

## طرح پیشنهادی برای برج خنک‌کن خشک هلر به منظور کاهش اثرات نامطلوب وزش باد

محسن گودرزی  
 استادیار دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا  
 ویدا روزبهانی  
 دانشجوی دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا

### چکیده

سیستم‌های خنک‌کن نیروگاهی به عنوان یکی از مهم‌ترین بخش‌های نیروگاه‌های حرارتی همواره مورد توجه خاص بوده‌اند. راندمان این بخش سیستم به طور مستقیم بر کارایی نیروگاه اثر می‌گذارد. عملکرد سیستم خنک‌کن خشک هلر نیز مانند سایر سیستم‌های خنک‌کن به شدت تحت تأثیر نامطلوب وزش باد قرار می‌گیرد. در صورت وزش شدید باد ممکن است کارایی حرارتی برج‌های هلر تا حدود چهل درصد کاهش یابد. تأثیر نامطلوب وزش باد بر عملکرد حرارتی برج ناشی از دو عامل جریان‌های گردابه‌ای در اطراف رادیاتورها و کج شدن پلوم خروجی از دودکش آنها است. در این تحقیق برای کاهش اثرات نامطلوب وزش باد طرحی پیشنهاد شده است که نتایج شبیه‌سازی عددی آن نشان داد این طرح می‌تواند عملکرد حرارتی برج را نسبت به طرح معمولی تا شصت و چهار درصد بهبود بخشد. در طرح پیشنهادی از دیوارهای بادشکنی به ارتفاع و پهنای ۲۰ متر و همچنین دهانه دودکش مایل با زاویه ۲۷ درجه نسبت به افق استفاده شده است.

کلمات کلیدی: برج خنک‌کن خشک هلر، باد، پلوم، دودکش، دیوار بادشکن.

## Proposing a Configuration for Heller-type Cooling Tower to Reduce Undesirable Wind Effects

M. Goodarzi Assistant Professor, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University  
 V. Rouzbahani B.Sc. Student, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University

### Abstract

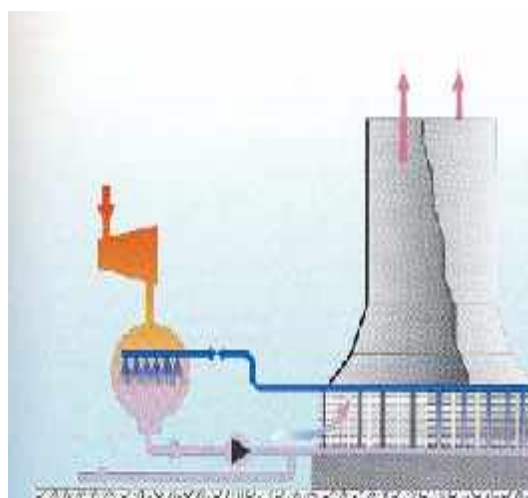
Cooling tower is one of the most important units used in the power plant. Thermal efficiency of the power plant is directly affected by thermal performance of the cooling system. Thermal performance of the Heller-type cooling tower is significantly reduced in the wind condition as same as the other dry-cooling towers. Thermal performance of the cooling tower may be reduced up to 40% during high speed wind condition. It is due to separating flow around the radiators and deflected exit plume at the top of the tower stack. In the present research work, a special configuration was proposed for Heller-type cooling tower to reduce the undesirable wind effects. Numerical simulations of the flow field showed that, it could increase the thermal performance of the cooling tower up to 64% regarding the usual design configuration. This proposal is a cooling tower having 20×20 (m<sup>2</sup>) windbreakers and exit plane making angle of 27° with horizontal direction.

**Keywords:** Heller-Type Cooling Tower, Wind, Plume, Stack, Wind-Breaker

## ۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین تجهیزات نیروگاه‌های بخار برج‌های خنک‌کن هستند. در مناطقی که با کمبود منابع آب مواجه هستند از برج‌های خنک‌کن خشک استفاده می‌شود. این برج‌ها از دو قسمت نسبتاً متمایز تشکیل شده‌اند. قسمت تحتانی برج استوانه‌ای با ارتفاع کم و قطر بزرگ و قسمت فوقانی دودکش استوانه‌ای با ارتفاع زیاد و قطر کم می‌باشد. قسمت تحتانی شامل رادیاتورها بوده که آب گرم خروجی از کندانسور داخل آنها جریان دارد. این دو قسمت توسط نواحی مخروطی شکل به هم متصل می‌شوند.

یکی از معمولترین نوع این برجها که به برجهای فلزی هم مشهور هستند برج خشک هلر است. در این سیستم که توسط مهندسی به نام هلر معرفی شد، آب کندانسور به رادیاتورهای عمودی که در پایه استوانه‌ای برج نصب شده‌اند وارد شده و پس از تبادل حرارت با هوای عبوری از روی آنها خنک می‌شود. این آب خنک شده مجدداً به کندانسور پاششی زیر توربین نیروگاه بازگردانده می‌شود. شکل ۱ نمونه‌ای از این سیستم خنک‌کن را نشان می‌دهد. هوای گرم درون برج به علت کاهش چگالی آن سبک شده و توسط هوای سرد بیرون از برج که چگالی بیشتری دارد به سمت بالای برج رانده می‌شود. این عمل باعث مکیده شدن هوای سرد به درون برج و گذر آن از روی رادیاتورهای تحتانی برج می‌شود. گذر این هوا و تبادل حرارت با سطح رادیاتورها باعث خنک شدن دمای آب عبوری از درون رادیاتورها خواهد شد.



شکل ۱- سیستم برج خنک کن خشک هلر

طراحی این برجها بر اساس شرایط هوای ساکن اطراف برج صورت می‌گیرد. تجربه نشان داده است که وزش باد تأثیر نامطلوبی بر عملکرد برج حرارتی می‌گذارد. مشاهدات تجربی و

شبیه‌سازی‌های عددی نشان داده‌اند که اگر سرعت وزش باد بیش از مقدار سه متر بر ثانیه باشد مقدار هوای مکیده شده به درون برج که از روی رادیاتورها می‌گذرد کاهش خواهد یافت و به این ترتیب مقدار انتقال گرما از رادیاتورها نیز با کاهش مواجه خواهد شد [۱].

