

دوگانه‌سازی برج‌های خنک‌کن خشک طبیعی و تر اجباری در یک نیروگاه بخار

کارشناس ارشد، دانشگاه اصفهان، مهندسی مکانیک
استادیار، دانشگاه اصفهان، مهندسی مکانیک
دانشیار، دانشگاه اصفهان، مهندسی مکانیک

محمدحسن ملک‌محمدی
حمید بهشتی
حسین احمدی^{*} کیا

چکیده

استفاده از برج خنک‌کن خشک و یا دوگانه سازی برج‌های خشک و تر، یکی از راه‌حل‌های شناخته شده برای کاهش آب مصرفی در برج‌های خنک‌کن تر نیروگاه‌های بخار است. در این مقاله این راهکار با استفاده از برج خنک‌کن هلر مورد بررسی قرار گرفت. شبیه‌سازی برای دو برج خنک‌کن خشک هلر نیروگاه شهید منتظری و برج خنک‌کن تر جریان اجباری نیروگاه اصفهان با استفاده از معادلات تحلیلی و تجربی حاکم بر آنها انجام شد. دو حالت موازی و سری برای ترکیب برج خنک‌کن‌های خشک هلر و تر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی و بررسی روش‌های اجرایی نشان می‌دهند که استفاده موازی از برج هلر با برج تر از نظر طراحی و بهره‌برداری قابل توجه نیست، اما حالت سری آنها در دو وضعیت با تغییر سیستم پمپاژ و بدون تغییر سیستم پمپاژ مناسب است. این تحقیق نشان داد که بدون تغییر در سیستم پمپاژ و چگالنده، نیروگاه می‌تواند با وضعیت مطلوب به کار خود ادامه دهد. صرفه‌جویی در مصرف آب تا دمای محیط زیر 20°C ، به میزان کامل به دست آمد، اما در دماهای بالاتر از آن مصرف آب روندی افزایشی دارد.

واژه‌های کلیدی: برج تر، برج خشک هلر، برج دوگانه، مصرف آب، نیروگاه.

Dual Making of Natural Dry and Forced Wet Cooling Towers in a Power Plant

M. H. Malekmohamadi

M.Sc. Student, University of Isfahan, Mechanical Engineering

H. Beheshti

Assistant Professor, University of Isfahan, Mechanical Engineering

H. Ahmadikia

Associate Professor, University of Isfahan, Mechanical Engineering

Abstract

Using of dry cooling towers or hybridized dry-wet towers is one of the well-known solutions for this purpose. In this paper, dry Heller cooling tower was combined appropriately with existing wet cooling tower to reduce the water consumption. Simulation of dry Heller cooling tower of Shahid Montazery power plant and wet forced counter flow cooling tower of Isfahan power plant was performed. Two cases of parallel and series for combination of dry and wet cooling towers was considered. The results of simulation and analysis of executive methods show that parallel use of Heller tower with wet tower is not reasonable. But series case in various ambient temperatures in two situations of changing pump system and without changing it was recognized appropriate. It was shown that there was no need for changing the pump systems and condenser works in continuous desirable condition. Water saving is full for ambient temperature below 20°C , but in more ambient temperature water saving trend is decreasing.

Keywords: Wet Tower, Dry Heller Tower, Hybrid Tower, Water Consumption, Power plant.

