



## تحلیل عملکرد یک برج خنک کن جریان غیرهمسو آزمایشگاهی

امیر رضا معموری - دانشجوی دکتری مکانیک - عضو هیات علمی موسسه آموزش عالی اشراق بجنورد

حمید رضا گشایشی - استادیار گروه مکانیک - دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد

عبدالامیر بک خوشنویس - دانشیار گروه مکانیک - دانشگاه حکیم سبزواری

E-mail: [amirel.mir3000@yahoo.com](mailto:amirel.mir3000@yahoo.com)

**چکیده:** در این مقاله بر روی یک برج خنک کن با جریان غیر همسو مکانیکی به طور تجربی آزمایش شده تا نحوه عملکرد برج در شرایط مختلف را بدست آورد تا به توان بهترین حالت را برای بیشترین بازده ایجاد نمود ابتدا به کمک روابط مرکل مشخصه برج بدست آمده که مشخصه برج معیاری از عملکرد برج می باشد و هرچه بتوان میزان آن را افزایش داد عملکرد برج نیز بهتر می شود سپس دمای آب در نقاط مختلف برج بدست آمده که نشان می دهد در بالای برج افت دمای آب بیشتر است و همچنین مشخصه برج در نقاط مختلف برج رسم شده که از بالا بودن مشخصه برج در بالای برج حکایت می کند و همچنین 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. و در نهایت تاثیر نسبت دبی های آب به هوا در مقابل مشخصه برج ارائه شده که با هم نسبت عکس دارند و رابطه بین این دو نیز در این برج بدست آمده است در این مقاله اکسرژی آب و هوا در داخل برج به طور جداگانه بررسی می شود.

**واژه های کلیدی:** اکسرژی- برج خنک کن- ضریب انتقال جرم- ضریب انتقال حرارت- مشخصه برج.

## The Performance Analysis of a Experimental Scale Counter-Flow Cooling Tower

A. R. Mamori, Hemmati, Department of Mech. Eng., Bejnord Higher Education Institute

H. M. Goshayeshi, the Faculty of Mech. Eng., Mashhad Islamic Azad University

A. A. Bek khoshnivis, Department of Mech. Eng., The University of Hakim Sabzevari

This paper deals with the experiments on a counter-flow cooling tower through which able to obtain its performance in various condition and finally able to specify an optimum condition for a maximum efficiency. First, by utilizing the Merkel equations the tower characteristics have been derived, then by measuring the water temperature at various level of the top of the tower, it has been shown that in the top of the tower the reduction of temperature is high. The characteristics of the tower have been depicted vs. the temperature of the inlet water, also the effects of the mass flow rate ratio in the tower on the variation of the tower characteristics has been studied. Finally, in this study the variation of the exergy in water and air flow have been evaluated, separately.

Keywords: Performance, Cooling tower, Experiment and Counter flow.

## ۱- مقدمه

دماسنج با دقت  $0.5^{\circ}\text{C}$  اندازه‌گیری می‌شوند. دستگاه دارای یک مخزن آب با ظرفیت دو مترمکعب و یک گرمکن الکتریکی می‌باشد. بعد از اینکه دمای آب به حد مطلوب می‌رسد آب به بالای برج پمپ می‌شود و بعد از عبور از دبی‌سنج و پرکن‌ها دوباره به برج برمی‌گردد. در این دستگاه دمای آب در اثر انتقال حرارت با هوا کاهش می‌یابد و دمای آب جهت بررسی در ارتفاع‌های مختلف پرکن بوسیله دماسنج‌ها ثبت می‌شود. البته قرائت داده‌ها در هر مرحله با مکث همراه است تا سیستم به حالت پایدار برسد.

## ۳- روابط حاکم

انتقال حرارت و جرم را در یک برج خنک‌کن بوسیله معادلات بقاء جرم و انرژی می‌توان بدست آورد. طبق قانون بقاء جرم، جرم آب در اثر تبخیر کم شده و به‌صورت رطوبت به هوا افزوده می‌شود.

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

بر طبق قانون بقاء انرژی، گرمای جذب شده توسط هوا با گرمای دفع شده از آب برابر است.

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

گرما از آب به دو طریق یکی بوسیله انتقال حرارت در اثر اختلاف دمای آب و هوا و دیگری بوسیله تبخیر سطحی بخشی از آب دفع می‌شود. حال معادله (۲) را با فرض اینکه جرم آب تبخیر شده اندک می‌باشد معادله زیر بدست می‌آید.

