

بررسی رد پای آب و رد پای اکولوژیکی سیستم سرمایه‌گذاری آب

مهنوش اقتداری^۱، عباس مهروان^{۲*}، مریم انصاری منش^۳

۱. دانشجوی دکتری معماری، گروه معماری، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران
mahnoosh.eghtedari@yahoo.com

۲. استادیار معماری، گروه معماری، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

۳. استادیار معماری، گروه معماری، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران
m.ansarimanesh@iauksh.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۱۵

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۸/۰۷/۱۰

چکیده

رشد سریع جمعیت جهانی، باعث مصرف بی‌رویه منابع طبیعی زمین شده است در این میان سیستم‌های تهویه مطبوع در ساختمان‌ها به دلیل مصرف زیاد برق و آب در تابستان باعث از بین رفتن منابع زمین برای تولید آب و انرژی برق می‌شوند. به منظور جلوگیری از مصرف بی‌رویه منابع طبیعی از شاخصی به نام رد پای اکولوژیکی استفاده می‌شود. هدف این تحقیق طراحی سیستم خنک‌کننده ایستایی است که علاوه بر ایجاد شرایط آسایش، با حداقل مصرف آب و برق موجب کاهش رد پای اکولوژیکی و رد پای آب و نیز کاهش میزان مصرف برق در ساختمان شود. این تحقیق به صورت تجربی-تحلیلی صورت گرفت. قابلیت خنک‌سازی ساختمان و مصرف آب آن توسط سیستم طراحی شده در گرم‌ترین ماه سال (مرداد ماه) از ساعت ۹ صبح تا ۳ بعدازظهر در سه روز متوالی آزمایش شد. نتایج نشان داد که کانال خنک‌کننده تبخیری می‌تواند شرایط آسایش محیط داخلی را در گرم‌ترین روزهای سال فراهم نماید. رد پای اکولوژیکی برق مصرفی این سیستم صفر است در حالی که رد پای اکولوژیکی برق کولر آبی $۱/۰۵ GJ/year$ است. رد پای آب کولر آبی ۱۰ برابر بیشتر از رد پای آب سیستم ایستا در سه ماه تابستان است.

کلیدواژه

ردپای اکولوژیکی، سیستم سرمایه‌گذاری ایستا، مصرف آب، مصرف انرژی

۱. سرآغاز

مصرفی زمین قابل احیا و باز تولید نیستند و به‌عنوان منابع تجدیدناپذیر شناخته می‌شوند (Kam Chun & Banhashemi, 2017). به‌منظور جلوگیری از مصرف بی‌رویه منابع طبیعی زمین و همچنین ارزیابی و محاسبه تأثیر فعالیت‌های انسان بر پایداری جهانی، از شاخصی به نام رد پای اکولوژیکی استفاده می‌شود (Cucek et al., 2012). در واقع رد پای اکولوژیکی به این سؤال پاسخ می‌دهد که چه مقدار از منابع زمین توسط انسان‌ها به مصرف می‌رسد (Galli et al., 2016). رد پای اکولوژیکی نخست توسط واکرناگل و ریس در سال ۱۹۹۲ معرفی شد

رشد سریع جمعیت جهانی و افزایش تولید گازهای گلخانه‌ای باعث از بین رفتن منابع طبیعی و آلودگی محیط‌زیست شده است (Kam Chun Banhashemi, & 2017) و این به نوبه خود، بر توسعه پایدار و سلامت انسان تأثیر می‌گذارد (Wang et al., 2020). زمین دارای محدودیت در تولید منابع طبیعی و جذب ضایعات است از طرفی در حال حاضر منابع طبیعی زمین برای تولید کالاها و خدمات، سریع‌تر از زمان احیای مجدد توسط محیط‌زیست، به مصرف می‌رسد هرچند برخی از منابع

مصرفی (۰/۲۲)، ماشین‌آلات (۰/۱۴) و برق (۰/۰۴۰) بود. در ایران نیز تحقیقاتی در زمینه رد پای اکولوژیکی ساختمان‌ها صورت گرفته است (حیدری و همکاران، ۱۳۹۶). تحقیقی درباره ارزیابی اثرهای زیست محیطی ساختمان آموزشی با استفاده از روش رد پای بوم‌شناختی انجام دادند. در این پژوهش رد پای اکولوژیکی مرحله بهره‌برداری از ساختمان که شامل مصرف انرژی دانشکده، مصرف آب، پسماند تولیدی و زمین زیر بنای ساختمان بود بررسی شد (حیدری و همکاران، ۱۳۹۶). بیان می‌دارند بخش اعظم رد پای اکولوژیکی دانشکده مربوط به مصرف آب در سال است که این میزان برابر $5/90 \text{ gha/year}$ است و بیشترین مصرف انرژی پس از آب، مصرف انرژی سوخت‌های فسیلی است که برابر $24/87 \text{ gha/year}$ است. حق پرست و همکاران (۱۳۹۶) تحقیقی برای محاسبه رد پای اکولوژیکی انجام دادند که محدوده این تحقیق شامل تهیه مواد اولیه تولید، حمل، نصب و نهایتاً بازیافت مواد بود. محاسبات برای دو ساختمان با ویژگی متفاوت انجام شد که ساختمان نخست اسکلت فلزی و دو طبقه ساختمان دوم با دیوار باربر و کلاف بتنی بود. رد پای اکولوژیکی محاسبه شده نمونه‌های مورد مطالعه شامل (ساخت) انرژی انباشته در مواد و مصالح مصرفی، (بهره‌برداری) انرژی مصرفی در حین بهره‌برداری، آب مصرفی در حین بهره‌برداری و (زمین مصرف شده) زمین اشغال شده برای ساختمان و محوطه (فضای باز یا فضای سبز) بود. نتایج به دست آمده از مطالعات نشان داد که بیشترین رد پای اکولوژیکی دو ساختمان مربوط به زمین انرژی است و برابر $1/9401$ هکتار در سال است. زمین انرژی شامل انرژی نهفته در مصالح انرژی بهره‌برداری است. در بررسی‌های فوق بیشترین رد پای اکولوژیکی ساختمان‌ها مربوط به آب و سوخت‌های فسیلی است.

