



Evaluation of the Efficiency of Hybrid Dry Cooling Tower by Placing the Air Cooling Condenser inside the Heller Cooling Tower

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Gharebaei H.¹
Jahangiri A.^{1*}
Ameri M.¹

How to cite this article

Gharebaei H, Jahangiri A, Ameri M. Evaluation of the Efficiency of Hybrid Dry Cooling Tower by Placing the Air Cooling Condenser inside the Heller Cooling Tower. Modares Mechanical Engineering. 2021;21(7):441-452.

¹ Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
P.O.B. 19839-4716
Phone: -
Fax: -
a.jahangiri@sbu.ac.ir

Article History

Received: October 31, 2020
Accepted: March 31, 2021
ePublished: June 17, 2021

ABSTRACT

The Heller towers are the most common types of power plants cooling towers where their efficiency is very sensitive to wind. According to the general approach of cooling systems designer, Direct dry cooling (ACC) systems are more popular today in power plants located in arid areas. In Heller towers due to the empty space inside them, in this study, instead of proposing the replacement of ACC towers, the hybrid model is proposed, where steam is directly passed into the ACC radiators without fan installed inside the Heller Tower, and condenses with a natural suction mechanism. The flow around the proposed model is investigated in three dimensions in two cases of no wind and at 8 different wind speeds with the assumption of incompressibility flow by the continuity, momentum, energy, and turbulence equations. The hybrid tower performance has been compared with the Fars power plant cooling system and it has been shown that the proposed cooling tower has performed 25% better than the Fars cooling system in no wind condition. It has also performed better in wind conditions at different speeds except for speeds above 12.5 m/s at a parallel and vertical array with the wind of ACCs. A vertical array of ACCs performance has been better than the parallel array. Therefore, the hybrid model with a vertical array of ACCs can be efficient to replace the cooling system of the Fars power plant.

Keywords Direct Dry Cooling Towers, Natural Draft Dry Cooling Towers (Heller), Computational Fluid Dynamics, Hybrid Model

CITATION LINKS

[1] Modern power system analysis. [2] Air-cooled heat exchangers and cooling towers. [3] Air cooling techniques in power plants. [4] The performance of natural draft dry cooling towers under crosswind: CFD study. [5] Numerical simulation of fluid flow and thermal performance... [6] Dimensional characteristics of wind effects ... [7] A quantitative approach identifies the critical flow ... [8] Operation of air-cooling CHP generating unit... [9] Numerical investigation of the performance of Heller type cooling towers... [10] Use of guide vanes for improvement of flow pattern... [11] Heat rejection enhancement in natural draft cooling tower... [12] A performance enhancement of a natural draft dry cooling tower... [13] Ventilation enhancement for a natural draft dry cooling tower... [14] The effect of windbreak walls on the thermal performance... [15] Wind-break walls with optimized setting angles for natural draft dry cooling tower... [16] The adoption of windbreak wall partially rotating to improve thermo-flow performance... [17] Feasibility study of the thermal performance improvement of natural draft dry cooling towers... [18] Thermal performance improvement of the three aligned natural draft dry cooling towers... [19] A proposed stack configuration for dry cooling tower... [20] Alternative geometry for cylindrical natural draft cooling tower... [21] Proposition of obliqueable ring installation at crown of the Hellertype cooling tower... [22] A numerical study on interactions between three short natural draft dry cooling towers... [23] Experimental investigation of the effect of perimeter windscreens... [24] Performance assessment of air-cooled steam condenser... [25] Square array of air-cooled condensers to improve thermo-flow performances... [26] Cooling performance of natural draft hybrid system... [27] Performance analyses of a combined natural draft hybrid cooling system... [28] Achieving near-water-cooled power plant performance... [29] Direct dry cooling system through hybrid ventilation... [30] Investigation of a new hybrid cooling system... [31] Archive of Fars Combined Powerplant. [32] Manual for installation maintenance and operation of COFIMCO G series rotor. [33] The finite volume method in computational fluid dynamics. [34] Numerical heat transfer and fluid flow.

بررسی کارایی برج خنک‌کن خشک هیبریدی با جاگذاری ACC در داخل برج خنک‌کننده هلر

حسل قره بایی

مهندسی مکانیک، گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

علی جهانگیری*

مهندسی مکانیک، گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

محمد عامری

مهندسی مکانیک، گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

برج‌های هلر از رایج‌ترین برج‌های خنک‌کن نیروگاه‌ها می‌باشند که تغییرات شرایط جوی نظیر وزش باد بر روی بازده حرارتی آن‌ها بسیار تأثیرگذار است. با توجه به رویکرد کلی شرکت‌های طراح سیستم‌های خنک‌کننده، امروزه در نیروگاه‌های واقع در مناطق خشک استقبال بیشتری از کندانسورهای هوایی شده است. در برج‌های هلر با توجه به فضای خالی بدون استفاده داخل آن‌ها، در این پژوهش به جای پیشنهاد جایگزینی کندانسورهای هوایی، مدل هیبریدی هلر- کندانسورهای هوایی پیشنهاد شده است که در آن بخار خروجی از توربین مستقیماً وارد رادیاتورهای کندانسورهای هوایی بدون فن که در داخل برج هلر تعبیه شده‌اند، شده و با مکانیزم مکش طبیعی، چگالش می‌یابد. مدل پیشنهادی در دو آرایش عمود و موازی جهت باد از کندانسورهای هوایی ارائه شده است که جریان اطراف مدل با فرض تراکم ناپذیر بودن، توسط معادلات پیوستگی، مومنتوم، انرژی و معادلات آشفنگی $k - \epsilon$ به صورت سه بعدی و در دو حالت عدم وزش باد و وجود وزش باد در 8 سرعت بررسی شده است. پس از بررسی‌های انجام شده عملکرد برج هیبریدی با سیستم خنک‌کاری واقعی نیروگاه فارس مقایسه شده و نشان داده شده است که برج خنک‌کن پیشنهادی در حالت عدم وزش باد، 25% نسبت به سیستم خنک‌کاری بهبود داشته و در شرایط وزش باد نیز در سرعت‌های کمتر از $12/5 \text{ m/s}$ از دو آرایش ذکر شده از کندانسورهای هوایی عملکرد بهتری داشته است. همچنین با مقایسه عملکرد برج هیبریدی در دو آرایش عمود و موازی جهت باد از کندانسورهای هوایی، آرایش عمودی از آن‌ها به عنوان گزینه مناسب معرفی شده است.

کلیدواژه‌ها: برج‌های خنک‌کننده خشک مستقیم، برج‌های خشک با مکش طبیعی (هلر)، دینامیک سیالات محاسباتی، مدل هیبریدی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۱۱

* نویسنده مسئول: a_jahangiri@sbu.ac.ir

۱- مقدمه

برج‌های خنک‌کننده یکی از مهم‌ترین قسمت‌های نیروگاه‌های تولیدکننده برق می‌باشد که علاوه بر مصرف انرژی بالا، بررسی تلفات در آن‌ها در سال‌های اخیر از اهمیت زیادی برخوردار بوده است. افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی، مصرف انرژی و هزینه‌های اقتصادی باعث شده است که بررسی‌هایی در جهت افزایش بازدهی نیروگاه‌ها انجام شود. سیستم خنک‌کننده در یک نیروگاه حرارتی از جمله تجهیزاتی است که نیازمند مصرف انرژی جهت

خنک‌کاری آب‌گردشی در نیروگاه است^[1]. سیستم خنک‌کن مورد استفاده در نیروگاه سیکل ترکیبی فارس، برج خنک‌کن خشک با مکش طبیعی می‌باشد. برج خنک‌کننده خشک با مکش طبیعی (هلر) شامل یک سری رادیاتور است که آب گرم دریافت شده از کندانسور از آن عبور می‌کند و گرمای آب‌گردشی توسط هوا گرفته شده و عمل خنک‌کاری صورت می‌گیرد. از معایب مهم برج‌های خنک‌کننده خشک طبیعی، تأثیر شرایط جوی نظیر دمای محیط و سرعت وزش باد بر روی بازدهی این برج است که استفاده از آن را محدود ساخته است.

عملکرد سیستم برج‌های خنک‌کننده خشک مستقیم (ACC) به این صورت است که بخار خروجی از توربین مستقیماً از طریق لوله‌های بخار و سیستم توزیع بخار به درون دسته لوله‌هایی منتقل می‌شود و این دسته لوله‌ها با قرار گرفتن در معرض وزش هوای خروجی از فن‌ها، سبب خنک‌کاری می‌شوند. از جمله معایب این سیستم‌ها می‌توان به محل قرارگیری کندانسورهای هوایی اشاره کرد که باید بسیار نزدیک به توربین باشند که باعث می‌شود کانال انتقال بخار توربین به برج با ابعاد بزرگی ساخته شود^[2].