۱- مقدمه

در حال حاضر میزان مصرف آب نیروگاه اصفهان $2000 \text{ m}^3/\text{h}$ در تابستان و کمی کمتر در زمستان است. با احتساب سرانه مصرف ۱۷۲ لیتر آب در ایران، با جایگزینی برج خشک‌کن خشک، می‌توان آب مورد نیاز ۲۸۰ هزار نفر در ایران را تأمین نمود. بی‌شک برج خشک‌کن تر به دلیل هزینه پایین‌تر، وابستگی کم به شرایط محیطی و بازده بیشتر نیروگاه، بهترین طرح برای اغلب نیروگاه‌های کشور بوده است. اما افزایش جمعیت، توسعه یافتگی صنعتی و تغییر الگوی مصرف موجب افزایش تقاضای آب شده است. تغییر اقلیم و کاهش نزولات جوی نیز این امر را تشدید کرده است. بنابراین رویکرد صنعت به استفاده از برج‌های خشک‌کن خشک افزایش یافته است. مه برج تر نیز مزاحمت زیادی برای نیروگاه و ساکنین اطراف آن دارد. همچنین آلودگی محیط زیست به دلیل وجود پساب برج تر قابل توجه است، که با ایجاد برج هلو، این مشکلات نیز مرتفع می‌گردند. هدف از این مقاله بررسی جایگزینی و دوگانه‌سازی برج خشک‌کن تر نیروگاه اصفهان جهت کاهش مصرف آب با توجه به امکانات فنی و اجرایی آن از قبیل شرایط آب و هوایی منطقه و سعی در عدم اعمال تغییرات احتمالی در چگالنده و دیگر اجزای نیروگاه می‌باشد.

تحقیقات اندکی برای استفاده از برج‌های دوگانه نیروگاهی در دسترس است. اسنایدر و همکاران [۱] در گزارشی انواع چیدمان برج خشک‌کن ترکیبی خشک و تر را بررسی کردند. مزیت این طراحی این است که هزینه احداث برج خشک‌کن خشک کمتر و همچنین هدر رفت آب به مراتب کمتر از برج خشک‌کن تر به تنهایی است. چوی و گلیکسمن [۲] صرفه جویی در مصرف آب و هزینه‌های مختلف با استفاده از برج خشک‌کن ترکیبی تر و خشک در مقایسه با برج خشک‌کن تمام خشک را مقایسه کردند. آنها نشان دادند که بالا رفتن دمای آب برج خشک و در نتیجه افزایش دمای چگالنده و متعاقب آن پایین آمدن بازده سیکل ترمودینامیکی نیروگاه، باعث افزایش هزینه‌های مختلف می‌گردد. تورچی و همکاران [۳] بیان کردند که تغییر از ۱۰۰ درصد برج خشک‌کننده تر به ۱۰۰ درصد برج خشک‌کننده خشک هزینه اولیه تولید الکتریسیته را تقریباً ۳ تا ۸ درصد افزایش خواهد داد؛ اما در عوض این تغییر باعث کاهش بیش از ۹۰ درصدی در مصرف آب نیروگاه می‌گردد. در مورد برج خشک‌کننده خشک به تنهایی هم، کارها و مطالعات تحقیقاتی بسیار زیادی انجام شده است. از جمله کارهای مربوط با طراحی گرمایی و همچنین راهکارهایی جهت افزایش بازده و بهینه‌سازی ابعاد برج خشک انجام گرفته است [۴ و ۵].

در این مقاله روش طراحی و محاسبه برج خشک‌کن خشک طبیعی هلو نیروگاه شهید منتظری اصفهان و روش تحلیلی برج

خشک‌کن تر واحدهای ۳۲۰ مگاواتی نیروگاه اصفهان انجام شده و برای طراحی مدل دوگانه استفاده شده است. حالت‌های ترکیبی سری و موازی بررسی شده و ترکیب مناسبی با هدف کاهش مصرف آب انتخاب شده است.

۲- تحلیل برج خشک‌کن خشک هلو

مهم‌ترین ویژگی سیستم خشک‌کن خشک طبیعی هلو عدم نیاز آن به آب جبرانی و عدم آلودگی محیط می‌باشد. از معایب عمده برج خشک این است که حد پایینی دمای آب خشک‌کننده در واقع همان دمای هوای خشک محیط است که موجب کاهش بازده نیروگاه می‌شود. از دیگر معایب آن اختلال در عملکرد آن در هنگام وزش باد و افزایش دمای محیط است.