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

رابطه ضریب انتقال حرارت و جرم بدین صورت می‌باشد.

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

عموماً یک سیکل تبرید شامل تبخیرکننده، چگالنده، کمپرسور و شیر انبساطی می‌باشد که چگالنده گرمای مبرد را به بیرون انتقال می‌دهد. چگالنده خود به دو نوع تقسیم می‌شوند: گالنده هوایی که بازده کمتری دارد ولی در مناطق مرطوب و همچنین مناطق کم‌آب انتخاب بهتری می‌باشند و چگالنده آبی که شامل یک مبدل پوسته و لوله می‌باشد که گرمای بخار توسط آب دفع می‌شود. سپس این آب مجدداً خنک می‌شود. معمولاً جهت خنک‌نمودن آب از برج خنک‌کن استفاده می‌شود. برج خنک‌کن خود به صورت‌های گوناگون تقسیم‌بندی می‌شود که شامل تماس مستقیم یا غیر مستقیم، جریان غیرهمسو یا متقاطع، جریان طبیعی یا مکانیکی و همچنین مکند یا دمنده می‌باشد.

تحلیل سیستم‌ها بر مبنای قانون دوم ترمودینامیک که اصطلاحاً تحلیل اکسرژی خوانده می‌شود، در راس تحقیقات ترمودینامیکی سه دهه اخیر قرار داشته و این توجه بدلیل بحران انرژی در سال‌های اخیر رشد و نمایی به خود گرفته است. اکسرژی عبارتست از حداکثر کار مفیدی که به لحاظ نظری از یک جریان ماده یا انرژی قابل استحصال است. مطابق این مفهوم در هر فرایند واقعی تولید آنتروپی مترادف با نابودی اکسرژی در آن فرآیند است. در این مقاله یک برج خنک‌کن بررسی می‌شود تا بتوان عملکرد بهینه برج را بدست آورد.

## ۲- دستگاه و روش آزمایش

برای بررسی عملکرد برج، مطابق شکل (۱) از یک برج خنک‌کن دمنده استفاده می‌شود. سیال‌های عامل این برج 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 آتمسفر تخلیه می‌شود. دبی هوا توسط یک اریفیس اندازه‌گیری می‌شود و دمای تر و خشک هوای ورودی و خروجی نیز توسط ۴ عدد

اکسرژی مخصوص از جمع اکسرژی ترمودینامیکی و شیمیایی بدست می آید.

$$\psi = (h - h_0) - t_0(s - s_0) + \sum_{k=1}^n x_k (\mu_{k,0} - \mu_{k,00}) \quad (13)$$

در برج فنککن سیالهای عامل فقط آب و هوا می باشند، ابتدا اکسرژی مخصوص آب را می نویسیم.

$$\psi_w = (h_{f,w} - h_{f,0}) - t_0(s_{f,w} - s_{f,0}) + Rt_0 \ln(RH_0) \quad (14)$$

حال اکسرژی آب را بدست می آوریم.

$$X_w = L [(h_{f,w} - h_{f,0}) - t_0(s_{f,w} - s_{f,0}) + Rt_0 \ln(RH_0)] \quad (15)$$

سپس اکسرژی مخصوص هوا را تعیین می کنیم، مشخصات هوا را همانند خواص مخلوط گاز ایده آل در نظر گرفته می شود و آنرا مخلوطی از هوای خشک و بخار آب فرض می کنیم. در اینصورت:

$$\psi_{air} = x_a [(h_a - h_{a,0}) - t_0(s_a - s_{a,0}) + (\mu_a - \mu_{a,0})] + x_v [(h_v - h_{v,0}) - t_0(s_v - s_{v,0}) + (\mu_v - \mu_{v,0})] \quad (16)$$

که علامت (-) در معادله فوق نشان می دهد که محاسبات بر پایه مولی می باشند،  $x_a$  و  $x_v$  را به ترتیب جزء مولی هوا و بخار آب است با داشتن معادلات زیر:

$$\bar{h}_a - \bar{h}_{a,0} = \bar{C}_{p_a} (t - t_0) \quad (17)$$

$$\bar{s}_a - \bar{s}_{a,0} = \bar{C}_{p_a} \ln \frac{t}{t_0} - \bar{R} \ln \frac{P}{P_0} \quad (18)$$

$$\bar{\mu}_a - \bar{\mu}_{a,0} = \bar{R} t_0 \ln \frac{t}{t_0} \quad (19)$$

اکسرژی مخصوص هوا بر پایه مولی به صورت زیر تبدیل می شود.