تأثیر شرایط محیطی از جمله شرایط وزش باد می‌تواند بیش از 40% ظرفیت خنک‌کاری برج را کاهش دهد. در بسیاری از طراحی‌های صورت گرفته از برج‌های خنک‌کن، از تأثیر وزش باد صرف‌نظر شده است^[3]. در این شرایط، به علت برهم خوردن تقارن توزیع فشار در اطراف برج، ایجاد گردابه در داخل برج، ایجاد مناطق جدایش جریان و همچنین به وجود آمدن پدیده درپوشی در خروجی برج، دبی هوای ورودی به برج و عملکرد برج خنک‌کن کاهش می‌یابد^[4-7]. در برج‌های خنک‌کننده مستقیم (ACC) نیز تحت شرایط باد، به دلیل نقص‌های هندسی، عبور هوای خنک‌کننده به صورت عمود بر فن‌های جریان محوری دشوار می‌گردد، از این رو عملکرد آن‌ها نیز اساساً به باد حساس است^[8].

بسیاری از محققین جهت بررسی و بهبود عملکرد برج در شرایط وجود اثرات محیطی از روش‌های عددی استفاده کردند. رشادتجو و همکاران^[9]، با ارائه بادشکن‌های شعاعی و اردکانی و همکاران^[10] با ارائه پره‌هایی به صورت آبشار در پایه برج، عملکرد برج هلر را بهبود بخشیدند. گودرزی^[11]، طرح پیشنهادی استفاده از چند مبدل حرارتی به عنوان دیواره بادشکن را بررسی کرده و نشان داده است که به جای استفاده از دیوار بادشکن معمولی، علاوه بر کاهش سرعت و هدایت جریان هوا به داخل برج، از ظرفیت سرمایه‌گذاری جریان هوای سردی که با سرعت به آن برخورد می‌کند نیز می‌توان استفاده نمود. وانگ و همکاران^[12, 13] با بازسازی قسمت ورودی هوا با استفاده از یک سازه پرپیچ و خم و همچنین یک سازه بادگیر مانند دایروی در یک برج خنک‌کننده خشک با مکش طبیعی، اثر مخرب باد بر روی هوای ورودی را کاهش دادند. واکا و همکاران^[14] و ما و همکاران^[15, 16] انواع دیگری از دیوارهای بادشکن را با تعداد و زوایای مختلف در اطراف

بوستامنت و همکاران^[28]، دو سیستم خنک کننده هیبریدی تر و خشک را در دمای بالا ارائه کرده‌اند که نشان می‌دهد، خنک کننده هیبریدی عملکرد ACC را با حداقل مصرف آب بهبود می‌بخشد. کونگ و همکاران^[29]، برای یک واحد تولید توان ۱۲۰۰ مگاوات، دو نوع سیستم خنک کننده خشک مستقیم هیبریدی و دارای فن با چیدمان‌های دایره‌ای و مستطیلی را پیشنهاد کردند و نشان دادند که در جهات مختلف باد عملکرد قابل قبولی دارند.

با توجه به رویکرد کلی شرکت‌های طراح و سازنده سیستم‌های خنک کننده، امروزه در نیروگاه‌های واقع در مناطق خشک استقبال بیشتری از سیستم‌های خنک کننده خشک مستقیم (ACC) به چشم می‌خورد. در برج‌های هلر با توجه به فضای خالی بدون استفاده در داخل آن‌ها که در نیروگاه فارس قطر پایه آن ۷۹ متر است، در این پژوهش به جای پیشنهاد جایگزینی برج‌های ACC، مدل هیبریدی هلر-ACC پیشنهاد شده است که در آن با جاگذاری رادیاتورهای ACC بدون فن در داخل پوسته برج هلر، بخار خروجی از توربین مستقیماً وارد برج هیبریدی شده و با مکانیزم مکش طبیعی، چگالش می‌یابد. همچنین با حذف فن‌های ACC در مصرف انرژی نیز صرفه‌جویی می‌گردد. با توجه به اهمیت نحوه آرایش ماژول‌های ACC در داخل برج هلر در شرایط وزش باد، برج هیبریدی در دو نوع آرایش از ردیف‌های ماژول‌های ACC به صورت موازی و عمود با جهت باد معرفی و بررسی شده است.

۲- معادلات حاکم

در پژوهش حاضر یک جریان تراکم ناپذیر سه بعدی و دائم شبیه‌سازی شده است. بدیهی است که معادلات حاکم شامل معادله بقای جرم، معادله اندازه حرکت و معادله انرژی و معادلات $k-\epsilon$ هستند. فرضیه لزجت گردابه‌ای بوزینسک برای تنش‌های رینولدز استفاده شده است. معادلات اساسی معادلات رینولدز بوده که به شکل برداری به صورت زیر نوشته می‌شوند^[10]:

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (1)$$

$$(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\vec{\nabla}P + \vec{\nabla} \cdot \vec{\sigma} - \beta(T - T_a) \vec{g} + \vec{S}_h \quad (2)$$

$$(\vec{v} \cdot \nabla)T = -\vec{\nabla} \cdot [\Gamma + \Gamma_t] \vec{\nabla}T + Q_h \quad (3)$$

که در روابط بالا V بردار سرعت، در رابطه (۲)، T دما و σ تانسور تنش است که به صورت زیر تعریف می‌شود^[10]:

$$\sigma_{ij} = (\mu + \mu_t) S_{ij} \quad (4)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

در رابطه (۴)، μ و μ_t لزجت مولکولی و تلاطمی است. همچنین در رابطه (۲)، $\beta = \left(-\frac{1}{\rho}\right) \left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)$ در ترم شناوری، ضریب انبساط حجمی هوا می‌باشد که برای گاز کامل $\beta = -\frac{1}{T}$ و T_a دمای اتمسفر است.

برج، ارائه داده‌اند که نتایج بررسی آن‌ها نیز بهبود عملکرد برج را نشان داده است.

جهانگیری و همکاران^[17, 18] با استفاده از تزریق دود به داخل برج نشان دادند که مدل پیشنهادی در شرایط باد، عملکرد بهتری نسبت به مدل واقعی دارد. همچنین نشان دادند که آرایش برج‌های هلر نیز بر بازده حرارتی تأثیر زیادی دارد.

گودرزی^[19, 20] یک مدل خروجی جدید برای دودکش برج ارائه داده است که نتایج بررسی عددی میدان جریان در اطراف برج پیشنهادی، بیانگر آن است که این شکل پیشنهادی، اثر درپوشی جریان خروجی را کاهش داده و باعث بهبود ۹% در بازدهی خنک کاری آن شده است. همچنین طی مطالعه‌ای دیگر با جایگزینی پوسته برج خنک کن با مقطع بیضوی به جای پوسته معمولی با مقطع دایره‌ای، نشان دادند که در شرایط وجود باد در سرعت بالا بازده خنک کاری بهبود می‌یابد. در تحقیقی دیگر نیز صباغ یزدی و قره جانلو^[21] برای کاهش انسداد خروج هوا از بالای برج خنک کن در هنگام وزش باد، پیشنهاد نصب حلقه کج شونده-ای در بالای برج خنک کن هلر را داده‌اند.

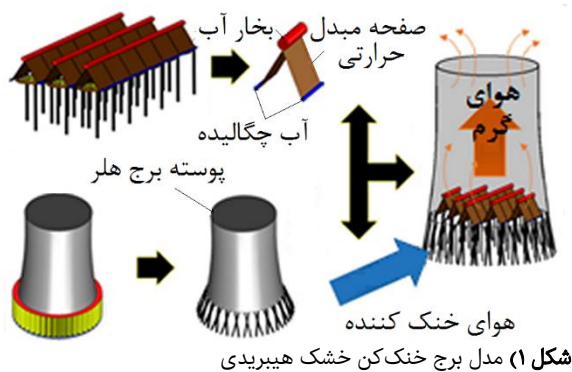
رشادتجو و همکاران^[9] با مطالعه الگوی جریان، عوامل تأثیرگذار بر کاهش دبی جریان هوای ورودی حاصل از تعامل برج‌های خنک کننده، و نیز اثرات منفی باد در آرایش‌های مختلف از برج‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند. خاموشی و همکاران^[22] عملکرد سه برج خنک کننده خشک با مکش طبیعی قرارگرفته در یک راستا را در فواصل مختلف از هم و در شرایط مختلف وزش باد بررسی کردند و دریافتند که با افزایش طول این برج‌ها عملکرد آن‌ها در شرایط وزش باد بهبود می‌یابد.

مارینکوویتز و همکاران^[23] اثر استفاده از شیشه اتومبیل را به عنوان بادشکن، بر روی فن‌های برج‌های خنک کننده خشک مستقیم بررسی کردند و نشان دادند که فضای ایجادشده توسط شیشه بر روی عملکرد برج‌های خنک کننده خشک مستقیم اثر مثبتی دارد. ژانگ و همکاران^[24]، جهت بهبود عملکرد برج‌های خنک کننده خشک مستقیم از یک مدل پره آبخاری به عنوان هدایت کننده استفاده کردند. جین و همکاران^[25]، مدل آرایش مربعی برج‌های خنک کننده خشک مستقیم را ارائه کردند و نشان دادند که عملکرد حرارتی برج‌های خنک کننده خشک مستقیم در آرایش مربعی، هم در شرایط وجود باد و هم در نبود آن بهبود یافته است.

