

بررسی عددی تأثیر سرعت باد بر عملکرد حرارتی برج های خنک کننده خشک نیروگاه سیکل ترکیبی کازرون

سید علی حسینی^۱، مهرداد محمدی^۲

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر، گروه مهندسی مکانیک، بوشهر، ایران: alihosseini17@yahoo.com
^۲استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز، گروه مهندسی مکانیک، شیراز، ایران: mehr4457@gmail.com

چکیده

سیستم های خنک کننده در نیروگاه های بخار و سیکل های ترکیبی به منظور کاهش دمای آب گردش خروجی از کندانسور مورد استفاده قرار می گیرند. برج های خنک کن خشک با مکش طبیعی یکی از پرکاربردترین نوع از سیستم های دفع حرارتی در مناطق کم آب نظیر ایران است. عملکرد برج های خنک کن خشک به شدت تحت تأثیر شرایط محیط به ویژه به سرعت و جهت وزش باد قرار می گیرند. بررسیها نشان می دهد که هرگونه افزایش در سرعت وزش باد کاهش عملکرد برج خنک کن خشک را به دنبال دارد.

در این پژوهش از یک حل عددی سه بعدی با توجه به اثر شناوری و شرایط مرزی مناسب و با در نظر گرفتن جریان باد برای بررسی میدان جریان هوا داخل و اطراف برج ها و همچنین عملکرد حرارتی برج های خنک کن خشک نیروگاه سیکل ترکیبی کازرون از طریق حل معادلات ناویراستوکس و معادله انرژی به روش دینامیک سیالات محاسباتی، تحت شرایط وزش باد با توجه به توزیع سرعت ورودی باد استفاده شده است.

با توجه به نتایج بدست آمده عملکرد برج خنک کننده تحت شرایط مختلف از جمله دما و رطوبت هوای محیط به همراه جهت و سرعت باد تحلیل شده و شرایط کاری مناسب به منظور افزایش راندمان سیستم ارائه شده است.

واژه های کلیدی: برج خنک کن، انرژی، دمای محیط، وزش باد

مقدمه

از اصلی ترین مفاهیم ترمودینامیکی آن است که هر چرخه ی قدرت باید از یک منبع گرم حرارت، جذب و به یک منبع سرد حرارت دفع کند تا بتواند کاری متناسب با اختلاف ارزش حرارتی این دو منبع به ما تحویل دهد. بنابراین همواره در یک چرخه های قدرت نیاز به حضور واحدی برای دفع حرارت با ارزش حرارتی پایین وجود دارد. در اکثر نیروگاهها این دفع حرارت به کمک برج های خنک کن صورت میگیرد. در واقع برج های خنک کن در کنار واحد دیگری که چگالنده نامیده میشود مجموعاً وظیفه ی تبدیل بخار خروجی از توربین به مایع قابل پمپاژ برای بویلر را بر عهده دارند.

اساس کار یک برج خنک کن خشک طبیعی بر اختلاف چگالی هوای سرد ورودی و هوای گرم درون برج واقع است. هوای گرم شده بدلیل جذب گرما از آب درون رادیاتورها به سمت بالا حرکت کرده و هوای سرد از پایین جایگزین می شود. طراحی این برج ها بر اساس شرایط ساکن هوای اطراف برج صورت می گیرد و طوری پایه گذاری شده است که کارایی و راندمان خنک کاری آنها به طور قابل ملاحظه ای به شرایط محیطی مانند دمای محیط و سرعت وزش باد و غیره وابسته است.

با توجه به نقش مهم و تأثیر گذار برج خنک کننده در بازده نیروگاه ها و هزینه ریالی بالای ناشی از افت احتمالی راندمان این سیستم های سرمایشی بر شبکه تولید برق، بررسی های فراوانی بر نحوه ی تأثیرگذاری شرایط مختلف بر عملکرد آنها انجام گردیده است. در اکثر کارهای گذشته که به صورت محاسبات عددی و اندازه گیری انجام گرفته اند، ساده سازی های زیادی انجام شده است.