ساختمان‌ها یکی از عوامل اصلی مصرف انرژی و تولید

که با واحد هکتار جهانی (gha) محاسبه می‌شود و در حال حاضر به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان شاخصی برای پایداری محیطی استفاده می‌شود (Kam Chun & Banhashemi, 2017) مدیریت تقاضای آب، اطمینان از حداقل آب برای مصرف روزانه، برنامه‌ریزی منابع آب و کاهش آب زیرزمینی، دغدغه مشترک در شهرهای بزرگ در سراسر جهان است و این چالش در کشورهای در حال توسعه برای رسیدگی و کاهش چنین مشکلات اولیه آبی بسیار بیشتر است (Arfanuzzaman & Atiq Rahman, 2017). در ایران میزان مصرف آب برای تولید کالاها و خدمات مصرفی توسط ساکنان، سهم عمده‌ای را به خود اختصاص می‌دهد به‌طوری‌که رد پای متوسط جهانی آب ($7452 \text{ Gm}^3/\text{year}$) و این مقدار برای ایران ($102/65 \text{ Gm}^3/\text{year}$) گزارش شده است (Chapagain & Hoeksrat, 2004). طبق این گزارش رد پای آب در ایران، بعد از آمریکا بالاترین میزان است ($1624^{cap}/\text{year}$). تحقیقات متعددی در ارتباط با رد پای ساختمان‌ها در زمینه مصرف آب و سوخت‌های فسیلی صورت گرفته است. (Kandananond, 2019) با محاسبه رد پای آب در ساختمان‌های مختلف مسکونی، اداری و آموزشی؛ مقدار آب مورد استفاده برای تولید سوخت و برق را محاسبه کرد و نشان داد که سوخت گازوئیل بیشترین میزان مصرف آب ($857 \text{ Litr}/\text{Kg}$) را به همراه دارد. (Guzmán et al., 2013) پژوهشی برای محاسبه رد پای اکولوژیکی ساخت در ساختمان‌های مسکونی در اسپانیا انجام دادند و شاخص منابع مورد استفاده (انرژی، آب، کار، مصالح ساختمانی) و ضایعات تولید شده در ساخت ساختمان‌های مسکونی را تجزیه و تحلیل کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که بیشترین رد پای زیست محیطی در بخش ساخت مرتبط با مصرف سوخت‌های فسیلی (زمین جذب کربن) است که این مقدار را ($0/384 \text{ (gha / year) / m}^2$) بیان کردند. در این تحقیق بیشترین رد پای کربن به ترتیب مربوط به مصالح

کرمان برای ده روز متوالی انجام دادند و نشان دادند که بیشترین دمای هوای حاصل شده با استفاده از این طراحی جدید $3/13^{\circ}\text{C}$ و کمترین آن $5/7^{\circ}\text{C}$ است که به طور متوسط می‌تواند دمای هوا را تا 10°C کاهش دهد. (Punyasompun et al., 2009) دو نمونه دودکش خورشیدی ساخته شده با شیشه و سلول خورشیدی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که دودکش خورشیدی در ترکیب با شیشه باعث افزایش بیشتر سرعت تهویه هوا در طول روز می‌شود.

Ahmed و Hussein (2017) تحقیقی درباره عملکرد خنک‌کنندگی دودکش خورشیدی انجام دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که دمای اتاق با دودکش خورشیدی 4 الی 5 درجه سلسیوس پایین‌تر از حالت بدون دودکش خورشیدی است که این مقدار کاهش حرارت، زمانی که حداکثر دمای هوا 40 درجه سلسیوس باشد ناکافی است. (Maerefat & Haghghi, 2010) از ترکیب دودکش خورشیدی و کانال خنک‌کننده تبخیری برای تهویه طبیعی اتاق بهره گرفتند. نتایج تحقیق نشان داد که این سیستم مناسب اقلیم های گرم و خشک است و در شرایطی که رطوبت نسبی محیط کمتر از 50 درصد باشد سیستم قادر است در دمای محیط $^{\circ}\text{C}$ 40 فضای داخل را در شرایط آسایش نگه دارد (Moosavi et al., 2020). این سیستم را برای ساختمان‌های دو طبقه بررسی کردند. نتایج نشان داد که این سیستم می‌تواند شرایط آسایش فضای داخل را فراهم کرده و 90 درصد انرژی سرمایش مورد نیاز در تابستان را فراهم نماید. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در ارتباط با قابلیت خنک‌سازی ساختمان‌ها توسط سیستم‌های ایستا، بررسی مصرف آب و انرژی برق این سیستم و تأثیر رد پای اکولوژی آن بر محیط‌زیست ضروری است.

در این پژوهش هدف بررسی رد پای آب و رد پای اکولوژیکی سیستم‌های ایستا است که به این منظور ابتدا اقدام به ساخت سیستم ایستای هیبرید شده و سپس شرایط آسایش و رد پای اکولوژی آن بررسی می‌شود.

گازهای گلخانه‌ای به شمار می‌روند و عامل انتشار بیش از 40 درصد از گازهای گلخانه‌ای جهان هستند (Jomehzadeha et al, 2016). همچنین 30 درصد برق توسط ساختمان‌ها مصرف می‌شود (Vorsatz, 2015). در میان تمام خدمات ساختمانی، سیستم‌های گرمایشی و تهویه مطبوع با مصرف بیش از 60 درصد انرژی فسیلی جزو بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی در ساختمان‌ها هستند (Manzano et al, 2015). در ایران بخش خانگی سهم عمده‌ای از مصرف انرژی کشور را به خود اختصاص می‌دهد به نحوی که $31/7$ درصد از کل فروش برق در سال 1392 مربوط به این قسمت بوده است (ترازنامه انرژی، 1392). از طرف دیگر این بخش به مواد و آب بالایی نیاز دارند برای مثال سرانه آب تهران در سال 1394 بیش از 220 لیتر در روز است (شرکت آب و فاضلاب استان تهران، 1394). در ساختمان‌های پایدار از خنک‌کننده‌های ایستا به جای سیستم‌های تهویه مطبوع استفاده می‌شود (Geetha & Velraj, 2012). تحقیقات مختلفی در ارتباط با میزان خنک‌کنندگی سیستم‌های ایستای سرمایش تبخیری توسط (Bahadori et al., 2008; Khani et al., 2017; Sadeghi et al., 2020) دودکش خورشیدی (Punyasompun et al., 2009; Ahmed Hussein., 2017) و سیستم‌های هیبریدی متشکل از هر دوی آنها (Maerefat & Haghghi., 2010) انجام شده است. در زمینه سیستم‌های ایستای سرمایش تبخیری (Bahadori et al., 2008) در یزد کارایی خنک‌کنندگی دو بادگیر جدید با ستون خیس شونده و سطوح خیس شونده را بررسی کردند. نتیجه به دست آمده نشان داد که نمونه سنتی بادگیر دمای هوا را 4°C کاهش می‌دهد درحالی که بادگیر با سطوح و ستون مرطوب باعث کاهش دمای هوا به ترتیب تا 11 و 14 درجه سلسیوس می‌شود.

Khani و همکاران (2017) یک مطالعه تجربی از طراحی مدولار بادگیر با استفاده از سطوح مرطوب در شهر

۲. مواد و روش‌ها

در این مقاله برای بررسی رد پای اکولوژیکی سیستم ایستای هیبرید طراحی شده ابتدا مشخصات سیستم که شامل ابعاد و اندازه، محل ساخت و مدت زمان انجام آزمایش است توضیح داده می‌شود سپس میزان مصرف آب و برق سیستم محاسبه شده و رد پای اکولوژیکی آن محاسبه می‌شود. در نهایت رد پای اکولوژیکی این سیستم با کولر آبی مقایسه می‌شود.