مطالعه تجربی رفتار هیدرولیکی و ترمودینامیکی برجهای خنک‌کن خشک بسیار پرهزینه می‌باشد. انجام این تحقیقات در ابعاد کوچک آزمایشگاهی تقریباً امکان‌پذیر نیست. در معادلات ممنوم دو گروه بی بعد ظاهر می‌شوند؛ عدد رینولدز (Re) در معادلات ممنوم افقی، و عدد گراش (Gr) در معادله ممنوم. ژای و فو [۲] نشان دادند که ثابت نگه داشتن دو گروه بی‌بعد مسئله بین مدل آزمایشگاهی درون تونل باد و نمونه اصلی در ابعاد واقعی، امکان‌پذیر نیست. به عبارت دیگر فراهم کردن تشابه کامل بین نمونه آزمایشگاهی درون تونل باد و برج واقعی ممکن نیست. مطالعه تجربی ژای و فو [۲] روی یک نمونه کوچک در تونل باد تنها کیفیت رفتار هیدرولیکی جریان را در اطراف برج پیش‌بینی کرد و نتوانست نتایج قابل قبولی از رفتار ترمودینامیکی پدیده ارائه دهد. تا به حال مطالعات تجربی اندکی روی نمونه‌های کوچک آزمایشگاهی انجام شده است که البته نتایج این مطالعات تنها از جنبه کیفی مورد توجه قرار گرفته‌اند و هیچ‌گاه از نظر کمی مبنای مقایسه و نتیجه‌گیری نبوده‌اند. تنها نتایج اندازه‌گیری در ابعاد واقعی می‌تواند مبنایی برای تحلیل‌های کمی قرار گیرند. این نوع مطالعات میدانی فقط روی کمیتهای انتگرالی مثل توان انتقال گرمای کل برج در شرایط وزش باد صورت گرفته و هیچ اطلاعات جزئی از میدان جریان و توزیع کمیتهای میدانی در دسترس نیست. بنابراین به نظر می‌سد که شبیه‌سازی عددی در ابعاد واقعی بهترین، کم هزینه‌ترین و مطمئن‌ترین روش برای بررسی هیدرولیکی و ترمودینامیکی پدیده است.

اولین مطالعات عددی برای بررسی علل افت کارایی برجهای خنک‌کن به هنگام وزش باد توسط محققانی همچون رادوسالجویک و اسپالدینگ [۳]، برگستروم و همکارانش [۴]، پریز و کروگر [۵]، وی و همکارانش [۶]، درکسن و همکارانش [۷]، و سو و همکارانش [۸] در طی سالهای ۱۹۹۳ تا ۱۹۹۸ انجام شد. این تحقیقات عددی اخیراً نیز توسط محققان دیگر از جمله الوکد و بهنیا [۹]، جوانی [۱۰]، و پرویزی [۱۱] ادامه یافته است. تمامی این مطالعات نشان دادند که دو عامل اساسی باعث کاهش کارایی برج به هنگام وزش باد می‌شوند. عامل اول وجود جریان شتاب یافته در اطراف بخش استوانه‌ای تحتانی (یا همان منطقه رادیاتورها) است که منجر به کاهش موضعی فشار

به منظور کاهش اثر باد بر کج شدن پلوم خروجی و کاهش پدیده خفگی در دهانه دودکش برج، گودرزی [۱۳] طرحی را برای برج‌های هذلولوی بتنی پیشنهاد دادند. تحقیق آنها نشان می‌دهد که در مناطقی که اصولاً جهت وزش باد از یکسو می‌باشد می‌توان از دودکش‌هایی که دارای سطح مقطع خروجی با زاویه تمایل پشت به جهت وزش باد هستند استفاده کرد. البته زاویه تمایل دهانه خروجی دارای مقدار بهینه‌ای است که با شبیه سازی‌های مکرر و اندازه‌گیری درصد کاهش انتقال گرما، این مقدار حدود ۲۷ درجه بدست آمده است [۱۳].

در تحقیق حاضر طرحی برای برج فلزی هلر پیشنهاد شده است که می‌تواند اثرات نامطلوب هر دو عامل فوق را بر راندمان حرارتی برج خنک‌کن کاهش دهد. برای این منظور طرح جدیدی که دیوارهای بادشکن و دودکش با دهانه مایل را همزمان به کار می‌برد، در برج هلر مورد بررسی قرار گرفته است. شبیه سازی عددی جریان اطراف برج پیشنهادی افزایش بیست و سه درصدی انتقال حرارت را نسبت به طرح معمول تحت وزش باد با سرعت ده متر بر ثانیه پیش‌بینی می‌کند.

