



University Of Qom



Predicting Water Consumption of Evaporative Coolers in Qom City Based on Climate Change and Population Growth: A Mathematical and Thermodynamic Modeling

Hadi Kargarsharifabad¹, Nader Rahbar², Hasan Farmani Entezam³

1. Corresponding author, Production and Recycling of Materials and Energy Research Center, Qom Branch, Islamic Azad University, Qom, Iran. E-mail: hadikargarsharifabad@iau.ac.ir
2. Energy and Sustainable Development Research Center, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran. E-mail: rahbar@semnaniau.ac.ir; nrahbar@gmail.com
3. Sustainable Development and Consumption Management Office, Qom Water and Sewerage Company, Qom, Iran. E-mail: erfan_nar1357@yahoo.com

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 05 Jul 2024
Revised 28 Oct 2024
Accepted 03 Nov 2024
Published 06 Nov 2024

Keywords:

Evaporative Coolers,
Water Consumption,
Climate Change,
Qom City,
Thermodynamic
Modeling.

ABSTRACT

Given the escalating water crisis and impending climate change, the sustainability of evaporative cooling systems, particularly direct evaporative coolers, has become a pressing concern in Iran, one of the world's largest consumers of this technology. This study aimed to investigate the impact of saturation efficiency and capacity on water consumption in particularly direct evaporative coolers under the specific climatic conditions of Qom, Iran. A thermodynamic model was developed to simulate the performance of these systems, and its results were validated against experimental data. The modeling results indicated a direct correlation between saturation efficiency, airflow rate, and water consumption. Specifically, increasing the saturation efficiency from 40% to 90% in a 5000 CFM air conditioner led to a 131% increase in water consumption. Moreover, larger capacity units consumed significantly more water. For instance, a 7000 CFM cellular pad cooler consumed roughly twice as much water as a 3500 CFM unit. Conversely, while conventional pad coolers with lower saturation efficiencies consumed less water, they also resulted in higher discharge air temperatures. These findings underscore the trade-off between improved cooling performance and increased water consumption in high-efficiency evaporative cooling systems. Consequently, to optimize water use in residential settings, there is a pressing need for policies that promote more efficient cooling technologies and reduce reliance on water-cooled air conditioners.

Cite this article: Kargarsharifabad H, Rahbar N, Farmani Entezam H. Predicting Water Consumption of Evaporative Coolers in Qom City Based on Climate Change and Population Growth: A Mathematical and Thermodynamic Modeling Civil Infrastructure Researches. 2024; Article in Press. <https://doi.org/10.22091/cer.2024.10972.1563>





پیش‌بینی مصرف آب کولرهای تبخیری موجود در شهر قم براساس تغییرات اقلیمی و افزایش جمعیت: مدل‌سازی ریاضی و ترمودینامیکی

هادی کارگر شریف‌آباد[✉]، نادر رهبر^۲، حسن فرمانی انتظام^۳

۱. نویسنده مسئول، مرکز تحقیقات تولید و بازیافت مواد و انرژی، واحد قم، دانشگاه آزاد اسلامی، قم، ایران. رایانامه: hadikargarsharifabad@iau.ac.ir
۲. مرکز تحقیقات انرژی و توسعه پایدار، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران. رایانامه: rahbar@semnaniau.ac.ir
۳. دفتر توسعه پایدار و مدیریت مصرف، شرکت آب و فاضلاب استان قم، قم، ایران. رایانامه: erfan_nar1357@yahoo.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۱۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۱۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۸/۱۶

کلیدواژه‌ها:

کولرهای تبخیری، مصرف آب، تأثیر تغییر اقلیم، شهر قم، مدل‌سازی ترمودینامیکی.

چکیده

با توجه به بحران آب در سال‌های اخیر و تغییرات اقلیمی پیش رو، امکان استفاده از کولرهای آبی، به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین منابع مصرف آب در جامعه ایران، موردتوجه محققان، سیاست‌گذاران و تصمیم‌گیرندگان در این زمینه قرار گرفته است. این مقاله با هدف بررسی تأثیر راندمان اشباع و ظرفیت کولرهای آبی بر مصرف آب در شرایط اقلیمی شهر قم انجام شده است. در این راستا مدل ترمودینامیکی حاکم بر سیستم‌های سرمایش تبخیری ارائه شده و برای اعتبارسنجی مدل‌سازی ترمودینامیکی از بررسی تجربی استفاده شده است. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که راندمان اشباع و دبی هوای کولر تأثیر مستقیم بر روی مصرف آب کولر دارند به‌طوری‌که افزایش راندمان اشباع از ۴۰ درصد به ۹۰ درصد در یک کولر آبی با ظرفیت ۵۰۰۰، منجر به افزایش ۱۳۱ درصد در مصرف آب می‌شود. همچنین، افزایش ظرفیت کولر نیز به‌طور مستقیم بر مصرف آب مؤثر است. به‌عنوان مثال، یک کولر سلولوزی ۷۰۰۰ حدود دو برابر یک کولر ۳۵۰۰ آب مصرف می‌کند. از سوی دیگر، کولرهای پوشالی با راندمان پایین‌تر، مصرف آب کمتری داشته، اما دمای خروجی هوای آن‌ها بالاتر است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که افزایش راندمان کولرهای آبی به‌منظور بهبود عملکرد آن‌ها، به‌طور هم‌زمان منجر به افزایش قابل‌توجه مصرف آب می‌شود. بنابراین، برای مدیریت بهینه مصرف آب در بخش خانگی، لازم است سیاست‌هایی برای تشویق استفاده از سیستم‌های سرمایشی کارآمدتر و کاهش وابستگی به کولرهای آبی تدوین شود.

استناد: کارگر شریف‌آباد هادی، رهبر نادر، فرمانی انتظام حسن. پیش‌بینی مصرف آب کولرهای تبخیری موجود در شهر قم براساس تغییرات اقلیمی و افزایش جمعیت: مدل‌سازی ریاضی و ترمودینامیکی. پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی، ۱۴۰۳؛ آماده به انتشار.

<https://doi.org/10.22091/cer.2024.10972.1563>



۱- مقدمه

ژیاوو و لیو^۴، فناوری خنک‌کننده تبخیری و کاربردهای یکپارچه آن را بررسی کردند و با طبقه‌بندی و بهینه‌سازی فناوری خنک‌کننده تبخیری به طور جامع، اثرات طراحی، شرایط ورودی، هندسه، مواد غشایی بر عملکرد خنک‌سازی تبخیری ارائه داده‌اند و استفاده از یادگیری ماشین با مدل هوش مصنوعی را برای تحقیقات آینده پیشنهاد داده‌اند [۹]. پژوهشگران با استفاده از روش آزمایشگاهی، تأثیر شار حرارت ورودی از سطوح کولر و دمای آب ورودی و هوای ورودی را بر عملکرد کولر آبی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که افزایش شار حرارتی در اطراف مخزن آب و کاهش رطوبت نسبی هوای ورودی از طریق پد مرطوب، هم دمای آب ورودی و هم دمای خروجی پد را کاهش می‌دهد [۱۰]. لی^۵ و همکاران، استفاده از کولر آبی در کاهش مصرف انرژی خنک‌کاری یک مرکز داده را به صورت تجربی بررسی کردند و نشان دادند که تنها زمانی که رطوبت نسبی هوای تازه با دمای بالا کمتر از ۴۰ درصد باشد، هوای تصفیه‌شده نیازهای تأمین هوای مرکز داده را برآورده می‌کند [۱۱].

