Journal of Architectural and Environmental Research, Volume 4, Issue 6, September 2026, pp.205-227.

Journal of Architectural and Environmental Research

DOI: 10.30470/jaer.2026.2097247.1241

Investigating the Energy Performance of Educational Buildings Based on the Integration of Passive Evaporative Cooling Systems and Cool Roofs in Hot-Arid Climates: A Case Study of Kianmehr School, Yazd

Saeed Azemati[1 *]

1. Assistant Professor, Department of Architecture, Tehran East Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, Saeed.azemati@iau.ac.ir

Research Article

***Corresponding Author:**
Saeed Azemati
Saeed.azemati@iau.ac.ir

Received: 2026/08/12
Accepted: 2026/09/21

Keywords: Energy Consumption in Educational Buildings, Evaporative Cooling, Cool Roofs, Passive Strategies, Hot-Arid Climate.

Abstract

In hot-arid climates, educational buildings face significant challenges in maintaining thermal comfort and managing high energy consumption due to extended operational hours and high occupant density. In this context, leveraging passive strategies can serve as an effective approach to reduce reliance on mechanical systems. The present study aims to evaluate the energy performance of educational buildings through the integration of passive evaporative cooling systems and high-reflectance "cool roofs" in a hot-arid climate. The Kianmehr School in Yazd—one of Iran's most prominent cities in this climatic zone—was selected as the case study. The research methodology is based on a descriptive-analytical approach. Initially, the climatic characteristics of Yazd and the key indicators affecting the cooling load of educational buildings were analyzed. Subsequently, the base-case building was modeled within an energy simulation environment to assess thermal performance and energy consumption across various scenarios. This process examined the impact of evaporative cooling systems—a low-energy indigenous solution—alongside the implementation of cool roofs with high solar reflectance. Finally, the synergistic performance of these two strategies was analyzed in comparison to the building's base-case configuration. The results indicate that the integration of evaporative cooling systems and cool roofs significantly reduces the cooling load of educational buildings and enhances indoor thermal comfort. Furthermore, by minimizing solar heat gain through the roof and maximizing evaporative cooling efficiency, these strategies play a crucial role in reducing the annual energy consumption of the building. The findings of this research can serve as a practical guideline for the design and optimization of educational facilities in hot-arid regions.

Cite this article: Azemati, S. (2026). Investigating the Energy Performance of Educational Buildings Based on the Integration of Passive Evaporative Cooling Systems and Cool Roofs in Hot-Arid Climates: A Case Study of Kianmehr School, Yazd. *Journal of Architectural and Environmental Research*, *4*(6), 205–227.
https://doi.org/10.30470/jaer.2026.2097247.1241

Print ISSN: 2588-6363
Online ISSN: 2981-247X

Authors

نشریه پژوهش‌های معماری و محیط، دوره ۴ ، شماره ۶، شهریور ۱۴۰۵ ، صفحات ۲۰۵-۲۲۷.

دوفصلنامه پژوهش های معماری و محیط

دانشگاه زنجان

DOI: 10.30470/jaer.2026.2097247.1241

بررسی سطح انرژی ساختمان‌های آموزشی مبتنی بر یکپارچه‌سازی سیستم‌های غیرفعال خنک‌کننده تبخیری و سقف‌های خنک در اقلیم گرم و خشک: نمونه موردی مدرسه کیانمهر شهر یزد

سعید عظمتی [۱*]

۱. استادیار، گروه معماری، واحد تهران شرق، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، Saeed.azemati@iau.ac.ir

مقاله پژوهشی

*** نویسنده مسئول:**
سعید عظمتی
Saeed.azemati@iau.ac.ir

دریافت مقاله: ۱۴۰۵/۰۵/۲۱
انتشارمقاله: ۱۴۰۵/۰۶/۳۰

واژگان کلیدی:
مصرف انرژی ساختمان‌های آموزشی، خنک‌سازی تبخیری، سقف‌های خنک، راهبردهای غیرفعال اقلیم گرم و خشک.

چکیده:

در اقلیم‌های گرم و خشک، ساختمان‌های آموزشی به دلیل ساعات بهره‌برداری طولانی و تراکم بالای کاربران، با چالش‌های جدی در تأمین آسایش حرارتی و مصرف بالای انرژی مواجه هستند. در این میان، بهره‌گیری از راهکارهای غیرفعال می‌تواند به‌عنوان رویکردی مؤثر در کاهش وابستگی به سیستم‌های مکانیکی مورد توجه قرار گیرد. پژوهش حاضر با هدف بررسی سطح انرژی ساختمان‌های آموزشی مبتنی بر یکپارچه‌سازی سیستم‌های غیرفعال خنک‌کننده تبخیری و سقف‌های خنک در اقلیم گرم و خشک انجام شده است. نمونه موردی این مطالعه، مدرسه کیانمهر در شهر یزد است که به‌عنوان یکی از شهرهای شاخص اقلیم گرم و خشک ایران انتخاب شده است. روش تحقیق در این پژوهش مبتنی بر رویکرد توصیفی—تحلیلی است. ابتدا ویژگی‌های اقلیمی شهر یزد و شاخص‌های مؤثر بر بار سرمایشی ساختمان‌های آموزشی مورد تحلیل قرار گرفت. سپس با طراحی و مدل‌سازی ساختمان نمونه در محیط شبیه‌سازی انرژی، عملکرد حرارتی و میزان مصرف انرژی در سناریوهای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. در این فرآیند، تأثیر استفاده از سامانه‌های خنک‌کننده تبخیری به‌عنوان یکی از راهکارهای بومی و کم‌مصرف، در کنار به‌کارگیری سقف‌های خنک با ضریب بازتاب بالا بررسی شد. در نهایت، عملکرد ترکیبی این دو راهکار در مقایسه با حالت پایه ساختمان مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که یکپارچه‌سازی سیستم‌های خنک‌کننده تبخیری و سقف‌های خنک می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی بار سرمایشی ساختمان‌های آموزشی را کاهش داده و منجر به بهبود شرایط آسایش حرارتی در فضاهای داخلی شود. همچنین این راهکارها با کاهش جذب حرارت خورشیدی در بام و افزایش کارایی خنک‌سازی تبخیری، نقش مؤثری در کاهش مصرف انرژی سالانه ساختمان ایفا می‌کنند. یافته‌های این پژوهش می‌تواند به‌عنوان راهنمایی کاربردی برای طراحی و بهینه‌سازی ساختمان‌های آموزشی در اقلیم‌های گرم و خشک مورد استفاده قرار گیرد.