برای تحلیل مبادله‌کن‌های گرمایی هنگامی که دماهای ورودی به مبادله‌کن دو سیال معلوم باشند، از روش $\epsilon\text{-NTU}$ استفاده می‌شود. از قرار گرفتن دو مبادله‌کن فورگو به صورت عمودی در کنار یکدیگر یک دلتا با زاویه ۶۰ درجه تشکیل می‌شود. در مبادله‌کن‌های گرمایی فورگو ضرایب انتقال گرمای جابجایی بر مبنای سطح جلویی همراه بادر نظر گرفتن رسوبات توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود [۷]:

$$\frac{1}{UA_{\text{face}}} = \frac{1}{\eta H_o A_o} + \frac{1}{H_i A_i} + \frac{\delta_t}{K_t A_t} + R_j \quad (1)$$

جزئیات روش در مرجع [۷] داده شده است.

افت فشار هوا حین عبور از دلتاهای پیرامون برج، ΔP_{delta} و افت فشار کرکره‌ها، ΔP_{louver} و افت فشار مربوط به پوسته بدنه برج، ΔP_{exit} از روابط زیر محاسبه می‌شوند [۶]:

$$\Delta P_{\text{delta}} = \left[0.147 + 0.007 \left(\frac{1}{\sin^2 \alpha} - 1 \right) \right] \left[\frac{G_d}{A_{\text{face}}} C_k^{0.5} \right]^{1.76} \quad (2)$$

$$\Delta P_{\text{louver}} = 0.00548 \left[\frac{G_{\text{ld}}}{A_{\text{face}}} C_k^{0.5} \right]^2 \quad (3)$$

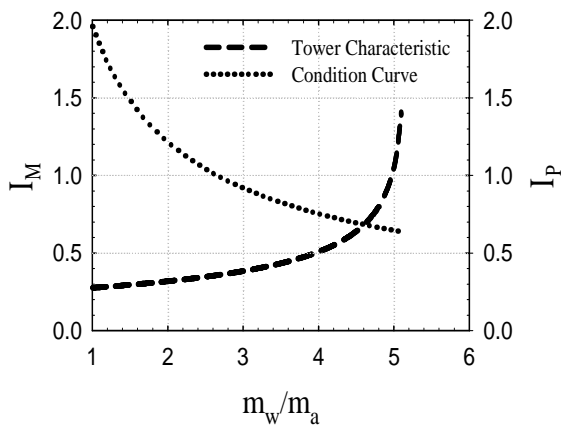
$$\Delta P_{\text{exit}} = \frac{\rho_{a,m}}{2g} \left[\frac{G_d}{3.6 \rho_{a,m} (D_2 - 2)^2 \pi} \right]^2 \quad (4)$$

ورود هوا به داخل برج و بالا رفتن آن به دلیل وجود نیروی بویانسی ناشی از گرم شدن هوا در مبادله‌کن گرمایی می‌باشد. مکش برج با رابطه زیر محاسبه می‌شود، که بایستی برابر مجموع افت‌های فشار موانع سر راه هوا شامل افت فشار دلتا، کرکره‌ها و پوسته برج باشد:

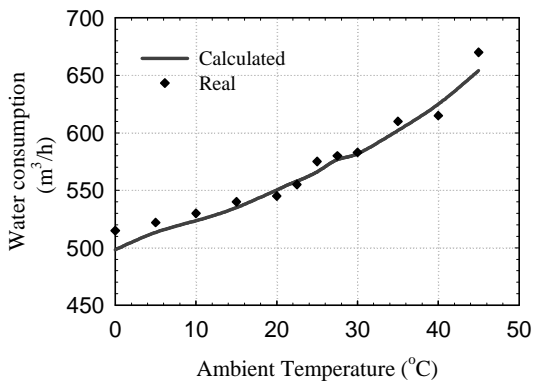
$$\sum \Delta P = \Delta P_{\text{delta}} + \Delta P_{\text{louver}} + \Delta P_{\text{exit}} = g Y_e \Delta p \quad (5)$$

یک برنامه رایانه‌ای بر مبنای روند طراحی برج هلو تدوین شده و بر مبنای اطلاعات برج‌های نیروگاه شهید منتظری برای

شده است که مقایسه مقادیر محاسبه شده و مقادیر واقعی بیانگر صحت برنامه رایانه‌ای تدوین شده است.