در تحقیقی کاپاس [۱] تغییرات اختلاف دمای میانگین آب خروجی از برج را نسبت به حالت مکش طبیعی با استفاده از نتایج بدست آمده برای سرعت های مختلف وزش باد مورد بررسی قرار داد. در مدل وی، هوا به عنوان گاز ایده ال تراکم ناپذیر با چگالی تابع دما، استفاده شده است. وی متوجه شد که اگر سرعت وزش باد بیش از سه متر بر ثانیه باشد مقدار هوای مکیده شده به درون برج که از روی رادیاتورها میگذرد کاهش خواهد یافت. سو و همکاران [۲] جریان سیال و توزیع سیال و توزیع دما در اطراف و درون برج خنک کن تحت وزش باد را با استفاده از روش حجم محدود بصورت عددی شبیه سازی کردند. آنها نتیجه گرفتند که در وضعیت وزش باد، جریان سیال در اطراف برج تقریباً شبیه جریان در اطراف سیلندر با سطح مقع دایره ی است. اردکانی و همکاران [۳] دریافتند که سکتورهای رو به جهت وزش باد و پشت به باد دارای راندمان حرارتی بالاتری نسبت به سکتورهای کناری مماس بر جهت وزش باد بوده، بطوریکه انتقال حرارت در سکتورهای مناسب رو به باد و پشت به باد حدود ۴۰ درصد بیشتر از سکتورهای کناری است. بعلاوه هنگام وزش باد، سکتورهای مناسب با افزایش سرعت باد عملکرد بهتری داشته در حالیکه عملکرد سکتورهای نامناسب کناری با افزایش سرعت باد کاهش می یابد.

استفاده شده است. انرژی جنبشی توربولانسی k و نرخ اتلاف انرژی ε می تواند به صورت معاملات زیر باشد:

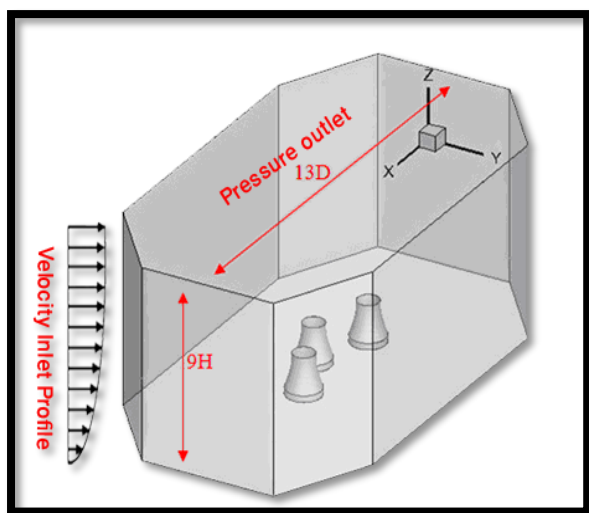
$$(V \cdot \nabla)k = \nabla \cdot [(v + v_t/\partial_k)\nabla k] + P + G - \varepsilon \quad (5)$$

$$(V \cdot \nabla)\varepsilon = \nabla \cdot [(v + v_t/\partial_\varepsilon)\nabla \varepsilon] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (P + G) - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

که p انرژی جنبشی تولیدی در اثر توربولانسی و G انرژی جنبشی تولیدی در اثر شناوری است.

مدلسازی عددی

در این پژوهش با استفاده از روش عددی به کمک دینامیک سیالات محاسباتی، معادلات پیوستگی، ناور-استوکس و انرژی برای مدل سازی جریان هوا و انتقال حرارت درون و بیرون برج های خنک کن استفاده شده و نتایج با در نظرگیری اثر پارامترهایی از قبیل دمای هوای محیط، سرعت باد و جهت آن و همچنین اثر استفاده از دیوار باد شکن مورد بررسی قرار گرفته است. برج های خنک کن بدون دیوار باد شکن در مقیاس واقعی، مطابق شکل ۱ در نظر گرفته شده اند.



شکل ۱: دامنه محاسباتی اطراف برج های خنک کن

همانطور که در شکل ۱ مشخص است، در مدلسازی سه بعدی از یک مرز حل هشت ضلعی در اطراف استفاده شده است. بدین شکل امکان در نظرگیری جریان با زاویه های حمله مختلف نسبت به برج وجود دارد. به منظور حل عددی، معادلات حاکم با استفاده از روش حجم محدود گسسته سازی شده و از نرم افزار آنسیس-فلوئنت نسخه ۱۵ جهت شبیه سازی عددی استفاده شده است.