استناد به این مقاله: عظمتی، سعید (۱۴۰۵) بررسی سطح انرژی ساختمان‌های آموزشی مبتنی بر یکپارچه‌سازی سیستم‌های غیرفعال خنک‌کننده تبخیری و سقف‌های خنک در اقلیم گرم و خشک: نمونه موردی مدرسه کیانمهر شهر یزد. *نشریه پژوهش‌های معماری و محیط*، ۴ (۶)، ۲۰۵-۲۲۷.
https://doi.org/10.30470/jaer.2026.2097247.1241

شاپا چاپی: ۲۵۸۸-۶۲۶۳
شاپا الکترونیکی: ۲۴۷۸-۲۹۸۱

CC BY NC

پدیدآورندگان

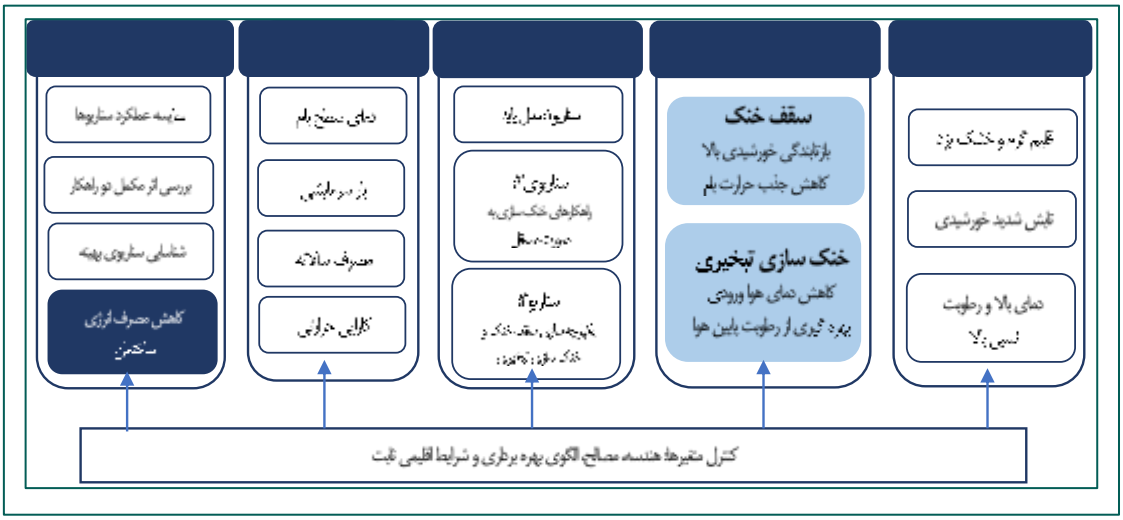
مقدمه

بخش ساختمان در دهه‌های اخیر به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی در سطح جهان شناخته می‌شود و سهم قابل توجهی از انرژی نهایی را به خود اختصاص می‌دهد. رشد روزافزون شهرنشینی، افزایش نیازهای حرارتی و توسعه کاربری‌های عمومی سبب شده است که توجه به بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها به‌ویژه در کشورهای مناطق گرم و خشک، بیش از گذشته ضروری باشد (Ahmed & Johnson, 2021). در میان انواع کاربری‌ها، ساختمان‌های آموزشی جایگاه ویژه‌ای دارند؛ زیرا علاوه بر ساعات بهره‌برداری طولانی، نیازمند حفظ سطح قابل قبولی از آسایش حرارتی، تهویه مناسب و کیفیت محیط داخلی هستند. این ویژگی‌ها موجب می‌شود که مدارس در دوره‌های گرم سال با بار سرمایشی بالا مواجه شوند و برای تأمین شرایط آسایش حرارتی به‌شدت به سیستم‌های مکانیکی وابسته شوند؛ مسئله‌ای که پیامد مستقیم آن افزایش هزینه انرژی، کاهش پایداری و وابستگی بیشتر به منابع غیرتجدیدپذیر است. اقلیم گرم و خشک ایران، شامل گستره وسیعی از شهرهای مرکزی و شرقی کشور، با ویژگی‌های خاصی چون تابش شدید خورشیدی، دمای هوای بالا در طول روز، رطوبت نسبی پایین و اختلاف زیاد دمای شبانه‌روز تعریف می‌شود (Alonso et al., 2022). این ویژگی‌ها سبب می‌شوند که ساختمان‌ها—به‌ویژه ساختمان‌های آموزشی—با چالش‌های جدی در مدیریت انرژی روبه‌رو باشند. از یک‌سو تابش فراوان خورشید منجر به گرم‌شدن بیش از حد بام و سطوح خارجی می‌شود، و از سوی دیگر رطوبت بسیار کم هوا ظرفیت خوبی برای استفاده از فرایند تبخیر ایجاد می‌کند. بنابراین، اقلیم گرم و خشک همزمان هم یک چالش در بحث آسایش حرارتی است و هم یک فرصت برای بهره‌گیری از راهکارهای غیرفعال سازگار با اقلیم. در این میان، دو راهبرد غیرفعال یعنی خنک‌سازی تبخیری و سقف‌های خنک در سال‌های اخیر به‌طور گسترده مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند (Chami & Emamianfar, 2017). سیستم‌های خنک‌کننده تبخیری با استفاده از فرایند طبیعی تبخیر آب، دمای هوا را کاهش داده و بدون نیاز به مصرف زیاد انرژی مکانیکی، سطح قابل قبولی از آسایش حرارتی را فراهم می‌کنند. این روش سابقه‌ای طولانی در معماری بومی ایران دارد؛ نمونه‌های آن را در بادگیرها، حوض‌خانه‌ها و جریان هوای تبخیری میان فضاهای نیمه‌باز می‌توان مشاهده کرد (Alwetaishi, 2021). از سوی دیگر، سقف‌های خنک—که با بهره‌گیری از پوشش‌های بازتابنده یا مصالح با ضریب گسیل بالا طراحی می‌شوند—توانایی کاهش جذب حرارت ناشی از تابش مستقیم خورشید را دارند. استفاده از این سقف‌ها می‌تواند به‌طور قابل توجهی دمای سطح بام را کاهش دهد و از انتقال حرارت به فضاهای داخلی جلوگیری کند (Baghbanian et al., 2015).

با وجود بررسی‌های متعدد درباره هر یک از این راهکارها به‌صورت مستقل، مطالعات ترکیبی و یکپارچه‌سازی آن‌ها در قالب یک سیستم جامع برای ساختمان‌های آموزشی بسیار محدود است. در حالی که از منظر عملکرد انرژی، انتظار می‌رود ترکیب خنک‌سازی تبخیری با سقف خنک بتواند اثرات مکملی ایجاد کند: سقف خنک با کاهش دمای سقف، بار حرارتی اولیه را کاهش می‌دهد و سیستم تبخیری با توان بیشتر می‌تواند دمای هوای ورودی به فضا را پایین بیاورد. این موضوع اهمیت مطالعه هم‌افزایی این دو راهکار را دوچندان می‌کند. در این راستا، پژوهش حاضر با تمرکز بر مدرسه کیانمهر شهر یزد—به‌عنوان نمونه‌ای شاخص از یک ساختمان آموزشی در اقلیم گرم و خشک—به بررسی تأثیر یکپارچه‌سازی سیستم خنک‌کننده تبخیری و سقف خنک بر سطح انرژی ساختمان می‌پردازد. برای دستیابی به این هدف، ابتدا ویژگی‌های اقلیمی و نیازهای حرارتی نمونه موردی تحلیل شده و سپس سناریوهای مختلف طراحی در محیط شبیه‌سازی انرژی مدل‌سازی و مقایسه شده است. هدف اصلی این پژوهش ارزیابی عملکرد هم‌زمان دو راهکار غیرفعال خنک‌کننده تبخیری و سقف خنک در کاهش مصرف انرژی ساختمان‌های آموزشی در اقلیم گرم و خشک است.