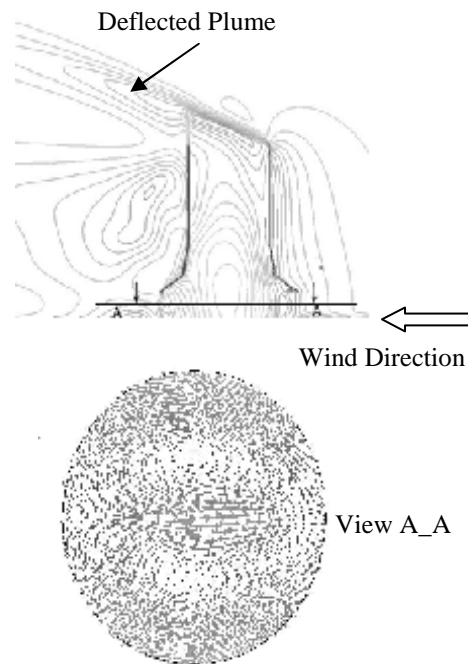
## ۲- روش شبیه سازی عددی میدان جریان

برای شبیه سازی عددی جریان در اطراف و درون برج باید معادلات حاکم بر جریان و نیز شرایط مرزی آن را مشخص کرد. جریان در برج به خصوص در غیاب وزش باد بر اساس نیروی شناوری ایجاد شده ناشی از اختلاف دمای هوای درون و بیرون برج به وجود می‌آید. هوای سرد بیرون در گذر از رادیاتورهای حرارت آب گرم خروجی از کندانسور را جذب کرده و گرم می‌شود. تغییر چگالی هوا به قدری ناچیز است که با تقریب بسیار خوبی می‌توان جریان هوا را تراکم ناپذیر در نظر گرفت. اما برای در نظر گرفتن نیروی غوطه‌وری ناشی از اختلاف کوچک چگالی در معادله اندازه حرکت در جهت خلاف شتاب ثقل می‌توان از تقریب بوزینسک [۱۴] استفاده کرد. در ضمن جریان درون برج به علت عدد گراشف [۱۴] بالا مغشوش می‌باشد. لذا معادلات حاکم بر جریان مغشوش تراکم ناپذیر دائم با تقریب بوزینسک و همراه با انتقال حرارت شامل معادله پیوستگی، معادلات اندازه حرکت، معادله انرژی حرارتی و مدل اغتشاشی همراه با تقریب بوزینسک می‌باشند. شکل برداری این معادلات به صورت زیر است که در آن از مدل اغتشاشی  $k-\epsilon$  استاندارد [۱۵] استفاده شده است:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0.0 \quad (1)$$

$$\rho(\vec{\nabla} \cdot \vec{V})\vec{V} = -\vec{\nabla}p + \vec{\nabla}\tau - \rho\beta(T - T_{ar})\vec{g} + \vec{S}_h \quad (2)$$

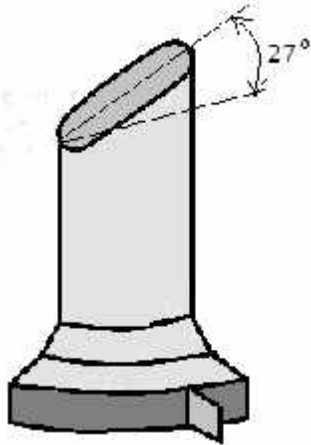
هوا در این منطقه و همچنین جدایش جریان در پشت برج می‌شود. افت فشار بوجود آمده در بخش وسیعی از محیط منطقه رادیاتورها، اختلاف فشار در دو طرف رادیاتورها را کاهش داده و باعث رکود دبی جرمی هوای عبوری از روی رادیاتورها می‌شود. عامل دوم پدیده خفگی یا درپوش در دهانه خروجی برج است که به علت تفاوت اندازه حرکت جریان هوای خروجی از دودکش و جریان باد ایجاد می‌شود. وزش باد باعث کج شدن پلوم خروجی برج و کاهش سطح مقطع جریان خروجی از برج می‌شود. لذا با ایجاد خفگی در دهانه دودکش، جریان خروجی از برج کاهش یافته و این امر باعث افزایش فشار درون برج نسبت به شرایط طراحی خواهد شد. در شکل ۲ این دو عامل به کمک کانتورها و بردارهای سرعت نشان داده شده‌اند.



شکل ۲- دو عامل اصلی نامطلوب شدن عملکرد برج‌های خنک‌کن

با توجه به وابستگی توان انتقال گرما رادیاتورها به الگوی جریان در مجاورت آنها، بسیاری از محققین به دنبال یافتن راه‌حلهایی برای کاهش تأثیر نامطلوب جریان کم فشار و پر سرعت در اطراف رادیاتورهای جانبی (عامل اول) بودند. دیوارهای بادشکن، که در راستای عمود بر مسیر وزش باد از کنار رادیاتورها در جهت شعاعی گسترش می‌یابند، برای این منظور اولین بار توسط محققانی همچون پریز و کروگر [۱۲] پیشنهاد و مورد توجه سایر محققان قرار گرفت. محققان دیگری از جمله الوکد و بهنیا [۹]، ژای و فو [۲]، و پرویزی [۱۱] از طریق شبیه سازی عددی کارایی بادشکنها را گزارش کردند.

در ضمن در شکل ۴ طرح نمادین برج پیشنهادی نشان داده شده است. در این شکل نحوه استقرار بادشکن و زاویه صفحه دهانه خروجی برج پیشنهادی نسبت به سطح افق نشان داده شده‌اند.



شکل ۴- شکل نمادین از طرح برج پیشنهادی

در یک مدل سازی سه بعدی که شامل کل استوانه برج و میدان جریان اطراف آن بود، مشاهده شد که میدان جریان حاصل شده نسبت به صفحه وزش باد کاملاً متقارن است. در ضمن به علت محدود بودن هندسه برج در کل میدان جریان جریان هوا پشت بدنه برج همراه با پدیده ریزش گردابه نخواهد بود، زیرا این پدیده در پشت استوانه های نامحدود و یا به عبارت دیگر در میدان جریان دو بعدی اتفاق می افتد. لذا در صورتیکه از معادلات متوسط گیری شده رینولدز برای جریان مغشوش استفاده شود، جریان نسبت به صفحه وزش باد متقارن خواهد بود. به علت وجود تقارن در صفحه وزش باد تنها نیمه متقارن مسأله شبیه سازی شده است. شکل ۵ میدان جریان را نشان می‌دهد، قاعده پایینی نیم استوانه زمین با سرعت صفر و قاعده بالایی مرز خروجی جریان با گرادیان صفر برای تغییرات کمیتها در نظر گرفته شده است. برای دیوارهای برج، دیوار بادشکن و نیز سطح زمین از شرط مرزی حرارتی دیوار آدیاباتیک<sup>۱</sup> استفاده شده است. در سطح تقارن نیز شرط مرزی تقارنی، که صفر بودن گرادیان کمیتها را در جهت عمود بر این سطح نشان می‌دهد، در نظر گرفته شده است. رادیاتورهای بخشی از مرزهای تعریف شده در میدان جریان هستند که به مانند یک سطح صاف قابل نفوذ که جریان در گذر از آن علاوه بر تبادل حرارت دچار افت فشار نیز می‌شود، مدل شده است.

