



مدلسازی ترمودینامیک و بررسی پارامترهای مؤثر بر عملکرد و مصرف آب کولرهای تبخیری مستقیم با استفاده از طراحی آزمایش‌ها و روش فاکتوریل کامل

نادر رهبر^{۱*}، هادی کارگر شریف آباد^۲، احد عابدینی اسفهلانی^۳

^۱ دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران.

^۲ دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد قم، دانشگاه آزاد اسلامی، قم، ایران.

^۳ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران.

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۰۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۰۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۶

چکیده

در این پژوهش، عملکرد کولرهای تبخیری مستقیم با استفاده از مدل‌سازی ترمودینامیکی و روش طراحی آزمایش‌ها (DOE) بررسی شد. مدل توسعه‌یافته با داده‌های تجربی اعتبارسنجی گردید و دمای هوای خروجی و مصرف آب را به ترتیب با خطای متوسط ۱/۹ و ۷ درصد پیش‌بینی کرد. همچنین، با استفاده از طراحی آزمایش فاکتوریل کامل، اثرات مستقل و برهم‌کنش پارامترهای مؤثر تحلیل شد. نتایج نشان داد دبی هوای ورودی و راندمان اشباع بیشترین تأثیر را بر مصرف آب دارند؛ به‌طوری‌که افزایش راندمان اشباع از ۴۰ به ۹۰ درصد، مصرف آب را تا ۱۳۰ درصد افزایش می‌دهد. در ادامه، دو مدل رگرسیونی برای برآورد ظرفیت سرمایش و مصرف آب ارائه شد و مصرف سالانه آب یک کولر آبی ۷۰۰۰ فوت‌مکعب بر دقیقه با راندمان ۷۰ درصد در ۹ شهر منتخب ایران محاسبه گردید. نتایج نشان داد مصرف سالانه آب از ۵۸ مترمکعب در تبریز تا ۱۹۴ مترمکعب در یزد متغیر است که نقش شرایط اقلیمی را در عملکرد این تجهیزات نشان می‌دهد. یافته‌های این پژوهش می‌تواند در طراحی کولرهای آبی، مدیریت مصرف آب، برنامه‌ریزی شهری، تدوین مقررات مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان و توسعه سامانه‌های سرمایشی پایدار در مناطق گرم و خشک کشور به‌کار گرفته شود.

کلمات کلیدی: کولر آبی، طراحی آزمایش‌ها؛ روش فاکتوریل کامل؛ ظرفیت سرمایش؛ مصرف آب، مدلسازی ترمودینامیک.

Thermodynamic Modeling and Analysis of Key Parameters Affecting the Performance and Water Consumption of Direct Evaporative Coolers Using Design of Experiments and Full Factorial Design Approach

Nader Rahbar^{1,*}, Hadi KargarSharifAbad², Ahad Abedini Esfahlani³

¹ Assoc. Prof., Department of Mechanical Engineering, Se.C., Islamic Azad University, Semnan, Iran.

² Assoc. Prof., Department of Mechanical Engineering, Qo. C., Islamic Azad University, Qom, Iran.

³ Assist. Prof., Department of Mechanical Engineering, Se.C., Islamic Azad University, Semnan, Iran.

Abstract

This study investigates the performance of direct evaporative coolers using thermodynamic modeling and a design of experiments (DOE) approach. The developed model was validated with experimental data, achieving average errors of 1.9% for outlet air temperature and 7% for water consumption. A full factorial DOE was used to evaluate the effects of key operating parameters. Results show that inlet air flow rate and saturation efficiency have the greatest influence on water consumption. Increasing saturation efficiency from 40% to 90% raises water use by 130%, demonstrating the trade-off between cooling performance and water demand. Two simplified regression models were developed to estimate cooling capacity and water consumption. These models were applied to calculate the annual water use of a standard 7,000 CFM evaporative cooler operating at 70% efficiency in nine Iranian cities. Annual water consumption ranged from 58 m³ in Tabriz to 194 m³ in Yazd, highlighting the strong influence of climate on system performance. The findings support optimized cooler design and selection, improved water management, sustainable urban planning, revisions to Iran's National Building Code (Article 19), and the development of efficient cooling systems for hot and arid regions.

Keywords: Evaporative cooler; Design of experiments; Full factorial design; Cooling capacity; Water consumption, Thermodynamic modeling.

۱- مقدمه

امروزه جهت ایجاد شرایط آسایش حرارتی، فن‌آوری‌های تهویه مطبوع به‌طور فزاینده‌ای در کاربردهای مسکونی و تجاری در سراسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرند. هرچند سیستم‌های سرمایش تراکمی دارای ضریب مزیت بالا بوده و ازجمله متداول‌ترین سیستم‌های سرمایشی در جهان می‌باشند، اما مصرف انرژی زیاد و وابستگی به میردهای شیمیایی و اثرات زیست‌محیطی ناشی از این میردها، از معایب استفاده از این سیستم‌ها می‌باشد [۱، ۲]. دستگاه‌های سرمایش تبخیری^۱ بر سیال آب به‌عنوان ماده خنک‌کننده تکیه نموده، برای تولید و بهره‌برداری اقتصادی مفید بوده و دارای مزایای زیست‌محیطی بسیاری می‌باشند. تحت شرایط و کاربردهای مناسب، سیستم تبخیری می‌تواند با استفاده از آب، به‌عنوان مایع خنک‌کننده، تهویه‌ای مناسب با حداقل مصرف انرژی را ایجاد کرده، علاوه بر آن دارای یکی از مهم‌ترین مزایا یعنی اجتناب از میردهای کلروفلوروکربن بوده که مخرب لایه ازن هستند. تصمیم‌گیری در مورد امکان استفاده از سرمایش تبخیری بستگی به شرایط آب و هوا و اقلیم محل ساختمان دارد. ساخت و کاربری آسان، هزینه اولیه و مصرف انرژی پایین، دوستدار لایه ازن و محیط‌زیست، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، افزایش کیفیت هوای داخل و استفاده مداوم از هوای تازه، تنوع مختلف، رطوبت زنی خودکار هوا و مصرف انرژی کمتر در ساعات پیک بار از مهم‌ترین مزایای سیستم‌های سرمایش تبخیری هستند [۳]. استفاده از کولرهای آبی در ایران به دلیل هزینه اولیه پایین و سازگاری با اقلیم گرم و خشک کشور، گستردگی فراوانی دارد. همانطور که در جدول ۱ خلاصه شده است، این تجهیزات بخش بزرگی از سیستم‌های سرمایشی کشور را

تشکیل می‌دهند که با توجه به بحران آب، بررسی عملکرد و بهینه‌سازی مصرف آب آن‌ها را به یک ضرورت تبدیل می‌کند. سیستم‌های سرمایش تبخیری از نظر کاربردی به کولرهای تبخیری مستقیم قطره‌ای (کولرهای آب متداول)، کولرهای تبخیری غیرمستقیم، کولرهای تبخیری اسلینگر، کولرهای تبخیری با پد چرخان، کولرهای تبخیری با پد صلب و ایرواشرها یا هواسوی‌ها تقسیم می‌شوند. از بین دسته‌بندی ذکرشده، در کشور ایران تقریباً فقط از کولرهای آبی و ایرواشرها به‌عنوان سیستم‌های سرمایش تبخیری استفاده می‌شود.

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، مهم‌ترین فاکتور محدودکننده کاربرد کولرهای تبخیری، به دو عامل محدودیت در ایجاد آسایش حرارتی و مصرف آب برمی‌گردد. 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. مشکل مهم‌تر سیستم سرمایش تبخیری، مصرف آب آن است. از آنجاکه بیشترین کاربرد سیستم‌های تبخیری در نواحی دارای هوای خشک بوده و این نواحی معمولاً از کمبود آب رنج می‌برند، وابستگی زیاد این سیستم‌ها به مصرف آب، یکی از نقاط ضعف آن‌ها محسوب می‌شود. همچنین، عدم امکان کنترل رطوبت هوا و عدم کارکرد مناسب در نواحی مرطوب نیز از سایر محدودیت‌های کولرهای آبی محسوب می‌شوند [۴].

در سال‌های اخیر تحقیقات فراوانی در خصوص تحلیل عملکرد سیستم‌های تبخیری صورت گرفته است که این تحقیقات به دو دسته تحقیقات آزمایشگاهی و تحقیقات بر پایه مدل‌سازی عددی تقسیم می‌شوند.

جدول ۱- مقیاس و اهمیت استفاده از کولرهای تبخیری در ایران

شرح	آمار کلیدی	منبع
فراوانی استفاده	پرکاربردترین سیستم سرمایشی در اقلیم گرم و خشک ایران	[۵]
مزایا	ساخت و کاربری آسان، هزینه اولیه و مصرف انرژی پایین، دوستدار لایه ازن و محیط‌زیست، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، افزایش کیفیت هوای داخل و استفاده مداوم از هوای تازه، تنوع مختلف، رطوبت زنی خودکار هوا و مصرف انرژی کمتر در ساعات پیک بار	[۴]

^۱ Evaporative air conditioning (EAC)

چالش عملکردی	مصرف آب، محدودیت در ایجاد آسایش حرارتی	[۴، ۵]
چالش بهداشتی	خطرات میکروبی و ایمنی سلامت	[۶]

۱-۱- تحقیقات تجربی و آزمایشگاهی

تحقیق تجربی یا آزمایشگاهی یکی از دقیق‌ترین و کارآمدترین روش‌های تحقیق است که برای آزمون فرضیه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. هدف این تحقیق بررسی تأثیر محرک‌ها، روش‌ها و یا شرایط خاص محیطی بر روی یک گروه آزمودنی بوده و از خصوصیات روش تجربی این است که ضمن دست‌کاری یا مداخله در متغیرها و کنترل شرایط، نتایج به‌دست‌آمده را مورد مشاهده قرار می‌دهد.

فرزاد [۷] در مورد افزایش راندمان سرمایش هوا در یک مرغداری تحقیق نموده و روشی کم‌هزینه و ساده برای خنک کاری هوای بیرون، قبل از ورود به سالن و افزایش راندمان کولر تبخیری ارائه نمودند. الدوکسی همکاران [۸] در کشور کویت یک دستگاه آزمایشگاهی خنک‌کننده دو مرحله‌ای تبخیری را ساخته و آزمایش کردند. جاین [۹] یک کولر تبخیری اصلاح‌شده به نام کولر تبخیری دومرحله‌ای را مورد بررسی قرار داد و نشان داد که با استفاده از این سامانه می‌توان درجه حرارت هوا را تا درجه حرارت حباب‌تر هوای محیط کاهش داد. مشیری و همکاران [۱۰] بر روی کولر تبخیری دو مرحله مستقیم و غیرمستقیم مطالعه نموده و کارایی و ابعاد بهینه کولر را مورد ارزیابی قرار دادند. آلکلیبی [۱۱] در پژوهشی بر روی کولر تبخیری دومرحله‌ای و کولر تبخیری مستقیم و غیرمستقیم نشان داد که کارایی کولر تبخیری دومرحله‌ای داخلی بالاتر از جریان مستقیم است. حلوایی نیاسر و همکاران [۱۲] به بررسی تأثیر استفاده از موتور براشلس در کولر آبی پرداخته و برتری مطلق موتور براشلس بر موتور تک‌فاز را در عملکرد کولرهای آبی گزارش نمودند. سعدی [۱۳] در یک تحقیق به بررسی تجربی عملکرد کولر تبخیری غیرمستقیم جریان عمود و حل عددی جریان هوا در مبدل حرارت-جرم پرداخته و نشان داد که افزایش دما و کاهش رطوبت نسبی هوای ورودی سبب بهبود عملکرد این نمونه کولر شده و افزایش دبی هوای ورودی هرچند که باعث افزایش دمای هوای خروجی می‌شود، ظرفیت سرمایش این دستگاه را بهبود می‌بخشد. علی دوست و موسوی [۱۴] در یک تحقیق تجربی به

بررسی عملکرد یک سیستم سرمایش تبخیری هیبریدی در ساختمانی مسکونی واقع در اقلیم گرم و خشک پرداخته و کاهش مصرف آب و برق و بهبود راندمان خنک کاری را برای سیستم هیبریدی گزارش نمودند.

در سال‌های اخیر، با هدف افزایش بهره‌وری و غلبه بر محدودیت‌های کولرهای تبخیری، پژوهش‌ها به سمت توسعه سیستم‌های ترکیبی (هیبریدی) برای کاربردهای خاص و پرمصرف، مانند مراکز داده، متمایل شده است. به عنوان نمونه، ژانگ و همکاران [۱۵] یک سیستم تهویه مطبوع هیبریدی نوین را که سرمایش تبخیری را با سرمایش هوایی متداول (تراکمی) ترکیب می‌کند، به صورت تجربی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که این سیستم ترکیبی در مقایسه با حالت سرمایش تراکمی تنها، ضریب عملکرد را تا ۲۱/۴۵ درصد بهبود بخشیده و پتانسیل بالایی برای کاهش مصرف انرژی در مراکز داده، به ویژه در اقلیم‌هایی با اختلاف دمای خشک و تر بالا، دارد. در کنار سیستم‌های هیبریدی، روش‌های سرمایش تبخیری مستقیم نیز برای کاربرد در مراکز داده مورد توجه قرار گرفته‌اند. در یک پژوهش آزمایشگاهی دیگر، مائو و همکاران [۱۶] عملکرد یک سیستم سرمایش تبخیری مستقیم از نوع مه-سرد را برای خنک‌کاری مراکز داده بررسی کردند. آن‌ها با بهینه‌سازی پارامترهایی نظیر زاویه پاشش و دبی آب، نشان دادند که این روش قادر است دمای بالای هوای ورودی (تا ۳۷ سانتی‌گراد) را به محدوده استاندارد مورد نیاز تجهیزات مرکز داده برساند و پتانسیل کاهش مصرف انرژی سالانه به میزان ۱۴ تا ۴۱ درصد را داراست.