$$\psi_{air} = (x_a \bar{C}_{p_a} + x_v \bar{C}_{p_v}) (t - t_0 - t_0 \ln \frac{t}{t_0}) + \bar{R} t_0 \ln \frac{P}{P_0} + \bar{R} t_0 (x_a \ln \frac{x_a}{x_{a,0}} + x_v \ln \frac{x_v}{x_{v,0}}) \quad (20)$$

همچنین اکسرژی مخصوص هوا را به صورت زیر بدست می آوریم.

عدد لوئیس تقریباً واحد می باشد و با قراردادن معادله (۴) و  $A = adV$  در معادله (۳) داریم:

$$G dh_a = C_{p_w} L dt_w = K [C_{p_w} (t_w - t_a) + (\omega_s - \omega) h_{fg}] adV \quad (5)$$

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

$$G dh_a = C_{p_w} L dt_w = K (h_s - h_a) adV \quad (6)$$

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 [۲۱].

اکسرژی مخصوص در برج وقتی اثر انرژی جنبشی و پتانسیل در حالت پایا چشم پوشی می شود شامل بخش ترمودینامیکی و شیمیایی می باشد.

$$\psi = \psi_{ch} + \psi_{tm} \quad (9)$$

که اکسرژی ترمودینامیکی مخصوص به صورت زیر نوشته می شود.

$$\psi_{tm} = (h - h_0) - T_0 (s - s_0) \quad (10)$$

و اکسرژی شیمیایی مخصوص به صورت زیر نوشته می شود.

$$\psi_{ch} = \sum_{k=1}^n x_k (\mu_{k,0} - \mu_{k,00}) \quad (11)$$

و پتانسیل شیمیایی میان حالت مرده (00) و محیطی (0) در دمای محیط بدینگونه داده می شود.

$$\mu_{k,0} - \mu_{k,00} = R t_0 \ln \frac{P_{k,0}}{P_{k,00}} \quad (12)$$

هرچه اختلاف دمای آب کمتر فرض شود و تعداد مراحل بیشتر باشد انتگرال فوق دقیقتر محاسبه خواهد شد. آنتالپی هوای اشباع و آنتالپی هوا را نیز به کمک نمودار رطوبی می‌توان بدست آورد. با مراجعه به شکل (۳) مشخصه برج در نقاط مختلف برج معلوم می‌شود و مشاهده می‌شود که مشخصه برج در بالای برج بیشتر از پایین برج می‌باشد. می‌توان اثر دمای آب ورودی بر روی مشخصه برج با انجام چند مرحله آزمایش و رسم نتایج آزمایش بصورت شکل (۴) تعیین نمود. بطوریکه از این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش دمای آب ورودی مشخصه برج نیز افزایش می‌یابد.

اثر تغییرات نسبت دبی‌های آب و هوا بر روی بازده بررسی شد که نتایج در شکل (۵) نشان داده شده است. بازده و اختلاف دمای آب ورودی و خروجی به اختلاف دمای آب ورودی و دمای تر هوای ورودی می‌باشد و مطابق رابطه زیر می‌باشد.

$$\eta = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{t_{w1} - t_{wbm}} \quad (24)$$

همانطور که در شکل مشخص است با افزایش نسبت دبی جرمی آب به هوا، بازده برج کاهش می‌یابد و مسئله مهمتر اینکه بازده برج وقتی ۱۰۰٪ است که نسبت دبی‌ها صفر باشد یعنی دبی آب کم و دبی هوا زیاد شود. جهت مشخص شدن رابطه بین مشخصه برج با نسبت دبی‌های آب و هوا، آزمایش‌ها در نسبت دبی‌های مختلف مشخصه برج انجام که نتایج در نمودار شکل (۶) نشان داده شده است. بطوریکه از این شکل هویداست، با افزایش نسبت دبی‌ها مشخصه برج کاهش می‌یابد. یعنی در نسبت دبی‌های پایین مشخصه برج افزایش می‌یابد و در نسبت  $\frac{L}{G}$  صفر، مشخصه برج بی‌نهایت می‌شود. سپس به کمک نرم‌افزار Excell با استفاده از روش برازش منحنی، منحنی بهینه رسم می‌شود و رابطه (۱۱) توسط همین نرم‌افزار برای منحنی رسم شده بدست می‌آید که برای پرکن مورد آزمایش رابطه مشخصه