جهانگیری و گلنشان [۴] به بررسی استفاده از تزریق دود خروجی به درون برج های خنک کن پرداختند. آنها نشان دادند که این تزریق دود مکش هوا به درون برج را افزایش داده که به نوبه خود موجب کاهش دمای آب خروجی و افزایش راندمان می گردد. محبی [۵] با مدلسازی دو برج خنک کن و با استفاده از تونل باد، تاثیر تغییر ارتفاع برج های خنک کن بر عملکرد یکدیگر را بررسی کرده و توزیع فشار پیرامون برج ها را به دست آورده دریافتند که با افزایش ارتفاع برج، برج جلویی تاثیر منفی بیشتری در برج عقب گذاشته و مانع ورود هوا به داخل برج می گردد در تحقیق حاضر عملکرد حرارتی سه برج خنک کننده نیروگاه سیکل ترکیبی کازرون با وزش باد و بدون وزش باد با دیوار بادشکن و بدون دیوار باد شکن به صورت عددی بررسی شده اند.

معادلات حاکم

برج خنک کن هله شبیه یک دودکش عمل می کند که جریان هوا در اثر جابه جایی طبیعی به داخل آن کشیده می شود. انتقال حرارت بین آب گرم ورودی به مبدل های حرارتی و هوای خنک کننده ورودی به درون برج ها با رابطه زیر بیان می شود.

$$Q_h = hA(\bar{T}_W - T) \quad (1)$$

که در رابطه فوق \bar{T}_W دمای متوسط آب رادیاتور و T دمای هوای ورودی است.

در کار حاضر جریان تراکم ناپذیر سه بعدی، دائم و مغشوش شبیه سازی شده و مدل اغتشاشی مورد استفاده نیز $k - \varepsilon$ استاندارد می باشد که از متداول ترین مدل های شبیه سازی آشفتگی در مسائل صنعتی می باشد. معادلات حاکم شامل معادلات پیوستگی، اندازه حرکت و معادله انرژی می باشند. که برای در نظر گرفتن اثرات شناوری، جمله شناوری در جهت عمود به معادله اندازه حرکت اضافه شده است.

شکل برداری معادلات حاکم به صورت زیر می باشد. معادله پیوستگی به صورت زیر می باشد:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (2)$$

معادله های مومنوم به شکل زیر در نظر گرفته شده اند:

$$(\vec{V} \cdot \nabla)\vec{V} = -\vec{\nabla}P + \vec{\nabla} \cdot \vec{\sigma} - \beta(T - T_a)\vec{g} + \vec{S}_h \quad (3)$$

که در این معادلات V بردار سرعت، T دما و σ تانسور تنش است.

معادله انرژی به صورت زیر می باشد:

$$(\vec{V} \cdot \nabla)T = -\vec{\nabla} \cdot [(\Gamma + \Gamma_t)\vec{\nabla}T] + Q_h \quad (4)$$

که Γ و Γ_t بترتیب ضریب هدایت حرارتی مولکولی و اغتشاشی می باشند. جمله \vec{S}_h در معادله مومنوم دربرگیرنده افت فشار سیال در هنگام عبور از رادیاتورها بوده که فقط در ورودی برج ظاهر می شود و جمله Q_h در معادله انرژی، مقدار حرارت منتقل شده به سیال از رادیاتورهاست. در حل مساله برای محاسبه چگالی از تقریب بوزینسک^۱

^۱ Boussinesq Approximation .

شرایط مرزی

تغییر در شبکه های محاسباتی در حالت مکش طبیعی، مقایسه نتایج نیز برای مطالعه شبکه در این حالت به صورت مجزا انجام شده است.