۲-۱- تحقیقات عددی و مدل‌سازی ریاضی

ژائو و گو [۱۷] عملکرد حرارتی یک کولر هوایی تبخیری غیرمستقیم را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق اثرات طیف وسیعی از پارامترها مانند سرعت جریان اولیه و ثانویه هوا، عرض کانال، رطوبت نسبی ورودی و مرطوب بودن صفحه بر روی عملکرد حرارتی آن مورد بررسی قرار گرفت. خالد و صلاح [۱۸] در تحقیقات خود نشان دادند که با

استفاده از کولر تبخیری غیرمستقیم، ایجاد شرایط آسایش حرارتی در اکثر ساعات شبانه‌روز امکان‌پذیر است. نتایج این تحقیق نشان داد که چون در این سامانه تنها از فن و پمپ آب استفاده می‌شود، مصرف انرژی بسیار پایین است. ماهشواری [۱۹] ارزیابی تحلیلی با استفاده از نتایج میدانی عملکرد یک کولر آبی در مکان‌های ساحلی و داخلی در کویت را ارائه داده و میزان صرفه‌جویی انرژی را در مقایسه با یک سیستم تهویه مطبوع تبریدی ارائه نمود. مارتینز و همکاران [۲۰] عملکرد یک سیستم تهویه هوا به همراه کندانسور را به صورت تجربی بررسی نموده و تأثیر ضخامت پد خنک‌کننده و عملکرد سیستم را در بهترین بهره‌وری به دست آوردند. آنان نشان دادند که با اضافه کردن یک پد با ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر، مصرف برق کمپرسور ۱۱/۴ درصد کاهش و ظرفیت خنک‌کنندگی ۱/۸ درصد افزایش و در نهایت ضریب عملکرد کلی ۱۰/۶ درصد افزایش می‌یابد. کامارگو و ابینوما [۲۱] به بررسی اصول اساسی فرآیند خنک کاری تبخیری و توسعه ریاضی معادلات تبادل حرارتی پرداختند. بشکانی و حسینی [۲۲] کارایی کولر تبخیری مستقیم مجهز شده به مبدل حرارتی صفحات مواج و مرطوب را با روش عددی بررسی کردند. در این تحقیق به منظور حل معادلات از تحلیل المان محدود استفاده شده و معادلات حاکم بر هوا با استفاده از تجزیه و تحلیل اختلاف محدود حل گردید. در این تحقیق، بازده اشباع و افت فشار به‌عنوان عملکرد سرعت هوا و عمق پوشش‌های میانی پوشال محاسبه شده و نتایج نشان داد که عملکرد سیستم با کاهش سرعت و افزایش عمق پوشش‌های میانی پوشال، بهبود می‌یابد. رن و یانگ [۲۳] یک مدل تحلیلی برای فرآیند انتقال گرما و جرم در یک خنک‌کننده تبخیری غیرمستقیم را در شرایط عملیاتی واقعی با تنظیمات موازی / ضد جریان ارائه نمودند. در معادلات مدل آنان اثرات تبخیر آب اسپری، تغییرات دمای آب اسپری و تغییر آنتالپی آب اسپری شده در امتداد سطح مبدل حرارتی در نظر گرفته شد. وو و همکاران [۲۴] در مطالعه‌ای عددی، انتقال حرارت و جرم مبادله شده میان آب و هوا را در یک سیستم تبخیری مستقیم بررسی نموده و تأثیر پارامترهای مختلف بر روی عملکرد آن را مورد مطالعه قرار دادند. طبق نتایج به دست آمده، تغییرات سرعت هوای خروجی و ضخامت پد دو پارامتر مؤثر کلیدی در کارایی کولر تبخیری مستقیم بوده و سرعت بهینه در کولر مدل شده ۲/۵ متر بر

ثانیه شناسایی شد. وو و همکاران [۲۵] در تحقیقی دیگر با ساده‌سازی معادلات انتقال جرم و انرژی، روابط ساده‌ای را برای انتقال حرارت و رطوبت در سیستم‌های سرمایشی تبخیری مستقیم استخراج نمودند. ملیکیان و فودا [۲۶] فرآیند درون کولر تبخیر مستقیم را مورد بررسی قرار داده و یک مدل ریاضی ساده برای توصیف انتقال گرما و جرم بین هوا و آب در یک کولر تبخیر مستقیم را ارائه نمودند. در این تحقیق تأثیرات سرعت هوای ورودی، ضخامت پد و دمای هوای ورودی در بازده خنک‌کننده کولر تبخیری محاسبه و آنالیز شده است. شنگ و نانا [۲۷] ارتباط تجربی بین سه پارامتر دمای هوا و آب ورودی و سرعت هوای ورودی و تأثیر آن در عملکرد کولر تبخیری را مورد ارزیابی قرار دادند. آنان با انجام آزمون‌های متعدد برای هر پارامتر نشان دادند که میان این سه پارامتر همبستگی تجربی وجود داشته و با تغییر هر پارامتر، کارایی خنک‌کننده تغییر می‌کند. معرفت و همکاران [۲۸] یک سیستم سرمایش ترکیبی سازگار با محیط‌زیست و سرمایش تبخیری مستقیم را مورد مطالعه قرار داده و گزارش دادند که راندمان این سیستم ترکیبی در مقایسه با سیستم تبخیری مستقیم ۴۵ درصد بالاتر است. احمدی و همکاران [۲۹] میزان صرفه‌جویی انرژی در صورت جایگزینی کولرهای آبی برجسب A در بخش ساختمان شهر تهران را با استفاده از روش مدل‌سازی پایین به بالا را مورد بررسی قرار داده و کاهش ۹۷۸ گیگاوات مصرف برق و ۶۸۰ هزار تن دی اکسید کربن را در سال با این جایگزینی برآورد و گزارش نمودند. انباراسو و همکاران [۳۰] با استفاده از نرم‌افزار مدلیکا به مدل‌سازی انتقال گرما و جرم در پدهای مورد استفاده در کولرهای تبخیری پرداخته و خطای کمتر از ۲ درصد را نسبت به داده‌های تجربی گزارش نمودند. کارگر شریف‌آباد و همکاران [۵] عملکرد کولرهای آبی را در اقلیم شهر قم با مدل‌سازی ترمودینامیکی مورد بررسی قرار دادند. پژوهش آنان نشان داد که افزایش راندمان کولرهای آبی به‌طور هم‌زمان منجر به افزایش قابل‌توجه مصرف آب می‌شود. همچنین، راندمان اشباع و دبی هوای کولر تأثیر مستقیم بر روی مصرف آب کولر داشته، به‌طوری‌که افزایش راندمان اشباع از ۴۰٪ به ۹۰٪ در یک کولر آبی با ظرفیت ۵۰۰۰، منجر به افزایش ۱۳۱٪ در مصرف آب می‌شود.

در حوزه مدل‌سازی عددی، تلاش‌ها برای افزایش دقت پیش‌بینی انتقال حرارت و جرم با جایگزین کردن پارامترهای

و قابلیت کنترل عوامل مزاحم از جمله مزایای روش‌های طراحی عاملی هستند [۳۳].

مارتین [۳۴] عملکرد حرارتی یک خنک‌کننده تبخیری نیمه مستقیم^۳ را برای استفاده به‌عنوان یک دستگاه بازیاب انرژی مورد بررسی قرار داد. این مطالعه از یک طراحی فاکتوریل کامل^۴ و تحلیل واریانس^۵ برای تجزیه و تحلیل سیستم استفاده کرد. وی گزارش نمود که تعامل بین جریان هوا و دما بیشترین تأثیر (۴۵٪) را بر بازیابی حرارت محسوس خواهد داشت. به این معنی که افزایش جریان هوا و اختلاف دما، منجر به افزایش بازیابی حرارت محسوس می‌شود. از طرف دیگر، سطح رطوبت نیز بیشترین عامل تأثیرگذار بر بازیابی حرارت کل می‌باشد. تاشتش و العقول [۳۵] تأثیر یک سیستم خنک‌کننده آبی بر عملکرد یک مازول فتوولتائیک را بررسی کردند. آنان از یک طرح فاکتوریل کامل سه سطحی و از آنالیز واریانس برای تجزیه و تحلیل داده‌ها استفاده نمودند. نتایج تحقیق آنان نشان داد که دمای تنظیم مازول فتوولتائیک بیشترین تأثیر را بر تولید انرژی اضافی داشته، درحالی‌که حداکثر اختلاف دمای مجاز تأثیر ناچیزی بر عملکرد سیستم داشت. کومینو و همکاران [۳۶] یک رابطه ساده برای محاسبه عملکرد یک کولر تبخیری غیرمستقیم ارائه نمودند. مدل ارائه شده با یک رویکرد خطی، رفتار سیستم را با دقت پیش‌بینی نموده و توافق خوبی را با داده‌های تجربی نشان می‌داد.

مین و همکاران [۳۷] یک مدل آماری را برای پیش‌بینی عملکرد یک سیستم بازیاب انرژی و خنک‌کننده تبخیری غیرمستقیم^۶ در آب و هوای گرم و مرطوب ارائه نمودند. آنان در این تحقیق از یک طرح فاکتوریل دوسطحی^۷ استفاده نمودند. مدل ارائه‌شده عملکرد خنک‌کنندگی محسوس و همچنین عملکرد رطوبت‌زدایی را به خوبی پیش‌بینی نموده و با داده‌های تجربی و اندازه‌گیری‌های میدانی توافق خوبی را نشان داد. یان و همکاران [۳۸] عملکرد یک خنک‌کننده تبخیری مستقیم مبتنی بر غشاء با تیغه‌های داخلی را با استفاده از روش آزمایش متعامد^۸ ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که شعاع فیبر و سرعت هوای ورودی بیشترین تأثیر را بر

تجربی با پدیده‌های فیزیکی بنیادی‌تر، همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. در همین راستا، لی و همکاران [۳۱] یک مدل انتقال حرارت و جرم دقیق‌تر برای کولرهای تبخیری غیرمستقیم نقطه شبنم ارائه دادند. نوآوری اصلی پژوهش آن‌ها، محاسبه نرخ واقعی ترشوندگی پدها با استفاده از اثر مارانگونی به جای به‌کارگیری مقادیر ثابت یا تجربی بود. این رویکرد منجر به بهبود دقت مدل تا ۱۵/۸ درصد در مقایسه با مدل‌های پیشین گردید. آن‌ها سپس با استفاده از این مدل بهبودیافته، پتانسیل صرفه‌جویی در مصرف انرژی سیستم‌های ترکیبی در ساختمان مدارس را تحلیل کردند.

۱-۳- طراحی آزمایش‌ها و روش‌های طراحی عاملی

یکی از مهم‌ترین سؤالات پیش روی طراحان و مهندسان در طراحی سیستم‌های مهندسی، به دست آوردن عوامل تأثیرگذار و مقدار تأثیر هرکدام از آن‌ها بر روی عملکرد سیستم طراحی شده می‌باشد. برای این منظور، یک مهندس لازم است اقدام به انجام مجموعه‌ای از آزمایش‌های متعدد نموده و از این طریق مقدار تأثیرپذیری عملکرد سیستم را بر حسب عوامل تأثیرگذار بررسی نماید. بدیهی است که هرچه تعداد پارامترهای مؤثر بر عملکرد سیستم بیشتر شوند، تعداد آزمایش‌های مورد نیاز نیز افزایش خواهد یافت. طراحی آزمایش‌ها^۱ روشی است که راه‌حلی قدرتمند و کارآمد را برای کاهش تعداد آزمایش‌ها ارائه می‌دهد. این تکنیک، که مبتنی بر علم آمار است، امکان ارزیابی همزمان تأثیر چندین عامل با سطوح مختلف را بر یک متغیر پاسخ در یک چارچوب آزمایشی انعطاف‌پذیر فراهم می‌کند. این روش به طراحان و تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا بفهمند هر عامل، هم به صورت مستقل و هم در تعامل با دیگر عوامل، چگونه بر عملکرد یک سیستم تأثیر می‌گذارد [۳۲]. روش‌های طراحی عاملی^۲ یا طراحی فاکتوریل از جمله روش‌های متداول و کارآمد طراحی آزمایش هستند که با داشتن انعطاف‌پذیری بالا و بر اساس روش‌های آماری، امکان غربالگری پارامترهای تأثیرگذار و بررسی تأثیر همزمان اثر دو یا چند عامل با سطوح مختلف را بر روی یک متغیر پاسخ فراهم می‌کنند. دقت، کارایی

⁶ Indirect evaporative cooling energy recovery system

⁷ Two-level factorial design

⁸ Orthogonal test method

¹ Design of experiments (DOE)

² Factorial design

³ Semi-indirect evaporative cooler (SIEC)

⁴ Full factorial design

⁵ ANOVA analysis

کارایی دمای مرطوب دارد. از طرف دیگر، سرعت هوای ورودی بیشترین عامل تأثیرگذار بر ضریب عملکرد سیستم تبخیری است. شی و همکاران [۳۹] یک مدل رگرسیون برای پیش‌بینی عملکرد یک کولر تبخیری غیرمستقیم جریان متقاطع با استفاده از روش سطح پاسخ^۱ را توسعه دادند. این مطالعه از یک طرح مرکب مرکزی با هشت عامل ورودی و پنج پاسخ خروجی استفاده کرد. آنان گزارش دادند که مدل رگرسیونی پیشنهادی می‌تواند عملکرد سیستم کولر تبخیری غیرمستقیم را در شرایط آب و هوایی مختلف با دقت پیش‌بینی نماید. همچنین، دمای خشک هوای ورودی و رطوبت نسبی مهم‌ترین عوامل مؤثر بر کارایی دمای مرطوب بوده و سرعت هوای ثانویه و ارتفاع کانال تأثیر قابل توجهی بر دمای خروجی هوای اولیه دارد.

۱-۴- ضرورت انجام این تحقیق

هرچند از مهم‌ترین مزایای کولرهای آبی تبخیری، مصرف کم انرژی الکتریکی و قیمت پایین آن‌ها می‌باشد، اما این مزایا به قیمت استفاده از تبخیر آب به‌عنوان عامل خنک‌کننده تمام شده است. به دلیل شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک ایران، کشور با بحران آب مواجه بوده و کولرهای آبی به‌عنوان یکی از پرتعدادترین و پرمصرف‌ترین تجهیزات سرمایشی، نقش مهمی را در افزایش مصرف آب و انرژی دارند. عملکرد کولرهای آبی به شدت به پارامترهای محیطی مانند دما، رطوبت نسبی و ارتفاع از سطح دریا وابسته بوده که لزوم مدل‌سازی دقیق و ارزیابی کارایی آن‌ها در شرایط اقلیمی مختلف را آشکار می‌سازد. از طرف دیگر، پرهزینه بودن روش‌های آزمایشگاهی و پیچیده بودن مدل‌سازی ریاضی، همواره ذهن مهندسان و طراحان را به سمت دستیابی به روابط و معادلاتی سوق می‌دهد که به سادگی و با سرعت بالا، همچنین دقتی مناسب بتوانند مصرف آب و مقدار سرمایش این تجهیزات را تخمین بزنند.

۱-۵- نوآوری تحقیق

اگرچه در پژوهش‌های پیشین، عملکرد کولرهای تبخیری با استفاده از مدل‌سازی ترمودینامیکی (مانند شنگ و نانا [۲۷]) یا روش‌های طراحی آزمایش (مانند مارتین [۳۴]) برای

کولرهای غیرمستقیم) به صورت مجزا تحلیل شده است، اما نوآوری اصلی این پژوهش در تلفیق این دو رویکرد برای تحلیل سیستماتیک کولرهای تبخیری مستقیم است. این رویکرد یکپارچه، امکان شناسایی و کمی‌سازی تأثیرات مستقل و مهم‌تر از آن، برهم‌کنش‌های کلیدی میان پارامترها (دما، رطوبت، دبی هوا، راندمان و ارتفاع) را فراهم می‌آورد. دستاورد نهایی این تحلیل، ارائه دو معادله رگرسیونی ساده و کاربردی برای تخمین همزمان مصرف آب و ظرفیت سرمایش است که ابزاری سریع و عملی برای مهندسان و سیاست‌گذاران فراهم می‌کند؛ جنبه‌ای که در تحقیقات پیشین کمتر به آن پرداخته شده است.

۲- تئوری و روش کار

در یک سیستم تبخیری ساده همانند کولرهای آبی و ایرواشرها^۲، هوای محیط وارد مجموعه شده و پس از عبور از محیط تر (همانند پوشال، افشانک‌ها و ...) هوای مرطوب از سیستم خارج می‌شود. به دلیل عبور هوا از مجاورت سطح بسیار بزرگ مرطوب و در طی فرایند تبخیر سطحی آب، هوا به همراه آب خنک می‌شوند. البته خنک‌سازی همواره با افزایش رطوبت نسبی هوا نیز همراه بوده و همین نکته سبب می‌شود، سیستم‌های تبخیری مستقیم بهترین عملکرد خود را در شرایط آب‌وهوای خشک و غیر مرطوب داشته باشند.

۲-۱- مدل‌سازی ترمودینامیکی کولرهای تبخیری

در این بخش، یک مدل ترمودینامیکی برای شبیه‌سازی عملکرد کولرهای تبخیری مستقیم توسعه داده شده است. این مدل بر اساس اصول بنیادین بقای جرم و انرژی در یک فرآیند سایکرومتریک با آنتالپی ثابت (آدیاباتیک) بنا شده است. هدف اصلی مدل، پیش‌بینی دقیق دمای هوای خروجی و میزان آب مصرفی بر اساس مجموعه‌ای از پارامترهای ورودی شامل شرایط اقلیمی (دما و رطوبت هوای ورودی)، مشخصات جغرافیایی (ارتفاع از سطح دریا) و ویژگی‌های عملکردی کولر (دبی هوا و راندمان اشباع) است. فرآیند مدل‌سازی در شکل ۱ به صورت شماتیک نمایش داده شده است.

