



Journal of Environmental Studies

Vol. 46, No. 1, Spring 2020

Journal Homepage: www.Jes.ut.ac.ir

Print ISSN: 1025-8620 Online ISSN 2345-6922

Investigation of Water Footprint and Ecological Footprint of Passive Hybrid Cooling System

Document Type
Research Paper

Mahnoosh Eghtedari¹, Abbas Mahravan^{2*} Maryam Ansarimanesh¹

Received
April 30, 2019

1 Department of Architecture, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran

Accepted
June 1, 2019

2 Department of Architecture, Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

DOI: [10.22059/JES.2020.301179.1008005](https://doi.org/10.22059/JES.2020.301179.1008005)

Abstract

The rapid growth of global population has placed an immense stress on the demand of natural resources and contributes to the destruction of the natural environment. All building services such as heating, ventilation, and air conditioning systems consume more than 60% energy in buildings, which is mainly supplied by fossil resources. The aim of this study is to design a Passive cooling system to provide comfortable conditions in residential Buildings. Also, with minimal water and electricity consumption, it will reduce ecological footprints and water footprints and also reduce the amount of electricity consumption in the building. This research was done experimentally-analytically. In order to calculate the efficiency of the proposed system, on August 4th to 7th, the temperature, humidity, and wind speed of the interior room were measured by considering the system. To evaluate the water consumption of the system, two scenarios were considered and their results were compared with each other. The results showed that the passive hybrid cooling system has the lowest ecological footprint of water and electricity compared to evaporative coolers. This system is also able to provide indoor comfort on the hottest days of the year.

Keywords: ecological footprint, energy consumption, passive cooling system, water consumption

* Corresponding author

Email: mahravan@razi.ac.ir

Expanded Abstract

Introduction

The rapid growth of global population has placed an immense stress on the demand of natural resources and contributes to the destruction of the natural environment. As the planet is now consuming natural resources in the production of goods and services faster than the environment can regenerate, strategies are urgently required to manage the ecological assets in a more effective way. The planet has biophysical limits on natural resources production and waste absorption. Buildings are one of the main factors in energy consumption and greenhouse gas emissions. Buildings consume about 40% of global energy consumption. All building services such as heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) systems consume more than 60% energy in buildings, which is mainly supplied by fossil resources. Today, because of the need for an effective method to achieve efficient energy and biocompatible architecture, the use of natural ventilation systems in buildings has become more significant. One of the methods to create comfortable conditions in the interior is a use of evaporative cooling in the cooling systems. Unlike air conditioners, evaporative cooling can be considered as an acceptable solution for sustainable construction, which reduces energy consumption and greenhouse gases. Evaporative cooling is widely used as a passive cooling method in the built environment. In the system, the movement of air on a wet surface causes the water evaporation through the air energy absorption, thereby reducing the temperature and increasing the amount of vapor contained in the air. We need indicators to demonstrate the current carrying capacity of the Earth so that decision makers are better informed to set goals, establish options for actions, and monitor progress regarding stated goals. Footprint is a quantitative measurement of natural resources and it is used to assess the extent of human activities impact on global sustainability. Ecological footprint was initially developed by Wackernagel and Rees in 1992, and is now widely used as an indicator for environmental sustainability. The international average water footprint is 7452 (Gm^3/year) and this amount is reported to be 102.65 (Gm^3/year) for Iran.

Numerous studies have been conducted on the footprints of buildings in the field of water consumption and fossil fuels. (Kandananond, 2019) calculated the amount of water used to produce fuel and electricity by calculating the footprints of water in various residential, office and educational buildings and showed that diesel fuel has the highest water consumption 857 (Litr/Kg). Heidari et al. (2017) conducted a study on the environmental impact assessment of educational buildings using ecological footprint method. In this study, the ecological footprints of the operation stage of the building, which included the energy consumption of the faculty, water consumption, production waste and the infrastructure of the building, were examined. Heidari et al. (2017) states that most of the ecological footprint of the faculty is related to water consumption per year, which is equal to 5.90 gha/year . The highest energy consumption after water is the energy consumption of fossil fuels, which is equal to 24.87 gha/year . Haghparast et al. (2017) calculated the ecological footprint. The scope of this research included the preparation of raw materials for production, transportation, installation and finally recycling of materials. The calculated ecological footprint of the studied samples includes (construction) of embodied energy in consumables, (operation) of energy consumed during operation, water consumed during operation and (land used) land occupied for the building. It was the outdoor or green space. The results of the studies showed that the highest ecological footprint of the two buildings is related to the energy field and is equal to 1.9401 hec/year .