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

$$(\vec{V} \cdot \vec{\nabla})k = \vec{\nabla}[(v + \frac{v_t}{\sigma_k})\vec{\nabla}k] + P + G - \varepsilon \quad (4)$$

$$(\vec{V} \cdot \vec{\nabla})\varepsilon = \vec{\nabla}[(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon})\vec{\nabla}\varepsilon] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(P+G) - C_{2\varepsilon}\frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

در معادلات فوق  $\vec{V}$ ،  $\vec{g}$  و  $\vec{S}_h$  به ترتیب بردارهای سرعت، شتاب ثقل، و جمله چشمه در معادله اندازه حرکت هستند.  $T$ ،  $\rho$ ،  $\beta$ ،  $Q_h$ ،  $p$ ،  $\tau$  به ترتیب دمای، فشار، جمله چشمه در معادله انرژی، ضریب تراکم‌پذیری هوا، چگالی هوا، و تانسور تنش برشی هستند. در ضمن  $T_{ar}$  دمای مرجع برای تقریب بوزینسک می باشد. همچنین  $k$  و  $\varepsilon$  به ترتیب انرژی جنبشی اغتشاشات و استهلاك این انرژی در معادلات مدل اغتشاشی هستند. سایر کمیت‌های و ثابت‌های معادلات فوق از روابط زیر حاصل می‌شوند

$$\tau_{ij} = (\mu + \mu_t)S_{ij}, \quad P = v_t S_{ij} S_{ij},$$

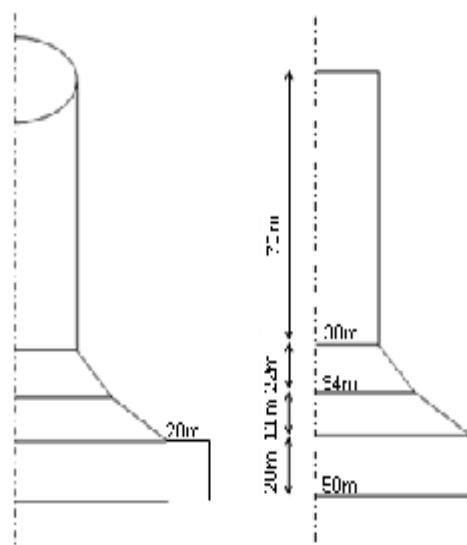
$$G = -g\beta\frac{v_t}{\sigma_t}\frac{\partial T}{\partial z}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2}(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i})$$

$$v_t = \frac{\mu_t}{\rho} = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad \Gamma = \frac{\mu}{Pr}, \quad \Gamma_t = \frac{\mu_t}{Pr_t}$$

$$C_\mu = 0.09, \quad C_{1\varepsilon} = 1.44, \quad C_{2\varepsilon} = 1.92, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3, \quad \sigma_t = 1.0$$

در روابط فوق  $\mu$  و  $Pr$  به ترتیب لزجت و عدد پرانتل هوا هستند.

شکل ۳ مشخصات ابعادی برج معمول و طرح پیشنهادی برای آن را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که ارتفاع متوسط طرح پیشنهادی با ارتفاع برج معمول یکی است.



شکل ۳- ابعاد هندسی بدنه برج معمولی و طرح پیشنهادی

<sup>1</sup> - Adiabatic Wall

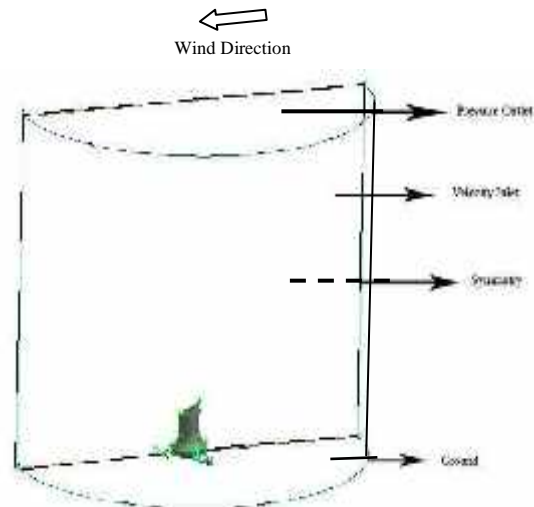
با وزش باد و بدون وزش باد تفاوت دارد. در حالتی که باد نمی‌وزد شرط مرزی در سطح جانبی شرط سیال دور دست انتخاب شده است به گونه‌ای که فشار سیال در این مرز برابر با فشار دور دست است. البته در این حالت شرط سیال دور دست خطاهایی را در جریان دور دست بوجود می‌آورد که با بزرگ بودن محدوده میدان جریان می‌توان تأثیر آن در مجاورت برج را کاهش داد. در حالت وزش باد در سطح پیرامونی نیمه استوانه میدان جریان سرعت و جهت آن برابر با سرعت و جهت وزش باد در نظر گرفته شده است.

معادلات حاکم به همراه شرایط مرزی معرفی شده در نرم افزار نرم افزار فلونت [۱۸] بارگذاری و حل شدند. برای میانمایی شارش کمیتها سطوح حجم معیارهای دیفرانسیلی از روش فریاد مرتبه دوم استفاده شد. شبکه محاسباتی لازم در نرم افزار گمبیت به کمک سلولهای چهار وجهی هرمی نامنظم ساخته شد و در هر هندسه مطالعه شبکه جهت اطمینان حاصل کردن از استقلال جوابها از تعداد نقاط شبکه صورت گرفت. براساس این مطالعات حدود ۱۵۳۰۰۰۰ سلول محاسباتی برای هندسه معمول و حدود ۱۸۴۰۰۰ سلول محاسباتی برای هندسه طرح پیشنهادی لازم بودند تا جوابها مستقل از شبکه بشوند. حل عددی به روش تکراری تا همگرایی کامل ادامه یافت. معیار همگرایی عدم تغییر باقی مانده‌های استاندارد گزارش شده توسط نرم افزار فلونت بوده است.