^۱ Response surface method

^۲ Airwasher

مرطوب ثابت بوده و مقدار آب تبخیر شده در کولر آبی، از رابطه زیر قابل محاسبه است [۵]:

$$\dot{m}_w = \dot{m}_a(\omega_2 - \omega_1) \quad (۱)$$

$$T_{WB,1} = T_{WB,2} \quad (۲)$$

در رابطه فوق T_{WB} دمای هوای مرطوب بوده و ω ، مقدار رطوبت مخصوص می‌باشد. مقدار رطوبت مخصوص هوا خود تابعی از فشار بخار و فشار اتمسفر می‌باشد که از روابط زیر قابل محاسبه است:

$$\omega_1 = \frac{\dot{m}_{v,1}}{\dot{m}_a}, \omega_2 = \frac{\dot{m}_{v,2}}{\dot{m}_a} \quad (۳)$$

$$\omega_1 = 0.622 \frac{p_{v,1}}{p - p_{v,1}}, \omega_2 = 0.622 \frac{p_{v,2}}{p - p_{v,2}} \quad (۴)$$

همچنین در رابطه (۵) مقدار رطوبت نسبی ϕ در هوای ورودی و خروجی کولر نیز به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\phi_1 = \frac{p_{v,1}}{p_{g,1}}, \phi_2 = \frac{p_{v,2}}{p_{g,2}} \quad (۵)$$

در روابط فوق p و p_g به ترتیب فشار اتمسفر و فشار بخار اشباع بوده که به عنوان دو پارامتر ورودی اصلی در تحلیل‌های سایکرومتریک عمل می‌کنند. فشار اتمسفر بر اساس ارتفاع از سطح دریا و فشار بخار اشباع بر اساس دمای هوا از روابط زیر قابل محاسبه هستند [۴۰، ۴۱]:

$$p_{g,1} = \exp\left(25.317 - \frac{5144}{T_{a,1} + 273}\right) \quad (۶)$$

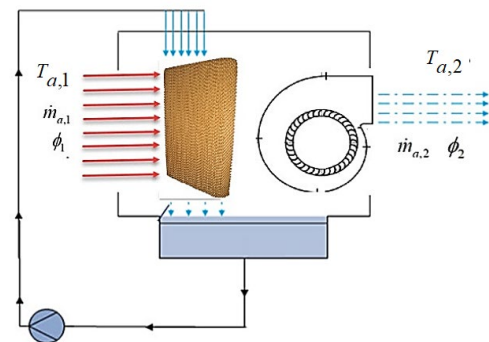
$$p_{g,2} = \exp\left(25.317 - \frac{5144}{T_{a,2} + 273}\right)$$

$$p = 101325(1 - 2.25577 \times 10^{-5}Z)^{5.2559} \quad (۷)$$

در رابطه (۸) پارامتر Z ارتفاع از سطح دریا و بر حسب متر می‌باشد. در حالت پایدار و ایده آل، 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. اما در شرایط واقعی، شرایط اشباع در هوای خروجی از کولر وجود نداشته و از راندمان اشباع برای بیان مقدار فاصله هوای خروجی از حالت اشباع استفاده می‌شود. راندمان اشباع یکی از مهم‌ترین مفاهیم در ارزیابی عملکرد کولرهای تبخیری بوده و نشان می‌دهد که کولر تا چه اندازه موفق شده است که هوای ورودی را به حالت اشباع برساند. به عبارت ساده‌تر، راندمان اشباع، میزان توانایی کولر در خنک کردن هوا از طریق تبخیر آب را نشان

برای سادگی و کارایی مدل، مفروضات کلیدی زیر در نظر گرفته شده است:

- فرآیند سرمایش در شرایط حالت پایا^۱ انجام می‌شود.
- فرآیند، آدیاباتیک است؛ یعنی هیچ انتقال حرارتی بین بدنه کولر و محیط اطراف وجود ندارد.
- تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل هوا در ورود و خروج از کولر ناچیز فرض می‌شود.
- فرآیند خنک کاری در دمای مرطوب ثابت رخ می‌دهد و دمای آب جبرانی ورودی به سیستم، معادل دمای مرطوب هوای ورودی است.
- هوا در هر مقطع از کولر دارای خواص یکنواخت است.



شکل ۱- شماتیک کولر تبخیری مورد استفاده در

مدلسازی ترمودینامیکی

در یک کولر تبخیری، مقدار سرمایش تولید شده، از موازنه جرم و حرارت به دست می‌آید. هوا با دبی $\dot{m}_{a,1}$ رطوبت نسبی ϕ_1 و دمای حباب خشک $T_{a,1}$ وارد کولر آبی شده پس از انتقال حرارت با آب، با دبی $\dot{m}_{a,2}$ رطوبت نسبی ϕ_2 و دمای حباب خشک $T_{a,2}$ از کولر خارج می‌شود. مقدار دبی هوای ورودی به کولر و خروجی از آن به صورت روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{m}_{a,1} = \dot{m}_a + \dot{m}_{v,1} \quad (۱)$$

$$\dot{m}_{a,2} = \dot{m}_a + \dot{m}_{v,2}$$

برای محاسبه مقدار آب تبخیر شده در کولر لازم است تغییرات رطوبت مخصوص هوا بین حالت ورودی و خروجی محاسبه شود. فرایند تغییر دما در کولر آبی به صورت دمای

^۱ Steady State

$$E_s = \frac{T_{a,1} - T_{a,2}}{T_{a,1} - T_{WB,1}} \times 100 \quad (۸)$$

در رابطه فوق T_{WB} دمای هوای مرطوب می باشد. همان طور که در رابطه (۳) بیان شد فرایند تغییر دمای هوا در کولر آبی به صورت دمای هوای مرطوب ثابت است. دمای هوای مرطوب که حد نهایی خنک کاری در یک فرایند تبخیری را مشخص می کند، خود تابعی از رطوبت نسبی و دمای هوای خشک هوا بوده و از روابط زیر قابل محاسبه است [۴۲، ۴۳]:

$$T_{WB,1} = T_{a,1} \times \operatorname{atan}[0.151977 \times (RH_1\% + 8.313659)^{1/2}] + \operatorname{atan}(T_{a,1} + RH_1\%) - \operatorname{atan}(RH_1\% - 1.676331) + 0.00391838(RH_1\%)^{3/2} \times \operatorname{atan}(0.023101 \times RH_1\%) - 4.686035 \quad (۹)$$

$$T_{WB,2} = T_{a,2} \times \operatorname{atan}[0.151977 \times (RH_2\% + 8.313659)^{1/2}] + \operatorname{atan}(T_{a,2} + RH_2\%) - \operatorname{atan}(RH_2\% - 1.676331) + 0.00391838(RH_2\%)^{3/2} \times \operatorname{atan}(0.023101 \times RH_2\%) - 4.686035 \quad (۱۰)$$

بهینه تر را انتخاب کنند. شکل ۲ شماتیک الگوریتم حل مدل ترمودینامیک ذکر شده را نشان می دهد. الگوریتم حل به شرح زیر می باشد:

مرحله ۱: دریافت پارامترهای ورودی:

- دمای هوای ورودی، رطوبت نسبی ورودی، ارتفاع از سطح دریا، دبی هوای کولر و راندمان اشباع

مرحله ۲: محاسبه فشارهای پایه

- محاسبه فشار اتمسفر از ارتفاع (رابطه ۸)
- محاسبه فشار بخار اشباع ورودی (رابطه ۷)

مرحله ۳: محاسبه خواص هوای ورودی

- محاسبه دمای مرطوب هوای ورودی با استفاده از دما و رطوبت نسبی هوای ورودی (معادله ۱۰)

- محاسبه رطوبت مخصوص هوای ورودی با استفاده از فشار بخار و فشار اتمسفر (معادله ۵)

مرحله ۴: محاسبه دمای هوای خروجی (با راندمان اشباع)

مرحله ۵: محاسبه خواص هوای خروجی (رابطه ۹)

- محاسبه فشار بخار اشباع در خروجی از (رابطه ۷)

می دهد. راندمان اشباع با مقایسه دمای خشک هوای ورودی به کولر با دمای خشک هوای خروجی از کولر در شرایطی که هوا به حداکثر رطوبت ممکن رسیده است (حالت اشباع)، محاسبه می شود. هرچه این اختلاف دما بیشتر باشد، راندمان اشباع بالاتر خواهد بود. نوع پوشال یا پدهای سلولزی، نحوه پاشش آب، دمای آب، طراحی کانال های هوا، کیفیت آب، سرعت هوا و دمای هوای ورودی از مهم ترین عوامل تأثیرگذار بر روی راندمان اشباع کولر آبی می باشند. راندمان اشباع در یک کولر آبی تبخیری از رابطه زیر محاسبه می شود:

در روابط فوق RH مقدار رطوبت نسبی بر حسب درصد بوده و به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\begin{aligned} RH_1 &= \phi_1 \times 100 \\ RH_2 &= \phi_2 \times 100 \end{aligned} \quad (۱۱)$$

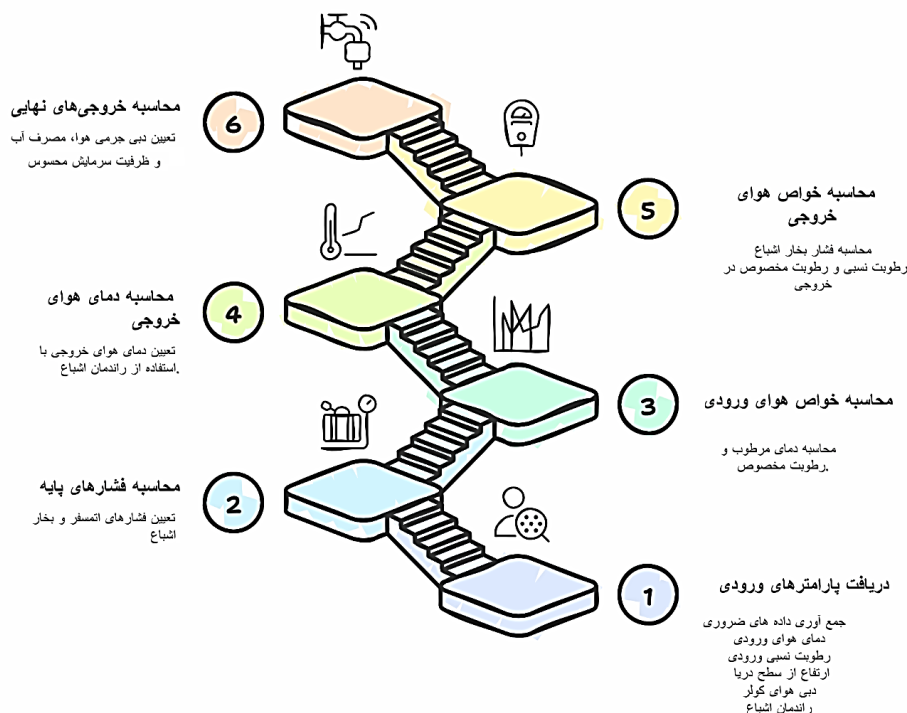
برای نشان دادن میزان کاهش دمای هوای عبوری از کولر آبی تبخیری مستقیم، از ظرفیت سرمایش محسوس استفاده می شود. این مقدار نشان دهنده انتقال انرژی حرارتی است که در طی فرایند سرمایش از هوا به آب منتقل می شود. مقدار ظرفیت سرمایش محسوس به صورت زیر تعریف می شود [۴۴]:

$$Q = \dot{m}_a \times 1.005 \times (T_{a,1} - T_{a,2}) \quad (۱۲)$$

رابطه فوق ابزار ساده ای برای محاسبه و تحلیل اولیه ظرفیت سرمایش کولر آبی در شرایط مشخص است. رابطه (۱۳) به عنوان یک ابزار ساده و عملی در مراحل مختلف طراحی، تحلیل و بهینه سازی کولرهای آبی مورد استفاده قرار می گیرد. همچنین، طراحان می توانند از آن رابطه برای تعیین مقدار سرمایش محسوس تولید شده توسط کولر در شرایط مختلف استفاده کنند. این تخمین اولیه به انتخاب اجزا و تنظیم پارامترهای عملکردی کولر کمک می کند. از طرف دیگر، طراحان می توانند تأثیر تغییرات پارامترهای مختلف (مانند دبی هوای عبوری، سرعت فن، یا طراحی کانال ها) را بر ظرفیت سرمایش ارزیابی کرده، با استفاده از این رابطه، مدل های مختلف کولر را از نظر ظرفیت سرمایش مقایسه نموده و طراحی

- محاسبه رطوبت نسبی خروجی با حل معکوس رابطه (۱۱) و فرض برابر بودن دمای مرطوب ورودی و خروجی
- محاسبه رطوبت مخصوص هوای خروجی از (رابطه ۴)
- محاسبه دبی جرمی هوا با (رابطه ۱)
- محاسبه مصرف آب بر حسب لیتر بر ساعت (رابطه ۳)
- محاسبه ظرفیت سرمایش محسوس (رابطه ۱۴)

مرحله ۶: محاسبه خروجی‌های نهایی



شکل ۲- شماتیک الگوریتم حل مدل ترمودینامیک

۳- نتایج

آن‌ها در نواحی مختلف کشور و با توجه به اقلیم آن منطقه بسیار ضروری و مهم می‌باشد. در این مقاله منظور از کولرهای تبخیری، ایرواشرها، کولرهای آبی پوشالی و کولرهای آبی سلولوزی می‌باشند. هرچند ساختار داخلی وسایل ذکر شده می‌تواند متفاوت باشد، اما نحوه عملکرد ترمودینامیکی آن‌ها در سرمایش هوای ورودی بسیار شبیه به یکدیگر بوده و می‌توان از معادلات (۱) تا (۱۳) برای تحلیل عملکرد آن‌ها بهره گرفت. کولرهای تبخیری مستقیم سلولوزی می‌توانند دمای هوا را به ۸۰ درصد دمای اشباع برسانند. درحالی‌که در کولرهای ارزان‌تر این مقدار بین ۴۰ تا ۷۰ درصد می‌باشد. با توجه به نوع پوشال و کیفیت و تنوع تولید در این دسته از وسایل، به‌صورت دقیق نمی‌توان عدد ثابتی را برای خنک کاری هوا در این وسایل در

همان‌طور که در بخش‌های قبل شرح داده شد، سیستم‌های تبخیری مورد استفاده در سرمایش ساختمان‌ها، به دو دسته برج‌های خنک‌کن آبی و کولرهای تبخیری (شامل ایرواشرها، کولرهای آبی پوشالی و کولرهای آبی سلولوزی) تقسیم می‌شوند. هرچند کولرهای تبخیری به صورت مستقیم اقدام به خنک نمودن هوای محیط می‌نمایند، اما برج‌های خنک‌کن آبی نقشی غیرمستقیم در سرمایش ساختمان داشته و تنها باعث خنک نمودن آب مورد استفاده در سایر سیستم‌های سرمایشی، نظیر چیلرهای تراکمی و جذبی، می‌شوند. با این حال، استفاده از هر دو وسیله فوق به علت محدود بودن منابع آبی در کشور همواره چالش برانگیز بوده و لزوم بررسی و تحلیل دقیق عملکرد

نظر گرفت. برای ایرواشرها به علت پاشش آب در هوا توسط افشانک‌ها، این مقدار بالاتر بوده و حدود ۹۰ درصد می‌باشد.

۳-۱- اعتبار سنجی مدل‌سازی عددی

جهت اعتبارسنجی مدل، از نتایج تجربی منتشر شده در مرجع [۵] که در شهرهای مختلف به دست آمده‌اند، استفاده شده است. لازم به ذکر است که تنوع در ظرفیت هوادهی کولرهای مورد استفاده در این آزمایش‌ها (از ۸۰۰ تا ۵۵۰۰ فوت مکعب بر دقیقه)، فرصت مناسبی را برای ارزیابی قابلیت تعمیم‌پذیری و استحکام^۱ مدل ترمودینامیکی پیشنهادی در پیش‌بینی عملکرد طیف وسیعی از کولرها فراهم می‌آورد. جدول ۲ اطلاعات این آزمایش‌ها و مقایسه نتایج تجربی با نتایج حاصل از مدل ترمودینامیکی را نشان می‌دهد. شکل ۳ مقایسه نتایج تجربی دمای هوای خروجی از کولر آبی را با نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی نشان می‌دهد. نتایج بیانگر خطای متوسط

۱/۹ درصدی مدل‌سازی در تخمین دمای خروجی هوا از کولر آبی بوده که دقت مناسب مدل را نشان می‌دهد.

