب دلار  $10000 \times 55 = 550000$  \$ و تعمیر و نگهداری 27500 \$ می باشد.

با توجه به اینکه ساعات کارکرد سیستم خنک کن در هوای گرم تابستان و در شرایط پیک شبکه خواهد بود، میزان ساعت روشن بودن این سیستم در طی ۲۴ ساعت حدود ۴ ساعت در نظر گرفته می شود. با فرض کارکرد دستگاه در ۴ ماه گرم سال (خرداد تا شهریور) تعداد ساعات کارکرد سیستم برای



شکل (۱۳) چگونگی خنک شدن هوای ورودی در سیستم مدیا بر روی دیاگرام سایکرومتریک

بازده رطوبت زنی سیستم با رابطه زیر تعریف می شود:

$$\eta_{humidifying} = \frac{T_{DB1} - T_{DB2}}{T_{DB1} - T_{WB}} = \frac{w_2 - w_1}{w_3 - w_1} \quad (1)$$

که در آن  $T_{DB}$  دمای هوای خشک،  $T_{WB}$  دمای هوای

مرطوب و  $w$  رطوبت مخصوص هوا می باشد.

مقدار آب مورد نیاز سیستم نیز از رابطه زیر بدست می آید:

$$\dot{m}_{water} = \dot{m}_{air} \times (w_2 - w_1) \quad (2)$$

در رابطه اخیر دبی جرمی هوای خشک در شرایط ورودی می باشد. با در نظر گرفتن شرایط طراحی حداکثر باز یافت توان در شرایط سایت نیروگاه فارس به صورت زیر بدست می آید:

در دمای  $T_{DB1} = 35^\circ C$  و رطوبت نسبی  $\phi_1 = 20\%$

مقدار رطوبت مخصوص برابر  $w_1 = 0.008464 \frac{Kg}{Kg dry air}$

خواهد بود.

در بهترین شرایط و با فرض بازده حداکثر برای سیستم سرمایه تبخیری، پایین ترین دمای قابل حصول دمای

حباب تر محیط است، بنابراین  $T_{DB2} = T_{WB1} = 17.86^\circ C$

و رطوبت نسبی  $\phi_2 = 100\%$  و رطوبت مخصوص آن

برابر  $w_2 = 0.015568 \frac{Kg}{Kg dry air}$  خواهد شد، بنابراین:

$$\Delta w = 0.007104 \frac{Kg}{Kg dry air}$$

با توجه به اینکه دبی جرمی هوای ورودی به کمپرسور در

شرایط طراحی 406 Kg/s می باشد [۱۰]، دبی آب مورد نیاز:

$$\dot{m}_{water} = 0.007104 \times 406 = 2.88 \frac{Kg}{s}$$

### تست عملکرد و تجزیه و تحلیل نتایج

با توجه به اینکه انجام تست عملکرد برای سیستم ها یکی از موارد اصلی و مهم در اجرای یک پروژه می باشد، در مورد سیستم خنک کن تبخیری نصب شده در نیروگاه فارس نیز تست های عملکرد برای واحدهای ۱ و ۲ در مردادماه ۱۳۸۳ انجام گرفت. مهمترین پارامترهایی که در انجام تست مدنظر قرار گرفتند افزایش توان خروجی واحدها و نیز میزان دمای محیط و ورودی به کمپرسور و همچنین رطوبت محیط بودند که با توجه به آنها نقاط اندازه گیری مشخص گردیدند.

با توجه به اینکه عملکرد صحیح سنسورهای نصب شده بر روی PLC نیز از لحاظ دقت عملکرد می بایستی مورد آزمایش قرار میگرفت، داده های دما و رطوبت هوا با یک دستگاه مولتی فانکشن دلتا نیز اندازه گیری شده و با مقادیر خروجی PLC مقایسه گردیدند. روند انجام تستها به صورت زیر می باشد:

- راه اندازی واحدهای گازی ۱ و ۲ نیروگاه فارس و قراردادن کنترل آنها در حالت اتوماتیک
- رسیدن واحدهای مد نظر به بار کامل و عدم بارگیری بیشتر آنها
- ثبت پارامترهای مورد نیاز تست عملکرد
- روشن کردن سیستم کولر تبخیری و انتظار ۲۰ دقیقه ای جهت پایدار شدن شرایط
- کنترل و ثبت پارامترهای مورد نیاز