Various studies have been conducted on the cooling rate of passive evaporative cooling systems, solar chimneys and hybrid systems. Bahadori et al. (2008) designed two new wind towers in the city of Yazd, Iran and tested them in September. One of the wind towers was equipped with wetted curtains suspended in the tower column and the other one with wetted surfaces. The cooling performance of the two new systems was compared with the conventional system. The experimental results showed that the efficiency of both new units with evaporative cooling systems was better than that of the

conventional unit. Further, the experimental results showed that the traditional type reduced the air temperature by 4°C, while the windcatchers with wet surfaces and wet curtains reduced the air temperature to 11 and 14°C, respectively, both of which reduced the air temperature more than the traditional type did (Khani & et al., 2017). An experimental study of modular windcatcher design using wet surfaces in Kerman for ten consecutive days showed that the highest air temperature obtained using this new design is 13.3°C and the lowest is 5.7°C is the average that can reduce the air temperature by up to 10%. Maerefat and Haghighi (2010) used a combination of solar chimney and evaporative cooling duct for natural ventilation of the chamber. Research has shown that the system is able to keep indoors at a comfortable temperature.

Materials & Methods

The Hybrid Passive Cooling System (HPCS) consisted of two distinctive systems: the Solar Chimney (SC) and Evaporative Cooling Cavity (ECC). The ECC system was connected to the northern view of the room and SC system was installed to the southern view of the room. The air entered the tower via the openings of the head tower in all directions and passed through the clay cylinders. In this section, the air is cooled and diverted downward. The SC system creates sufficient temperature difference between the interior and exterior by maximizing the solar energy gain and performed air ventilation in the SC and ECC systems. The proposed hybrid system was built in the campus of Azad University, Kermanshah branch in August and was tested from August 4th to 7th. In order to calculate the efficiency of the proposed system, on August 4th to 7th, the temperature, humidity, and wind speed of the interior room were measured by considering the HPCS. To evaluate the water consumption of the HPCS, two scenarios were considered and their results were compared with each other.

Scenario 1: On August 4th-7th, the amount of water reduction inside the clay cylinders was measured from 9:00 AM to 3:00 PM.

Scenario 2: On August 18, the room temperature and humidity were measured from 9:00 AM to 3:00 PM.

Dimensions and size of the HPCS was: A room with 2 m×2 m×2.35 m (L×W×H) dimensions with 10 cm -thick walls and 35 cm-thick ceiling without air filtration. A SC with 1 m height, 60 cm width, 17 cm air gap, and 45° tilt angel. The front side of the SC consisted of a 15 mm-thick glass glazing and the rear part included a 1 m-high absorber wall made of a black-painted aluminum sheet. A 40 cm × 10 cm air outlet of SC placed 20 cm below the ceiling. The ECC system built with a length of 3.25 m and 0.6 × 0.4 m cross-section. Each air inlet opening of the wind tower is 40 cm × 40 cm and air exit opening is 30 cm × 30 cm. Four clay cylinders installed in the cavity, are 20 cm diameter, and 90 cm height. Testing was performed for ten consecutive days at around 9:00 am, noon, and 3:00 pm during the hottest summer days. In order to calculate the efficiency of the proposed system, two scenarios were considered and the results were compared with each other.

Discussion of Results

Cool performance of HPCS: The lowest temperature was recorded 21.1°C at 9:00 AM on the 5th of August. The lowest temperature is noon on 22.9°C and on the 6th of August. At 3 PM, the lowest air temperature of 23.72 was reached on the 5th of August. The highest difference between the temperature of the inlet windcatcher and the outside environment is 16.3°C, which is on the 7th of August and at 3:00 PM. Based on the results, the highest RHs of the outlet air from the tower at 3:00 PM were 60.7% on the 6th of August. The lowest RHs of the outlet air from the tower at 3:00 PM were 52% on the 5th of August. Based on the results, the ECC system can increase the RH of air by an average of 34%. The highest outlet air velocity of the tower is 0.72 m/s, at 3:00 PM on the 5th of August. The lowest air velocity is 0.5 m/s at 9:00 AM on the 6th of August.