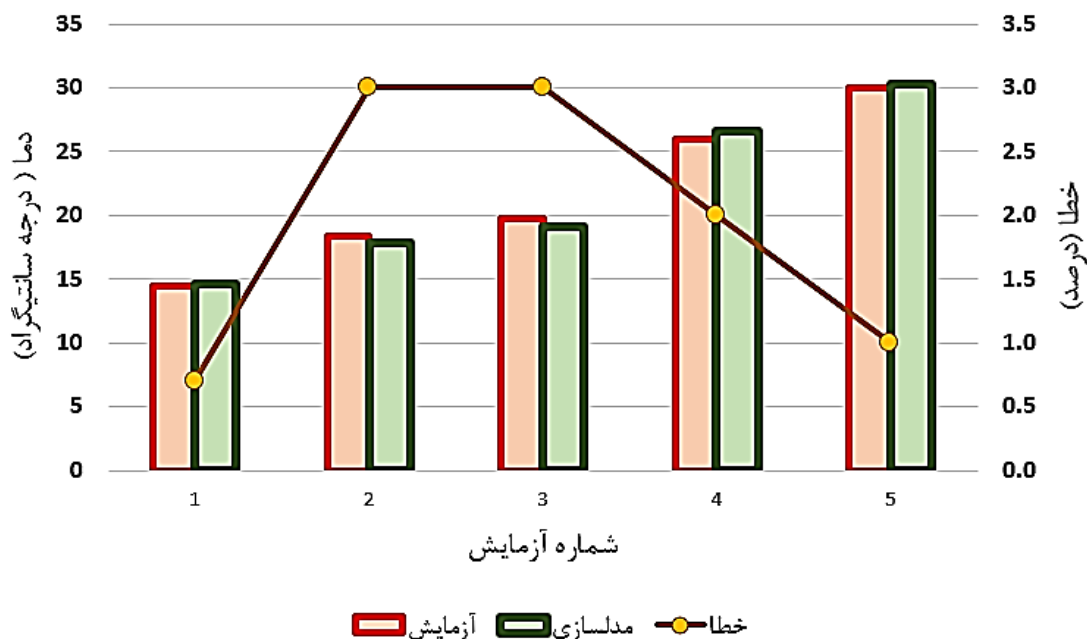
شکل ۴ مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی را با نتایج حاصل از آزمایش در شهرستان یزد (ردیف ۴، جدول ۱) نشان می‌دهد. نتایج بیانگر دقت ۷ درصدی مدل در پیش‌بینی مصرف آب کولر آبی می‌باشد. شایان ذکر است که پارامتر کلیدی راندمان اشباع در این پژوهش به عنوان یک پارامتر عملکردی و تجمعی^۲ در نظر گرفته شده است. این پارامتر نه تنها اثر مستقیم کیفیت و نوع پد خنک‌کننده (پوشالی یا سلولزی) را نمایندگی می‌کند، بلکه به طور ضمنی، اثرات واقعی دیگری مانند میزان تابش خورشید بر بدنه کولر یا وجود سایبان را نیز در خود منعکس می‌سازد. موفقیت مدل در اعتبارسنجی و تطابق نزدیک آن با داده‌های تجربی (با خطای پایین)، صحت این رویکرد مهندسی را برای اهداف پژوهش حاضر تأیید می‌نماید. لازم به ذکر است، عواملی نظیر نشتی آب در کولر، پخش نامناسب آب، رسوب‌گیری پوشال و ... از عوامل ایجادکننده تفاوت بین نتایج مدل‌سازی با نتایج واقعی هستند.

جدول ۲- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از مدل ترمودینامیک

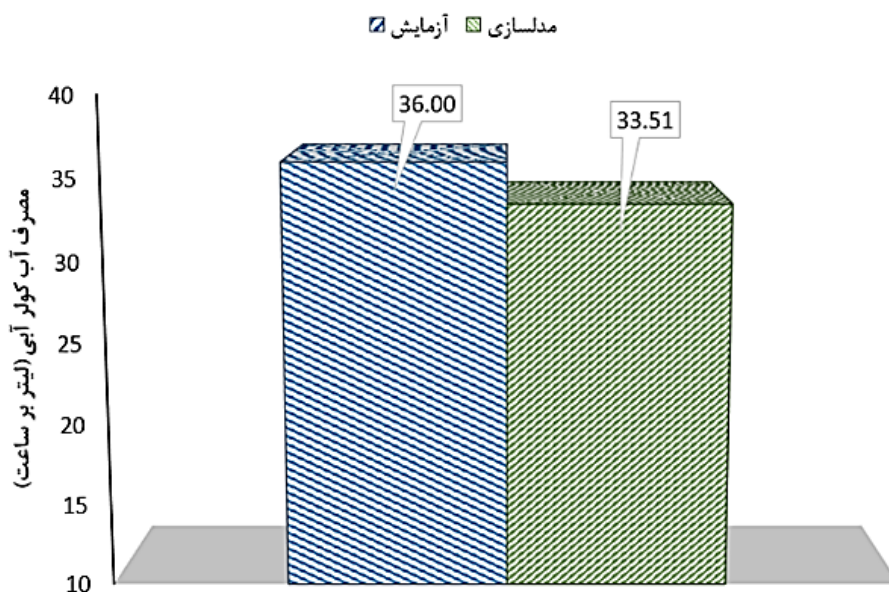
ردیف	شهر	راندمان اشباع %	دبی هوای ورودی (CFM)	رطوبت نسبی هوای ورودی %	دمای هوای ورودی (°C)	دمای هوای خروجی تجربی (°C)	دمای هوای خروجی مدل (°C)	درصد خطا %
۱	کرج	۸۰	۳۰۰۰	۱۴/۵	۲۶	۱۴/۵	۱۴/۶	۰/۷
۲	سمنان	۵۸	۸۰۰	۷	۲۸	۱۸/۴	۱۷/۸	۳
۳	سمنان	۶۲	۸۰۰	۵	۳۱/۵	۱۹/۷	۱۹/۱	۳
۴	یزد	۴۷	۵۵۰۰	۲۵	۳۳	۲۶	۲۶/۶	۲
۵	قم	۳۰	۴۵۰۰	۲۰	۳۵	۳۰	۳۰/۳	۱

^۱ Robustness

^۲ Lumped Parameter



شکل ۳- مقایسه دمای خروجی از کولر تبخیری مستقیم در حالت تجربی با مدل سازی ترمودینامیکی



شکل ۴- مقایسه مصرف آب کولر تبخیری مستقیم در حالت تجربی با مدل سازی ترمودینامیکی

ارتفاع از سطح دریای محل نصب، راندمان اشباع و دبی هوای ورودی به کولر می باشند. برای بررسی کاربرد مدل پیشنهاد شده در پیش بینی عملکرد کولر آبی، یک مطالعه موردی در اقلیم شهر سمنان به شرح زیر صورت گرفته است.

۳-۲- بررسی عملکرد کولر آبی در شرایط مختلف روابط (۱) تا (۱۳) نشان می دهند که عملکرد کولر آبی شامل مصرف آب، دما و رطوبت نسبی هوای خروجی از آن تابعی از پنج پارامتر دمای هوای ورودی، رطوبت نسبی هوای ورودی،

۳-۲-۱- مطالعه موردی - بررسی عملکرد کولر آبی در

اقلیم گرم و خشک مرکز استان سمنان

شهر سمنان در طول جغرافیایی ۵۳ درجه و ۲۳ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۳۴ دقیقه واقع شده و ارتفاع متوسط آن از سطح دریا ۱۱۲۷ متر است. آب و هوای این شهر در تابستان گرم و خشک و در زمستان نسبتاً سرد است. متوسط درجه حرارت سالانه ۱۸/۴ درجه سانتی گراد بوده و این در حالی است که حداکثر مقدار دمای خشک ۴۲/۵ درجه سانتی گراد (با رطوبت نسبی ۱۲٪) و حداقل مقدار دمای خشک منفی ۵/۴ درجه سانتی گراد (با رطوبت نسبی ۸۷٪) گزارش شده است. از آنجا که متوسط درجه حرارت سالانه این شهر کمتر از ۲۱ درجه سانتی گراد است، از دیدگاه مبحث ۱۹ مقررات ملی ایران، شهر سمنان از نظر گونه بندی درجه انرژی (گرمایی - سرمایی)، دارای درجه انرژی متوسط با نیاز غالب گرمایشی است. بررسی داده های هواشناسی شهر سمنان در طی یک سال در نرم افزار مشاور اقلیم^۱ و بر روی نمودار سایکرومتریک نشان می دهد که فقط در ۹/۳ درصد ساعات سال (حدود ۸۱۵ ساعت) دمای هوای محیط سمنان در شرایط آسایش حرارتی قرار دارد. این در حالی است که در باقی ساعات به سیستم های تهویه مطبوع برای ایجاد شرایط آسایش حرارتی نیاز خواهیم داشت. نتایج همچنین نشان می دهند که در شهر سمنان و جهت ایجاد شرایط آسایش، در ۳۶/۸ درصد ساعات سال نیاز به سیستم سرمایشی خواهیم داشت که در این میان ۳۴/۶ درصد مواقع (۳۰۲۷ ساعت) سیستم های تبخیری مستقیم پاسخگوی تأمین شرایط آسایش خواهند بود.

جهت بررسی تأثیر راندمان اشباع بر عملکرد کولرهای آبی، اطلاعات دما و رطوبت نسبی روزانه شهر سمنان در مدل ترمودینامیک وارد شده و نتیجه خروجی از مدل ترمودینامیکی در شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج نشان می دهند که با افزایش راندمان اشباع کولر آبی ۵۰۰۰، مقدار مصرف آب در این وسیله افزایش یافته، به طوری که با افزایش این مقدار از ۴۰٪ به ۹۰٪، مقدار مصرف آب در کولر نیز به صورت متوسط حدود ۱۳۰٪ افزایش می یابد. حداکثر مقدار مصرف آب روزانه برای کولر آبی ۵۰۰۰ در شرایط آب و هوایی سمنان برابر ۶۶۴،

۸۶۲، ۱۲۶۵ و ۱۶۲۳ لیتر در روز به ترتیب برای راندمان اشباع ۰/۴، ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۹ خواهد بود.

شکل ۶ مصرف کل یک کولر آبی ۵۰۰۰ را در چهار ماه گرم سال (ماه می تا آگوست) با توجه به شرایط آب و هوایی شهر سمنان نشان می دهد. در محاسبات انجام شده فرض شده است که کولر آبی در این مدت همواره روشن و در حال ایجاد سرمایش در ساختمان بوده است. نتایج نشان می دهند که با افزایش راندمان اشباع از ۴۰ درصد به ۹۰ درصد، مصرف کل آب کولر آبی ۵۰۰۰ در شهر سمنان از ۶۷۳۱۵ لیتر به ۱۵۶۳۶۷ لیتر افزایش می یابد. این به معنای افزایش ۲/۳ برابری مصرف آب کولر آبی می باشد.

همچنین، برای بررسی تأثیر راندمان اشباع بر مصرف آب این وسیله، شرایط گرم ترین روز ۲۰ سال اخیر شهر سمنان (دمای ۴۲/۵ درجه سانتی گراد و رطوبت نسبی ۱۰ درصد) در مدل ترمودینامیکی وارد شده و نتایج در شکل ۷ برای انواع کولر ارائه گردیده است. نتایج نشان می دهند که راندمان اشباع و دبی هوای کولر تأثیر مستقیم بر روی مصرف آب کولر دارند. به عنوان مثال در یک کولر سلولوزی (راندمان اشباع نزدیک ۹۰٪)، 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 ۰/۴۵ استفاده نماییم، مصرف آب این کولر حدود ۲/۵ برابر کمتر خواهد بود. هرچند دمای هوای خروجی نیز بیشتر خواهد بود.

شکل ۸ تأثیر تغییرات دمای هوای ورودی را بر مصرف آب یک کولر آبی معمولی با راندمان اشباع ۵۰٪ نشان می دهد. نتایج نشان می دهند که دمای هوای ورودی تأثیر مستقیم بر روی مصرف آب کولر آبی داشته، به طوری که در همه حالات با افزایش دمای هوا از ۲۵ درجه سانتی گراد به ۴۵ درجه سانتی گراد، مصرف آب ۱۶۰ درصد افزایش خواهد یافت. به عنوان مثال در یک کولر آبی ۵۰۰۰، مصرف آب با افزایش دمای هوا از ۲۵ به ۴۵ درجه سانتی گراد، به ترتیب از ۲۶/۲ لیتر بر ساعت به ۴۳ لیتر بر ساعت افزایش خواهد یافت.

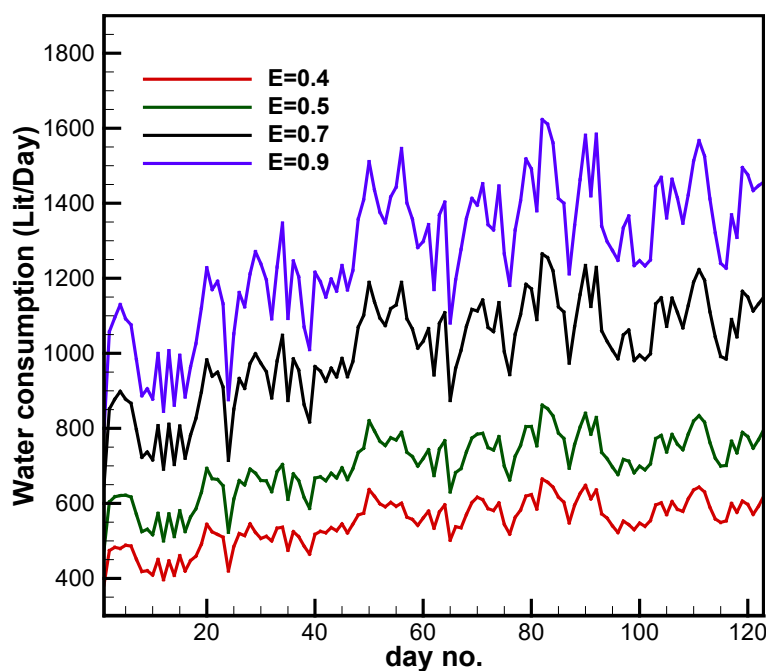
رابطه (۹) نشان می دهد که دمای هوای خروجی از کولر، تابعی از دمای هوای ورودی، راندمان اشباع آدیاباتیک و دمای مرطوب هوا (خود تابعی از دمای هوای خشک و رطوبت نسبی) است. شکل ۹ تأثیر این پارامترها را بر دمای هوای خروجی از

^۱ Climate consultant

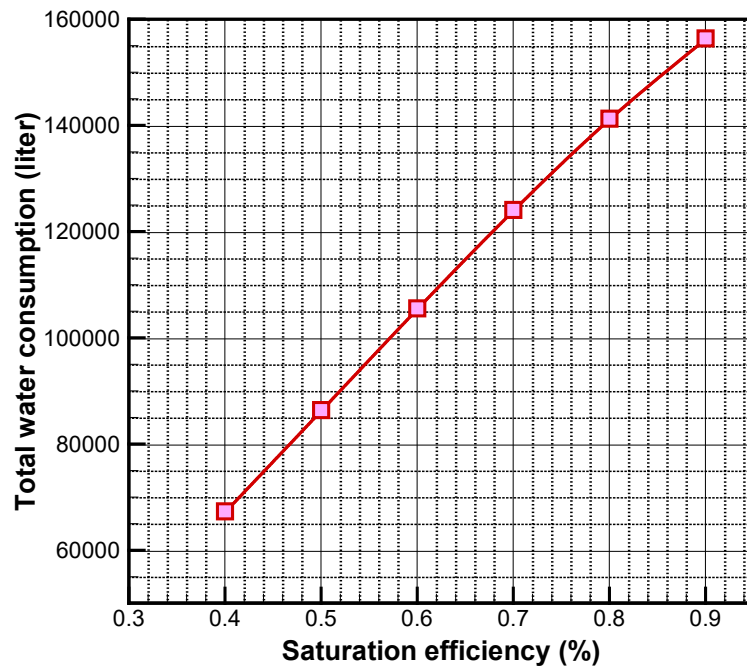
۳-۲-۲- بررسی تأثیر ارتفاع شهر محل قرارگیری کولر آبی در مصرف آب

با توجه به روابط ۵ تا ۱۰ مشخص است که ارتفاع از سطح دریا بر روی فشار محیط، رطوبت نسبی، رطوبت مخصوص و دمای مرطوب تأثیرگذار است. از آنجاکه فرایند تبخیر در کولر آبی فرایندی با دمای مرطوب ثابت است، تغییر ارتفاع بر روی شرایط خروجی از کولر آبی نیز تأثیرگذار خواهد بود. شکل‌های ۹ تا ۱۱ تأثیر ارتفاع شهر محل نصب دستگاه را بر روی مصرف آب کولر آبی در شرایط مختلف محیطی و راندمان اشباع آدیاباتیک نشان می‌دهند. نتایج بیانگر این موضوع هستند که افزایش ارتفاع همواره باعث افزایش مصرف آب خواهد شد.