شکل ۱- به دست آوردن نقطه طرح در برج تر نیروگاه



شکل ۲- مقایسه مصرف واقعی آب برج تر با نتایج محاسباتی

۴- برج دوگانه

مشکل اصلی نیروگاه اصفهان مصرف آب بسیار بالای آن است که با کم آبی فعلی کار این نیروگاه را با معضلات فراوانی روبرو کرده است. در نتیجه چاره‌ای جز استفاده از سیستم خشک علی‌رغم هزینه ساخت زیاد آن برای کاهش مصرف آب وجود ندارد. برای این منظور دو برج خشک طبیعی با برج تر موجود به صورت ترکیبی مد نظر قرار گرفته است. دبی آب خنک‌کن گردش‌ی برج تر فعلی $47400 \text{ m}^3/\text{h}$ است که بین ۱۲ سل برج تر تقسیم می‌شود. دمای آب ورودی به برج 45°C و دمای آب خروجی از آن 7.8°C خنک‌تر، یعنی 37.2°C است [۹]. برای ترکیب دو برج، از دو حالت موازی و سری می‌توان استفاده کرد که در ذیل به آنها پرداخته می‌شود.

۴-۱- حالت موازی

تعداد سل‌های برج تر یک واحد 320 مگاواتی نیروگاه اصفهان 12 عدد است و آب به گونه‌ای بین دو برج موازی تقسیم می‌شود که مضرری از یک سل باشد.

برج هلر آزمایش شده است مقایسه مقادیر محاسبه شده و مقادیر واقعی در جدول ۱ نشان دهنده صحت برنامه رایانه‌ای تدوین شده است.

جدول ۱- مقادیر محاسبه شده واقعی برج هلر نیروگاه شهید منتظری

پارامتر	محاسبه‌ای	واقعی
تعداد ستون‌ها(عدد)	۲۳۸	۲۳۸
قطر پایه برج(m)	۱۰۵٫۹۱	۱۰٫۹
قطر دهانه بالایی(m)	۶۰٫۵۳	۶۰
ارتفاع برج(m)	۱۲۱٫۳۲	۱۲۰

۳- تحلیل برج خنک‌کن تر جریان اجباری

در برج‌های تر محدوده نسبت دبی آب به دبی هوا توسط حل همزمان سه رابطه زیر به دست می‌آید.

$$1- \text{رابطه مرکل [۸]}$$

$$2- \text{یک رابطه برای هسته خنک‌کننده}$$

$$3- \text{رابطه موازنه آنتالپی}$$

رابطه (۶) که توسط مرکل ارائه گردیده است، ساده‌ترین و البته پرکاربردترین رابطه در محاسبات مربوط به برج خنک‌کن تر است. این رابطه کمیت‌های لازم جهت خنک کردن را به خواص و اطلاعات هسته خنک‌کننده مربوط می‌کند [۸].

$$(6a) \quad \int_{h_{w,out}}^{h_{w,in}} \frac{dh_w}{h_g - h_a} = \int_{z_1}^{z_2} \frac{\gamma A_{i/v}}{m_w} Adz$$

$$(6b) \quad I_M = I_p$$

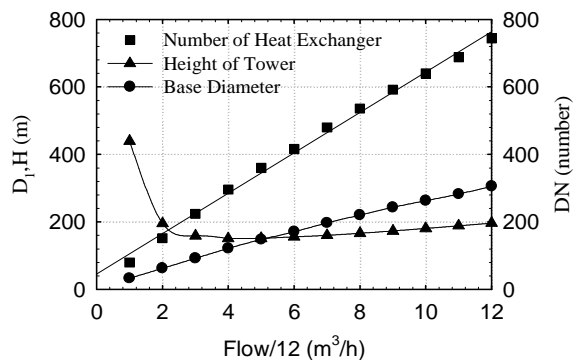
مقدار انتگرال I_M به خواص آب و هوا در ورودی و خروجی بستگی دارد و توسط یک روش عددی تعیین می‌شود. مشخصات برج تر نیروگاه اصفهان از داده‌های شرکت Hamon-Sobelco استفاده شده است [۹]. چون I_M و I_p هر دو تابعی از نسبت دبی آب به نسبت دبی هوا هستند، بنابراین در نقطه طراحی برج رابطه (۶) برقرار خواهد بود. پس در نقطه تلاقی دو منحنی I_M و I_p نسبت دبی‌ها مشخص می‌شود.