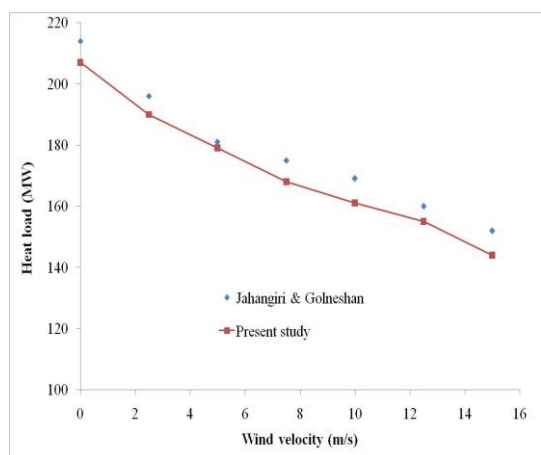
جدول ۱: مقایسه مطالعه شبکه بر روی سرعت در میدان محاسباتی

حالت	تعداد شبکه	انتقال حرارت مبدل ها MW
۱	۱۷۹۶۰۲۰	۲۰۹/۵۶
۲	۱۸۴۶۰۳۱	۲۰۹/۹۱
۳	۲۰۵۰۳۵۱	۲۱۲/۹۰
۴	۲۲۰۰۷۶۴	۲۱۳/۸۹

به منظور اعتبار سنجی کد محاسباتی، در جدول ۱ بار حرارتی بدست آمده در این پژوهش برای یک برج با داده های طراحی و همچنین شبیه سازی عددی جهانگیری و گلنشان [۳] در شرایط مشابه از نظر جریان و هندسه مقایسه شده است. نتایج تحقیق حاضر در حالت بدون دیوار باد شکن با نتایج مشابه از پژوهش جهانگیری و گلنشان [۳] در حالت بدون وزش باد مقایسه شدند و تطابق قابل قبولی میان نتایج دو تحقیق قابل مشاهده می باشد. علت اختلاف اندک بین نتایج تحقیق حاضر با نتایج جهانگیری و گلنشان [۳] مربوط به روش حل عددی شامل شبکه محاسباتی متفاوت، روش گسسته سازی معادلات و توزیع آشفستگی ورودی متفاوت می باشد.

جدول ۲: مقدار حرارت دفع شده در مبدل های برج بدون وزش باد

مقادیر اندازه گیری شده	شبیه سازی عددی	شرایط طراحی	
		مقدار	اندازه
۲۰۸/۲۰	۲۱۲/۹۰	۲۱۴/۳	حرارت MW



شکل ۳: بار حرارتی برج خنک کننده در مقایسه با نتایج جهانگیری و گلنشان [۳]

شرط مرزی دیوار برای زمین و جداره برج به کار رفته است و همچنین شرط سرعت ثابت برای صفحه بالایی دامنه محاسباتی استفاده شده است. شرط مرزی سرعت ورودی به منظور تعریف سرعت و خصوصیات جریان ورودی با استفاده از یک تابع تعریف شده توسط کاربر به نرم افزار وارد شده است. دمای هوای با توجه به داده های هواشناسی منطقه در سرعت های مختلف باد استفاده شده است.

در شبیه سازی های صورت گرفته رادیاتورها به صورت یک ناحیه متخلخل^۲ در نظر گرفته شده است که افت فشار و ضریب انتقال حرارت آن مطابق روابط زیر متناسب با دبی هوا محاسبه می گردد.

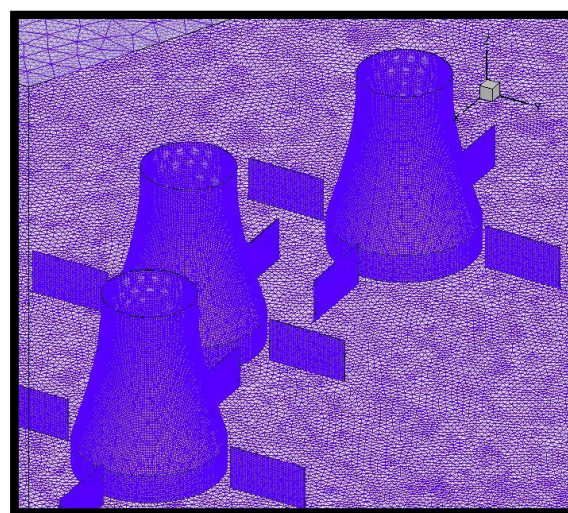
$$\Delta p = 2.1m_{\alpha 1}^{1.76} + 0.06m_{\alpha 1}^2 \quad (5)$$

$$h = 1374m_{\alpha 1}^{0.515} \quad (6)$$

که در این رابطه Δp افت فشار هوا (pa) و $m_{\alpha 1}$ گذر هوای عبوری از واحد سطح از مبدل حرارتی (ton/m².hr) و h ضریب انتقال حرارت جابجایی رادیاتورها می باشد.