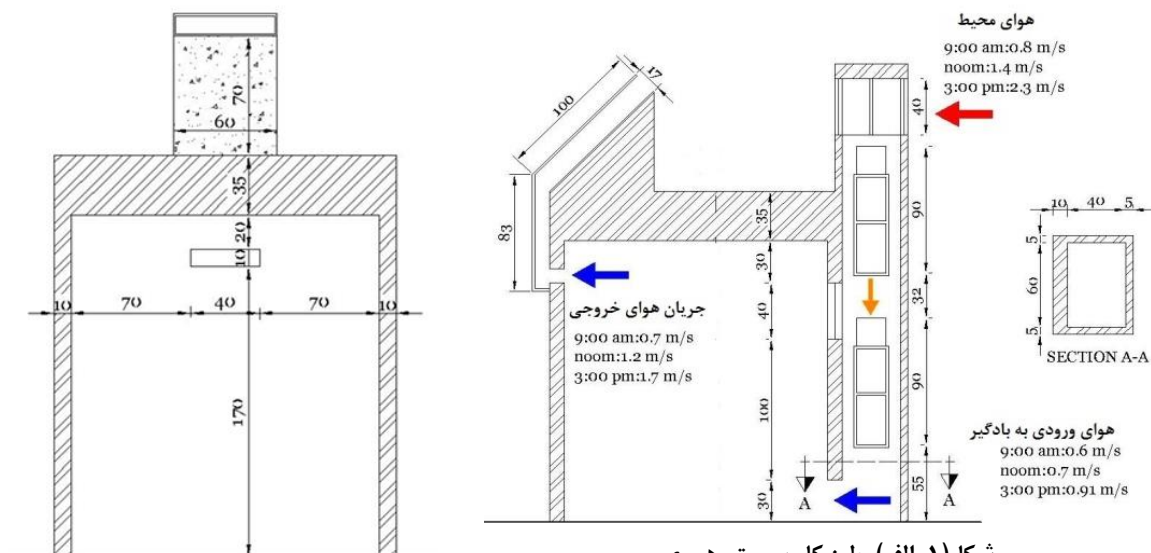
۱-۲. عملکرد سیستم طراحی شده

سیستم ترکیبی سرمایشی ایستا شامل دو سیستم متمایز است؛ دودکش خورشیدی و کانال خنک‌کننده تبخیری. کانال خنک‌کننده تبخیری به نمای شمالی ساختمان متصل شد و دودکش خورشیدی در سمت خارجی نمای جنوبی اتاق قرار گرفت. هوا از طریق بازشوهای ایجاد شده در رأس بادگیر در تمام جهات وارد بادگیر شد و از روی استوانه های رسی مرطوب عبور کرد. در این قسمت هوا

خنک شد و به سمت پایین تغییر جهت داد. دودکش خورشیدی با استفاده از حداکثر دریافت تابش خورشیدی، اختلاف دمای کافی بین درون و بیرون ایجاد کرد و باعث ایجاد تهویه هوا در اتاق شد (شکل ۱-الف).

۲-۲. ابعاد و اندازه سیستم

ابعاد و اندازه سیستم سرمایشی هیبریدی طراحی شده در جدول (۱) آورده شده است. دهانه خروجی هوا در دودکش خورشیدی به فاصله ۲۰ سانتی متر از زیر سقف قرار گرفته است شکل (۱-الف) و (۱-ب) و زاویه شیب دودکش خورشیدی با توجه به عرض جغرافیایی محل ۴۵ درجه در نظر گرفته شده است. در داخل کانال سرمایش تبخیری چهار استوانه رسی به قطر ۲۰ سانتی متر و ارتفاع ۹۰ سانتی متر قرار داده شده. هر یک از استوانه‌ها گنجایش ۲۴/۵ لیتر آب و در مجموع ۹۸ لیتر آب را دارد شکل (۲-الف) و (۲-ب).



شکل (۱-الف). طرز کار سیستم هیبریدی

(منبع: نگارندگان)

شکل (۱-ب). برش عرضی اتاق

(منبع: نگارندگان)



شکل (۲-ب). دو استوانه نصب شده در پایین کانال بادگیر
(منبع: نگارندگان)



شکل (۲-الف). دو استوانه نصب شده در بالای کانال بادگیر
(منبع: نگارندگان)

جدول ۱. ابعاد و اندازه سیستم هیبرید طراحی شده

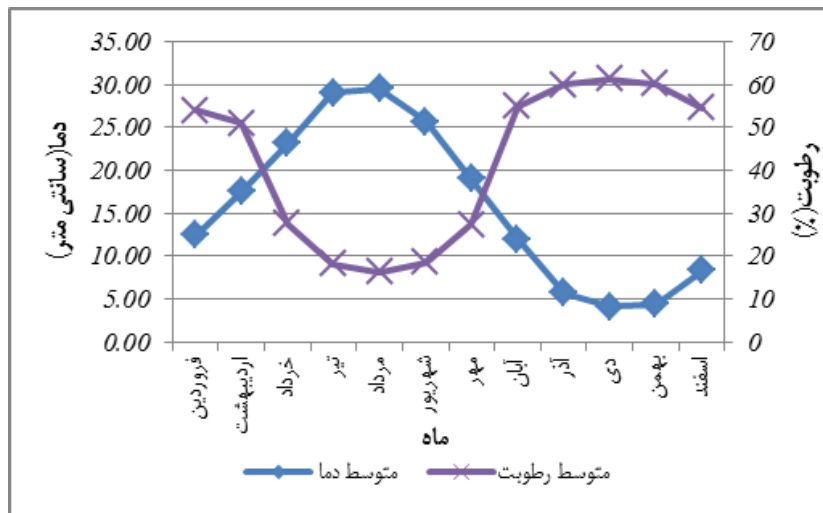
ابعاد دودکش خورشیدی (cm)		ابعاد سیستم سرمایش تبخیری		ابعاد اتاقک	
حقیقی و معرفت (۲۰۱۰، ص ۲۰۴۷)		(cm)		(cm)	
۱	ارتفاع	325	طول کانال بدران (۲۰۰۳، ص ۱۰۳۵)	00۲	طول (متر)
۶۰	عرض	(6×4)	سطح مقطع کانال (طول × عرض) خانی و همکاران (۲۰۱۷، ص ۲۶)	00۲	عرض (متر)
۱۷	عمق حفره	40×40	بازشوهای ورودی هوای خارج	235	ارتفاع (متر)
		30×30	بازشوی خروجی هوا به اتاق	۱۰	ضخامت دیوار
1/5	ضخامت شیشه	قطر ۲۰			
100	صفحه جاذب				
(۱۰×۴۰)	دهانه خروجی هوا (طول × عرض)	ارتفاع ۹۰	استوانه رسی	۳۵	ضخامت سقف

منبع: نگارندگان

توجه به آمار ۱۰ ساله دما و رطوبت (۱۳۹۷-۱۳۸۸)، استان کرمانشاه دارای تابستان‌های گرم و نیمه‌خشک است (میانگین رطوبت در سه ماه تابستان ۱۸ درصد است) به این دلیل محدوده مورد آزمایش شهر کرمانشاه انتخاب شد (شکل ۳).