The amount of water level reduction in cylinders in the windcatcher (Scenario 1): The highest

reduction in water level every three days is the cylinder 2 at 3 PM. The lowest decrease in water level was obtained in cylinder 3 at 9:00 AM. The lowest average decrease in water volume is related to the third day of the experiment on 5 August and the highest average decrease in water volume is related to the second day of the experiment on 6th August.

Water and electricity consumption of evaporative cooler in scenario 2: To investigate scenario 2, on August 18, the temperature and humidity inside the room and the outside environment were measured from 9:00 AM to 3:00 PM. The lowest and highest levels of indoor humidity are 16% at 3:00 PM and 27% at 12:00 AM, respectively, while the outdoor humidity is 13% at 3:00 PM and 19% at 12:00 AM. The evaporative cooler lowers the indoor ambient temperature by an average of 5% and increases the ambient humidity by an average of 7%.

Comparison of electricity and water used in scenarios 1 and 2: The amount of electricity consumed in Scenario 1 is zero, but in Scenario 2, this value is 12112.9 kJ/ day. The environmental footprint of electricity consumed in Scenario 1 is zero, but in Scenario 2, it is 1.05 Gb/ year. The water used in Scenario 2 is 0.04 m³ more than Scenario 1.

Conclusions

This study aims to investigate the ecological footprint and water footprint of the Hybrid Passive cooling system and compare it with evaporative coolers. The results showed that the chamber can provide comfort conditions with zero energy consumption by using a hybrid system during the hottest days of the year from 9:00 AM to 3:00 PM. The power consumption of the evaporative cooler in the 3 months of summer is 1.13 Gj, while the power consumption of the designed hybrid system is zero. The ecological footprint of the power consumption of this system is zero, while the ecological footprint of the evaporative cooler is 1.05 (Gj/ year). From the data obtained, we conclude that the passive hybrid cooling system has the lowest ecological footprint of water and electricity compared to evaporative coolers. The system is also able to provide indoor comfort on the hottest days of the year.

بررسی رد پای آب و رد پای اکولوژیکی سیستم سرمایه‌ی ترکیبی ایستا

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

۱ گروه معماری، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی کرمانشاه، ایران

۲ گروه معماری، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۸/۰۷/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۱۵

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 درحالی‌که 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.

کلیدواژه‌ها: رد پای اکولوژیکی، سیستم سرمایه‌ی ایستا، مصرف آب، مصرف انرژی

۱. سرآغاز

محیط‌زیست، به مصرف می‌رسد هرچند برخی از منابع 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.,

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

فسیلی (زمین جذب کربن) است که این مقدار را (gha / m^2) بیان کردند. در این تحقیق بیشترین رد پای کربن به ترتیب مربوط به مصالح مصرفی (۰/۲۲)، ماشین‌آلات (۰/۱۴) و برق (۰/۴۰) بود. در ایران نیز تحقیقاتی در زمینه رد پای اکولوژیکی ساختمان‌ها صورت گرفته است (حیدری و همکاران، ۱۳۹۶). تحقیقی دربارهٔ ارزیابی اثرهای زیست محیطی ساختمان آموزشی با استفاده از روش رد پای بوم‌شناختی انجام دادند. در این پژوهش ردپای 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 دانشکدهٔ مربوط به مصرف آب در سال است که این میزان برابر $gha/year$ ۵/۹۰ است و بیشترین مصرف انرژی پس از آب، مصرف انرژی سوخت‌های فسیلی است که برابر $gha/year$ ۲۴/۸۷ 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، (بهره برداری) 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 ردپای اکولوژیکی دو ساختمان مربوط به زمین انرژی است و برابر ۱/۹۴۰ هکتار در سال است. زمین انرژی شامل انرژی نهفته در مصالح و انرژی بهره‌برداری است. در بررسی‌های فوق بیشترین ردپای اکولوژیکی ساختمان‌ها

رد پای اکولوژیکی نخست توسط واکرناگل و ریس در سال ۱۹۹۲ معرفی شد که با واحد هکتار جهانی 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 ($Gm^3/year$) ۱۰۲/۶۵ و این مقدار برای ایران ($Gm^3/year$) ۷۴۵۲ گزارش شده است (Chapagain & Hoeksrat, 2004). طبق این گزارش رد پای آب در ایران، بعد از آمریکا بالاترین میزان است ($cap/year$) 1624). 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 گازی بیشترین میزان مصرف آب ($Litr/Kg$) 857 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

Khani و همکاران (۲۰۱۷) یک مطالعه تجربی از طراحی مدولار بادگیر با استفاده از سطوح مرطوب در شهر 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 (۲۰۱۷) 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 اقلیم‌های 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

مربوط به آب و سوخت‌های فسیلی است. ساختمان‌ها یکی از عوامل اصلی مصرف انرژی و تولید 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) Moosavi et al., 2020) 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 در حالی که بادگیر با سطوح و ستون مرطوب باعث کاهش دمای هوا به ترتیب تا 11 و 14 درجه سلسیوس می‌شود.