شبکه بندی دامنه حل

در این پژوهش جهت بررسی تاثیر وزش باد و دمای هوا بر جریان و انتقال حرارت روی برج های خنک کن، از شبکه های غیر سازمان یافته استفاده شده است. شکل ۳ نمایی از شبکه در اطراف برج به همراه دیوار بادشکن از نمای نزدیک نشان می دهد.



شکل ۲: نمایی از شبکه بندی و دیوار بادشکن در دامنه محاسباتی

مطالعه شبکه

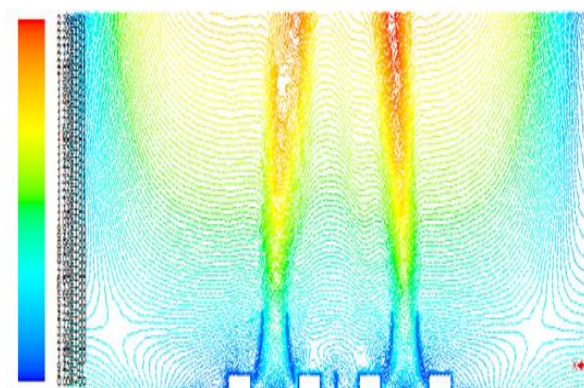
به منظور اطمینان از مستقل بودن نتایج تعداد سلولهای محاسباتی، مطالعه شبکه برای چهار حالت مختلف در جدول ۱ بر روی نتایج انجام شده که تعداد شبکه ۲۰۵۰۳۵۱ به عنوان معیار مطالعه با توجه به دقت نتایج و حجم محاسبات برای تمام شبیه سازی ها انتخاب شده است. البته لازم به ذکر است که با توجه به حساستر بودن نتایج به

^۲ Porous Jump.

نتایج

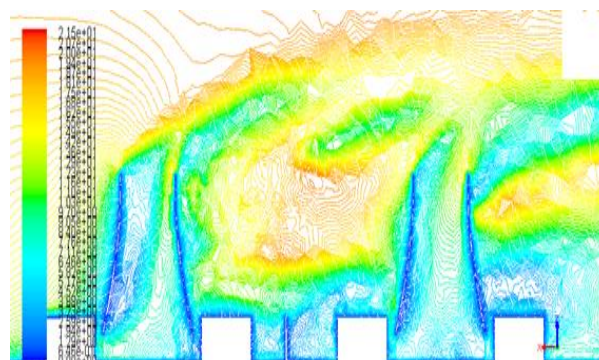
در این بخش نتایج حل معادلات جریان و انرژی پس از اطمینان از همگرایی و اعتبارسنجی به صورت توزیع دما، توزیع فشار و خط جریان مورد بررسی قرار گرفته است.

در ابتدا به بررسی حالت مکش طبیعی پرداخته و سپس به تحلیل سرعت های مختلف اشاره می شود. همانطور که در شکل ۴ مشخص است از آنجایی که در حالت مکش طبیعی وزش بادی وجود ندارد میدان جریان کاملا متقارن می باشد و نشان دهنده وجود ماهیت جابه جایی آزاد در درون برج و اطراف آن می باشند. و شاهد یکنواختی تغییرات سرعت در سطوح مختلف هستیم.



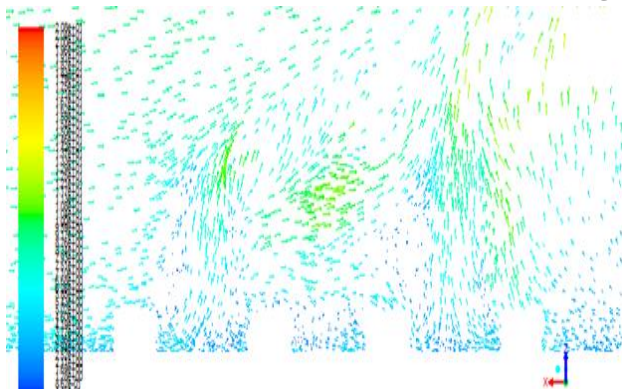
شکل ۴: کانتورهای سرعت در حالت سرعت باد صفر متر بر ثانیه و دمای محیط ۳۰ درجه سانتیگراد