$$\psi_{air} = (C_{pa} + \omega C_{pv}) \left( t - t_0 - t_0 \ln \frac{t}{t_0} \right) + (1 + 1.608\omega) R_a t_0 \ln \frac{P}{P_0} + R_a t_0 \quad (21)$$

$$\left\{ (1 + 1.608\omega) \ln \frac{(1 + 1.608\omega_{00})}{(1 + 1.608\omega)} + 1.608 \ln \frac{\omega}{\omega_{00}} \right\}$$

اکسرژی هوا نیز با فرض ثابت بودن فشار در طول برج  $(P=P_0)$  به صورت زیر می‌شود [۳ و ۴].

$$X_{air} = G \left[ \begin{array}{l} (C_{pa} + \omega C_{pv}) \left( t - t_0 - t_0 \ln \frac{t}{t_0} \right) + \\ \left\{ (1 + 1.608\omega) \ln \frac{(1 + 1.608\omega_{00})}{(1 + 1.608\omega)} + 1.608 \ln \frac{\omega}{\omega_{00}} \right\} \\ R_a t_0 \end{array} \right] \quad (22)$$

#### ۴- بحث و نتایج

در ابتدا دمای آب در نقاط مختلف برج بررسی می‌شود. تغییرات این دما در ارتفاع برج در شکل (۲) نشان داده شده است. مطابق شکل دمای آب به مرور کاهش می‌یابد که نشان می‌دهد انتقال حرارت مرحله به مرحله در حال انجام است همچنین مشاهده می‌شود 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 است که نشان می‌دهد در بالای برج انتقال حرارت بیشتر از پایین برج می‌باشد.

حال با در نظر گرفتن روابط (۷) و (۸) به بررسی مشخصات برج پرداخته می‌شود و در این روابط عبارت  $(KaV/L)$  بنام مشخصه برج می‌باشد که معیاری از عملکرد گرمایی برج است. با علم به اینکه اختلاف آنتالپی هوای اشباع و هوا خطی نیست لذا باید به روش‌های عددی اکتفا کرد، در این قسمت انتگرال فوق به صورت زیر تقریب زده می‌شود [۵].

$$\frac{KaV}{L} \approx C_{pw} \sum \frac{\Delta t_w}{h_s - h_a} \quad (23)$$

برج می‌باشد.

$$\frac{KaV}{L} = 2.564 \left( \frac{L}{G} \right)^{-0.69} \quad (25)$$

با توجه به این که این نرم افزار  $R2 = 0.9$  را برای همگرایی این رابطه بدست آورد و همانطور که می‌دانیم هرچه این مقدار به ۱ نزدیک تر شود رابطه بهتر می‌باشد، می‌توان رابطه فوق را خوب دانست. در ادامه، برای تعیین دقت محاسبات، رابطه بدست آمده با رابطه سایر محققین موجود در پیشینه تحقیق در شکل (۶) مقایسه شده که با توجه با اختلاف ظاهر پرکن‌ها این اختلاف بدیهی می‌باشد.

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 می‌آید. همانطور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود با افزایش دبی آب، ضریب انتقال جرم افزایش می‌یابد.

و بالاخره در شکل (۸) مشخصه برج نسبت به دمای همگرایی برج رسم شده است. واضح است با افزایش مشخصه برج، دمای همگرایی کاهش می‌یابد. با ادامه دادن این نمودار مشخص می‌شود در مشخصه برج بی‌نهایت، دمای همگرایی به سمت صفر میل می‌کند و این بدان معنی است که در حداکثر عملکرد برج در حالت ایده‌آل، دمای آب خروجی از برج به دمای تر هوای ورودی می‌رسد که در این صورت به بازده ۱۰۰٪ یا مشخصه برج بی‌نهایت رسیده است.

