

مقاله پژوهشی

ارزیابی عملکرد سیستم سرمایش تبخیری هیبرید در ساختمان‌های مسکونی اقلیم گرم و خشک، با رویکرد کاهش مصرف آب

سارا علی دوست^۱، لیلا موسوی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معماری و انرژی، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۲- استادیار و عضو هیئت علمی گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه یزد، یزد، ایران

چکیده

"تأمین آسایش حرارتی ساختمان‌های مسکونی در فصل گرما" سبب مصرف بالای برق و متعاقباً ایجاد آلودگی، تغییرات آب و هوایی و کاهش منابع می‌گردد. این مسئله در اقلیم گرم و خشک، به واسطه مصرف بالای آب برای سرمایش تبخیری با سیستم‌های متداول (کولرآبی) چالش بیشتری دارد. باهدف کاهش مصرف آب و تأمین آسایش حرارتی و ایجاد سرمایش نسبی، می‌بایست سیستمی در نظر گرفته شود که با هزینه کم، اقداماتی ساده و کمترین تجهیزات، بر روی ساختمان اعمال گردد. به همین سبب، سیستم هیبریدی متناسب با این اقلیم پیشنهاد می‌شود که بتواند اهداف پژوهش را تحقق بخشد. در این پژوهش، به منظور بررسی کارکرد سیستم پیشنهادی، دو اتاق مشابه به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفتند. در این زمینه شاخص‌های محیطی نظیر دما، رطوبت نسبی و جریان هوا توسط سنسورهای مربوط به مدت ۵ روز (۲۴ ساعت در مرداد و شهریورماه) در اتاق‌های مذکور پایش گردید. در بخش اول ابتدا وضعیت دو اتاق مشابه نسبت به یکدیگر بررسی شد. در بخش دوم سیستم هیبریدی پیشنهادی در یکی از اتاق‌ها تعبیه و عملکرد آن نسبت به تهویه طبیعی یک‌طرفه و کولرآبی مقایسه شد. در بخش اول مشخص شد اتاق‌ها از نظر وضعیت محیطی یکسان هستند و راه‌کارهای تهویه طبیعی یک‌طرفه و سرمایش تبخیری متکی به تهویه طبیعی بر شرایط اتاق‌ها کمترین تأثیر را داشته‌اند. در بخش دوم سیستم هیبریدی کارایی خود را به اثبات رساند. زمانی که میانگین دمای محیط بیرون 30°C تا 32°C باشد، سیستم هیبریدی پیشنهادی به کاهش دمای محیط داخلی قادر است. این سیستم نسبت به شرایط تهویه طبیعی یک‌طرفه در محیط داخل به طور میانگین $5/5^{\circ}\text{C}$ کاهش دما و $16-18$ درصد افزایش رطوبت نسبی ایجاد کرده است. باوجود نوسان دمایی پایین‌تر سیستم هیبریدی کولرآبی کاهش بیشتر دما (حداکثر 8°C) و افزایش بیشتر رطوبت نسبی (حداکثر 23 درصد) را از خود نشان داده است که به هنگام کاهش شدت گرما سبب بیش سرمایش فضا می‌شود. در این راستا ساکنان با استفاده از تهویه طبیعی سعی در کنترل دمای داخل را دارند و این موضوع منجر به اتلاف بالای انرژی و سلب آسایش ساکنان می‌گردد. اگرچه در ساعات محدودی شرایط آسایش حرارتی تأمین نشده است؛ این سیستم با ایجاد سرمایش نسبی در مقایسه با کولرآبی مورد مطالعه کاهش 96 درصد مصرف آب و 74 درصد مصرف برق را به همراه داشته است. به عبارتی مصرف آب را از 290 liters/day توسط کولرآبی موجود، به حداکثر 10 liters/day و مصرف برق را از 10 kWh به $2/6$ kWh کاهش داده است؛ بنابراین می‌توان گفت بر اساس ارزیابی شرایط حرارتی فضاها توسط شاخص PMV سیستم هیبریدی برای بعدازظهر، شب و ساعات اولیه صبح (بین ساعات ۱۸ تا ۸) ماه‌های گرم فصل تابستان و بهار مطلوب است.

تاریخ دریافت:

۲۲ خرداد ۱۴۰۲

تاریخ پذیرش:

۱۴ بهمن ۱۴۰۲

کلیدواژه‌ها:

سامانه‌های هیبریدی

آسایش حرارتی

سرمایش تبخیری

کاهش هدررفت آب

بهینه سازی انرژی

اقلیم گرم و خشک

doi: 10.22034/AHDC.2024.20202.1749

E-ISSN: 2645-372X /© 2023. Published by Yazd University This is an open access article under the CC BY 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



۱- مقدمه

ساختمان‌های موجود، به‌ویژه ساختمان‌های اقلیم گرم و خشک، به دلیل سیستم‌های سرمایشی، دارای مصرف بیشتر آب و انرژی هستند. لذا از این طریق، در تغییرات اقلیمی سهم قابل‌توجهی دارند (Ansari, & Al-Khourchid, Al-Ghamdi, 2023). بار سرمایشی ساختمان‌ها، تحت تأثیر تغییرات اقلیمی است و بیشترین سهم (حدود ۶۰ درصد) را در میان انرژی‌های مصرفی ساختمان دارد (Jomehzadeh et al., 2017; Hatamipour, Mahiyar, & Taheri, 2007). در اقلیم‌های گرم و خشک، به‌منظور تأمین آسایش در فصول گرم، اغلب از سیستم‌های تبخیری (Cuce & Riffat, 2016)، مانند کولرهای آبی استفاده می‌شود که مناسب این اقلیم است (Bishoyi & Sudhakar, 2017)؛ اما این شیوه علاوه بر مصرف انرژی، مصرف فراوان آب (Heidari, Roshandel, & Vakiloroaya, ۲۰۱۹) را به همراه دارد. بررسی‌های اولیه نشان می‌دهند مصرف آب کولر، بخصوص در مناطق گرم و خشک از مقدار ضوابط پیشنهادی استاندارد مهندسی آب کشور بیش‌تر است (Rabbani, Mousavi, & Qara Guzlu, 2008). با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام‌شده در سه محله مختلف تهران، مصرف آب در فصل گرم بین ۲۰۰ تا ۴۵۰ لیتر در طی ۹۰ روز، افزایش داشته است که به‌طور متوسط می‌توان مصرف روزانه آب کولرآبی را حدود ۳۰۰ لیتر، به ازای هر واحد، برآورد کرد (Nesary Moghadam & yaghoubian, 2013). در استان یزد حدود ۴۰۰ هزار کولرآبی موجود است که هرکدام به‌طور میانگین در فصول گرم سال، ۴۰۰ لیتر آب در شبانه‌روز مصرف می‌کند (Gol Shiri Isfahani & Shahdipour, 2018). به دلیل وجود بحران جهانی آب (Boretti & Rosa, 2019)، کاهش مصرف آب توسط سیستم‌های سرمایش تبخیری باید به‌عنوان التزام در طراحی این سیستم‌ها محسوب گردد. لذا لازم است سیستم خنک‌کننده‌ای ارائه شود که در کنار تأمین آسایش حرارتی، کاهش مصرف آب را به دنبال داشته باشد.

باوجود این‌که کولرهای آبی و سیستم‌های سرمایش تبخیری در خنک کردن فضا عملکرد مؤثری دارند؛ اغلب قابل‌کنترل نیستند و درجه‌بندی خاصی برای آن‌ها تعریف‌نشده است (Sohani & Sayyaadi, 2018). ازآنجاکه کولرهای آبی با محدودیت روبه‌رو هستند، کاربران، برای کنترل دمای داخل، با باز گذاشتن پنجره‌ها هدر رفت انرژی سرمایشی و متعاقباً آب را به حداکثر می‌رسانند. بنابراین به‌منظور بررسی شرایط سیستم‌های تبخیری، پژوهشی میدانی صورت گرفت که در دو مرحله به مقایسه عملکرد دو سیستم خنک‌کننده با دستگاه‌های مربوط، می‌پردازد. این مطالعه با پیشنهاد الحاقاتی کمکی به سیستم سرمایشی موجود در اقلیم گرم و خشک و تبدیل آن به سیستم خنک‌کننده‌ای مناسب؛ سعی دارد با اضافه کردن قابلیت جدید به آن، علاوه بر بهبود شرایط حرارتی داخل، مصرف آب و انرژی را تا حد چشمگیری کاهش دهد.

پرسش‌های پژوهش

- چگونه سیستم هیبریدی در سرمایش ساختمان‌های مسکونی اقلیم گرم و خشک می‌تواند به کار گرفته شود تا ضمن افزایش آسایش حرارتی، در کاهش مصرف انرژی نیز مؤثر باشد؟
- با به‌کارگیری سامانه‌های هیبریدی سرمایشی، تا چه میزان می‌توان مصرف برق و آب را جهت سرمایش ساختمان‌های مسکونی در اقلیم گرم و خشک را کاهش داد؟

۲- پیشینه تحقیق

"سیستم سرمایش تبخیری"، به‌عنوان گزینه برتر نسبت به سیستم‌های مبتنی بر مبرد، برای تأمین آسایش حرارتی در مناطق گرم و خشک توصیه می‌شود و این، در حالی است که استفاده از این سیستم‌ها، مصرف بالای آب و برق را به همراه دارد (Duan et al., 2012; Murshed, 2019). با در نظر گرفتن این موضوع، پژوهش‌هایی به‌منظور ارائه راهکارهایی برای کاهش مصرف آب توسط این سیستم صورت گرفته است. یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر مصرف آب توسط کولرآبی، غلظت نمک موجود در آب است. زمانی که غلظت نمک موجود در آب از ۲۷۰ ppm به ۲۰۰۰۰۰ ppm افزایش یابد،

مصرف آب ۱/۵ لیتر بر ساعت کم می‌شود؛ اما راندمان سیستم سرمایشی کاهش و دمای محیط ۸/۶ درصد افزایش می‌یابد (Kabeel & Bassuoni, 2017). کولرهای آبی به دلیل عدم تولید گازهای مخرب نسبت به سیستم‌های مبتنی بر مبرد برتری دارند؛ اما به دلیل رطوبت زایی، برای اقلیم‌های مرطوب نمی‌توانند کارایی داشته باشند. لذا برای به کارگیری کولر آبی در این اقلیم، لازم است آن را با تجهیزات خشک‌کننده ترکیب کنند (Heidari et al., 2019). می‌توان برای افزایش عملکرد سرمایشی کولر آبی، آن را با یک سیستم سرمایش تبخیری غیرمستقیم نیز ترکیب کرد که در این صورت، کاهش مصرف برق را به دنبال خواهد داشت.

با بررسی انواع سیستم‌های خنک‌کننده تبخیری در اقلیم‌های مختلف ایران، مشخص شد، ترکیب سیستم سرمایش تبخیری مستقیم و غیرمستقیم، یکی از مطلوب‌ترین استراتژی‌های خنک‌سازی برای اقلیم‌های گرم و خشکی نظیر یزد، است (Heidarinejad, Heidarinejad, Delfani, & Esmaeelian, 2008). در این راستا، سیستم سرمایش تبخیری مستقیم و غیرمستقیم با افزایش شرایط آسایش حرارتی، به ترتیب تا ۶۰ و ۷۰ درصد در شهر یزد، حداکثر کارایی را از خود نشان دادند (fallah, Heidari, & Fazeli, 2017). طبق مطالعات تجربی صورت گرفته، در شرایطی که تنها سیستم سرمایش تبخیری مستقیم قادر به برقراری آسایش حرارتی در فصل تابستان نباشد، ترکیب آن با سیستم سرمایش تبخیری غیرمستقیم، می‌تواند راهکاری مؤثر باشد. اگرچه به کارگیری این سیستم ترکیبی، در کنار برقراری آسایش حرارتی، منجر به کاهش ۶۰ درصد مصرف برق نسبت به سیستم‌های مبتنی بر مبرد می‌شود؛ اما مصرف آب را تا ۵۵ درصد نسبت به سیستم‌های سرمایش تبخیری مستقیم، افزایش می‌دهد (Heidarinejad, Bozorgmehr, Delfani, & Esmaeelian, 2009). به همین سبب پژوهش‌هایی برای کاهش مصرف آب توسط این سیستم ترکیبی، صورت گرفته است. به منظور کاهش هرچه بیشتر مصرف آب و برق توسط این سیستم ترکیبی، می‌توان ضخامت پدها را به حداقل و سطح تماس را به حداکثر رساند (Sohani & Sayyaadi, 2018). انتخاب شکل بهینه سیستم تبخیری غیرمستقیم متناسب با اقلیم گرم و خشک، از دیگر استراتژی‌هایی است که نسبت به نمونه اولیه آن، کاهش ۸۶/۴ درصد آب را به دنبال داشته است (Sohani, Sayyaadi, & Mohammadhosseini, 2018). سیستم مذکور، قابلیت تنظیم ساعتی را دارد و می‌توان از این طریق ۱۹/۶ درصد مصرف آب را در مقایسه با مدل پایه، کاهش داد (Sohani, Sayyaadi, & Zeraatpisheh, 2019).