در شکل ۵ کانتورهای فشار برای سرعت ۱۵ m/s در زاویه وزش صفر درجه برای برج های خنک کن نشان داده شده است. همانطور که مشخص است کانتور فشار مربوط به برج جلویی به برج های دیگر اثر می گذارد و همچنین جریان هوای خروجی از عقب رادیاتور (که معمولا در سرعت های بیشتر از ۱۰ m/s بوجود می آید) برای برج سوم کاهش یافته است. و اثر پذیری برج ها از یکدیگر در این شکل به طور واضح دیده می شود. محل تشکیل گردابه ها به خوبی قابل تشخیص می باشد.



شکل ۵: کانتورهای فشار در حالت سرعت باد ۲۰ متر بر ثانیه و دمای محیط ۲۰ درجه سانتیگراد

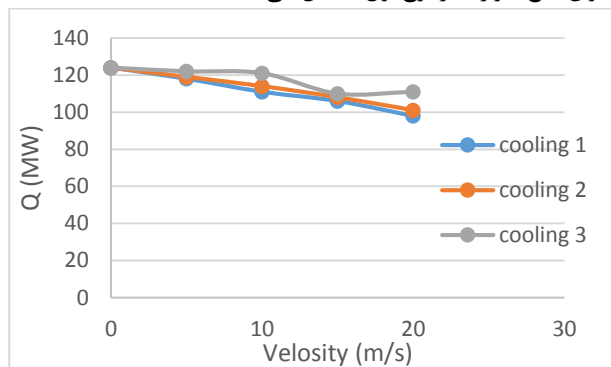
در شکل ۶ بردارهای سرعت برای سرعت باد ۱۵ m/s در زاویه باد وزش صفر درجه برای برج ها نشان داده شده است در سرعت های کمتر داخل برج ها بالای مبدل حرارتی یک گردابه به وجود می آید ولی در سرعت های بیشتر این گردابه از بین می رود. و همچنین در سرعت های بالاتر مولفه افقی سرعت در دهانه خروجی برج ها افزایش می یابد و باعث انسداد بیشتر خروجی و کاهش هوای ورودی به برج می شود.



شکل ۶: بردارهای سرعت در حالت سرعت باد ۱۵ متر بر ثانیه و دمای محیط ۳۰ درجه سانتیگراد

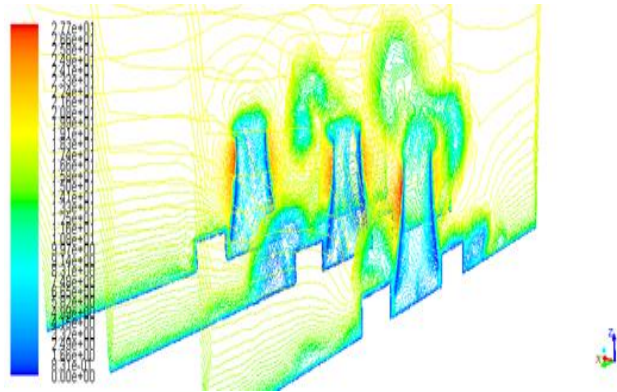
هنگام وزش باد یک جفت گردابه درون برج به وجود می آید و نیز یک جفت گردابه در پشت برج به وجود می آید که در برج سوم این جفت گردابه شدت کمتری نسبت به دو برج دیگر دارد که ناشی از اثر دو برج دیگر به صورت یک جان پناه برای برج سوم می باشد. البته گردابه درون برج با توجه به سرعت وزش و محل قرارگیری برج ممکن است که به سمت مبدل های کناری به صورت جزئی متمایل شود که با افزایش سرعت قدرت گردابه ها نیز افزایش می یابد. در تمام سرعت ها دو گردابه تشکیل می شود البته گردابه در یک صفحه قرار نمی گیرند ولی در گلوگاه حتما جریان بصورت چرخشی در می آید. و جریان بیرون برج مشابه جریان حول استوانه است.