با توجه به پرهزینه بودن تحقیقات تجربی و آزمایشگاهی بسیاری از محققان ترجیح می‌دهند به جای استفاده از روش‌های تجربی، با استفاده از معادلات ترمودینامیکی حاکم بر سیستم، از مدل‌سازی ریاضی جهت تحلیل سیستم‌های سرمایشی استفاده کنند. گو و ژائو^۶، با بررسی عددی عملکرد حرارتی یک کولر هوای تبخیری غیرمستقیم، اثرات طیف وسیعی از پارامترهایی مانند سرعت جریان اولیه و ثانویه هوا، عرض کانال، رطوبت نسبی ورودی و مرطوب بودن صفحه بر روی عملکرد حرارتی آن را بررسی کرده‌اند [۱۲]. در تحقیقی دیگر، ارزیابی تحلیلی با استفاده از نتایج میدانی عملکرد یک کولر آبی در مکان‌های ساحلی و داخلی در کویت ارائه

دستگاه‌های سرمایش تبخیری با تکیه به آب به جای مبردهای شیمیایی به‌عنوان ماده خنک‌کننده، تحت شرایط و کاربردهای مناسب می‌تواند تهویه خوب و خنک‌کنندگی با حداقل مصرف انرژی را ایجاد کند [۱]. ساخت و کاربری آسان، هزینه اولیه و مصرف انرژی پایین، دوست‌دار لایه ازن و محیط‌زیست، افزایش کیفیت هوای داخل و استفاده مداوم از هوای تازه، تنوع مختلف، رطوبت‌زنی خودکار هوا و مصرف انرژی کمتر در ساعات پیک بار از مهم‌ترین مزایای سیستم‌های سرمایش تبخیری هستند [۲]. مهم‌ترین فاکتورهای محدودکننده کاربرد کولرهای تبخیری محدودیت در ایجاد شرایط آسایش حرارتی و مصرف آب می‌باشد. یک سیستم سرمایش تبخیری معمولی می‌تواند دمای هوای ۴۵ درجه سانتی‌گراد را به دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد برساند که این مقدار هنوز از شرایط آسایش واقعی ساکنان ساختمان فاصله دارد. از آنجاکه بیشترین کاربرد سیستم‌های تبخیری در نواحی با هوای خشک بوده و این نواحی معمولاً از کمبود آب رنج می‌برند، وابستگی زیاد سیستم‌های سرمایش تبخیری به مصرف آب به‌عنوان یکی از نقاط ضعف این سیستم‌ها محسوب می‌شود [۳].

تا به امروز تحقیقات فراوانی به صورت شبیه‌سازی عددی و تحقیقات تجربی و آزمایشگاهی در زمینه کولرهای تبخیری انجام شده است [۴]. کاپیلان^۱ و همکاران، کالسیا^۲ و همکاران و گوپتا^۳ و همکاران انواع مختلف سیستم‌های خنک‌کننده تبخیری را مورد بحث قرار داده و چالش‌های انواع مختلف مواد متخلخل خنک‌کننده را بررسی کردند [۵-۷]. در مطالعه دیگری، توسعه فن‌آوری سیستم‌های خنک‌کننده تبخیری و ادغام آن با فرآیندهای رطوبت‌زدایی هوا مرور شده است [۸].

⁴ - Xiao and Liu

⁵ - Li

⁶ - Guo and Zhao

¹ - Kapilan

² - Kalsia

³ - Gupta

سرعت هوای ورودی، ضخامت پد، دمای هوای خنک‌کننده ورودی هوا در بازده خنک‌کننده کولر تبخیری محاسبه و آنالیز نمودند [۲۰]. شنگ و نانا، در پژوهشی ارتباط تجربی بین سه پارامتر و تأثیر آن در بهره‌وری را مورد ارزیابی قرار دادند. این سه پارامتر مهم، دمای هوا، آب ورودی و سرعت هوای ورودی می‌باشد که با انجام آزمون‌های متعدد برای هر پارامتر با استفاده از سرعت‌های افزایشی مشخص می‌کند که میان این سه پارامتر همبستگی تجربی وجود دارد و با تغییر هر پارامتر کارایی خنک‌کننده تغییر می‌کند [۲۱]. حسینی و همکاران، استفاده از سیستم سرمایش ترکیبی از خنک‌کننده تبخیری مستقیم با سرمایش تبخیری غیرمستقیم شامل برج خنک‌کننده و کویل سرمایشی را جهت ایجاد آسایش حرارتی در شهرهای مختلف ایران مورد بررسی قرار دادند. نتایج به‌دست آمده نشان داد ضریب عملکرد سیستم سرمایشی ترکیبی حدود ۱۰-۲۰ درصد نسبت به خنک‌کننده تبخیری مستقیم افزایش یافته است [۲۲]. سعدی با بررسی تجربی و عددی کولر سرمایشی تبخیری غیرمستقیم جریان عمود، نشان داده است افزایش دما و کاهش رطوبت نسبی هوای ورودی، سبب بهبود عملکرد این نمونه کولر می‌شود [۲۳]. در تحقیق دیگر، به‌صورت تئوری، پارامترهای مهم کولر آبی تبخیری در ۹ ساعت به‌طور منظم بررسی شد و با نتایج تجربی در شهر بیرجند مقایسه گردید. با توجه به نتایج مشخص شد که دمای آب سیرکولاسیون تا حد زیادی به دمای خشک هوای خروجی از کولر نزدیک است که این پدیده به علت وجود دبی آب سیرکولاسیون و تماس مداوم با آب و هوای عبوری است [۲۴].

کمبود آب به‌عنوان یکی از چالش‌های اساسی قرن حاضر، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، اهمیت مدیریت بهینه منابع آبی را دوچندان کرده است [۲۵]. در این میان، کولرهای آبی به‌عنوان یکی از پرکاربردترین

شد و میزان صرفه‌جویی انرژی در مقایسه با کاربرد یک سیستم تهویه مطبوع تبریدی ارائه گردید [۱۳]. مارتینز^۷ و همکاران، به مطالعه تجربی عملکرد یک سیستم تهویه هوا به همراه کندانسور پرداخته و تأثیر ضخامت پد خنک‌کننده را بررسی و عملکرد سیستم را در بهترین بهره‌وری به‌دست آوردند [۱۴]. محققان به بررسی اصول اساسی فرآیند تبخیری خنک‌کننده برای آسایش حرارتی، اصول عملیات برای سیستم خنک‌کننده مستقیم و توسعه ریاضی معادلات تبادل حرارتی را ارائه داده‌اند [۱۵]. بشکانی و حسینی، بازده اشباع و افت فشار کولر تبخیری مستقیم مجهز به مبدل حرارتی را به‌عنوان عملکرد سرعت هوا و عمق پوشش‌های میانی پوشال را با روش عددی بررسی کردند و نشان دادند که بهره‌وری با کاهش سرعت و افزایش عمق پوشش‌های میانی پوشال بهبود می‌یابد [۱۶]. در مطالعه دیگری با هدف توسعه یک مدل تحلیلی برای فرآیند انتقال گرما و جرم در خنک‌کننده تبخیر غیرمستقیم در شرایط عملیاتی واقعی، اثرات تبخیر آب اسپری، تغییرات دمای آب اسپری و تغییر آنتالپی آب اسپری در امتداد سطح مبدل حرارتی در معادلات مدل را در نظر گرفته و نتایج حاصل را مقایسه نموده است [۱۷]. وو^۸ و همکاران، به مطالعه عددی انتقال حرارت و رطوبت میان آب‌وهوا در یک سیستم تبخیری مستقیم پرداختند و تأثیر پارامترهای مختلف بر روی عملکرد آن را مورد مطالعه قرار دادند. در تحقیق دیگری نیز با ساده‌سازی معادلات انتقال جرم و انرژی به‌صورت تئوری، روابط ساده‌ای برای انتقال حرارت و رطوبت در سیستم‌های سرمایشی تبخیری مستقیم استخراج کردند [۱۸ و ۱۹]. پژوهشگران بر روی انتقال حرارت و جرم، فرآیند درون کولر تبخیر مستقیم را مورد بحث قرار داده و یک مدل ریاضی ساده برای توصیف انتقال گرما و جرم بین هوا و آب در یک کولر تبخیر مستقیم ارائه کرده‌اند و تأثیرات

^۷- Martinez

^۸- Wu

^۹- Sheng and Nnanna

دمای محیط و سرعت باد بوده و از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$Q_h = h.A(T_\infty - T_{w,1}) = \dot{m}_{w,1}.Cp_w.T_{w,1} - \dot{m}_{w,2}.Cp_w.T_{w,2} \quad (1)$$

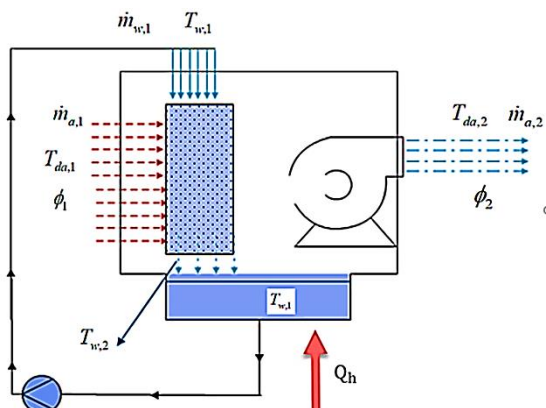
$$-\dot{m}_{w,sup}.h_{w,sup} \quad (2)$$

$$\dot{m}_{w,sup} = \dot{m}_{w,1} - \dot{m}_{w,2}$$

در روابط فوق، $\dot{m}_{w,sup}$ و $h_{w,sup}$ به ترتیب دبی و آنتالپی آب تزریق‌شده به تشت زیرین توسط شناور کولر بوده و h ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی می‌باشد که براساس رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۶]:

$$h = 2.8 + (3.V_a) \quad (3)$$

که در آن V_a سرعت باد در محیط اطراف کولر می‌باشد.