### ۳- بررسی نتایج عددی

اساس ایده مورد نظر بسیار ساده است. برای کاهش اثر خفگی در دهانه خروجی برج باید سطح مقطع برج را بدون کاهش قطر آن افزایش داد. به این منظور می‌توان سطح دهانه خروجی برج را به شکل بیضی که از تقاطع یک صفحه غیر عمود بر محور برج حاصل می‌شود، در نظر گرفت. باید توجه داشت که بخش مرتفع‌تر دودکش برج در این حالت باید مقابل به جهت وزش باد قرار گیرد، در غیر این صورت خفگی دهانه خروجی برج تشدید خواهد شد. در ضمن متوسط ارتفاع دودکش برج برابر با ارتفاع همان طرح معمول می‌باشد.

در منطقه رادیاتورها نیز برای کاهش جریان‌های گردابه‌ای بوجود آمده و همچنین جلوگیری از جدایش جریان در پشت برج، و نیز به منظور افزایش دبی جرمی هوای ورودی به رادیاتورها از دو دیوار بادشکن در زوایای ۹۰ و ۲۷۰ درجه، عمود بر جریان باد استفاده شده است. شکل ۶ وضعیت برج را در هنگام وزش باد با طرح پیشنهادی نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل نشان داده شده است به هنگام وزش باد باز هم پلوم خروجی منحرف می‌شود اما به علت بزرگ بودن سطح



شکل ۵- میدان جریان شبیه سازی شده

برای میزان تبادل گرما و افت فشار ناشی از عبور جریان از روی رادیاتورها بر اساس اطلاعات مبدل‌های فورگو [۱۶] روابطی بر حسب مقدار سرعت عمود بر رادیاتورها به کار رفته است:

$$\Delta p = \frac{1}{2} k_v \rho V_n^2 \quad (6)$$

که در آن  $V_n$  مؤلفه سرعت عمود بر سطح رادیاتور بوده و ضریب افت فشار،  $k_v$ ، بر اساس رابطه تجربی [۱۶] زیر محاسبه می‌شود:

$$k_v = 13.03 V_n^{-0.24} + 0.436 \quad (7)$$

افت فشار حاصل از عبور جریان از روی رادیاتورها به صورت یک جمله چشمه،  $\bar{\Delta h}$ ، در معادله اندازه حرکت و فقط برای سلولهای محاسباتی شامل رادیاتورها وارد شده است. دمای سطح رادیاتورها متوسط دمای آب ورودی و خروجی از آنها انتخاب شده است:

$$T_r = \frac{T_{wi} + T_{wo}}{2} \quad (8)$$

نرخ انتقال گرما در رادیاتورها از رابطه زیر محاسبه می‌شود

$$\dot{Q}_r = A_r h (T_r - T) \quad (9)$$

که  $T_r$  و  $A_r$  به ترتیب دما و مساحت رادیاتور هستند. ضریب انتقال گرما جابجایی از رابطه تجربی زیر محاسبه می‌شود [۱۷].

$$h = 2035.2 V_n^{0.515} \quad (10)$$

تأثیر انتقال گرما از رادیاتورها نیز به صورت یک جمله چشمه،  $\bar{Q}_h$ ، در معادله انرژی و فقط برای سلولهای شامل رادیاتورها لحاظ می‌شود.

شرط مرزی در سطح پیرامونی میدان حل برای دو حالت

وزش باد برای طرح معمول برج، و برج همراه بادشکن و دودکش با دهانه مایل با زاویه ۲۷ درجه نسبت به سطح افق، آورده شده است.

در این جدول درصد کاهش نرخ انتقال گرما به واسطه طرح پیشنهادی از رابطه زیر محاسبه شده است:

$$\frac{Q_{Des} - Q_{New}}{Q_{Des}} \times 100$$

که در آن  $Q_{New}$  و  $Q_{Des}$  به ترتیب نرخ انتقال گرما بدون وزش باد در برج با طرح معمول و طرح پیشنهادی هستند.

جدول ۱- نرخ انتقال حرارت برج خنک کن در حالت‌های معمول و طرح پیشنهادی بدون وزش باد

نوع برج	طرح معمول	طرح پیشنهادی
دبی جرمی هوای ورودی به برج بر حسب کیلوگرم بر ثانیه	۲۰۴۵۸	۲۰۳۰۶
کل نرخ انتقال گرما بر حسب مگاوات	۳۲۳،۹۴	۳۲۱،۸۵۴
درصد کاهش نرخ انتقال گرما به واسطه طرح پیشنهادی	-	٪۰،۶۵

توان حرارتی این نوع از برجهای خنک کن در محدوده ۲۸۰-۳۴۰ مگاوات می‌باشد [۱۹]. بنابراین مقدار حاصل شده از شبیه سازی عددی تحقیق حاضر (۳۲۱ مگاوات) با مقدار متوسط فوق (۳۱۰ مگاوات) حداکثر ۳٪ اختلاف دارد، که برای اعتبار سنجی روش شبیه سازی عددی مفید است. نتایج این جدول نشان می‌دهند که استفاده از دیوار بادشکن و مایل کردن دهانه خروجی دودکش در هوای ساکن اندکی از دبی جرمی هوای ورودی به برج و مقدار انتقال گرما رادیاتورها می‌کاهد. علت این کاهش را می‌توان به افزایش اثرات اصطکاکی دیواره دودکش و کاهش نسبی نیروی غوطه‌وری نسبت به دودکش معمولی ارتباط داد. از آنجا که هدف از به کارگیری این طرح بهبود عملکرد برج در حالت وزش باد است، استفاده از این طرح بر عملکرد برج در هوای ساکن تأثیر نامطلوب چندانی ندارد.