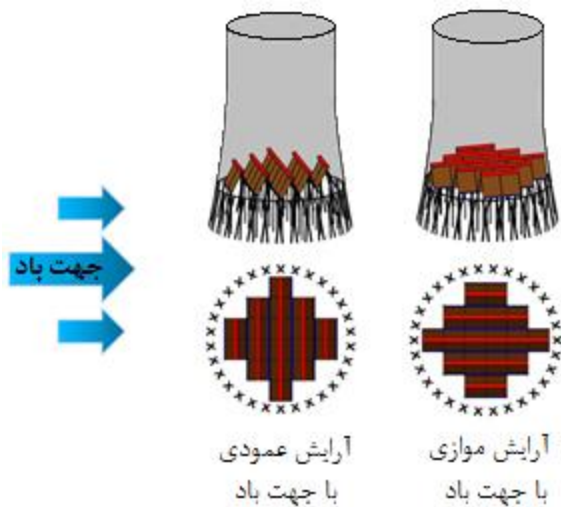
هوانگ و همکاران^[26, 27]، برای جبران و بهبود ضعف ذاتی سیستم‌های خنک کننده خشک مرسوم و متداول، یک سیستم خنک کننده هیبریدی با مکش طبیعی معرفی کرده‌اند تا با ترکیب بخش‌های خنک کننده خشک و تر در یک برج خنک کن با مسیر سری و موازی از جریان هوا از فن‌آوری‌های خنک کننده خشک و تر استفاده شود که بررسی این مدل نشان‌دهنده بهبود سیستم هیبریدی نسبت به سیستم خنک کننده مرسوم بوده است.

۳- هندسه مسئله

در این مدل همانند شکل ۱ رادیاتورهای اطراف برج خنک‌کننده هلر و فن‌های محوری ACCها حذف شده و با هم ترکیب شده‌اند. به عبارتی رادیاتورهای ACC نقش رادیاتورهای حذف شده در برج هلر را دارند به گونه‌ای که بخار خروجی از توربین مستقیماً وارد هدر بالایی رادیاتورهای ACC شده و هنگام پایین آمدن از آن با هوای ورودی به برج هلر که از طریق مکش طبیعی وارد می‌گردد، عمل چگالش در آن صورت می‌گیرد و پس از ورود آب چگالیده شده به هدر پایین، توسط پمپ به مسیر سیکل هدایت می‌گردد. تعداد ۱۸ ماژول ACC بدون فن در این مدل به کار رفته است که پس از بررسی انواع آرایش این ACCها در داخل فضای برج، نحوه چیدمان آن‌ها همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است در دو حالت موازی و عمود با جهت باد از آرایش ACCها، در بهترین حالت ممکن به گونه‌ای که بیشترین تعداد از آن‌ها و با کمترین تداخل در داخل برج هلر جا نمایی گردد، انجام شده است. در شکل ۲ نحوه چیدمان ACCها به صورت متقارن و در ۵ ردیف عمودی ۲ تایی، ۴ تایی و ۶ تایی انجام شده و مابین ردیف‌ها فاصله‌ای حدود ۱ متر برای گذرگاه تعبیه شده است.



شکل ۱) مدل برج خنک‌کن خشک هیبریدی



شکل ۲) نحوه آرایش ماژول‌های ACC در داخل برج هیبریدی

در این مطالعه، مدل رادیاتور برای توصیف ویژگی‌های جریان و انتقال حرارت مجموعه لوله‌های فین دار در کندانسورهای خنک‌کننده هوایی استفاده شده است که هم مقدار افت فشار و هم ضریب انتقال حرارت به صورت توابعی از سرعت بیان می‌گردند:

$$\Delta P = \frac{1}{2} K_L \rho v^2 \quad (۶)$$

که با توجه به رابطه (۲) جمله پسا در معادله مومنتم S_{h1} برابر افت کلی فشار سیال داخل رادیاتور می‌باشد.

با توجه به رابطه ۶، چگالی هوا، v سرعت عمود بر صفحات رادیاتور و K_L یک ضریب تجربی است که از مراجع و داده‌های طراحی سازندگان این سیستم‌ها محاسبه می‌شود [29].

$$K_L = \sum_{n=1}^3 r_n v^{n-1} \quad (۷)$$

و مقادیر r_n به صورت زیر می‌باشد:

$$r_1 = 71.689 \quad r_2 = -31.707 \quad r_3 = 4.798$$

هنگامی که هوا از رادیاتور عبور می‌کند، گرما از رادیاتور گرفته شده و در نتیجه با توجه به رابطه (۳) در معادله انرژی جمله چشمه حرارتی بایستی اضافه شود:

$$Q_h = h A_r (T_s - T_{a,d}) \quad (۸)$$

که A_r سطح انتقال حرارت رادیاتور، T_s دمای بخار خروجی از توربین که وارد صفحات مبدل حرارتی ACC می‌گردد، T_a دمای هوای پایین دست برج هیبریدی و h بیانگر ضریب انتقال حرارت تجربی بوده و از مراجع و داده‌های طراحی سازندگان این سیستم‌ها محاسبه می‌شود [29].

$$h = \sum_{n=1}^3 h_n v^{n-1} \quad (۹)$$

و مقادیر h_n به صورت زیر می‌باشد.

$$h_1 = 536.993 \quad h_2 = 2013.089 \quad h_3 = -97.772$$

معادلات تلاطمی $k-\epsilon$ عبارت است از:

$$(V \cdot \nabla) k = \nabla \cdot [(v + v_t / \sigma_k) \nabla k] + P + G - \epsilon \quad (۱۰)$$

$$(V \cdot \nabla) \epsilon = \nabla \cdot [(v + v_t / \sigma_\epsilon) \nabla \epsilon] + c_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (P + G) - c_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (۱۱)$$

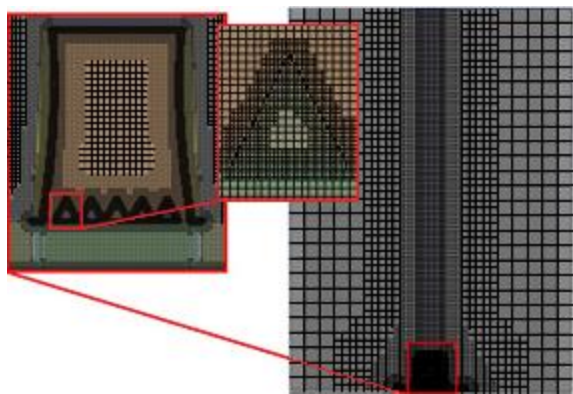
k انرژی جنبشی تلاطمی، ϵ نرخ اتلاف، P انرژی جنبشی تولیدی در اثر تلاطم و G انرژی جنبشی تولیدی در نتیجه شناوری می‌باشد.

به منظور تعریف سرعت و خصوصیات اسکالر جریان ورودی به مرز، شرط مرزی، سرعت ورودی است که پروفیل سرعت وزش باد عبارت است از [18]:

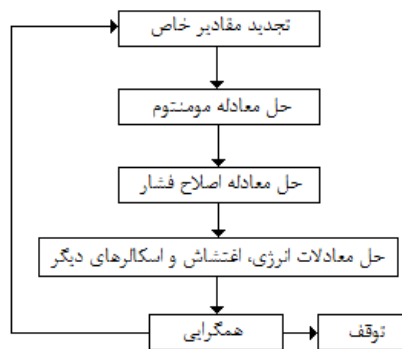
$$V_{cw} = V_{ref} \cdot cw \left(\frac{y}{y_{ref}} \right)^{0.2} \quad (۱۲)$$

$$v \cdot w = 0 \quad y_{ref} = 10m \quad V_{cw,ref} = 2.5 \dots 20 \text{ m/s}$$

است که در شکل ۴ نحوه شبکه‌بندی آن‌ها نشان داده شده است. مدل‌سازی جریان، حول برج خنک‌کن در ابعاد واقعی انجام شده است و جهت تحلیل جریان و میزان انتقال حرارت مطابق شکل ۵ از الگوریتم روش حل تفکیکی در روش دینامیک سیالات محاسباتی استفاده شده است. در این الگوریتم معادلات حاکم به ترتیب حل خواهند شد و چون این معادلات خطی نیستند چندین تکرار در حلقه فرآیند حل قبل از بدست آوردن حل همگرا باید انجام گیرد^[33]. در این بین یک معادله پواسون برای اصلاح فشار از معادله پیوستگی و معادلات خطی شده مومنتم حل می‌شود تا بر روی مقادیر سرعت و فشار و جریان‌های جرمی اصلاحات لازم به عمل آید تا معادلات پیوستگی ارضا شوند که در این پژوهش به دلیل حل پایای مسئله، از الگوریتم سیمپل (SIMPLE) برای ارتباط فشار و سرعت استفاده شده است^[34]. لازم به ذکر است که جمله-های پخش در معادلات بر مبنای روش تفاضل مرکزی مرتب می‌شوند و همیشه با دقت مرتبه دو می‌باشند. روش جداسازی کلیه معادلات نیز آپ ویند مرتبه یک می‌باشد. در نهایت نیز مسئله مورد نظر با در نظر گرفتن معیار همگرایی (مقدار باقیمانده) ارائه شده در جدول ۲ حل شده است. برای بررسی استقلال نتایج از تعداد نقاط مش، مطابق جدول ۳، از ۴ مدل شبکه تولید شده استفاده شده و تعداد ۴۶۸۶۹۴۸ به عنوان مناسب‌ترین گزینه انتخاب شده است.



