http://mme.modares.ac.ir

مجله علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

بهمن ۱۳۹۲، دوره ۱۳ شماره ۱۱ ص‌ص ۳۰-۴۰

مقاله پژوهشی کامل
تاریخ دریافت ۹۱/۱۲/۲۲
تاریخ پذیرش ۹۲/۴/۸
ارائه در سایت ۹۲/۹/۳۰

بررسی میدانی الگوی جریان هوای ورودی به رادیاتورهای برج خنک‌کن خشک هلر

محمدعلی اردکانی[۱*]، محمدعلی رنجبر[۲]

۱- دانشیار پژوهشکده مکانیک، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران
۲- دانشجوی دکترای مهندسی هوافضا، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران
* تهران، صندوق پستی ۱۱۵-۳۳۱۶۵، ardekani@irost.org

چکیده- یکی از عوامل محیطی تأثیرگذار بر عملکرد برج خنک‌کن خشک میزان وزش باد محیط می‌باشد. براساس تحقیقات انجام‌شده وزش باد باعث کاهش راندمان برج خنک‌کن خشک تا حدود ۲۰٪ می‌شود. لذا مطالعات و تحقیقات زیادی در جهت بهبود کارایی برج‌های خنک‌کن انجام شده است. اگرچه تحقیقات گوناگون به روش‌های تجربی و عددی انجام شده است، ولی بسیاری از داده‌های به‌دست آمده دارای اعتبارسنجی مناسب نبوده و نیاز است که تحقیقات میدانی مناسبی انجام پذیرد. به این منظور نیاز است تا الگوی جریان هوا در اطراف قسمت پایین برج خنک‌کن و داخل دلتاها بررسی شود. در این تحقیق که از نوع میدانی می‌باشد، الگوی جریان هوا در اطراف قسمت پایین برج و درون دلتاهای برج خنک‌کن نیروگاه منتظر قائم مورد ارزیابی قرار گرفته است. با بررسی نتایج مشخص گردید که جریان در اطراف قسمت پایین برج خنک‌کن فاقد جدایش می‌باشد. سکتورهای در جهت باد و پشت به آن دارای بیشترین بازدهی و سکتورهای مماس به باد دارای کمترین بازدهی می‌باشند که این موضوع ناشی از الگوی جریان ورودی به دلتا می‌باشد به طوری که جریان در دلتاهای مناسب به صورت یکنواخت وارد رادیاتور می‌شود ولی در دلتاهای بحرانی یک حرکت گردابه مانند دارد و فقط مقدار کمی از آن وارد رادیاتور می‌شود.

کلیدواژگان: برج خنک‌کن خشک، مرئی سازی، سرعت جریان هوا، اندازه گیری میدانی.

Field study on airflow pattern through radiator of Heller dry cooling tower

M.A Ardekani[1*], M.A. Ranjbar[2]

1-. Assoc. Prof., Mech. Eng., Iranian Org. for Science and Tech. (IROST), Tehran, Iran
2- PhD. Student, aerospace. Eng., Iranian Org. for Science and Tech. (IROST), Tehran, Iran
* P.O.B. 33165-115 Tehran, Iran. ardekani@irost.org

Abstract- Wind is one of the factors influencing the performance of the dry cooling tower. According to research, wind will decrease the efficiency of dry cooling tower about 20%. Therefore, many studies have been done to improve the performance of dry cooling towers. Although various numerical methods and wind tunnel studies have been conducted, but the data obtained has not been properly validated and therefore requires that the appropriate field research done. To study the effect of wind on the performance of dry cooling tower, it is appropriate to model airflow around the cooling tower and the entrance of the deltas. In this research, which is the field research, air flow pattern around the tower and the deltas of Montazar ghaem plant cooling tower has been evaluated. The survey results found that the flow around the cooling tower has no separation. The sectors are positioned in front and back of the wind have the most efficiency and the least efficient sectors that are tangential to the wind. There is a vortex flow pattern in the critical deltas.

Keywords: Dry Cooling Tower, Visualization, Airflow Velocity, Field Measurement.

۱- مقدمه

در سیکل اصلی یک نیروگاه بخار، سیال عامل ابتدا در مخزن بخار که همان منبع دما بالا می‌باشد، حرارت دریافت می‌کند و بعد از رسیدن به دمای مورد نظر به داخل توربین هدایت می‌شود، تا از انرژی پتانسیل ذخیره شده در سیال برای چرخاندن پره‌های توربین استفاده شود. سیال عامل بعد از خروج از توربین به صورت مخلوطی از مایع و بخار بوده که می‌بایست قبل از ورود به پمپ و تکرار مجدد سیکل، تحت عمل سردسازی قرار گیرد. برای خنک کردن سیال گرم شده بنا به موقعیت نیروگاه و شرایط محیطی و آب و هوایی از روش‌های گوناگونی استفاده می‌شود. یک روش متداول برای خنک سازی آب برگشتی از کندانسور استفاده از برج‌های خنک‌کن می‌باشد که نوع و چگونگی این برج‌ها با توجه به شرایط محیطی منطقه و پارامترهای تأثیرگذار دیگر تعیین می‌شود. به صورت کلی در نیروگاه‌ها، سیستم‌های خنک‌کننده با تناسب چگالش بخار خروجی از توربین توسط آب یا هوا می‌توانند به صورت مستقیم یا غیر مستقیم عمل کنند. سیستم غیر مستقیم خنک شونده با هوا به همراه چگالنده به طور خلاصه سیستم هلر نامیده می‌شود.

عملکرد این گونه برج‌ها به این صورت است که هوا از محفظه رادیاتورهایی که در قسمت پایه برج تعبیه شده و آب گرم برگشتی از کندانسور در آنها جریان دارد، وارد برج می‌شود. هوای ورودی در اثر تماس با رادیاتورها گرم شده و چگالی آن کاهش پیدا می‌کند و به سمت بالای برج به حرکت در می‌آید. هندسه خاص برج نیز این حرکت را تشدید کرده و در نهایت یک خاصیت مکش شدید در برج ایجاد می‌شود که همین مکانیزم، عامل اصلی خنک‌سازی در برج‌های هلر می‌باشد.

از آنجا که برج خنک‌کن گرما را با هوای محیط مبادله می‌کند، شرایط محیط بر آن تأثیرگذار است. یکی از این عوامل محیطی تأثیرگذار بر عملکرد برج خنک‌کن میزان وزش باد می‌باشد که در اکثر شرایط تاثیر نامطلوبی بر کارکرد سیستم دارد. این تأثیر نامطلوب سبب کاهش راندمان برج خنک‌کن و در نتیجه کل واحد نیروگاهی به ویژه در فصول گرم می‌شود.