"سیستم‌های تبخیری مکانیکی"، به دلیل تأمین هوای تازه از محیط خارجی، بر کیفیت هوای داخل ساختمان تأثیر مثبتی دارد (Chiesa, Grosso, Bogni, & Garavaglia, 2017). باوجود سازگاری بیشتر سیستم‌های غیرفعال با محیط‌زیست در مقایسه با سیستم‌های مکانیکی، استفاده از آن‌ها مستلزم کاهش مصرف آب است تا بتواند آسایش حرارتی را به همراه داشته باشد. بررسی‌های انجام‌شده بر سیستم خنک‌کننده غیرفعال تبخیری با جریان رو به پایین (passive downdraft evaporative cooling)، نشان می‌دهد که با تنظیم برنامه عملکردی و کنترل جریان پاشش آب، سیستم سرمایشی مذکور کاهش مصرف ۱۹/۶ درصد آب و ۴۷/۹ درصد انرژی را در اقلیم گرم و خشک به همراه دارد (Kang & Strand, 2018). ترکیب "سیستم کانال زیرزمینی" با سیستم تبخیری غیرمستقیم، ازجمله روش‌هایی است که به منظور کاهش مصرف آب پیشنهادشده است. این کانال با پیش سرمایش هوای ورودی سیستم تبخیری غیرمستقیم، مصرف آب و انرژی را به ترتیب تا ۴۵ درصد و ۶۲ درصد کاهش می‌دهد (Nemati, Omidvar, & Rosti, 2021). بهینه‌سازی مصرف آب "سیستم تبخیری در حفره دیوار تهویه شونده" (ventilated wall cavity)؛ جزو پژوهش‌هایی بود که هم به صورت تجربی و هم به صورت عددی موردبررسی قرار گرفت. با به کار بستن مدل ارائه‌شده برای ارزیابی این سیستم، می‌توان اندازه بهینه قطرات و حداکثر ارتفاع موردنیاز برای تبخیر کامل قطرات را پیش‌بینی و از مصرف اضافه آب جلوگیری کرد (Alaidroos & Krarti, 2016). ترکیب این سیستم با دودکش خورشیدی برای اقلیم گرم و خشک در مطالعه‌ای بررسی شد (Maerefat & Haghighi, 2010)؛ اما به دلیل وجود قشر نامناسب آب و حفره تعبیه‌شده در دیوار برای سیستم تبخیری آن، مصرف آب بالا بود. برای رفع مشکل مربوط، محققان، با حذف حفره دیوار در این سیستم، اضافه کردن پمپ شناور و در نظر گرفتن سطح کافی برای پد خیس، توانستند مصرف آب را کاهش دهند و آسایش حرارتی فراهم کنند (Abdallah et al., 2013).

در کل، سیستم‌های خنک‌کننده غیرفعال متعددی وجود دارند که می‌توانند به کاهش بار بیشینه، کاهش نوسانات دمای داخلی و حفظ دمای هوای داخل در یک محدوده راحت منجر شوند. این سیستم‌ها از انرژی‌های تجدیدپذیر، مانند خورشید و باد برای تأمین بار سرمایشی و تهویه فضا استفاده می‌کنند (Taleb, 2014). سیستم‌های تهویه طبیعی، به‌عنوان نوعی استراتژی خنک‌کننده غیرفعال، جایگزین مناسبی برای کاهش مصرف انرژی هستند (Nejat, Jomehzadeh, Hussien, & Abd Majid, 2018). بخش قابل توجهی از سیستم‌های سرمایش تبخیری کم‌مصرف با سامانه‌های تهویه طبیعی، نظیر دودکش خورشیدی، آتریوم و بادگیر ترکیب می‌شوند (Song, Darani, Khdaier, Abu-Rumman, & Kalbasi, 2021) و به همین منظور با توجه به کاربرد متداول و عملکرد بالای بالقوه آن‌ها، به‌خصوص در اقلیم‌های گرم و خشک، موردبررسی قرار گرفتند (Bagasi, 2020; Bagasi & Calautit, 2021; Ahmed, Kumar, & Mottet, 2021; Calautit, & Karban, 2021).

همان‌طور که در بخش قبلی اشاره شد، "سیستم خنک‌کننده غیرفعال تبخیری با جریان رو به پایین" یا "برج بادی" از بادگیر، کانال و یک دهانه در قسمت پایین تشکیل شده است. این سیستم، باد را در قسمت بالا جذب و هوای محیط بیرون را با استفاده از تبخیر آب، خنک و مرطوب می‌کند. هوای خنک شده از طریق دریچه‌ای در قسمت پایین وارد فضا می‌شود (Kang & Strand, 2019). در مطالعاتی که از سوی ریچارد استرن، داهو کانگ و ماروتن گولم انجام گرفته است، این سیستم در ترکیب با ساختمان‌ها به‌صورت شبیه‌سازی و میدانی به‌منظور ارزیابی پارامترهایی، از جمله ارتفاع، سرعت باد و اختلاف بین دمای خشک و تر بررسی شده است (Ghoulem, El Moueddeb, Nehdi, Zhong, & Calautit, 2020; Kang & Strand, 2016). پژوهشی دیگر که در زمینه سیستم‌های خنک‌کننده غیرفعال با جریان رو به پایین در ساختمان سنتی اقلیم گرم و خشک انجام یافته؛ نه‌تنها کاهش دمای 15°C ایجاد کرده، بلکه رطوبت را تا ۵۰ درصد افزایش داده است (Soumia, AbdElKader, & Djaffar, 2022). درواقع سیستم تبخیری مذکور با خنک‌سازی هوا و تأمین مقداری هوای تازه برای فضای داخلی، باعث صرفه‌جویی فراوانی در بارهای سرمایشی موردنیاز فضا گشته و کیفیت محیط داخل را بهبود می‌بخشد.

بادگیرها، به‌عنوان سیستم‌های قدیمی سرمایش غیرفعال، می‌توانند به کمک فشار باد، محیط داخلی را خنک سازند. مدل‌های اولیه آن از هزاران سال پیش در ساختمان‌های سنتی ایران قرار داشته و با کمک تهویه طبیعی به خنک‌سازی و برقراری آسایش حرارتی فضا کمک کرده است (Hughes, Calautit, & Ghani, 2012). باهدف بازآرایی نقش بادگیرها و تقویت مکش آن‌ها در جهت خنک‌سازی فضا، پژوهشگران به‌واسطه تعبیه کانال‌هایی برای ارتباط با عمق زمین، توانسته‌اند، هوای خنک و مرطوب زیرزمین را استفاده و به فضاهای مرتبط با آن هدایت کنند (pourahmadi & Ayatollahi, 2012).

با بررسی پژوهش‌های پیشین، ملاحظه می‌شود که سیستم‌های غیرفعال، به‌تنهایی پاسخگوی نیازهای آسایشی در شرایط اقلیمی سخت نیستند. لذا در تحقیقات انجام‌یافته، با روش‌های هیبرید ترکیب شده‌اند تا ضعف آن‌ها رفع گردد. در همین زمینه در شرایط اقلیمی سخت گرم و خشک، به‌منظور ارتقای سیستم‌های غیرفعال تبخیری، با سیستم‌های الحاقی، مانند فن‌هایی کم‌مصرف، ترکیب شده‌اند (Hassawi-Al, 2021; Harrouz, Ghali, & Ghaddar, 2021; Serageldin et al, 2020). یکی از مهم‌ترین دلایل ارتقای این سیستم‌های غیرفعال، غیر از میانگین دمای بالای هوای محیط بیرون، پوشش دادن زمان‌هایی است که باد و خورشید به‌عنوان انرژی‌های تجدیدپذیر و مورد استفاده توسط سیستم‌های غیرفعال، موجود نباشند (Hughes et al, 2012; Jafari & Kalantar, 2022; Omara, Mohammed, & Abuelnuor, 2021). با در نظر گرفتن همه این موارد، از برجسته‌ترین عوامل تعیین‌کننده در به‌کارگیری این سیستم‌ها به‌جز عملکرد آن‌ها، "در نظر گرفتن هزینه اعمال آن در مقابل هزینه‌های حامل‌های انرژی" است (Elaouzy & El Fadar, 2022). بنابراین سیستمی که بتواند با کم‌ترین هزینه و اقداماتی ساده بر روی ساختمان اعمال شود بسیار مطلوب و کاربردی خواهد بود.

مطالعاتی که تاکنون انجام گرفته‌اند، به مسئله کاهش مصرف آب در سرمایش تبخیری ساختمان‌ها، به‌خصوص در اقلیم گرم و خشک، کم‌تر پرداخته‌اند. این پژوهش، نوعی سیستم خنک‌کننده هیبریدی را ارائه می‌کند که برای برآورده کردن آسایش حرارتی در فضای مسکونی، بر اساس روش‌های تجربی، بررسی شده است. این سیستم با استفاده از الحاق فن‌های کمکی و اجزای مربوط به کولر، طراحی شده است. با استفاده از رویکرد پیشنهادی، این مطالعه باهدف تعیین این مسئله که آیا سیستم خنک‌کننده هیبریدی جدید پیشنهادی، برای اقلیم گرم و خشک مؤثر است، صورت گرفته است. لذا با توجه به بحران جهانی آب، به‌ویژه در اقلیم‌های گرم و خشکی مانند یزد، سیستم خنک‌کننده‌ای که با در نظر گرفتن وضعیت موجود خانه‌ها با راهکاری ساده، کم‌هزینه، عملکرد بالا، مدت بازگشت سرمایه پایین و بدون ایجاد محدودیت در طراحی، بتواند هم در مصرف آب و هم در مصرف انرژی صرفه‌جویی کند، برای سیستم‌های خنک‌کننده مکانیکی فعلی جایگزینی مناسب خواهد بود.

۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- نمونه مورد مطالعه

این پژوهش در نمونه‌ای از ساختمان مسکونی در شهر یزد (اقلیم گرم و خشک) با سازه تری دی پانل (3D Panels) صورت گرفته است که این سازه مانند عایق عمل می‌کند. سقف این ساختمان از جنس تیرچه‌بلوک و جنس کف‌پوش داخلی ساختمان، از سنگ است. پنجره‌ها تک جداره و دارای پروفیل آهنی می‌باشند و نوع شیشه‌های آن رفلکس رنگ روشن است. دیوارهای خارجی با آجر نمای رنگ روشن کار شده‌اند. این خانه دارای دوطبقه همکف و زیرزمین و در نبش کوچه اصلی قرار گرفته است؛ به‌طوری که از طرف جنوب و غرب با خانه‌های مسکونی همسایگان احاطه شده است. گرمایش و سرمایش خانه مذکور به ترتیب توسط شوفاژ و کولرآبی صورت می‌گیرد. نتایج مطالعات، شرایط ساختمان را به‌دقت، با در نظر گرفتن سیستم‌های سرمایشی و بدون آن، به‌منظور تأمین آسایش حرارتی، هم‌زمان با کنترل مصرف آب و برق موردبررسی قرار می‌دهد.

۳-۲- شرایط آزمایش

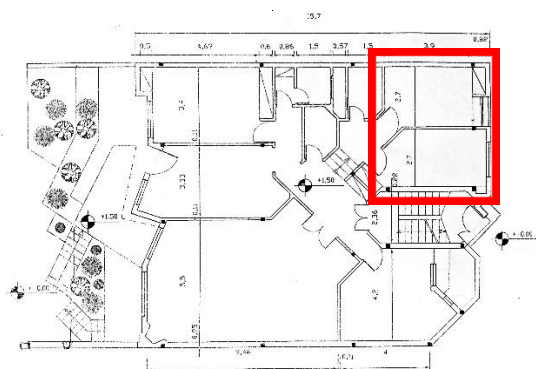
پژوهش میدانی در فصل تابستان در تاریخ‌های ۱۵، ۱۷، ۲۳ و ۳۱ مردادماه و ۴ شهریورماه سال ۱۴۰۱ انجام گرفت. روزهای مورد مطالعه در یکی از گرم‌ترین ماه‌های سال، بر اساس داده‌های آب و هوایی شهر یزد و تحلیل نمودارهای اقلیمی نرم‌افزار Climate Consultant 6.0 (Climate Consultant 6.0, 2021)، انتخاب شده‌اند تا وضعیت، به‌صورت بهتری قابل ارزیابی باشد. اندازه‌گیری پارامترهای دما و رطوبت نسبی، سرعت جریان هوای اتاق‌ها و میزان آب مصرفی کولرآبی توسط دستگاه‌های مربوط صورت گرفته است (جدول ۱). فضاهای انتخاب‌شده، برای انجام پژوهش، دارای شرایط کاملاً مشابهی بوده و در طول آزمایش بدون سکنه بوده‌اند.

برای بررسی، در این تحقیق دو اتاق شمالی کنار هم در طبقه همکف، انتخاب شده‌اند که از نظر هندسی، ابعاد پنجره و بازشو و جنس سقف، کف، دیوار و پرده، دارای وضعیت مشابهی هستند (تصویر ۱-۲). این دو اتاق با مساحت حدود ۱۱ مترمربع، دارای پنجره‌ای به ابعاد $1/5 \text{ m} \times 1/2 \text{ m}$ با بازشو $0/50 \text{ m} \times 0/35$ در سمت شمال هستند. هر اتاق دارای یک در است که به سبب کنترل شرایط محیطی و عدم تأثیر متغیرهای فضاهای مجاور، بسته شد. برای سرمایش هر دو اتاق از یک کولرآبی مشترک استفاده شده که تنها برای این دو اتاق تعبیه شده است. دریچه کولر به ابعاد $0/60 \text{ m} \times 0/30$ در دیوار جنوب این اتاق‌ها واقع شده و این، در حالی است که کولر برای دریافت باد غالب در ضلع شمالی قرار گرفته است. تصویر ۳ ابعاد اتاق‌ها و موقعیت قرارگیری سنسورها را در مکان‌های مشخص شده، نشان می‌دهد. در هر اتاق، دو سنسور برای اندازه‌گیری میانگین دمای اتاق و رطوبت نسبی و سرعت جریان هوا قرار گرفته‌اند. یک سنسور نیز برای اندازه‌گیری دما و رطوبت نسبی محیط بیرون در خارج از ساختمان و بر روی پشت‌بام نصب شده است. دیتا لاگر دما و رطوبت نسبی در

ارتفاع ۱/۱ متر از کف و در وسط اتاق و بر روی پایه قرار گرفته است تا میزان آسایش را در ارتفاع نشسته افراد اندازه‌گیری کند. همچنین، هات وایر برای اندازه‌گیری سرعت جریان هوا، در کنار دیتا لاگر، در همین ارتفاع و در وسط اتاق بر روی پایه نصب شده است. در اتاق‌ها دما و رطوبت نسبی به‌صورت خودکار با فواصل زمانی یک دقیقه توسط دیتالاگر به ثبت می‌رسید. هات وایر موجود در اتاق‌ها نیز به کمک لپ‌تاپ با فواصل زمانی یک ثانیه، داده‌ها را ذخیره می‌کرد. برای اندازه‌گیری دما و رطوبت نسبی هوای محیط بیرون، دیتالاگر در مجاورت کولر و در ارتفاع ۱/۱ متر از کف بام بر روی پایه سایبان نصب گردید (تصویر ۴). همچنین برای اندازه‌گیری مصرف آب، کنتور مورد تأیید شرکت آب و فاضلاب بر سر راه آب ورودی به کولر قرار گرفت (تصویر ۵-۶). دیتالاگر قرار داده‌شده در پشت‌بام با فواصل زمانی ۵ دقیقه، داده‌ها را به ثبت می‌رساند و اعداد کنتور آب نیز، هر ساعت یک‌بار یادداشت‌برداری می‌شد. مکان قرارگیری تمامی سنسورهای قرارگرفته در داخل فضا و خارج ساختمان، در کل آزمایش‌ها ثابت است.

