



# Functional Investigation of Heat Transfer in a Cooling Tower

## ARTICLE INFO

### Author

Mamouri A.R.<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, National University of Skills (NUS), Tehran, Iran.

### \* Correspondence

Address: National University of Skills  
Amirelmir3000@yahoo.com

### How to cite this article

Mamouri A. R. Functional Investigation of Heat Transfer in a Cooling Tower. Proceedings of the 6th National Conference on Mechanical-Civil Engineering and Advanced Technologies. 2024; 24(11):79-83.

## ABSTRACT

In this study, a laboratory mechanical cooling tower has been investigated to determine how the cooling tower operates under different conditions and to create the best possible state for maximum efficiency. First, the cooling tower characteristic is obtained using Merkel relations, which is a measure of the tower's performance. The higher the characteristic, the better the tower's performance. Then, the water temperature at different heights of the tower has been obtained, which shows that the water temperature decreases more at the top of the cooling tower. The tower characteristic has also been plotted at different points of the cooling tower, which indicates that the tower characteristic is higher at the top of the cooling tower. Then, the changes in the tower characteristic with respect to the inlet water temperature have been shown, which shows that as the inlet water temperature increases, the tower characteristic also increases. Then, the effect of the ratio of water flow rate to air flow rate on the tower characteristic is presented, which are inversely related, and finally, the tower characteristic relationship for this cooling tower has been obtained.

**Keywords** Cooling Tower, Mass Transfer Coefficient, Heat Transfer Coefficient, Tower Characteristics.

ماهنامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژهنامه مجموعه مقالات ششمین کنفرانس ملی مهندسی مکانیک، عمران و فناوری‌های پیشرفته



## بررسی عملکردی انتقال حرارت در یک برج خنک کننده



### چکیده

در این تحقیق، یک برج خنک کن مکانیکی آزمایشگاهی بررسی شده است تا نحوه عملکرد برج خنک کن در شرایط مختلف بدست آید و به توان بهترین حالت برای بیشترین بازده را ایجاد نمود. ابتدا به کمک روابط مرکل مشخصه برج خنک کن بدست می آید که مشخصه برج معیاری از عملکرد برج می باشد. هرچه بتوان میزان مشخصه را افزایش داد، عملکرد برج نیز بهتر می شود. سپس دمای آب در ارتفاع های مختلف برج بدست آمده است که نشان می دهد در بالای برج خنک کن، کاهش دمای آب بیشتر است. همچنین مشخصه برج در نقاط مختلف برج خنک کن رسم شده است که از بالا بودن مشخصه برج در بالای برج خنک کن حکایت می کند. سپس تغییرات مشخصه برج نسبت به دمای آب ورودی نشان داده شده است که هرچه دمای آب ورودی افزایش یابد مشخصه برج نیز بیشتر می شود. سپس تاثیر نسبت دبی آب به دبی هوا روی مشخصه برج ارائه شده که با هم نسبت عکس دارند و در نهایت رابطه مشخصه برج برای این برج خنک بدست آمده است.

### مشخصات مقاله

#### نویسنده

امیررضا معموری \*

<sup>1</sup> گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

#### \* نویسنده مسئول

آدرس: دانشگاه ملی مهارت -  
۰۹۱۵۳۰۷۴۱۳۶

amirelmir3000@yahoo.com

**کلیدواژه‌ها** برج خنک کن، ضریب انتقال جرم، ضریب انتقال حرارت، مشخصه برج.

بهینه را هم در چرخه خنک‌کننده داخلی سرور و هم در چرخه آب منبع سرد خارجی تحت دماهای مختلف محیط بر اساس اصل حداقل مصرف برق به کمک برج خنک کن بررسی می‌کند.

هدف از این کار تحقیقی یک رویکرد جامع برای طراحی برج خنک کننده است. یک مدل ریاضی برای یک برج خنک‌کننده مرطوب جریان مخالف بر اساس معادلات گرما و تعادل جرم یک‌بعدی به دست آمده است. در این مقاله یک برج خنک کن بررسی می‌شود تا بتوان عملکرد بهینه برج را بدست آورد.