محققین متعددی با استفاده از روش‌های عددی و تجربی، در زمینه بررسی تاثیر باد بر عملکرد برج‌های خنک‌کن تحقیق نموده‌اند. وی و همکاران [۱] برای مشخص نمودن تأثیر منفی وزش باد بر عملکرد حرارتی برج خنک‌کن خشک تحقیقات تجربی (تونل باد) و اندازه‌گیری‌های میدانی را در نیروگاه شانکسی چین انجام داده‌اند. آنها در اندازه‌گیری‌های میدانی از تعدادی سرعت سنج و سنسور دماسنج استفاده نموده‌اند. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که افزایش سرعت وزش باد تا ۶ متر بر ثانیه، باعث کاهش حدوداً ۲۰٪ در سرعت هوای ورودی به داخل برج می‌شود که این خود منجر به کاهش بازدهی برج خنک‌کن می‌شود. همچنین آنها در بخش تجربی (تونل باد) تحقیق، سه مدل مختلف از برج خنک‌کن را ساخته و اثر عبور جریان هوا در داخل برج و پدیده خفگی را مورد بررسی قرار داده‌اند. حاصل کار نشان می‌دهد نتایج کار میدانی و نتایج آزمایش تونل باد تفاوت چندانی ندارند و وزش باد سبب کاهش حدود بین ۱۰ تا ۲۰٪ دبی عبوری از رادیاتورها می‌شود. همچنین در این تحقیق بحث جدایش در دهانه خروجی بالای برج و تأثیر آن بر عملکرد برج بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که جدایش در لبه جلویی دهانه خروجی برج باعث القا یک جریان برگشتی و کاهش عملکرد می‌شود ولی از سوی دیگر با به وجود آوردن ضریب فشار استاتیکی منفی باعث افزایش مکش برج می‌شود. پریز و همکاران [۲] به بررسی عددی و میدانی تاثیر وزش باد بر عملکرد یک برج خنک‌کن خشک پرداخته‌اند. داده‌برداری میدانی روی برج خنک‌کن خشک درنیروگاه کندال آفریقای جنوبی انجام شده است. داده‌های اندازه‌گیری شده محیطی شامل دمای خشک هوا، سرعت و جهت باد می‌باشد. نتایج کار نشان می‌دهد که با افزایش سرعت باد، اختلاف دمای آب خروجی از رادیاتور و هوای ورودی به برج به شدت افزایش می‌یابد، یا به عبارت دیگر عملکرد حرارتی برج کاهش پیدا می‌کند.

کیهانی و همکاران [۳] در تحقیقی با ساخت مدلی از برج خنک‌کن خشک نیروگاه شازند اراک با مقیاس ۱/۴۰۰ و قرار دادن آن در داخل تونل باد به بررسی توزیع سرعت و فشار در گلوگاه برج پرداخته و با استفاده از دیواره‌های باد شکن با ابعاد مختلف، سعی در بهبود عملکرد آن نموده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که وزش باد تا سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه، باعث کاهش دبی جرمی در برج می‌شود و هنگامی که وزش باد دارای سرعتی بیش از ۱/۵ متر بر ثانیه می‌شود، دبی عبوری افزایش خواهد داشت. لازم به ذکر است در تحقیق فوق پدیده خفگی بررسی شده و مدل فاقد مکش می‌باشد. با توجه به این که مدل

فوق فاقد مکش در قسمت پایین برج می‌باشد داده‌ها برای قسمت بالای برج و بررسی پدیده خفگی ارزشمند خواهد بود و نیاز است تا در قسمت پایینی با وجود مکش بررسی شود زیرا در هنگام وجود مکش پدیده جدایش دچار تغییر می‌شود که در این مورد می‌توان به تحقیق فرانسون اشاره کرد [۴]. فرانسون و همکاران در این تحقیق به بررسی جریان حول استوانه با وجود مکش و وزش دائمی پرداخته‌اند. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که به علت وجود مکش جدایش به تأخیر افتاده و در شرایط قویتر مکش، جدایش از بین می‌رود. مددنیا و همکاران [۵] در تحقیقی به بررسی تجربی اثر دیوارهای بادشکن بر روی عملکرد یک برج خنک‌کن با استفاده از تونل باد پرداخته‌اند. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از این دیوارهای بادشکن راندمان برج را تا حدود ۳۳ درصد افزایش می‌دهد. اگر چه در زمینه دیوار بادشکن تحقیقات قابل قبولی انجام شده است، ولی طی بررسی‌های انجام شده، به دلایل اقتصادی تا کنون صنعتی نشده است.

سو و همکاران [۶] در پژوهشی به کمک روش عددی حجم محدود، توزیع جریان سیال و دما داخل و خارج یک نوع برج خنک‌کن را به صورت عددی بررسی نمودند. نتایج نشان می‌دهد هنگامی که سرعت باد تا ۱۰ متر بر ثانیه افزایش می‌یابد، انتقال حرارت برج خنک‌کن بیش از ۳۰ درصد کاهش می‌یابد. پرویزی [۷] در تحقیقی با استفاده از شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت معادلات حاکم بر میدان جریان و میدان دما را در محیط سه بعدی درون و اطراف یک برج خنک‌کن خشک حل نموده است. نتایج حل نشان می‌دهد که با افزایش سرعت وزش باد تا حدود ۳ متر بر ثانیه مقدار دبی جرمی هوای ورودی به داخل برج افزایش می‌یابد ولی با افزایش بیشتر سرعت باد، دبی جرمی هوای ورودی کاهش پیدا می‌کند، به طوری که در سرعت باد ۱۲ متر بر ثانیه مقدار آن تا حدود ۵۰٪ افت کرده و توزیع فشار در داخل برج خنک‌کن نامتقارن می‌شود که همگی موجب کاهش دفع حرارتی از برج خنک‌کن، افزایش دمای آب خروجی از رادیاتورها و در نتیجه افت راندمان برج خنک‌کن می‌شوند. مروتی [۸] در تحقیقی عملکرد برج خنک‌کن با جریان طبیعی نیروگاه سیکل ترکیبی یزد در هنگام وزش باد را بررسی نموده و راهکارهایی اصلاحی را ارائه کرده است. در این مطالعه نخست عملکرد برج بدون وزش باد به صورت عددی شبیه‌سازی شده و نتایج با داده‌های تجربی مقایسه شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی وزش باد مشخص شده است که در سرعت‌های کمتر از ۵ متر بر ثانیه افزایش سرعت باد باعث کاهش عملکرد برج می‌شود ولی در سرعت‌های بیشتر از ۵ متر بر ثانیه عملکرد برج بهتر می‌شود.

وزش باد تاثیر قابل توجهی بر عملکرد برج ها دارد به طوری که طبق گزارش‌های ارائه شده در مقالاتی که بررسی شد در مواردی می تواند تا حدود ۲۰ درصد راندمان نیروگاه را کاهش دهد. لذا مطالعات و تحقیقات زیادی برای بهبود کارایی برج‌های خنک‌کن انجام شده است. با بررسی تحقیقات و مطالعات انجام شده مشخص گردید که غالب کارهای انجام شده به صورت عددی و تست های تونل باد بوده است و تاکنون کار میدانی عمده‌ای در زمینه بررسی الگوی جریان باد در اطراف قسمت پایین برج خنک‌کن خشک انجام نشده است.