استوانه‌هاى رسى مرطوب عبور كرد. در اين قسمت هوا خنك شد و به سمت پايين تغيير جهت داد. دودكش خورشيدى با استفاده از حداكثر دريافت تابش خورشيدى، اختلاف دماى كافى بين درون و بيرون ايجاد كرد و باعث ايجاد تهويه هوا در اتاقك شد (شكل ۱-الف).

۲-۲. ابعاد و اندازه سيستم

ابعاد و اندازه سيستم سرمايشى هيبريدى طراحى شده در جدول (۱) آورده شده است. دهانه خروجى هوا در دودكش خورشيدى به فاصله ۲۰ سانتى متر از زير سقف قرار گرفته است (شكل ۱-الف) و (۱-ب) و زاويه شيب دودكش خورشيدى با توجه به عرض جغرافيايى محل ۴۵ درجه در نظر گرفته شده است. در داخل كانال سرمايش تبخيرى چهار استوانه رسى به قطر ۲۰ سانتى متر و ارتفاع ۹۰ سانتى متر قرار داده شده. هر يك از استوانه‌ها گنجائش ۲۴/۵ ليتر آب و در مجموع ۹۸ ليتر آب را دارد (شكل ۲-الف) و (۲-ب).

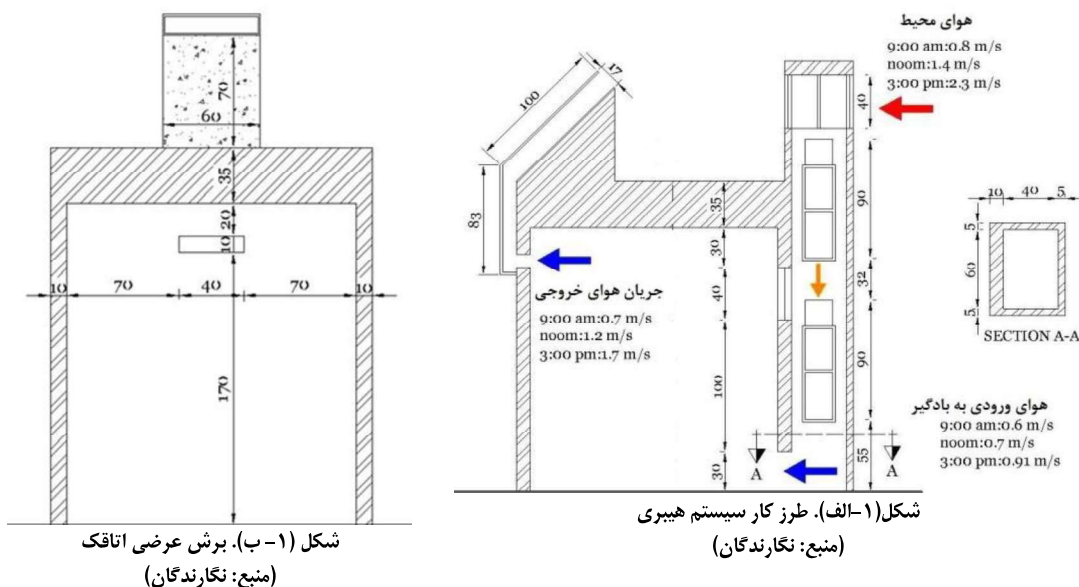
اقدام به ساخت سيستم ايستاي هيبريد شده و سپس شرايط آسايش و رد پاى اكولوژى آن بررسى مى‌شود.