## ۲- دستگاه و روش آزمایش

برای بررسی عملکرد برج، از یک برج خنک کن دمنده که در شکل ۱ نشان داده شده است استفاده می‌شود. سیالات عمل‌کننده آب و هوا می‌باشند که جریان هوا از پایین برج وارد شده و بوسیله یک فن دمنده از روی پرکن‌ها عبور می‌نماید و سپس به اتمسفر تخلیه می‌شود. دبی هوا توسط یک اریفیس اندازه‌گیری می‌شود و دمای تر و خشک هوای ورودی و خروجی نیز توسط ۴ عدد دماسنج با دقت  $0.05^{\circ}\text{C}$  اندازه‌گیری می‌شود. دستگاه دارای مخزن با  $2\text{ m}^3$  آب و یک گرمکن الکتریکی می‌باشد. بعد از اینکه دمای آب به حد مطلوب رسید، آب به بالای برج پمپ می‌شود و بعد از عبور از دبی‌سنج و پرکن‌ها دوباره به برج بر می‌گردد. در این دستگاه دمای آب در اثر انتقال حرارت با هوا کاهش می‌یابد و دمای آب جهت بررسی در ارتفاع‌های مختلف پرکن بوسیله دماسنج‌ها خوانده می‌شود البته خواندن هر مرحله با مکث همراه است تا به حالت پایدار برسد.

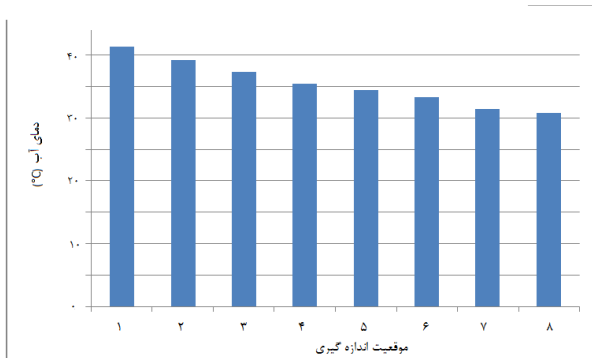


شکل ۱) برج خنک کن مورد آزمایش

## ۱- مقدمه

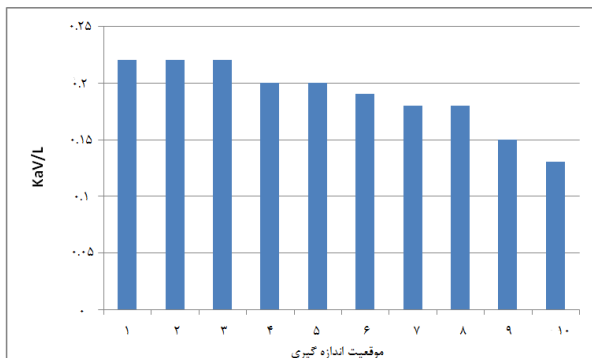
سیکل تبرید شامل اواپراتور، کندانسور، کمپرسور و شیر انبساط می‌باشد که کندانسور گرمای مبرد را به بیرون می‌دهد. کندانسورها خود به دو نوع تقسیم می‌شوند: کندانسور هوایی که بازده کمتری دارند ولی در مناطق شرجی و همچنین مناطق کم آب انتخاب بهتری می‌باشند و کندانسور آبی که شامل یک میدل پوسته لوله می‌باشد که گرمای بخار توسط آب گرفته می‌شود، سپس این آب مجدداً خنک می‌شود و این سیکل ادامه می‌یابد. معمولاً جهت خنک نمودن این آب از برج خنک کن استفاده می‌شود. برج‌های خنک کن خود به صورت‌های گوناگون تقسیم می‌شوند که شامل تماس مستقیم یا غیر مستقیم، جریان غیر همسو یا متقاطع، جریان طبیعی یا مکانیکی و همچنین مکنده یا دمنده تقسیم می‌شوند. تقریباً هر فرآیند صنعتی نیاز به کنترل دما دارد. به همین دلیل امروزه برج‌های خنک‌کننده بخشی از بسیاری از تاسیسات کارخانه هستند. عملکرد آنها بر اساس یک اصل است که در آن انرژی از آب گرم در تماس مستقیم با هوای نسبتاً خنک و خشک حذف می‌شود. در یک برج خنک‌کننده جریان مخالف، فرآیند شامل یک فاز گاز (هوا) به سمت بالا، یک فاز مایع (فیلم آب) به سمت پایین و یک سطح تماس بزرگ بین دو فاز است. فاکتورهای کلیدی مورد نیاز برای انتقال شدید گرما و جرم در یک برج خنک‌کننده، سطح تماس بزرگ هوا به آب و ضریب انتقال حرارت بالا است [1].