بر همین اساس، سوالات پژوهش به شکل زیر تدوین می‌شوند:

۱. استفاده از سقف خنک چه میزان می‌تواند دمای بام و بار سرمایشی ساختمان را کاهش دهد؟
۲. سیستم خنک‌کننده تبخیری به‌تنهایی چه تأثیری بر مصرف انرژی سالانه ساختمان دارد؟
۳. تلفیق این دو راهکار چه مقدار بهبود در عملکرد انرژی ایجاد می‌کند و آیا اثرات آن‌ها مکمل یکدیگر است؟
۴. کدام سناریوی طراحی می‌تواند بیشترین کارایی حرارتی را برای اقلیم گرم و خشک یزد فراهم کند؟



شکل ۱. مدل مفهومی پژوهش. تدوین: نویسنده

مدل مفهومی پژوهش (شکل۱) در راستای سوالات تبیین شده در خصوص موضوع مورد بحث در مقاله باعث ایجاد فرضیه و ساختاری می‌شود که در ادامه در بخش های مرتبط مورد تدقیق قرار می گیرد.

روش‌شناسی پژوهش

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و از نظر ماهیت، توصیفی—تحلیلی است که با بهره‌گیری از روش شبیه‌سازی انرژی ساختمان انجام شده است. رویکرد اصلی پژوهش مبتنی بر ارزیابی عملکرد انرژی ساختمان‌های آموزشی در اقلیم گرم و خشک و بررسی تأثیر راهبردهای غیرفعال شامل سیستم خنک‌سازی تبخیری و سقف‌های خنک بر کاهش مصرف انرژی و بهبود شرایط آسایش حرارتی است.

در این راستا، ابتدا مبانی نظری مرتبط با مصرف انرژی در ساختمان‌های آموزشی، راهبردهای غیرفعال کاهش بار سرمایشی و عملکرد سیستم‌های خنک‌سازی تبخیری و سقف‌های خنک از طریق مطالعات کتابخانه‌ای و بررسی منابع علمی شامل مقالات پژوهشی، کتب تخصصی و استانداردهای مرتبط مورد بررسی قرار گرفت.

نمونه مورد مطالعه در این پژوهش، ساختمان مدرسه کیانمهر واقع در شهر یزد است. انتخاب شهر یزد به دلیل قرارگیری در اقلیم گرم و خشک و برخورداری از ویژگی‌هایی نظیر تابش خورشیدی شدید، رطوبت نسبی پایین و نوسانات قابل توجه دمای شبانه‌روزی صورت گرفته است که شرایط مناسبی برای ارزیابی عملکرد سیستم‌های خنک‌سازی تبخیری و سقف‌های خنک فراهم می‌آورد. مدل هندسی ساختمان مورد بررسی بر اساس یک پلان تیپ از ساختمان‌های آموزشی شامل فضاهای آموزشی، فضاهای اداری، راهروها و حیاط مرکزی تعریف شده و مشخصات فیزیکی ساختمان از جمله ابعاد فضاها، ارتفاع طبقات، نوع مصالح پوسته ساختمان، مشخصات بام و ویژگی‌های بازشوها در مدل شبیه‌سازی لحاظ شده است.

به منظور تحلیل عملکرد انرژی ساختمان، ابتدا یک مدل پایه از ساختمان در نرم‌افزار شبیه‌سازی انرژی ایجاد شده و پارامترهای اقلیمی شهر یزد شامل دمای هوا، رطوبت نسبی، شدت تابش خورشیدی و سایر داده‌های اقلیمی در آن تعریف شده است. در این مرحله، عملکرد انرژی ساختمان در شرایط اولیه و بدون استفاده از راهبردهای مورد بررسی به عنوان سناریوی مرجع محاسبه شده است. سپس به منظور بررسی تأثیر راهبردهای بهینه‌سازی انرژی، سناریوهای مختلفی در مدل شبیه‌سازی اعمال شده است.

۱. در سناریوی نخست، اثر استفاده از سقف خنک با افزایش بازتاب‌پذیری سطح بام بر کاهش دمای سطح بام و بار حرارتی ورودی ساختمان مورد ارزیابی قرار گرفته است.
۲. در سناریوی دوم، عملکرد سیستم خنک‌سازی تبخیری در تأمین سرمایش فضاهای آموزشی و تأثیر آن بر مصرف انرژی بررسی شده است.

۳. در نهایت، در سناریوی سوم استفاده همزمان از هر دو راهکار به منظور بررسی اثر هم‌افزایی آن‌ها در کاهش بار سرمایشی و بهبود عملکرد انرژی ساختمان تحلیل شده است. به منظور ارزیابی نتایج شبیه‌سازی، شاخص‌هایی نظیر بار سرمایشی سالانه ساختمان، میزان مصرف انرژی سیستم سرمایش، دمای داخلی فضاهای آموزشی و درصد ساعات قرارگیری در محدوده آسایش حرارتی مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۴. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در سناریوهای مختلف با یکدیگر مقایسه شده و میزان تأثیر هر یک از راهبردهای مورد مطالعه در کاهش مصرف انرژی و بهبود شرایط حرارتی ساختمان تحلیل شده است. در نهایت، بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، کارآمدترین راهکار برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌های آموزشی واقع در اقلیم گرم و خشک ارائه می‌شود.

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

در سال‌های اخیر، افزایش مصرف انرژی در ساختمان‌ها و ضرورت کاهش وابستگی به سیستم‌های مکانیکی سبب شده است که راهکارهای غیرفعال به‌عنوان یکی از مهم‌ترین رویکردهای بهینه‌سازی انرژی مورد توجه پژوهشگران قرار گیرد.

در این میان، استفاده از روش‌های خنک‌سازی سازگار با شرایط اقلیمی، به‌ویژه در مناطق گرم و خشک، نقش مهمی در کاهش بار سرمایشی ساختمان‌ها ایفا می‌کند (Ameri Siahui et al., 2024). از جمله این راهکارها می‌توان به سیستم‌های خنک‌کننده تبخیری و سقف‌های خنک اشاره کرد که هر یک به‌طور مستقل در مطالعات متعددی مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

پژوهش‌های مختلف نشان داده‌اند که سیستم‌های خنک‌کننده تبخیری به دلیل مصرف انرژی پایین و سازگاری با شرایط اقلیم گرم و خشک، می‌توانند جایگزین مناسبی برای سیستم‌های سرمایشی متداول باشند (Eghtedari et al., 2021). برخی مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از خنک‌کننده‌های تبخیری در مناطق دارای رطوبت نسبی پایین قادر است دمای هوای ورودی به ساختمان را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد و در نتیجه بار سرمایشی مورد نیاز را کاهش دهد (Omidvar & Shayani, 2016).

همچنین بررسی‌ها در حوزه معماری بومی ایران نشان می‌دهد که استفاده از سازوکارهای تبخیری، مانند حوض‌ها، آب‌نماها و جریان هوا در فضاهای نیمه‌باز، از دیرباز به‌عنوان یکی از روش‌های مؤثر برای ایجاد شرایط آسایش حرارتی در فضاهای داخلی مورد استفاده قرار گرفته است (Jamshidzadeh et al., 2025). در کنار این راهکار، استفاده از سقف‌های خنک نیز به‌عنوان یکی از راهبردهای مؤثر در کاهش جذب تابش خورشیدی در ساختمان‌ها مورد توجه قرار گرفته است(Asadi et al., 2012). سقف‌های خنک معمولاً با استفاده از مصالح یا پوشش‌هایی با ضریب بازتاب بالا و ضریب گسیل حرارتی مناسب طراحی می‌شوند که می‌توانند بخش قابل توجهی از تابش خورشید را بازتاب داده و از افزایش دمای سطح بام جلوگیری کنند(Tavakoli & Emamianfar, 2017). مطالعات انجام‌شده در مناطق گرم نشان داده‌اند که استفاده از این نوع سقف‌ها می‌تواند دمای سطح بام را به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داده و در نتیجه انتقال حرارت به فضای داخلی ساختمان و بار سرمایشی سیستم‌های تهویه را کاهش دهد(Sohrabi et al., 2023).