۲-۳. محل و زمان مورد مطالعه

با توجه به اینکه خنک ساختن فضا از طریق سرمایش تبخیری باعث افزایش رطوبت هوا در محیط می‌شود بنابراین خنک کننده‌های تبخیری مناسب آب و هوای گرم و خشک است. با



شکل ۳. میانگین دما و رطوبت هوای شهر کرمانشاه در سال‌های ۱۳۸۸-۱۳۹۷

منبع: (<http://www.kermanshahmet.ir/met/amar>)

سرمایش، میزان آب مصرفی و رد پای آب سیستم ایستای هیبرید طراحی شده بررسی شد. در روز ۱۴ تا ۱۶ مرداد دما و رطوبت اتاقک آزمون پس از راه‌اندازی سیستم هیبرید اندازه‌گیری شد. همچنین میزان کاهش آب استوانه‌های رسی - که درون کانال سیستم پیشنهادی قرار گرفته بودند- از ساعت ۹ صبح تا ۳ بعدازظهر در روزهای ذکر شده بررسی شد. سناریو (۲): در این سناریو میزان مصرف آب، برق، رد پای آب و رد پای اکولوژیکی برق کولر آبی بررسی شد. طبق اطلاعات مرکز آمار ۷۰ درصد خانوارهای شهری از کولر آبی استفاده می‌کنند بنابراین مقایسه بین کولر آبی و سیستم پیشنهادی صورت گرفت (<https://www.amar.org.ir>). کولر آبی دارای مشخصات (CFM ۳۰۰۰) با دور کند است. به‌منظور بررسی عملکرد خنک‌کنندگی کولر آبی، در روز ۲۷ مرداد ماه از ساعت ۹ صبح تا ۳ بعدازظهر دما و رطوبت اتاقی به ابعاد ۱۲ متر مربع اندازه‌گیری شده سپس در ساعت ۳ بعدازظهر مقدار کاهش آب داخل مخزن کولر بررسی شد. هدف از این مقایسه، بررسی رد پای آب و رد پای اکولوژیکی سیستم پیشنهادی و کولر آبی است به این منظور میزان مصرف آب سیستم ایستای هیبرید محاسبه شد و با میزان مصرف آب و برق کولر آبی مقایسه شد.

شهر کرمانشاه دارای عرض جغرافیایی ۱۹° ۳۴ شمالی، متوسط جریان باد ۲ متر بر ثانیه، متوسط رطوبت ۲۱ درصد و متوسط دمای ۲۹ °C است (<http://www.kermanshahmet.ir/met/amar>). سیستم ترکیبی سرمایشی ایستای پیشنهادی در محوطه دانشگاه آزاد اسلامی کرمانشاه در مرداد ماه ساخته شد. زمان ساخت اتاقک آزمون در مرداد ماه سال ۱۳۹۷ بوده که از تاریخ ۱۴ تا ۱۶ مرداد، برای بررسی میزان مصرف آب سیستم آزمایش شد.

۲-۴. روش تحقیق

تحقیق حاضر به صورت تجربی - تحلیلی است که به‌منظور بررسی کارایی خنک‌کنندگی سیستم سرعت باد، دما و رطوبت نسبی هوا برای هوای محیط، هوای خروجی بادگیر و هوای خروجی دودکش خورشیدی در اتاقک آزمون اندازه‌گیری شد. ابزارهای اندازه‌گیری در این پژوهش دیتالاگر دماسنج و رطوبت سنج مدل KH 50، دیتالاگر دماسنج و رطوبت سنج مدل Medex Europe، سرعت سنج مدل AVM-07، دماسنج مدل HTC-2 و TH02. برای بررسی میزان مصرف آب سیستم ایستای هیبرید، دو سناریو در نظر گرفته شده و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه شد. سناریو (۱): در این سناریو عملکرد

مجموع این دو عدد (PCE) میزان برق مصرفی در مدت یک ساعت به دست می آید.

$$PCE = E_{ec} + E_{pec} = 352 + 209 = 561 \quad (2)$$

که در رابطه (۲) PCE، میزان برق مصرفی (وات بر ساعت)، E_{ec} برق مصرفی کولر آبی (وات بر ساعت) و E_{pec} ، برق مصرفی پمپ کولر آبی (وات بر ساعت) می باشد.

$$E_{ec} = E_{ecl} \times V_{rms} \quad 1/6 \times 220 = 352 \quad (3)$$

که در رابطه (۳)، E_{ecl} مصرف برق کولر با دور کند (آمپر) و V_{rms} ولتاژ برق شهر می باشد.

$$E_{pec} = E_p \times V_{rms} \quad 0.95 \times 220 = 209 \quad (4)$$

در رابطه (۴)، E_p مصرف برق مصرفی پمپ کولر (آمپر) است.

۲-۵-۲. محاسبه رد پای اکولوژیکی آب

برای محاسبه رد پای اکولوژیکی آب، میزان آب مصرفی سیستم‌های سرمایشی ایستا و کولر آبی برای سه ماه تابستان بررسی می‌شود. بدین منظور، مقدار انرژی برق مصرف شده برای تولید یک مترمکعب آب محاسبه می‌شود. بیشترین برق تولیدی در ایران توسط نیروگاه‌های بخار است و مصرف آب نیروگاه‌های بخار به‌طور میانگین در ایران در ده سال (۲۰۰۲-۲۰۱۲) $0.16 \text{ m}^3/\text{MWh}$ است. یعنی برای تولید هر مترمکعب آب $1/7$ مگاوات ساعت معادل 1700 کیلووات ساعت برق مصرف می‌شود (Shamshirgaran et al., 2016). با تبدیل عدد حاصل به گیگا ژول مشخص می‌شود که تولید هر مترمکعب آب نیاز به مصرف $6/12$ گیگا ژول انرژی برق دارد که با تقسیم این عدد بر 100 عدد حاصل 0.062 به دست می‌آید. این عدد رد پای اکولوژیکی به ازای 1 مترمکعب آب مصرفی است.

$$WE_F = \frac{PCW}{100} \quad (5)$$

با توجه به رابطه (۵) PCW انرژی برق مصرفی برای تولید یک مترمکعب آب WE_F رد پای زیست محیطی آب

۲-۵. محاسبه رد پای اکولوژیکی سیستم سرمایشی ایستا و کولر آبی

Wackernagel و Rees (۱۹۹۶) بیان می‌دارند برای برآورد بار اکولوژیکی هر نوع مصرف یا کالا در شرایطی که موضوع تحقیق بررسی موردی باشد، مصرف همان مورد را با بررسی و اندازه‌گیری جزء به جزء محصولات و خدماتی که به خود اختصاص داده است می‌توان محاسبه کرد. برای برآورد توان جذب دی اکسید کربن توسط زمین، دی اکسید کربن حاصل از مصرف سوخت ملاک عمل قرار می‌گیرد و در این تحقیق از رویکرد دی اکسید کربن استفاده شده است. یک هکتار زمین توان جذب دی اکسید کربن حاصل از مصرف 100 گیگا ژول انرژی فسیلی در سال را دارد. در این تحقیق بار اکولوژیکی انرژی مصرفی در حین بهره‌برداری و آب مصرفی در سیستم سرمایشی ایستا و کولر آبی محاسبه می‌شود.