یو و همکارانش [2] معادلات برج خنک کن را بررسی نمودند و روش محاسبه آن را با جزئیات ارائه نمودند. فیسنگو و همکارش [3] یک مدل ریاضی بهبود یافته برای عملکرد برج خنک کن مکانیکی ارائه نمودند، این مدل یک مسئله مقدار مرزی را برای یک سیستم معادلات دیفرانسیل معمولی نشان می‌دهد که تغییر در سرعت قطرات، شعاع و دمای آن و همچنین تغییر در دما و چگالی بخار آب در هوای مه‌آلود در یک برج خنک‌کننده را توصیف می‌کند. رویز و همکارانش [4] به توصیف تجربی یک نمونه اولیه برج خنک‌کننده جدید پرداختند نوآوری آنها مربوط به مطالعه برج خنک‌کننده ای متکی است که برای جلوگیری از انتشار ذرات معلق در هوا به جو طراحی شده است. این آزمایش‌ها در یک کارخانه آزمایشی که به طور موقت برای این منظور ساخته شده بود انجام شد و در ارزیابی اثرات زیست محیطی (سطح انتشار) از روش کاغذ حساس استفاده نمودند. این مقاله به تجزیه و تحلیل تجربی پدیده‌های انتقال همزمان گرما و جرم بین آب و هوا با تماس مستقیم در یک برج خنک‌کننده بسته می‌پردازد. لوماری و همکارانش [5] به تجزیه و تحلیل تجربی پدیده‌های انتقال همزمان گرما و جرم بین آب و هوا با تماس مستقیم در یک برج خنک‌کننده بسته می‌پردازد. هی و همکارانش [6] برای توسعه یک سیستم خنک‌کننده بسیار کارآمد و صرفه‌جویی در انرژی در یک مرکز داده، مطالعه مدیریت حرارتی



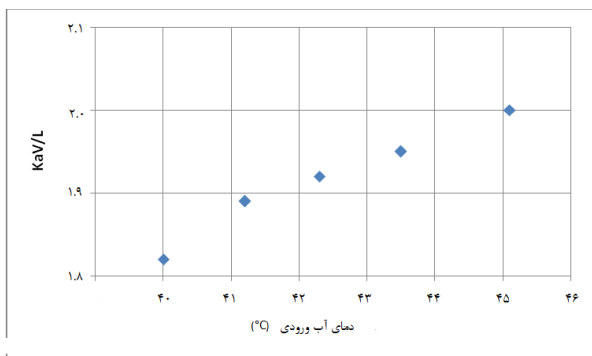
شکل ۲) تغییرات دمای آب در نقاط مختلف برج

هرچه اختلاف دمای آب کمتر فرض شود تعداد مراحل بیشتر و انتگرال دقیق تر محاسبه خواهد شد. انتقالی هوای اشباع و انتقالی هوا را نیز به کمک نمودار سایکومتریک می توان بدست آورد. با رسم شکل ۳ مشخصه برج در نقاط مختلف برج معلوم می شود مشخصه برج در بالای برج بیشتر از پایین برج می باشد.



شکل ۳) مشخصه برج در نقاط مختلف برج

جهت مشخص شدن اثر دمای آب ورودی بر روی مشخصه برج با انجام چند مرحله آزمایش و رسم شکل ۴ مشاهده می شود با افزایش دمای آب ورودی مشخصه برج نیز افزایش می یابد.



شکل ۴) تغییرات مشخصه برج با دمای آب ورودی

سپس تغییرات بازده با نسبت دبی های آب و هوا بررسی می شود و نتایج در شکل ۵ رسم می شود. بازده اختلاف دمای آب ورودی و خروجی به اختلاف دمای آب ورودی و دمای تر هوای ورودی می باشد و مطابق رابطه زیر می باشد.

$$\eta = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{t_{w1} - t_{wb,th}} \quad (10)$$

### ۳- معادلات ریاضی

انتقال حرارت و جرم را در یک برج خنک کننده بوسیله معادلات بقاء جرم انرژی می توان بدست آورد. طبق قانون بقاء جرم، جرم کم شده از آب تبخیر شده و به هوا افزوده می شود.

$$dL = Gd\omega \quad (1)$$

بر طبق قانون بقاء انرژی، گرمای داده شده به هوا با گرمای گرفته شده از آب برابر است.