در شکل (۹) اکسرژی آب در نقاط مختلف برج نشان داده شده است که بیانگر انرژی جریان آب حمل در برج می‌باشد. بطوریکه از این شکل مشاهده می‌شود، به‌طور پیوسته این انرژی از بالا به پایین در حال کاهش است. با توجه به این حقیقت که

دمای جریان آب در برج از بالا تا پایین در حال کاهش است، این کاهش انرژی را می‌توان بدیهی دانست. در معادله (۱۵) که اکسرژی آب تعریف شده دو عبارت اول آن اکسرژی گرمایی می‌باشد که تابع دماست و عبارت آخر آن اکسرژی شیمیایی است که تابع رطوبت محیط می‌باشد و چون رطوبت محیط ثابت است، می‌توان نتیجه گرفت که اکسرژی تنها تابع دماست و بنابراین این اکسرژی آب در پایین کمتر از بالای برج می‌باشد.

در سمت هوا، اکسرژی هوا که بخار آب موجود در آن بوسیله تبخیر آب در برج تولید می‌شود دارای دو بخش می‌باشد: بخش اول، اکسرژی هوا ناشی از انتقال حرارت جابجایی و بخش دوم اکسرژی هوا ناشی از انتقال حرارت تبخیری است که در معادله (۲۲) ظاهر می‌شود که عبارت اول آن اکسرژی ناشی از جابجایی و بقیه اکسرژی ناشی از تبخیر می‌باشند. همانطور که مشاهده می‌شود اکسرژی ناشی از جابجایی ابتدا کاهش می‌یابد و سپس از ارتفاع ۰/۶۸ متر افزایش می‌یابد چون در پایین برج دمای هوا بیشتر است و انتقال حرارت از هوا به آب می‌باشد، نتیجه می‌شود که اکسرژی هوا ناشی از تبخیر در طول برج افزایش می‌یابد زیرا تبخیر در طول برج انجام می‌شود و نسبت رطوبت در حال افزایش است. اکسرژی هوا از جمع اکسرژی ناشی از تبخیر و جابجایی می‌باشد که هر جزء اکسرژی در نمودار شکل (۱۰) نشان داده شده است. بطوریکه از این شکل مشاهده می‌شود اکسرژی هوا تقریباً با اکسرژی ناشی از تبخیر برابر است و بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ه جزء اکسرژی ناشی از جابجایی بسیار ناچیز می‌باشد.

#### ۵- فهرست علائم

A	مساحت ( $m^2$ )
a	مساحت در واحد حجم ( $m^2/m^3$ )
$C_p$	گرمای ویژه در فشار ثابت (J/kgK)

- [2] Facão, J. and Oliveira, A., 2004. "Heat and Mass Transfer Correlations for the Design of Small Indirect Contact Cooling Towers". Applied Thermal Eng., 24, pp 1969-1978.
- [3] Muangnoi, T., Asvapoositkul, W. and Wongwises, S., 2008, "Effects of Inlet Relative Humidity and Inlet Temperature on the Performance of Counter-Flow Wet Cooling Tower Based on Exergy Analysis", Energy Conversion and Management, 49, pp 2795-2800.
- [4] Muangnoi, T., Asvapoositkul, W. and Wongwises, S., 2007, "An Exergy Analysis on the Performance of a Counter-Flow Wet Cooling Tower", Applied Thermal Engineering, 27, pp 910-917.
- [5] Costelloe, B. and Finn, D. P., 2009, "Heat Transfer Correlations for Low Approach Evaporative Cooling Systems in Buildings", Applied Thermal Eng., 29, pp 105-115.
- [6] Goshayshi, H. R. 2000, Ph.D. thesis, Univ. of South Bank London, pp:67-83.