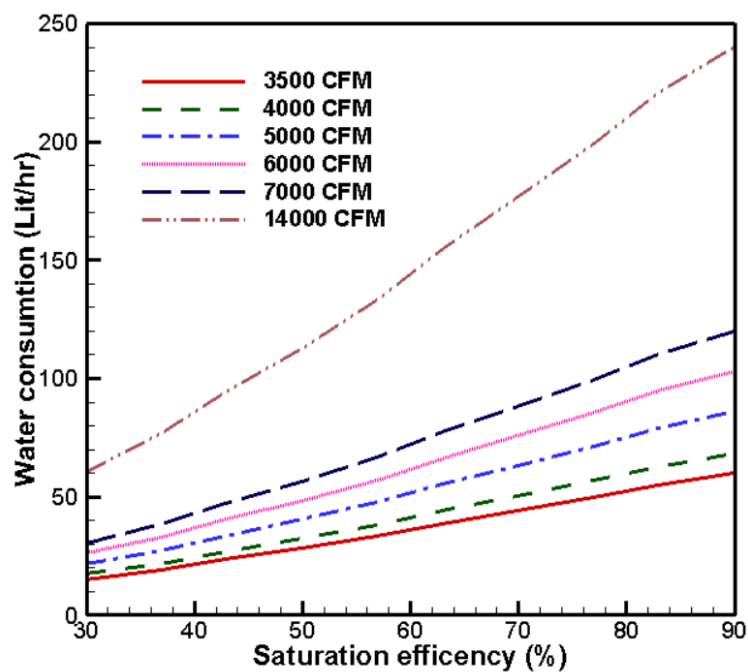
یک کولر آبی با راندمان اشباع ۵۰٪ ارائه می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که در یک دمای هوای ثابت ورودی، با افزایش رطوبت نسبی هوای ورودی از ۵ درصد به ۶۵ درصد، دمای هوای خروجی تقریباً ۱۳۳ درصد افزایش می‌یابد. نتایج همچنین نشان می‌دهند که اگر رطوبت نسبی هوا بیشتر از ۶۵ درصد باشد، عملاً کولر آبی توانایی خنک نمودن هوا را از دست خواهد داد. لازم به ذکر است در عمل هرچه سرعت هوای ورودی به کولر بیشتر شود، به علت کاهش زمان تماس بین هوا و پوشال، دمای هوای خروجی از کولر افزایش می‌یابد. در این حالت لازم است توجه ویژه به نوع پوشال، میزان تخلخل و فشردگی آن صورت گیرد. در این شکل همچنین، نواحی آسایش حرارتی با رنگ زرد مشخص شده است که می‌تواند طراحان را از قرارگیری دمای هوای خروجی در محدوده آسایش حرارتی آگاه نماید.



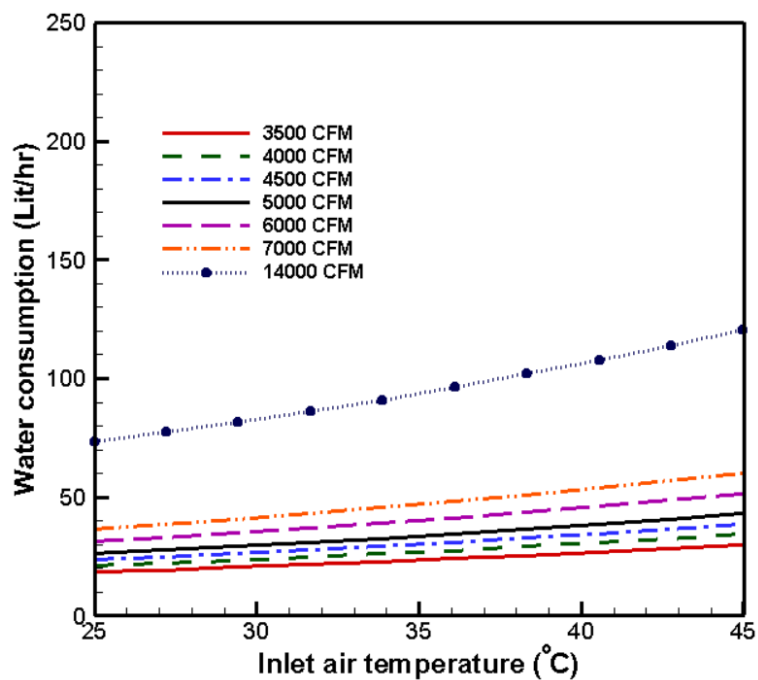
شکل ۵- مصرف آب کولر آبی ۵۰۰۰، بین ماه‌های می تا آگوست در شهر سمنان



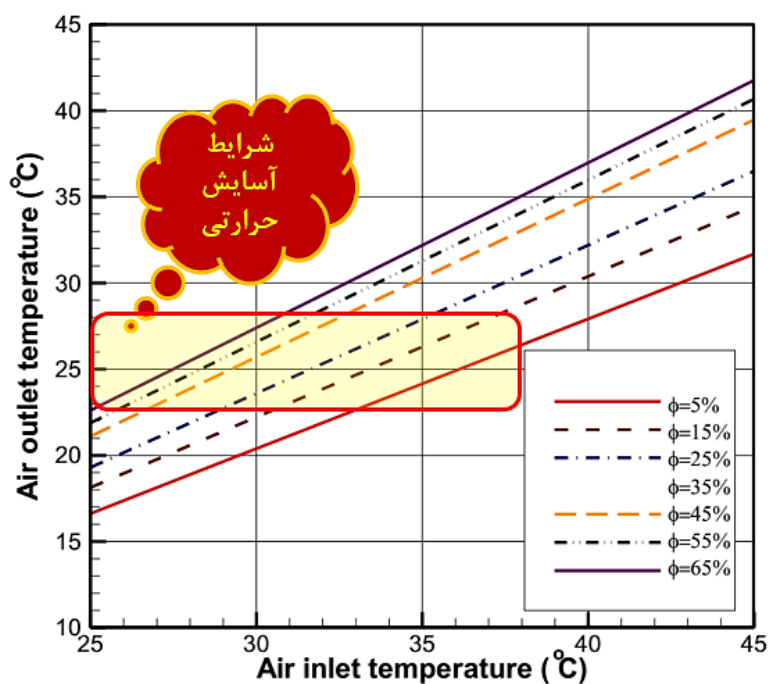
شکل ۶- مصرف کل آب کولر آبی ۵۰۰۰، در چهار ماه گرم سال در شهر سمنان



شکل ۷- تأثیر راندمان اشباع بر مصرف آب کولر آبی در گرم‌ترین ساعت شهر سمنان در
($T_{da,1}=42/5^{\circ}\text{C}$, $\phi_1 = 10\%$)



شکل ۸- تأثیر دمای هوای ورودی بر مصرف آب انواع کولر آبی در شرایط
($\phi_1 = 10\%$, $E = 50\%$)



شکل ۹- تأثیر رطوبت نسبی و دمای هوای ورودی بر دمای خروجی از کولر آبی (شهر سمنان، راندمان اشباع ۵۰٪)

همان ارتفاع و با دبی هوای ۳۵۰۰ فوت مکعب بر دقیقه، این مقدار به حدود ۴۰ لیتر بر ساعت کاهش می‌یابد.

۳-۲-۳ بررسی پارامترهای مؤثر بر مصرف آب کولر آبی با روش طراحی فاکتوریل کامل

نتایج ارائه شده در بخش قبل نشان می‌دهند که دبی هوا، دما و رطوبت نسبی هوای ورودی، ارتفاع از سطح دریا و راندمان اشباع کولر آبی، پنج پارامتر کلیدی تأثیرگذار بر روی مصرف آب و ظرفیت سرمایش آن هستند. در این پژوهش، برای بررسی تأثیر همزمان این پنج پارامتر کلیدی بر عملکرد کولرهای آبی، از روش طراحی آزمایش فاکتوریل کامل استفاده شده است. این روش قدرتمند آماری علاوه بر اینکه امکان بررسی جداگانه تأثیر هر یک از پارامترها را فراهم می‌آورد، تأثیر تعاملات بین آن‌ها را نیز بر روی متغیرهای پاسخ، یعنی مصرف آب و دمای هوای خروجی کولر، ارزیابی می‌کند.

شایان ذکر است علت استفاده از طرح فاکتوریل کامل دو سطحی توجه به هدف اصلی پژوهش در شناسایی اثرات اصلی و برهم‌کنش‌های دوطرفه، بوده است. این روش در مقایسه با طرح‌های پیشرفته‌تر مانند طرح مرکب مرکزی^۱، اگرچه اثرات درجه دوم را مدل نمی‌کند، اما برای تحلیل کمی اثر پارامترها بدون نیاز به آزمایش‌های اضافی، کارآمدتر و مناسب‌تر است.

در این تحقیق با توجه به استفاده از یک مدل ترمودینامیکی معتبر برای شبیه‌سازی عملکرد کولر، نیازی به انجام آزمایش‌های فیزیکی پرهزینه و زمان‌بر نبوده و نتایج مورد نیاز از اجرای مدل در شرایط مختلف به دست آمده است. در این طراحی، هر یک از پنج پارامتر مؤثر در دو سطح (بالا و پایین) در نظر گرفته شده و تمامی ترکیبات ممکن از سطوح مختلف این پارامترها برای انجام شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شده است. جدول ۳ فاکتورهای مورد استفاده در طراحی آزمایش فاکتوریل کامل و سطوح بالا و پایین آن‌ها را ارائه داده است.

در طراحی فاکتوریل کامل با پنج پارامتر و دو سطح برای هر پارامتر، تعداد کل شبیه‌سازی‌های لازم برابر با ۲ به توان ۵ یا ۳۲ حالت خواهد بود. این تعداد شبیه‌سازی امکان بررسی دقیق تأثیرات اصلی هر پارامتر و همچنین اثرات متقابل آن‌ها بر متغیرهای پاسخ فراهم می‌آورد. لازم به ذکر است که در

شکل ۱۰ مصرف آب یک کولر آبی را تحت تأثیر مستقیم ارتفاع از سطح دریا و دمای هوای ورودی نشان می‌دهد. نتایج بیان می‌کنند که با افزایش هر ۱۰۰ متر از ارتفاع، مصرف آب کولر به طور متوسط ۰/۴ لیتر بر ساعت افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، در ارتفاع ۱۵۰۰ متری از سطح دریا و دمای هوای ورودی ۴۵ درجه سانتی‌گراد، مصرف آب کولر به حدود ۴۵ لیتر بر ساعت می‌رسد که نسبت به شرایط مشابه در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد (۳۰ لیتر بر ساعت) حدود ۵۰ درصد افزایش را نشان می‌دهد. افزایش مصرف آب با افزایش ارتفاع عمده‌تأ به دلیل کاهش فشار هوا و افزایش ظرفیت تبخیری آب در ارتفاعات بالاتر رخ می‌دهد. همچنین، افزایش دما منجر به افزایش تبخیر آب و در نتیجه افزایش مصرف آب می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد که در مناطق با ارتفاع زیاد و دمای بالا، انتخاب کولر آبی با ظرفیت مناسب و مدیریت مصرف آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

شکل ۱۱ تأثیر ارتفاع از سطح دریا و راندمان اشباع کولر آبی را بر میزان مصرف آب را در دمای ورودی هوا ۴۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۱۰ درصد نشان می‌دهد. بر اساس داده‌های ارائه‌شده در این نمودار، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ارتفاع از سطح دریا، مصرف آب کولر آبی به طور خطی افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش راندمان اشباع کولر (E)، میزان مصرف آب نیز افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که ارتفاع و ظرفیت سرمایشی دو عامل بسیار مهم در تعیین مصرف آب کولر آبی هستند. با افزایش هر یک از این دو عامل، مصرف آب کولر به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد که علت این افزایش را می‌توان به عوامل مختلفی از جمله کاهش فشار هوا در ارتفاعات بالا و افزایش نیاز به تبخیر آب برای خنک‌سازی هوا نسبت داد.

شکل ۱۲ به بررسی تأثیر ارتفاع از سطح دریا و دبی هوای ورودی بر میزان مصرف آب یک کولر آبی می‌پردازد. بر اساس داده‌های ارائه شده در این نمودار، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ارتفاع از سطح دریا و همچنین با افزایش دبی هوای ورودی به کولر آبی، میزان مصرف آب به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، در ارتفاع ۱۵۰۰ متری از سطح دریا و با دبی هوای ۱۴۰۰۰ فوت مکعب بر دقیقه، مصرف آب کولر آبی به حدود ۱۲۰ لیتر بر ساعت می‌رسد، در حالی که در

^۱ Central Composite Design (CCD)

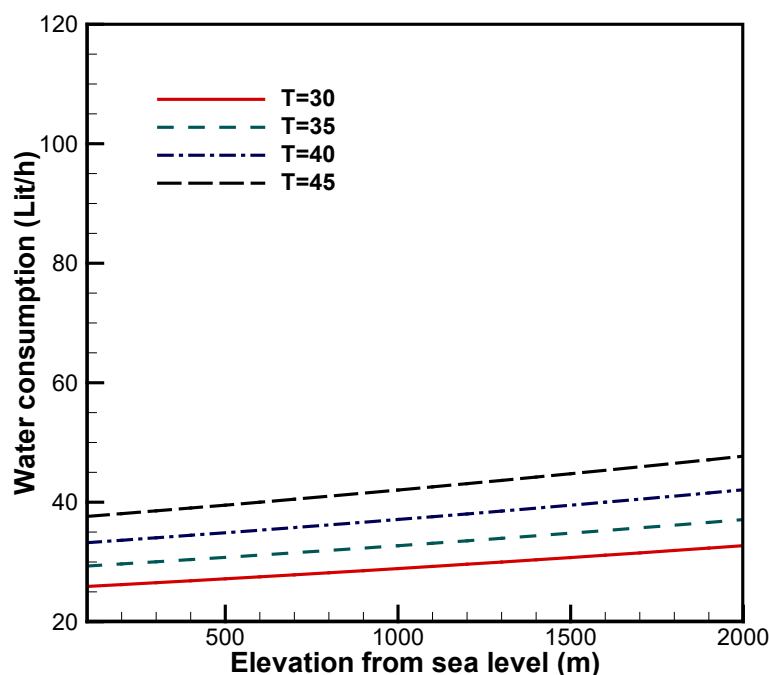
تخمین مصرف آب و دمای خروجی کولر در شرایط مختلف عملیاتی مورد استفاده قرار گرفته، همچنین، در طراحی و بهینه‌سازی عملکرد کولرهای آبی بسیار مفید باشند.