$$Gdh_a = C_{p_w}d(t_w L) = C_{p_w}(Ldt_w + t_w dL) \quad (2)$$

گرمای از آب به ۲ طریق گرفته می شود: ۱- بوسیله اختلاف دمای آب و هوا ۲- بوسیله تبخیر بخشی از آب. حال معادله (۲) را با فرض اینکه جرم آب تبخیر شده اندک می باشد معادله زیر بدست می آید.

$$Gdh_a = C_{p_w}Ldt_w = h_c A C_{p_w}(t_w - t_a) + KA(\omega_s - \omega)h_{fg} \quad (3)$$

رابطه ضریب انتقال حرارت و جرم بدین صورت می باشد.

$$h/K = \rho C_{p_w} L e^{2/3} \quad (4)$$

عدد لوئیس تقریباً ۱ می باشد و با قرار دادن معادله (۴) و در معادله (۳) داریم.

$$Gdh_a = C_{p_w}Ldt_w = K[C_{p_w}(t_w - t_a) + (\omega_s - \omega)h_{fg}]adV \quad (5)$$

سمت راست معادله (۵) اختلاف انتقالی هوای اشباع ( $h_s$ ) و انتقالی هوا ( $h_a$ ) می باشد.

$$Gdh_a = C_{p_w}Ldt_w = K[h_s - h_a]adV \quad (6)$$

در نتیجه داریم.

$$\frac{KaV}{L} = C_{p_w} \int \frac{dt_w}{h_s - h_a} \quad (7)$$

$$\frac{KaV}{G} = \int \frac{dh_a}{h_s - h_a} \quad (8)$$

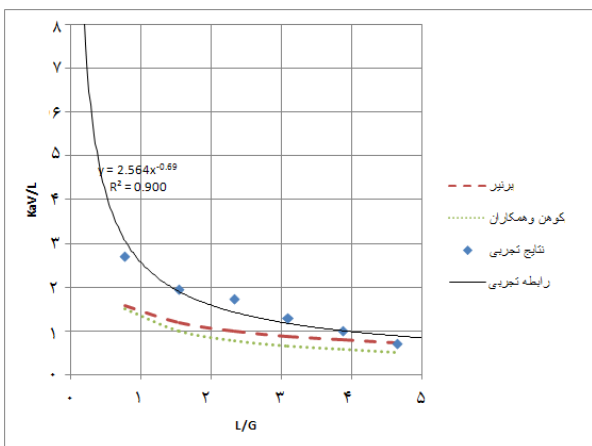
معادلات (۷) و (۸) مشخصه برج می باشد [7,8].

### ۴- نتایج و بحث

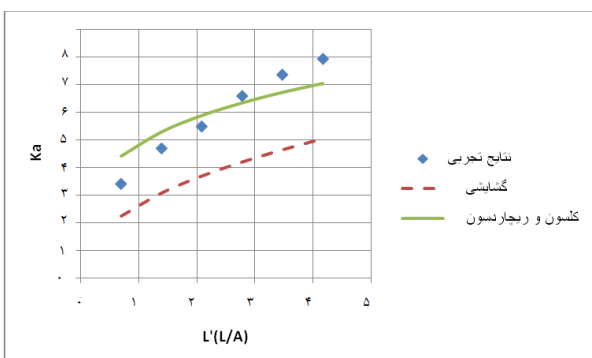
ابتدا دمای آب در نقاط مختلف برج بررسی می شود همانطور که در شکل ۲ مشاهده می شود دمای آب به مرور کاهش یافته است که نشان می دهد انتقال حرارت مرحله به مرحله در حال انجام گرفتن است همچنین دیده می شود دمای آب در ۴ مرحله اول بیشتر از ۵ درجه تغییر نموده در حالی که در ۴ مرحله انتهایی کمتر از ۵ درجه تغییرات داشته ایم که نشان می دهد در بالای برج انتقال حرارت بیشتر از پایین برج می باشد.