با وجود مطالعات متعدد در زمینه هر یک از این راهکارها، بخش قابل توجهی از پژوهش‌های پیشین به بررسی جداگانه سیستم‌های خنک‌کننده تبخیری یا سقف‌های خنک پرداخته‌اند. در حالی که بررسی عملکرد ترکیبی این دو راهکار می‌تواند درک دقیق‌تری از ظرفیت‌های آن‌ها در کاهش مصرف انرژی ساختمان‌ها ارائه دهد. به‌ویژه در ساختمان‌های آموزشی که دارای الگوی بهره‌برداری خاص و تراکم بالای کاربران هستند، تحلیل اثرات هم‌زمان این راهکارها می‌تواند به ارائه راهبردهای طراحی مؤثرتر منجر شود(Azemati, 2025).

از این‌رو، پژوهش حاضر با تمرکز بر یکپارچه‌سازی سیستم خنک‌کننده تبخیری و سقف خنک در یک ساختمان آموزشی واقع در اقلیم گرم و خشک، تلاش می‌کند خلأ موجود در مطالعات پیشین را مورد بررسی قرار دهد. در این راستا، مدرسه کیانمهر شهر یزد به‌عنوان نمونه موردی انتخاب شده و عملکرد انرژی ساختمان در سناریوهای مختلف طراحی مورد تحلیل قرار می‌گیرد تا تأثیر هم‌افزایی این دو راهکار غیرفعال بر کاهش مصرف انرژی و بهبود شرایط حرارتی فضاهای آموزشی ارزیابی شود.

جدول ۱. خلاصه پیشینه پژوهش‌های مرتبط با راهکارهای سرمایش غیرفعال و بهینه‌سازی انرژی. تدوین: نویسنده.

ردیف	نویسنده و سال	موضوع تمرکز پژوهش	یافته‌های کلیدی و شاخص‌های فنی	نقش در پژوهش حاضر
۱	عامری سیاهویی و همکاران (۲۰۲۴)	انرژی خورشیدی و راهکارهای غیرفعال در اقلیم گرم و خشک	تأکید بر ضرورت کاهش وابستگی به سیستم‌های مکانیکی و استفاده از توان اقلیمی	تبیین ضرورت و مبانی اولیه ضرورت طراحی اقلیمی
۲	اقتداری و همکاران (۲۰۲۱)	سیستم‌های سرمایش ترکیبی و آسایش حرارتی	اثبات کارایی سیستم‌های تبخیری در کاهش مصرف انرژی و سازگاری با خشکی هوا	تبیین کارایی فنی سیستم‌های تبخیری
۳	امیدوار و شایانی (۲۰۱۶)	مرور سیستم‌های سرمایش تبخیری مستقیم	کاهش قابل توجه دمای هوای ورودی در مناطق با رطوبت نسبی پایین	مرجع فنی برای پتانسیل کاهش بار سرمایشی
۴	جمشیدزاده و همکاران (۲۰۲۵)	معماری بومی و راهکارهای صفر انرژی	اثربخشی عناصر سنتی (حوض و جریان هوا) در ایجاد ریزاقلیم‌های خنک	پیوند میان راهکارهای نوین و اصالت معماری ایرانی
۵	اسدی و همکاران (۲۰۱۲)	بهینه‌سازی راهبردهای بهسازی پوسته	نقش کلیدی اصلاح مشخصات حرارتی بام در کاهش بار حرارتی کل ساختمان	مبنای نظری برای انتخاب سناریوهای بهسازی
۶	توکلی و امامیان‌فر (۲۰۱۷)	الگوهای پوشش سقف در اقلیم‌های گرم	تأثیر ضریب بازتاب (Albedo) و گسیل حرارتی در کنترل دمای سطحی بام	مبنای انتخاب مصالح برای سناریوی «سقف خنک»
۷	سهرابی و همکاران (۲۰۲۳)	عملکرد حرارتی پوسته در اقلیم یزد	کاهش انتقال حرارت به فضاهای داخلی از طریق مدیریت دمای سطوح خارجی	صحه‌گذاری بر اهمیت نمونه موردی (یزد)
۸	عظمتی (۲۰۲۵)	بهینه‌سازی انرژی در ساختمان‌های آموزشی	تأثیر الگوی بهره‌برداری و تراکم کاربران بر کارایی راهکارهای غیرفعال	تخصصی کردن بحث برای کاربری «مدرسه»

با توجه به افزایش فزاینده مصرف انرژی در بخش ساختمان و ضرورت حرکت به‌سوی طراحی‌های سازگار با اقلیم، بررسی راهبردهای غیرفعال در بهینه‌سازی عملکرد حرارتی ساختمان‌ها به یکی از محورهای مهم پژوهش‌های معاصر تبدیل شده است. در این میان، ساختمان‌های آموزشی به دلیل ساعات بهره‌برداری طولانی، تراکم بالای کاربران و حساسیت ویژه به شرایط آسایش حرارتی، نیازمند راهکارهایی هستند که بتوانند ضمن کاهش وابستگی به سیستم‌های مکانیکی، کیفیت محیط داخلی و کارایی انرژی را نیز ارتقا دهند. از این‌رو، شناخت مبانی نظری مرتبط با اقلیم گرم و خشک، خنک‌سازی تبخیری، سقف‌های خنک و نحوه اثرگذاری آن‌ها بر بار حرارتی و مصرف انرژی، بستر لازم را برای تحلیل علمی و انتخاب سناریوی بهینه در این پژوهش فراهم می‌کند.

۱. مصرف انرژی در ساختمان‌های آموزشی در اقلیم گرم و خشک

بخش ساختمان یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی در جهان محسوب می‌شود و سهم قابل توجهی از مصرف انرژی نهایی را به خود اختصاص می‌دهد. در بسیاری از کشورها، ساختمان‌ها حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد از کل انرژی مصرفی را مصرف می‌کنند که بخش عمده‌ای از آن مربوط به تأمین شرایط آسایش حرارتی از طریق سیستم‌های گرمایش، سرمایش و تهویه است (Azemati & Jamshidzadeh, 2024). در این میان، ساختمان‌های آموزشی به دلیل الگوی بهره‌برداری خاص، تراکم بالای کاربران و ساعات استفاده مشخص، از جمله فضاهایی هستند که مدیریت مصرف انرژی در آن‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. ساختمان‌های آموزشی، به‌ویژه مدارس، دارای ویژگی‌هایی هستند که آن‌ها را از سایر کاربری‌های ساختمانی متمایز می‌کند. حضور هم‌زمان تعداد زیادی دانش‌آموز در کلاس‌ها، فعالیت‌های آموزشی مداوم و نیاز به حفظ شرایط مناسب حرارتی و کیفی هوا از جمله عواملی هستند که می‌توانند موجب افزایش مصرف انرژی در این ساختمان‌ها شوند (Azemati, 2025). علاوه بر این، در بسیاری از مدارس موجود، طراحی معماری و سیستم‌های تأسیساتی بدون توجه کافی به شرایط اقلیمی و اصول بهینه‌سازی انرژی انجام شده است که این امر منجر به افزایش بار حرارتی ساختمان و وابستگی بیشتر به سیستم‌های مکانیکی سرمایش و گرمایش می‌شود. در مناطق گرم و خشک، مسئله مصرف انرژی در ساختمان‌های آموزشی از اهمیت بیشتری برخوردار است. این اقلیم‌ها که بخش وسیعی از فلات مرکزی ایران را دربر می‌گیرند، با ویژگی‌هایی همچون تابش شدید خورشید، دامنه بالای نوسانات دمایی شبانه‌روزی، رطوبت نسبی پایین و تابستان‌های طولانی و گرم شناخته می‌شوند (Foruzanmehr, 2012). در چنین شرایطی، ساختمان‌ها در معرض دریافت قابل توجهی از