جدول ۳- فاکتورهای مورد استفاده در طراحی آزمایش

فاکتوریل کامل و سطوح بالا و پایین آن‌ها

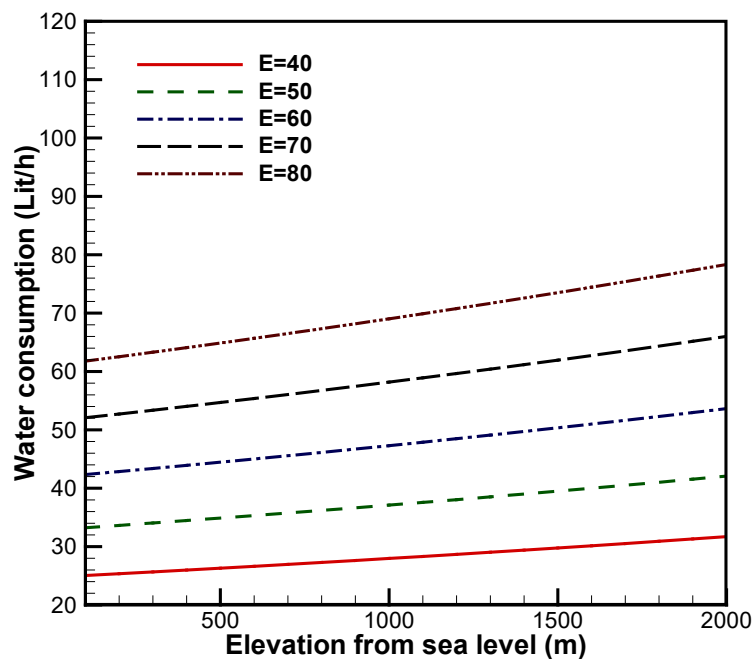
فاکتور	برچسب	واحد	سطح پایین	سطح بالا
راندمان اشباع	A	%	۴۰	۹۰
دبی ورودی	B	CFM	۲۰۰۰	۱۴۰۰۰
دمای ورودی	C	°C	۲۷	۵۰
رطوبت نسبی ورودی	D	%	۵	۶۰
ارتفاع از سطح دریا	E	m	۲۰	۲۰۰۰

تحلیل فاکتوریل انجام شده، تنها اثرات اصلی و برهمکنش‌های دوتایی بین پارامترها در نظر گرفته شده و از برهمکنش‌های مرتبه بالاتر (سه‌تایی، چهارتایی و ...) به دلیل پیچیدگی بیشتر و احتمالاً تأثیر کمتر آن‌ها صرف‌نظر شده است. این ساده‌سازی با هدف تمرکز بر مهم‌ترین اثرات و ارائه تحلیلی قابل‌فهم‌تر انجام شده است. سپس، با استفاده از تکنیک‌های آماری پیشرفته از جمله تحلیل واریانس^۱ و مدل‌های رگرسیونی، تأثیر هر یک از عوامل و تعاملات آن‌ها بر روی متغیرهای پاسخ (مصرف آب کولر) به صورت کمی بررسی می‌شود. تحلیل واریانس به ما کمک می‌کند تا اهمیت آماری تأثیر هر عامل و تعامل آن با سایر عوامل را تعیین کنیم. مدل‌های رگرسیونی نیز روابط ریاضی بین متغیرهای مستقل (پارامترها) و متغیرهای وابسته (مصرف آب) را به صورت معادلات ریاضی استخراج می‌کنند. بدین ترتیب، می‌توان به طور دقیق تعیین کرد که کدام یک از پارامترها و یا ترکیبات آن‌ها بیشترین تأثیر را بر روی مصرف آب کولر دارند. این روابط ریاضی استخراج شده می‌توانند به عنوان یک مدل پیش‌بینی‌کننده دقیق برای

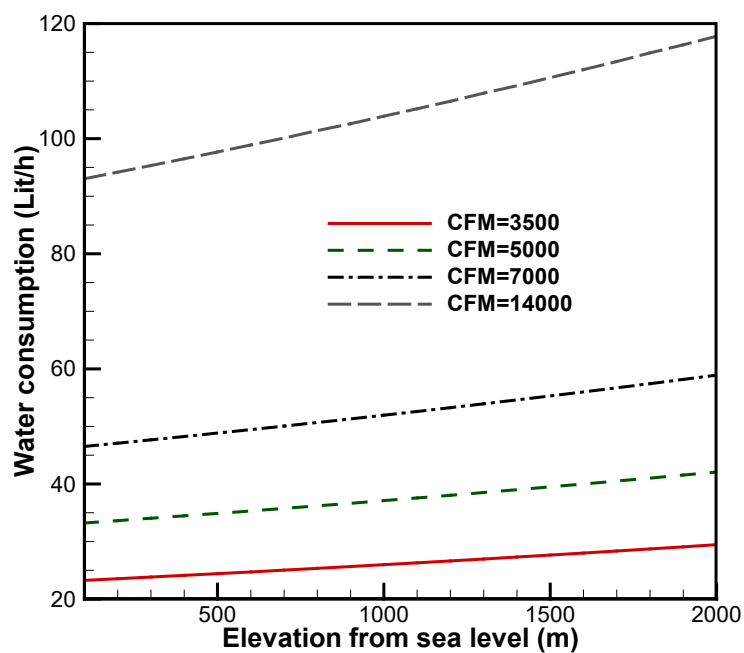


شکل ۱۰- تأثیر ارتفاع و دمای هوای ورودی بر دمای هوای خروجی از کولر آبی ۵۰۰۰
($\phi_1 = 10\%$, $E = 50\%$)

^۱ ANOVA



شکل ۱۱- تأثیر ارتفاع و راندمان اشباع بر مصرف آب کولر آبی ۵۰۰۰
($\Delta t_{da,1}=4.0^{\circ}\text{C}$, $\phi_1 = 0.10$)



شکل ۱۲- تأثیر ارتفاع و دبی هوای ورودی بر مصرف آب کولر آبی
($\Delta t_{da,1}=4.0^{\circ}\text{C}$, $\phi_1 = 0.10$, $E=0.50$)

راندمان اشباع بیشترین تأثیر را بر مصرف آب داشته، همچنین، دبی هوا و رطوبت نسبی بیشترین تأثیر را بر ظرفیت سرمایش کولر آبی دارند. سایر عوامل و برهم‌کنش‌ها نیز با توجه به طول میله‌هایشان در نمودار، به ترتیب اهمیت خود قرار گرفته‌اند.

با استفاده از نتایج روش فاکتوریل کلی و استفاده از رگرسیون خطی می‌توان روابط (۱۴) و (۱۵) را برای محاسبه مصرف آب و ظرفیت سرمایش کولر آبی، بر حسب عوامل تأثیرگذار روی آن‌ها، پیشنهاد داد. در این روابط مقادیر E و CFM به ترتیب برحسب درصد و فوت مکعب بر دقیقه می‌باشند. جدول ۴ معیارهای آماری ارزیابی دقت مدل‌های رگرسیونی روابط (۱۴) و (۱۵) را ارائه می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که مدل‌ها از توانایی بالایی در پیش‌بینی ظرفیت سرمایش و مصرف آب برخوردار هستند. میانگین خطای مطلق^۳ و جذر میانگین مربعات خطا^۴ به ترتیب ۶/۷ و ۸/۷ کیلووات برای مدل ظرفیت سرمایش و ۹/۴ و ۱۴ لیتر بر ساعت برای مدل مصرف آب محاسبه شد که با توجه به ماهیت تقریبی و کاربردی این مدل‌ها، قابل قبول ارزیابی می‌شوند.

جداول ۵ و ۶ خلاصه‌ای از تحلیل واریانس (ANOVA) برای مدل‌های رگرسیونی ظرفیت سرمایش و مصرف آب را ارائه می‌دهند. مقادیر P-Value کمتر از ۰/۰۵ برای عوامل اصلی و برخی برهم‌کنش‌ها، معنی‌داری آماری آن‌ها را نشان می‌دهد. همانطور که پیش از این شرح داده شد، برای تحلیل بصری اهمیت نسبی عوامل و برهم‌کنش‌ها، از نمودارهای پارتو و نرمال (شکل‌های ۱۳ و ۱۴) استفاده شده است که ترتیب اولویت عوامل تأثیرگذار را به‌صورت شهودی نشان می‌دهند. شکل ۱۵ مقایسه ظرفیت سرمایش کولر آبی محاسبه شده از رابطه (۱۴) را با حالت تجربی و مدلسازی ترمودینامیکی برای سه شهر قم، یزد و کرج نشان می‌دهد. نتایج بیانگر دقت متوسط ۱۳ درصدی معادله (۱۴) نسبت به نتایج آزمایشگاهی می‌باشد. شکل ۱۶ مقایسه مصرف آب کولر تبخیری را، که توسط رابطه (۱۵) محاسبه شده است، نسبت به حالت تجربی (ردیف ۴ جدول ۱) و مدلسازی ترمودینامیک نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودار مشخص است، معادله (۱۵) می‌تواند با دقت قابل قبولی (با خطای حدود ۱۶ درصد نسبت به نتایج آزمایشگاهی و ۱۰ درصد نسبت به مدلسازی) مقدار آب مصرفی کولر آبی را

شکل ۱۳ نمودارهای نرمال^۱ حاصل از روش فاکتوریل کامل را برای بررسی عوامل تأثیرگذار روی مصرف آب و ظرفیت سرمایش کولر آبی را نشان می‌دهد. در نمودار نرمال، انحراف نقاط از خط مرجع نرمال، نشان‌دهنده شدت و جهت تأثیر هر عامل یا برهم‌کنش بین عوامل بر روی متغیر پاسخ (یعنی مصرف آب کولر) است. به عبارت دیگر، نقاطی که به طور قابل توجهی از خط مرجع دور هستند، نشان می‌دهند که تغییرات در آن عامل یا برهم‌کنش، تأثیر آماری معنی‌داری بر مصرف آب و ظرفیت سرمایش دارند. با بررسی دقیق این نمودار به این نتیجه می‌توان رسید که عوامل تأثیرگذار بر مصرف آب به ترتیب دبی هوا، راندمان اشباع، دمای هوای ورودی و سپس ارتفاع از سطح دریا می‌باشند. برخی از برهم‌کنش‌های بین این عوامل مانند برهم‌کنش دبی هوا در راندمان اشباع، دبی در دمای هوا نیز تأثیر قابل توجهی بر مصرف آب کولر دارند. از طرف دیگر، عوامل تأثیرگذار بر ظرفیت سرمایش نیز به ترتیب دبی هوا، رطوبت نسبی، راندمان اشباع و دمای هوای ورودی می‌باشند. همچنین، برخی از برهم‌کنش‌های بین این عوامل نیز مانند برهم‌کنش دبی در راندمان اشباع و دبی در رطوبت هوا نیز تأثیر قابل توجهی بر مصرف آب کولر دارند. بررسی نمودار نرمال نشان می‌دهد که تأثیر رطوبت هوای ورودی و برخی از برهم‌کنش‌ها بر مصرف آب و تأثیر رطوبت هوا، ارتفاع و برخی برهم‌کنش‌ها نیز بر روی ظرفیت سرمایش کولر آبی تأثیری منفی می‌باشد. به‌طورکلی، این نمودار به ما کمک می‌کند تا عوامل کلیدی، که بر روی عملکرد کولر تأثیر می‌گذارند، را شناسایی نماییم.

شکل ۱۴ نمودار پارتو^۲ حاصل از روش فاکتوریل کامل را برای بررسی عوامل تأثیرگذار روی مصرف آب کولر آبی نشان می‌دهد. این نمودار یک ابزار بصری قدرتمند برای شناسایی مهم‌ترین عوامل مؤثر بر مصرف آب کولر آبی بوده که از طریق تحلیل واریانس به دست آمده است. این نمودار، عوامل و برهم‌کنش‌های مختلف را به صورت نزولی و بر اساس میزان تأثیرگذاری آن‌ها بر روی متغیر پاسخ (یعنی مصرف آب و ظرفیت سرمایش) مرتب می‌کند. میله‌های بلندتر نشان‌دهنده عوامل یا برهم‌کنش‌هایی هستند که بیشترین تأثیر را بر مصرف آب و ظرفیت سرمایش دارند. مشاهده می‌شود که دبی هوا و

^۳ Mean absolute error (MAE)

^۴ Root mean square error (RMSE)

^۱ Normal plot

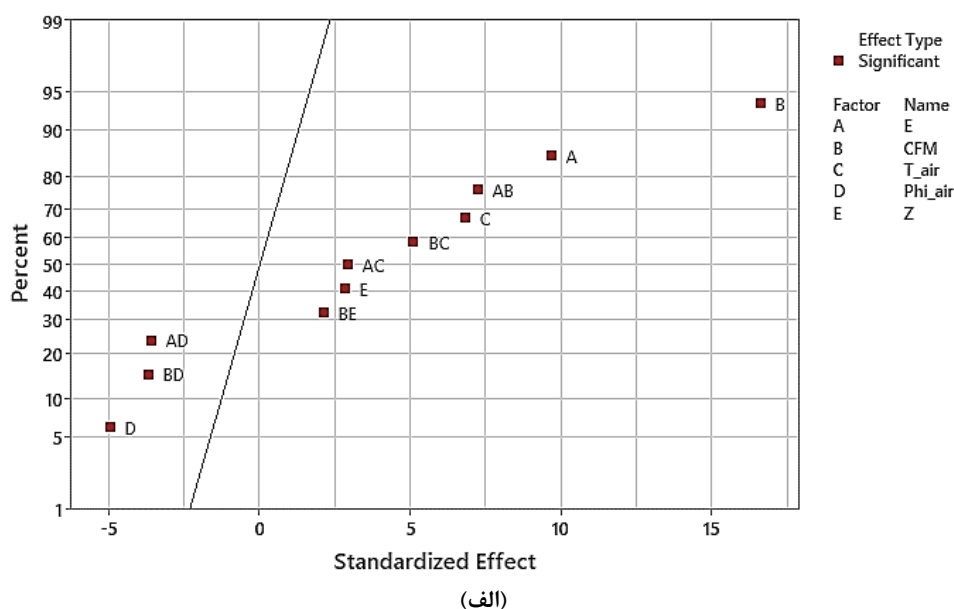
^۲ Pareto plot

حباب خشک و رطوبت نسبی را برای شهر شاهرود نشان می‌دهد. به همین ترتیب برای سایر شهرها نیز می‌توان تغییرات ساعتی دما و رطوبت نسبی را به دست آورد. با قرار دادن مقادیر دمای هوای بالاتر از ۲۷ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی مربوط به آن، در رابطه (۱۵) و جمع مقادیر مصرف ساعتی آب به دست آمده، می‌توان مصرف کل آب کولرهای تبخیری را در ایام گرم سال برای شهرهای مختلف مورد محاسبه قرار داد. جدول ۸ مصرف سالیانه آب کولرهای تبخیری را در شهرهای منتخب برحسب مترمکعب در سال ارائه می‌دهد. در محاسبه نتایج ارائه شده، کولرهای ۵۰۰۰ و ۷۰۰۰ به عنوان متداول‌ترین کولرهای تبخیری و مقادیر راندمان اشباع ۵۰ درصد و ۷۰ درصد نیز به عنوان راندمان اشباع متداول برای کولرهای پوشالی و سلولوزی در نظر گرفته شده‌اند. نتایج بیانگر بیشترین مصرف آب به ترتیب در شهرهای یزد، شیراز و قم بوده، این در حالی است که کمترین مصرف آب در شهرهایی با اقلیم سردتر مانند تبریز، شهرکرد و شاهرود رخ خواهد داد.

پیش‌بینی کند. لذا این معادله می‌تواند به عنوان یک معادله عمومی و سرانگشتی برای محاسبه و تخمین مقدار آب مصرفی کولرهای آبی مورد استفاده قرار گیرد. برای این منظور، از معادله (۱۵) برای محاسبه مصرف آب کولرهای تبخیری در چند شهر منتخب کشور ایران استفاده شده است. جدول ۷ اطلاعات مربوط به شهرهای مورد نظر و ساعات مورد نیاز به سرمایش را، بر اساس استاندارد اشری ۵۵، ارائه می‌دهد. برای محاسبه مصرف آب کولرهای تبخیری در شهرهای ذکر شده در جدول ۷، فرض شده است که در دماهای بالاتر از ۲۷ درجه سانتی‌گراد، شرایط عدم آسایش در محیط برقرار بوده و در نتیجه، ساکنین اقدام به استفاده از کولرهای تبخیری برای ایجاد سرمایش خواهند نمود [۴۵].