سپس به بررسی مشخصه برج پرداخته می شود که از روابط (۷) و (۸) بدست می آیند که در این رابطه  $KaV/L$  مشخصه برج می باشد و معیاری از عملکرد گرمایی برج است با علم به اینکه اختلاف انتقالی هوای اشباع و هوا خطی نیست لذا باید به روش های عددی اکتفا کرد در این قسمت انتگرال فوق به صورت زیر تقریب زده می شود [9].

$$\frac{KaV}{L} \approx C_{p_w} \sum \frac{\Delta t_w}{h_s - h_a} \quad (9)$$

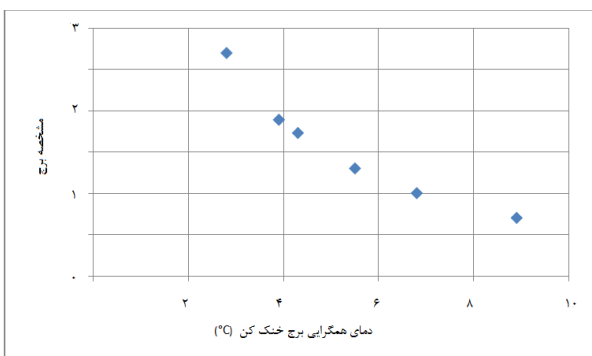


شکل ۶) تغییرات مشخصه برج با نسبت جرم آب و هوا و مقایسه با نتایج دیگر محققان [10]



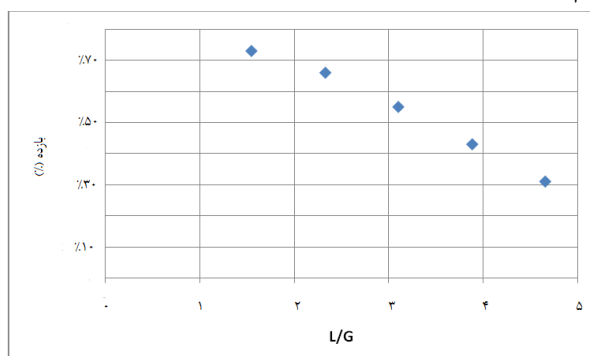
شکل ۷) نمودار Ka برج نسبت به L' و مقایسه با نتایج دیگر محققان [10]

و در انتها در شکل ۸ مشخصه برج نسبت به دمای همگرایی برج رسم شده است واضح است با افزایش مشخصه برج، دمای همگرایی کاهش می یابد. با ادامه دادن این نمودار مشخص می شود در مشخصه برج بی نهایت، دمای همگرایی به سمت صفر میل می کند و این بدان معنی است که در ماکزیمم عملکرد برج در حالت ایده آل، دمای آب خروجی از برج به دمای تر هوای ورودی می رسد که در این صورت به بازده ۱۰۰٪ یا مشخصه برج بی نهایت رسیده است.



شکل ۸) نمودار مشخصه برج نسبت به دمای همگرایی برج

همانطور که در شکل مشخص است با افزایش نسبت جرم آب به هوا بازده برج کاهش می یابد و مسئله مهمتر این است که بازده برج وقتی ۱۰۰٪ است که نسبت دبی ها صفر باشد یعنی دبی آب کم و دبی هوا زیاد شود.



شکل ۵) تغییرات بازده با نسبت جرم آب و هوا

جهت مشخص شدن رابطه بین مشخصه برج با نسبت دبی های آب و هوا، در نسبت دبی های مختلف مشخصه برج بدست می آید و نمودار شکل ۶ رسم می شود دیده می شود با افزایش نسبت دبی ها مشخصه برج کاهش می یابد یعنی در نسبت دبی های پایین مشخصه برج افزایش می یابد و در نسبت L/G صفر، مشخصه برج بی نهایت می شود. سپس به کمک نرم افزار اکسل بهترین منحنی کشیده می شود و رابطه ۱۱ توسط همین نرم افزار برای منحنی رسم شده بدست می آید که برای پرکن مورد آزمایش رابطه مشخصه برج می باشد.

با توجه به این که این نرم افزار  $R^2=0.9$  را برای همگرایی این رابطه بدست آورد و همانطور که می دانیم هرچه این مقدار به ۱ نزدیک تر شود رابطه بهتر می باشد می توان رابطه فوق را خوب دانست. در ادامه بین رابطه بدست آمده و رابطه دیگر محققین در شکل ۶ مقایسه شده که با توجه با اختلاف ظاهر پرکن ها این اختلاف بدهی می باشد.