انتظار داریم با افزایش زاویه وزش باد اثر گذاری برج اول بر دو برج دیگر بیشتر شود ولی با افزایش سرعت باد، دیگر رفتار برج ها فقط وابسته به زاویه وزش نیست و همزمان هر دو پارامتر بر برج اثر می گذارند. در وضعیت وزش باد در زاویه ۳۰ درجه، با افزایش سرعت باد میزان دفع حرارت از برج اول کاهش می یابد.



شکل ۷: مقایسه حرارت دفع شده در برج های خنک کن

در شکل ۸ تغییرات میزان دفع حرارت از سه برج برحسب تغییرات سرعت وزش باد در زاویه ۴۵ درجه به طور صفحات عمودی مشاهده می شود



شکل ۸: کانتورهای سرعت در حالت سرعت باد ۲۰ متر بر ثانیه و دمای محیط ۲۰ درجه سانتیگراد در صفحات عمود بر جریان

جریان قائم درون سیستم می گردد در صورتی که در حالت وزش باد، مولفه غالب سرعت در بالای برج افقی می باشد و در نتیجه تا حدی جلوی خروج جریان داغ به صورت عمودی را می گیرد. این دو عامل به صورت همزمان عملکرد برج خنک کننده را به میزان قابل ملاحظه ای با افزایش سرعت باد کاهش می دهند.

به منظور بررسی تاثیر دیوار بادشکن بر روی عملکرد برجهای خنک کننده شبیه سازی با دیوار بادشکن و بدون دیوار بادشکن برای حالت دمای محیط برابر ۲۰ درجه سانتیگراد برای دو سرعت ۱۰ و ۲۰ متر بر ثانیه در زاویه های مختلف انجام گرفت و بار حرارتی میانگین برج ها به صورت جدول ۳ استخراج گردید. مطابق این جدول مشخص است که توان حرارتی میانگین برج ها با استفاده از دیوار بادشکن در سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه حدود ۱۳ درصد و در سرعت باد ۲۰ متر بر ثانیه در حدود ۹ درصد افزایش می یابد.

جدول ۳: عملکرد برج ها همراه با دیوار و بدون دیوار

سرعت باد=۱۰ متر بر ثانیه	سرعت باد=۲۰ متر بر ثانیه	
136 MW	121 MW	با استفاده از دیوار بادشکن
125 MW	105 MW	بدون استفاده از دیوار بادشکن

نتیجه گیری و جمع بندی

در این تحقیق میدان جریان و انتقال حرارت اطراف برج های خنک کننده نیروگاه سیکل ترکیبی کازرون به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است.

بر اساس شبیه سازی های صورت گرفته مشخص می شود که افزایش دمای محیط باعث کاهش در مکش برج خنک کن و باعث محدود شدن حجم هوای عبوری از روی رادیاتورهای چیده شده در پایین برج می شود. که باعث کاهش راندمان برج می گردد. و همچنین در اکثر مواقع کمترین سرعت، بیشترین راندمان و تقریباً بیشترین سرعت کمترین راندمان را دارد. همچنین در سرعت های کم، با توجه به افزایش ضریب انتقال حرارت و شرایط ایجاد شده برای برج ها احداث دیوار بادشکن باعث می شود راندمان برج در محدوده زاویه وزش ۱۵ الی ۴۵ درجه تقریباً به راندمان حالت مکش طبیعی نزدیک شود.