جدول (۱) و (۲) ضمیمه نتایج تست های عملکرد را برای واحدهای ۱ و ۲ نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که داده های بدست آمده از تست عملکرد با مقادیر مربوط به محاسبات بسیار نزدیک است. محاسبات بر مبنای بازده ۸۰ درصد برای سیستم کولر تبخیری و با توجه به منحنی عملکرد نیروگاه که برای شرایط سایت تصحیح شده است، انجام گرفته اند. اختلاف موجود میان تست عملکرد با مقادیر مربوط به محاسبات نیز می تواند ناشی از تغییر شرایط کارکرد توربین گاز نسبت به منحنی های عملکرد اولیه و یا اختلاف مقدار بازده سیستم خنک کن نصب شده برای محاسبات باشد. همچنین بر اساس شکل (۱۵) با افزایش درجه حرارت و کاهش رطوبت نسبی هوا، میزان افت دمای ورودی کمپرسور

یک سال به صورت  $480 \text{ h/year} = 4 * 30 * 4$  و میزان برق تولیدی سالیانه ناشی از کاربرد این سیستم برابر  $4800000 \text{ KWh/year} = 480 * 1000 * 10$  می شود.

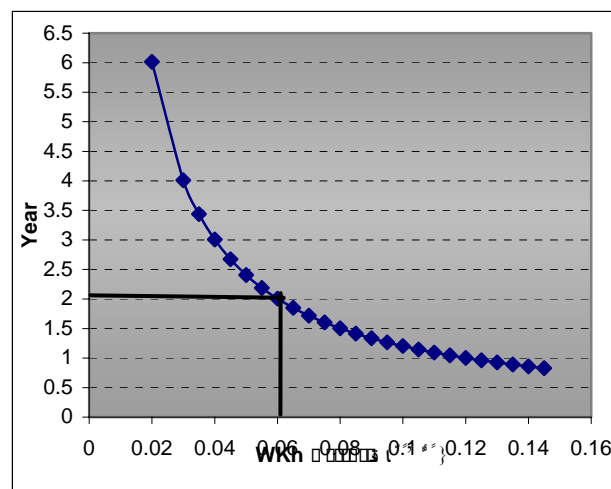
فروش این برق تولیدی باعث برگشت هزینه سرمایه گذاری در طی مدت کوتاهی خواهد گردید. لازم به ذکر است که در این محاسبات بالاترین محدوده ها در نظر گرفته شده و لذا مقادیر ذکر شده مقادیر حدی خود را نشان می دهند و بسته به شرایط، میزان زمان برگشت سرمایه کمتر نیز خواهد شد.

شکل (۱۴) زمان برگشت سرمایه را برای مقادیر مختلف فروش برق به شبکه و با در نظر گرفتن هزینه های بهره برداری نشان می دهد. مراجعه به این شکل نشان میدهد که با قیمت فروش حدود  $6 \text{ Cent/KWh}$  زمان برگشت سرمایه حداکثر ۲ سال خواهد بود. این زمان با استفاده از رابطه زیر محاسبه شده است:

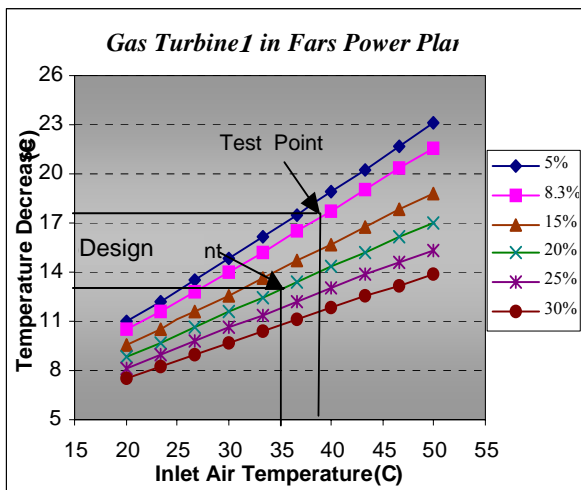
$$\text{Payback Period} = \frac{\text{Capital Costs} + \text{O\&M Costs}}{\text{Savings}}$$