در ادامه جهت مشخص شدن رابطه بین ضریب انتقال جرم (Ka) و دبی آب بر واحد مساحت پرکن L' در دبی هوای ثابت، ضریب انتقال جرم بدست می آید. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می شود با افزایش دبی آب، ضریب انتقال جرم افزایش می یابد.

$$\frac{KaV}{L} = 2.564(L/G)^{-0.69} \quad (11)$$

- 2- Yu J, Qu Z, Zhang J, Hu S, Guan J. Comprehensive coupling model of counter-flow wet cooling tower and its thermal performance analysis. *Energy*. 2022;238:121726.
- 3- Fisenko S, Brin A, Petruichik A. Evaporative cooling of water in a mechanical draft cooling tower. *International Journal of heat and mass transfer*. 2004;47(1):165-77.
- 4- Ruiz J, Navarro P, Hernández M, Lucas M, Kaiser A. Thermal performance and emissions analysis of a new cooling tower prototype. *Applied Thermal Engineering*. 2022;206:118065.
- 5- Lemouari M, Boumaza M, Kaabi A. Experimental analysis of heat and mass transfer phenomena in a direct contact evaporative cooling tower. *Energy conversion and management*. 2009;50(6):1610-7.
- 6- He W, Zhang J, Li H, Liu S, Wang Y, Lv B, et al. Optimal thermal management of server cooling system based cooling tower under different ambient temperatures. *Applied thermal engineering*. 2022;207:118176.
- 7- Bedekar S, Nithiarasu P, Seetharamu K. Experimental investigation of the performance of a counter-flow, packed-bed mechanical cooling tower. *Energy*. 1998;23(11):943-7.
- 8- Facao J, Oliveira A. Heat and mass transfer correlations for the design of small indirect contact cooling towers. *Applied thermal engineering*. 2004;24(14-15):1969-78.
- 9- Costelloe B, Finn D. Heat transfer correlations for low approach evaporative cooling systems in buildings. *Applied thermal engineering*. 2009;29(1):105-15.
- 10- Goshayshi H, Missenden J. The investigation of cooling tower packing in various arrangements. *Applied thermal engineering*. 2000;20(1):69-80.

## ۵- نتیجه گیری

در این تحقیق بر روی یک برج خنک کن بررسی انجام شده است تا نحوه عملکرد برج در شرایط مختلف بدست آید لذا ابتدا به کمک روابط مرکل مشخصه برج بدست آمده است سپس دمای آب در نقاط مختلف برج بررسی شده است که نشان می دهد در بالای برج افت دمای آب بیشتر است و همچنین مشخصه برج در نقاط مختلف برج بررسی گردید که بالا بودن مشخصه برج در بالای برج را حکایت می کند و همچنین تغییرات مشخصه برج نسبت به دمای آب ورودی نشان داده شده است که هرچه دمای آب ورودی افزایش یافته است، مشخصه برج نیز بیشتر شده است. در نهایت تاثیر نسبت دبی های آب به هوا در مقابل مشخصه برج ارائه شده است که نشان داده شده است با هم نسبت عکس دارند.

## فهرست علائم

L	دبی آب ( $m^3s^{-2}$ )
G	دبی هوا ( $m^3s^{-2}$ )
Le	عدد لوئیس
$C_p$	گرمای ویژه ( $ms^{-1}$ )
t	دما ( $^{\circ}C$ )
h	ضریب انتقال حرارت ( $jm^{-2}s^{-1}K^{-1}$ )
A	سطح مقطع ( $m^2$ )
K	ضریب انتقال جرم ( $kgm^{-2}s^{-1}$ )
a	سطح فصل مشترک ( $m^2m^{-3}$ )
V	حجم ( $m^3$ )
$h_{fg}$	گرمای نهان تبخیر ( $ikg^{-1}$ )

## علائم یونانی

$\rho$	چگالی ( $kgm^{-3}$ )
$\omega$	رطوبت مخصوص ( $kgkg^{-1}$ )
$\eta$	بازده
زیرنویسها	
a	هوا
w	آب
s	اشباع
wb	دمای تر

**تأییدیه اخلاقی:** محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیرایرانی منتشر نشده است.

**تعارض منافع:** در این مقاله هیچگونه تعارض منافی برای اظهار وجود ندارد.

**منابع مالی:** در این مقاله از امکانات دانشگاه ملی مهارت استفاده شده است و منابع مالی دیگری نداشته است.

## مراجع

- 1- Milosavljevic N, Heikkilä P. A comprehensive approach to cooling tower design. *Applied thermal engineering*. 2001;21(9):899-915.