انرژی خورشیدی قرار دارند که می‌تواند موجب افزایش دمای سطوح خارجی، به‌ویژه بام و دیوارها، و در نتیجه افزایش انتقال حرارت به فضای داخلی شود. این مسئله به‌طور مستقیم سبب افزایش بار سرمایشی و مصرف انرژی برای تأمین آسایش حرارتی در فضاهای داخلی می‌گردد. از سوی دیگر، بسیاری از ساختمان‌های آموزشی موجود در مناطق گرم و خشک دارای فرم‌های ساده، سطوح بام وسیع و مصالحی با ظرفیت جذب حرارتی بالا هستند که این ویژگی‌ها می‌تواند موجب تشدید جذب تابش خورشیدی و افزایش دمای داخلی ساختمان شود.

جدول ۲. ویژگی‌های اقلیم گرم و خشک و تأثیر آن بر مصرف انرژی ساختمان‌های آموزشی. تدوین: نویسنده.

ویژگی اقلیمی	شرح ویژگی	تأثیر بر عملکرد حرارتی ساختمان	پیامد در مصرف انرژی
تابش شدید خورشید	شدت بالای تابش خورشیدی در طول سال به‌ویژه در فصل تابستان	افزایش دمای سطوح خارجی ساختمان به‌ویژه بام و دیوارها	افزایش بار سرمایشی و مصرف انرژی
دمای بالای روز	دمای بالای هوا در ساعات روز در فصل گرم	انتقال حرارت بیشتر به فضای داخلی ساختمان	افزایش نیاز به سیستم‌های سرمایشی
دامنه نوسان دمایی بالا	اختلاف قابل توجه دمای روز و شب	امکان ذخیره و آزادسازی حرارت در مصالح ساختمانی	در صورت طراحی مناسب می‌تواند به کاهش مصرف انرژی کمک کند
رطوبت نسبی پایین	میزان رطوبت پایین در هوا	فراهم شدن شرایط مناسب برای استفاده از خنک‌سازی تبخیری	افزایش کارایی سیستم‌های تبخیری
آسمان صاف و تابش مستقیم	تعداد زیاد روزهای آفتابی در طول سال	افزایش دریافت انرژی خورشیدی توسط ساختمان	افزایش بار حرارتی ساختمان

در چنین شرایطی، استفاده گسترده از سیستم‌های سرمایشی مکانیکی به‌عنوان راهکار اصلی تأمین آسایش حرارتی، مصرف انرژی و هزینه‌های بهره‌برداری ساختمان را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد (Rouhi & Mahdinejad, 2025). با توجه به این چالش‌ها، توجه به راهکارهای طراحی اقلیمی و استفاده از سیستم‌های غیرفعال می‌تواند نقش مهمی در کاهش بار سرمایشی و بهبود عملکرد انرژی ساختمان‌های آموزشی در مناطق گرم و خشک ایفا کند. این راهکارها با بهره‌گیری از ویژگی‌های اقلیمی و استفاده از اصول طراحی پایدار، امکان کاهش وابستگی به سیستم‌های مکانیکی و در نتیجه کاهش مصرف انرژی را فراهم می‌کنند. از این رو، بررسی و به‌کارگیری راهبردهای مناسب برای کنترل انتقال حرارت، کاهش جذب تابش خورشیدی و بهبود شرایط حرارتی در ساختمان‌های آموزشی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

۲. راهبردهای غیرفعال کاهش بار سرمایشی در اقلیم گرم و خشک

در اقلیم‌های گرم و خشک، کاهش بار سرمایشی ساختمان یکی از مهم‌ترین اهداف طراحی اقلیمی محسوب می‌شود. در این مناطق، شدت بالای تابش خورشیدی، دمای بالای هوای روز، و طولانی بودن فصل گرما موجب افزایش قابل توجه دریافت حرارت توسط پوسته ساختمان می‌شود. در چنین شرایطی، استفاده از سیستم‌های فعال سرمایشی به‌تنهایی نه‌تنها موجب افزایش مصرف انرژی می‌گردد، بلکه وابستگی ساختمان به تجهیزات مکانیکی را نیز تشدید می‌کند (Çengel et al., 2015). از این‌رو، راهبردهای غیرفعال به‌عنوان یکی از مؤثرترین رویکردهای کاهش مصرف انرژی در این اقلیم‌ها مطرح می‌شوند. راهبردهای غیرفعال به مجموعه اقداماتی اطلاق می‌شود که بدون اتکا به تجهیزات مکانیکی و با بهره‌گیری از ویژگی‌های اقلیمی، فرم ساختمان، مصالح و سازماندهی فضایی، به بهبود شرایط آسایش حرارتی کمک می‌کنند. هدف اصلی این راهبردها، کنترل دریافت حرارت ناخواسته، کاهش انتقال حرارت به فضای داخلی و افزایش ظرفیت دفع حرارت در دوره‌های خنک‌تر شبانه است (Pham Thi Lan Huong et al., 2023). یکی از مهم‌ترین اصول در کاهش بار سرمایشی، کنترل تابش خورشیدی است. در اقلیم گرم و خشک، بیشترین سهم بار حرارتی ناشی از تابش مستقیم خورشید بر سطوح افقی، به‌ویژه بام، و سطوح عمودی جنوبی و غربی است. استفاده از سایه‌بان‌ها، طراحی عمق مناسب بازشوها، جهت‌گیری صحیح ساختمان و به‌کارگیری سطوح با ضریب بازتاب بالا از جمله راهکارهایی هستند که می‌توانند میزان جذب تابش را کاهش دهند. به‌ویژه بام ساختمان، به دلیل بیشترین دریافت تابش مستقیم، نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش یا کاهش بار حرارتی دارد (Ebrahimi & Hosseini, 2022).

راهبرد مهم دیگر، بهینه‌سازی جرم حرارتی ساختمان است. در اقلیم‌های گرم و خشک که دارای نوسان دمایی شبانه‌روزی بالا هستند، استفاده از مصالح با ظرفیت حرارتی مناسب می‌تواند به جذب حرارت در طول روز و آزادسازی آن در شب کمک کند. این ویژگی در صورت طراحی صحیح تهویه شبانه، می‌تواند موجب کاهش دمای داخلی و کاهش نیاز به سرمایش مکانیکی شود. تهویه طبیعی و خنک‌سازی تبخیری غیرمکانیکی نیز از دیگر راهبردهای مؤثر در این اقلیم محسوب می‌شوند (Sadeghi & Davoudabadi Farahani, 2019). به دلیل رطوبت نسبی پایین هوا، امکان بهره‌گیری از پدیده تبخیر برای کاهش دمای هوا فراهم است. جریان هوای طبیعی، حیاط‌های مرکزی، حوض‌ها و عناصر آبی در معماری سنتی ایران نمونه‌هایی از بهره‌گیری از این ظرفیت اقلیمی هستند که نشان می‌دهند چگونه می‌توان بدون مصرف انرژی فسیلی، شرایط آسایش نسبی را فراهم کرد. علاوه بر این، کاهش ضریب جذب حرارتی پوسته ساختمان از طریق انتخاب رنگ‌ها و مصالح مناسب، نقش مهمی در کنترل دمای سطحی و کاهش انتقال حرارت ایفا می‌کند. استفاده از پوشش‌های بازتابنده و سطوح روشن می‌تواند دمای سطح بام را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد و در نتیجه از افزایش دمای هوای داخلی جلوگیری کند (Pradono, 2019). در مجموع، راهبردهای غیرفعال در اقلیم گرم و خشک را می‌توان در سه محور اصلی دسته‌بندی کرد:

۱. کاهش دریافت حرارت خورشیدی

۲. کنترل و تأخیر در انتقال حرارت به داخل

۳. افزایش دفع حرارت از ساختمان (Sommese et al., 2022).