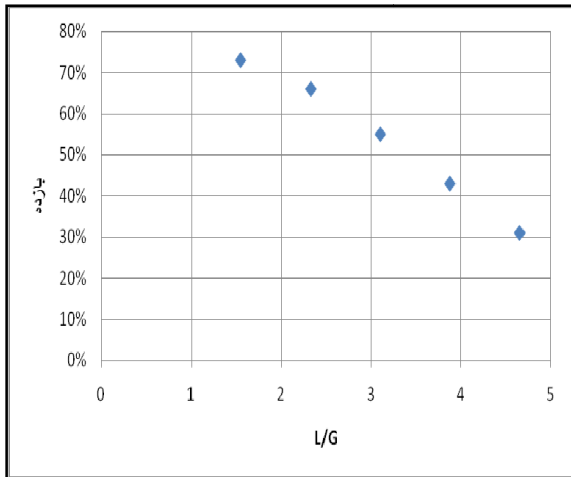


شکل (۱): برج خنک کن مورد آزمایش

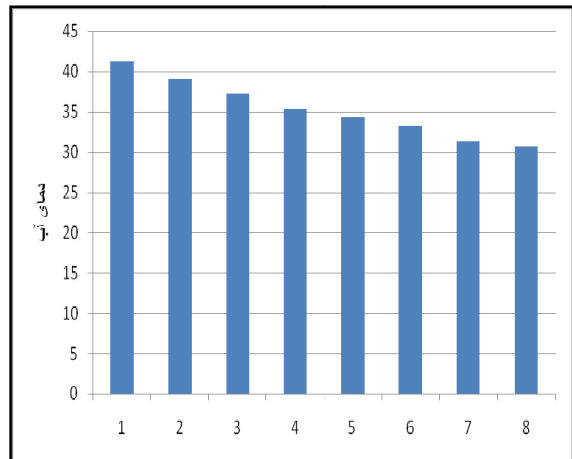
G	دبی جرمی آب (kg/s)
h	آنتالپی (kJ/kg)
$h_c$	ضریب انتقال حرارت ( $W/m^2K$ )
$h_{fg}$	آنتالپی ناشی از تغییر فاز (kJ/kg)
K	ضریب انتقال جرم ( $kg/m^2s$ )
L	دبی جرمی آب (kg/s)
Le	عدد لوئیس (-)
R	ثابت عمومی گازها ( $kJ/kmol.K$ )
s	آنتروپی ( $kJ/kg.K$ )
t	دما (K)
$x_k$	کسر جزء مولی K ام (-)
V	حجم ( $m^3$ )
	علائم یونانی
$\mu$	پتانسیل شیمیایی (kJ/kg)
$\rho$	دانسیته ( $kg/m^3$ )
$\Psi$	اکسرژی مخصوص ( $kJ/kg.K$ )
	زیرنویس‌ها
a	هوا
ch	شیمیایی
f	سیال
in	ورودی
s	اشباع
tm	ترمودینامیکی
w	آب
wb	حباب مرطوب

#### ۶- مراجع

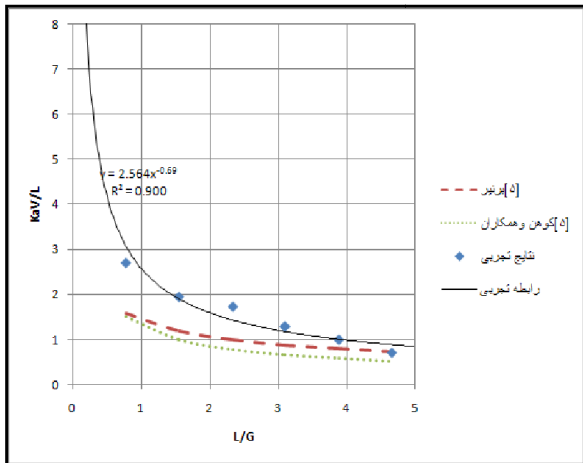
- [1] Bedekar, S. V., Nithiarasu, P. and Seetharamu, K. N., 1998. "Experimental Investigation of the Performance of a Counter – Flow Packed-Bed Mechanical Cooling Tower", Energy 23, pp 943-947.



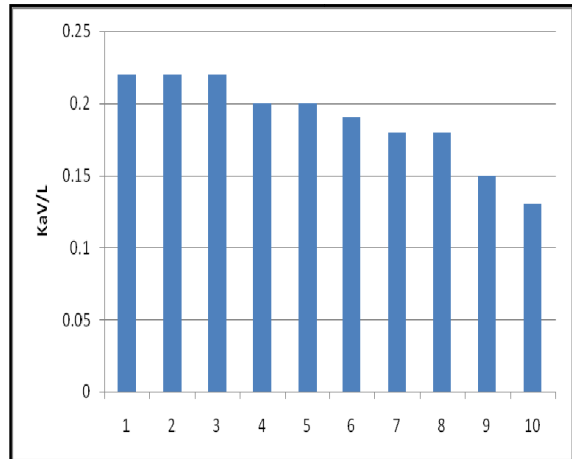
شکل (۵): تغییرات بازده با نسبت جرم آب و هوا