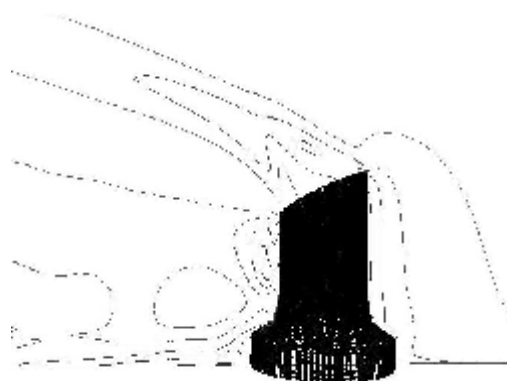
درصد نرخ انتقال گرما نسبت به وضعیت بدون وزش باد، و درصد بهبود نرخ انتقال گرما به واسطه طرح پیشنهادی از روابط زیر محاسبه شده‌اند:

$$\frac{Q_{wind}}{Q_{Des}} \times 100$$

$$\frac{Q_{New-Wind} - Q_{Des-Wind}}{Q_{Des-Wind}} \times 100$$

که در آن  $Q_{New-Wind}$  و  $Q_{Des-Wind}$  به ترتیب نرخ انتقال گرما با وزش باد در برج با طرح معمول و طرح پیشنهادی هستند. جدول ۲ درصد انتقال گرما را نسبت به وضعیت بدون وزش باد در حالتی که باد با سرعت ۱۰ متر بر ثانیه می‌وزد، نشان

مقطع دهانه خروجی که در جهت عمود بر محور برج نیست حالت خفگی ایجاد شده کمتر بوده و سطح عبور جریان بزرگتر از حالت معمول خواهد بود.



شکل ۶- تأثیر مایل کردن دهانه خروجی دودکش برج بر پلوم خروجی

به منظور مقایسه عملکرد حرارتی برج پیشنهادی با برج معمول عملکرد آنها به صورت عددی شبیه سازی شد. شبیه سازی عددی در دو وضعیت بدون وزش باد و حالت وزش باد با سرعت متوسط ۱۰ متر بر ثانیه صورت گرفته است. این سرعت به این دلیل انتخاب شده است که اکثر محققان مطالعات خود را با این سرعت انجام داده‌اند و در ضمن از نظر آماری بیشترین احتمال وزش باد با این سرعت در مناطق مختلف گزارش شده است [۱۷ و ۱۳-۱]. البته در مراجع مختلف از توزیع سرعت‌های متفاوتی برای سرعت باد استفاده شده است که تنها وجه مشترک آنها مقدار متوسط ۱۰ متر بر ثانیه بودن سرعت در محدوده ارتفاع برج و صفر بودن سرعت در روی زمین است، اما توزیع سرعت در این محدوده کم و بیش متفاوت بوده است. علت این تفاوتها هم شرایط اقلیمی مختلف فرض شده برای شبیه سازی عددی بوده است. همچنین تمامی شبیه سازیهای انجام شده روی برجهای هذلولوی صورت گرفته است. از آنجا که در تحقیق حاضر برجهای استوانه‌ای هله مورد نظر بوده است، و هدف فقط بررسی و دستیابی به تخمینی از میزان بهبود عملکرد این نوع از برجها با طرح پیشنهادی به کارگیری همزمان دیوار بادشکن و دهانه مایل بوده است، از یک توزیع سرعت یکنواخت در مرز دور دست استفاده شده است. مسلماً این شرط مرزی ممکن است با شرایط واقعی و همینطور شرایط مرزی به کار گرفته شده در شبیه سازی برجهای هذلولوی تفاوت‌هایی داشته باشد، اما خللی در مقایسه‌های نهایی مورد نظر این تحقیق وارد نخواهد کرد.

در جدول ۱ دبی جرمی ورودی به رادیاتورها و مقدار انتقال حرارت اندازه‌گیری شده از نتایج عددی در حالت بدون

می‌دهد. نتایج این جدول نشان می‌دهد که به کارگیری همزمان دیوار بادشکن و دودکش با دهانه مایل بهبود قابل توجهی در عملکرد برج خنک‌کن خشک هلر به هنگام وزش باد دارد.

**جدول ۲- درصد انتقال حرارت برج خنک‌کن استوانه‌ای هلر در**

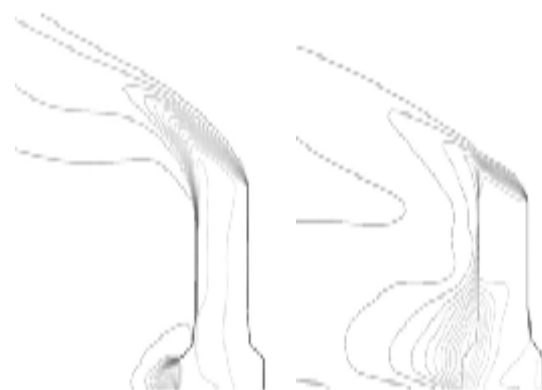
**حالت‌های معمول، و طرح پیشنهادی**

نوع برج	طرح معمول	طرح پیشنهادی
درصد نرخ انتقال گرما نسبت به وضعیت بدون وزش باد	۶۰٫۵٪	۹۸٫۵٪
درصد بهبود نرخ انتقال گرما به واسطه طرح پیشنهادی	-	۶۴٪

در طرح معمول برج قسمتی از رادیاتورها که در مقابل وزش باد قرار دارند دبی هوای بیشتری دریافت کرده‌اند و به همین دلیل انتقال گرمایی بیشتری داشته و دما در این قسمت کمتر است. اما در مقابل قسمتی از رادیاتورها که در پشت برج قرار گرفته‌اند به دلیل جدایش جریان در آن ناحیه انتقال گرما در رادیاتورها به خوبی صورت نگرفته و آب خروجی از رادیاتورها دمای بالایی دارد. در طرح پیشنهادی به علت به کارگیری دیوار بادشکن در اطراف رادیاتورها توزیع دما در این قسمت یکنواخت‌تر است، طیف دمای مربوط به ناحیه گردابه‌ای درون برج کوچکتر شده و به همین دلیل مکش برج افزایش یافته است. برای بررسی بیشتر این جزئیات میدان سرعت در مقطع میانی قسمت تحتانی برج (رادیاتورها) در شکل ۸ نشان داده شده است. این شکل به روشنی نشان می‌دهد که محدوده متأثر از جریان گردابه‌ای در طرح پیشنهادی کاهش یافته است و اندازه گردابه‌ها در ناحیه رادیاتورها کوچکتر شده است بنابراین دبی جرمی ورودی به برج افزایش می‌یابد.