ترکیب هوشمندانه این راهکارها می‌تواند وابستگی ساختمان‌های آموزشی به سیستم‌های سرمایشی مکانیکی را کاهش داده و مصرف انرژی را به‌طور معناداری بهینه کند. در این میان، استفاده از خنک‌سازی تبخیری و به‌کارگیری سقف‌های خنک به‌عنوان دو راهبرد مکمل، ظرفیت قابل توجهی برای کاهش بار سرمایشی در ساختمان‌های واقع در اقلیم گرم و خشک دارند که در بخش بعدی به‌صورت تخصصی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

جدول ۳. راهکارهای ارایه شده و تأثیر آن بر مصرف انرژی ساختمان‌های آموزشی. تدوین: نویسنده

دسته راهبرد	راهکار طراحی	توضیح	تأثیر بر مصرف انرژی
کنترل دریافت تابش خورشیدی	جهت‌گیری مناسب ساختمان	استقرار ساختمان در راستای مناسب برای کاهش تابش مستقیم به جداره‌ها	کاهش بار حرارتی ورودی
	سایه‌اندازی و سایه‌بان‌ها	استفاده از سایبان، پیش‌آمدگی‌ها و عناصر سایه‌انداز	کاهش گرم شدن فضاهای داخلی
کنترل دریافت تابش خورشیدی	استفاده از سقف‌های خنک	به‌کارگیری پوشش‌های با ضریب بازتاب بالا در بام	کاهش دمای سطح بام و انتقال حرارت
	افزایش جرم حرارتی مصالح	استفاده از مصالح با ظرفیت حرارتی بالا برای جذب حرارت روز و آزادسازی شبانه	کاهش نوسانات دمای داخلی
کنترل انتقال حرارت	عایق‌کاری حرارتی پوسته	استفاده از عایق در بام و دیوارها برای کاهش انتقال حرارت	کاهش نیاز به سیستم سرمایشی
افزایش دفع حرارت	تهویه طبیعی	ایجاد جریان هوا از طریق بازشوها و سازماندهی فضایی مناسب	خروج هوای گرم از فضا
	خنک‌سازی تبخیری	استفاده از تبخیر آب برای کاهش دمای هوا در فضاهای داخلی یا نیمه‌باز	کاهش دمای هوا با مصرف انرژی پایین

۳. سیستم‌های خنک‌سازی تبخیری و سقف‌های خنک در بهینه‌سازی انرژی ساختمان

یکی از مؤثرترین رویکردهای کاهش مصرف انرژی در اقلیم‌های گرم و خشک، بهره‌گیری از سیستم‌هایی است که بدون نیاز به مصرف انرژی زیاد، توانایی کاهش دما و تعدیل شرایط حرارتی فضاهای داخلی را دارند. در این میان، خنک‌سازی تبخیری و سقف‌های خنک[1] به‌عنوان دو فناوری غیرفعال—کم‌مصرف، نقش مهمی در بهینه‌سازی عملکرد انرژی ساختمان‌ها ایفا می‌کنند (Zalba et al., 2003). کارایی این دو سیستم به‌ویژه در اقلیمی مانند یزد که دارای تابستان‌های طولانی، تابش شدید و رطوبت نسبی پایین است، بسیار قابل توجه است. خنک‌سازی تبخیری

بر مبنای یک فرآیند طبیعی عمل می‌کند: تبخیر آب باعث جذب گرما از هوای اطراف و در نتیجه کاهش دما می‌شود. در مناطق گرم و خشک، به دلیل پایین بودن رطوبت نسبی، ظرفیت تبخیر به‌مراتب بیشتر بوده و این سیستم می‌تواند با راندمان بالا عمل کند. عملکرد کلی این سیستم بر اساس سه مکانیسم اصلی است:

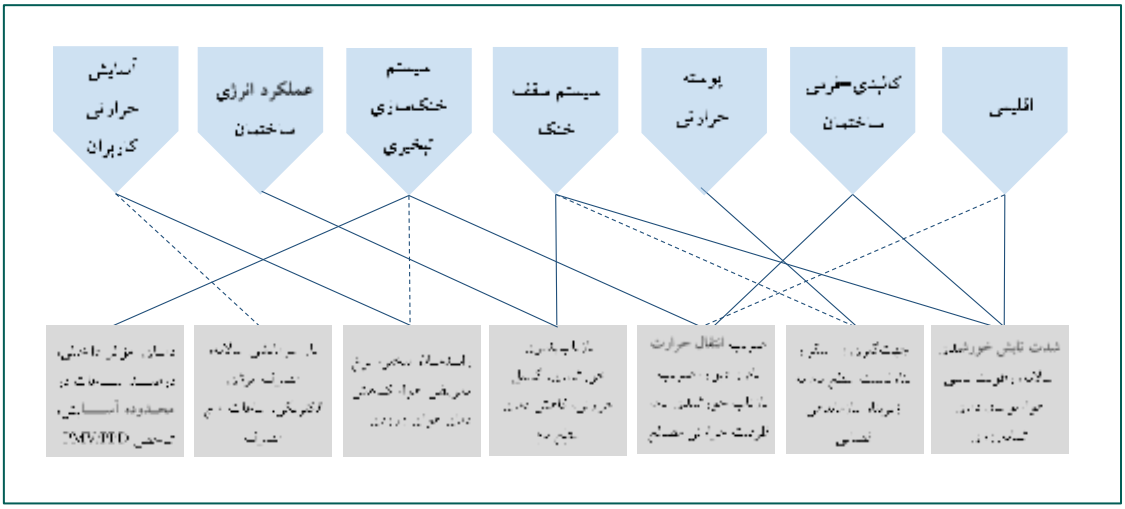
۱. ورود هوا از میان یک واسط مرطوب (پد سلولزی یا الیاف طبیعی).

۲. تبخیر بخشی از آب و جذب گرمای محسوس هوا.

۳. کاهش دمای هوای ورودی و افزایش رطوبت نسبی محیط (Zhang et al., 2025).

به‌طور معمول، سیستم‌های تبخیری در مقایسه با سیستم‌های سرمایش تراکمی، برق بسیار کمتری مصرف می‌کنند و از آن‌جا که از هیچ سیکل تبرید مکانیکی استفاده نمی‌شود، انتشار کربن و بار شبکه برق را کاهش می‌دهند. در معماری سنتی ایران، نمونه‌های اولیه این سیستم در قالب بادگیرها، حوض‌ها، آب‌نماها و سطوح خیس داخلی مشاهده می‌شود که همگی بر پایه همین اصل فیزیکی عمل می‌کرده‌اند. در ساختمان‌های آموزشی، استفاده از خنک‌سازی تبخیری می‌تواند دمای هوای ورودی را بین ۸ تا ۱۲ درجه سانتی‌گراد کاهش دهد و شرایط آسایش حرارتی نسبی را حتی در زمان اوج گرما فراهم کند. از سوی دیگر، هزینه اولیه و پیچیدگی اجرایی آن کم است و در مدل‌های شبیه‌سازی انرژی نیز به‌خوبی قابل ارزیابی است (Watchman et al., 2021).