شکل ۴) شبکه بکار گرفته شده برای شبیه‌سازی جریان در داخل و خارج برج خنک کن خشک هیبریدی



شکل ۵) الگوریتم روش حل تفکیکی^[33]

۴- شرایط مرزی

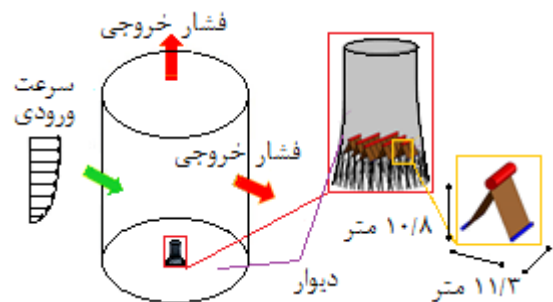
جدول ۱ به ترتیب مشخصات کلی ACCها و برج خنک‌کننده خشک هلر بکار رفته در برج خنک‌کننده خشک هیبریدی را نشان می‌دهد. شکل ۳ نیز نشان‌دهنده ابعاد کلی برج هیبریدی و شرایط مرزی اعمال شده می‌باشد. شرط مرزی سرعت ورودی به منظور تعریف سرعت و خصوصیات اسکالر جریان ورودی به مرز است که پروفیل این سرعت به صورت رابطه ۱۲ اعمال شده است. شرط مرزی فشار خروجی برای تعیین فشار استاتیکی هوا در جریان خروجی و دیگر متغیرهای اسکالر پشت جریان به کار می‌رود. شرط مرزی دیوار برای در بر گرفتن ناحیه نزدیک به سطح جامد انتخاب می‌گردد. شرط مرزی رادیاتور برای مدل کردن مائول‌های ACC بکار می‌رود. رادیاتور به صورت بی‌نهایت نازک و افت فشار رادیاتور متناسب با هد دینامیکی هوا در نظر گرفته می‌شود که این افت فشار ΔP مطابق با رابطه ۶ با مؤلفه عمودی سرعت عبوری از رادیاتور، v تغییر می‌کند^[29].

۵- تولید شبکه محاسباتی، روند حل و استقلال از مش

قدم اول برای حل عددی، تولید شبکه مناسب بر روی دامنه محاسباتی است. در این پژوهش برای تولید هندسه و شبکه محاسباتی از نرم‌افزار Ansys meshing استفاده شده و جهت بررسی تأثیر اثرات مختلف وزش باد بر نتایج جریان و انتقال حرارت روی برج‌های خنک‌کن با توجه به پیچیدگی هندسه و فضای حل مسئله از شبکه‌های ترکیبی تولید شده توسط روش کارترین استفاده شده

جدول ۱) مشخصات فنی برج خنک‌کننده^[31] و ACC^[32]

موضوع	مقدار
برج خنک‌کننده خشک هلر	
قطر پائین برج	۷۹ متر
ارتفاع برج	۱۰۰ متر
سازه تنوره برج	بتونی
ACC	
نوع	Multi-cell
ارتفاع	۱۰/۸ متر
طول مقطع پایین	۱۱/۳ متر
عرض مقطع پایین	۱۱/۳ متر
جنس لوله‌ها	A283-Galvanized
جنس پرها	A283-Galvanized
تولید کننده	GEA



شکل ۳) ابعاد مدل و شرایط مرزی فضای حل مسئله

در رابطه ۱۳ کارایی حرارتی برج هیبریدی در شرایط مختلف بر اساس نسبت حرارت دفع شده از برج هیبریدی (Q_{Hybrid}) به بیشینه حرارت دفع شده از کندانسور ($Q_{Max Condenser}$) و برای بیان کارایی حرارتی کندانسور در شرایط یکسان با برج هیبریدی به صورت نسبت حرارت دفع شده از کندانسور ($Q_{Condenser}$) به بیشینه حرارت دفع شده از کندانسور ($Q_{Max Condenser}$) در سیکل ترکیبی فارس است.

$$\dot{m}^* = \frac{\dot{m}_{Hybrid/Heller}}{\dot{m}_{Max Heller}} \quad (14)$$

در رابطه ۱۴ نیز \dot{m}^* بیانگر دبی هوای بدون بعد است که این مقدار برای برج هیبریدی بر اساس نسبت هوای مکیده شده در برج هیبریدی در شرایط مختلف (\dot{m}_{Hybrid}) به بیشینه هوای مکیده شده در برج هلر ($\dot{m}_{Max Heller}$) و برای برج هلر نیز بر اساس نسبت هوای مکیده شده در برج هلر (\dot{m}_{Heller}) در شرایط یکسان با برج هیبریدی به بیشینه هوای مکیده شده در برج هلر ($\dot{m}_{Max Heller}$) در سیکل ترکیبی فارس است.

۱-۶- بررسی عملکرد برج خنک‌کننده خشک هیبریدی در حالت عدم وزش باد و وزش باد در دو آرایش موازی و عمود با جهت باد از ACCها و در سرعت‌های مختلف

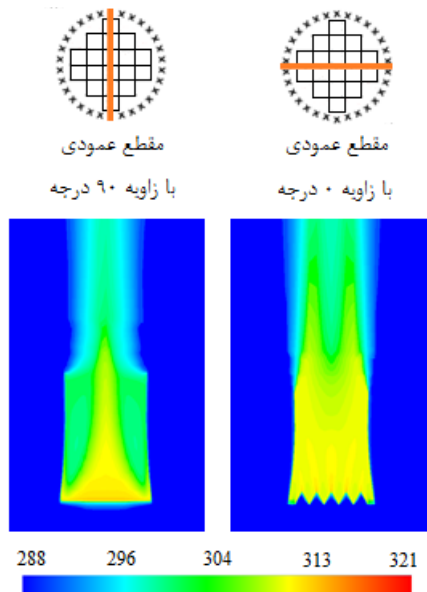
۱-۶-۱- حالت عدم وزش باد (مکش طبیعی)

همان طور که انتظار می‌رود کانتور دمای برج هیبریدی نشان داده شده در شکل ۶ متقارن می‌باشد.

۱-۶-۲- حالت وزش باد در دو آرایش موازی و عمود با جهت باد از ACCها و در سرعت‌های مختلف

۱-۶-۲-۱- آرایش عمود بر جهت باد ACCها

همان طور که در نمودار شکل ۷ مشاهده می‌شود، در سرعت ۲/۵ متر بر ثانیه، مقدار کارایی حرارتی، اندکی بیشتر از حالت عدم وزش



شکل ۶) کانتور دما هوا در مقاطع مختلف طولی از برج خنک‌کن هیبریدی در حالت مکش طبیعی

جدول ۲) معیار همگرایی در پژوهش حاضر

معادلات	پیوستگی	مومنتم	انرژی	توربولنسی
معیار همگرایی	1e-4	1e-6	1e-8	1e-6

جدول ۳) حرارت دفع شده از یک برج هیبریدی برای شبکه‌های مختلف

تعداد شبکه	میزان انتقال حرارت (MW)
۱۵۷۹۸۰۰	۲۳۸/۰۳
۳۲۶۸۸۶۶	۲۳۹/۹۳۹
۴۶۸۶۹۴۸	۲۴۰/۸۱۹
۶۰۳۵۷۰۴	۲۴۰/۹۹

۶- نتایج

برای اعتبارسنجی حل عددی، از نتایج تجربی موجود در خصوص یک برج هلر منفرد در شرایط بهره‌برداری استفاده می‌شود. جدول ۳ مقدار حرارت دفع شده از برج هلر را برای سه حالت نشان می‌دهد. حل عددی انجام شده حدود ۶٪ خطا نسبت به نتایج تجربی موجود دارد که با توجه به مطالعات انجام شده، مقداری قابل قبول می‌باشد.