شکل (۱) دو منحنی I_M و I_p را بر اساس نسبت دبی‌ها برای برج خنک‌کن تر نیروگاه بر اساس دمای آب ورودی به برج 45°C ، دمای آب خروجی از برج 37.2°C ، دمای محیط 30°C و رطوبت نسبی ۲۵ درصد نشان می‌دهد. برای پیدا کردن رطوبت هوای خروجی، از نسبت جرمی رطوبت به عنوان معیاری برای اندازه‌گیری رطوبت هوای خروجی استفاده می‌شود. برای محاسبه آب تبخیری در برج می‌توان از اختلاف نسبت جرمی رطوبت هوا در ورودی و خروجی برج استفاده کرد. بنابراین آب مصرفی در برج به دست خواهد آمد.

مصرف آب برج تر بر مبنای داده‌های نیروگاه و از طریق برنامه رایانه‌ای برای نیروگاه اصفهان در نمودار شکل (۲) مقایسه

شکل (۳) نتایج محاسبات را در دبی‌های مختلف و دمای محیط 30°C و رطوبت محیط را ۲۵ درصد نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود ابعاد و اندازه‌های برج خشک به دست آمده جهت احداث منطقی نیست و دلیل آن این است که برج از شرایط طراحی خارج شده است. تعداد مبادله‌کن‌ها بسیار زیاد و سرعت آب در مبادله‌کن بسیار کم است. در مبادله‌کن‌های گرمایی باید سرعت آب بین 0.5m/s تا 3m/s باشد، در حالی که سرعت آب در برنامه رایانه‌ای در دبی‌های مختلف 0.51m/s تا 0.649m/s به دست آمده است.

علاوه بر موارد فوق، موازی کردن برج خشک و برج تر معایب عمده دیگری نیز دارد. از جمله این که استفاده از این روش مستلزم کنترل دبی آب در هر برج و در شرایط مختلف کارکرد است که برای اجرای آن استفاده از شیرهای کنترل به تعداد کافی و همچنین استفاده از یک مکانیزم اندازه‌گیری و کنترل مناسب ضروری است. به علت این معایب، استفاده از این روش نه از لحاظ طراحی و نه از لحاظ بهره‌برداری منطقی نبوده و قابل توجیه نیست.