تحلیل مبانی نظری این پژوهش نشان می‌دهد که مسئله مصرف انرژی در ساختمان‌های آموزشی واقع در اقلیم گرم و خشک، نتیجه مجموعه‌ای از عوامل اقلیمی، کالبدی و رفتاری است که در تعامل با یکدیگر، بار سرمایشی را به‌طور معناداری افزایش می‌دهند. اقلیم گرم و خشک یزد با تابش شدید خورشیدی، رطوبت نسبی پایین و نوسانات حرارتی زیاد، شرایطی ایجاد می‌کند که در آن پوسته ساختمان (به‌ویژه بام) به‌عنوان اصلی‌ترین منبع دریافت گرما شناخته می‌شود؛ در حالی‌که الگوی کاربری مدارس با ساعات فعالیت ثابت و تراکم جمعیت بالا، مصرف انرژی را تشدید می‌کند. بررسی راهبردهای غیرفعال کاهش بار سرمایشی نشان می‌دهد که سه محور اصلی—کاهش دریافت حرارت، کنترل انتقال حرارت و افزایش دفع حرارت—چارچوب مفهومی مشترک تمام مداخلات غیرفعال هستند. در این میان، دو راهکار «خنک‌سازی تبخیری» و «سقف‌های خنک» نه‌تنها از منظر عملکردی به‌خوبی با شرایط اقلیمی یزد هم‌خوانی دارند، بلکه به دلیل سادگی ساخت، هزینه پایین و امکان پیاده‌سازی در ساختمان‌های آموزشی، ظرفیت ویژه‌ای برای کاهش مصرف انرژی ارائه می‌کنند. داده‌های نظری مرتبط با خنک‌سازی تبخیری نشان می‌دهد که این سیستم در اقلیم‌هایی با رطوبت نسبی پایین، دارای بیشترین بازده است و می‌تواند دمای هوا را به شکل محسوس کاهش



شکل ۲. مدل نظری بهینه‌سازی انرژی ساختمان آموزشی در اقلیم. تدوین: نویسنده.

دهد. این ویژگی در ساختمان‌های آموزشی که با جریان پیوسته هوا و نیاز به تأمین آسایش حرارتی سریع‌تر مواجه هستند، اهمیت بالایی دارد. در مقابل، سقف‌های خنک با کاهش دمای سطح بام، بار حرارتی ورودی به ساختمان را محدود می‌کنند و موجب کاهش تقاضای سرمایشی در ساعات اوج حرارت می‌شوند.

تحلیل ترکیب این دو فناوری نشان می‌دهد که رابطه‌ای هم‌افزا میان آن‌ها وجود دارد: سقف خنک با کاهش دمای بام و جلوگیری از گرم‌شدن بیش از حد لایه‌های فوقانی ساختمان، شرایط اولیه مطلوب‌تری برای اثربخشی سیستم تبخیری ایجاد می‌کند.

از سوی دیگر، کاهش دمای داخلی ناشی از خنک‌سازی تبخیری، بار گرمایی مؤثر بر سقف را نیز کم می‌کند. این چرخه متقابل، منجر به یک چرخه ترمودینامیکی پایدار می‌شود که هم مصرف انرژی را کاهش می‌دهد و هم کیفیت آسایش حرارتی را بهبود می‌بخشد. جمع‌بندی مبانی نظری (شکل ۲) همچنین نشان می‌دهد که اگرچه هر یک از این راهکارها به‌تنهایی اثرگذار هستند، اما شکاف پژوهشی مهمی در بررسی عملکرد یکپارچه آن‌ها وجود دارد—به‌ویژه در ساختمان‌های آموزشی اقلیم گرم و خشک ایران که الگوهای ساخت مشابه و محدودیت‌های انرژی مشخصی دارند.

این خلأ نظری، ضرورت انجام پژوهش حاضر را توجیه می‌کند و نشان می‌دهد که مدل‌سازی انرژی در مدرسه کیانمهر یزد نه‌تنها از لحاظ علمی قابل اتکا است، بلکه می‌تواند نتایج کاربردی ارزشمندی برای طراحی پایدار مدارس در این اقلیم ارائه کند. به‌طور کلی، تحلیل مبانی نظری تأکید می‌کند که تلفیق دو رویکرد «کاهش حرارت ورودی از بام» و «تولید سرمایش کم‌مصرف مبتنی بر تبخیر»، چارچوبی مناسب و کارآمد برای دستیابی به مصرف انرژی بهینه در مدارس اقلیم گرم و خشک فراهم می‌آورد. این جمع‌بندی مبنای تدوین سناریوهای شبیه‌سازی و انتخاب شاخص‌های ارزیابی انرژی در ادامه پژوهش خواهد بود.

یافته‌های پژوهش

همانطور که گفته شد شهر یزد به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شهرهای واقع در اقلیم گرم و خشک ایران شناخته می‌شود و به دلیل شرایط خاص اقلیمی خود، همواره بستری مناسب برای بررسی راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها به شمار می‌آید. این شهر در مرکز فلات ایران و در استان یزد واقع شده و به دلیل قرارگیری در کمربند خشک جهانی، دارای تابستان‌های بسیار گرم و خشک، زمستان‌های نسبتاً سرد و اختلاف دمای قابل توجه بین شب و روز است. چنین شرایطی سبب می‌شود که ساختمان‌ها در بخش قابل توجهی از سال با بار سرمایشی قابل ملاحظه‌ای مواجه باشند.

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های اقلیمی یزد، شدت بالای تابش خورشیدی در طول سال است که به‌ویژه در فصل تابستان باعث افزایش دمای سطح بام و پوسته ساختمان می‌شود. این مسئله نقش بام را به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مسیرهای انتقال حرارت به داخل ساختمان برجسته می‌کند. در کنار این عامل، رطوبت نسبی پایین هوا در بیشتر ایام سال از ویژگی‌های شاخص اقلیم یزد محسوب می‌شود. این شرایط اقلیمی سبب می‌شود سیستم‌های خنک‌سازی تبخیری در مقایسه با سیستم‌های متداول سرمایشی عملکرد مطلوب‌تری داشته باشند و بتوانند با مصرف انرژی کمتر، شرایط آسایش حرارتی را فراهم کنند.

از دیگر ویژگی‌های اقلیم یزد می‌توان به نوسانات قابل توجه دمای شبانه‌روزی اشاره کرد؛ به‌گونه‌ای که اختلاف دمای روز و شب در بسیاری از روزهای سال قابل توجه است. این ویژگی در معماری سنتی یزد نیز مورد توجه قرار گرفته و استفاده از عناصر اقلیمی نظیر بادگیرها، حیاط‌های مرکزی و مصالح با ظرفیت حرارتی بالا در راستای تعدیل شرایط حرارتی محیط شکل گرفته است.

با این حال، در بسیاری از ساختمان‌های آموزشی معاصر، توجه کافی به این ویژگی‌های اقلیمی نشده و در نتیجه مصرف انرژی برای تأمین شرایط آسایش حرارتی افزایش یافته است. با توجه به ویژگی‌های اقلیمی ذکر شده، شهر یزد بستر مناسبی برای بررسی کارایی راهبردهای غیرفعال کاهش بار سرمایشی به‌ویژه سیستم‌های خنک‌سازی تبخیری و سقف‌های خنک محسوب می‌شود.