با توجه به مطالب ذکر شده مشخص می‌شود که در زمان وزش باد راندمان برج‌های خنک‌کن خشک کاهش می‌یابد. دستیابی به فیزیک قضیه و دلایل کاهش راندمان برج خنک‌کن از اهمیت بالایی برخوردار است تا با شناخت این موضوع بتوان راه‌حل مناسبی برای بهبود عملکرد برج خنک‌کن ارائه کرد. با شناخت الگوی جریان هوا و همچنین توزیع سرعت در دلتاهای مختلف می‌توان نتایج تحقیقات عددی و تجربی (تونل باد) را صحه‌گذاری کرد. تاکنون تحقیقات زیادی با استفاده از روش‌های عددی انجام شده ولی در برخی از آنها نتایج متناقضی با یکدیگر وجود دارد (به عنوان مثال نتایج مراجع [۸،۷]). همچنین با توجه به اختلاف شدید عدد رینولدز در داده‌های تونل باد با عدد رینولدز برج خنک‌کن واقعی نیاز است تا نتایج تونل باد نیز برون‌یابی شود و لذا برای برون‌یابی صحیح و درست نیاز است تا داده‌های میدانی بررسی شود.

در این مقاله الگوی جریان در اطراف قسمت پایین برج خنک‌کن به صورت میدانی بررسی شده و تأثیر آن در مقدار انتقال حرارت از سکتورهای برج ارزیابی می‌شود. همچنین سکتورهایی که در موقعیت مناسب و نامناسب قرار دارند، مشخص شده و جریان در اطراف و داخل آنها بررسی می‌شود. علاوه بر این با استفاده از روش‌های مرئی‌سازی نظیر تافت و عکس‌برداری حرارتی الگوی جریان در داخل دلتاهای مناسب و بحرانی مشخص و ارائه گردیده است.

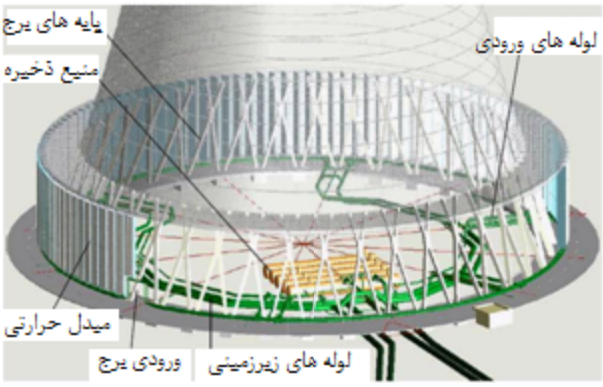
۲- اجزای برج خنک‌کن خشک

در ابتدا مناسب است برج خنک‌کننده خشک و اجزای آن به طور خلاصه توصیف شود. برج خنک کن خشک همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است شامل بدنه برج، دلتاها و مبدل‌های حرارتی می‌باشد.

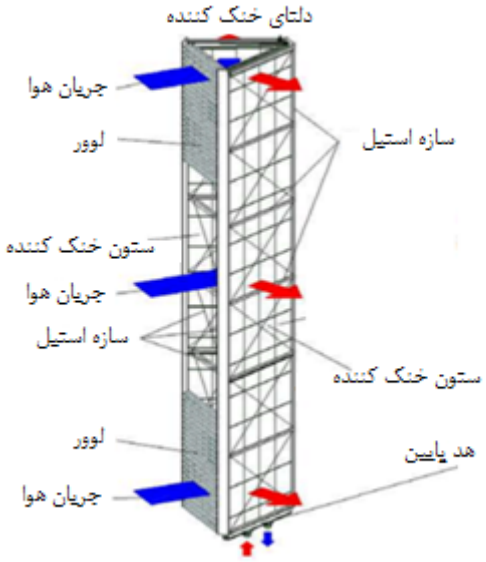
دلتاها شامل دو رادیاتور می‌باشند و به صورت عمودی در اطراف دیوارهٔ برج چیده شده‌اند تا آب خروجی از کندانسور در آنها توسط جریان طبیعی هوا خنک شود. در ضلع سوم مثلث تشکیل شده توسط دو رادیاتور، کرکره‌هائی قرار دارند که برای کنترل دبی هوای ورودی به دلتا می‌باشند و از آن‌ها با نام لوورها یا دمپرهای هوا یاد می‌شود. شکل ۲ نمایی از یک دلتا را نمایش می‌دهد. مطابق شکل جریان هوا از میان لوورها عبور کرده و وارد رادیاتور می‌شود و پس از خنک‌سازی وارد قسمت داخل برج خنک‌کن می‌شود. زاویه بین ستون‌های دلتاها بر الگوی جریان تأثیرگذار هستند. این زاویه بین ۴۲ تا ۶۰ درجه تغییر می‌کند که اندازه آن تابعی از قطر پایه برج و تعداد دلتاها می‌باشد. همچنین محیط هر برج به ۶ قسمت تقسیم شده که هر کدام از آنها یک سکتور نامیده می‌شود.

۳- روش آزمایش

این تحقیقات به صورت میدانی بوده و در نیروگاه برق منتظر قائم انجام شده است. این نیروگاه در حومه کرج قرار گرفته و همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است دارای سه برج خنک‌کن خشک غیر مستقیم هلر است که در امتداد شمال به جنوب چیده شده‌اند.



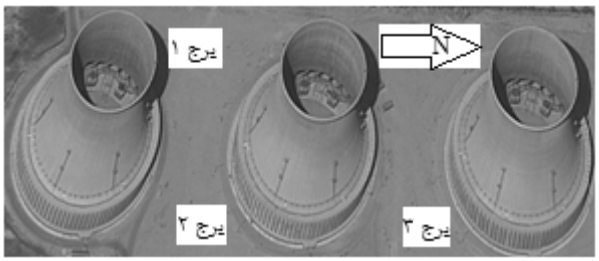
شکل ۱ شمای کلی اجزای برج خنک کننده خشک



شکل ۲ اجزای یک دلتای خنک کن

قطر پایین هر برج ۷۲ متر، ارتفاع هر برج ۹۲ متر، قطر گلوگاه آن ۴۸ متر، تعداد دلتاهای هر برج ۹۶ عدد، زاویه هر دلتا ۴۹ درجه، تعداد سکتورهای هر برج ۶ عدد، میزان آب در گردش ۱۷۰۰۰ متر مکعب و تعداد پیک کولرهای هر برج ۱۲ عدد می‌باشد.