در شکل ۹ توزیع سرعت در حالت‌های مختلف نشان داده شده است. برای طرح معمول برج در هوای ساکن یک توزیع کاملاً منظم و متقارن در دهانه خروجی وجود دارد. هنگام وزش باد با سرعت ۱۰ متر بر ثانیه این توزیع به علت ایجاد خفگی در جریان خروجی نامنظم شده و در جهت باد منحرف می‌شود. در طرح پیشنهادی به علت استفاده از دودکش با دهانه مایل مشاهده می‌شود که به دلیل تضعیف خفگی در جریان خروجی توزیع سرعت منظم‌تر شده است.

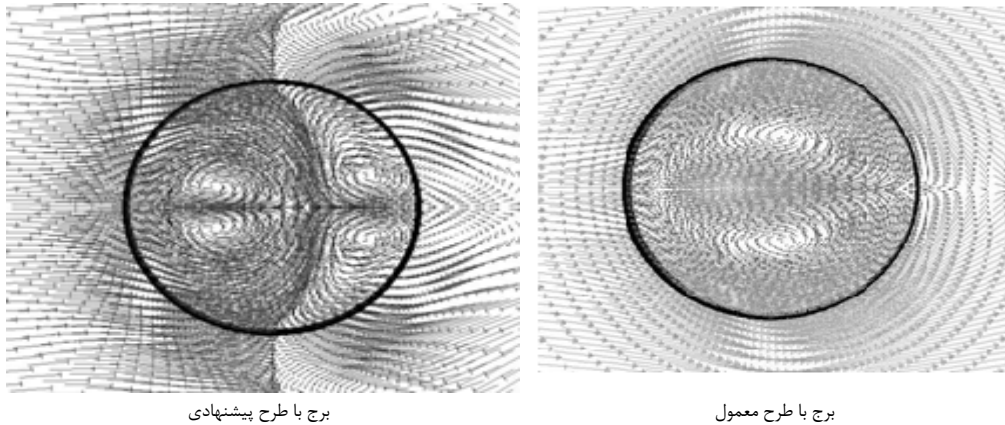
پدیده خفگی در دهانه خروجی برج و تأثیر مطلوب طرح پیشنهادی در کاهش این پدیده را با ترسیم خطوط هم‌دما در صفحه تقارن می‌توان نشان داد. در شکل ۷ خطوط هم‌دما در صفحه تقارن نشان داده شده‌اند. این خطوط محدوده پلوم خروجی را نشان می‌دهند. همانطور که در این شکل دیده می‌شود پلوم طرح پیشنهادی در مقایسه با طرح معمول از پهنای بیشتری برخوردار بوده و در نتیجه جریان خروجی از دودکش این طرح با خفگی کمتری روبرو می‌شود.



برج با طرح پیشنهادی

برج با طرح معمول

**شکل ۷- خطوط هم‌دما در سطح تقارن برج**



شکل ۸- بردارهای سرعت در ارتفاع میانی رادیاتورها



شکل ۹- بردارهای سرعت در دهانه خروجی برج

هوای عبوری از برج و نزدیکی راندمان طرح پیشنهادی به راندمان طراحی برج می‌باشد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

طرح پیشنهادی برج خنک کن با دودکش مایل و دیوارهای بادشکن به شرط ثابت بودن جهت وزش باد می‌تواند به میزان قابل توجهی عملکرد حرارتی برج را به هنگام وزش باد بهبود بخشد. در صورت تغییر جهت وزش باد، بخصوص تا ۱۸۰ درجه، ممکن است عملکرد حرارتی طرح پیشنهادی حتی از طرح معمول نیز کمتر شود. اما در صورتیکه از مکانیزمهای مناسبی جهت چرخاندن بادشکنها و بخشی از استوانه فوقانی که شامل دهانه خروجی مایل است استفاده شود، می‌توان همیشه هندسه طرح پیشنهادی را به گونه‌ای که مطابق با شرایط بررسی شده در این تحقیق است تغییر داد و از عملکرد حرارتی مناسب آن به هنگام وزش باد بهره‌مند شد. به هر حال طرح پیشنهادی حاضر مثل سایر طرحهای پیشنهادی قبلی تا رسیدن به مرحله عملیاتی فاصله دارد.

در شکل ۱۰ توزیع نقطه‌ای مؤلفه عمودی سرعت در خطمرکزی دهانه خروجی برج در حالت‌های مختلف نشان داده شده است. این نمودارها علاوه بر تأیید اطلاعات شکل ۷ مقدار مکانی و متوسط سرعت در دهانه خروجی برج را نشان می‌دهند. برای طرح معمول برج تحت وزش باد مشاهده می‌شود که متوسط سرعت جریان خروجی از برج نسبت به بقیه حالات کمتر است که این ناشی از دو عامل ایجاد خفگی در دهانه دودکش برج و وجود جریانهای گردابه‌ای و جدایش جریان در قسمت رادیاتورها است. در طرح پیشنهادی به علت استفاده از دودکش با دهانه مایل به واسطه تضعیف خفگی در جریان خروجی توزیع سرعت یکنواخت‌تر است و در این حالت متوسط سرعت جریان خروجی از برج نسبت به طرح معمول بیشتر شده است.