۲. مواد و روش‌ها

در اين مقاله براي بررسى رد پاى آب و رد پاى اكولوژيكي سيستم ايستاي هيبريد طراحى شده ابتدا مشخصات سيستم كه شامل ابعاد و اندازه، محل ساخت و مدت زمان انجام آمايش است توضيح داده مى‌شود سپس ميزان مصرف آب و برق سيستم محاسبه شده و رد پاى اكولوژيكي آن محاسبه مى‌شود. در نهايت رد پاى اكولوژيكي اين سيستم با كولر آبي مقايسه مى‌شود.

۲-۱. عملکرد سيستم طراحى شده

سيستم تركيبى سرمايشى ايستا شامل دو سيستم متمايز است؛ دودكش خورشيدى و كانال خنك‌كننده تبخيرى. كانال خنك‌كننده تبخيرى به نماى شمالى ساختمان متصل شد و دودكش خورشيدى در سمت خارجى نماى جنوبى اتاق قرار گرفت. هوا از طريق بازشوهاى ايجاد شده در رأس بادگير در تمام جهات وارد بادگير شد و از روى





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

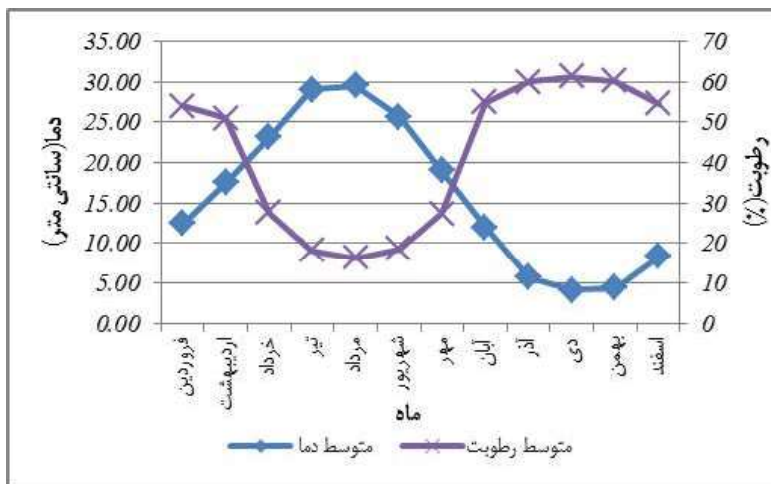
ابعاد دودکش خورشیدی (cm) حقیقی و معرفت (۲۰۴۷، ۲۰۱۰، ص)		ابعاد سیستم سرمایش تبخیری (cm)		ابعاد اتاقک (cm)	
۱	ارتفاع	325	طول کانال بدران (۲۰۰۳، ۱۰۳۵، ص)	00۲	طول (متر)
۶۰	عرض	(6×4)	سطح مقطع کانال (طول× عرض) خانی و همکاران (۲۰۱۷، ۲۶، ص)	00۲	عرض (متر)
۱۷	عمق حفره	40×40	بازشوهای ورودی هوای خارج	235	ارتفاع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

منبع: نگارندگان

شهر کرمانشاه دارای عرض جغرافیایی ۱۹° ۳۴' شمالی، متوسط جریان باد ۲ متر بر ثانیه، متوسط رطوبت ۲۱ درصد و متوسط دمای °C ۲۹ 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.

۲-۳. محل و زمان مورد مطالعه

با توجه به اینکه خنک ساختن فضا از طریق سرمایش تبخیری باعث افزایش رطوبت هوا در محیط می شود بنابراین خنک کننده های تبخیری مناسب آب و هوای گرم و خشک است. با توجه به آمار ۱۰ ساله دما و رطوبت (۱۳۸۸-۱۳۹۷)، استان کرمانشاه دارای تابستان های گرم و نیمه خشک است (میانگین رطوبت در سه ماه تابستان ۱۸ درصد است) به این دلیل محدوده مورد آزمایش شهر کرمانشاه انتخاب شد (شکل ۳).



شکل ۳. میانگین دما و رطوبت هوای شهر کرمانشاه در سال‌های ۱۳۸۸-۱۳۹۷
منبع: (<http://www.kermanshahmet.ir/met/amar>)

۲-۴. روش تحقیق

تحقیق حاضر به صورت تجربی - تحلیلی است که به منظور 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 50 KH، 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 سرمایه‌ش، 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 (۱ CFM) ۳۰۰۰ با دور کند است. به منظور 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.

۲-۵. محاسبه رد پای اکولوژیکی سیستم سرمایه‌شی 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

که در رابطه (۳)، E_{ec} 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 مصرف برق پمپ کولر (آمپر) است.