شکل ۱- شماتیک کولر تبخیری مورد استفاده در مدل‌سازی ترمودینامیکی

هوا با دبی $\dot{m}_{a,1}$ ، رطوبت نسبی ϕ_1 و دمای حباب خشک $T_{a,1}$ وارد کولرآبی شده و پس از انتقال حرارت با آب با رطوبت نسبی ϕ_2 و دمای حباب خشک $T_{a,2}$ از کولر خارج می‌شود. فرآیند تغییر دما در کولرآبی به صورت دمای مرطوب ثابت بوده و مقدار آب تبخیر شده در کولرآبی از رابطه (۴) قابل محاسبه است [۲۷]:

$$\dot{m}_w = \dot{m}_a (\omega_2 - \omega_1) \quad (4)$$

مقدار رطوبت مخصوص، ω ، نیز از روابط زیر قابل محاسبه است [۲۷]:

وسایل سرمایه‌ی مورد استفاده در این مناطق، سهم قابل‌توجهی در مصرف آب دارند. طبق نتایج تفصیلی سرشماری عمومی نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵ مرکز آمار ایران، در استان قم بیش از ۳۸۳ هزار خانوار وجود دارد که با توجه به شرایط آب و هوایی حاکم بر این استان، می‌توان انتظار داشت تعداد زیادی کولرآبی به‌دلیل مصرف کم برق و قیمت پایین آن‌ها در این استان وجود داشته باشد. با توجه به افزایش جمعیت، تغییر الگوی مصرف و تغییرات اقلیمی، پیش‌بینی دقیق مصرف آب کولرهای آبی و تدوین برنامه‌های مدیریت بهینه آب، امری ضروری است. بررسی مطالعات انجام شده در این زمینه نشان می‌دهد تاکنون مصرف آب کولرهای تبخیری براساس تغییرات اقلیمی و افزایش جمعیت با مدل‌سازی ریاضی و ترمودینامیکی پیش‌بینی نشده است. تحقیق حاضر با هدف مدل‌سازی و پیش‌بینی مصرف آب کولرهای آبی در شهر قم و ارزیابی تأثیر عوامل مختلف از جمله راندمان اشباع، ظرفیت کولر و شرایط اقلیمی بر این مصرف انجام شده است. با توجه به اینکه استفاده از کولرهای آبی در آینده نیز پیش‌بینی می‌شود، شناخت دقیق عوامل مؤثر بر مصرف آب این دستگاه‌ها و ارائه راهکارهای کاهش مصرف آب، می‌تواند در مدیریت بهینه منابع آبی شهری نقش مؤثری ایفا نماید.

۲- تئوری و روش کار

۲-۱- مدل‌سازی ترمودینامیکی

شکل ۱، شماتیک سیستم تبخیری مورد استفاده در فرآیند مدل‌سازی ترمودینامیکی را نشان می‌دهد. هوا در دما و رطوبت نسبی محیط وارد کولر آبی شده و پس از برخورد با آب پوشال از کولر خارج می‌شود.

در یک کولر تبخیری، میزان سرمایه‌ی تولید شده از موازنه جرم و حرارت به‌دست می‌آید. نرخ انتقال حرارت از محیط اطراف به آب داخل تشت زیرین کولرآبی تابعی از

$$h = h_a + \omega h_v \cong 1.005T + \omega(2500 + 1.82T) \left(\frac{Kj}{kg} \right) \quad (13)$$

۲-۲- بررسی داده‌های اقلیمی شهر قم

قم در طول جغرافیایی ۵۱ درجه و عرض جغرافیایی ۳۴/۷ درجه واقع شده و ارتفاع متوسط آن از سطح دریا ۹۳۷ متر است. آب و هوای این شهر در تابستان، گرم و خشک در زمستان، نسبتاً سرد می‌باشد. متوسط حداقل درجه حرارت سردترین ماه سال ۵/۱۶- و متوسط حداکثر گرم‌ترین ماه سال ۴۲/۵ درجه است. در این مطالعه از نرم‌افزار متونورم^{۱۰} برای به‌دست آوردن داده‌های اقلیمی شهر قم (دمای هوای خشک، دمای هوای مرطوب، رطوبت نسبی و غیره) در سال‌های قبل و آینده استفاده شده است (جدول ۱). متونورم نرم‌افزار قدرتمند و معتبری جهت ساخت داده‌های اقلیمی و با دسترسی آنلاین به داده‌های هواشناسی بیش از ۸۹۰۰ ایستگاه هواشناسی در سرتاسر جهان، پنج ماهواره هواشناسی و همچنین داده‌های هواشناسی ۳۰ سال اخیر است و تاریخچه اطلاعاتی یک منطقه جغرافیایی خاص را درگذر زمان ایجاد می‌کند.

۲-۳- اعتبارسنجی مدل‌سازی عددی

جهت اعتبارسنجی مدل‌سازی مورد استفاده در این تحقیق، از نتایج به‌دست آمده از چند آزمایش صورت گرفته در شهرهای مختلف طبق جدول ۲ استفاده شده است. این نتایج نشان می‌دهند با افزایش دمای هوای ورودی، راندمان اشباع آدیباتیک کولر آبی کاهش می‌یابد. شکل ۲، تصویری از بررسی تجربی مصرف آب کولر و تجهیزات اندازه‌گیری میزان مصرف لحظه‌ای و مصرف کل آب را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است صحت و درستی تجهیزات اندازه‌گیری قبل از آزمایش‌ها بررسی شده‌اند و هر آزمایش نیز در شرایط مختلف تکرار شده است. جدول ۳، مقایسه نتایج تجربی با نتایج حاصل از مدل‌سازی را

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \quad (5)$$

$$\omega = 0.622 \frac{P_v}{p - P_v} = 0.622 \frac{\phi P_g}{p - \phi P_g} \quad (6)$$

$$P_g = \exp\left(25.317 - \frac{5144}{T + 273}\right) \quad (7)$$

$$p = 101.325(1 - 2.25577 \times 10^{-5} Z)^{5.2559} \quad (8)$$

از آنجاکه رطوبت نسبی در خروجی سیستم معین نبوده و بایستی توسط مدل محاسبه شود، مقدار رطوبت نسبی در خروجی از سیستم با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شود [۲۶]:

$$E_s = \frac{T_{a,1} - T_{a,2}}{T_{a,1} - T_{WB,1}} \quad (9)$$

$$T_{WB,1} = T_{WB,2}$$

$$T_{WB} = T \times \left[\begin{aligned} & \text{atan}[0.151977 \times (RH \% + 18.313659)^{1/2}] \\ & + \text{atan}(T + RH \%) \\ & - \text{atan}(RH \% - 1.676331) + \\ & 0.00391838(RH \%)^{3/2} \times \\ & \text{atan}(0.023101 \times RH \%) - 4.686035 \end{aligned} \right] \quad (10)$$

در روابط فوق، E_s راندمان اشباع کولر آبی بوده که بسته به نوع پوشال و نحوه تولید هر دستگاه متفاوت می‌باشد. در حالت پایدار و ایده‌آل، با فرض این‌که تماس کامل بین آب و هوا در داخل کولر فراهم باشد، هوای وارد شده به کولر آبی به حالت اشباع از کولر خارج خواهد شد. با فرض آدیباتیک بودن مجموعه پوشال کولر آبی و با استفاده از قانون اول ترمودینامیک برای پوشال می‌توان نوشت:

$$Q = \sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{m}_i h_i \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & (\dot{m}_{a,2} + \dot{m}_{v,2}) h_{a,2} - \\ & (\dot{m}_{a,1} + \dot{m}_{v,1}) h_{a,1} + \\ & \dot{m}_{w,2} h_{w,2} - \dot{m}_{w,1} h_{w,1} = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

در رابطه فوق، h انتالپی هوای مرطوب بوده که از رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود [۲۷]:

¹⁰ Meteonorm

۳- نتایج

۳-۱- بررسی عملکرد کولرآبی در شهر قم تحت شرایط مختلف

جهت بررسی تأثیر راندمان اشباع بر عملکرد کولرهای آبی، اطلاعات دما و رطوبت نسبی روزانه، مربوط به متوسط ۲۰ سال اخیر شهر قم (شکل ۳)، در مدل ترمودینامیک وارد شده و نتیجه مدل‌سازی در شکل ۴ نشان داده شده است.