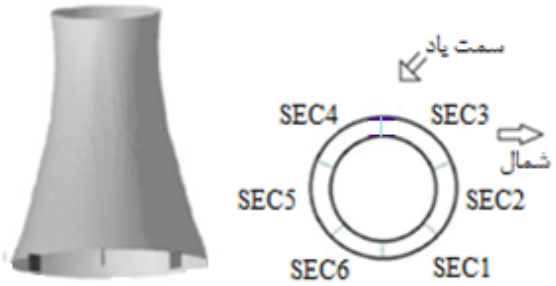
با توجه به داده‌های هواشناسی کرج در بازه ۱۰ ساله [۹] حداقل میانگین دمای سالانه ۸/۸ و حداکثر میانگین دمای سالانه ۲۹/۹ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. حداقل میانگین رطوبت نسبی سالانه ۳۰ درصد و حداکثر میانگین رطوبت نسبی سالانه ۵۱ درصد می‌باشد. حداقل میانگین سرعت باد سالانه ۲/۲ و حداکثر میانگین سرعت باد سالانه ۱۴/۸ متر بر ثانیه می‌باشد. سمت باد غالب در منطقه ۲۷۰ درجه نسبت به شمال یعنی از سمت غرب می‌باشد. اندازه‌گیری‌های انجام شده بر روی برج شماره ۱ بوده است. در این تحقیق سرعت جریان باد در اطراف قسمت پایین برج خنک‌کن و در ورودی و خروجی دلتاهای برج خنک‌کن با توجه به شرایط مختلف باد اندازه‌گیری شده است.



شکل ۳ موقعیت جغرافیایی قرار گرفتن برجهای خنک‌کن نیروگاه منتظر قائم

همچنین با استفاده از دمای آب ورودی و خروجی سکتورها، میزان انتقال حرارت اندازه‌گیری شده است. به منظور تعیین الگوی جریان هوا نیاز است تا از روش‌های آشکارسازی استفاده شود. روش‌های آشکارسازی موجود، نظیر دود، تافت، خاک چینی، روغن و عکس‌برداری می‌باشند و روش‌های جدیدتری مانند تصویرنگاری سرعت ذرات نیز وجود دارد که مناسب آزمایشگاه می‌باشد و در میدان غیر قابل استفاده می‌باشد. با توجه به گستره میدانی و عملیاتی بودن سایت نیروگاه منتظر قائم تنها روش قابل استفاده و قابل قبول تافت بود. همچنین برای بررسی بهتر عملکرد رادیاتورها، با استفاده از دوربین حرارتی دمای آنها اندازه‌گیری شده است. در این اندازه‌گیری‌ها از دو عدد بادسنج دیجیتال پروانه‌ای و یک عدد بادسنج دیجیتال فنجانی، دوربین حرارتی و میله تافت استفاده شده است. بادسنج‌های به کار رفته دارای ماکزیمم خطای ۲٪ در محدوده سرعت ۰/۹ تا ۳۵ متر بر ثانیه می‌باشند و دوربین حرارتی دارای حساسیت حرارتی ۰/۰۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

مرحله اول جهت دست‌یابی به هدف ذکر شده، یعنی تعیین الگوی جریان ورودی به دلتاها، مشخص نمودن دلتاهای بحرانی و مناسب می‌باشد. منظور از دلتاهای بحرانی، دلتاهایی می‌باشند که بدترین عملکرد را با توجه به جهت وزش باد دارا می‌باشند. روش کار به این صورت بوده که در ابتدا سرعت باد در اطراف برج، در دو فاصله نیم متری و ۵ متری از دلتاها، اندازه‌گیری و نسبت به سرعت در نقطه مرجع در همان لحظه بی‌بعد شده است. نقطه مرجع در محلی قرار می‌گیرد که تحت تأثیر موانع محیطی قرار نداشته باشد. سرعت‌های اندازه‌گیری شده شامل سرعت شعاعی(عمودی) و مماسی باد در اطراف برج می‌باشد. داده‌برداری از سرعت باد اطراف برج، در ۶ ایستگاه صورت گرفته است (در ۶ سکتور)، که فاصله هر ایستگاه نسبت به هم معادل ۶۰ درجه (۱۶ عدد دلتا) می‌باشد. لازم به ذکر است تعداد کل دلتاهای اطراف برج ۹۶ عدد است که هر ۱۶ دلتا تشکیل یک سکتور را می‌دهد. داده‌های مربوط به دمای آب ورودی و خروجی به برج و همچنین دبی آن نیز توسط سنسورهای دما و دبی سنج نصب شده اندازه‌گیری و به رایانه‌های اتاق کنترل ارسال و ذخیره شده است. شکل ۴ مشخص کننده موقعیت نقطه مبنای اندازه‌گیری و سکتورهای برج خنک‌کن می‌باشد.



شکل ۴ شماتیک سکتورهای برج خنک‌کن

یکی از مشکلات این تحقیق میدانی تغییرات زیاد و کنترل نشده سرعت باد بوده که به منظور رفع این مشکل و بالا بردن دقت نتایج، تعداد دفعات اندازه‌گیری‌ها افزایش یافته است. همچنین با توجه به این که سرعت هوا کنترل شده نمی‌باشد، لذا احتمال خطا در برخی از داده‌ها وجود دارد که این خطا با استفاده از تابع توزیع گوس که اکثر پدیده‌های فیزیکی را نرمالیزه می‌کند، بررسی شده است. روش کار به این صورت بوده است که برای داده‌های برداشت شده، مقدار میانگین، میانه، پراش و انحراف معیار محاسبه شده و با توجه به مقادیر محاسبه شده مقدار چولگی بدست آمده و از روی آن متقارن یا غیرمتقارن بودن داده‌ها تشخیص داده شده است. در این تحقیق، داده‌برداری در ۲۰ روز مختلف و در هر روز ۳ نوبت و در مجموع ۶۰ مرتبه به مورد اجرا گذاشته شده است.

۴- بررسی نتایج

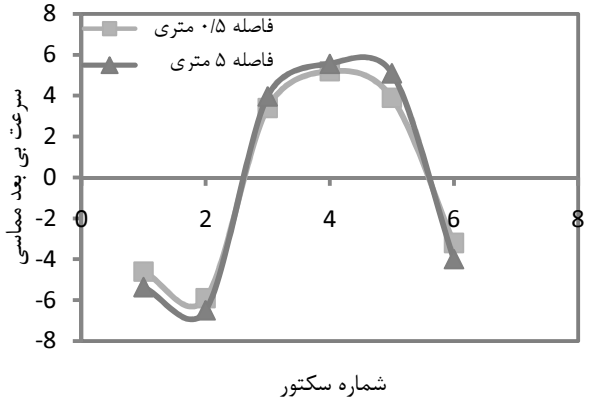
به منظور بررسی تأثیر وزش باد بر برج خنک‌کن خشک، نیاز است که الگوی جریان هوا در اطراف آن مشخص شود. به این منظور سرعت جریان در فواصل ۵ متری و نیم متری از ورودی دلتا اندازه‌گیری شده و با استفاده از سرعت مبنا بی‌بعد شده است (جدول ۱).