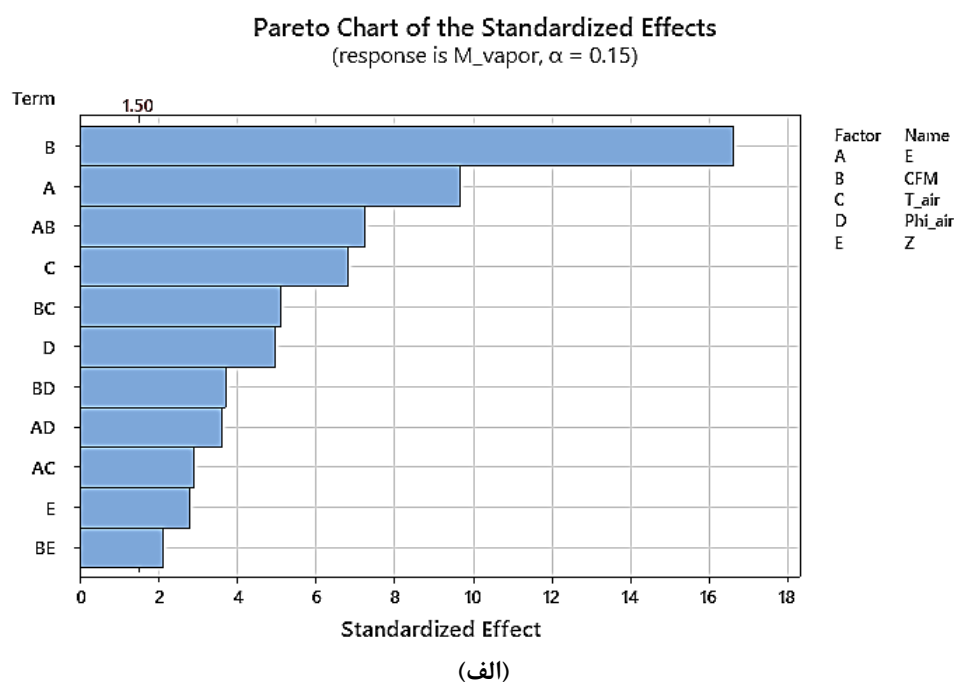
با استفاده از اطلاعات ساعتی دمای هوا و رطوبت نسبی، که از فایل اطلاعات اقلیمی شهرهای جدول ۳ (فایل EPW) موجود در سایت مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی) استخراج می‌شود و رابطه (۱۵) می‌توان مصرف ساعتی آب کولرهای تبخیری را به دست آورد. همچنین با جمع این مقادیر، مصرف سالیانه آب کولرهای تبخیری را نیز می‌توان محاسبه نمود. به عنوان مثال، شکل ۱۶ تغییرات ساعتی دمای

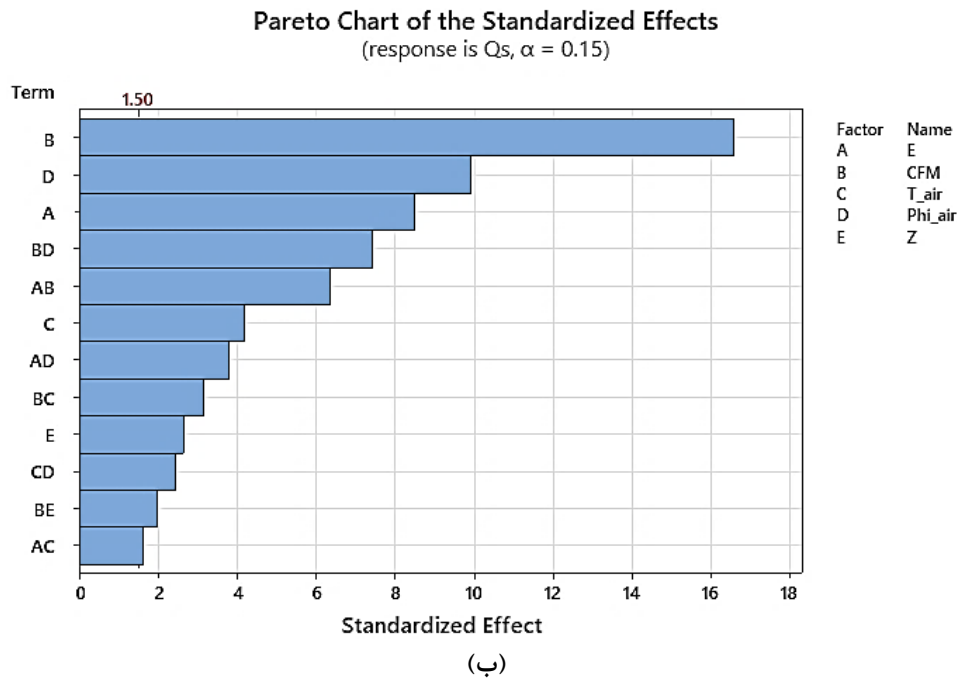
Normal Plot of the Standardized Effects
(response is M_vapor, $\alpha = 0.15$)





شکل ۱۳- نمودار نرمال پلات اثرات استاندارد شده بر الف) مصرف آب کولر آبی ب) ظرفیت سرمایش





شکل ۱۴- نمودار پارتو اثرات استاندارد شده و رتبه بندی عوامل مؤثر بر الف) مصرف آب کولر آبی ب) ظرفیت سرمایش

$$Q = -14.4 - 0.054 \times E_s + 0.00017 \times CFM - 0.194 \times T_{air,1} + 1.45 \times RH_1 + 0.000077 \times E_s \times CFM + 0.01016 \times E_s \times T_{air,1} - 0.01225 \times E_s \times RH_1 + 0.000083 \times CFM \times T_{air,1} - 0.0001 \times CFM \times RH_1 - 0.000001 \times CFM \times Z - 0.01697 \times T_{air,1} \times RH_1 \quad (13)$$

$$\dot{M}|_{Hourly} = 44.0 - 0.677 \times E_s - 0.00899 \times CFM - 2.089 \times T_{air,1} + 1.325 \times RH_1 + 0.000154 \times E_s \times CFM + 0.0321 \times E_s \times T_{air,1} - 0.02038 \times E_s \times RH_1 + 0.000236 \times CFM \times T_{air,1} - 0.000088 \times CFM \times RH_1 + 0.000001 \times CFM \times Z \quad (14)$$

جدول ۴- معیارهای آماری ارزیابی دقت مدل های رگرسیونی ارائه شده در روابط (۱۴) و (۱۵)

مدل	ضریب تعیین یا R^2	خطای مطلق میانگین MAE	جذر میانگین مربعات خطا RMSE
ظرفیت سرمایش رابطه (۱۴)	۰/۹۶۷	۶/۷ کیلووات	۸/۷ کیلووات
مصرف آب ساعتی رابطه (۱۵)	۰/۹۶۹	۹/۴ لیتر بر ساعت	۱۴ لیتر بر ساعت

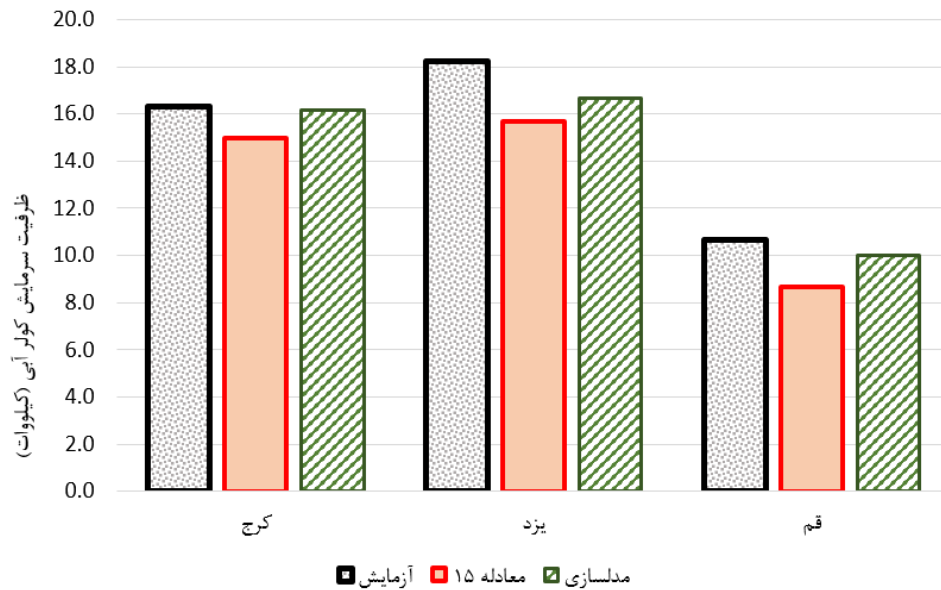
جدول ۵- تحلیل واریانس (ANOVA) برای معادله ظرفیت سرمایش کولرهای تبخیری (معادله ۱۴)

P-Value	F-Value	میانگین مربعات تنظیم شده	مجموع مربعات تنظیم شده	درجات آزادی	نام عوامل و بهرم کنش ها
۰/۰۰۰	۵۰/۱۱	۵۲۵۴	۶۳۰۴۹	۱۲	Model
۰/۰۰۰	۹۳/۷۶	۹۸۳۱	۴۹۱۵۵	۵	Linear
۰/۰۰۰	۷۲	۷۵۵۸	۷۵۵۸	۱	E_s

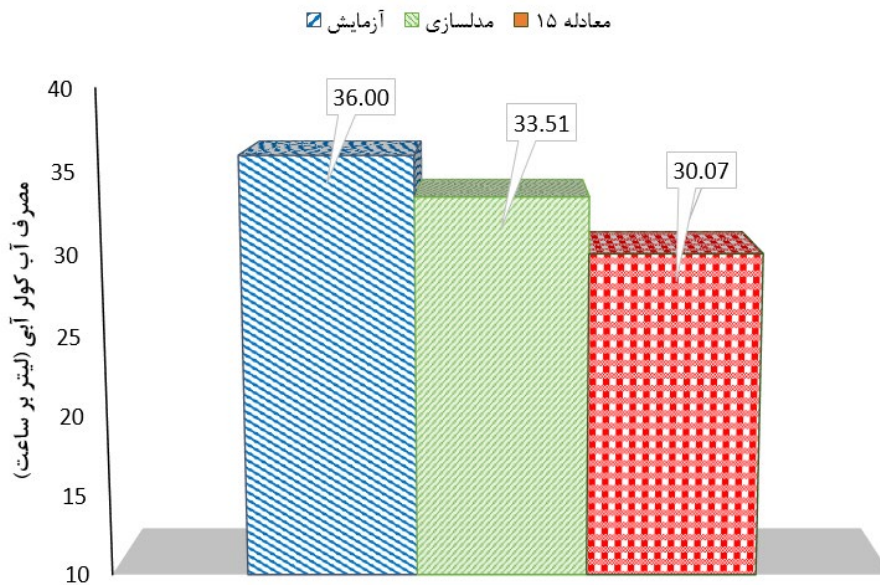
CFM	۱	۲۸۷۴۰	۲۸۷۴۰	۲۷۴	۰/۰۰۰
$T_{air,1}$	۱	۱۸۴۶	۱۸۴۶	۱۷/۶۱	۰/۰۰۰
RH_1	۱	۱۰۲۸۰	۱۰۲۸۰	۹۸	۰/۰۰۰
Z	۱	۷۲۹	۷۲۹	۶/۹۶	۰/۰۱۶
2-Way Interactions	۷	۱۳۸۹۴	۱۹۸۴	۱۸/۹۳	۰/۰۰۰
$E_s \times CFM$	۱	۴۲۵۱	۴۲۵۱	۴۰/۵۵	۰/۰۰۰
$E_s \times T_{air,1}$	۱	۲۷۳	۲۷۳	۲/۶۱	۰/۱۲۳
$E_s \times RH_1$	۱	۱۵۲۰	۱۵۲۰	۱۴/۵	۰/۰۰۱
$CFM \times T_{air,1}$	۱	۱۰۳۹	۱۰۳۹	۹/۹۱	۰/۰۰۵
$CFM \times RH_1$	۱	۵۷۸۳	۵۷۸۳	۵۵	۰/۰۰۰
$CFM \times Z$	۱	۴۱۰	۴۱۰	۳/۹۱	۰/۰۶۳
$T_{air,1} \times RH_1$	۱	۶۱۷	۶۱۷	۵/۸۸	۰/۰۲۵

جدول ۶- تحلیل واریانس (ANOVA) برای معادله (تخمین مصرف آب کولرهای تبخیری معادله ۱۵)

نام عوامل و برهم‌کنش‌ها	درجات آزادی	مجموع مربعات تنظیم شده	میانگین مربعات تنظیم شده	F-Value	P-Value
Model	۱۱	۱۸۴۱۳۸	۱۶۷۳۹/۸	۵۱/۴۸	۰/۰۰۰
Linear	۵	۱۴۵۷۱۱	۲۹۱۴۲/۱	۸۹/۶۲	۰/۰۰۰
E_s	۱	۳۰۳۹۶	۳۰۳۹۵/۶	۹۳/۴۸	۰/۰۰۰
CFM	۱	۸۹۷۲۹	۸۹۷۲۸/۵	۲۷۵/۹۴	۰/۰۰۰
$T_{air,1}$	۱	۱۵۰۳۹	۱۵۰۳۸/۸	۴۶/۲۵	۰/۰۰۰
RH_1	۱	۷۹۸۸	۷۹۸۷/۵	۲۴/۵۶	۰/۰۰۰
Z	۱	۲۵۶۰	۲۵۶۰/۱	۷/۸۷	۰/۰۱۱
2-Way Interactions	۶	۳۸۴۲۷	۶۴۰۴/۵	۱۹/۷۰	۰/۰۰۰
$E_s \times CFM$	۱	۱۷۰۹۷	۱۷۰۹۷/۰	۵۲/۵۸	۰/۰۰۰
$E_s \times T_{air,1}$	۱	۲۷۳۳	۲۷۳۲/۹	۸/۴۰	۰/۰۰۹
$E_s \times RH_1$	۱	۴۲۰۶	۴۲۰۶/۱	۱۲/۹۴	۰/۰۰۲
$CFM \times T_{air,1}$	۱	۸۴۵۹	۸۴۵۸/۶	۲۶/۰۱	۰/۰۰۰
$CFM \times RH_1$	۱	۴۴۹۲	۴۴۹۱/۹	۱۳/۸۱	۰/۰۰۱
$CFM \times Z$	۱	۱۴۴۱	۱۴۴۰/۷	۴/۴۳	۰/۰۴۸



شکل ۱۵- مقایسه ظرفیت سرمایش کولر آبی محاسبه شده از رابطه (۱۴) با حالت تجربی و مدل‌سازی ترمودینامیکی



شکل ۱۶- مقایسه مصرف آب کولر آبی محاسبه شده از رابطه (۱۵) با حالت تجربی و مدل‌سازی ترمودینامیکی

جدول ۷- اطلاعات اقلیمی و سرمایشی مربوط به شهرهای منتخب بر اساس مبحث ۱۹ مقررات ملی ایران و استاندارد اشری ۵۵

ردیف	نام شهر	ارتفاع از سطح دریا (متر)	تعداد ساعات مورد نیاز برای سرمایش در سال	پیشینه دمای سالیانه (سانتی‌گراد)	درجه انرژی	نیاز غالب
۱	شاهرود	۱۳۲۵	۲۱۰۳	۳۸/۳	متوسط	گرمایش
۲	سمنان	۱۱۲۷	۲۲۳۰	۴۰/۸	متوسط	گرمایش

۳	اصفهان	۱۵۵۰	۱۸۴۰	۴۰	متوسط	گرمایش
۴	قم	۹۲۸	۲۲۵۷	۴۲/۵	متوسط	گرمایش
۵	شهرکرد	۲۰۴۹	۸۹۳	۳۶/۳	متوسط	گرمایش
۶	شیراز	۱۴۸۸	۲۱۶۰	۴۰/۷	متوسط	گرمایش
۷	تبریز	۱۳۶۱	۹۴۳	۳۹/۸	زیاد	گرمایش
۸	تهران	۱۱۹۱	۲۰۷۴	۴۰/۵	متوسط	گرمایش
۹	یزد	۱۲۳۰	۲۶۲۲	۴۲/۴	متوسط	سرمایش و گرمایش

جدول ۸- مصرف سالیانه آب کولرهای تبخیری در شهرهای مختلف (مترمکعب در سال) از رابطه (۱۵)