ارائه می‌دهد. نتایج بیانگر دقت بسیار مناسب مدل در تخمین مقادیر دما و رطوبت نسبی هوای خروجی از کولر می‌باشند. لازم به ذکر است که در واقعیت این مقادیر ممکن است به علت میزان رسوب در پوشال، پخش نامناسب آب روی پوشال، نشستی آب از کولر و غیره تفاوت زیادی با مدل محاسباتی داشته باشند. با این حال از آنجا که هدف از مدل‌سازی تخمین عملکرد دستگاه در شرایط ایده‌آل می‌باشد، می‌توان از این موارد در بررسی نتایج این تحقیق صرف‌نظر نمود.

جدول ۱- متوسط ماهیانه درجه حرارت حباب خشک و رطوبت نسبی برای سال‌های مختلف

| ماه | متوسط سال‌های ۲۰۱۰-۱۹۹۰ | | سال ۲۰۲۰ | | پیش‌بینی در سال ۲۰۳۰ | | پیش‌بینی در سال ۲۰۴۰ | |
|----------|--------------------------|----------------|--------------------------|----------------|--------------------------|----------------|--------------------------|----------------|
| | درجه حرارت حباب خشک (°C) | رطوبت نسبی (%) | درجه حرارت حباب خشک (°C) | رطوبت نسبی (%) | درجه حرارت حباب خشک (°C) | رطوبت نسبی (%) | درجه حرارت حباب خشک (°C) | رطوبت نسبی (%) |
| اردیبهشت | ۲۵/۱ | ۳۱/۵ | ۲۳/۶ | ۳۲ | ۲۴/۳ | ۳۱/۵ | ۲۴/۲ | ۳۲ |
| خرداد | ۳۰/۱ | ۲۴/۹ | ۲۹ | ۲۵/۳ | ۲۹/۶ | ۲۵ | ۲۹/۹ | ۲۵/۳ |
| تیر | ۳۳/۳ | ۲۳/۱ | ۳۲/۷ | ۲۴/۳ | ۳۳ | ۲۴/۲ | ۳۳/۲ | ۲۴ |
| مرداد | ۳۲/۲ | ۲۲/۹ | ۳۱/۶ | ۲۴/۷ | ۳۱/۷ | ۲۴/۸ | ۳۲/۱ | ۲۵ |
| شهریور | ۲۶/۸ | ۲۸/۲ | ۲۷ | ۲۵/۹ | ۲۷ | ۲۶/۱ | ۲۷/۵ | ۲۵/۷ |

جدول ۲- نتایج آزمایشگاهی مورد استفاده برای اعتبار سنجی مدل‌سازی

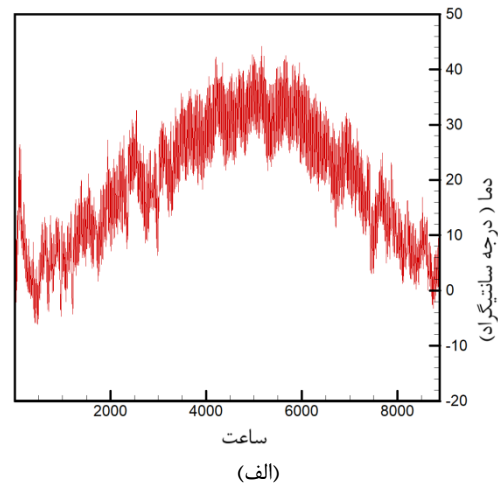
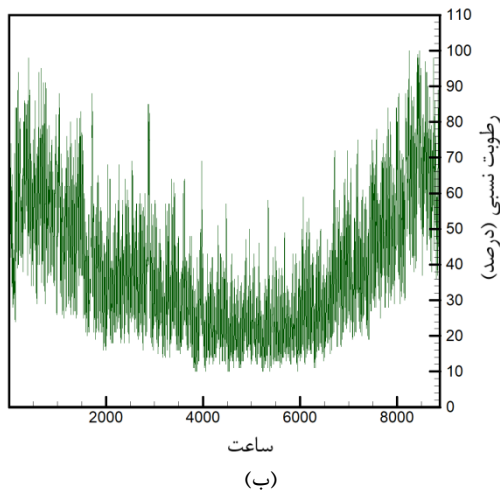
| شهر | ارتفاع از سطح دریا (m) | دمای هوای ورودی (°C) | رطوبت نسبی هوای ورودی (%) | نوع کولر | دبی هوای ورودی m ³ /s | راندمان اشباع آدیاباتیک کولر | دمای هوای خروجی (°C) | رطوبت نسبی هوای خروجی (%) | مصرف آب کولر (lit/h) |
|-------|------------------------|----------------------|---------------------------|----------|----------------------------------|------------------------------|----------------------|---------------------------|----------------------|
| کرج | ۱۳۰۰ | ۲۶ | ۱۴/۵ | ۳۰۰۰ CFM | ۱/۴۸۴ | ۰/۸ | ۱۴/۵ | ۷۱ | --- |
| سمنان | ۱۱۷۱ | ۲۸ | ۷ | ۸۰۰ | ۰/۳۶ | ۰/۵۸ | ۱۸/۴ | ۴۴ | --- |
| سمنان | ۱۱۷۱ | ۳۱/۵ | ۵ | ۸۰۰ | ۰/۳۶ | ۰/۶۲ | ۱۹/۷ | ۴۸ | --- |
| یزد | ۱۲۳۰ | ۳۳ | ۲۵ | ۵۵۰۰ | ۲/۵۹ | ۰/۴۷ | ۲۶ | ۴۷ | ۳۶ |
| قم | ۹۳۷ | ۳۵ | ۲۰ | ۴۵۰۰ | ۲/۱۲ | ۰/۳ | ۳۰ | ۳۳ | --- |



شکل ۲- تصویر بررسی مصرف لحظه‌ای و مصرف کل کولرآبی

جدول ۳- مقایسه نتایج تجربی با نتایج حاصل از مدل‌سازی

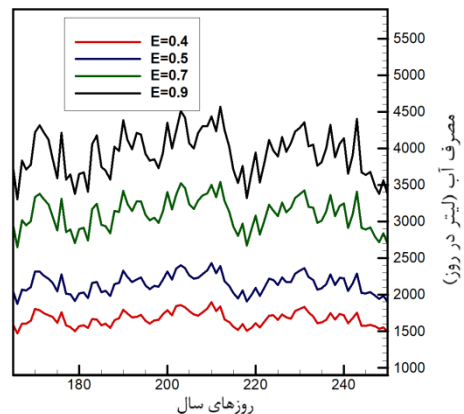
| رطوبت نسبی هوای خروجی از کولر (%) | | | ردیف | دمای هوای خروجی از کولر (°C) | | | ردیف |
|-----------------------------------|----------|-------|------|------------------------------|----------|-------|------|
| خطا (%) | مدل‌سازی | تجربی | | خطا (%) | مدل‌سازی | تجربی | |
| ۴ | ۷۴ | ۷۱ | ۱ | ۰/۷ | ۱۴/۶ | ۱۴/۵ | ۱ |
| ۹ | ۴۰ | ۴۴ | ۲ | ۳ | ۱۷/۸ | ۱۸/۴ | ۲ |
| ۱۸ | ۳۹/۵ | ۴۸ | ۳ | ۳ | ۱۹/۱ | ۱۹/۷ | ۳ |
| ۶ | ۵۰ | ۴۷ | ۴ | ۲ | ۲۶/۶ | ۲۶ | ۴ |
| ۰/۶ | ۳۳/۲ | ۳۳ | ۵ | ۱ | ۳۰/۳ | ۳۰ | ۵ |