جدول ۱: دستگاه‌های استفاده‌شده در اندازه‌گیری پژوهش میدانی

نام ابزار	پارامتر	محدوده اندازه‌گیری و دقت اندازه‌گیری	تعداد	روش اندازه‌گیری	فواصل اندازه‌گیری	تصاویر
Temperature & Humidity Data Logger GM1365	دما و رطوبت	-30~80 °C ±0.3 °C	۲	مستقیم	۱ دقیقه	
		0~100% RH ±2.0% RH				
Hot-wire anemometer TA 888	جریان و دما	0.1~25.0 m/s ± (5%+1d)	۲	مستقیم	۱ ثانیه	
		0 to 50 °C ± 1 °C				
Mini Temperature and Humidity Data Logger - Testo 174H	دما و رطوبت	-20 °C to +70 °C ±0.5 °C	۲	مستقیم	۵ دقیقه	
		0 to 100%RH ±3%RH (2 to +98%RH) at +25 °C				
SD-1 Multi jet Semi-Dry type Baylan Water Meter	میزان آب مصرفی	Permanent Flowrate 2.5 m3/h ±0.25-0.5% Maximum Working Temp 0 to 50 °C Maximum Working Pressure 16 bar	۱	مستقیم	۲/۵ متر مکعب بر ساعت	



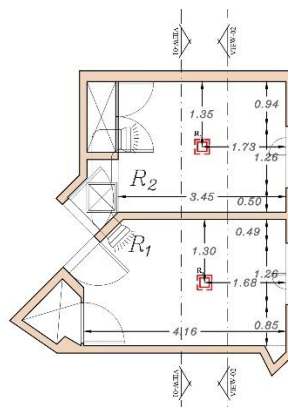
تصویر ۲: موقعیت قرارگیری اتاق‌ها نسبت فضاهای دیگر در پلان طبقه همکف خانه (مأخذ: نگارندگان)



تصویر ۱: نمای شمالی ساختمان مورد بررسی و موقعیت اتاق‌ها (مأخذ: نگارندگان)



تصویر ۴: موقعیت دیتالاگر قرار گرفته در محیط خارج از ساختمان (مأخذ: نگارندگان)



تصویر ۳: موقعیت سنسورها در پلان اندازه‌گذاری شده اتاق‌ها (مأخذ: نگارندگان)



تصویر ۶: نمایی از اتصال کنتور آب (مأخذ: نگارندگان)



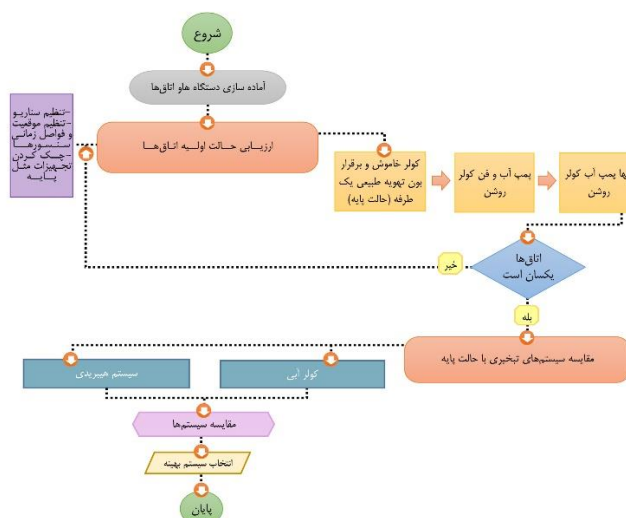
تصویر ۵: موقعیت قرارگیری کنتور آب (مأخذ: نگارندگان)

خلاصه‌ای از شرایط آزمایش و نمونه موردی در جدول ۲ نشان داده شده است. همچنین، تصویر ۷، مراحل و ترتیب پژوهش میدانی را به تصویر کشیده است. این آزمایش شامل دو مرحله است: ارزیابی حالت اولیه اتاق‌ها و ارزیابی شرایط استفاده از سیستم‌های تبخیری با تهویه طبیعی یک‌طرفه. ارزیابی اولیه اتاق‌ها با آزمایش دو اتاق مشابه مذکور شروع می‌شود که از نظر مشابهت و یکسان بودن، لازم است اعتبار سنجی شوند تا برای مقایسه در مرحله‌های بعدی پژوهش مورد استفاده قرار گیرند. ارزیابی شرایط استفاده از سیستم‌های تبخیری شامل دو قسمت است که با تهویه طبیعی یک‌طرفه به عنوان حالت پایه مقایسه می‌گردد: ۱. ارزیابی عملکرد سیستم هیبریدی؛ ۲. ارزیابی عملکرد کولر آبی.

جدول ۲: اطلاعات مربوط به نمونه مورد مطالعه و پایش میدانی

شهر/موقعیت	یزد ۳۱ / °52'17.5"N 54°21'35.6"E
نوع اقلیم	گرم و خشک
نوع ساختمان انتخابی	ساختمان مسکونی جدید دوطبقه (زیرزمین و همکف) / ساختمان جنوبی
وضعیت اشغال	اتاق‌ها بدون سکنه
جنس مصالح	دیوار: تری دی پانل (3D Panels) سقف: تیرچه‌بلوک
فصل اندازه‌گیری و مدت انجام آزمایش	تابستان، ۴ روز
تاریخ‌های اندازه‌گیری	۱۵، ۱۷، ۲۳، ۳۱ مرداد و ۴ شهریورماه
روش اندازه‌گیری	۲۴ ساعته به صورت متوالی

Hot-wire anemometer Temperature and Humidity Data Logger Semi-Dry Type Water Meter	دستگاه‌ها
دمای هوا، رطوبت نسبی، جریان هوا، میزان آب مصرفی	پارامترهای اندازه‌گیری
دو اتاق یکسان از خانه مسکونی انتخاب‌شده	محل آزمایش
کولر: ضلع شمالی اتاق‌ها: ضلع شمالی دریچه کولر: به سمت جنوب اتاق‌ها	وضعیت قرارگیری

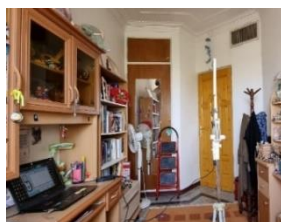


تصویر ۷: فلوچارت روند پژوهش میدانی (مأخذ: نگارندگان).

۳-۳- چگونگی پایش

۳-۳-۱- وضعیت پایش اولیه اتاق‌ها

به‌منظور پایش اولیه اتاق‌ها، در دو روز ۱۵ و ۱۷ مردادماه، بعد از بستن در اتاق‌ها و ایزوله کردن آن‌ها از بقیه فضاها، اندازه‌گیری شاخص‌های محیطی شروع شد. پنجره‌ها و دریچه‌های کولر در تمام طول آزمایش باز گذاشته شده بودند. سعی شد شرایط یکسان برای هر دو اتاق ۱ و ۲ ترتیب داده شود تا بتوان نسبت به وضعیت دو اتاق در مراحل بعدی آزمایش مقایسه درستی داشت (تصویر ۱۱-۸). روزهای آزمایش بافاصله یک روز نسبت به یکدیگر انتخاب شدند تا آثار آزمایش روز قبل بر پارامترهای آزمایش روز بعد تأثیر نگذارند. پارامترهای آزمایش، طی ۲۴ ساعت در هر دو روز اندازه‌گیری شدند. این مرحله آزمایش شامل سه حالت بود که در سه بازه زمانی مجزا بررسی شد. در نظر گرفتن سه حالت مختلف برای اندازه‌گیری، به این دلیل بود که نسبت به وضعیت یکسان بودن اتاق‌های ۱ و ۲ در شرایط مختلف اطمینان حاصل شود.



تصویر ۹: نمای جنوبی اتاق ۱ و موقعیت سنسورها (مأخذ: نگارندگان)



تصویر ۸: نمای شمالی اتاق ۱ و موقعیت سنسورها (مأخذ: نگارندگان)



تصویر ۱۱: نمای جنوبی اتاق ۲ و موقعیت سنسورها
(مأخذ: نگارندگان)



تصویر ۱۰: نمای شمالی اتاق ۲ و موقعیت سنسورها
(مأخذ: نگارندگان)

۳-۳-۲- وضعیت پایش سیستم‌های تبخیری

در این حالت از مطالعه میدانی، کارایی سیستم‌های تبخیری با حالت پایه مقایسه شد. این حالت شامل دو قسمت بود:

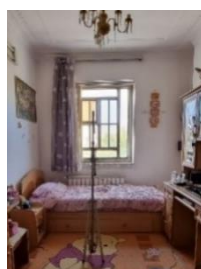
۱. ارزیابی عملکرد سیستم هیبریدی؛ ۲. ارزیابی عملکرد کولرآبی. در شرایط اقلیمی سخت شهر یزد، در بیشتر ساعات فصل تابستان، نیاز به استفاده از سیستم‌های خنک‌کننده است. به همین سبب، هر قسمت از این آزمایش به مدت ۲۴ ساعت در روزهای ذکر شده صورت گرفت؛ تا زمان مناسب استفاده از سیستم‌های خنک‌کننده تعیین گردد. در قسمت اول، در اتاق ۲ سیستم هیبریدی اعمال شد. این سیستم متشکل از دو فن با مشخصات ذیل است: ۱. قطر ۲۰ سانتی‌متر با میزان هوادهی ۱۰۰۰ مترمکعب بر ساعت و قدرت ۵۰ وات؛ ۲. قطر ۱۵ سانتی‌متر با میزان هوادهی ۳۵۰ مترمکعب بر ساعت و قدرت ۴۲ وات (Damandeh, ۲۰۲۳) که به ترتیب: اولی بر روی دریچه کولر و دومی بر روی پنجره نصب شد. درواقع، در کنار تست‌های اولیه شرایط بازشوها و دریچه‌ها، انواع مختلف فن‌ها نیز، موردبررسی قرار گرفت و فن‌هایی با شرایط مذکور انتخاب گردید. همراه با فعال بودن این سیستم در اتاق ۲، پنجره باز و تنها پمپ آب کولرآبی روشن گذاشته شد (تصویر ۱۲-۱۳). در همین زمان، در اتاق ۱، دریچه کولر مسدود گردید؛ درحالی‌که پنجره مانند پنجره اتاق ۲، به‌منظور برقراری تهویه طبیعی یک‌طرفه، باز گذاشته شد (تصویر ۱۵-۱۴). این قسمت از آزمایش در روزهای ۲۳ و ۳۱ مردادماه به‌عنوان دو روز گرم و آفتابی در گرم‌ترین ماه سال، صورت گرفت. در قسمت دوم، برای آزمایش کولرآبی، دریچه کولرآبی در اتاق ۲ پوشانده و پنجره، برای تهویه طبیعی یک‌طرفه، باز گذاشته شد. به دلیل محدودیت پایش میدانی، کولرآبی مورد استفاده در پژوهش میدانی، همان کولرآبی موجود در فضا بود که مشخصات آن در جدول ۳ ذکر شده است. در اتاق ۱، موتور و پمپ آب کولرآبی روشن و هردو پنجره و دریچه کولرآبی باز گذاشته شدند. این بخش آزمایش، در روز ۴ شهریور صورت گرفت.

جدول ۳: مشخصات کولرآبی آبسال

جریان مصرفی		توان مصرفی		قدرت موتور		هوادهی	بازده خنکی	فرکانس	ولتاژ
آمپر		کیلووات		اسب بخار		M ³ /hr	CFM	هرتز	ولت
کند	تند	کند	تند	کند	تند	۸۳۵۰	۴۹۰۰	۸۵	۲۲۰
۳/۲	۲/۵	۰/۴۰	۰/۸۹	۱/۴	۳/۴			۵۰	



تصویر ۱۵: وضعیت
دریچه کولر در اتاق ۱
(مأخذ: نگارندگان)



تصویر ۱۴: وضعیت
بازشو در اتاق ۱ (مأخذ:
نگارندگان)



تصویر ۱۳: موقعیت فن
قرارگرفته بر روی پنجره در
اتاق ۲ (مأخذ: نگارندگان)



تصویر ۱۲: موقعیت فن
قرارگرفته بر روی دریچه کولر
در اتاق ۲ (مأخذ: نگارندگان)

۴- نتایج و بحث

در این بخش، داده‌ها ذیل دو بخش تحلیل می‌گردد: در بخش اول، وضعیت اولیه اتاق‌ها بررسی می‌شود و در بخش دوم، شرایط استفاده از سیستم‌های تبخیری با تهویه طبیعی یک‌طرفه، به‌عنوان حالت پایه، بررسی می‌شود که این بخش خود، شامل دو قسمت است: ۱. سیستم هیبریدی؛ ۲. کولر آبی. نتایج، پارامترهای اندازه‌گیری شده‌ای چون دما و رطوبت محیط بیرونی و داخلی، جریان هوای داخل و مصرف آب سیستم را در برمی‌گیرد. جدول ۴، وضعیت حالات مختلف پایش را به‌صورت طبقه‌بندی شده نشان می‌دهد.