جدول ۴) اعتبارسنجی حل عددی برای برج هلر منفرد

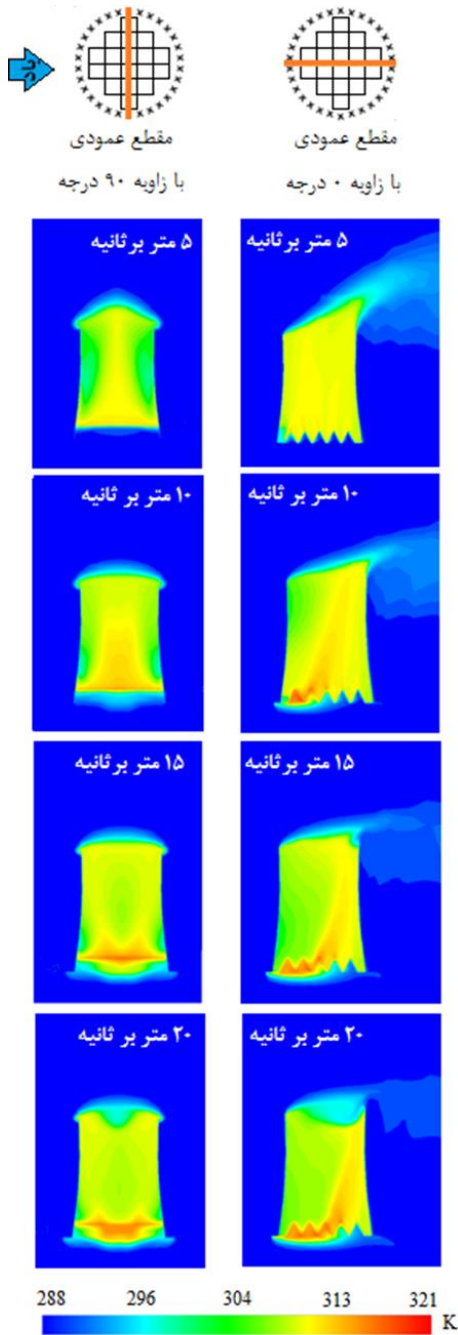
شرایط طراحی	شبیه‌سازی عددی	مقادیر ثبت شده در لاگ‌شیت‌های نیروگاه فارس
حرارت دفع شده (MW)	3/214	8/202

با توجه به متقارن بودن هندسه برج هلر و مبدل‌های آن، جهت باد تأثیری بر عملکرد خنک‌کاری این برج ندارد و تنها سرعت باد، بر عملکرد آن تأثیرگذار است. اما در برج هیبریدی این شرایط وجود نداشته و هندسه آن به گونه‌ای است که عملکرد آن علاوه بر سرعت باد به جهت باد هم وابسته است. در این بخش عملکرد برج هیبریدی در دو آرایش موازی و عمود با جهت باد از ACCها و در سرعت‌های مختلف، بررسی شده و از نظر میدان جریان هوا و مقدار حرارت دفع شده با سیستم خنک‌کاری نیروگاه فارس مقایسه خواهد شد.

با توجه به ورود مستقیم بخار خروجی از توربین به برج هیبریدی، این برج از نظر عملکرد حرارتی نقش کندانسور در سیکل ترکیبی نیروگاه فارس را بر عهده دارد بنابراین در انتهای این پژوهش نتایج مربوط به مقادیر حرارت دفع شده در برج هیبریدی با مقادیر حرارت دفع شده از کندانسور پاششی بدست آمده از بررسی‌های انجام شده در مرجع [30] مقایسه می‌گردد.

با توجه به اینکه جهت مقایسه و بیان بهتر نتایج، نمودارهایی که در ادامه خواهد آمد بر اساس روابط بی بعد متناسب ارائه شده است، این روابط بدون بعد معرفی می‌گردد: رابطه ۱۳ بیانگر کارایی حرارتی (ϵ) می‌باشد.

$$\epsilon = \frac{Q_{Hybrid/condenser}}{Q_{Max Condenser}} \quad (13)$$

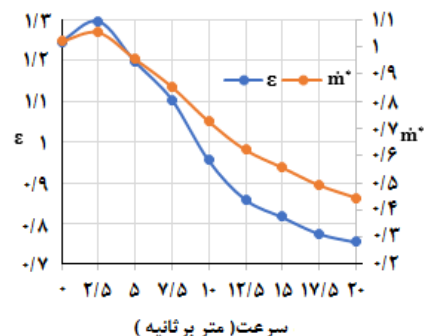


شکل ۸) کانتور دما هوا در مقاطع مختلف طولی از برج خنک کن هیبریدی در آرایش عمودی از ACC ها

۶-۲-۲- آرایش موازی با جهت باد ACC ها

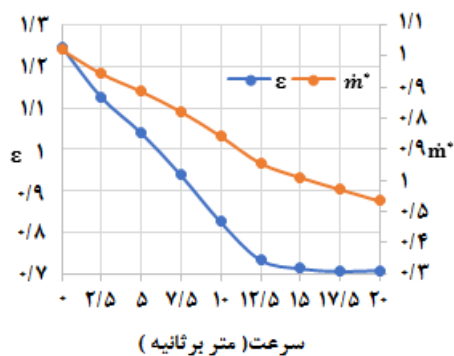
آنچه در شکل ۱۰ مشاهده می شود، در این آرایش نیز با افزایش سرعت وزش باد از میزان کارایی برج کاسته شده و همچنین مکش برج نیز افت می کند. مشابه حالت قبل، کانتورهای ارائه شده در شکل های ۱۱ و ۱۲ جهت توجیه نتایج استفاده می گردد. در این آرایش، وزش باد دقیقاً به موازات محور هر ماژول بوده و تقریباً سطح زیرین تمام ماژول ها تحت تأثیر وزش باد قرار می گیرند. درحالی که در آرایش عمودی ACC ها که وزش باد عمود بر محور

باد گزارش شده است که این امر در اثر ترکیب شرایط انتقال حرارت جابجایی اجباری و آزاد در نزدیکی وضعیت طراحی پایه چنین برج هایی می باشد. در طراحی برج های هلو، حداقل مقدار وزش باد در حدود ۲m/s الی ۲/۵m/s لحاظ می گردد و بهترین عملکرد برج در این شرایط متصور است [4]. در این آرایش با افزایش سرعت وزش باد، به استثنای بادهای ضعیف (کوچک تر از ۲/۵m/s) از میزان کارایی برج کاسته شده و همچنین مکش برج نیز افت پیدا می کند. دلیل این کاهش با توجه به کانتورها و بردارهای ارائه شده در تصاویر ۸ و ۹ بیان می گردد. جهت توجیه نتایج، کانتور دما و بردار سرعت در مقطع طولی به صورت موازی با محور رادیاتورها (مقطع طولی با زاویه ۹۰ درجه) و عمود بر محور آن ها (مقطع طولی با زاویه صفر درجه) ارائه شده است. همان طور که در کانتور دما و بردار سرعت در مقطع طولی (شکل ۸ و ۹) مشاهده می گردد، در اثر افزایش سرعت هوا مقداری از دبی هوای مکیده شده در ارتفاع ۱۵ متری از سمت مقابل برج فرار می کند و همچنین در دهانه بالایی برج که با افزایش ارتفاع، سرعت باد نیز بیشتر شده است (به دلیل پروفیل نمایی سرعت وزش باد)، اثر پوششی (wind covering effect)، دهانه بالای برج را مسدود نموده و باعث کاهش مکش برج می گردد. همچنین با افزایش سرعت، تقارن اولیه که در شرایط عدم وزش باد وجود داشت (شکل ۶)، به هم خورده و باعث ایجاد گردابه های کوچک شده است که با افزایش سرعت باد، تعداد و ابعاد گردابه ها رشد می کند. در واقع در اثر وزش باد، به دلیل ایجاد جریان های ثانویه پیرامون ماژول های ACC، هوایی که به صورت موضعی گرم شده است با احتمال ورود به مبدل های کناری باعث بر هم خوردن تقارن عبور جریان در ماژول ها می شود که با افزایش سرعت باد، این افزایش تجمع هوای گرم در رادیاتورها و همچنین تجمع هوای تقریباً دما پایین در دهانه بالای برج در اثر به وجود آمدن گردابه ها و مسیر جریان هوای عبوری، سبب کاهش عملکرد برج هیبریدی می شود.



شکل ۷) کارایی حرارتی و دبی بی بعد هوای عبوری از برج هیبریدی در آرایش عمود بر جهت باد از ACC ها

هوا در زیر رادیاتورها از سمت مخالف وزش باد مهیا بوده و با افزایش سرعت هوا مقدار بیشتری از دبی هوای مکیده شده در ارتفاع ۱۵ متری از سمت مقابل برج فرار می‌کند و همچنین در دهانه بالایی برج که با افزایش ارتفاع، سرعت باد نیز بیشتر شده است، اثر پوششی منجر به مسدود شدن دهانه بالای برج شده که این انسداد با افزایش سرعت باد شدت یافته است بطوریکه پلوم خروجی از برج همان طور که در تصاویر کانتور دمای طولی مشاهده می‌گردد، کج شده و تقریباً به سمت افقی شدن پیش می‌رود و باعث کاهش مکش برج می‌گردد. همان طور که در کانتورهای دما نیز مشاهده می‌گردد با افزایش سرعت باد تقارن اولیه که در شرایط عدم وزش باد وجود داشت، به هم خورده و باعث ایجاد گردابه‌های کوچک می‌شود. تعداد و ابعاد گردابه‌ها با افزایش سرعت باد، رشد می‌کند. در واقع احتمال می‌رود که در اثر وزش باد، به دلیل ایجاد جریان‌های ثانویه پیرامون ماژول‌های ACC، هوایی که بصورت موضعی گرم شده است وارد مبدل‌های کناری شده و تقارن عبور جریان در ماژول‌ها را برهم ریخته است.