بنابراین پر واضح است که طرح پیشنهادی باعث تضعیف خفگی در دهانه خروجی برج، افزایش دبی جرمی هوای عبوری از رادیاتورها، کاهش اغتشاش و جدایش جریان داخل برج و ایجاد یکنواختی در پلوم خروجی از برج می‌شود. در این حالت به علت وجود بادشکن و دودکش با دهانه مایل، متوسط سرعت جریان خروجی از برج به حالت طراحی برجها (طرح معمول در هوای ساکن) نزدیک است و این مطلب بیانگر بالا بودن دبی جرمی



Rezkallah K.S., "A Study on the Effects of Wind on the Air Intake Flow of a Cooling Tower", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 64, pp. 47-59, 1996.

[8] Su M.D., Tang G.F., 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, Vol. 79(3), pp. 289-306, 1998.

[9] Al-Waked R., Behnia M., "The Performance of Natural Draft Dry Cooling Towers under Cross Wind : CFD Study", International Journal of Energy Research, Vol. 28, pp. 147-161, 2004.

[۱۰] جوانی م., "اثر باد بر راندمان حرارتی برجهای خنک کننده خشک" پایان نامه کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، تبدیل انرژی، دانشگاه بوعلی سینا، ۱۳۸۵.

[۱۱] پرویزی ب., "تحلیل و بررسی تأثیر منفی وزش باد بر عملکرد برجهای خنک کننده نیروگاهی و ارائه راه حل" پایان نامه کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، تبدیل انرژی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۶.

[12] Du Preez A.F., and Kroger D.G., "The Effect of the Heat Exchanger Arrangement and Wind-Breaker Walls on the Performance of Natural Draft Dry-Cooling Towers Subjected to Cross-Winds", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 58, pp. 293-303, 1995.

[13] Goodarzi M., "A Proposed Stack Configuration for Dry Cooling Tower to Improve Cooling Efficiency under Crosswind", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 98, pp. 858-863, 2010.

[14] Gebhart B., "Buoyancy-Induced Flows and Transport", Textbook Edition, Hemisphere Publishing Corporation, 1988.

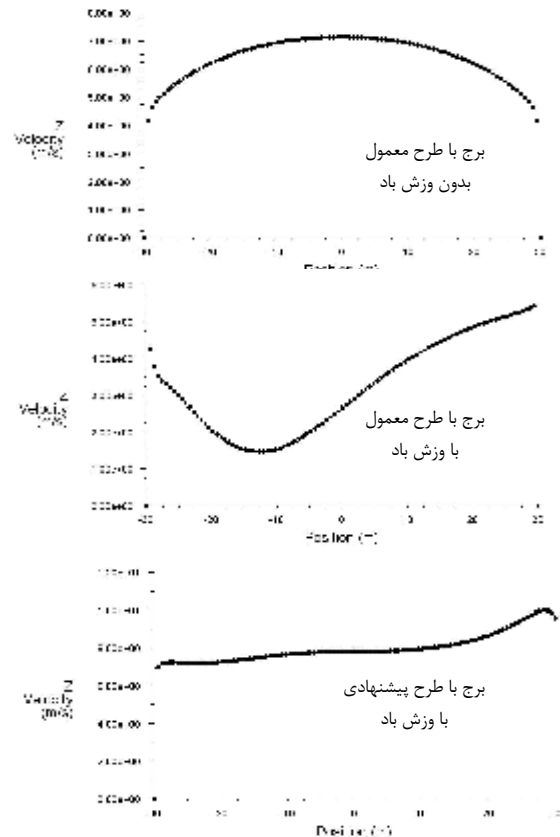
[15] Launder B.E., and Spalding D.B., "The Numerical Computation of Turbulent Flow", Comput. Methods Appl. Mech. Eng., Vol. 3, pp. 269-289, 1974.

[16] "The Heller System", EGI, Budapest, 1984.

[17] Azimian A.A., Shams K., and Khojasteh A., "Simulation of Wind Effect on Dry Cooling Tower", 9<sup>th</sup> ISME2005 conference, May 17-19, IUT, Isfahan, Iran, 2005.

[18] FLUENT, User's Guide, FLUENT Incorporated, Lebanon, NH, USA. 1999.

[۱۹] ستاری س., "اثر گرم کردن مجدد هوا بر روی عملکرد برجهای خنک کننده هله"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۰.



شکل ۱۰- توزیع مؤلفه عمودی سرعت در خط مرکزی دهانه خروجی برج

### مراجع

- [1] Kapas, "Behavior of Natural Draught Cooling Towers in Wind", CMFF, 30, Budapest, Hungary, 2003.
- [2] Zhai Z., Fu S., "Improving Cooling Efficiency of Dry-Cooling Towers under Cross-wind Conditions by Using Wind-Break Methods", Applied Thermal Engineering, Vol. 26, PP. 1008-1017, 2006.
- [3] Radosavljevic D., Spalding D.B., "Simultaneous Prediction of Internal and External Aerodynamic and Thermal Flow Field of a Natural Draft Cooling Tower in a Cross Wind", Proc. 6<sup>th</sup> IAHR Cooling Tower Workshop, Pisa, 1988.
- [4] Bergstrom D.J., Derksen D., Rezkallah K.S., "Numerical Study of Wind Flow over a Cooling Tower", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vols. 46 and 47, pp. 657-666, 1993.
- [5] Du Preez A.F., and Kroger D.G., "Effect of Wind on Performance of a Dry-Cooling Tower", Heat Recovery Systems and CHD, Vol. 13, pp. 139-146, 1993.
- [6] Wei Q., Zhang B., Liu K., Du X., and Meng X., "A Study of The Unfavorable Effects of Wind on the Cooling Efficiency of Dry Cooling Towers", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vols. 54 and 55, pp. 633-643, 1995.
- [7] Derksen D., Bender T.J., Bergstrom D. J.,