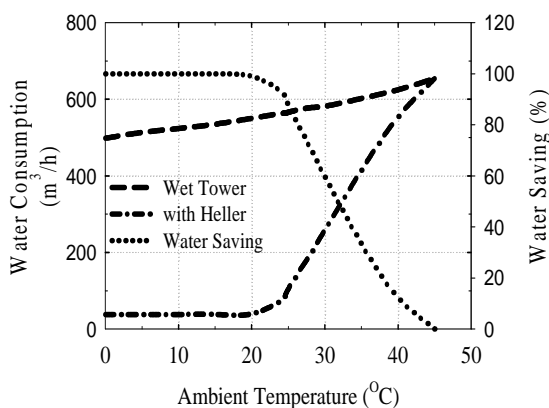
شکل ۳- ابعاد برج هلر در حالت موازی

۴-۲- حالت سری

مبنا در تحلیل برج‌های دوگانه به صورت سری، حفظ فشار چگالنده یعنی حفظ دمای آب خروجی از برج است، لذا نتایج به دست آمده بر مبنای حفظ دمای آب خروجی از برج می‌باشد. اساس کار به این ترتیب است که آب گردش ابتدای برج خشک و بعد از آن از برج تر عبور می‌کند. برای انتخاب ابعاد و اندازه‌های برج هلر گزینه‌های مختلفی در پیش رو است. به این منظور با توجه به این که صحت برنامه رایانه‌ای برج خشک هلر نیروگاه شهید منتظری مورد اطمینان است و دبی آب خنک‌کن گردش برج تر نیروگاه اصفهان در حدود دو برابر دبی آب خنک‌کن گردش نیروگاه منتظری موازی با هم و سری با برج تر در نظر گرفته می‌شود. بنابراین ابعاد، اندازه‌ها و تعداد مبادله‌کن‌های گرمایی مشخص است و با ترکیب برنامه برج خشک هلر با برنامه برج تر، مقدار آب مصرفی در برج تر محاسبه می‌شود. به این ترتیب که

ابتدا دمای آب خروجی از برج‌های هلر محاسبه می‌شود. سپس این دما، به عنوان دمای آب ورودی به برج تر قرار داده می‌شود. قرار گرفتن برج هلر به صورت سری در مسیر آب گردش باعث افزایش هد و کاهش دبی خواهد شد. در ابتدا ضرایب افت‌ها بر حسب توان دوم دبی، در چگالنده و سایر مسیرها در حالت فعلی محاسبه می‌شود. سپس میزان افت‌ها در چگالنده، مسیرها و برج هلر بر حسب دبی محاسبه می‌شود. در ادامه با استفاده از منحنی مشخصه پمپ‌های آب گردش موجود، نقطه کارکرد جدید سیستم تعیین می‌گردد.

شکل (۴) نتیجه انجام محاسبات و میزان صرفه‌جویی در مصرف آب را نشان می‌دهد. همان گونه که ملاحظه می‌گردد مصرف آب حداکثر ۵ درصد در 30°C افزایش می‌یابد. در نتیجه تغییر در سیستم پمپاژ تأثیر چندانی در روند مصرف آب نخواهد داشت و چگالنده با برج دوگانه و پمپ‌های فعلی تقریباً مشابه با حالت فعلی به کار خود ادامه خواهد داد. شایان ذکر است که حداکثر ΔT مجاز آب خنک‌کن گردش در چگالنده نیروگاه، 14°C می‌باشد [۹]. استفاده سری این دو نوع برج باعث می‌شود که برای دفع مقدار مشخصی گرما از چگالنده، برج خشک مقداری را دفع کرده و مابقی توسط برج تر دفع گردد. در واقع این ترکیب سیستم خنک‌کن انعطاف و قابلیت این را دارد که در فصل‌های گرم و در زمان‌های وزش باد که در عمل سهم برج خشک در دفع گرما کم می‌شود، برج تر با دفع گرمای بیشتر این نقیصه را جبران کرده و فشار چگالنده ثابت مانده و در نتیجه بازده سیکل نیروگاه کاهش نیابد.



شکل ۴- مقایسه مصرف آب برج تر به تنهایی با برج دوگانه

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله سعی بر آن است که کاهش مصرف آب در برج‌های خنک‌کن یک نیروگاه که از نوع تر اجباری است، با استفاده از برج خنک‌کن خشک از نوع طبیعی هلر مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور ابتدا برج هلر و برج تر طراحی شده‌اند. برای دوگانه‌سازی، ابتدا حالت موازی برج هلر با برج تر در نسبت

ρ	چگالی (kg/m^3)
زیرنویس‌ها	
a	هوا
d	دلتا
i	درونی
m	متوسط
o	بیرونی
s	اشباع
t	لوله
w	آب