جدول ۱ جدول تغییرات سرعت بی بعد مماسی

شماره سکتور	سرعت بی بعد مماسی در فاصله ۰/۵ متری	سرعت بی بعد مماسی درفاصله ۵ متری
۱	-۴/۶	-۵/۴
۲	-۵/۹	-۶/۵
۳	۳/۴	۴
۴	۵/۲	۵/۶
۵	۳/۹	۵/۱
۶	-۳/۲	-۴

شکل ۵ توزیع سرعت بدون بعد مماسی را در فواصل ۵ و نیم متری از ورودی دلتا نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، با توجه به این که باد در زاویه ۲۹۰ درجه نسبت به شمال، یعنی روبروی سکتور ۳ می‌باشد، لذا در اطراف برج (زوایای ۹۰ و ۲۷۰ درجه نسبت به این سکتور (سکتورهای ۲ و ۴)) سرعت جریان هوا بیشترین مقدار را دارا می‌باشد. علامت منفی سرعت، نشان دهنده جهت آن می‌باشد (جهت باد در حالت ساعت‌گرد منفی در نظر گرفته شده است).
با توجه به شکل فوق می‌توان دریافت که در سکتور ۲، سرعت حدود ۶ برابر سرعت مبنا می‌باشد (میانگین سرعت مبنا حدود ۲/۱ متر بر ثانیه می‌باشد.). همچنین در سکتور ۴، سرعت حدود ۵ برابر سرعت مبنا است. عدم تقارن در نمودارهای سرعت سمت چپ و راست برج را می‌توان ناشی از عوامل مختلف و به ویژه تاثیر برج شماره ۲ دانست (مطابق شکل شماره ۳ این برج در سمت راست برج خنک‌کن شماره ۱ قرار گرفته است).

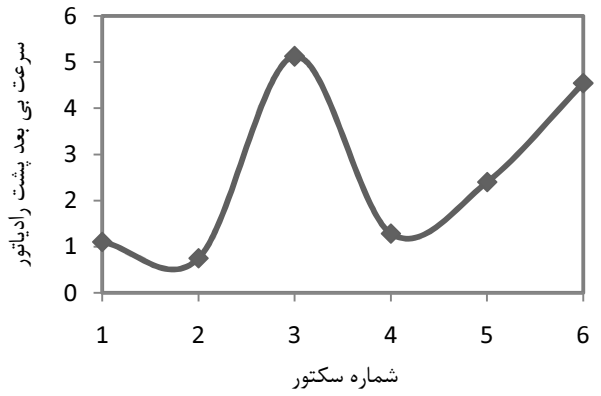
هنگامی که فاصله از ۵ متری به نیم متری کاهش می‌یابد، سرعت مماسی مقداری کاهش می‌یابد که این موضوع را می‌توان ناشی از جریان شعاعی به داخل رادیاتور در نظر گرفت. همچنین با توجه شکل ۵ می‌توان دریافت که در اطراف قسمت پایین برج خنک‌کن، پدیده جدایش اتفاق نیفتاده است که این امر با توجه به وجود مکش برج خنک‌کن کاملاً توجیه‌پذیر می‌باشد و لذا فرض ایجاد جدایش (قسمت پایین برج در مجاورت رادیاتورها) در تجزیه و تحلیل تحقیقات عددی و تجربی صحیح نمی‌باشد.



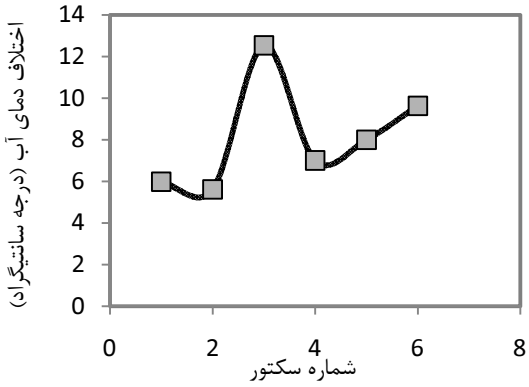
شکل ۵ تغییرات سرعت بی بعد مماسی در فواصل ۰/۵ و ۵ متری از برج

شکل ۶ تغییرات سرعت بی‌بعد شعاعی در خروجی رادیاتورها را نشان می‌دهد. همان گونه که در شکل فوق نشان داده شده سکتور ۳ بهترین سرعت خروجی را داشته که این سکتور عمود بر جهت جریان باد می‌باشد. سکتور ۶ که ۱۸۰ درجه با سکتور ۳ فاصله دارد (در پشت برج نسبت به جهت باد قرار گرفته است.)، نیز سرعت مناسبی را دارد، ولی سکتورهای ۲، ۴ و ۱دارای سرعت کمتری می‌باشند. لذا سکتورهای ۳ و ۶ بهترین راندمان را داشته و سکتور مناسب می‌باشند ولی سکتورهای ۲، ۴ و ۱ نامناسب می‌باشند. لازم به ذکر است که با بررسی انجام شده از سیستم‌های موجود در مرکز کنترل نیروگاه، دما در خروجی سکتورهای ۳ و ۶ کمتر از سکتورهای ۲ و ۴ می‌باشد. این موضوع را می‌توان این گونه توجیه کرد، که جریان باد در کناره‌های برج دارای بیشترین سرعت می‌شود و فشار هوای بیرون برج افت کرده و در نتیجه اختلاف فشار بیرون و داخل برج در سکتورهای مذکور بالا نبوده و به همین دلیل افت سرعت جریان هوا و انتقال حرارت وجود دارد.

به منظور بررسی بهتر تأثیر وزش باد بر عملکرد برج خنک‌کن، مقدار انتقال حرارت یا به عبارت دیگر دمای آب ورودی و خروجی سکتورهای برج بررسی شده است. شکل ۷ اختلاف دمای ورودی و خروجی رادیاتورها را در سکتورهای مختلف نشان می‌دهد. همان گونه که در شکل نشان داده شده است، اختلاف دمای آب ورودی و خروجی، که بیانگر انتقال حرارت می‌باشد، برای سکتور ۳ (روبروی باد) بهترین و برای سکتورهای ۲، ۴ و ۱ (مماس به باد) بدترین می‌باشد. به این ترتیب می‌توان تشخیص داد که دلتاهای واقع در سکتور ۳ بهترین و دلتاهای واقع در سکتورهای ۲، ۴ و ۱ بحرانی‌ترین دلتاها می‌باشند.