جدول ۴: حالات مختلف آزمایش همراه وضعیت اتاق‌ها

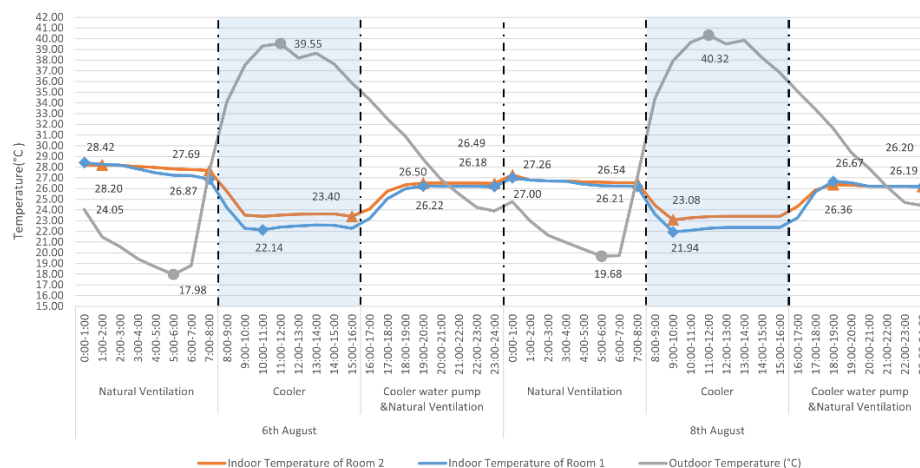
تاریخ	حالت‌های آزمایش	شرایط اتاق ۱	شرایط اتاق ۲
۱۴۰۱/۰۵/۱۵ اتاق‌های یکسان	تهویه طبیعی یک‌طرفه ۸:۰۰-۰۰:۰۰	پنجره باز در بسته دریچه کولر باز	پنجره باز در بسته دریچه کولر باز
	فن کولر روشن ۱۶:۰۰-۸:۰۰		
	تنها پمپ آب کولر روشن ۰۰:۰۰-۱۶:۰۰		
۱۴۰۱/۰۵/۱۷ اتاق‌های یکسان	تهویه طبیعی یک‌طرفه ۸:۰۰-۰۰:۰۰	پنجره باز در بسته دریچه کولر باز	پنجره باز در بسته دریچه کولر باز
	فن کولر روشن ۱۶:۰۰-۸:۰۰		
	تنها پمپ آب کولر روشن ۰۰:۰۰-۱۶:۰۰		
۱۴۰۱/۰۵/۲۳ سیستم هیبریدی	اتاق ۱: تهویه طبیعی یک‌طرفه اتاق ۲: سیستم هیبریدی (۲۴ ساعت)	پنجره باز در بسته دریچه کولر بسته	در بسته یک فن بر روی پنجره قرار گرفته است یک فن بر روی دریچه کولر قرار گرفته است
۱۴۰۱/۰۵/۳۱ سیستم هیبریدی	اتاق ۱: تهویه طبیعی یک‌طرفه اتاق ۲: سیستم هیبریدی (۲۴ ساعت)	پنجره باز در بسته دریچه کولر بسته	در بسته یک فن بر روی پنجره قرار گرفته است یک فن بر روی دریچه کولر قرار گرفته است
۱۴۰۱/۰۶/۰۴ کولر آبی	اتاق ۱: کولر آبی اتاق ۲: تهویه طبیعی یک‌طرفه (۲۴ ساعت)	پنجره باز در بسته دریچه کولر باز	پنجره باز در بسته دریچه کولر بسته

۴-۱- ارزیابی شرایط اولیه اتاق‌ها

تصویر ۱۶، دمای محیط بیرون و درون دو اتاق را در حالتی که در وضعیت یکسان قرار دارند، به تصویر کشیده است. تحلیل‌ها در این بخش از آزمایش، به دلیل توالی حالت‌ها، پس از تثبیت هر حالت صورت گرفته است. در هر دو اتاق ۱ و ۲، بیشترین دما به همان ساعات اولیه شروع آزمایش، یعنی ساعت ۰ بامداد در هر دو روز ۱۵ و ۱۷ مرداد مربوط است و کم‌ترین دما در حالتی است که کولر در این اتاق‌ها روشن بوده است. کمترین دمای به ثبت رسیده بین $21/9^{\circ}\text{C}$ تا $23/4^{\circ}\text{C}$ در این دو روز بوده است. هنگام تهویه شبانه، تغییرات دمای محیط داخل نسبت به محیط بیرون، کم محسوب می‌گردد، زیرا درحالی که دمای محیط بیرون حداکثر $6/1^{\circ}\text{C}$ کاهش می‌یابد، دمای محیط داخل حداکثر $1/5^{\circ}\text{C}$ پایین می‌آید. باوجود تفاوت فراوان طیف دمایی داخل و محیط بیرون در طول مدت آزمایش تهویه طبیعی یک‌طرفه، کاهش دما در این حالت بسیار کم است که از دلایل آن می‌توان به عایق‌هایی که در سازه تری دی پنل دیوارهای اتاق به‌کاررفته‌اند و همچنین کوچک بودن مساحت بازشوها به‌منظور تهویه طبیعی یک‌طرفه، اشاره کرد.

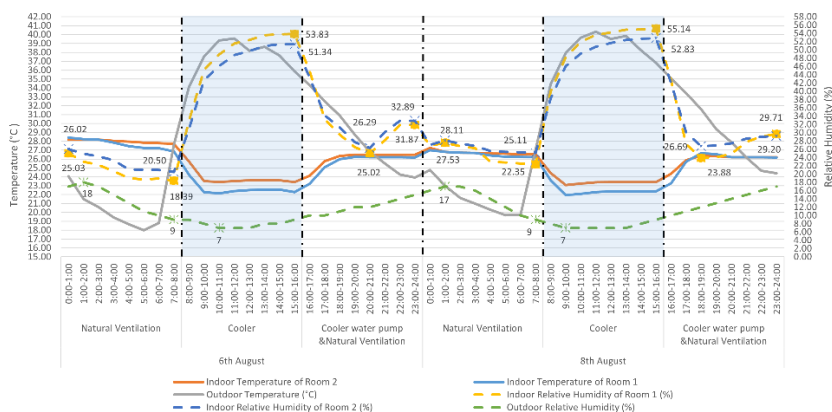
با به اوج رسیدن دمای بیرون و افزایش حداکثری آن تا $^{\circ}\text{C}$ ۶، به هنگام روشن شدن کولرآبی، دمای داخل بین $^{\circ}\text{C}$ ۳/۵ تا $^{\circ}\text{C}$ ۴/۷ کاهش یافت. در این زمان، باوجود نوسان دمایی بالای محیط بیرون، اتاق‌ها دارای نوسان دمایی نسبتاً ثابتی می‌باشند. این مسئله نشان می‌دهد، کولرآبی، به‌عنوان سیستم سرمایشی تبخیری، بر اساس دمای حباب‌تر (Wet-bulb temperature) عمل می‌کند و پس از افزایش رطوبت فضا تا میزان مشخصی، روند تغییر دما ثابت می‌شود. از دیگر دلایل این موضوع می‌توان به عایق بودن دیوارها اشاره کرد که با کاهش اتلاف بار سرمایشی، اتاق‌ها کمتر تحت تأثیر نوسان دمایی محیط بیرون قرار می‌گیرند.

در آخر آزمایش در هر دو روز ۱۵ و ۱۷ مرداد از ساعت ۱۶ تا ۲۴، کولرآبی خاموش شد و تنها پمپ آب کولرآبی در هر دو اتاق روشن ماند؛ هدف آزمایش بررسی تأثیر سرمایش تبخیری متکی بر تهویه طبیعی بود. دمای داخل در مدتی که تنها پمپ آب کولر روشن و تهویه طبیعی یک‌طرفه برقرار بود، بین $^{\circ}\text{C}$ ۰/۱ تا $^{\circ}\text{C}$ ۰/۵ کاهش نشان می‌داد؛ باوجود این که دمای محیط بیرون حداکثر تا $^{\circ}\text{C}$ ۱۰/۷ کاهش یافته بود. روند تغییر دمای اتاق تقریباً ثابت بوده و به همین منظور تأثیر پمپ آب کولر در سرمایش بسیار ناچیز تلقی می‌شود؛ عایق بودن دیوارها را نیز می‌توان علت این امر دانست. کاهش زیاد دمای محیط بیرون بیانگر عدم نیاز به سیستم سرمایشی مکانیکی با قدرت بالا مثل کولرآبی و امکان استفاده از راهکارهای جایگزین است.



تصویر ۱۶: دمای محیط بیرون و داخل اتاق‌ها در دو روز ۶ و ۸ August (۱۵ و ۱۷ مرداد) هنگام یکسان بودن وضعیت اتاق‌ها (مشخص شدن نتایج کولر توسط هایالات آبی رنگ) (مأخذ: نگارندگان).

تصویر ۱۷، در کنار دمای محیط داخل اتاق‌ها و بیرون، رطوبت نسبی آن‌ها را نیز به تصویر کشیده است. در زمان آزمایش تهویه طبیعی یک‌طرفه، هم‌زمان با کاهش دما، رطوبت نسبی نیز در اتاق‌ها کم شده است که به دنبال کاهش رطوبت نسبی محیط بیرون، حداکثر تا ۹٪، رطوبت نسبی اتاق‌ها حداکثر تا ۶٪ کاهش یافته است. رطوبت نسبی داخل اتاق‌ها در مدتی که کولرآبی روشن بود، با کاهش دما، بین ۲۸٪ تا ۳۵٪ افزایش پیدا کرده است؛ درحالی که رطوبت نسبی محیط بیرون به مقدار ناچیزی کاهش یافته است. کاهش رطوبت نسبی هوای محیط بیرون و افزایش حداکثری دما در این بازه زمانی، تأییدی بر مناسب بودن استفاده از سیستم سرمایش تبخیری در این زمان خواهد بود.



تصویر ۱۷: دما و رطوبت نسبی محیط بیرون و داخل اتاق‌ها در دو روز ۶ و ۸ August (۱۵ و ۱۷ مرداد) هنگام یکسان بودن وضعیت اتاق‌ها (مشخص شدن نتایج کولر توسط هایالایت آبی‌رنگ) (مأخذ، نگارندگان).

در بخش آخر، رطوبت نسبی داخل اتاق‌ها بعد از خاموش شدن تنها موتور کولر، به کمینه خود در این مرحله می‌رسد. بعد از تثبیت کاهش رطوبت نسبی اتاق‌ها، پمپ آب بر محیط داخل تأثیر اندکی داشته و رطوبت نسبی را افزایش و پیرو آن دما را به میزان بسیار ناچیز کاهش داده است. جریان هوای اتاق نیز برای سرعت بخشیدن به تبخیر آب و ایجاد کاهش دما کافی نبوده است. همچنین می‌تواند افزایش ناچیز رطوبت نسبی داخل می‌تواند به سبب افزایش رطوبت نسبی محیط بیرون بوده باشد، نه متأثر از پمپ آب. به‌منظور کاهش دمای داخل، عدم تجمع رطوبت نسبی در داخل و افزایش سرعت تبخیر آب و جایگزینی هوای سرد به‌جای گرم؛ می‌توان از وسیله‌ای مانند فن یا پنکه سقفی و یا ... استفاده کرد.

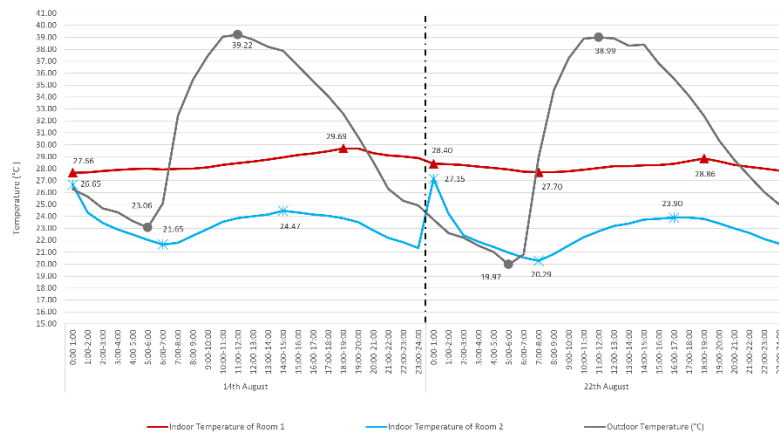
بررسی وضعیت هر دو اتاق در حالات مختلف حاکی از تفاوت حداکثر دمایی $1/26^{\circ}\text{C}$ و رطوبت نسبی ۳٪ است که با ضریب همبستگی دمایی ۹۸٪ و رطوبت نسبی ۹۹٪، مشابهت آن‌ها به اثبات رسیده است. همچنین، با مشابه بودن میانگین دمایی و رطوبت نسبی محیط بیرون در این دو روز، می‌توان گفت، شرایط مناسب برای انجام آزمایش فراهم بوده است. اندازه‌گیری‌ها در تمامی حالات نشان می‌دهند که تفاوت سرعت جریان هوا نیز، در اتاق‌ها ناچیز بوده است (حداکثر $0/02\text{ m/s}$). همان‌طور که مشخص است، کاهش بیشتر دما و رطوبت نسبی در اتاق یک، نسبت به اتاق دو، در مرحله اول و آخر و افزایش بیشتر رطوبت نسبی همراه با کاهش دمای بیشتر در اتاق یک در مرحله دوم؛ گویای نرخ جابه‌جایی بیشتر هوای اتاق یک است. موقعیت دریچه و کانال کولر را می‌توان از علت‌های این موضوع دانست. به همین سبب، به هنگام روشن شدن کولرآبی، هوای مرطوب بیشتری وارد اتاق یک شده و با خاموش شدن آن، سریع‌تر خارج شده است.