۲-۵-۲. محاسبه رد پای اکولوژیکی آب

برای محاسبه رد پای اکولوژیکی آب، میزان آب مصرفی سیستم‌های سرمایه‌گذاری 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) $0.6 \text{ m}^3/\text{MWh}$ 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.

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

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

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

زمین، دی‌اکسید کربن حاصل از مصرف سوخت ملاک عمل قرار می‌گیرد و در این تحقیق از رویکرد دی‌اکسیدکربن استفاده شده است. یک هکتار زمین توان جذب دی‌اکسید 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 سرمایه‌گذاری 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 2 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، 4 PEF رد پای اکولوژیکی الکتریسیته و $100(\text{Gj}/\text{gha})$ توان جذب دی‌اکسیدکربن هر هکتار زمین مولد است

$$\text{برق مصرفی} = \frac{\text{Gj}}{1000000} = \text{برق مصرفی}$$

$$\text{برق مصرفی} = \frac{\text{BTU} \times 1/055}{\text{Kwh}} \times 3411 = \text{برق مصرفی}$$

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

برای محاسبه میزان برق مصرفی کولر آبی، ابتدا میزان برق مصرف شده توسط کولر آبی $5(E_{ec})$ و پمپ آن $6(E_{pec})$ در مدت زمان یک ساعت را محاسبه نموده مجموع این دو عدد (PCE) میزان برق مصرفی در مدت یک ساعت به دست می‌آید.

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

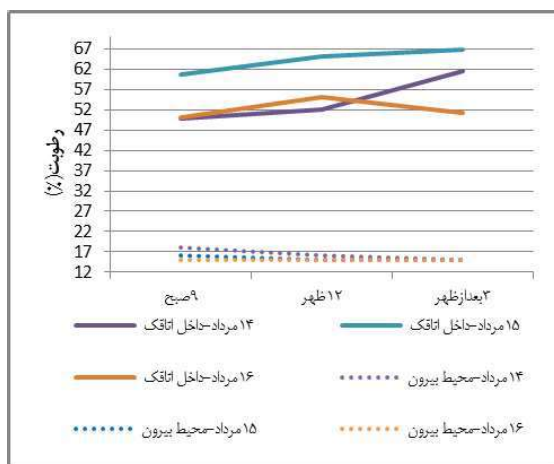
که در رابطه (۲) PCE ، میزان برق مصرفی (وات بر ساعت)، E_{ec} مصرفی کولر آبی (وات بر ساعت) و E_{pec} ، برق مصرفی پمپ کولر آبی (وات بر ساعت) می باشد.

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

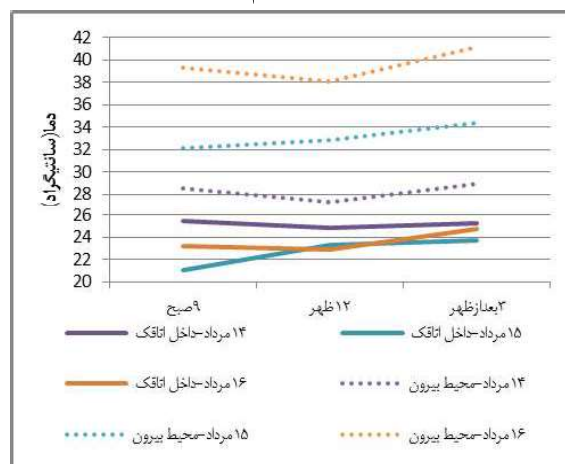
اندازه‌گیری شد.

شکل‌های (۴ تا ۶) به ترتیب دمای هوای داخل اتاقک، رطوبت و سرعت هوای دهانه بادگیر به داخل اتاقک 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 اتاقک 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 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