$$= \frac{5.5 * 10^5 + 2.75 * 10^4}{4800000 * 0.06} = 2 \text{ Year}$$

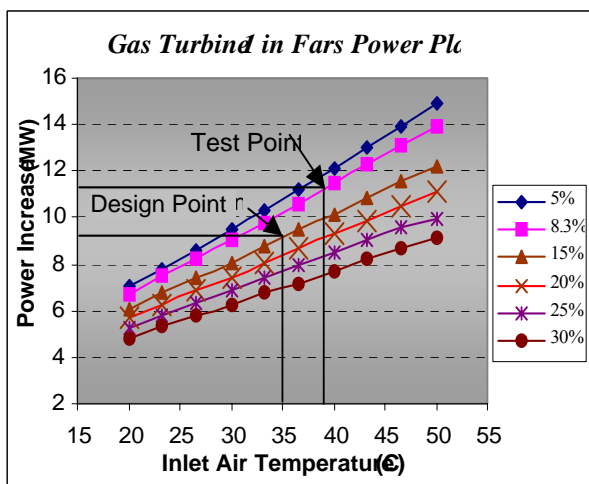
اگر هزینه سرمایه گذاری اولیه برای بدست آوردن این توان را با مقدار مشابه آن برای احداث یک نیروگاه گازی جدید ( $300 \text{ \$/KW}$ ) مقایسه نماییم، مشخص می گردد که این سیستم از توجیه اقتصادی لازم برخوردار می باشد.



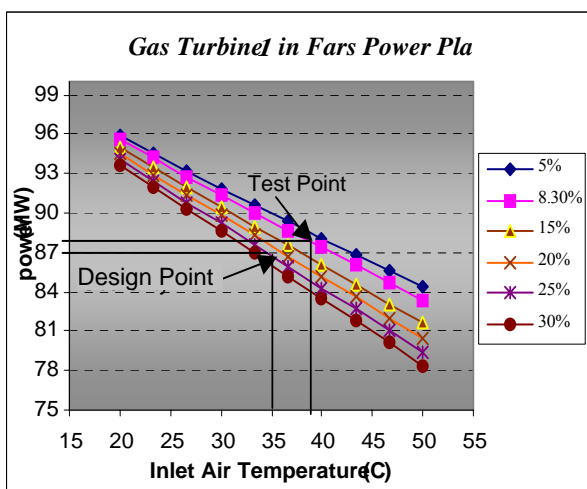
شکل (۱۴) حدود زمان برگشت سرمایه برای نصب تجهیزات سیستم کولر تبخیری مدیا برای نیروگاه سیکل ترکیبی فارس به ازای مقادیر مختلف قیمت برق



شکل (۱۵) میزان کاهش دمای هوای ورودی به کمپرسور در اثر کولر تبخیری مدیا در شرایط مختلف آب و هوایی



شکل (۱۶) میزان افزایش توان خروجی توربین گاز در اثر کولر تبخیری مدیا در شرایط مختلف آب و هوایی



شکل (۱۷): مقدار توان خروجی توربین گاز واحد ۱ در اثر کولر تبخیری مدیا در شرایط مختلف آب و هوایی

افزایش می یابد. به عنوان مثال در دمای محیط ۳۸ درجه سانتیگراد و رطوبت نسبی ۸٪ (بر اساس محاسبات تست) کاربرد سیستم خنک کن Media، دمای هوای ورودی به کمپرسور را حداقل به میزان ۱۷ درجه سانتیگراد کاهش داده است. بر اساس شکل (۱۶) نیز میزان افزایش توان خروجی در شرایط مذکور ۱۱/۱۱ مگاوات می باشد. مقدار توان خروجی نیز در شکل (۱۷) برای واحد ۱ گازی نشان داده شده است

#### ۴- نتیجه گیری

نتایج بدست آمده نشان می دهد که نصب سیستم کولرهای تبخیری مدیا بر روی توربینهای گازی واحدهای شماره ۲ و نیروگاه سیکل ترکیبی فارس باعث افزایش متوسط حدود ۱۱ MW معادل ۱۴/۵ درصد شده است.

نتایج بررسی فنی و اقتصادی ذکر شده نیز نشان می دهد که نصب سیستمهای مذکور از نصب یک توربین گاز جدید برای تولید توان بیشتر، بسیار ارزاتر بوده و برای مناطقی نظیر فارس، یزد و غیره که آب و هوایی با دمای بالا و رطوبت کم به طور مستمر در طول روز دارند، بسیار مناسب است. همچنین میزان سرمایه گذاری اولیه نسبت به بازگشت سرمایه پایین بوده و مدت زمان بازگشت سرمایه در این نیروگاه حدود ۲ سال خواهد بود.