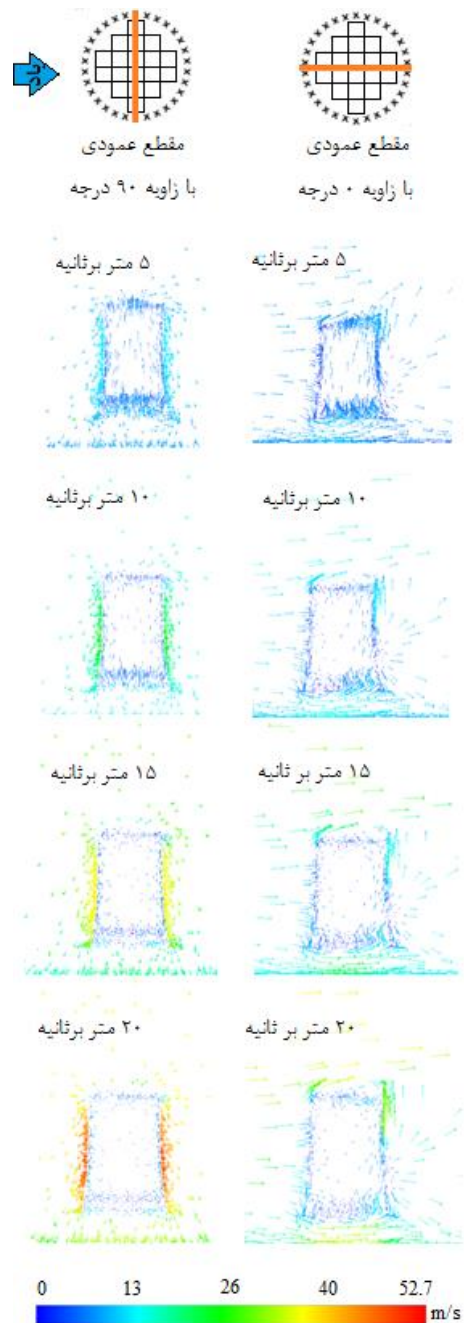


شکل ۱۰) کارایی حرارتی و دبی بی بعد هوای عبوری از برج هیبریدی در آرایش موازی با جهت باد از ACCها

۲-۶- مقایسه برج خنک کن هیبریدی با برج هلر نیروگاه فارس از نظر میدان جریان هوا

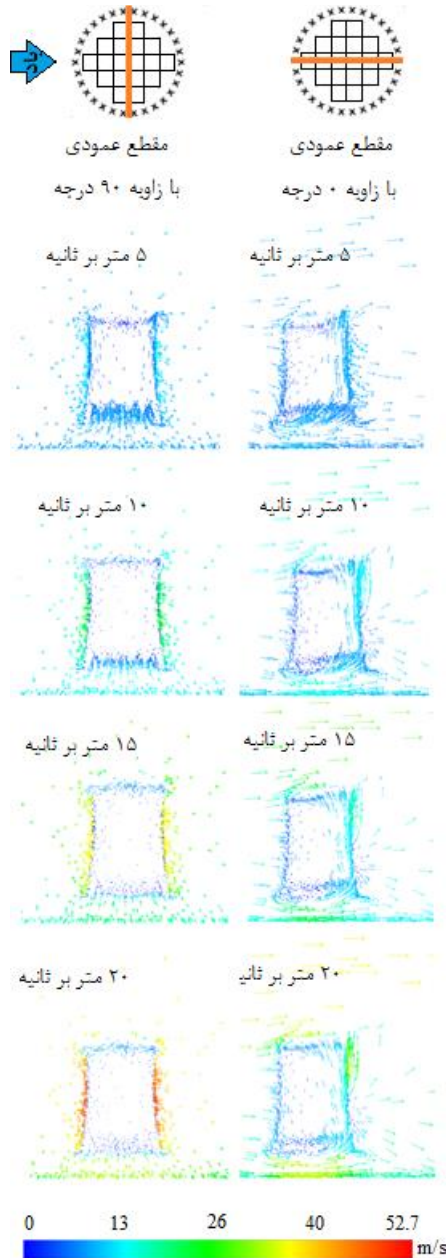
با توجه به اینکه سازوکار خنک‌کاری سیستم خنک کن خشک هلر و نیز سیستم خنک کن هیبریدی بر اساس مکش طبیعی می‌باشد بنابراین در این بخش رژیم جریان هوای اطراف و داخل هر دو برج در شرایط عدم وزش باد و نیز در شرایط وزش باد (برای برج هیبریدی در جهات مختلف) بررسی می‌گردد.

بر اساس شکل ۱۳ برج هیبریدی مقدار هوای عبوری بیشتری حدود ۲ درصد نسبت به برج هلر دارد که با توجه به متوسط دمای بیشتر برج هیبریدی که حدود ۳/۵ درجه بالاتر از برج هلر است، می‌توان این میزان مکش بیشتر را توجیه نمود. (شکل ۱۴)



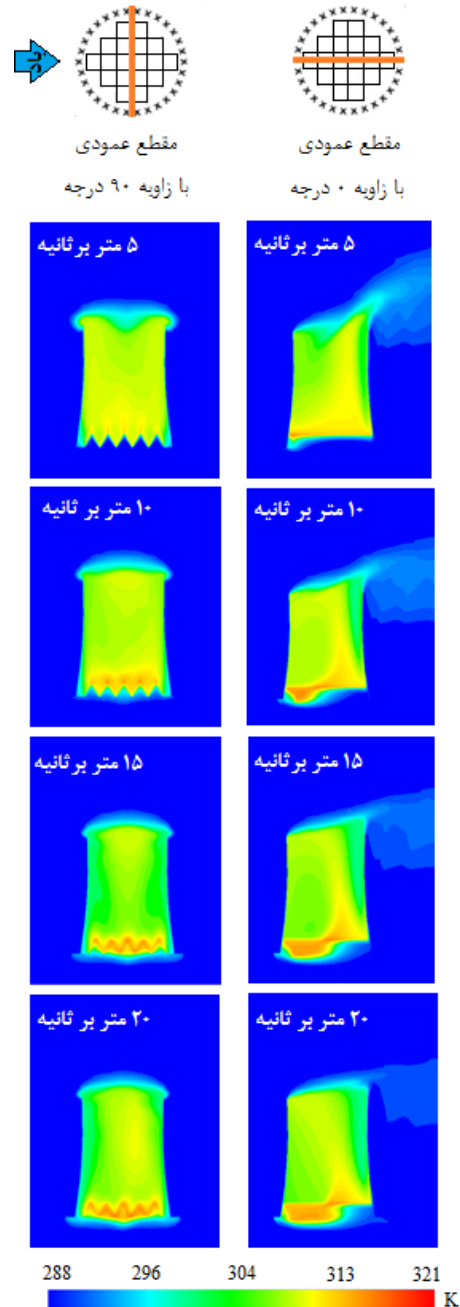
شکل ۹) بردار سرعت هوا در مقاطع مختلف طولی از برج خنک کن هیبریدی در آرایش عمودی از ACCها

ماژول‌ها برقرار شده بود و دو ماژول ابتدایی بیش از سایر ماژول‌ها تحت تأثیر قرار می‌گرفتند. انتظار می‌رود که در این آرایش به دلیل تحت تأثیر قرار گرفتن همه ماژول‌ها از وزش باد، میزان عملکرد برج کاهش بیشتری داشته باشد و با مقایسه شیب نمودارهای دو آرایش، این مهم واضح است. ظاهر کانتورهای دما نیز نشان‌دهنده اختلاف دمای کمتر بین هوای ورودی به ماژول‌ها با هوای عبوری از آن‌ها می‌باشد که نشان می‌دهد هوای گرم‌تر سطح تأثیرگذاری بیشتری از ماژول‌ها را پوشش داده و باعث افت عملکرد آن‌ها شده است. همان طور که در کانتور سرعت و دما در مقطع عمودی (شکل‌های ۱۱ و ۱۲) مشاهده می‌گردد، شرایط فرار بخشی از جریان