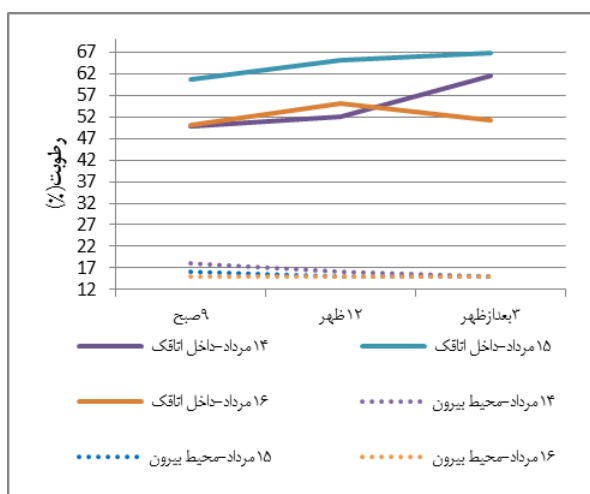
۲-۵-۱. محاسبه رد پای اکولوژیکی الکتریسیته

برای تبدیل مقدار برق مصرفی به معادل زمین (هکتار) باید آن را ابتدا به BTU و نهایتاً به ژول تبدیل کرد. یک کیلو وات ساعت برابر 3411 بی تی یو است و هر BTU نیز معادل $1/055$ کیلوژول است. برای محاسبه رد پای اکولوژیکی برق مصرفی از رابطه (۱) استفاده می‌شود که در این رابطه PCE انرژی برق مصرفی سیستم مورد نظر (سیستم ایستا یا کولر آبی) در طول سه ماه تابستان، PE_F رد پای اکولوژیکی الکتریسیته و (Gj/gha) ، توان جذب دی اکسید کربن هر هکتار زمین مولد است

$$PE_F = \frac{PCE}{100} \quad (1)$$

برای محاسبه میزان برق مصرفی کولر آبی، ابتدا میزان برق مصرف شده توسط کولر آبی (E_{ec}) و پمپ آن (E_{pec}) در مدت زمان یک ساعت را محاسبه نموده

دمای هوا $23/72^{\circ}\text{C}$ به دست آمد که در مقایسه با دمای بیرون $(34/4^{\circ}\text{C})$ $10/68^{\circ}\text{C}$ کاهش دما داشته است. بیشترین اختلاف دمای دهانه بادگیر با محیط بیرون $16/3^{\circ}\text{C}$ است که در روز ۱۶ مرداد و ساعت ۳ بعدازظهر است. با توجه به داده‌ها این سیستم می‌تواند دمای هوا را به طور متوسط ۱۰ درجه سلسیوس پایین آورد. همچنین دمای هوای دهانه بادگیر در تمام ساعات در شرایط آسایش قرار دارد. بر اساس داده‌های شکل (۵) بیشترین میزان رطوبت دهانه بادگیر در ساعت ۳ بعدازظهر است که بیشترین مقدار آن ۶۷ درصد و مربوط به روز ۱۵ مرداد است. کمترین مقدار رطوبت ۵۰ درصد و در روز ۱۴ مرداد است. حداکثر افزایش رطوبت هوا در روز ۱۵ مرداد ساعت ۳ بعدازظهر است که ۵۲ درصد است. بر اساس نتایج به دست آمده این سیستم می‌تواند رطوبت نسبی هوا را به طور متوسط ۳۴ درصد افزایش دهد. بیشترین سرعت هوا در خروجی دهانه بادگیر به اتاق، در روز ۱۴ مرداد و ساعت ۳ بعدازظهر است که این مقدار $0/72\text{m/s}$ است هنگامی که سرعت هوای محیط $1/51\text{m/s}$ است و کمترین میزان سرعت هوا $0/5\text{m/s}$ در روز ۱۵ مرداد و ساعت ۹ صبح است هنگامی که سرعت هوای محیط در این ساعت $0/74\text{m/s}$ است شکل (۶).



شکل ۵. رطوبت هوای ورودی بادگیر به اتاق و محیط بیرون

(منبع: نگارندگان)

(gha/year) و $100(\text{Gj})$ توان زمین برای جذب دی‌اکسیدکربن است.

۳. نتایج

۳-۱. دما، رطوبت هوا و سرعت باد در سیستم

ترکیبی سرمایشی ایستا

برای بررسی ایجاد شرایط آسایش هوای داخل اتاق در روزهای ۱۴ تا ۱۶ مرداد ماه دما، رطوبت هوا و سرعت باد محیط، دهانه خروجی هوای بادگیر به داخل اتاق و دهانه خروجی هوای دودکش خورشیدی در داخل اتاق اندازه‌گیری شد.

شکل‌های (۴ تا ۶) به ترتیب دمای هوای داخل اتاق، رطوبت و سرعت هوای دهانه بادگیر به داخل اتاق را برای سیستم ترکیبی سرمایشی ایستا، در سه روز متوالی در ساعات ۹ صبح، ۱۲ ظهر و ۳ بعدازظهر نشان می‌دهد. شکل (۴) نشان می‌دهد که کمترین دمای هوای دهانه خروجی از بادگیر به اتاق در ساعت ۹ صبح و در روز ۱۵ مرداد، $21/1^{\circ}\text{C}$ است که در مقایسه با دمای بیرون $(32/1^{\circ}\text{C})$ 11°C کاهش دما داشته است. کمترین دمای هوا در ساعت ۱۲ ظهر $22/9^{\circ}\text{C}$ و در روز ۱۶ مرداد است که در مقایسه با دمای بیرون $(38/12^{\circ}\text{C})$ $15/22^{\circ}\text{C}$ کاهش دما داشته است. همچنین در روز ۱۵ مرداد در ساعت ۳ بعدازظهر کمترین



شکل ۶. دمای هوای ورودی بادگیر به اتاق و محیط بیرون

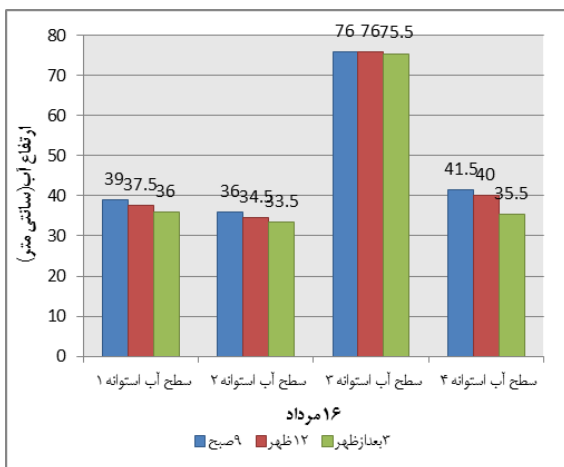
(منبع: نگارندگان)



شکل ۷. ارتفاع آب استوانه‌ها در روز ۱۴ مرداد

(منبع: نگارندگان)

در هر سه روز انجام آزمایش مربوط به استوانه ۲ و در ساعت ۳ بعدازظهر است. کمترین کاهش سطح آب در استوانه ۳ و در ساعت ۹ صبح به دست آمد. براساس داده‌های جدول (۲) کمترین میزان کاهش حجم آب مربوط به روز سوم آزمایش در تاریخ ۱۶ مرداد است و بیشترین میانگین کاهش حجم آب مربوط به روز دوم آزمایش در تاریخ ۱۵ مرداد ماه است.