۴-۲- ارزیابی سیستم‌های تبخیری

۴-۲-۱- بررسی عملکرد سیستم هیبریدی

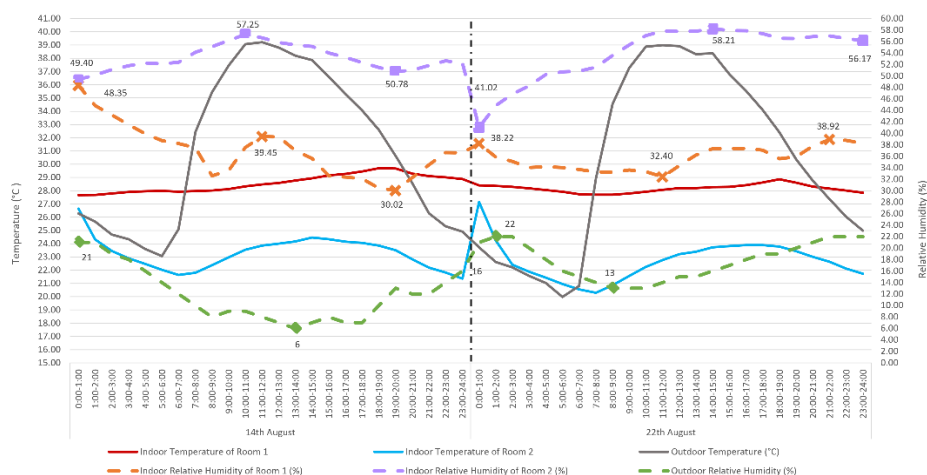
در این آزمایش، به‌منظور برقراری تهویه طبیعی در اتاق یک و بررسی عملکرد سیستم هیبریدی در اتاق دو، پنجره‌های هر دو اتاق باز گذاشته شدند. در اتاق دو، فن‌های سیستم هیبریدی روشن و هم‌زمان، تنها پمپ آب کولرآبی روشن شد. آب مصرفی توسط پمپ آب کولر، همان آب شهری با دمای بین 25°C تا 26°C در تابستان است. تصویر ۱۸، تفاوت دما و رطوبت نسبی بین محیط بیرونی و داخل اتاق‌ها را نشان می‌دهد. دمای داخلی اتاق یک در هر دو روز با ۴ الی ۷ ساعت تأخیر، نسبت به دمای محیط بیرون، به حداکثر می‌رسد که عایق بودن دیوار را می‌توان یکی از دلایل این تأخیر زمانی دانست. در ابتدای آزمایش، دمای دو اتاق تقریباً مشابه یکدیگر بوده‌اند و تحلیل‌ها پس از تثبیت وضعیت اتاق‌ها صورت گرفته‌اند. بر اساس تصویر، اثر مثبت سیستم هیبریدی کاملاً مشهود است؛ زیرا این سیستم در اتاق ۲، به‌صورت تقریبی، بین $3/4^{\circ}\text{C}$ تا $7/5^{\circ}\text{C}$ نسبت به اتاق یک با تهویه طبیعی یک‌طرفه، کاهش دما ایجاد کرده است. باوجود نوسان دمایی حداکثر 19°C محیط بیرونی و تفاوت بالای دمای اتاق دو با آن، دمای داخل دارای نوسان اندکی بود؛ زیرا با در نظر گرفتن

تفاوت بیشینه و کمینه دمایی اتاق دو، در این دو روز تنها حدود $3/2^{\circ}\text{C}$ نوسان دمایی مشاهده شد. این موضوع از مزیت‌های این سیستم تلقی می‌شود.



تصویر ۱۸: دمای محیط بیرون و داخل اتاق‌ها در دو روز ۱۴ و ۲۲ ام August (۲۳ و ۳۱ مرداد) هنگام برقرار بودن تهویه طبیعی یک‌طرفه در اتاق یک و استفاده از سیستم هیبریدی در اتاق دو (مأخذ: نگارندگان).

با توجه به تصویر ۱۹، می‌توان به رابطه معکوس بین دما و رطوبت نسبی محیط بیرون پی برد. اتاق‌ها نه تنها از نظر دمایی، بلکه از نظر رطوبت نسبی هم در آغاز آزمایش، یکسان بودند. در طول آزمایش، سیستم هیبریدی در اتاق دو نسبت به اتاق یک در این دو روز، بین ۵٪ تا ۲۵٪ اختلاف ایجاد کرده است. با وجود نوسان حداکثر ۱۵٪ رطوبت نسبی محیط بیرون در این دو روز، نوسان رطوبت نسبی در اتاق دو تقریباً ثابت و حداکثر ۶٪ است. این موضوع نشان‌دهنده توانایی سودمند سیستم هیبریدی در این اتاق است. در جهت بهبود شرایط آسایش داخل، سیستم پیشنهادی توانسته است رطوبت نسبی اتاق دو را حداکثر تا ۲۴٪ نسبت به محیط بیرون و با کسر اختلاف اولیه رطوبت اولیه با محیط بیرون، افزایش دهد و این، یکی دیگر از ویژگی‌های مثبت این سیستم، محسوب می‌شود. برخلاف اتاق دو، اتاق یک با تهویه طبیعی یک‌طرفه، رطوبت نسبی نوسان داری را به ثبت رسانده است که در مقایسه با رطوبت نسبی محیط بیرون ناچیز تلقی می‌شود. علت این تأخیر را می‌توان نرخ پایین تعویض هوای محیط اتاق یک دانست. گفتنی است، میانگین سرعت جریان در اتاق یک با تهویه طبیعی یک‌طرفه، در هر دو روز تقریباً برابر با 0.2 m/s و در اتاق دو در هر دو روز، تقریباً 0.2 m/s اندازه‌گیری شده است؛ بنابراین، قرارگیری فن در بالای اتاق، منجر به افزایش ناچیز سرعت جریان هوا در مرکز اتاق شده است که محل آسایش حرارتی ساکنین، نیست.



تصویر ۱۹: دما و رطوبت نسبی محیط بیرون و داخل اتاق‌ها در دو روز ۱۴ و ۲۲ ام August (۲۳ و ۳۱ مرداد) هنگام برقرار بودن تهویه طبیعی یک‌طرفه در اتاق یک و استفاده از سیستم هیبریدی در اتاق دو (مأخذ: نگارندگان).

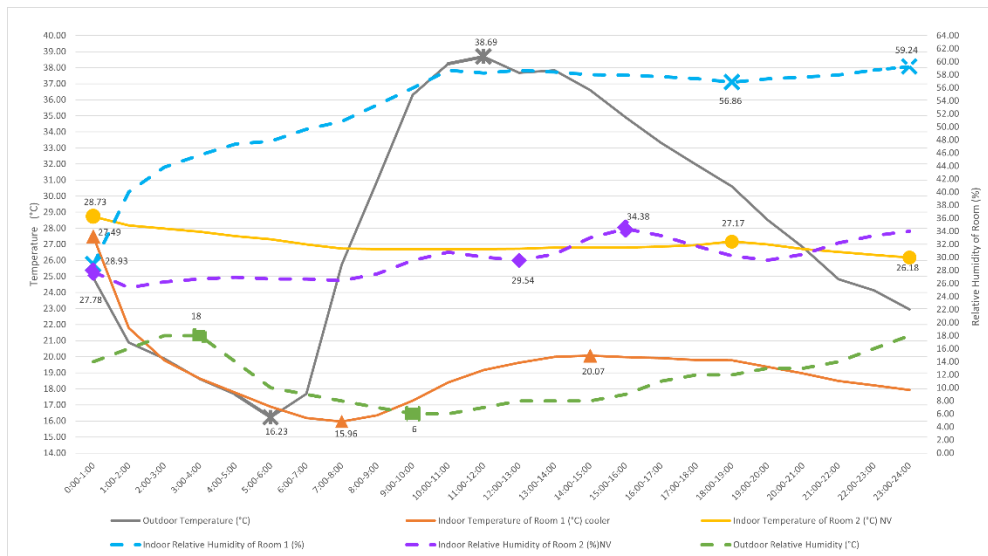
سیستم هیبریدی متشکل از دو فن و اجزای کولر آبی است. کانال‌های کولر آبی می‌توانند مانند بادگیر مرطوب و یا سیستم خنک‌کننده تبخیری غیرفعال با جریان رو به پایین باشند؛ به گونه‌ای که گاهی به صورت غیرفعال عمل می‌کنند و باد را از خود به داخل عبور می‌دهند؛ اما با توجه به افت فشار باد در این مسیر، به منظور مکش باد به داخل کانال، به فن نیاز است. از طرفی تنها روشن کردن پمپ آب کولر آبی، در محفظه آن، رطوبت مورد نیاز برای کاهش دمای هوا را در اختیار سیستم قرار می‌دهد. با تبخیر قطرات آب، گرمای محسوس به گرمای نهان تبدیل می‌شود و دمای هوای ورودی به فضا، کاهش می‌یابد. با وجود کاهش دمای مناسب توسط این سیستم، مصارف آب و برق آن نیز، در بخش‌های بعد مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۴-۲-۲- بررسی عملکرد کولر آبی

این آزمایش، مشابه آزمایش قبل در طی ۲۴ ساعت، یعنی از ساعت ۰ بامداد تا ۲۴، در روز ۴ شهریورماه صورت گرفته است. برای مقایسه عملکرد کولر آبی با حالت پایه، با روشن شدن موتور کولر آبی و پمپ آن، دریچه کولر در اتاق یک باز گذاشته و بالعکس در اتاق دو بسته نگه داشته شد. سپس، درها به منظور عدم ارتباط دو اتاق با محیط بیرون و با یکدیگر، بسته شدند. همانند اتاق دو، پنجره اتاق یک نیز، می‌بایست باز باشد؛ زیرا کولر آبی با ایجاد فشار مثبت در فضا، در راستای عملکرد بهتر، نیاز به تهویه طبیعی دارد تا جریان عرضی برقرار شود. همچنین، باز گذاشتن پنجره به هنگام روشن بودن کولر، منجر به مکش هوای خنک بیشتر، فشار کمتر به موتور، عدم دم کردن آن و نرخ جریان هوای بیشتر فضا می‌شود. اندازه‌گیری‌های دما و رطوبت نسبی اتاق‌ها و محیط بیرونی در تصویر ۲۰ قابل مشاهده است. دو اتاق از نظر دما و رطوبت نسبی در ابتدای آزمایش شرایط مشابهی داشتند و تحلیل‌ها پس از تثبیت وضعیت اتاق‌ها انجام گرفته‌اند. اتاق یک نیز با فاصله زمانی ۳ الی ۴ ساعت تأخیر، نسبت به دمای محیط بیرون و اتاق دو، با ۷ ساعت تأخیر، دمای بیشینه خودشان را به ثبت می‌رسانند. عایق بودن دیوار و کوچک بودن بازشوها را می‌توان از دلایل این تأخیر دانست.

با ثبات یافتن روند آزمایش، کولر آبی در اتاق یک، نسبت به اتاق دو، با بهره‌گیری از تهویه طبیعی یک‌طرفه، بین $6/4^{\circ}\text{C}$ تا $8/3^{\circ}\text{C}$ کاهش دما و بین ۱۲٪ تا ۳۳٪ افزایش رطوبت نسبی ایجاد کرد. یکی دیگر از پارامترهای اندازه‌گیری شده در اتاق‌ها، سرعت جریان هوا است که در روز ۴ شهریور در اتاق یک $0/1\text{ m/s}$ و در اتاق دو، با تهویه طبیعی یک‌طرفه، $0/1\text{ m/s}$ به ثبت رسیده است. مشاهده می‌شود نرخ جریان هوای ورودی در اتاق ۱، نسبت به اتاق ۲، بیشتر است. به همین سبب، اتاق ۱ از دمای محیط بیرون نسبت به اتاق دو تأثیرپذیری سریع‌تری داشته است که دلیل آن وجود موتور کولر و بالا رفتن نرخ جریان هوای ورودی به واسطه آن است.

با وجود نوسان دمایی بالای $22/5^{\circ}\text{C}$ محیط بیرون و اختلاف دمایی بالای اتاق یک با محیط بیرون، این اتاق پس از به ثبات رسیدن، نوسان دمایی کم $4/1^{\circ}\text{C}$ را از خود نشان داده است؛ اما مشاهده می‌شود که اتاق دو نسبت به اتاق یک (حدود 1°C) دارای نوسان کمتری بوده است که بر پایین بودن نرخ جابه‌جایی هوا در این اتاق دلالت دارد. اتاق یک، در این روز، نوسان ۲٪ رطوبت نسبی از خود نشان داده است که در مقایسه با نوسان ۱۲٪ رطوبت نسبی محیط بیرون، تقریباً روند ثابتی را دارا است. کولر آبی، به عنوان سیستم تبخیری مستقیم، رطوبت نسبی داخل اتاق یک را حداکثر تا ۳۸٪ نسبت به محیط بیرون و با کسر اختلاف رطوبت اولیه اتاق با محیط بیرون، افزایش می‌دهد. برخلاف اتاق یک، اتاق دو، نوسان بالاتر رطوبت نسبی را نشان می‌دهد که این نوسان برابر ۵٪ است؛ اما نسبت به تغییرات رطوبت نسبی محیط بیرون، مقدار اندکی محسوب می‌گردد. لذا این عدم تأثیرپذیری اتاق دو از رطوبت نسبی محیط بیرون، به سبب پایین بودن نرخ جریان هوا در این اتاق است.



تصویر ۲۰: دما و رطوبت نسبی محیط بیرون و داخل اتاق‌ها در دو روز ۲۶ ام August (۴ شهریور) هنگام برقرار بودن تهویه طبیعی یک طرفه در اتاق یک و استفاده از کولرآبی در اتاق دو (مأخذ، نگارندگان)

جدول ۵ خلاصه‌ای از نتایج آزمایش‌های میدانی را در روزهای مشخص شده نشان می‌دهد. زمانی که اتاق‌ها از نظر یکسان بودن مورد بررسی قرار گرفتند از بین سه حالت آزمایش شده تنها کولرآبی بر کاهش دمای فضا نقش مؤثری داشت و بقیه حالت‌ها تأثیر چندانی نداشتند. به طور کلی، اگرچه کاهش دمای بیشتری توسط کولرآبی ایجاد می‌شود؛ در ساعات نیاز به سرمایش نسبی نظیر بعدازظهر، شب و ساعات اولیه صبح به سبب محدودیت در کنترل باعث بیش سرمایش فضا و سلب آسایش ساکنان در ساعاتی نظیر می‌شود. در این راستا، ساکنان به منظور کنترل دمای داخل با باز گذاشتن بازوهای بیشتر سبب اتلاف انرژی بیشتر و هدر رفت آب خواهند شد. با فرض در نظر گرفتن حداقل کولرآبی مناسب و موجود در بازار برای دو اتاق مورد مطالعه (۱۳۰۰ CFM)، مصرف آب ۱۵ لیتر بر ساعت و برق ۹/۴ کیلووات ساعت در شبانه‌روز خواهد بود (Absal, ۲۰۲۳). لذا برای کاهش مصرف آب و برق کولرآبی، می‌بایست سیستمی در نظر گرفته شود که در ساعات غیر اوج گرما، برای تأمین آسایش حرارتی مناسب فضا، مورد استفاده قرار گیرد و زمان استفاده از کولرآبی را به کاهش دهد. پیرو این موضوع، مصرف آب و برق سیستم هیبریدی نیز مورد بررسی قرار گرفته و به ثبت رسیده است. اندازه‌گیری‌ها مصرف آب و برق کولرآبی را در یک شبانه‌روز به ترتیب ۲۹۰ لیتر و ۱۰ kWh نشان داده‌اند؛ اما استفاده از سیستم پیشنهادی این مقدار را به ۱۰ لیتر و ۲/۶ kWh رسانده و باعث کاهش ۹۶٪ مصرف آب و ۷۴٪ مصرف برق شده است.