شکل ۳- (الف) شرایط دمایی و (ب) شرایط رطوبت نسبی متوسط ۲۰ ساله شهر قم

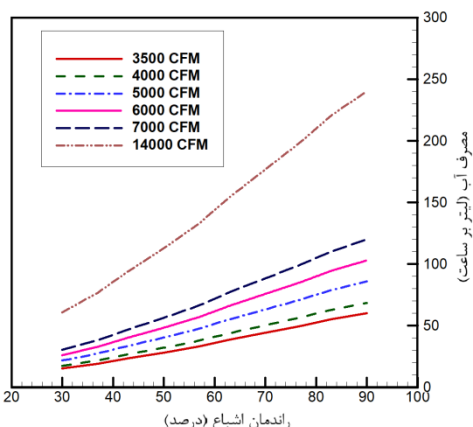
نتایج نشان می‌دهد که با افزایش راندمان اشباع در کولر آبی ۵۰۰۰، مقدار مصرف آب در این وسیله افزایش یافته است، به طوری که با افزایش این مقدار از ۴۰ درصد به ۹۰ درصد، مقدار مصرف آب در کولر نیز به صورت متوسط حدود ۱۳۴ درصد افزایش می‌یابد. همچنین، نتایج این نمودار نشان می‌دهد که مصرف آب کولر آبی در طول روزهای گرم سال نوسانات قابل توجهی داشته است که این نوسانات به عوامل مختلفی مانند دمای محیط و رطوبت نسبی هوا بستگی دارد. بدیهی است که در روزهایی که دمای هوا بالاتر و رطوبت نسبی پایین‌تر است، مصرف آب کولر آبی نیز بیشتر خواهد بود. نتایج این نمودار نشان می‌دهد که اگرچه افزایش راندمان اشباع کولر آبی منجر به بهبود عملکرد آن می‌شود، اما این بهبود با افزایش قابل توجه مصرف آب همراه است. بنابراین، در انتخاب کولر آبی باید به عوامل مختلفی مانند شرایط آب و هوایی منطقه، هزینه آب و برق و نیازهای سرمایه‌گذاری ساختمان توجه نمود.

در مدل‌سازی فرض شده است که زمانی که دمای هوای محیط بالاتر از ۲۹ درجه سانتی‌گراد شده است، کاربر، کولر آبی (۵۰۰۰ CFM) را روشن نموده است. بنابراین، برای شرایط هوای سرد (زمستان و پاییز)، همچنین برای مواقعی که دمای محیط نزدیک شرایط آسایش بوده است، مقدار مصرف آب کولر آبی صفر در نظر گرفته شده است.



شکل ۴- مصرف آب کولر آبی ۵۰۰۰ در روزهای سال، براساس اطلاعات آب و هوایی متوسط ۲۰ ساله شهر قم

بر روی مصرف آب کولر دارند و با افزایش راندمان اشباع و دبی هوای کولر، مصرف آب کولر نیز افزایش می‌یابد.

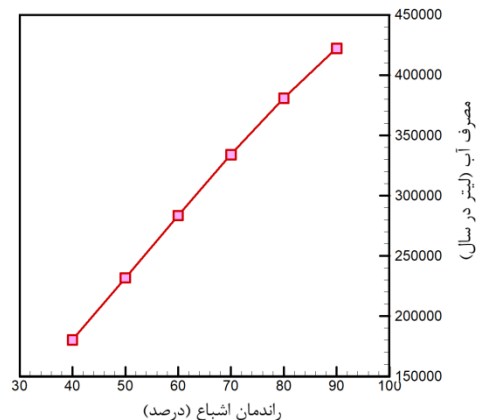


شکل ۶- تأثیر راندمان اشباع بر مصرف آب کولر آبی در شرایط $(T = 42.5^{\circ}C, \phi = 10\%)$

افزایش مصرف آب کولر با افزایش دبی هوای ورودی در رابطه (۴) ارائه شده است. طبق رابطه (۹)، افزایش راندمان اشباع در شرایط هوای ورودی ثابت، ناشی از نزدیک شدن دمای هوای حباب خشک خروجی به دمای هوای حباب تر ورودی می‌باشد. به‌عنوان مثال، در یک کولر سلولوزی (راندمان اشباع نزدیک ۹۰ درصد)، کولر ۷۰۰۰ مصرف آبی حدود دو برابر کولر ۳۵۰۰ دارد. از طرف دیگر، اگر به جای کولر سلولوزی ۷۰۰۰ بخواهیم از یک کولر پوشالی معمولی ۷۰۰۰ با راندمان اشباع ۴۵ درصد استفاده نماییم، مصرف آب این کولر حدود ۲/۵ برابر کمتر خواهد بود. هرچند دمای هوای خروجی نیز بیشتر خواهد بود.

شکل ۷، تأثیر تغییرات دمای هوای ورودی را بر مصرف آب یک کولر آبی معمولی با راندمان اشباع ۵۰ درصد نشان می‌دهد. طبق شکل ۷، دمای هوای ورودی تأثیر مستقیم بر روی مصرف آب کولر آبی داشته، به‌طوری‌که در همه حالت‌ها با افزایش دمای هوا از ۲۵ درجه سانتی‌گراد به ۴۵ درجه سانتی‌گراد، مصرف آب ۱۶۰ درصد افزایش خواهد یافت که مطابق با رابطه (۹) نیز می‌باشد. به عنوان مثال، در یک کولر آبی ۵۰۰۰، مصرف آب با افزایش دمای هوا از ۲۵ به ۴۵ درجه

شکل ۵، مصرف کل یک کولر آبی ۵۰۰۰ را در ماه‌های گرم سال با توجه به شرایط آب و هوایی شهر قم (متوسط ۲۰ ساله) نشان می‌دهد. در محاسبات انجام شده فرض شده است که کولر آبی در این مدت همواره روشن و در حال ایجاد سرمایه‌گذاری در ساختمان بوده است. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش راندمان اشباع از ۴۰ درصد به ۹۰ درصد، مصرف کل آب کولر آبی ۵۰۰۰ در شهر قم از ۶۷۳۱۵ لیتر به ۱۵۶۳۶۷ لیتر افزایش می‌یابد. این به معنای افزایش ۲/۳ برابری مصرف آب کولر آبی می‌باشد. شکل ۵، به وضوح نشان می‌دهد که با افزایش راندمان اشباع کولر آبی، میزان مصرف آب سالانه آن نیز به‌طور خطی افزایش می‌یابد. این رابطه مستقیم نشان می‌دهد که هرچه کولر آبی کارآمدتر باشد، به علت جذب رطوبت بیشتری از هوا، به آب بیشتری نیز نیاز خواهد داشت. دلیل افزایش مصرف آب کولر آبی با افزایش راندمان ناشی از جذب بیشتر رطوبت به علت افزایش سطح تماس آب با هوا می‌باشد.



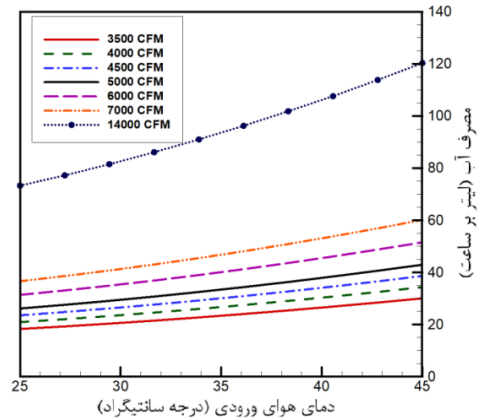
شکل ۵- مصرف کل کولر آبی ۵۰۰۰ در طی یک سال براساس اطلاعات آب و هوایی متوسط ۲۰ ساله شهر قم

همچنین برای بررسی تأثیر راندمان اشباع بر مصرف آب کولر آبی، شرایط یکی از گرم‌ترین ساعات ۲۰ سال اخیر شهر قم (دمای ۴۲/۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۱۰ درصد) در مدل ترمودینامیکی وارد شده و نتایج برای انواع کولر در شکل ۶ ارائه گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که راندمان اشباع و دبی هوای کولر تأثیر مستقیم

ظرفیت‌های مختلف و راندمان‌های تبخیر مختلف را در سال‌های مختلف برآورد کرد. در شکل ۸، این مقادیر برای سه ظرفیت مختلف با راندمان تبخیر پایین در سال ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ نشان داده شده است. نتایج ارائه شده، روند افزایشی قابل‌توجهی در مصرف آب ماهانه کولرهای آبی را با افزایش ظرفیت نشان می‌دهد. همچنین، شکل ۸ نشان می‌دهد که بیشترین مصرف آب در ماه‌های گرم سال مانند تیر و مرداد رخ می‌دهد که این امر کاملاً منطقی است.