در مورد کانتورهای سرعت در صفحه عمود بر جریان دیده می شود که نواحی گردابه در اطراف برجها که ناشی از وجود مانع در مسیر جریان (خود برجها و دیوارهای باد شکن) بزرگتر شده و بیشتر جریان را تحت تاثیر قرار می دهند. در برج اول عملا شدت بالای جریان باد امکان ورود هوا در اثر مکش را در ناحیه سمت راست برج از بین برده است و در صورتی که برای برج سوم در قسمت راست مکش جریان وجود دارد. از طرفی بایستی به این نکته اشاره شود که عملا سرعت باد همانند یک مانع در قسمت بالای برج عمل کرده و مانع از افزایش مکش می گردد که دلیل این پدیده بالا رفتن میزان فشار در قسمت بالایی برج می باشد. لازم به ذکر است که افزایش سرعت باد دارای دو اثر کاهنده توان بر روی میزان عملکرد برج خنک کننده می باشد. اول اینکه با افزایش سرعت باد علی رغم وجود دیوارهای باد شکن (که در ادامه در مورد تاثیر آنها نیز بحث خواهد شد) مقدار قابل ملاحظه ای جریان از طریق قسمت زیرین برج و بدون توجه به مکانیزم جابجایی آزاد وارد برج می گردد که این امر منجر به وجود آمدن یک شار خروجی از جریان سیال از فضای زیرین برج می شود. به گونه ای که سیال خنک وارد شده از زیر برج بدون گرم شدن و بالا رفتن از طریق مکانیزم جابجایی آزاد، به دلیل اینرسی بالای خود از همان قسمت زیرین برج خارج شده و این پدیده به شدت عملکرد برج را کاهش می دهد. البته بایستی به این نکته توجه نمود که تاثیر باد بر روی تمامی برج ها یکسان نمی باشد این مورد بیشتر برای برج خنک کننده اول در مسیر جریان صدق می کند و برای دو برج دیگر به دلیل ایجاد آشفتگی بالا توسط برج اول، حالت ورود جریان با سرعت بالا از قسمت زیرین آن کمتر مشاهده می شود و عملکرد آنها به میزان کمتری تحت تاثیر جریان باد قرار دارد.

پارامتر منفی دیگری که توسط جریان باد عملکرد برجها را کاهش می دهد مربوط به تاثیر جریان باد در قسمت بالایی برجها به عنوان یک درپوش فشاری می باشد. همانگونه که در مورد عملکرد برجها عنوان شد، تاثیر اختلاف دمای هوا در پایین و بالای برج باعث ایجاد یک

تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می دانند از شرکت مدیریت تولید برق جنوب فارس و همچنین کارکنان نیروگاه سیکل ترکیبی شهرستان کازرون که شرایط لازم را برای این تحقیق را فراهم نمودند، تقدیر و تشکر نماید.

فهرست علائم

h	ضریب انتقال حرارت جابه جایی
\bar{T}_W	دمای متوسط آب رادیاتور
T	دمای هوای ورودی
K_L	ضریب افت فشار
m	دبی جرمی
q	نرخ حرارتی رادیاتور
Γ	ضریب هدایت حرارتی مولکولی
Γ_t	ضریب هدایت حرارتی اغتشاشی
T	دما
Δp	اختلاف فشار
علائم یونانی	
ε_{th}	کارایی حرارتی برج خنک کن
ρ	چگالی kg/m^3

مراجع

- [1] Kapas, N., Investigation of flow characteristics of HELLER-TYPE cooling tower with different cooling delta angels, Periodica polytechnica ser. Mech. Eng., 2003., 47(2), 143-150
- [2] Su. M., Tang. G. and Fu. S. (1999). Numerical Simulation of Fluid Flow and Thermal Performance of a Dry-cooling tower under Cross Wind Condition., Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics., Vol. 79, No. 3, pp.289-306.
- [۳] اردکانی، محمدعلی، فرحانی، فواد. مزیدی شرف آبادی، محسن. ۱۳۹۲، "بررسی عددی تاثیر وزش باد بر عملکرد برج خنک کن خشک هلر نیروگاه منتظر قائم"، پانزدهمین کنفرانس دینامیک شماره ها، سیالات بندرعباس، انجمن فیزیک ایران، دانشگاه هرمزگان،
- [۴] جهانگیری، علی و گلنشان، علی اکبر، ۱۳۸۸، "بررسی عددی سه بعدی تزریق دود خروجی از نیروگاه سیکل ترکیبی به درون برج خنک کن خشک با مکش طبیعی تحت وزش باد"، هفدهمین کنفرانس سالانه (بین المللی) مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران.
- [۵] محبی، رسول، ۱۳۹۳، بررسی تجربی تاثیر ارتفاع برج های خنک کن خشک مجاور هم بر عملکرد یکدیگر تحت شرایط وزش بادهای عرضی، اولین کنفرانس سراسری توسعه محوری مهندسی عمران، معماری، برق و مکانیک ایران، گرگان، شرکت مهندسی عمران بنای تدبیر با همکاری دانشگاه گلستان.