شکل ۹. ارتفاع آب استوانه‌ها در روز ۱۴ مرداد

(منبع: نگارندگان)

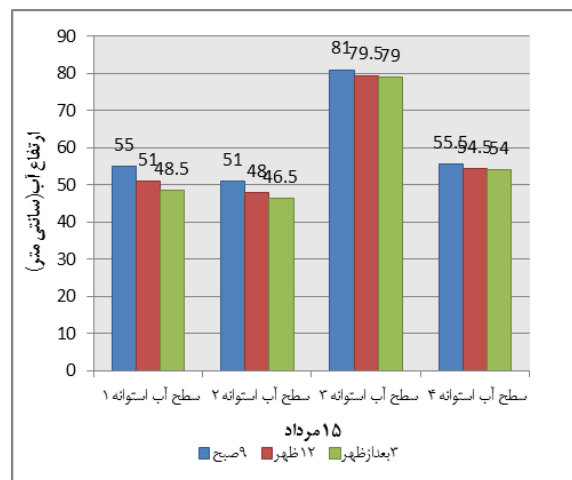


شکل ۶. سرعت هوای ورودی بادگیر به اتاقک و محیط بیرون

(منبع: نگارندگان)

۲-۳. میزان کاهش سطح آب استوانه‌ها در بادگیر (سناریو ۱)

در ساعت ۹ صبح روز ۱۴ مرداد استوانه‌ها به‌طور کامل از آب پر شدند و اندازه‌گیری کاهش سطح آب استوانه‌ها تا ساعت ۳ بعدازظهر روز ۱۶ مرداد صورت گرفت. استوانه‌های ۱ و ۲، در بالای بادگیر و استوانه‌های ۳ و ۴ در پایین بادگیر قرار داده شدند شکل (۲-الف) و (۲-ب). بر اساس شکل‌های (۷)، (۸) و (۹) بیشترین کاهش سطح آب



شکل ۸. ارتفاع آب استوانه‌ها در روز ۱۴ مرداد

(منبع: نگارندگان)

جدول (۲). میانگین کاهش حجم آب استوانه‌ها (cm³)

روز			میزان ارتفاع سطح آب (cm)
۱۴ مرداد	۱۵ مرداد	۱۶ مرداد	
۱۲/۹	۲۰/۲	۱۱/۹	
۴۰۵۰/۶	۶۳۴۲/۸	۳۷۳۶/۶	میزان کاهش حجم آب استوانه (cm ³) = (ارتفاع سطح آب × πr ²)
۱۴۱۳۰			مجموع (cm ³)

بیشترین میزان رطوبت محیط داخل به ترتیب ۱۶ درصد در ساعت ۳ بعدازظهر و ۲۷ درصد در ساعت ۱۲ ظهر است و این در حالی است که رطوبت محیط بیرون در ساعت ۳ بعدازظهر ۱۳ درصد و در ساعت ۱۲ ظهر، ۱۹ درصد است. با توجه به داده‌های به دست آمده کولر آبی به‌طور متوسط دمای محیط داخل را ۵°C پایین می‌آورد و رطوبت محیط را ۷ درصد افزایش می‌دهد.

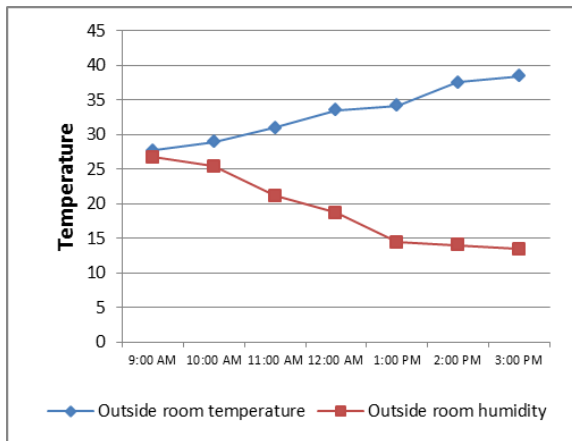
۳-۳-۲. میزان برق مصرفی در سناریو ۲

برای محاسبه برق مصرف شده توسط کولر آبی در روز ۲۷ مرداد ماه بر اساس داده‌های جدول (۳)، میزان برق مصرفی کولر آبی (E_{ec}) و پمپ آن (E_{pec}) در مدت زمان یک ساعت را محاسبه کرده مجموع این دو عدد (PCE) میزان برق مصرفی در مدت یک ساعت به دست می‌آید.

۳-۳-۳. میزان مصرف آب و برق کولر آبی در سناریو ۲ (استفاده از کولر آبی)

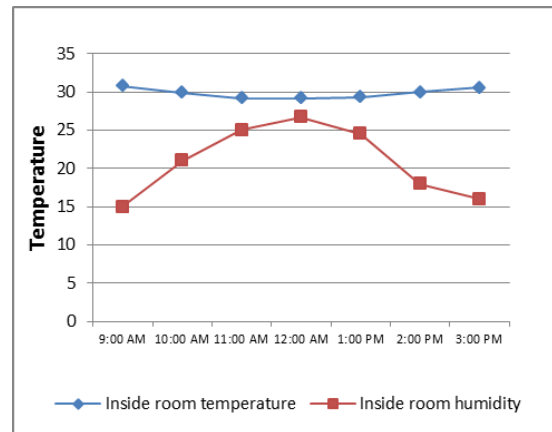
۳-۳-۱. میزان خنک‌کنندگی کولر آبی

برای بررسی سناریو ۲ اتاق مسکونی به ابعاد ۳×۴×۳ (طول، عرض، ارتفاع) که سیستم سرمایشی آن کولر آبی ۳۰۰۰ CFM با دور کند بود در نظر گرفته شد. در روز ۲۷ مرداد ماه دما و رطوبت داخل این اتاق و محیط بیرون از ساعت ۹ صبح تا ۳ بعدازظهر، اندازه‌گیری شد. با توجه به شکل‌های (۱۰) و (۱۱) پایین‌ترین دمای محیط داخل در ساعت ۱۲ ظهر و ۲۹/۲°C است در این ساعت دمای محیط بیرون ۳۳/۵°C است. بیشترین دمای داخل ۳۰/۶°C و در ساعت ۳ بعدازظهر حاصل شد که در این ساعت دمای محیط بیرون ۳۸°C درجه سلسیوس است. کمترین و



شکل ۱۱. دمای و رطوبت هوای خارج در سناریو ۲

(منبع: نگارندگان)



شکل ۱۰. دمای و رطوبت هوای داخل در سناریو ۲

(منبع: نگارندگان)

جدول ۳. مشخصات برق مصرفی کولر آبی براساس کاتالوگ مدل ۳۰۰۰

نوع کولر	ولتاژ ورودی برق (ولت)	مصرف برق کولر با دور کند (آمپر)	مصرف برق پمپ آب کولر (آمپر)
کولر آبی ۳۰۰۰	۲۲۰	۱/۶	۰/۹۵

(منبع: نگارندگان)