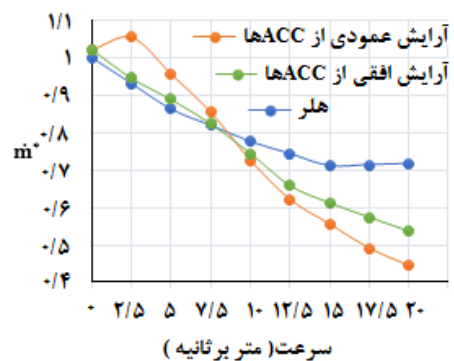


شکل ۱۲) بردار سرعت هوا در مقاطع مختلف طولی از برج خنک کن هیبریدی در آرایش موازی با جهت باد از ACCها

در این قسمت جهت بررسی و مقایسه اثر وزش باد بر عملکرد دو برج هلر و هیبریدی، با توجه به اینکه برج هلر مستقل از جهت وزش باد بوده ولی برج هیبریدی وابسته به جهت باد، به مقایسه عملکرد برج هلر در سرعت‌های مختلف با برج هیبریدی در همان سرعت‌ها ولی در دو آرایش متفاوت از ACCها پرداخته می‌شود. شایان‌ذکر است که مقایسه حرارتی بین برج هلر و سیستم خنک-کن هیبریدی بی‌معناست چرا که سیستم هیبریدی در واقع یک کندانسور هوایی مستقیم بوده درحالی‌که برج هلر سیستم خنک کن غیرمستقیم است و جهت بررسی عملکرد حرارتی این دو سیستم ضروری است که کندانسور مرتبط با برج هلر از منظر حرارتی با سیستم هیبریدی مقایسه گردد ولی از آنجا که عملکرد



شکل ۱۱) کانتور دما هوا در مقاطع مختلف طولی از برج خنک کن هیبریدی در آرایش موازی با جهت باد از ACCها



شکل ۱۳) مقایسه دبی بی بعد هوای عبوری از برج خنک کن هیبریدی و برج هلر در شرایط وزش باد

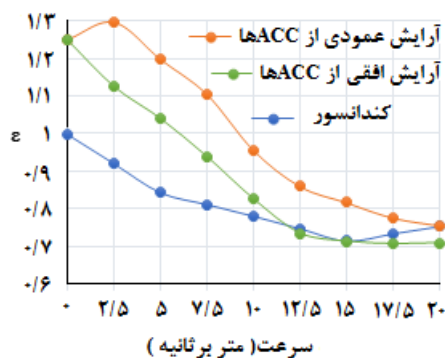
(۲۵ درصد) بیشتر از کندانسور شده است. همچنین در شرایط وزش باد در همه سرعت‌های باد و در هر دو آرایش به غیر از سرعت ۱۲ متر بر ثانیه به بالا در آرایش عمودی، برج هیبریدی میزان کارایی بالاتری نسبت به کندانسور نیروگاه فارس داشته است. که دلیل این افزایش با مشاهده کانتورهای دما و بردارهای سرعت در مقاطع طولی برج هیبریدی و همچنین میزان دبی هوای مکیده شده توسط برج توجیه می‌گردد. مطابق شکل ۱۴، میزان دبی بی بعد هوای عبوری از برج هیبریدی در سرعت‌های بالاتر از ۱۰ متر بر ثانیه، از برج هلر کمتر است، اما با توجه به اینکه فرایند انتقال حرارت علاوه بر هوای عبوری از برج هیبریدی از طریق هوای در رفت از قسمت ورودی هوای برج هیبریدی نیز صورت می‌گیرد. در سرعت‌های بالا در رفت هوا بالا بوده و علاوه بر میزان حرارت دفع شده از برج هیبریدی، از طریق این در رفت نیز مقداری انتقال حرارت رخ داده است.

در شکل ۱۵ پایین‌ترین کارایی در سرعت ۱۲/۵ تا ۱۵ متر بر ثانیه مربوط به آرایش موازی است و در بقیه سرعت‌ها پایین‌ترین کارایی مربوط به کندانسور نیروگاه فارس است. این نشان می‌دهد که برج هیبریدی پیشنهادی هم در شرایط وزش باد و هم در شرایط عدم وزش باد (مکش طبیعی) کارایی بهتری دارد.

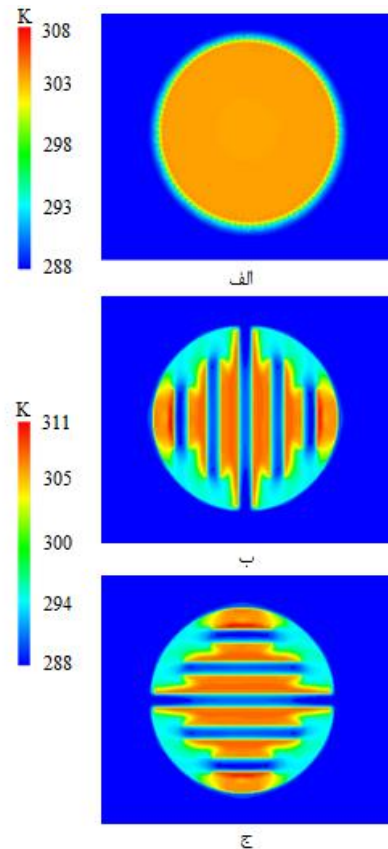
بنابراین با توجه به بررسی‌های انجام شده می‌توان گفت برج هیبریدی در تمامی شرایط وزش باد به غیر از سرعت ۱۲/۵ تا ۲۰ متر بر ثانیه مربوط به آرایش موازی با جهت باد از ACCها دارای عملکرد بهتری نسبت به سیستم خنک کاری نیروگاه فارس می‌باشد. اما برج هیبریدی با آرایش عمود بر جهت باد از ACCها عملکرد مناسب‌تری از خود نشان داده بود بنابراین می‌تواند جایگزین مناسبی برای سیستم خنک کاری غیرمستقیم هلر باشد.

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش روش جایگزینی سیستم خنک کاری خشک نیروگاه سیکل ترکیبی فارس با ارائه دو مدل برج خنک‌کن هیبریدی



شکل ۱۵) مقایسه کارایی حرارتی برج هیبریدی با کندانسور سیکل نیروگاه فارس



شکل ۱۴) مقایسه کانتورهای دمای برج خنک‌کن در مقطع افقی و در شرایط مکش طبیعی (الف) هلر ب) هیبریدی با آرایش عمود بر جهت باد از ACCها ج) هیبریدی با آرایش موازی با جهت باد از ACCها

هیدرودینامیکی هر دو برج مشابه است جهت مطالعه بیشتر به مقایسه مکش هر دو برج در سمت هوا پرداخته شده است. با توجه به نمودار ارائه شده در شکل ۱۴ دبی هوای مکیده شده توسط برج‌ها در شرایط وزش باد با افزایش سرعت باد، کاهش می‌یابد. از طرفی تغییرات در مکش برج رفتار یکدستی ندارد بطوری که تا سرعت ۱۰ متر بر ثانیه، مکش برج هیبریدی از برج هلر بیشتر بوده و از آن به بالا تا سرعت ۲۰ متر بر ثانیه نیز کمتر می‌باشد که این امر با توجه به کانتورهای دما و بردارهای سرعت برج هیبریدی نشان داده شده در بخش‌های قبل که در سرعت‌های بالا با در رفت بیشتری از هوا مواجه بودیم، قابل توجیه است. بنابراین مکش برج نمی‌تواند به تنهایی معیار مناسبی جهت بررسی عملکرد برج‌ها باشد. میزان حرارت دفع شده از برج علاوه بر میزان مکش برج به میدان دما و ضریب انتقال حرارت و نیز مکانیزم انتقال وابسته است بنابراین مناسب‌تر است که بررسی عملکرد این دو سیستم از جنبه حرارت دفع شده در کندانسور مربوطه صورت پذیرد که در ادامه خواهد آمد.

۳-۶ مقایسه عملکرد برج هیبریدی از نظر مقدار حرارت دفع شده با کندانسور سیکل نیروگاه فارس

همان طور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، میزان کارایی حرارتی برج هیبریدی در شرایط عدم وزش باد به میزان قابل‌توجهی

β	(1/K)	ضریب انبساط حجمی
ϵ	(m ² /s ³)	نرخ تلفات تلاطم
the	(-)	عملکرد حرارتی برج
Γ	(kg/m·s)	ضریب مولکولی انتقال حرارت رسانشی
μ	(kg/m·s)	ویسکوزیته دینامیکی
θ	(m ² /s)	ویسکوزیته سینماتیکی
ρ	(kg/m ³)	چگالی
σ	(Pa)	تانسور تنش
اندیس‌ها		
a		هوا
ref		نقطه مرجع
t		تلاطم
cw		آب سرد چرخشی

جدید(هلر-ACC) با آرایش موازی و عمود با جهت باد از ACC-ها، جهت کاهش اثرات منفی باد بر عملکرد نیروگاه و بهبود کلی آن از طریق شبیه‌سازی عددی (CFD)، بررسی شده است. نتایج تحلیل عددی نشان می‌دهد که در حالت عدم وزش باد برج هیبریدی ۲۵٪ حرارت بیشتری نسبت به کندانسور سیکل نیروگاه فارس دفع می‌کند. همچنین در شرایط وزش باد نیز در سرعت‌های کمتر از ۱۲/۵ متر بر ثانیه هر دو آرایش از ACCها عملکرد بهتری نسبت به سیستم خنک‌کاری آن نیروگاه داشته است. از طرفی در سرعت‌های بالای ۱۲/۵ متر بر ثانیه برخلاف پایین بودن مقدار مکش هوای خنک‌کاری در برج هیبریدی نسبت به برج هلر نیروگاه، میزان حرارت دفع شده در برج هیبریدی با آرایش عمود بر جهت باد از ACCها بالاتر از میزان حرارت دفع شده از کندانسور نیروگاه در آن شرایط است. بنابراین برج هیبریدی با آرایش عمود بر جهت باد از ACCها گزینه مناسبی برای جایگزینی سیستم خنک‌کن نیروگاه فارس و بهبود عملکرد آن خواهد بود.