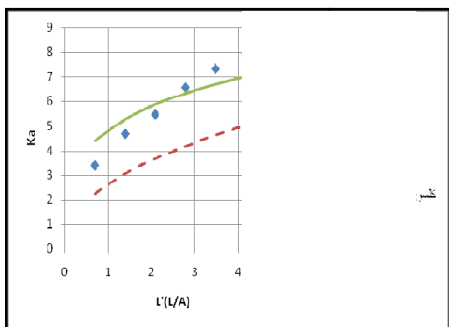
شکل (۲): تغییرات دمای آب در نقاط مختلف برج



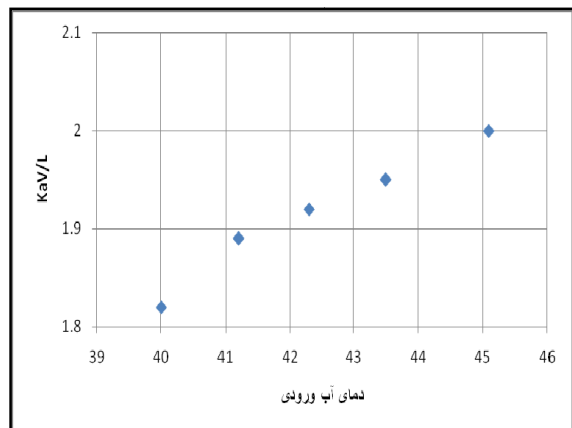
شکل (۶): تغییرات مشخصه برج با نسبت جرم آب و هوا



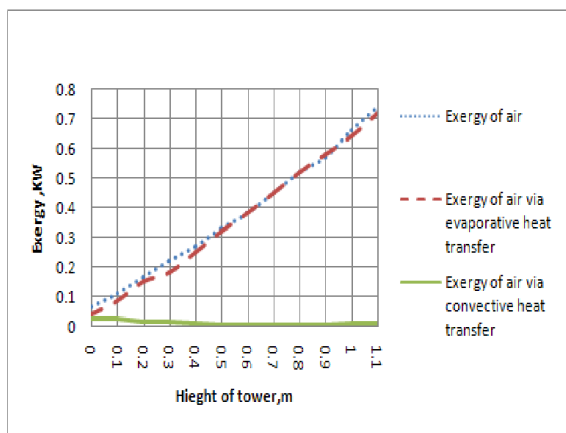
شکل (۳): مشخصه برج در نقاط مختلف برج



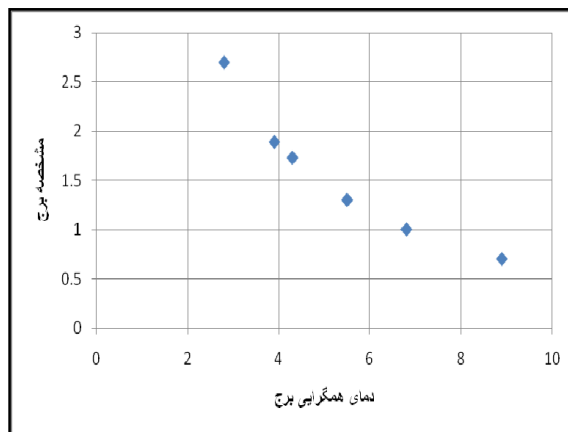
شکل (۷): نمودار Ka برج نسبت به L' و مقایسه با نتایج دیگران



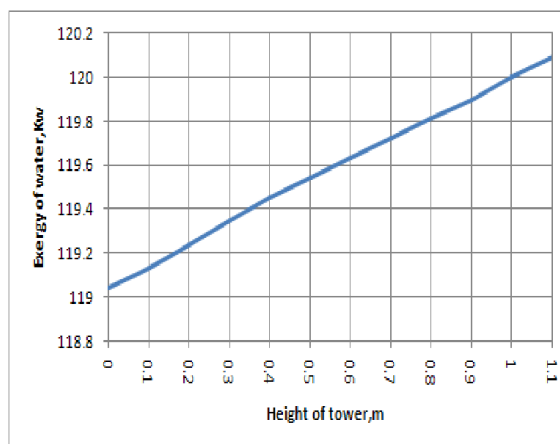
شکل (۴): تغییرات مشخصه برج با دمای آب ورودی



شکل (۱۰): اکسرژی هوا، اکسرژی هوا ناشی از تبخیر و اکسرژی هوا ناشی از جابجایی در ارتفاع های مختلف برج



شکل (۸): نمودار مشخصه برج نسبت به دمای همگرایی برج



شکل (۹): اکسرژی آب در ارتفاع های مختلف برج