براساس سرشماری نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵ و آمار اعلام‌شده توسط معاونت آمار و اطلاعات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان قم، میزان خانوار استان قم تا سال ۱۴۰۵ پیش‌بینی شده است. در این تحقیق، جهت برآورد تعداد خانوار تا سال ۲۰۴۰، از نرخ رشد جمعیت پیش‌بینی شده استفاده شده است.

سانتی‌گراد، به ترتیب از ۲۶/۲ لیتر بر ساعت به ۴۳ لیتر بر ساعت افزایش خواهد یافت.

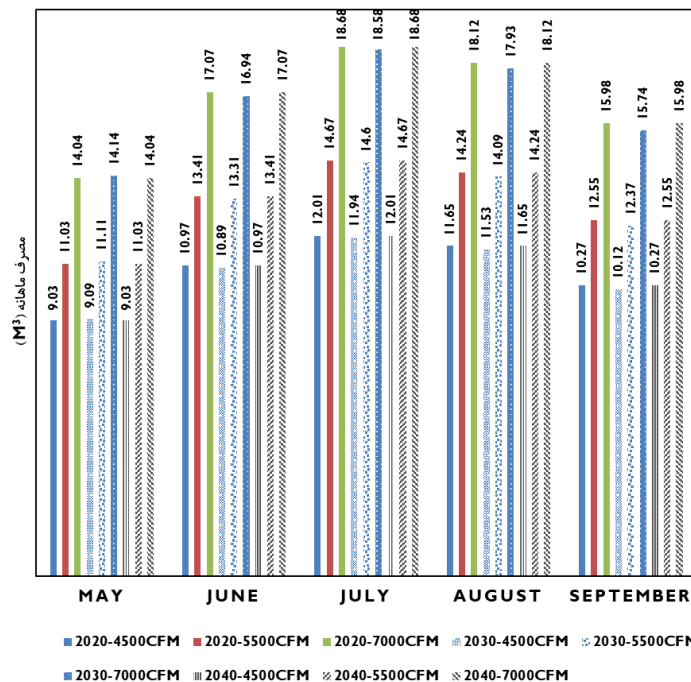


شکل ۷- تأثیر دمای هوای ورودی بر مصرف آب انواع کولر آبی

در شرایط ($E = 0.5$, $\phi = 10\%$)

۳-۲- پیش‌بینی عملکرد کولر آبی در شهر قم تحت شرایط مختلف

با توجه به مدل‌سازی انجام شده در این تحقیق، می‌توان با دقت خوب میزان مصرف ماهانه کولرهای آبی با



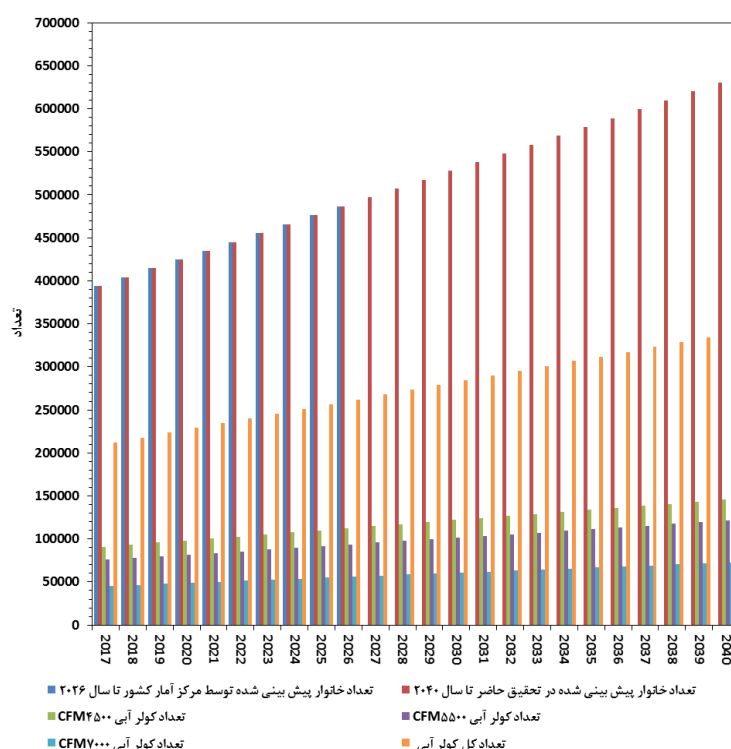
شکل ۸- مصرف ماهانه یک کولر در ظرفیت‌های مختلف و راندمان تبخیر ۳۰٪ برای سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰

خانوارهای هر سال لحاظ شده است. همچنین براساس تقریب انجام شده، تعداد کولرهای آبی در سه مدل ۴۵۰۰، ۵۵۰۰ و ۷۰۰۰ فوت مکعب بر دقیقه به‌صورت درصدی از

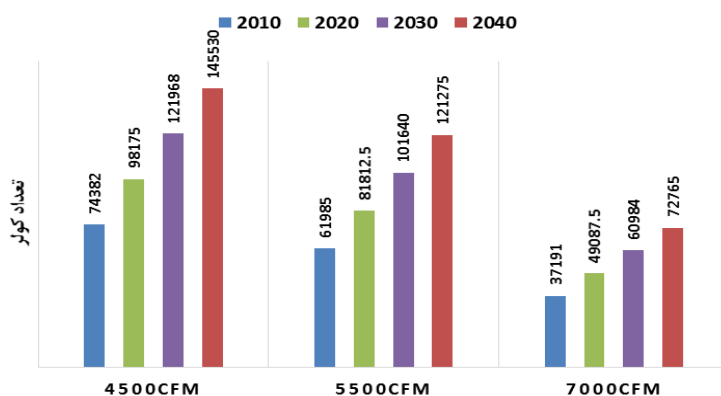
برای محاسبه تعداد کولرهای آبی از تعداد انشعابات آب استفاده شده است که براساس اطلاعات دریافتی از شرکت آب و فاضلاب استان قم به‌صورت ۷۷ درصد تعداد

نشان می‌دهد. این افزایش به طور مستقیم با رشد جمعیت و افزایش تقاضا برای سرمایه‌گذاری در مناطق گرم و خشک مرتبط است. این تغییرات در الگوی مصرف کولرهای آبی، می‌تواند به عوامل مختلفی از جمله افزایش سطح درآمد خانوارها، تغییر در سبک زندگی و همچنین بهبود فناوری کولرهای آبی نسبت داده شود. با توجه به این روند رو به رشد، پیش‌بینی می‌شود که در آینده نیز مصرف انرژی برای سرمایه‌گذاری یابد و این موضوع نیاز به اتخاذ تدابیر مناسب برای مدیریت مصرف انرژی و کاهش اثرات زیست محیطی آن را ضروری می‌سازد.