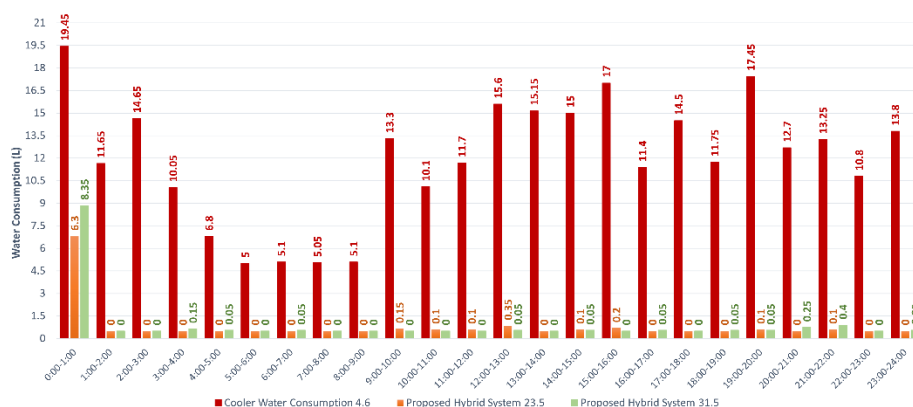
جدول ۵: خلاصه‌ای از نتایج پارامترهای اندازه‌گیری شده در آزمایش میدانی به صورت شبانه‌روزی

تاریخ	حالت‌های آزمایش	میانگین دمای بیرون (°C)	میانگین رطوبت بیرون (%)	کل مصرف آب (L)	مصرف برق (kWh)	اتاق‌ها	میانگین دمای داخل (°C)	میانگین رطوبت نسبی داخل (%)	میانگین جریان هوای داخل (°C)
اتاق‌های یکسان ۱۴۰۱/۰۵/۱۵	تهویه طبیعی	۲۱/۰۸	۱۳/۷۵	-	-	اتاق ۱	۲۷/۶۹	۲۰/۷۴	۰/۰۰
	تهویه طبیعی	۲۱/۰۸	۱۳/۷۵	-	-	اتاق ۲	۲۷/۹۹	۲۲/۷۷	۰/۰۰
	فن کولر	۳۷/۶۱	۷/۸۸	۱۳۰/۹	۳/۳۳	اتاق ۱	۲۲/۶۲	۴۹/۰۰	۰/۱۵
	فن کولر	۳۷/۶۱	۷/۸۸	۱۳۰/۹	۳/۳۳	اتاق ۲	۲۳/۸۰	۴۶/۴۶	۰/۱۳
	تهویه طبیعی	۲۸/۳۷	۱۲/۱۳	۳/۵۵	۰/۱۳	اتاق ۱	۲۵/۶۶	۳۱/۳۹	۰/۰۳

۰/۰۲	۳۲/۳۵	۲۶/۰۹	اتاق ۲						
۰۰/۰۰	۲۴/۷۵	۲۶/۵۴	اتاق ۱	-	-	۱۳/۸۸	۲۲/۱۴	تهویه طبیعی یک طرفه	۸۰۰-۰۰۰
۰/۰۰	۲۶/۳۴	۲۶/۷۲	اتاق ۲						
۰/۱	۵۱/۶۳	۲۲/۴۲	اتاق ۱	۳/۳۳	۱۲۷/۸۵	۷/۵۰	۳۸/۳۴	فن کولر روشن	۱۶:۰۰-۸:۰۰
۰/۰۸	۴۹/۲۳	۲۳/۴۷	اتاق ۲						
۰/۰۲	۲۸/۶۴	۲۵/۸۷	اتاق ۱	۰/۱۳	۲/۷۵	۱۳/۵۰	۲۹/۰۸	تهویه طبیعی کولر پمپ آب روشن	۰۰:۰۰-۱۶:۰۰
۰/۰۱	۲۹/۹۹	۲۵/۹۶	اتاق ۲						
۰/۰۰	۳۶/۸۷	۲۸/۵۷	اتاق ۱	۲/۵۹	۷/۵	۱۱/۸۳	۳۱/۰۶	اتاق ۱: تهویه طبیعی یک طرفه اتاق ۲: سیستم هبیریادی (۲۴ ساعت)	۱۴۰۱/۰۵/۳۳
۰/۰۲	۵۳/۱۰	۲۳/۲۸	اتاق ۲						
۰/۰۰	۳۵/۶۷	۲۸/۱۶	اتاق ۱	۲/۵۹	۹/۵۵	۱۷/۷۹	۳۰/۱۰	اتاق ۱: تهویه طبیعی یک طرفه اتاق ۲: سیستم هبیریادی (۲۴ ساعت)	۱۴۰۱/۰۵/۳۱
۰/۰۲	۵۳/۹۵	۲۲/۷۱	اتاق ۲						
۰/۱۰	۵۳/۱۸	۱۹/۰۸	اتاق ۱	۹/۹۹	۲۸۶/۳۵	۱۱/۴۵	۲۸/۱۶	اتاق ۱: کولر آبی اتاق ۲: تهویه طبیعی یک طرفه (۲۴ ساعت)	۱۴۰۱/۰۶/۰۴
۰/۰۰	۲۹/۷۱	۲۷/۰۴	اتاق ۲						

۴-۳- مقایسه مصرف آب سیستم هبیریادی و کولر آبی

تصویر ۲۱، مصرف آب سیستم هبیریادی را به صورت ساعتی نشان می دهد. در ساعت اولیه آزمایش، هر دو سیستم مصرف آب بالاتری نسبت به بقیه ساعات از خود نشان داده اند که علت آن، نیاز به خیس شدن تمامی پوشال های محفظه کولر آبی است. عموماً، محفظه تمام کولر های آبی دارای یک شناور است و به محض این که آب، به سطح خاصی در کف آن برسد، آب رسانی قطع می گردد. در تمامی زمان ها، آب به صورت پیوسته در محفظه کولر آبی در حال گردش است و در صورتی که سطح آب در کف کولر پایین بیاید، شناور، آب را مجدداً وصل می کند. فعالیت موتور کولر در محفظه خیس کولر آبی از جمله دلایلی است که باعث می شود مصرف آب توسط این سیستم تبخیری مکانیکی بیشتر شود. برخلاف موتور کولر که نزدیک به پوشال ها قرار گرفته است و باعث افزایش تبخیر و اتلاف بار سرمایشی می گردد؛ فن مکنده در فاصله ای دورتری از محفظه کولر آبی به منظور هدایت هوای خنک شده به داخل ساختمان، واقع شده است.



تصویر ۲۱: مصرف آب توسط کولرآبی و سیستم هیبریدی در سه روز ۲۳ و ۳۱ مردادماه و ۴ شهریورماه (مآخذ: نگارندگان)

۴-۵- مقایسه مصرف برق سیستم هیبریدی و کولرآبی

با توجه به این که سیستم‌های خنک‌کننده تبخیری مکانیکی مانند کولرآبی در اقلیم‌های گرم و خشک نسبت به سیستم‌های مبتنی بر مبرد از بهترین عملکرد برخوردارند؛ از آن‌ها به عنوان سیستم‌های معمول سرمایشی خانه‌ها استفاده می‌شود؛ اما این سیستم‌ها با مصرف فراوان آب و برق همراه هستند. بر طبق مشخصات درج‌شده بر روی کولرآبی با قدرت هوادهی $8350 \text{ m}^3/\text{hr}$ ، مصرف برق کولرآبی با دور کند 0.4 kW و با دور تند 0.89 kW است. رابطه زیر میزان مصرف وسیله‌های برقی را در طول زمان مشخص، برحسب کیلووات ساعت، نشان می‌دهد:

$$kWh = \frac{\text{Watts} \times \text{time (hrs)}}{1000} \quad (1)$$

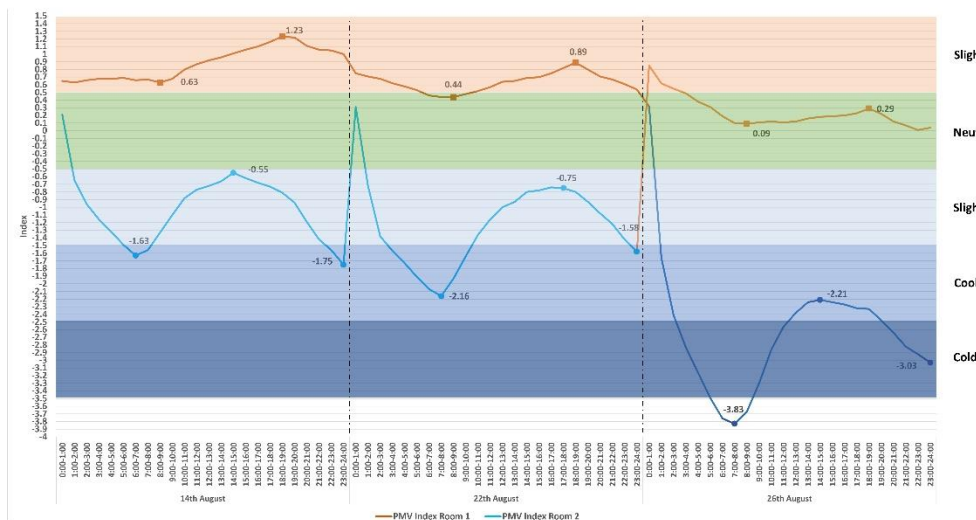
که Watt مصرف برق وسیله برقی، time مدت زمان استفاده از وسیله، kWh میزان برق مصرفی وسیله در طول زمان است. بر اساس رابطه (۱) میزان مصرف برق فن کولر به‌تهایی در طول یک شبانه‌روز برابر با $9/6 \text{ kWh}$ است. با توجه به این که توان برق مصرفی پمپ آب برابر با 16 W است در یک شبانه‌روز مصرف برق کولرآبی برابر $9/9 \text{ kWh}$ است. این در حالی است که سیستم هیبریدی تنها از دو فن تشکیل شده است که توان برق مصرفی فن‌ها 50 W و 42 W است. مصرف برق فن‌ها در طول یک شبانه‌روز، برابر با $2/20 \text{ kWh}$ خواهد بود. حال اگر میزان برق مصرفی پمپ آب کولر را هم به آن اضافه کنیم، مصرف کلی سیستم هیبریدی پیشنهادی برابر با $2/59 \text{ kWh}$ خواهد بود. با مقایسه مصرف برق هردو سیستم تبخیری کولرآبی و سیستم هیبریدی پیشنهادی کاهش مصرف ۷۴ درصد برق توسط سیستم هیبریدی پیشنهادی جدید مشاهده می‌شود.

۴-۶- بررسی شرایط آسایش در سیستم هیبریدی و کولرآبی

بخش عمده‌ای از فعالیت‌های زندگی هر انسان در فضاهای داخلی صورت می‌گیرد. از این‌رو، در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متفاوتی با انجام پایش‌های میدانی و تطبیق نتایج با شاخص‌های آسایش حرارتی، به ارزیابی عملکرد حرارتی فضاهای داخلی پرداخته‌اند (Zare Mohazabie, zadeh-Boni, Heidari, & Soltan-Dar-zadeh Pileh-Reza, ۲۰۲۲). برای ارزیابی قابل قبول بودن شرایط حرارتی سیستم هیبریدی پیشنهادی در اتاق‌ها، شاخص متوسط آرای پیش‌بینی شده (PMV) مورد قبول استاندارد اشری ۵۵ (ASHRAE)، به عنوان راهنمای اصلی در نظر گرفته شد. استاندارد اشری ۵۵، محدوده آسایش حرارتی را در این شاخص بین -0.5 تا $+0.5$ توصیه می‌کند که می‌تواند رضایت ۸۰ درصد ساکنان یا بیشتر را به دست آورد. دمای مؤثر توصیه شده توسط استاندارد برای فصل تابستان، با نرخ پوشش 0.5 clo ، برای رطوبت ۳۰ درصد برابر با $24/5^\circ\text{C} - 28^\circ\text{C}$ و برای رطوبت ۶۰ درصد برابر با $23^\circ\text{C} - 25/5^\circ\text{C}$ است. همچنین توصیه می‌کند که رطوبت نسبی زیر ۶۰ درصد حفظ شود. از سوی دیگر، رطوبت بسیار کم می‌تواند به افزایش الکتریسیته ساکن و مشکلات سلامتی مانند تحریک پوست منجر شود. لذا رطوبت نسبی باید از ۳۰

درصد بیشتر باشد. در ادامه، به منظور آسایش ساکنان، میانگین سرعت هوای کمتر از 0.15 m/s را پیشنهاد می‌کند (American Society of Heating & Engineers, 2017). برای مقایسه آسایش حرارتی اتاق‌های دارای تهویه طبیعی یک‌طرفه و سیستم هیبریدی پیشنهادی و کولرآبی؛ لازم است پارامترهای مربوط به شاخص PMV مورد بررسی قرار گیرند. میانگین جریان و دما و رطوبت نسبی به صورت ساعتی برای سه روز ۲۳ و ۳۱ مرداد و ۴ شهریور، وارد سایت شدند و محاسبات به صورت آنلاین توسط برنامه معتبر (Tartarini, Schiavon, Cheung, & Hoyt, 2020)، تنظیم شده توسط دانشگاه کالیفرنیا، صورت گرفت.