## ۵- مراجع

- [1]. Frank J. Brook, "GE gas Turbine performance Characteristic", GE power system, Report NO. GER-356H, 1998
- [2]. Cyrus B. Meher-Homji & Thomas R. Mee III, 1999, "Gas Turbine Power Augmentation By Fogging of Inlet Air", proceeding of the 28<sup>th</sup> Turbomachinery symposium, PP. 93-113
- [3] CelPad. The more efficient Cooling Pad. <http://www.hutek-asia.com>
- [4]. CELdek 7060-15 Evaporative Cooling Pad. <http://www.munters.com>
- [5]. Chuck Jones, John A. Jacobs III, "Economic and Technical Considerations for Combined- Cycle Performance- Enhancement Options" GE Power Systems, Schenectady
- [6]. Gas Turbine Inlet Cooling, AAF Power & Industrial, 2002. <http://www.aafintl.com>
- [7]. Cooling Inlet Air Improves Turbine Output, Donaldson Company, Inc. Printed in USA. 2001. <http://www.donaldson.com>
- [8]. ASHRAE Handbook, "HVAC Systems & Equipment" IP ed., 1992
- [9]. Grace D., Boncimino G. & Stenzel W., "Combined cycle power plant optimization studies", proceeding of JPGC01, International Joint Power Generation Conference, New Orleans, Louisiana, The Netherlands, June 4-7 2001, Paper NO: JPGc2001/pwr-1903., 2001

[۱۰]. مدارک فنی نیروگاه سیکل ترکیبی فارس



جدول (۱): نتایج تست عملکرد سیستم کوکر تبخیری مدیا بر روی پارامترهای مختلف توربین گاز واحد ۱ نیروگاه فارس

پارامتر	واحد	قبل از مدیا	بعد از مدیا	تغییرات	درصد تغییرات
دمای محیط	C	۳۸/۱۷	۳۸/۲۷	۰/۱۰۳	۰/۲۷۱
رطوبت نسبی	%	۸/۳	۸/۲	-۰/۰۸	-۱
فشار محیط	KPa	۸۳/۸۵	۸۳/۸۲	-۰/۰۲۳	-۰/۰۲۸
دمای هوای ورودی به کمپرسور	C	۴۰/۶	۲۲/۶۶	-۱۷/۹۳	-۴۴/۱۷
دمای هوای خروجی ار کمپرسور	C	۳۷۱	۳۴۷	-۲۴	-۶/۴۷
فشار هوای خروجی ار کمپرسور	bar	۸/۲۳	۸/۹۲	۰/۶۹	۸/۴۲
دمای دود خروجی از آگزوز	C	۵۵۹/۶	۵۴۹	-۱۰/۶۶	-۱/۹۰
توان خروجی	Mw	۷۶/۶	۸۷/۷۱	۱۱/۱۱	۱۴/۵۰

جدول (۲): نتایج تست عملکرد سیستم کوکر تبخیری مدیا بر روی پارامترهای مختلف توربین گاز واحد ۲ نیروگاه فارس

پارامتر	واحد	قبل از مدیا	بعد از مدیا	تغییرات	درصد تغییرات
دمای محیط	C	۳۸/۳۷	۳۸/۶۰	۰/۲۳	۰/۶۲
رطوبت نسبی	%	۸/۰۳	۸/۳۳	۰/۳	۳/۷۳
فشار محیط	KPa	۸۳/۹۵	۸۳/۹۰	-۰/۰۵	-۰/۰۶
دمای هوای ورودی به کمپرسور	C	۳۸	۲۰	-۱۸	-۴۷/۳۷
دمای هوای خروجی ار کمپرسور	C	۳۷۳/۶۶	۳۴۸/۶۶	-۲۵	-۶/۶۹
فشار هوای خروجی ار کمپرسور	bar	۸/۷۶	۹/۴۲	۰/۶۵	۷/۴۵
دمای دود خروجی از آگزوز	C	۵۵۱	۵۴۰	-۱۱	-۱/۹۹
توان خروجی	Mw	۸۱/۴۸	۹۲/۲۹	۱۰/۸۱	۱۳/۲۷