مراجع

- [1] Snyder T., Bentley J., Giebler M., Glicksman L. R., and Rohsenow W. M., "Advanced wet-dry cooling tower concept performance prediction", Department of Mechanical Engineering, M.I.T. 0000Energy Laboratory, Report no. MIT-EL 77-002, vol. I, January 1977.
- [2] Choi M., and Glicksman L. R., "Computer optimization of dry and wet/dry cooling tower systems for large fossil and nuclear power plants", Energy Laboratory Report no. M.I.T-EL 79034, 1979.
- [3] Turchi C. S., Wagner M. J., and Kutscher C.F., "Water use in parabolic trough power plants: summary results from Worley Parsons' analyses", Technical Report NREL/TP-5500-49468 December 2010.
- [4] Smrekar J., Senegacnik A., and Fuhrer C., "Methodology for evaluation of cooling tower performance – Part 2: Application of the methodology and computational aspects of Poppe equations", Int. J. Energy Conversion and Management, vol. 52, pp. 3282-3289, 2011.
- [5] Goodarzi M., [A proposed stack configuration for dry cooling tower to improve cooling efficiency under crosswind], Int. J. Wind Engineering Industrial Aerodynamics, vol. 98, pp. 858-863, 2010.
- [6] "Hysys software documentation", Shahid Mohamad Montazeri Power Plant", Isfahan, Iran, 1984.
- [7] احمدی کیا حسین، ایروانی غلامعباس، "بررسی عددی و تجربی برج خنک‌کننده خشک طبیعی نیروگاه حرارتی بخار"، نشریه استقلال دانشگاه صنعتی اصفهان، سال ۲۶، شماره ۱، صفحه ۱۸۳-۱۹۵، شهریور ۱۳۸۶.
- [8] Gurney J. D., and Cotter I. A., "Cooling Tower, London", Maclaren & Sons Ltd. London, 1966.
- [9] Cooling Tower Documents no. C.583 and C.749, Islam Abad Power Plant, Isfahan, Iran, 1988.

دبی‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت که هرچند در مصرف آب صرفه‌جویی حاصل می‌شد، اما به دلیل این که فشار و دمای چگالنده پایین است و برای برج تر طراحی شده و نه برای برج خشک، ابعاد و اندازه‌های به دست آمده از محاسبات انجام شده در بیشتر موارد از لحاظ استانداردهای سازهای غیر قابل قبول بود. حالت سری دو برج مزایای مختلفی دارد. از جمله ثابت ماندن دمای آب خروجی از برج دوگانه در حالت‌های مختلف آب هوایی و همچنین افت‌های مسیر کمتر است که باعث می‌گردد با استفاده از پمپ‌های موجود و بدون هیچ تغییری در چگالنده سیستم جدید بتواند مورد بهره‌برداری قرار گیرد. در روش سری صرفه‌جویی کامل در مصرف آب نیز تا دمای زیر 20°C به دست آمد؛ اما در دماهای بالا تر از آن، مصرف آب روندی افزایشی دارد. با وجود این همچنان صرفه‌جویی در مصرف آب تا دمای پایین‌تر از 40°C وجود دارد که در آن دماها برج خشک در عمل کارایی خود را از دست می‌دهد و تمام وظیفه دفع بار گرمایی بر عهده برج تر خواهد بود. بنابراین استفاده از برج هلر به صورت سری با برج تر گزینه‌ای بسیار مناسب برای کاهش مصرف آب در نیروگاه اصفهان می‌باشد.

نمادها

A	مساحت (m^2)
A_{face}	مساحت مقابل جریان هوا (m^2)
$A_{i/v}$	سطح داخلی بر واحد حجم (m^{-1})
C_k	نسبت چگالی هوای گرم به هوای استاندارد
D_2	قطر دهانه بالایی برج خشک (m)
G	شار گرمی ($\text{kg/m}^2\text{s}$)
g	شتاب جاذبه (m/s^2)
H	ضریب انتقال گرمای جابجایی ($\text{W/m}^2\text{C}$)
h	آنتالپی (J)
K	رسانایی گرمایی ($\text{W/m}^\circ\text{C}$)
m	دبی گرمی (kg/s)
P	فشار (Pa)
R_j	ضریب رسوب ($^\circ\text{C/W}$)
U	ضریب انتقال گرمای کلی ($\text{W/m}^2\text{C}$)
Y_e	ارتفاع مؤثر برج خشک (m)
z	طول (m)
نمادهای یونانی	
α	زاویه (rad)
γ	ضریب انتقال گرم ($\text{kg/m}^2\text{s}$)
Δ	اختلاف
δ	ضخامت (m)
η	بازده