جدول ۴. مقدار کاهش آب مخزن کولر

سطح مقطع مخزن آب کولر (cm ²)	ارتفاع آب در ساعت ۹ صبح (cm)	ارتفاع آب در ساعت ۳ بعدازظهر (cm)	میزان کاهش ارتفاع سطح آب (cm)
۹۵ × ۱۰۰	۷	۲	۵

منبع: نگارندگان

۳-۴. مقایسه برق و آب مصرف شده در سناریو ۱ و ۲ با توجه به اینکه داده‌های آزمایش در گرم‌ترین ساعات روز یعنی از ساعت ۹ صبح تا ۳ بعدازظهر جمع‌آوری شده است. بنابراین آب و برق مصرفی برای شش ساعت شبانه‌روز محاسبه و با هم مقایسه می‌شوند. همچنین برای محاسبه آب مصرفی استوانه‌ها در سناریو ۱، میانگین آب مصرفی در سه روز متوالی محاسبه می‌شود. با توجه به داده‌های جدول (۵) سیستم سرمایشی ایستا در سناریو ۱ به‌طور میانگین ۵ درجه سلسیوس بیشتر از کولر آبی (سناریو ۲) دما را کاهش می‌دهد. همچنین رطوبت نسبی محیط در سیستم ایستا ۲۷ درصد افزایش داشته اما کولر آبی رطوبت نسبی محیط را تنها ۷ درصد افزایش داده است. بنابراین سیستم ایستا در مقایسه با کولر آبی، رطوبت نسبی محیط را ۲۰ درصد بیشتر افزایش داده است. میزان برق مصرفی در سناریو ۱ صفر است ولی در سناریو ۲ این مقدار، ۱۲۱۱۲/۹۰ کیلوژول در یک روز است. رد پای زیست محیطی برق مصرفی در سناریو ۱ صفر است ولی در سناریو ۲، ۱/۰۵ گیگاژول بر سال است. آب مصرفی در سناریو ۲ به اندازه ۰/۰۴ متر مکعب بیشتر از سناریو ۱ است.

مصرف برق کولر آبی CFM ۳۰۰۰ با دور کند برابر ۱/۶ آمپر (E_{ecl}) و ولتاژ برق شهر ۲۲۰ ولت (V_{rms}) است. با توجه به رابطه (۴) برق مصرفی کولر آبی (E_{ec}) برابر ۳۵۲ وات بر ساعت به دست می‌آید. مقدار مصرف پمپ کولر آبی ۰/۹۵ آمپر است که با توجه به رابطه (۵) مصرف برق پمپ کولر آبی (E_{pec}) ۲۰۹ وات بر ساعت حاصل می‌شود و میزان برق مصرفی در مدت یک ساعت (PCE) با توجه به رابطه (۳) ۵۶۱ وات بر ساعت است. برای محاسبه برق مصرفی در سه ماه تابستان (E_{summer})، برق مصرفی در یک ساعت (کیلووات ساعت) ضرب در مجموع ساعات اندازه‌گیری از ۹ صبح تا ۳ بعدازظهر (۶ ساعت) شده سپس عدد حاصله در تعداد روزهای سه ماه تابستان (۹۳ روز) ضرب می‌شود که این مقدار برابر ۳۱۳ کیلو وات است.

۳-۳-۳. میزان آب مصرفی کولر آبی در سناریو ۲

با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام شده در روز ۲۷ مرداد ماه کاهش سطح مخزن آب کولر آبی از ساعت ۹ صبح تا ۳ بعدازظهر در جدول (۴) مشخص شده است. حجم آب مصرف شده توسط کولر آبی (۷) از ساعت ۹ صبح تا ۳ بعدازظهر برابر با حاصل ضرب مساحت مخزن آب کولر (m^2) در میزان کاهش ارتفاع سطح آب است ($1 \times 0.95 \times 0.05$) که این مقدار ۴۷/۵ لیتر در روز به دست آمد.

جدول ۵. مقایسه آب و برق مصرفی و رد پای زیست محیطی آب و برق در سناریو ۱، ۲ و ۳

برق مصرفی در یک روز (GJ)	آب مصرفی در یک روز (لیتر)	رد پای اکولوژیکی برق در یک روز (E_1) ($Gj/year$)	رد پای اکولوژیکی آب در یک روز (E_2) ($Gj/year$)	رد پای اکولوژیکی میانگین کاهش دما در یک روز ($^{\circ}C$)	میانگین افزایش رطوبت در یک روز (%)
۰	۴/۷	۰	۰/۰۰۳۱	۱۰	۳۴
۱/۱۳	۴۷/۵	۱/۰۵	۰/۰۳۱	۵	۷

منبع: نگارندگان

۴. بحث و نتیجه‌گیری

این تحقیق برای بررسی ردپای اکولوژیکی آب و برق سیستم سرمایشی ایستا و مقایسه آن با کولر آبی صورت گرفت. عملکرد خنک‌کنندگی و مصرف آب سیستم سرمایشی ایستا در گرم‌ترین روزهای سال اندازه‌گیری شد. نمودارهای دما، رطوبت نسبی و سرعت باد نشان می‌دهد که سیستم ایستای هیبرید در طول آزمایش و در هر سه ساعت اندازه‌گیری در شرایط آسایش قرار دارد. به طوری که این سیستم دمای هوا را به‌طور متوسط تا ۱۰ درجه سلسیوس و افزایش رطوبت نسبی هوا به‌طور متوسط تا ۳۳ درصد کاهش می‌دهد. بنابراین اتاقک می‌تواند با استفاده از سیستم هیبرید در طول گرم‌ترین روزهای سال از ساعت ۹ صبح تا ۳ بعدازظهر شرایط آسایش را با مصرف انرژی صفر فراهم کند. خانی و همکاران در طرح جدید بادگیر مدولار نشان دادند که این سیستم می‌تواند دمای هوا را حداکثر ۱۳ درجه سلسیوس کاهش دهد. همچنین بادران نیز در طراحی کانال تبخیری با استفاده از معادلات ریاضی نشان داد که دمای هوا تا ۱۱ درجه سلسیوس کاهش می‌یابد در صورتی که در بادگیر طراحی شده در این تحقیق حداکثر کاهش دمای هوا ۱۶ درجه سلسیوس به دست آمد. بیشترین مقدار افزایش رطوبت نسبی هوای خروجی از بادگیر در طرح پیشنهادی ۵۲ درصد است که این مقدار افزایش رطوبت در بادگیر با شطح خیس شونده

و بادگیر با ستون‌های خیس که توسط بهادری و همکاران صورت گرفت به ترتیب برابر ۶۷ درصد و ۷۰ درصد، در طرح خانی و همکاران ۵۳ درصد و طرح بادران ۴۵ درصد بود. برق مصرفی کولر آبی در سه ماه تابستان ۱/۱۳ گیگا ژول است در صورتی که برق مصرفی سیستم هیبرید طراحی شده صفر است. رد پای اکولوژیکی برق مصرفی این سیستم صفر است در حالی که رد پای اکولوژیکی برق کولر آبی $1/05 Gj/year$ است. رد پای آب کولر آبی ۱۰ برابر بیشتر از رد پای آب سیستم ایستا در سه ماه تابستان است. از داده‌های جدول فوق نتیجه می‌گیریم که سیستم سرمایشی ترکیبی ایستا با مصرف کمتر آب و عدم مصرف برق نسبت به کولر آبی، کمترین میزان رد پای اکولوژیکی آب و برق را دارد. همچنین این سیستم قادر به فراهم آوردن شرایط آسایش محیط داخلی در گرم‌ترین روزهای سال است.