شکل ۶ تغییرات سرعت بی بعد شعاعی در پشت رادیاتورهای سکتورها

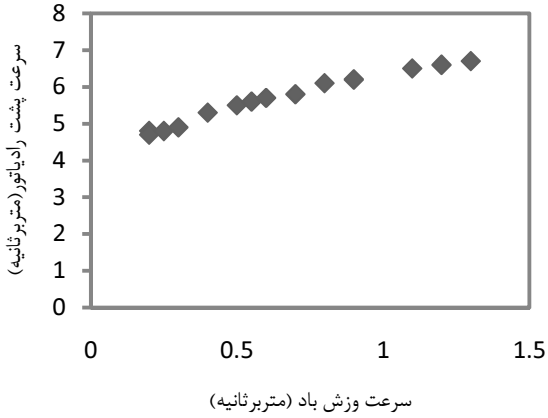


شکل ۷ اختلاف دمای آب ورودی و خروجی رادیاتور

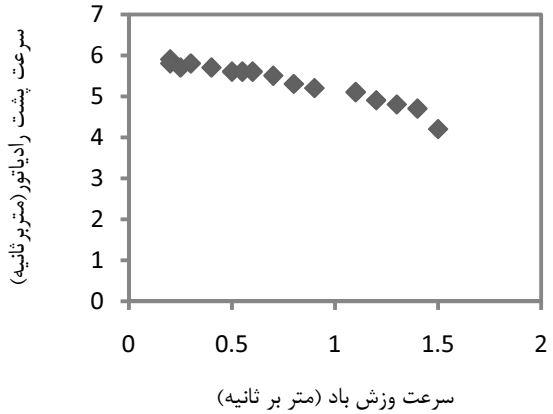
همچنین اختلاف ایجاد شده در دمای آب ورودی و خروجی به سکتور ۶ که در پشت برج قرار گرفته نشان می‌دهد که این سکتور دارای عملکرد مناسبی می‌باشد.

شکل ۸ سرعت جریان شعاعی خروجی از رادیاتور دلتای مناسب (در جهت باد) را بر حسب سرعت وزش باد نشان می‌دهد. همان گونه که در شکل نشان داده شده سرعت جریان خروجی با افزایش سرعت وزش باد، افزایش یافته است. به عبارت دیگر، این دلتا از برج خنک‌کن با افزایش سرعت باد دارای راندمان بهتری می‌شود.

شکل ۹ سرعت شعاعی خروجی جریان هوا از رادیاتور دلتای بحرانی (در کناره جانبی برج یعنی سکتور ۲) را بر حسب سرعت وزش باد نشان می‌دهد. همان طور که در شکل نشان داده شده سرعت جریان خروجی با افزایش سرعت وزش باد، کاهش یافته است. به عبارت دیگر، راندمان این دلتا از برج خنک‌کن با افزایش سرعت باد کاهش می‌یابد.



شکل ۸ سرعت شعاعی در پشت رادیاتور دلتای مناسب بر حسب سرعت وزش باد



شکل ۹ سرعت شعاعی در پشت رادیاتور دلتای نامناسب بر حسب سرعت وزش باد

پس از مشخص شدن دلتاهای خوب و بحرانی، مناسب است تا جریان در داخل دلتاهای مذکور بررسی شده و الگوی جریان هوا مشخص شود. با مشخص شدن الگوی جریان هوا در ورودی دلتا می‌توان روش‌های مناسبی را برای بهبود عملکرد رادیاتور ارائه داد.

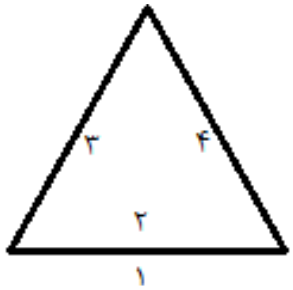
۵- آشکارسازی جریان

یکی از تکنیک‌های قدیمی برای آشکارسازی جریان، استفاده از تافت است. تافت به رشته‌هایی از الیاف اطلاق می‌شود که دارای وزن کم و انعطاف مناسب بوده که به صورت یک سر درگیر روی مدل نصب شده و طرف دیگر آنها می‌تواند آزادانه حرکت کند. این حرکت تابعی از جهت و نوع جریان می‌باشد [۱۰]. با توجه به پیچیدگی جریان و گردابه‌ها، در این تحقیق با استفاده از تافت مرئی‌سازی انجام شده است تا الگوی جریان هوا در قسمت پایین اطراف برج و به خصوص ورودی‌ها مورد ارزیابی قرار گیرد. به این منظور با استفاده از مجموعه‌ای از تافت‌ها الگوی جریان در داخل دلتاهای با عملکرد مناسب و ضعیف بررسی شده است. نحوه اندازه‌گیری به این صورت بود که میله تافت در سه ضلع دلتا قرار می‌گرفت و از آن تصویربرداری می‌شد. برای پوشش ارتفاع نیز صفحه‌ای مشبک از تافت‌ها در جهات مختلف قرار می‌گرفت. همچنین با استفاده از دوربین حرارتی از نحوه توزیع دما در آن دلتا نیز تصویربرداری شده است.

شکل‌های ۱۰ تا ۱۴ الگوی جریان باد در دلتای مناسب را نشان می‌دهند که با استفاده از آنها می‌توان الگوی جریان باد در دلتای مناسب (واقع در سکتور ۳) را بررسی کرد. شکل ۱۰ شماتیک سطح برش خورده افقی دلتا و مکانهای قرارگیری تافت‌ها را نشان می‌دهد.

شکل ۱۱ الگوی جریان هوا در محل ۱ را نشان می‌دهد که از بیرون دلتا گرفته شده است. شکل ۱۱ بیان کننده این است که جریان به صورت موازی وارد لوور می‌شود.

شکل ۱۲ نشان دهنده محل قرارگیری تافت‌ها در ایستگاه ۲ (در دهانه دلتا و از سمت داخل) می‌باشد. جهت تافت‌ها نشان دهنده جهت جریان در راستای عمود بر رادیاتور است.



شکل ۱۰ شماتیک سطح برش خورده افقی دلتا

شکل ۱۱ الگوی جریان هوا در محل ۱ دلتای مناسب

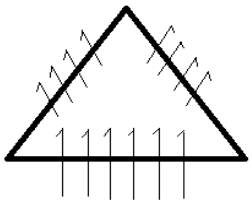
شکل ۱۲ الگوی جریان هوا در محل ۲ دلتای مناسب

شکل ۱۳ رادیاتور سمت چپ (محل ۳) و شکل ۱۴ رادیاتور سمت راست (محل ۴) را نشان می‌دهد. در این حالت‌ها دیده می‌شود که جریان وارد رادیاتورها می‌شود. لذا با توجه به تصاویر تافت که در ۴ جهت نشان داده شده است، می‌توان الگوی جریان هوا در دلتای مناسب را به صورت شماتیک شکل ۱۱ ترسیم نمود.