ردیف	نام شهر	۵۰۰۰		۷۰۰۰	
		□□□□	□□	□□	□□
		۵۰٪	۷۰٪	۵۰٪	۷۰٪
۱	اصفهان	۶۲/۴	۹۵/۴	۸۸/۳	۱۳۳/۳
۲	قم	۶۸	۱۰۵/۴	۹۵/۷	۱۴۷/۶
۳	سمنان	۶۷/۳	۱۰۰/۷	۹۳/۵	۱۴۱/۳
۴	شهرکرد	۳۲/۳	۴۷/۵	۴۵/۴	۶۶/۶
۵	شیراز	۷۱/۵	۱۰۸/۳	۱۰۰/۷	۱۵۱/۵
۶	تبریز	۲۸/۶	۴۲	۳۹/۳	۵۸
۷	تهران	۶۴/۵	۹۸	۹۰/۳	۱۳۷
۸	یزد	۸۷	۱۳۹	۱۲۵	۱۹۴
۹	شاهرود	۳۴/۵	۴۹/۶	۴۷/۳	۶۹/۹

به‌منظور شناسایی پارامترهای مؤثر بر عملکرد کولرهای آبی، از روش طراحی آزمایش فاکتوریل کامل استفاده شد تا اثر متقابل پارامترهای مختلف بر عملکرد کولر به‌طور دقیق بررسی شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی و تحلیل آماری به صورت مختصر شامل موارد زیر می‌باشد:

- تأثیر پارامترها بر مصرف آب: پارامترهایی مانند دبی هوا، راندمان اشباع، دمای ورودی، و ارتفاع از سطح دریا تأثیر مستقیمی بر مصرف آب کولر دارند. این در حالی است که رطوبت نسبی تأثیر معکوس بر مصرف آب کولر خواهد داشت
- اهمیت راندمان اشباع و دبی هوای ورودی: دبی هوای ورودی و راندمان اشباع و تأثیر برهم‌کنش متقابل بین این دو عامل به عنوان مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر مصرف آب شناسایی شد.
- تأثیر ارتفاع از سطح دریا بر مصرف آب کولر آبی: هرچند افزایش ارتفاع از سطح دریا نیز باعث افزایش مصرف آب کولر می‌شود، اما تأثیر آن از سایر عوامل مؤثر بر عملکرد کولر آبی کمتر است.
- ارائه مدل پیش‌بینی دقیق مصرف آب کولر آبی و ظرفیت سرمایش: دو رابطه‌ی رگرسیونی بر اساس پارامترهای دبی، دما و رطوبت نسبی هوای ورودی و ارتفاع از سطح دریا ارائه شده که توانایی بالا و دقت مناسبی در پیش‌بینی مصرف آب و ظرفیت سرمایش کولر آبی بر اساس پارامترهای ورودی دارند.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، باهدف بررسی عملکرد کولرهای تبخیری مستقیم و شناسایی پارامترهای مؤثر بر مصرف آب، ظرفیت سرمایش و دمای خروجی آن‌ها، مدلی ترمودینامیکی توسعه داده شده است. در ابتدا با مقایسه نتایج مدل با نتایج آزمایشگاهی نسبت به اطمینان از صحت جواب‌های مدل اقدام گردید. سپس، به‌صورت نمونه موردی، عملکرد کولر آبی در اقلیم شهر سمنان مورد بحث و بررسی قرار گرفت. درنهایت،

• مدل ارائه شده برای پیش‌بینی مصرف آب کولرهای تبخیری در چند شهر منتخب ایران جهت تخمین مصرف آب سالیانه این دستگاه مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین مصرف آب سالیانه مربوط به شهرهای یزد، شیراز و قم بوده، این در حالی است که کمترین مصرف آب در شهرهایی با اقلیم سردتر مانند تبریز، شهرکرد و شاهرود رخ خواهد داد.

نتایج ارائه شده در این پژوهش نشان می‌دهند که با استفاده از مدل‌سازی ترمودینامیکی و روش‌های آماری می‌توان به درک عمیق‌تری از عملکرد کولرهای تبخیری دست یافت. مدل و روابط ارائه شده در این پژوهش می‌توانند به عنوان یک ابزار مفید برای طراحان و مهندسان تأسیسات مکانیکی در جهت پیش‌بینی عملکرد و انتخاب مناسب کولرهای آبی و محاسبات سرانگشتی مورد نیاز برای طراحی و انتخاب آن‌ها در ساختمان‌ها، قرار گیرند.

۵- پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده

بر اساس نتایج این تحقیق پیشنهادهایی زیر برای تحقیقات آینده ارائه می‌شود:

- بررسی تأثیر انواع مختلف پوشال بر روی راندمان اشباع و مصرف آب کولر
- توسعه یک مدل ترمودینامیکی تفکیک‌شده^۱ که در آن، اثر تابش خورشید و انتقال حرارت از بدنه به عنوان یک ترم انرژی مستقل وارد معادلات حاکم شود. در چنین مدلی، پارامتر راندمان اشباع صرفاً نماینده مشخصات ذاتی و انتقال جرم پد خنک‌کننده خواهد بود. همچنین، توسعه مدل برای بررسی اثر سایر عوامل تأثیرگذار نظیر تشعشع خورشید، سرعت باد محیط، جنس بدنه کولر، نوع الکتروموتور کولر و ...
- بهینه‌سازی عملکرد کولرهای تبخیری در راستای دستیابی به سرمایه‌های بالاتر، مصرف انرژی و مصرف آب کمتر با استفاده از مدل‌سازی ترمودینامیک و روش طرح مرکب مرکزی

تقدیر و تشکر

این پژوهش با حمایت مالی شرکت توزیع نیروی برق استان سمنان و در چارچوب قرارداد پژوهشی شماره ۶۲۰/۲۸۳۸۳ مورخ ۹۵/۱۱/۱۴ و همچنین حمایت دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان در چارچوب قرارداد پژوهشی شماره ۱۹۸۶ مورخ ۹۶/۲/۱۸ انجام شده است. این بودجه صرفاً برای پشتیبانی از فرآیند پژوهش استفاده شده و هیچ نقشی در طراحی مطالعه، جمع‌آوری داده‌ها، تحلیل، تفسیر، نگارش مقاله یا تصمیم به انتشار آن نداشته است. نویسندگان مقاله بدین‌وسیله از هر دو نهاد که با حمایت مالی خود در تحقق این پژوهش نقش بسزایی داشته‌اند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایند.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌های پشتیبان یافته‌های این مطالعه، در صورت درخواست معقول، در دسترس هستند. پژوهشگران علاقه‌مند می‌توانند با توضیح دقیق نیاز خود به داده‌ها، با نویسنده مسئول تماس بگیرند.

اعلام تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ تعارض منافع مالی یا غیرمالی مرتبط با این پژوهش و انتشار آن وجود ندارد. بودجه دریافت شده صرفاً برای پوشش هزینه‌های مرتبط با پژوهش بوده و هیچ تأثیری بر نتایج مطالعه یا فرآیند انتشار آن نداشته است.

فهرست علائم و اختصارات

دبی هوا، ft^3/min	CFM
راندمان اشباع، %	E_s
انتالپی هوا، $\text{Kj/Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	h
مصرف آب L/hr	$\dot{M}$
دبی، Kg/s	$\dot{m}$
فشار، Pa	P
ظرفیت سرمایش Kw	Q
رطوبت نسبی، %	RH

¹ Decoupled

- [8] El-Dessouky H, Ettouney H, Al-Zeefari A (2004) Performance analysis of two-stage evaporative coolers. *Chem. Eng. J.* 102(3): 255-266.
- [9] Jain D (2007) Development and testing of two-stage evaporative cooler. *Build. Environ.* 42(7): 2549-2554.
- [10] Moshari S, Heidarinejad G, Fathipour A (2016) Numerical investigation of wet-bulb effectiveness and water consumption in one- and two-stage indirect evaporative coolers. *Energy Convers. Manag.* 108: 309-321.
- [11] Alklaibi A (2015) Experimental and theoretical investigation of internal two-stage evaporative cooler. *Energy Convers. Manag.* 95: 140-148.
- [12] Niasar AH, NikKhah H (2019) Performance enhancement of evaporative water cooler equipped with permanent magnet brushless motor drive based on power control strategy. *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.* 8(2): 1268-1275.
- [13] Sadi M (2023) Experimental study of Maisotsenko cross-flow cooler and numerical solution of air in mass and heat exchanger. *Energy Eng. Manag.* 11(3): 108-121.
- [14] Alidoost S, Moosavi L (2024) Performance evaluation of the hybrid evaporative cooling system in residential buildings in hot and arid climates, with a water conservation approach. *J. Archit. Hot Dry Clim.* 11(18): 63-86.
- [15] Zhang Y, et al. (2025) Experimental study on the performance of a novel data center air conditioner combining air cooling and evaporative cooling. *Int. J. Refrig.* 170: 98-112.
- [16] Mao R, et al. (2025) Experimental investigation on the application of cold-mist direct evaporative cooling in data centers. *Int. J. Therm. Sci.* 208: 109500.
- [17] Guo X, Zhao T-S (1998) A parametric study of an indirect evaporative air cooler. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 25(2): 217-226.
- [18] Joudi KA, Mehdi SM (2000) Application of indirect evaporative cooling to variable domestic cooling load. *Energy Convers. Manag.* 41(17): 1931-1951.
- [19] Maheshwari G, Al-Ragom F, Suri R (2001) Energy-saving potential of an indirect evaporative cooler. *Appl. Energy* 69(1): 69-76.
- [20] Martínez FR, Gómez EV, Martín RH, Gutiérrez JM, Díez FV (2004) Comparative study of two different evaporative systems: an indirect evaporative cooler and a semi-indirect ceramic evaporative cooler. *Energy Build.* 36(7): 696-708.
- [21] Camargo JR, Ebinuma CD, Silveira JL (2005) Experimental performance of a direct evaporative cooler operating during summer in a Brazilian city. *Int. J. Refrig.* 28(7): 1124-1132.
- [22] Beshkani A, Hosseini R (2006) Numerical modeling of rigid media evaporative cooler. *Appl. Therm. Eng.* 26(5-6): 636-643.

دما،

T

ارتفاع از سطح دریا،

Z

حروف یونانی

رطوبت مخصوص، Kg_{air}/Kg_{water}

ω

رطوبت نسبی

ϕ

زیرنویس‌ها

هوا

a

بخار اشباع

g

نهان

L

بخار

v

هوای مرطوب

WB

مراجع

- [1] Tahani M, Shamsodini S, Farahat S, Rabani A (2015) Thermodynamic simulation of ejector-expansion refrigerator cooler. *J. Solid Fluid Mech.* 5(2): 181-189.
- [2] Rahimi M, Hosseini SMJ, Ranjbar A (2023) Performance improvement in refrigeration systems using fin-reinforced phase change material. *J. Solid Fluid Mech.* 13(4): 159-170.
- [3] Bom GJ (1999) Evaporative air-conditioning: applications for environmentally friendly cooling. World Bank Publications, Washington, DC.
- [4] Heidarinejad G, Delfani S, Esmaeelian J, Heidarinejad M (2007) Principles and applications of evaporative coolers. Building and Housing Research Center, Ministry of Housing and Urban Development, Tehran.
- [5] Kargarsharifabad H, Rahbar N, Farmani Entezam H (2024) Predicting water consumption of evaporative coolers in Qom City based on climate change and population growth: a mathematical and thermodynamic modeling. *Civ. Infrastruct. Res.* 10(2): 133-146.
- [6] Stefaniak Ł, Szczęśniak S, Walaszczyk J, Rajska K, Piekarska K, Danielewicz J (2025) Challenges and future directions in evaporative cooling: balancing sustainable cooling with microbial safety. *Build. Environ.* 267: 112292.
- [7] Farzad AA (2003) The effect of cooling water temperature on cooling rate and study of increasing the efficiency of water coolers in poultry housing. *J. Water Wastewater* 14(1): 32-37.

- [34] Martín RH (2009) Characterization of a semi-indirect evaporative cooler. *Appl. Therm. Eng.* 29(10): 2113-2117.
- [35] Tashtoush B, Al-Oqool A (2019) Factorial analysis and experimental study of water-based cooling system effect on the performance of photovoltaic module. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 16(7): 3645-3656.
- [36] Comino F, Milani S, De Antonellis S, Joppolo CM, Ruiz de Adana M (2018) Simplified performance correlation of an indirect evaporative cooling system: development and validation. *Int. J. Refrig.* 88: 307-317.
- [37] Min Y, Chen Y, Yang H (2019) A statistical modeling approach on the performance prediction of indirect evaporative cooling energy recovery systems. *Appl. Energy* 255: 113832.
- [38] Yan W, et al. (2022) Performance evaluation and parameter sensitivity analysis of a membrane-based evaporative cooler with built-in baffles. *Appl. Therm. Eng.* 208: 118228.
- [39] Shi W, Yang H, Ma X, Liu X (2023) Performance prediction and optimization of cross-flow indirect evaporative cooler by regression model based on response surface methodology. *Energy* 283: 128636.
- [40] Azari P, Mirabdollah Lavasani A, Rahbar N (2020) Evaluation of energy and exergy efficiency of a solar air collector with V-groove absorber plate using mathematical modeling. *Iran. J. Mech. Eng.* 22(2): 148-175.
- [41] Azari P, Mirabdollah Lavasani A, Rahbar N, Eftekhari Yazdi M (2022) Combination of a V-grooved solar collector with a single-slope solar still: performance evaluation, mathematical modeling, and economic analysis. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.* 236(15): 8731-8753.
- [42] ASHRAE (2013) Psychrometrics. In: ASHRAE handbook—fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA.
- [43] Stull R (2011) Wet-bulb temperature from relative humidity and air temperature. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 50(11): 2267-2269.
- [44] Dhamneya AK, Rajput S, Singh A (2018) Thermodynamic performance analysis of direct evaporative cooling system for increased heat and mass transfer area. *Ain Shams Eng. J.* 9(4): 2951-2960.
- [23] Chengqin R, Hongxing Y (2006) An analytical model for the heat and mass transfer processes in indirect evaporative cooling with parallel/counter flow configurations. *Int. J. Heat Mass Transf.* 49(3): 617-627.
- [24] Wu J, Huang X, Zhang H (2009) Theoretical analysis on heat and mass transfer in a direct evaporative cooler. *Appl. Therm. Eng.* 29(5): 980-984.
- [25] Wu J, Huang X, Zhang H (2009) Numerical investigation on the heat and mass transfer in a direct evaporative cooler. *Appl. Therm. Eng.* 29(1): 195-201.
- [26] Fouda A, Melikyan Z (2011) A simplified model for analysis of heat and mass transfer in a direct evaporative cooler. *Appl. Therm. Eng.* 31(5): 932-936.
- [27] Sheng C, Nnanna AA (2012) Empirical correlation of cooling efficiency and transport phenomena of direct evaporative cooler. *Appl. Therm. Eng.* 40: 48-55.
- [28] Maerefat M, Ahmadi S, Poshtiri AH (2015) Investigation and performance analysis of a hybrid cooling system of air underground channel and direct evaporative cooler. *Modares Mech. Eng.* 15(5): 137-144.
- [29] Ahmadi M, Maleki A, Vadadi-Kalantar S (2018) Energy saving estimation of replacing the A-class evaporative coolers in the Tehran buildings (residential). *Q. J. Energy Policy Plan. Res.* 3(4): 57-74.
- [30] Anbarasu S, Zuo W, Fu Y, Shukla Y, Rawal R (2022) Validated open-source Modelica model of direct evaporative cooler with minimal inputs. *J. Build. Perform. Simul.* 15(6): 757-770.
- [31] Li X, Chang Y, Liu W, Yao W, Zhu G (2025) Energy-saving potential of dew point indirect evaporative cooler applied in school building. *Appl. Therm. Eng.* 275: 126865.
- [32] Omidi B, Rahbar N, Kargarsharifabad H, Poolaei Moziraji Z (2023) Performance evaluation of a solar desalination-hot water system using heat pipe vacuum tube parabolic trough solar collector: an experimental study with Taguchi analysis. *Energy Convers. Manag.* 292: 117347.
- [33] Antony J (2023) Design of experiments for engineers and scientists. Elsevier, Amsterdam.