تشکر و قدردانی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

تأییدیه اخلاقی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

تعارض منافع: این مقاله از پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی دانشگاه شهید بهشتی استخراج شده است و تعارض منافع وجود ندارد.

سهم نویسندگان: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

منابع مالی: هزینه‌های پژوهش منتج به این مقاله از منابع اعتبار ویژه اساتید طرح پژوهش فناورانه پژوهشگاه نیرو تامین شده است.

منابع

- 1- Kothari DP, Nagrath IJ. Modern power system analysis. Tata McGraw-Hill Education; 2003.
- 2- Kröger DG. Air-cooled heat exchangers and cooling towers. Oklahoma: Penwell Corporation; 2004.
- 3- Ding E. Air cooling techniques in power plants. Water and Electric Power Press, Beijing. 1992.
- 4- Al-Waked R, Behnia M. The performance of natural draft dry cooling towers under crosswind: CFD study. International journal of energy research. 2004;28(2):147-61.
- 5- Su MD, Tang GF, Fu S. Numerical simulation of fluid flow and thermal performance of a dry-cooling tower under cross wind condition. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics. 1999;79(3):289-306.
- 6- Yang LJ, Wu XP, Du XZ, Yang YP. Dimensional characteristics of wind effects on the performance of indirect dry cooling system with vertically arranged heat exchanger bundles. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2013;67:853-66.
- 7- Wang W, Lv J, Zhang H, Liu Q, Yue G, Ni W. A quantitative approach identifies the critical flow characteristics in a natural draft dry cooling tower. Applied Thermal Engineering. 2018;131:522-30.
- 8- Xiao L, Ge Z, Du X, Yang L, Xu Z. Operation of air-cooling CHP generating unit under the effect of natural wind. Applied Thermal Engineering. 2016;107:827-36.

۸- فهرست علائم

C	(J/kg·K)	ظرفیت گرمایی مخصوص
g	(m/s ²)	شتاب گرانشی
G	(1/m ² s ²)	انرژی تولید جنبش تلاطمی
y	(m)	ارتفاع برج خنک کن
h	(W/m ² ·K)	ضریب انتقال حرارت جابجایی
k	(m ² /s ²)	انرژی جنبشی تلاطمی
K	(W/m·K)	ضریب انتقال حرارت رسانشی
KL	(-)	ضریب تلفات
m	(kg/s)	دبی جرمی
P	(Pa)	فشار
Pr	(-)	عدد پرانتل
Pr _t	(-)	عدد پرانتل تلاطم
Q	(W)	گرما
Q _{conv}		گرمای از دست رفته از برج
t	(s)	زمان
S	(kg/m ² s ²)	جمله چشمه مومنوم
T	(K)	دما
T _{wi}	(K)	دمای ورودی آب در مبدل حرارتی
T _{wo}	(K)	دمای خروجی آب در مبدل حرارتی
The	(K)	دمای متوسط آب داغ
Tai	(K)	دمای هوا در ورودی مبدل حرارتی
V	(m/s)	بردار سرعت
U	(m/s)	سرعت باد

نمادهای یونانی

- International Journal of Thermal Sciences. 2021;159:106505.
- 23- Marincowitz FS, Owen MT, Muiyser J. Experimental investigation of the effect of perimeter windscreens on air-cooled condenser fan performance. Applied Thermal Engineering. 2019;163:114395.
- 24- Zhang X, Li Y, Chen H. Performance assessment of air-cooled steam condenser with guide vane cascade. Journal of Thermal Science. 2019;28(5):993-1003.
- 25- Jin R, Yang X, Yang L, Du X, Yang Y. Square array of air-cooled condensers to improve thermo-flow performances under windy conditions. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018;127:717-29.
- 26- Huang X, Chen L, Yang L, Du X, Yang Y. Cooling performance of natural draft hybrid system with parallel air path. Applied Thermal Engineering. 2020;169:114971.
- 27- Huang X, Wang W, Chen L, Yang L, Du X. Performance analyses of a combined natural draft hybrid cooling system with serial airflow path. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020;159:120073.
- 28- Bustamante JG, Rattner AS, Garimella S. Achieving near-water-cooled power plant performance with air-cooled condensers. Applied Thermal Engineering. 2016;105:362-71.
- 29- Kong Y, Wang W, Huang X, Yang L, Du X, Yang Y. Direct dry cooling system through hybrid ventilation for improving cooling efficiency in power plants. Applied Thermal Engineering. 2017;119:254-68.
- 30- رضا علیزاده خنسلو، بررسی یک سیستم خنک‌کن هیبریدی جدید (هلر-کندانسور هوایی) و امکان سنجی و آنالیز انرژی، آگرژی و اقتصادی یک نیروگاه نمونه با سیستم خنک‌کن جدید، دانشگاه شهید بهشتی، ۱۳۸۹.
- 31- Archive of Fars Combined Powerplant.
- 32- Manual for installation maintenance and operation of COFIMCO G series rotor.
- 33- Moukalled F, Mangani L, Darwish M. The finite volume method in computational fluid dynamics. Berlin, Germany: Springer; 2016.
- 34- Patankar SV. Numerical heat transfer and fluid flow. CRC press; 2018.
- 9- Reshadatjoo H, Moltagh SY, Mirzayi I. Numerical investigation of the performance of Heller type cooling towers in different arrangements from the perspective of air intake flow rate. Mechanics & Industry. 2015;16(6):602.
- 10- Ardekani MA, Ranjbar MA, Farhani F. Use of guide vanes for improvement of flow pattern and enhancement of thermal performance of dry cooling towers. Mechanics & Industry. 2017;18(1):111.
- 11- Goodarzi M, Keimanesh R. Heat rejection enhancement in natural draft cooling tower using radiator-type windbreakers. Energy conversion and management. 2013;71:120-5.
- 12- Wang W, Lyu J, Zhang H, Liu Q, Yue G, Ni W. A performance enhancement of a natural draft dry cooling tower in crosswind via inlet flow field reconstruction. Energy and Buildings. 2018;164:121-30.
- 13- Wang W, Zhang H, Lyu J, Liu Q, Yue G, Ni W. Ventilation enhancement for a natural draft dry cooling tower in crosswind via windbox installation. Applied Thermal Engineering. 2018;137:93-100.
- 14- Al-Waked R, Behnia M. The effect of windbreak walls on the thermal performance of natural draft dry cooling towers. Heat Transfer Engineering. 2005;26(8):50-62.
- 15- Ma H, Si F, Kong Y, Zhu K, Yan W. Wind-break walls with optimized setting angles for natural draft dry cooling tower with vertical radiators. Applied Thermal Engineering. 2017;112:326-39.
- 16- Ma H, Si F, Zhu K, Wang J. The adoption of windbreak wall partially rotating to improve thermo-flow performance of natural draft dry cooling tower under crosswind. International Journal of Thermal Sciences. 2018;134:66-88.
- 17- Jahangiri A, Golneshan A. Feasibility study of the thermal performance improvement of natural draft dry cooling towers due to flue gas injection. World Applied Sciences Journal. 2011;12(4):568-75.
- 18- Jahangiri A, Borzooee A, Armoudli E. Thermal performance improvement of the three aligned natural draft dry cooling towers by wind breaking walls and flue gas injection under different crosswind conditions. International Journal of Thermal Sciences. 2019;137:288-98.
- 19- Goodarzi M. A proposed stack configuration for dry cooling tower to improve cooling efficiency under crosswind. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2010;98(12):858-63.
- 20- Goodarzi M, Ramezanpour R. Alternative geometry for cylindrical natural draft cooling tower with higher cooling efficiency under crosswind condition. Energy conversion and management. 2014;77:243-9.
- 21- Yazdi SR, Gharehjanloo S. Proposition of obliqueable ring installation at crown of the Hellertype cooling tower for reduction of throttling effect in windy condition. Modares Mechanical Engineering. 2014;14(3):185-93.
- 22- Khamooshi M, Anderson TN, Nates RJ. A numerical study on interactions between three short natural draft dry cooling towers In an in-line arrangement.