تعداد انشعابات محاسبه شده است. شکل ۹، روند رو به رشد تعداد خانوار و به تبع آن افزایش چشمگیر تعداد کولرهای آبی در شهر قم را تا سال ۲۰۴۰ نشان می‌دهد. افزایش جمعیت و گسترش شهرنشینی، تقاضا برای استفاده از کولرهای آبی را به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین وسایل سرمایه‌گذاری در مناطق گرم و خشک، به‌ویژه در فصل تابستان، به شدت افزایش خواهد داد. جهت مقایسه رشد تعداد کولرهای آبی با رشد جمعیت، تعداد کولرهای آبی مختلف در سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۴۰ در شکل ۱۰ مقایسه شده‌اند که روند افزایشی قابل توجه در تعداد کولرهای آبی با ظرفیت‌های مختلف در طول سال‌های مورد بررسی را



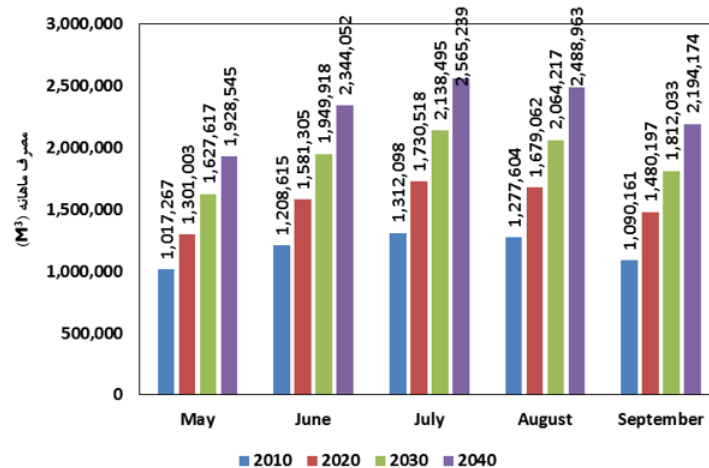
شکل ۹- تغییرات تعداد خانوار و کولرهای آبی در ظرفیت‌های مختلف از ۲۰۱۰ تا ۲۰۴۰



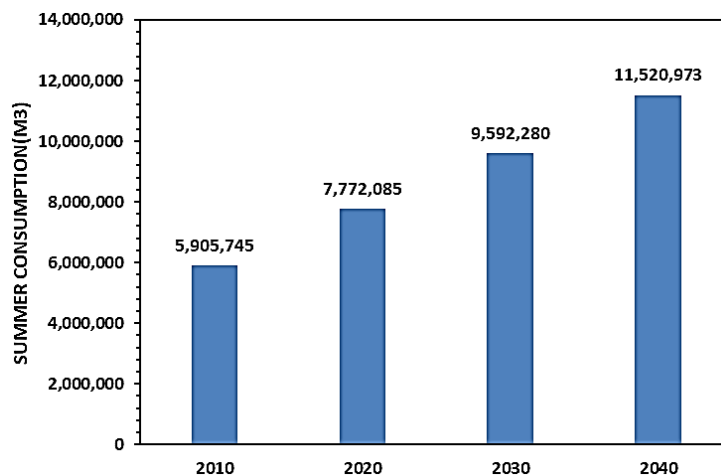
شکل ۱۰- تعداد کولرهای آبی در ظرفیت‌های مختلف برای سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۴۰

استفاده از کولرهای آبی بیشتر شده و در نتیجه، مصرف آب نیز افزایش یافته است. این روند افزایشی نشان می‌دهد که با وجود پیشرفت‌های تکنولوژیکی و معرفی سیستم‌های سرمایشی جدید، کولرهای آبی همچنان نقش مهمی در تأمین آسایش حرارتی در مناطق گرم و خشک ایفا خواهند نمود. با این حال، این افزایش مصرف آب، چالش‌های جدی در زمینه مدیریت منابع آب به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایجاد می‌نماید. بنابراین، اتخاذ تدابیر مناسب برای کاهش مصرف آب کولرهای آبی، از جمله استفاده از کولرهای آبی با راندمان بالا، استفاده از سایبان برای کولرها و تعمیر و نگهداری دوره‌ای آنها، امری ضروری خواهد بود.

با عنایت به مدل‌سازی ترمودینامیکی و پیش‌بینی مصرف آب ماهانه برای هر ظرفیت هوادهی و تعداد کولرهای مختلف، می‌توان مقدار مصرف آب ماهانه هر نوع ظرفیت را نیز در سال‌های مختلف برآورد کرد. مقدار کل مصرف ماهانه کولرهای مختلف در ماه‌های مختلف تابستان و همچنین کل مصرف فصل تابستان سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۴۰، در شکل ۱۱ ارائه شده است. نتایج ارائه شده، افزایش قابل توجه مصرف آب کولرهای آبی در فصل تابستان را در طول سال‌های مورد بررسی نشان می‌دهد. این افزایش به عوامل مختلفی از جمله رشد جمعیت، افزایش دمای هوا و به تبع آن افزایش تقاضا برای سرمایش مرتبط خواهد بود. به عبارت دیگر، در سال‌های آینده، به علت گرم‌تر شدن هوا و افزایش جمعیت، نیاز به



(الف)



(ب)

شکل ۱۳- مقدار مصرف کل آب کولرهای آبی شهر قم در (الف) ماه‌های مختلف تابستان و (ب) تابستان سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۴۰

۴- نتیجه‌گیری

نتایج مدل‌سازی کولر آبی ۵۰۰۰ نشان می‌دهند که با افزایش راندمان اشباع کولر از ۴۰ درصد به ۹۰ درصد، مصرف کل آب کولر آبی ۵۰۰۰ در شهر قم از ۶۷۳۱۵ لیتر به ۱۵۶۳۶۷ لیتر افزایش می‌یابد. این به معنای افزایش ۲/۳ برابری مصرف آب کولر آبی می‌باشد.

همچنین برای بررسی تأثیر راندمان اشباع بر مصرف آب این وسیله، شرایط یکی از گرم‌ترین ساعات ۲۰ سال اخیر شهر قم (دمای ۴۲/۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۱۰ درصد) در مدل ترمودینامیکی وارد شده است. نتایج نشان می‌دهند که راندمان اشباع و دبی هوای کولر تأثیر مستقیم بر روی مصرف آب کولر دارند. به‌عنوان مثال، در یک کولر سلولوزی (راندمان اشباع نزدیک ۹۰ درصد)، کولر ۷۰۰۰ مصرف آبی حدود دو برابر کولر ۳۵۰۰ دارد. از طرف دیگر، اگر به جای کولر سلولوزی ۷۰۰۰ بخواهیم از یک کولر پوشالی معمولی ۷۰۰۰ با راندمان اشباع ۴۵ درصد استفاده نماییم، مصرف آب این کولر حدود ۲/۵ برابر کمتر خواهد بود. هرچند دمای هوای خروجی نیز بیشتر خواهد بود. بنابراین اگرچه استفاده از کولرهای سلولوزی باعث افزایش خنک‌کاری می‌گردد، اما به علت افزایش مصرف آب، استفاده از آن از طرف شرکت‌های آب و فاضلاب توصیه نمی‌شود.

در نهایت و به‌عنوان نتیجه نهایی می‌توان گفت که علی‌رغم اعتقاد همگانی مبنی بر کاهش استفاده از کولرهای تبخیری توسط شهروندان قمی تا سال ۲۰۴۰، به علت قیمت بسیار پایین‌تر و هزینه برق کمتر، همچنان استفاده از کولرهای آبی در ۲۰ سال آینده مورد استفاده اکثر شهروندان قم خواهد بود. با توجه به مقدار مصرف آب زیاد در کل تابستان توسط کولرهای آبی پیش‌بینی شده در سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۴۰ در ماه‌های گرم تابستان، بایستی مسئولان یا با ارائه یارانه بسیار زیاد برای مصرف برق، مشتریان را به سمت استفاده از سیستم‌های تبرید تراکمی سوق داده، یا برنامه‌ریزی مناسب را جهت تأمین

آب این کولرها تا سال ۲۰۴۰ انجام دهند. هرچند با توجه به شرایط اقلیمی کشور، تأمین آب برای این وسیله کم‌بازده و پرمصرف توجیه علمی و اقتصادی نخواهد داشت.

۴-۱- پیشنهادها برای ادامه تحقیق

با توجه به نتایج این مقاله و اهمیت موضوع، پیشنهادهایی برای ادامه تحقیق در این حوزه به شرح زیر ارائه می‌شود:

(الف) عمق بخشیدن به مدل‌سازی و بررسی تأثیر عوامل محیطی مانند سرعت باد، تابش خورشید، دمای محیط و رطوبت نسبی

(ب) تحلیل حساسیت و بررسی تأثیر تغییرات عوامل مؤثر و تعیین میزان تأثیرگذاری آن‌ها

(پ) بررسی اقتصادی، مقایسه هزینه-فایده با توجه به هزینه‌های خرید، نصب، تعمیر و نگهداری انواع مختلف کولرهای آبی و همچنین هزینه‌های ناشی از مصرف آب و برق آن‌ها

قدردانی

نویسندگان مقاله مراتب تشکر و قدردانی خود را از شرکت آب و فاضلاب استان قم پیرو حمایت مالی و معنوی از قرارداد پژوهشی «بررسی و تخمین مصرف سالیانه آب در کولرهای آبی براساس اقلیم سال‌های آینده شهرستان قم- بررسی تجربی و مدل‌سازی عددی» با شماره ۱۰/۲۳۱/ص مورخ ۹۷/۲/۲۴ و همچنین پیگیری‌های ناظر محترم پروژه جناب آقای عبدالهادی مطهری اعلام می‌دارند.