نموداری به واسطه خروجی مقادیر شاخص PMV، برای هر دو اتاق در سه روز ذکر شده ترسیم شده است (تصویر ۸). محدوده‌های احساس حرارتی در بازه‌های مشخص بارنگ‌های متفاوت، متمایز شده‌اند تا راحت‌تر بتوان عملکرد سیستم‌ها و وضعیت اتاق‌ها را مورد ارزیابی قرار داد. نمودار سیستم هیبریدی در اتاق ۲، در روزهای ۲۳ و ۳۱ مرداد، بیشتر در محدوده کمی سرد قرار گرفته است که با در نظر گرفتن اتلاف بار سرمایشی در اکثر خانه‌ها، می‌تواند آسایش حرارتی را به همراه داشته باشد. در کل، نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهند، سیستم هیبریدی در بیشتر ساعات، تقریباً توانسته است عملکرد مؤثری داشته باشد و در صورتی که میانگین دمای هوا بالا باشد، می‌تواند به جای کولرآبی در ساعات بعدازظهر، شب و ساعات اولیه صبح (بین ساعات ۱۸ تا ۸) مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، به سبب پاسخگویی سیستم پیشنهادی در مردادماه، به عنوان گرم‌ترین ماه سال، توانایی برقراری آسایش حرارتی در دیگر ماه‌های گرم تابستان و بهار را نیز، خواهد داشت. با بررسی هم‌زمان روند شاخص اتاق ۱ که دارای تهویه طبیعی یک‌طرفه بوده، در روز ۲۳ و ۳۱ مرداد، می‌توان به عدم کفایت تهویه طبیعی یک‌طرفه اشاره کرد. ضمناً دلیل مناسب بودن نسبی دمای اتاق ۱، می‌تواند عایق کاری مناسب و پیش سرمایش اولیه ناشی از سیستم خنک‌کننده خانه باشد.



تصویر ۲۲: نمایی از مقادیر خروجی شاخص PMV برای اتاق‌های ۱ و ۲ در سه روز ۲۳ و ۳۱ مردادماه و ۴ شهریورماه (مأخذ: نگارندگان)

اتاق ۱، با داشتن کولرآبی در روز ۴ شهریور، نه تنها به بازه خنثی نزدیک نشده است، بلکه از محدوده خیلی سرد هم عبور کرده و نامطلوب است. درواقع، کولرآبی در ساعاتی که اوج گرما نیست، با افزایش بار سرمایشی بیش از حد، باعث می‌شود ساکنان پنجره‌ها را همراه با روشن بودن کولر باز بگذارند. به سبب کاهش اتلاف بار سرمایشی ناشی از این مسئله، اقدامات مقتضی مورد نیاز است. همچنین ایجاد بار سرمایشی پایین‌تر از محدوده آسایش به‌مرورزمان، انتظارات ساکنان نسبت به دمای آسایش را بالا می‌برد که به روشن کردن مداوم سیستم‌های تهویه مطبوع منجر می‌شود. مشاهده می‌شود، در روز ۴ شهریور، اتاق ۲، با تهویه طبیعی یک‌طرفه در بیشتر ساعات، با صرف نظر از مقادیر شاخص در ساعات اولیه، در محدوده خنثی قرار دارد که بر بار سرمایشی فضا قبل از شروع آزمایش، عایق بودن فضا و پایین آمدن میانگین دمای هوا

با نزدیک شدن به فصل پاییز، دلالت دارد. در صورتی که میانگین دمای هوا بالاتر می‌بود، کولر می‌توانست بازه بهتری به ثبت برساند و در محدوده سرد و کمی سرد قرار بگیرد.

۵- نتیجه‌گیری

روشن است، سیستم‌های سرمایش تبخیری مکانیکی، از نظر مصرف انرژی، گزینه بهتری نسبت به سیستم‌های مبتنی بر میرد، محسوب می‌گردند؛ اما به سبب مصرف فراوان آب در اقلیم‌های گرم و خشک، استفاده از آن‌ها با محدودیت روبرو است. بنابراین، با به‌کارگیری دوفن آکسیال با دبی ۳۵۰ و ۱۰۰۰ مترمکعب بر ساعت و تنها پمپ آب (رطوبت زایی) و کانال کولرآبی موجود در فضا، بدون استفاده از موتور کولر، سیستمی پیشنهاد گردید که علاوه بر تأمین آسایش حرارتی، در مقایسه با کولرآبی، کاهش مصرف آب و برق را در پی داشت. به عبارتی، سیستم مذکور از کانال کولر به‌عنوان، "بادگیر مرطوب" یا "سیستم خنک‌کننده غیرفعال تبخیری با جریان رو به پایین (passive downdraft evaporative cooling)"، استفاده می‌کند و هوای خنک را به‌وسیله مکش فن‌ها به داخل هدایت می‌کند.

پژوهش حاضر، عملکرد سیستم هیبریدی پیشنهادی، تهویه طبیعی یک‌طرفه و سیستم کولرآبی را در محیط داخل، به‌صورت تجربی، با استفاده از پارامترهای میزان آب مصرفی، دمای هوا و رطوبت نسبی، سرعت جریان هوا محیط داخل و محیط بیرون، بررسی می‌کند. این پارامترها طی ۲۴ ساعت، توسط دستگاه‌های معتبر، در تابستان و در اقلیم گرم و خشک یزد، اندازه‌گیری شده است. پژوهش میدانی در دو اتاق خواب مجاور، در یک واحد مسکونی ویلایی در شهر یزد، انجام‌یافته است. در طول پژوهش، دو حالت مختلف در این دو اتاق آزمایش شدند. در حالت اول، وضعیت دو اتاق در دو روز ۱۵ و ۱۷ مرداد به‌صورت یکسان و به سه صورت مختلف ارزیابی شدند؛ به‌طوری‌که در ۸ ساعت اول، تهویه طبیعی یک‌طرفه، در ۸ ساعت دوم، کولرآبی و در ۸ ساعت سوم، تنها پمپ آب کولرآبی در ترکیب با تهویه طبیعی یک‌طرفه در این دو روز به‌صورت مجزا آزمایش شدند. در حالت دوم، یکی از اتاق‌ها با تهویه طبیعی یک‌طرفه، به‌عنوان حالت پایه در نظر گرفته شد و اتاق دوم با سیستم هیبریدی در روز ۲۳ و ۳۱ مرداد و با کولرآبی در روز ۴ شهریورماه موردبررسی قرار گرفت.

نتایج نشان داده است که اتاق‌ها در حالات مختلف، عملکرد یکسانی داشته‌اند که اثباتی بر یکسان بودن آن‌ها به‌منظور مقایسه‌های بعدی بود. در این مرحله، سه حالت تهویه طبیعی یک‌طرفه، کولرآبی و سرمایش تبخیری متکی بر تهویه طبیعی به ترتیب هر کدام در طول ۸ ساعت، موردبررسی قرار گرفتند. در این راستا، به‌جز کولرآبی، راهکارهای تهویه طبیعی یک‌طرفه و سرمایش تبخیری متکی بر تهویه طبیعی، در کاهش دمای فضا نقشی نداشتند. سپس، عملکرد سیستم‌های تبخیری در مقایسه با تهویه طبیعی یک‌طرفه، به‌عنوان مدل پایه ارزیابی شد. استفاده از سیستم هیبریدی پیشنهادی، به‌طور میانگین کاهش دمای $5/5^{\circ}\text{C}$ و افزایش رطوبت نسبی ۱۶ تا ۱۸ درصد نسبت به اتاق دارای تهویه طبیعی یک‌طرفه، به همراه داشت. همچنین، باوجود تفاوت میانگین دمایی زیاد اتاق دارای سیستم با محیط بیرون و نوسان دمایی زیاد محیط بیرون؛ نوسان دمایی این سیستم بسیار پایین است. اگرچه نوسان رطوبت نسبی محیط بیرون بالا است و میانگین رطوبت نسبی اتاق دارای سیستم، اختلاف زیادی با محیط بیرون دارد؛ اما رطوبت نسبی آن دارای نوسان پایینی بوده است. در زمان استفاده از کولرآبی در این مرحله، به‌طور میانگین، کاهش دما تا 8°C نسبت به اتاق دارای تهویه طبیعی یک‌طرفه، به وجود آمد و رطوبت نسبی تا ۲۳ درصد افزایش یافت.

هدف پژوهش حاضر، ایجاد فرصتی برای استفاده بهینه از کولرآبی است. با مقایسه بین سیستم هیبریدی و کولرآبی، نوسان دمایی پایین‌تر در سیستم هیبریدی مشاهده شد؛ اما به‌صورت میانگین، دما توسط کولر کاهش بیشتر و رطوبت نسبی افزایش بیشتر یافته است. با بررسی تأثیر این موضوع بر آسایش اتاق، مشخص شد، عملکرد کولرآبی در بیشتر اوقات، بیش‌ازاندازه بوده است و لذا آسایش حرارتی را به همراه نخواهد داشت؛ بنابراین، سیستم هیبریدی باوجود میانگین دمای 3°C - 33°C محیط بیرون، نسبت به کولرآبی، در بیشتر ساعات توانسته است آسایش حرارتی بهتری فراهم کند و پاسخگوی گرم‌ترین روزهای سال باشد. به‌علاوه، استفاده از این سیستم، کاهش ۷۴ درصد در مصرف برق و کاهش ۹۶ درصد در مصرف آب را نسبت به کولرآبی به همراه داشته است. بر طبق اندازه‌گیری‌ها، کولرآبی موردبررسی دارای مصرف

حدودی ۳۰۰ لیتر آب و ۱۰ kWh برق در شبانه‌روز است که سیستم مذکور در مقایسه با آن، حداکثر ۱۰ لیتر آب و ۲/۶ kWh برق را در شبانه‌روز، به مصرف می‌رساند. درواقع سیستم مذکور، به‌عنوان گزینه‌ای کم‌مصرف در کنار کولرآبی، با ایجاد سرمایش نسبی در ساعات غیر از اوج گرمای ماه‌های گرم تابستان و بهار (بعدازظهر، شب و ساعات اولیه صبح، بین ساعات ۱۸ تا ۸) و کاهش مصرف آب و برق، می‌تواند به کولرآبی کمک کند و ساعات استفاده از آن را کاهش دهد. ایجاد رطوبت کافی، کاهش دمای مناسب، نوسان دما و رطوبت نسبی پایین و کاهش مصرف برق و آب، همگی از مزیت‌های سیستم هیبریدی پیشنهادی به شمار می‌روند. همچنین با استفاده از همان تجهیزات سیستم سرمایشی موجود خانه (کولرآبی)، با راهکاری کم‌هزینه و اقداماتی ساده و بدون ایجاد محدودیت در طراحی، بر روی ساختمان اعمال می‌گردد که می‌تواند به‌عنوان ایده اولیه و به‌منظور بهبود سیستم سرمایشی کم‌مصرف، افق‌هایی فرا روی طراحان و محققان بگشاید.

پیشنهادهای

مطالعات بیشتری برای ارزیابی عملکرد سیستم پیشنهادی در فضاهای بزرگ‌تر، موردنیاز است. همچنین، در راستای ارتقای کارایی سیستم هیبریدی، جمع‌آوری داده‌های آزمایشی بیشتر به‌منظور بررسی متغیرهایی نظیر قدرت فن، محل قرارگیری دریچه و ابعاد کانال، مطلوب است. می‌توان گفت، تأثیر سیستم هیبریدی بر میزان رضایت ساکنان از شرایط حرارتی محیط داخل، از دیگر مواردی است که در آینده، به‌صورت تجربی، می‌تواند موردبررسی قرار گیرد.

سیاسگزاری

نویسندگان از حمایت شرکت آب و فاضلاب استان یزد در انجام این کار تحقیقاتی، سپاس‌گزاری می‌کنند. این مقاله بر اساس داده‌های خامی است که توسط خود نویسندگان جمع‌آوری شده است. تنها بخشی از داده‌های مربوط به آب‌وهوای شهر یزد که توسط "اداره کل هواشناسی استان یزد" تنظیم شده بود، مورداستفاده قرار گرفت. لذا از تمامی دست‌اندرکاران تشکر و قدردانی می‌شود.

لازم به ذکر است، این پژوهش برگرفته از پایان‌نامه ارشد با عنوان "طراحی مجموعه مسکونی کم‌مصرف در یزد با رویکرد کاهش مصرف آب در تأمین شرایط آسایش حرارتی" است.