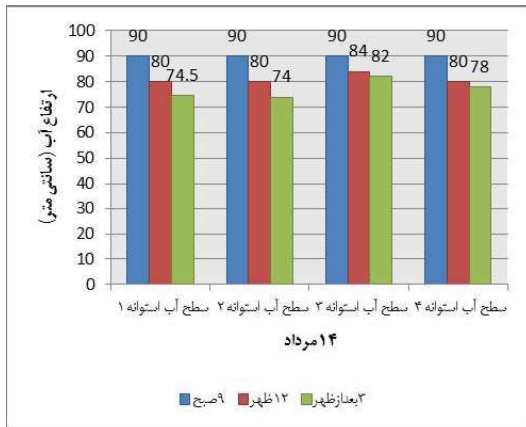
به‌طور متوسط 10° درجه سلسیوس پایین آورد. همچنین دمای هوای دهانه بادگیر در تمام ساعات در شرایط آسایش قرار دارد. بر اساس داده‌های شکل (۵) بیشترین میزان رطوبت دهانه بادگیر در ساعت ۳ بعدازظهر است که بیشترین مقدار آن 67 درصد و مربوط به روز ۱۵ مرداد است. کمترین مقدار رطوبت 50 درصد و در روز ۱۴ مرداد است. حداکثر افزایش رطوبت هوا در روز ۱۵ مرداد و ساعت ۳ بعدازظهر است که 52 درصد است. بر اساس نتایج به دست آمده این سیستم می‌تواند رطوبت نسبی هوا را به‌طور متوسط 34 درصد افزایش دهد. بیشترین سرعت هوا در خروجی دهانه بادگیر به اتاقک، در روز ۱۴ مرداد و ساعت ۳ بعدازظهر است که این مقدار $0/72\text{m/s}$ است و هنگامی که سرعت هوای محیط $0/51\text{m/s}$ 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 اتاقک و محیط بیرون (منبع: نگارندگان)

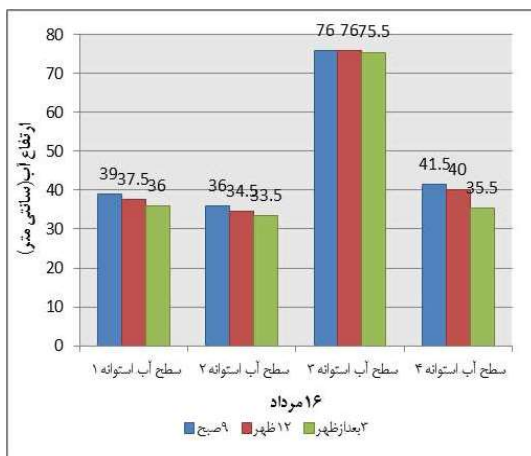


شکل ۴. دمای هوای ورودی بادگیر به اتاقک و محیط بیرون (منبع: نگارندگان)



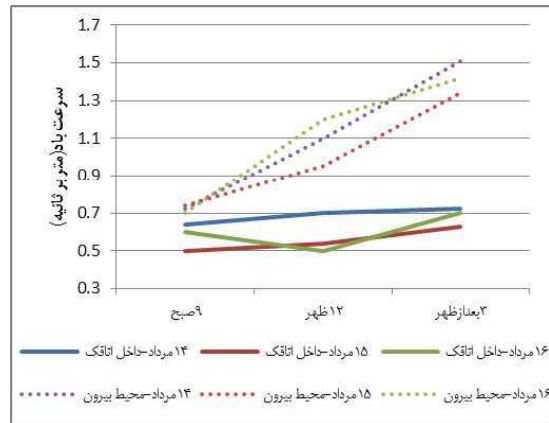
شکل ۷. ارتفاع آب استوانه‌ها در روز ۱۴ مرداد
(منبع: نگارندگان)

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)

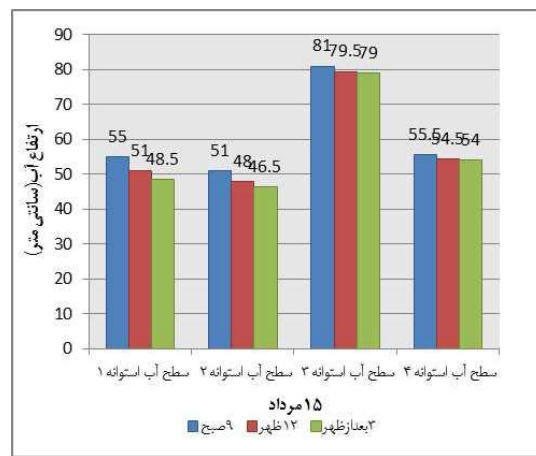
ارتفاع) که سیستم سرمایشی آن کولر آبی ۳۰۰۰CFM با دور کند بود در نظر گرفته شد. در روز ۲۷ مرداد ماه دما و رطوبت داخل اتاق و محیط بیرون از ساعت ۹ صبح تا ۳ بعدازظهر، اندازه‌گیری شد. با توجه به شکل‌های (۱۰) و (۱۱) پایین‌ترین دمای محیط داخل