فهرست علائم و اختصارات

| | |
|-------|---|
| A | مساحت، (مترمربع) |
| C_p | ظرفیت حرارتی، (کیلوژول کیلوگرم بر کلوین) |
| E_s | راندمان اشباع |
| h | ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، (وات مترمربع بر کلوین) |
| H | انتالپی هوای مرطوب، (کیلوژول بر کیلوگرم) |

| | | | |
|--------|---------------|-----------|---------------------------|
| ϕ | رطوبت نسبی، % | \dot{m} | دبی، (کیلوگرم بر ثانیه) |
| | زیر نویس‌ها | m | جرم، (کیلوگرم) |
| a | هوا | P | فشار، (پاسکال) |
| g | بخار اشباع | Q | حرارت، (وات) |
| v | بخار | RH | رطوبت نسبی، (درصد) |
| W | آب | T | دما، (کلوین) |
| WB | هوای مرطوب | V_a | سرعت باد، (متر بر ثانیه) |
| SUP | ورودی | Z | ارتفاع از سطح دریا، (متر) |
| | | | حروف یونانی |
| | | ω | رطوبت مخصوص |

References

- [1] Joudi KA, Mehdi SM. Application of indirect evaporative cooling to variable domestic cooling load. *Energy Conversion and Management*. 2000; 41(17): 1931-1951. doi: [10.1016/S0196-8904\(00\)00004-2](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00004-2)
- [2] Bom GJ. *Evaporative air-conditioning: applications for environmentally friendly cooling*: World Bank Publications; 1999.
- [3] Heidarinejad G, Delfani S, Esmaeelian J, Heidarinejad M. *Principles and Applications of Evaporative Coolers*. Ministry of Housing and Urban Development: Building and Housing Research Center; 2007. [In Persian]
- [4] Zhu G, Wen T, Wang Q, Xu X. A review of dew-point evaporative cooling: Recent advances and future development. *Applied Energy*. 2022 Apr 15; 312: 118785. doi: [10.1016/j.apenergy.2022.118785](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118785)
- [5] Kapilan N, Isloor AM, Karinka S. A comprehensive review on evaporative cooling systems. *Results in Engineering*. 2023 Jun 1; 18: 101059. doi: [10.1016/j.rineng.2023.101059](https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101059)
- [6] Kalsia M, Sharma A, Kaushik R, Dondapati RS. *Evaporative Cooling Technologies: Conceptual Review Study*. 2023.
- [7] Gupta SK, Arora B, Arora A. Thermo-economic assessment of air conditioner utilizing direct evaporative cooling: A comprehensive analysis. *International Journal of Refrigeration*. 2024 Feb 1; 158: 68-88. doi: [10.1016/j.ijrefrig.2023.11.021](https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.11.021)
- [8] Abdullah S, Zubir MN, Muhamad MR, Newaz KM, Öztöp HF, Alam MS, Shaikh K. Technological development of evaporative cooling systems and its integration with air dehumidification processes: A review. *Energy and Buildings*. 2023 Mar 15; 283: 112805. doi: [10.1016/j.enbuild.2023.112805](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112805)
- [9] Xiao X, Liu J. A state-of-art review of dew point evaporative cooling technology and integrated applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024 Mar 1; 191: 114142. doi: [10.1016/j.rser.2023.114142](https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114142)
- [10] Ndukwu MC, Ibeh MI, Akpan GE, Ugwu E, Akuwueke L, Oriaku L, Ihediwa VE, Abam FI, Wu H, Kalu CA, Ben AE. Analysis of the influence of outdoor surface heat flux on the inlet water and the exhaust air temperature of the wetting pad of a direct evaporative cooling system. *Applied Thermal Engineering*. 2023 May 25; 226: 120292. doi: [10.1016/j.applthermaleng.2023.120292](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120292)
- [11] Li C, Mao R, Wang Y, Zhang J, Lan J, Zhang Z. Experimental study on direct evaporative cooling for free cooling of data centers. *Energy*. 2024 Feb 1; 288: 129889. doi: [10.1016/j.energy.2023.129889](https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129889)
- [12] Guo X, Zhao T-S. A parametric study of an indirect evaporative air cooler. *International communications in heat and mass transfer*. 1998; 25(2): 217-226. doi: [10.1016/S0735-1933\(98\)00008-6](https://doi.org/10.1016/S0735-1933(98)00008-6)
- [13] Maheshwari G, Al-Ragom F, Suri R. Energy-saving potential of an indirect evaporative cooler. *Applied Energy*. 2001; 69(1): 69-76. doi: [10.1016/S0306-2619\(00\)00066-0](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(00)00066-0)
- [14] Martinez FR, Gómez EV, Martín RH, Gutiérrez JM, Díez FV. Comparative study of two different evaporative systems: an indirect evaporative cooler and a semi-indirect ceramic evaporative cooler. *Energy and Buildings*. 2004; 36(7): 696-708. doi: [10.1016/j.enbuild.2003.10.010](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.10.010)
- [15] Camargo JR, Ebinuma CD, Silveira JL. Experimental performance of a direct evaporative cooler operating during summer in a Brazilian city. *International Journal of Refrigeration*. 2005; 28(7): 1124-1132. doi: [10.1016/j.ijrefrig.2004.12.011](https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2004.12.011)
- [16] Beshkani A, Hosseini R. Numerical modeling of rigid media evaporative cooler. *Applied Thermal Engineering*. 2006; 26(5): 636-643. doi: [10.1016/j.applthermaleng.2005.06.006](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.06.006)

- [17] Chengqin R, Hongxing Y. An analytical model for the heat and mass transfer processes in indirect evaporative cooling with parallel/counter flow configurations. *International journal of heat and mass transfer*. 2006; 49(3): 617-627. doi: **10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.08.019**
- [18] Wu J, Huang X, Zhang H. Theoretical analysis on heat and mass transfer in a direct evaporative cooler. *Applied Thermal Engineering*. 2009; 29(5): 980-984. doi: **10.1016/j.applthermaleng.2008.05.016**
- [19] Wu J, Huang X, Zhang H. Numerical investigation on the heat and mass transfer in a direct evaporative cooler. *Applied Thermal Engineering*. 2009; 29(1): 195-201. doi: **10.1016/j.applthermaleng.2008.02.018**
- [20] Fouda A, Melikyan Z. A simplified model for analysis of heat and mass transfer in a direct evaporative cooler. *Applied Thermal Engineering*. 2011; 31(5): 932-936. doi: **10.1016/j.applthermaleng.2010.11.016**
- [21] Sheng C, Nnanna AA. Empirical correlation of cooling efficiency and transport phenomena of direct evaporative cooler. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. 2011 Jan 1; 54907: 953-967. doi: **10.1016/j.applthermaleng.2012.01.052**
- [22] Hosseini S, Heidarinejad G, Pasdarsahri H. Verification of Pre-Cooling Effects on Saturation Effectiveness of Evaporative Coolers. *Modares Mechanical Engineering*. 2014; 13(13): 188-199. doi: **20.1001.1.10275940.1392.13.13.9.5** [In Persian]
- [23] Sadi M. Experimental Study of Maisotsenko Cross-Flow Cooler and Numerical Solution of Air in Mass and Heat Exchanger. *Energy Engineering and Management*. 2023; 11(3): 108-121. doi: **10.22052/11.3.1** [In Persian]
- [24] Omidi Kashani B. Experimental and theoretical investigation of mass and heat transfer and cooling efficiency in an evaporative water cooler manufactured in Iran. *The first international air conditioning conference and thermal and refrigeration facilities*; Tehran. 2015. [In Persian]
- [25] Komasi M, Ghobadi Khosro S, Hashemi M. Drought Forecasting Using Tree Multi-Scale Model. *Civil Infrastructure Researches*. 2017; 2(2): 51-65. doi: **10.22091/cer.2017.832** [In Persian]
- [26] Sampathkumar K, Arjunan T, Pitchandi P, Senthilkumar P. Active solar distillation-A detailed review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010; 14(6): 1503-1526. doi: **10.1016/j.rser.2010.01.023**
- [27] Cengel YA, Boles MA. *Thermodynamics: an engineering approach*: McGraw-Hill; 2002.