شکل‌های ۱۶ تا ۱۹ الگوی جریان باد در دلتای بحرانی را نشان می‌دهند، که با استفاده از آنها می‌توان الگوی جریان باد در دلتای بحرانی را بررسی کرد. شکل ۱۶ جریان در محل ۱ را نشان می‌دهد، که از بیرون دلتا گرفته شده است. شکل ۱۶ بیان کننده این است که جریان به سمت داخل و سمت چپ تمایل دارد.

شکل ۱۳ الگوی جریان هوا در محل ۳ دلتای مناسب

شکل ۱۴ الگوی جریان هوا در محل ۴ دلتای مناسب



شکل ۱۵ شماتیک الگوی جریان در دلتای مناسب

شکل ۱۷ نشان دهنده محل قرارگیری تافت‌ها در ایستگاه ۲ (در دهانه دلتا و از سمت داخل) می‌باشد. جهت تافت‌ها نشان دهنده جهت جریان به موازات دهانه می‌باشد.

شکل ۱۸ رادیاتور سمت چپ را نشان می‌دهد. در این حالت دیده می‌شود که قسمت اعظم جریان به موازات دیواره رادیاتور حرکت می‌کند و فقط مقدار کمی از آن تمایل به عبور از رادیاتور دارد و در انتهای دیواره رادیاتور، جریان به سمت دیواره سمت راست می‌چرخد.

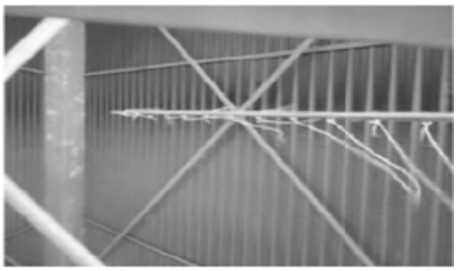
شکل ۱۹ رادیاتور سمت راست را نشان می‌دهد. در این حالت دیده می‌شود که قسمت اعظم جریان به موازات دیواره رادیاتور و به سمت دهانه خروجی حرکت می‌کند و فقط مقدار کمی از آن تمایل به عبور از رادیاتور دارد و در انتهای دیواره رادیاتور، جریان به سمت دهانه بیرونی می‌چرخد. لذا با توجه به تصاویر تافت که در ۴ جهت نشان داده شده است، می‌توان الگوی جریان هوا در دلتای نامناسب را به صورت شماتیک شکل ۲۰ ترسیم نمود.

شکل ۱۶ الگوی جریان هوا در محل ۱ دلتای نامناسب

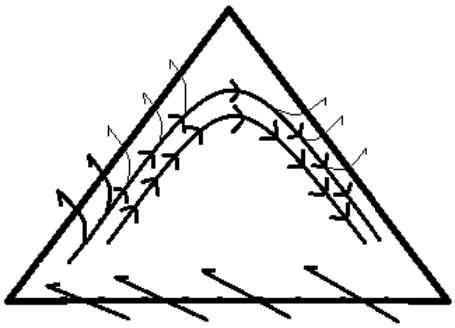
شکل ۱۷ الگوی جریان هوا در محل ۲ دلتای نامناسب

شکل ۱۸ الگوی جریان هوا در محل ۳ دلتای نامناسب

همان طور که در شکل دیده می‌شود جریان درون دلتا یک حرکت گردابه مانند را دارد که این امر باعث عدم نفوذ جریان به داخل رادیاتورها و در نتیجه کارکرد نامناسب آنها می‌شود.



شکل ۱۹ الگوی جریان هوا در محل ۴ دلتای نامناسب



شکل ۲۰ شماتیک جریان درون دلتای بحرانی

۶- مرئی‌سازی حرارتی

با توجه به پیچیدگی‌های اندازه‌گیری میدانی، به منظور بررسی بهتر الگوی جریان، مناسب است توزیع دما در دلتاهای مربوطه اندازه‌گیری شود. کاملاً مشخص است در صورتی که انتقال حرارت به خوبی انجام شود و جریان باد از رادیاتورها عبور کند دمای آن قسمت از رادیاتور پایین‌تر خواهد بود. لذا مکان‌هایی که دما بالاتر نشان داده می‌شود، نشانگر عدم انتقال حرارت مناسب و یا به عبارت دیگر عدم عبور جریان هوای مناسب خواهد بود.

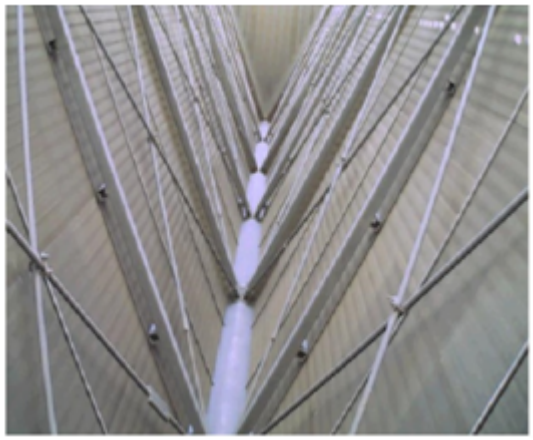
شکل ۲۱- الف تصویر دلتای قرار گرفته در سکتور مناسب (رو به باد) را نشان می‌دهد.

شکل ۲۲ تصویر حرارتی همان دلتا را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل نشان داده شده است، قسمت اعظم سطح رادیاتور دارای دمای یکنواخت حدود ۴۸ درجه می‌باشد. لازم به ذکر است دمای سطح رادیاتور بین ۳۹/۸ تا ۵۹/۹ درجه تغییر می‌کند.

با توجه به آزمایش‌هایی که با استفاده از تافت انجام شده و همچنین تصویرهای حرارتی می‌توان الگوی جریان را مطابق شکل ۱۵ تأیید کرد.

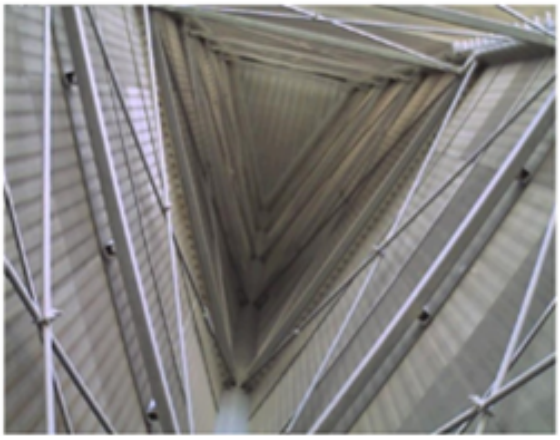
شکل ۲۳ تصویر دلتای قرار گرفته در سکتور نامناسب (مماس به باد) را نشان می‌دهد.