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)

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،

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

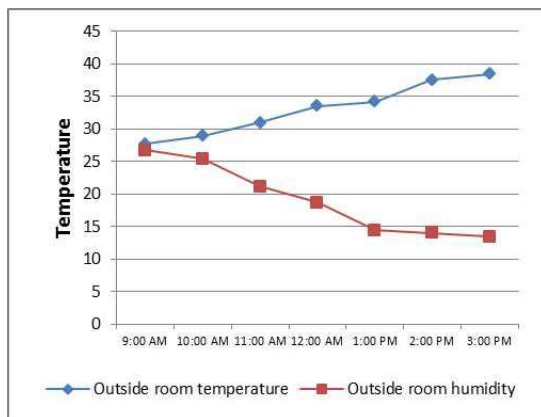
روز			میزان ارتفاع سطح آب (cm)
۱۶ مرداد	۱۵ مرداد	۱۴ مرداد	
۱۱/۹	۲۰/۲	۱۲/۹	
۳۷۳۶/۶	۶۳۴۲/۸	۴۰۵۰/۶	میزان کاهش حجم آب استوانه (cm ³) = (ارتفاع سطح آب × πr ²)
			مجموع (cm ³)
			۱۴۱۳۰

دمای محیط داخل را ۵°C پایین می‌آورد و رطوبت محیط را ۷ درصد افزایش می‌دهد.

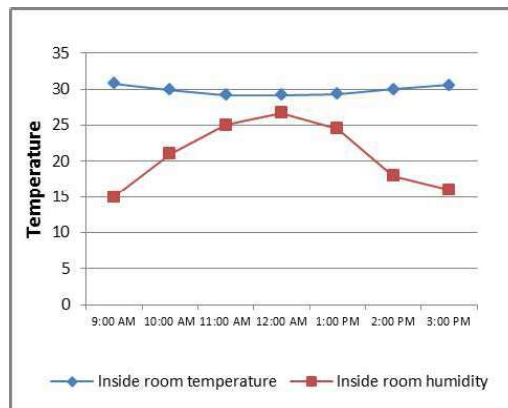
۲-۳-۲. میزان برق مصرفی در سناریو ۲

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.

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 بعد از ظهر حاصل شد که در این ساعت دمای محیط بیرون ۳۸°C درجه سلسیوس است. کمترین و بیشترین میزان رطوبت محیط داخل به ترتیب ۱۶ درصد در ساعت ۳ بعد از ظهر و ۲۷ درصد در ساعت ۱۲ ظهر است و این در حالی است که رطوبت محیط بیرون در ساعت ۳ بعد از ظهر ۱۳ درصد و در ساعت ۱۲ ظهر، ۱۹ درصد است. با توجه به داده‌های به دست آمده کولر آبی به طور متوسط



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

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

منبع: نگارندگان

دست آمد.

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 جمع آوری 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_{ec1}) 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 (V) 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

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

رد پای اکولوژیکی آب در سه ماه تابستان W_{EF} ($Gj/year$)	رد پای اکولوژیکی آب در یک روز (E_2)	رد پای اکولوژیکی برق در سه ماه تابستان PE_F ($Gj/year$)	رد پای اکولوژیکی برق در یک روز (E_1)	آب مصرفی در یک روز (لیتر)	برق مصرفی در یک روز (GJ)	میانگین افزایش رطوبت در یک روز (%)	میانگین کاهش دما در یک روز (°C)
۰/۳	۰/۰۰۳۱	۰	۰	۴/۷	۰	۳۴	۱۰
۳	۰/۰۳۱	۱/۰۵	۰/۰۱۱۳	۴۷/۵	۱/۱۳	۷	۵

منبع: نگارندگان

۴. بحث و نتیجه‌گیری

سیستم سرمایشی ایستا و مقایسه آن با کولر آبی صورت گرفت. عملکرد خنک‌کنندگی و مصرف آب سیستم

این تحقیق برای بررسی ردپای اکولوژیکی آب و برق

آبی $1/0.5 GJ/year$ 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. شبیه سازی 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)

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 با داران 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 با داران 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

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 آفچه‌لو، 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., Behroozzadeh, 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 Zeghamati, 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.