منابع

- Abdallah, A. S. H., Yoshino, H., Goto, T., Enteria, N., Radwan, M. M., & Eid, M. A. (2013). Integration of evaporative cooling technique with solar chimney to improve indoor thermal environment in the New Assiut City, Egypt. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 4(1), 1-15. doi:https://doi.org/10.1186/2251-6832-4-45
- Absal. (2023). Swamp Cooler Specification. Retrieved from <https://www.aabsalco.com/upload/catalog/1611564166-AC70.pdf> (In Persian)
- Ahmed, T., Kumar, P., & Mottet, L. (2021). Natural ventilation in warm climates: The challenges of thermal comfort, heatwave resilience and indoor air quality. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 138, 110669. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110669
- Al-Hassawi, O. D. S. (2021). Advancing performance of passive downdraft cooling: results from built prototypes of single stage and hybrid downdraft cooling towers. *ARCHITECTURAL SCIENCE REVIEW*, 64(1-2), 17-27. doi:https://doi.org/10.1080/00038628.2020.1731677
- Alaidroos, A., & Krarti, M. (2016). Experimental validation of a numerical model for ventilated wall cavity with spray evaporative cooling systems for hot and dry climates. *Energy and Buildings*, 131, 207-222. doi:https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.09.035
- American Society of Heating, R., & Engineers, A.-C. (2017). Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy: ANSI/ASHRAE Standard 55-2017 (Supersedes ANSI/ASHRAE Standard 55-2013) Includes ANSI/ASHRAE Addenda Listed in Appendix N: Ashrae.
- Bagasi, A. A., & Calautit, J. K. (2020). Experimental field study of the integration of passive and evaporative cooling techniques with Mashrabiya in hot climates. *Energy and Buildings*, 225, 110325. doi:https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110325

- Bagasi, A. A., Calautit, J. K., & Karban, A. S. (2021). Evaluation of the Integration of the traditional architectural element Mashrabiya into the ventilation strategy for buildings in hot climates. *Energies*, 14(3), 530. doi:<https://doi.org/10.3390/en14030530>
- Bishoyi, D., & Sudhakar, K. (2017). Experimental performance of a direct evaporative cooler in composite climate of India. *Energy and Buildings*, 153, 190-200. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.014>
- Boretti, A., & Rosa, L. (2019). Reassessing the projections of the World Water Development Report. *npj Clean Water*, 2(1), 15. doi:<https://doi.org/10.1038/s41545-019-0039-9>
- Chiesa, G., Grosso, M., Bogni, A., & Garavaglia, G. (2017). Passive Draught Evaporative Cooling System Integration in Existing Residential Building Typologies: A Case Study. *Energy Procedia*, 111, 599-608. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.222>
- ClimateConsultant6.0. (2021). Climate Consultant (Version 6.0): UCLA Retrieved from <https://energy-design-tools.sbse.org/>
- Cuce, P. M., & Riffat, S. (2016). A state of the art review of evaporative cooling systems for building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1240-1249. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.066>
- Damandeh. (2023). Axial Fan Specifications. Retrieved from <https://www.damandeh.com/module/DamandeFanProduct/View/ProductDetail/page-2596/index.aspx?ProductId=1504&SerId=1070>
- Duan, Z., Zhan, C., Zhang, X., Mustafa, M., Zhao, X., Alimohammadisagvand, B., & Hasan, A. (2012). Indirect evaporative cooling: Past, present and future potentials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(9), 6823-6850. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.07.007>
- Elaouzy, Y., & El Fadar, A. (2022). Energy, economic and environmental benefits of integrating passive design strategies into buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167, 112828. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112828>
- fallah, e., Heidari, S., & Fazeli, M. (2017). Efficiency Evaluation of the Passive Cooling Systems in the Hot and Dry Climate of Iran (Study on the City of Yazd and Isfahan). *Iranian Journal of Energy*, 19(4), 0-0. Retrieved from <http://necjournals.ir/article-1-979-en.html> (In Persian)
- Ghoulem, M., El Moueddeb, K., Nehdi, E., Zhong, F., & Calautit, J. (2020). Analysis of passive draught evaporative cooling windcatcher for greenhouses in hot climatic conditions: Parametric study and impact of neighbouring structures. *Biosystems Engineering*, 197, 105-121. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.06.016>
- Gol Shiri Isfahani, O., & Shahdipour, A. (2018). Investigating the saving of water consumption due to the replacement of air conditioners with evaporative coolers: A case study in Yazd city. Paper presented at the Second Congress of Iranian Water and Wastewater Science and Engineering. <https://civilica.com/doc/856098> (In Persian)
- Harrouz, J. P., Ghali, K., & Ghaddar, N. (2021). Integrated solar – Windcatcher with dew-point indirect evaporative cooler for classrooms. *Applied Thermal Engineering*, 188, 116654. doi:<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116654>
- Hatamipour, M. S., Mahiyar, H., & Taheri, M. (2007). Evaluation of existing cooling systems for reducing cooling power consumption. *Energy and Buildings*, 39(1), 105-112. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.05.007>
- Heidari, A., Roshandel, R., & Vakiloroya, V. (2019). An innovative solar assisted desiccant-based evaporative cooling system for co-production of water and cooling in hot and humid climates. *Energy Conversion and Management*, 185, 396-409. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.02.015>
- Heidarinejad, G., Bozorgmehr, M., Delfani, S., & Esmaeliani, J. (2009). Experimental investigation of two-stage indirect/direct evaporative cooling system in various climatic conditions. *Building and Environment*, 44(10), 2073-2079. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.02.017>

- Heidarinejad, G., Heidarinejad, M., Delfani, S., & Esmaeliani, J. (2008). Feasibility of using various kinds of cooling systems in a multi-climates country. *Energy and Buildings*, 40(10), 1946-1953. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.04.016>
- Hughes, B. R., Calautit, J. K., & Ghani, S. A. (2012). The development of commercial wind towers for natural ventilation: A review. *Applied Energy*, 92, 606-627. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.11.066>
- Jafari, S., & Kalantar, V. (2022). Numerical simulation of natural ventilation with passive cooling by diagonal solar chimneys and windcatcher and water spray system in a hot and dry climate. *Energy and Buildings*, 256, 111714. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111714>
- Jomehzadeh, F., Nejat, P., Calautit, J. K., Yusof, M. B. M., Zaki, S. A., Hughes, B. R., & Yazid, M. N. A. W. M. (2017). A review on windcatcher for passive cooling and natural ventilation in buildings, Part 1: Indoor air quality and thermal comfort assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 736-756. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.254>
- Kabeel, A., & Bassuoni, M. (2017). A simplified experimentally tested theoretical model to reduce water consumption of a direct evaporative cooler for dry climates. *International Journal of Refrigeration*, 82, 487-494. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2017.06.010>
- Kang, D., & Strand, R. K. (2016). Significance of parameters affecting the performance of a passive down-draft evaporative cooling (PDEC) tower with a spray system. *Applied Energy*, 178, 269-280. doi:[10.1016/j.apenergy.2016.06.055](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.055)
- Kang, D., & Strand, R. K. (2018). Performance control of a spray passive down-draft evaporative cooling system. *Applied Energy*, 222, 915-931. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.039>
- Kang, D., & Strand, R. K. (2019). Analysis of the system response of a spray passive downdraft evaporative cooling system. *Building and Environment*, 157, 101-111. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.037>
- Khourchid, A. M., Al-Ansari, T. A., & Al-Ghamdi, S. G. (2023). Cooling Energy and Climate Change Nexus in Arid Climate and the Role of Energy Transition. *Buildings*, 13(4), 836. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2075-5309/13/4/836>
- Maerefat, M., & Haghighi, A. (2010). Natural cooling of stand-alone houses using solar chimney and evaporative cooling cavity. *Renewable Energy*, 35(9), 2040-2052. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.02.005>
- Murshed, S. S. (2019). *Advanced Cooling Technologies and Applications: BoD-Books on Demand*.
- Nejat, P., Jomehzadeh, F., Hussen, H. M., Calautit, J. K., & Abd Majid, M. Z. (2018). Application of Wind as a Renewable Energy Source for Passive Cooling through Windcatchers Integrated with Wing Walls. *Energies*, 11(10), 2536. doi:<https://doi.org/10.3390/en11102536>
- Nemati, N., Omidvar, A., & Rosti, B. (2021). Performance evaluation of a novel hybrid cooling system combining indirect evaporative cooler and earth-air heat exchanger. *Energy*, 215, 119216. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119216>
- Nesary Moghadam, M., & yaghoubian, m. (2013). Investigating water and electricity consumption in evaporative coolers and Air conditioners and providing new solutions for building cooling. Paper presented at the The Second National Conference on Climate, Building and Energy Efficiency, Iran Energy Efficiency Organization (IEEO-SABA), Isfahan. <https://civilica.com/doc/215848> (In Persian)
- Omara, A. A. M., Mohammed, H. A., Al Rikabi, I. J., Abuelnuor, M. A., & Abuelnuor, A. A. A. (2021). Performance improvement of solar chimneys using phase change materials: A review. *Solar Energy*, 228, 68-88. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.09.037>
- pourahmadi, M., & Ayatollahi, S. M. H. (2012). Refunctioning Solutions For Different Wind Catchers Of Yazd Based On Their Related Summer Side Spaces. *Journal of Architecture in Hot and Dry Climate*, 1(1), 7-18. Retrieved from https://smb.yazd.ac.ir/article_38_ce048c29380b977c7ded2258a75118c8.pdf (In Persian)

- Rabbani, D., Mousavi, S. G. A., & Qara Guzlu, M. (2008). Modeling the water consumption of an evaporative cooler in the hot and arid region of Qom. Paper presented at the 11th National Congress On Environmental Health. <https://civilica.com/doc/144564>
- Reza-zadeh Pileh-Dar-Boni, N., Heidari, S., & Soltan-zadeh, H. (2022). Behavioral Adaptation in Villas and Apartments of Rasht during Summer. *Journal of Iranian Architecture Studies*, 11(21), 131-157. doi:10.22052/JIAS.2022.246485.1059 (In Persian)
- Serageldin, A. A., Abdeen, A., Ahmed, M. M., Radwan, A., Shmroukh, A. N., & Ookawara, S. (2020). Solar chimney combined with earth to-air heat exchanger for passive cooling of residential buildings in hot areas. *Solar Energy*, 206, 145-162. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.05.102>
- Sohani, A., & Sayyaadi, H. (2018). Thermal comfort based resources consumption and economic analysis of a two-stage direct-indirect evaporative cooler with diverse water to electricity tariff conditions. *Energy Conversion and Management*, 172, 248-264. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.07.008>
- Sohani, A., Sayyaadi, H., & Mohammadhosseini, N. (2018). Comparative study of the conventional types of heat and mass exchangers to achieve the best design of dew point evaporative coolers at diverse climatic conditions. *Energy Conversion and Management*, 158, 327-345. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.12.042>
- Sohani, A., Sayyaadi, H., & Zeraatpisheh, M. (2019). Optimization strategy by a general approach to enhance improving potential of dew-point evaporative coolers. *Energy Conversion and Management*, 188, 177-213. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.02.079>
- Song, Y.-l., Darani, K. S., Khadair, A. I., Abu-Rumman, G., & Kalbasi, R. (2021). A review on conventional passive cooling methods applicable to arid and warm climates considering economic cost and efficiency analysis in resource-based cities. *Energy Reports*, 7, 2784-2820. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.04.056>
- Soumia, O., AbdElKader, H., & Djaffar, S. (2022). Evaluation of old building processes in the housing of Algeria's arid regions and its improvement by integration of passive draught evaporative cooling. *Energy and Buildings*, 273, 112395. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112395>
- Taleb, H. M. (2014). Using passive cooling strategies to improve thermal performance and reduce energy consumption of residential buildings in UAE buildings. *Frontiers of Architectural Research*, 3(2), 154-165. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foar.2014.01.002>
- Tartarini, F., Schiavon, S., Cheung, T., & Hoyt, T. (2020). CBE Thermal Comfort Tool: Online tool for thermal comfort calculations and visualizations. *SoftwareX*, 12, 100563. doi:<https://doi.org/10.1016/j.softx.2020.100563>
- Zare Mohazabie, A., Shahcheraghi, A., & Shahin, H. (2022). Indoor Environmental Quality with an Emphasis on Thermal Comfort in Traditional Houses, Case studies: Two Qajar Houses in Shiraz. *Journal of Iranian Architecture Studies*, 5(9), 85-100. Retrieved from https://jias.kashanu.ac.ir/article_111760_281047e8c5d1103a0d15430eafd39380.pdf (In Persian).

Original Research Article

Evaluating the performance of the hybrid evaporative cooling system in residential buildings in hot and arid climates with a water conservation approachSara Alidoost¹, Leila Moosavi^{2*}

- 1- Master Student of Energy & Architecture, Department of Architecture, Faculty of Art & Architecture, Yazd University, Yazd, Iran.
- 2- Assistant Professor, Faculty Member of Architectural Department, Department of Architecture, Faculty of Art & Architecture, Yazd University, Yazd, Iran.

 10.22034/AHDC.2024.20202.1749

Received:
June 12, 2023

Accepted:
February 3, 2024

Keywords:
Hybrid systems,
Thermal
comfort,
Evaporative
cooling,
Water
conservation,
Energy
efficiency,
Hot and arid
climate

Abstract

"Providing thermal comfort for residential buildings during hot seasons" causes high electricity consumption, which subsequently leads to pollution, climate change, and resource depletion. This issue poses a particular challenge in hot and arid climates due to the substantial water consumption required for evaporative cooling using conventional systems, namely evaporative coolers. To address this challenge and achieve thermal comfort while reducing water consumption, it is essential to consider cost-effective and minimally equipped systems for buildings through the implementation of simple measures. Therefore, a hybrid system suitable for this climate is proposed to fulfill the research objectives. To evaluate the performance of the proposed system, an experimental study was conducted in two similar rooms. Environmental indicators such as temperature, relative humidity, and air velocity were monitored using relevant sensors for five consecutive days (24 hours per day) in these rooms. In the first section, the condition of the two similar rooms was examined. In the second section, the proposed hybrid system was installed in one of the rooms, and its performance was compared to that of a one-sided natural ventilation and evaporative cooler. In the first section, it was determined that the rooms had similar environmental conditions, and one-sided natural ventilation and evaporative cooling based on natural ventilation had a minimal impact on the room conditions. In the second section, the hybrid system proved its efficiency. When the outdoor temperature averaged from 30 to 32°C, the proposed hybrid system was capable of reducing the indoor temperature by an average of 5.5°C while increasing the indoor relative humidity by 16-18% compared to one-sided natural ventilation. Despite the lower temperature fluctuations of the hybrid system, the evaporative cooler demonstrated further temperature reduction (up to 8°C) and increased the relative humidity (by 23%), leading to the excessive cooling of the space during a decrease in heat intensity. In other words, occupants attempt to control the indoor temperature using natural ventilation, resulting in significant energy waste and depriving the residents of thermal comfort. Although thermal comfort conditions were not met during limited hours, this system creates relative cooling and thus results in a remarkable 96% reduction in water consumption and a 74% reduction in electricity consumption compared to an evaporative cooler. In other words, it reduces water consumption from 290 liters/day to a maximum of 10 liters/day. Additionally, the system reduces electricity consumption from 10 kwh to 2.6 kwh.