شکل ۲۴ تصویر حرارتی همان دلتا را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، توزیع دما بر روی رادیاتورها به صورت یکنواخت نمی‌باشد و کمترین دما مربوط به رادیاتور سمت چپ (رادیاتور رو به باد) می‌باشد و به سمت داخل رفته رفته دما افزایش می‌یابد و بیشترین دما مربوط به قسمت بیرونی رادیاتور سمت راست می‌باشد. لازم به ذکر است دمای سطح رادیاتور بین ۳۹/۸ تا ۵۹/۹ درجه تغییر می‌کند. با توجه به آزمایش‌هایی که با استفاده از تافت انجام شده و همچنین تصویرهای حرارتی می‌توان الگوی جریان را مطابق شکل ۲۰ تأیید کرد.

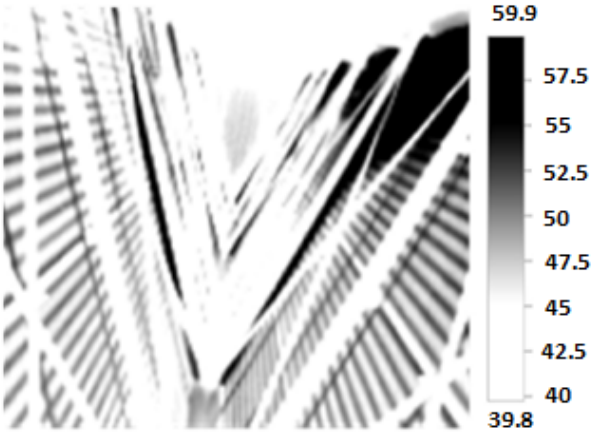


شکل ۲۱ دلتای قرار گرفته در سکتور مناسب

شکل ۲۲ تصویر حرارتی دلتای قرار گرفته در سکتور مناسب



شکل ۲۳ دلتای قرار گرفته در سکتور نامناسب



شکل ۲۴ تصویر حرارتی دلتای قرار گرفته در سکتور نامناسب

۷- جمع‌بندی

با توجه به تحقیقات میدانی انجام شده و بررسی داده‌ها در ارتباط با برج خنک‌کن خشک می توان نتایج زیر را ارائه داد:

۱- با توجه به الگوی جریان در قسمت پایین اطراف برج خنک‌کن می‌توان تشخیص داد که پدیده جدایش در اطراف برج خنک‌کن اتفاق نیفتاده است و دلیل آن وجود مکش در رادیاتورهای برج خنک‌کن می‌باشد. لذا برای تجزیه و تحلیل و صحه‌گذاری نتایج عددی و تجربی تونل باد وجود جدایش در قسمت پایین اطراف برج خنک‌کن قابل قبول نمی‌باشد.

۲- با توجه به اندازه‌گیری سرعت جریان باد در خروجی دلتاها مشخص شد، در مکان‌هایی که سرعت جریان مماسی در خارج از برج خنک‌کن بالا می‌باشد، سرعت جریان خروجی از دلتاهای فوق کمتر خواهد بود. همچنین با اندازه‌گیری دمای آب ورودی و خروجی به رادیاتورهای این دلتاها مشخص شد که این

رادیاتورها دارای انتقال حرارت کمتر می‌باشند. لذا دلتاهای بحرانی و نامناسب در مکان‌هایی است که سرعت مماسی بیشترین مقدار را دارد و دلیل آن نیز کاهش فشار استاتیکی در بیرون برج خنک کننده است.

۳- با افزایش سرعت وزش باد، سرعت خروجی در دلتای مناسب افزایش می‌یابد، ولی سرعت خروجی از دلتای بحرانی کاهش می‌یابد.

۴- با استفاده از تافت و همچنین تصویرهای حرارتی، الگوی جریان هوای ورودی به دلتای مناسب مشخص شد. این الگوی جریان طوری است که تقریباً جریان هوا عمود بر ضلع مقابل دلتا وارد شده و به صورت یکنواخت وارد قسمت‌های رادیاتور می‌شود که نشان دهنده الگوی مناسب جریان است.

۵- بررسی انجام شده با استفاده از تافت و همچنین تصویرهای حرارتی، الگوی جریان هوای ورودی به دلتای نامناسب را مشخص کرد. این الگوی جریان طوری است که جریان هوای ورودی به دلتا یکنواخت نبوده و دارای زاویه شدیدی نسبت به سطح عمود می‌باشد. این زاویه سبب می‌شود که در قسمت‌هایی از رادیاتور جریان عبوری نداشته باشیم و الگوی جریان به حالت گردابه مانند باشد و با توجه به تصاویر حرارتی قسمت‌های زیادی از رادیاتورها عمل نمی‌کند.

۶- با توجه به بحث‌های انجام شده مشخص می‌شود، که برای تحقیقات عددی و یا تجربی، شبیه‌سازی صحیح جریان در اطراف دلتاها مهم بوده و در صورتی که بتوان جریان هوای ورودی به دلتاهای بحرانی را با روش‌های مختلف از جمله پره‌های راهنما کنترل و هدایت نمود می‌توان راندمان را افزایش داد که قابل بررسی است.

۸- تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند که از مسئولان محترم برق منطقه‌ای تهران و همچنین مسئولان و کارشناسان نیروگاه منتظر قائم که ضمن پشتیبانی، شرایط لازم برای این تحقیق را فراهم نمودند، تقدیر و تشکر نمایند.

۹- مراجع

[1] Wei Q., Zhang B., Liu K., "A Study of the Unfavorable Effects of Wind on the Cooling Efficiency of Dry Cooling Towers", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 54 & 55, February 1995, pp. 633-643.

[2] Preez A.F., Kroger D.G., "Effect of wind on performance of a dry cooling tower", *Heat Recovery Systems and CHP Journal*, Vol. 13, Issue 2, March 1993, pp. 139-146.

[3] keyhani M.H., Molavi A., "Experimental study of the effect of wind break on natural dry cooling tower", in *The 1th national Conference on thermal power plant*, Tehran, Iran, 2009. (In Persian)

[4] Fransson J., Konieczny P., Alfredsson P., "Flow around a porous cylinder subject to continuous suction or blowing", *Journal of Fluids and Structures,* Volume 19, Issue 8, November 2004, pp. 1031-1048.

[5] Madadnia M., Koosha H., Mirzaei M., "Effect of Wind Break Walls on Performance of a Cooling Tower Model", *Mech. & Aerospace Eng. Journal*, Vol. 3, No. 4, winter 2008, pp. 61-67.

[6] Su M.D., Tang G.F., "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. 74, 1999, pp. 289-306.

[7] Parvizi B., *Analysis of negative effect of wind power on performance of dry cooling tower and provide solution*, MSc Thesis, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, 2009. (In Persian)

[8] Morovati H., *Numerical Simulation of effect of wind on performance of dry cooling tower of Yazd power plant*, MSc Thesis, Department of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, 2010. (In Persian)

[9] Metrological report, Karaj Agricultural synoptic weather station, 1996-2005.

[10] Ardekani M.A., *Design and Application of Low Speed Wind Tunnel*, K.N.T. University Publication, pp. 142-170, Tehran, 2009. (In Persian)