برای توسعه سیستم ترکیبی ایستای هیبرید و محاسبات مربوط به آن، تحقیقات بیشتری در این زمینه لازم است. بدین منظور در تحقیقات آینده موارد عنوان شده در نظر گرفته شود. ۱. شبیه‌سازی CFD یا دینامیک سیالات محاسباتی برای توسعه طرح پیشنهادی برای ساختمان‌های چند طبقه و ارزیابی ردپای آب و ردپای اکولوژیکی این سیستم‌ها ۲. بررسی رد پای کربن سیستم طراحی شده و مقایسه آن با کولر آبی.

یادداشت‌ها

1. Cubic Feet per Minute (CFM)
2. British Thermal Unit (BTU)
3. Power consumed energy (PCE)
4. Power Ecological Foot print (PE_F)
5. Electricity for evaporative cooler (E_{ec})
6. Electricity for pump evaporative cooler (E_{pec})
7. Electricity for evaporative cooler with low power (E_{ecl})
8. City electricity voltage (V_{rms})
9. Power Consumed to produce 1m³ of Water (PCW)
10. Water Ecological Foot print (WEF)

منابع

- ترازنامه انرژی. ۱۳۹۶. معاونت امور برق و انرژی، دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی.
- حق‌پرست، ف.، آصفی، م. و میرهاشمی، م. ۱۳۹۵. ارزیابی اثرات زیست محیطی ساختمان با استفاده از سامانه جای پای بوم‌شناختی، مسکن و محیط روستا، ۳۶(۱۶۰): ۱۹-۳۳.
- حیدری، ا.، عوامی، ا. و آقچه‌لو، م. ۱۳۹۶. ارزیابی اثرهای محیط زیستی با استفاده از روش جای پای بوم‌شناختی (مطالعه موردی: فعالیت دانشکده مهندسی انرژی دانشگاه صنعتی شریف)، محیط‌شناسی، ۴۳(۲): ۳-۳۱۶.
- شرکت آب و فاضلاب استان تهران. ۱۳۹۴. (<http://www.tpww.ir/fa/news>).
- مرکز آمار ایران. ۱۳۹۷. <https://www.amar.org.ir>.
- Ahmed, O.K. and Hussein, A.S. 2017. New design of Solar Chimney (Case study), Case Studies in Thermal Engineering, S2214-157X(17):30274-5.
- Arfanuzzaman, M.d. and Atiq Rahman, A. 2017. Sustainable water demand management in the face of rapid urbanization and ground water depletion for social-ecological resilience building, Volume 10: 9-22.
- Badran, Ali.A. 2003. Performance of cool towers under various climates in Jordan, Energy and Buildings, 35: 1031-1035.
- Bahadori, M.N., Mazidi, M., Dehghani, aR. 2008. Experimental investigation of new designs of wind towers. Renew Energy, 33: 2273-81.
- Chapagain, A.K. and Hoekstra, AY. 2004. Water footprints of nations. Value of Water Research Report Series No. 16, UNESCO-IHE, Delft, The Netherlands: 1-240.
- Cucek, L., Klemes, J.J. and Kravanja, Z. 2012. A review of footprint analysis tools for monitoring impacts on sustainability. Journal of Cleaner Production, 34:9-20.
- Galli, A., Giampietro, M., Goldfinger, S., Lazarus, E., Lin, D., Saltelli, S., Wackernagel, M. and Müller, F. 2016. Questioning the Ecological Footprint, Ecological Indicators, 69 :224-232.
- Geetha, N.B. and Velraj, R. 2012. Passive cooling methods for energy efficient buildings with and without thermal energy storage – A review. Energy Educ Sci Technol Part A Energy Sci Res; 29:913-46.
- Guzmán, J.S., Marrero, M. and de-Arellano, A.R. 2013. Methodology for determining the ecological footprint of the construction of residential buildings in Andalusia (Spain), Ecological Indicators, 25: 239-249.
- Jomehzadeh, F., Payam Nejata, B., Calautit, J.K., Badruddin, M., Yusofa, M., Sheikh Ahmad, Z., Ben Richard, H. and Muhammad Noor, A. 2017. A review on windcatcher for passive cooling and natural ventilation in buildings, Part 1: Indoor air quality and thermal comfort assessment:1-21.
- Kam Chun Ding, G. and Banihashemi, S. 2017. Ecological and Carbon Footprints The Future for City Sustainability. Encyclopedia of Sustainable Technologies, 2:43-51.
- Kandanand, k. 2019. The Energy Related Water Footprint Accounting of A Public Organization: The Case of A Public University in Thailand, 156: 149-153.
- Khani, S. M.R., Bahadori M.N. and Dehghani-Sanij, A.R. 2017. Experimental investigation of a modular wind tower in hot and dry regions, Energy for Sustainable Development, 39:21-28.
- Maerefat, M. and Haghighi, A.P. 2010. Natural cooling of stand-alone houses using solar chimney and evaporative cooling cavity, Renewable Energy, 35:2040-2052.

- Manzano-Agugliaro, F., Montoya, F.G., Sabio-Ortega, A. and García-Cruz, A. 2015. Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort. *Renew Sustain Energy Rev*; 49:736–55.
- Moosavi, L., Zandi, M., Mokhtar, B., Behroozizadeh, E. and Kazemi, I. 2020. New design for solar chimney with integrated windcatcher for space cooling and ventilation, *Building and Environment*, 1323(20):30143-8.
- Punyasompun, S., Hirunlabh, J., Khedari, J. and Zeghmami, B. 2009. Investigation on the application of solar chimney for multi-storey buildings. *Renew Energy*; 34:2545–61.
- Sadeghi, M., Samali, B., Wood, G. and de Dear, R. 2020. Comfort cooling by wind towers in the Australian residential context - Experimental wind tunnel study of comfort, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 196: 104014.
- Shamshirgaran, S., Nouzari, R., Assadi, M.M., Khalaji, M., Najafzadeh, K. and Bayati, G.R. 2016. The indicators and criteria of efficiency, Water Consumption And Emission Of Thermal Power Plants. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(22):13338-43.
- Ürge-Vorsatz, D., Cabeza, L.F., Serrano, S., Barreneche, C. and Petrichenko, K. 2015. Heating and cooling energy trends and drivers in buildings. *Renew Sustain Energy Rev*; 41:85–98.
- Wackernagel, M. and Rees, W.E. 1996. Our ecological footprint: Reducing human impact on the earth. New catalyst bioregional series: no. 9. Gabriola Island, BC, Philadelphia, PA: New Society Publishers.
- Wang, Q., Hao, D., Li, F., Guan, X. and Chen, P. 2020. Development of a new framework to identify pathways from socioeconomic development to environmental pollution, *Journal of Cleaner Production*, 253:1-11.