۱. یکپارچه‌سازی یافته‌های کمی و کیفی

در این پژوهش، عملکرد انرژی یک ساختمان آموزشی در این اقلیم مورد ارزیابی قرار گرفته تا میزان تأثیر این راهکارها در کاهش مصرف انرژی و بهبود شرایط حرارتی فضاهای آموزشی مشخص شود.

جدول ۴. مشخصات اقلیمی شهر یزد. تدوین: نویسنده

شاخص اقلیمی	مقدار تقریبی	توضیح
میانگین دمای سالانه	حدود ۱۹–۲۰ درجه سانتی‌گراد	نشان‌دهنده اقلیم گرم و خشک
میانگین حداکثر دمای تابستان	۳۸–۴۰ درجه سانتی‌گراد	افزایش قابل توجه بار سرمایشی
میانگین حداقل دمای زمستان	حدود ۰ تا ۲ درجه سانتی‌گراد	نشان‌دهنده نوسان دمایی بالا
میانگین رطوبت نسبی سالانه	حدود ۳۰–۳۵ درصد	شرایط مناسب برای خنک‌سازی تبخیری
میانگین بارش سالانه	حدود ۶۰ میلی‌متر	اقلیم بسیار خشک
شدت تابش خورشیدی	حدود ۵۵–۶ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در روز	پتانسیل بالای دریافت انرژی خورشیدی
اختلاف دمای شب و روز	حدود ۱۵–۲۰ درجه سانتی‌گراد	نوسانات حرارتی قابل توجه

به منظور ارزیابی عملکرد انرژی ساختمان آموزشی مورد مطالعه، ابتدا یک مدل پایه از ساختمان در شرایط متعارف طراحی و شبیه‌سازی شد. این مدل به‌عنوان وضعیت مرجع در نظر گرفته شده و نتایج حاصل از آن مبنای مقایسه با سایر سناریوهای بهینه‌سازی انرژی قرار گرفت.

در این مدل، مشخصات کالبدی ساختمان شامل هندسه فضاها، ابعاد کلاس‌های آموزشی، راهروها، فضاهای اداری و حیاط مرکزی بر اساس پلان تیپ ساختمان‌های آموزشی در نظر گرفته شد. همچنین ویژگی‌های پوسته ساختمان شامل دیوارهای خارجی، سقف، پنجره‌ها و مصالح متداول مورد استفاده در ساختمان‌های آموزشی مشابه در اقلیم یزد در مدل شبیه‌سازی لحاظ شد.

در سناریوی پایه، بام ساختمان به‌صورت متداول و بدون استفاده از فناوری سقف خنک در نظر گرفته شد و سیستم سرمایش ساختمان نیز بر اساس شرایط رایج در بسیاری از مدارس مناطق گرم و خشک مدل‌سازی گردید. داده‌های اقلیمی شهر یزد شامل دمای هوا، رطوبت نسبی، شدت تابش خورشیدی و سایر پارامترهای اقلیمی در مدل وارد شده و عملکرد انرژی ساختمان در طول یک سال مورد تحلیل قرار گرفت.

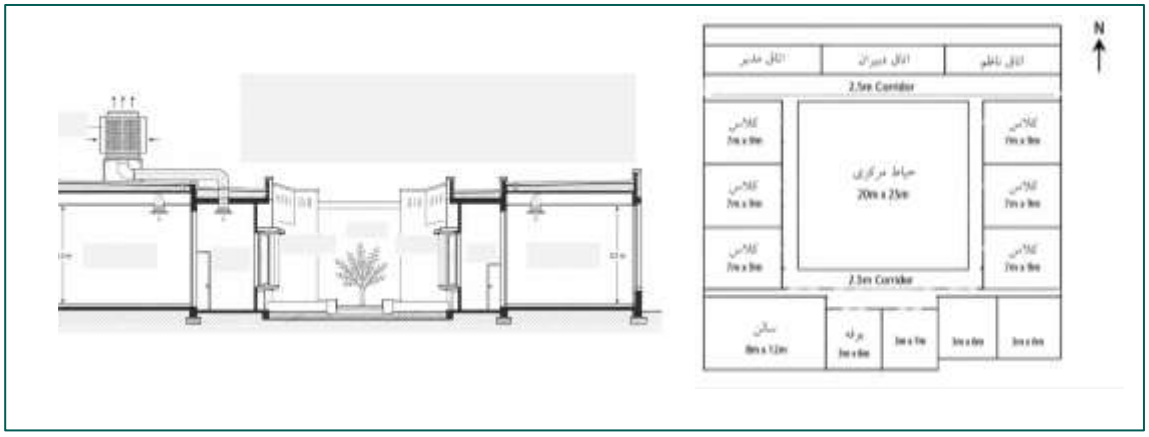
نتایج شبیه‌سازی مدل پایه نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از مصرف انرژی ساختمان به تأمین بار سرمایشی در ماه‌های گرم سال اختصاص دارد. به دلیل شدت بالای تابش خورشیدی و دمای بالای هوا در فصل تابستان، دمای سطح بام ساختمان افزایش یافته و در نتیجه میزان انتقال حرارت از طریق بام به فضای داخلی افزایش می‌یابد. این مسئله موجب افزایش بار سرمایشی سیستم تهویه و در نهایت افزایش مصرف انرژی ساختمان می‌شود.

همچنین بررسی شرایط حرارتی فضاهای داخلی نشان می‌دهد که در ساعات اوج گرما، دمای داخلی کلاس‌های آموزشی در صورت عدم استفاده از راهبردهای مؤثر کاهش بار سرمایشی می‌تواند از محدوده آسایش حرارتی فراتر رود. این موضوع به‌ویژه در فضاهای آموزشی که تراکم حضور دانش‌آموزان بالا است، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند و می‌تواند بر کیفیت محیط آموزشی و شرایط آسایش حرارتی کاربران تأثیرگذار باشد.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از مدل پایه، می‌توان نتیجه گرفت که ساختمان‌های آموزشی در اقلیم گرم و خشک با چالش قابل توجهی در زمینه کنترل بار سرمایشی و مصرف انرژی مواجه هستند. از این‌رو استفاده از راهبردهای غیرفعال کاهش بار حرارتی از جمله سقف‌های خنک و سیستم‌های خنک‌سازی تبخیری می‌تواند نقش مهمی در بهبود عملکرد انرژی ساختمان ایفا کند. در ادامه پژوهش، تأثیر هر یک از این راهکارها به‌صورت جداگانه و سپس به‌صورت ترکیبی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است.

جدول ۵. مشخصات مدل پایه ساختمان مورد مطالعه. تدوین: نویسنده

پارامتر	مقدار در مدل پایه	توضیح
نوع ساختمان	آموزشی (مدرسه)	شامل کلاس‌ها، فضاهای اداری و راهرو
موقعیت جغرافیایی	یزد، ایران	اقلیم گرم و خشک
تعداد طبقات	۱ طبقه	الگوی رایج مدارس
ارتفاع طبقه	حدود ۳.۵ متر	ارتفاع معمول کلاس‌ها
مساحت تقریبی ساختمان	حدود ۹۰۰ مترمربع	بر اساس پلان تیپ
ابعاد کلاس‌ها	۷ × ۹ متر	استاندارد فضاهای آموزشی
نوع بام	بام تخت معمولی	بدون فناوری سقف خنک
ضریب بازتاب بام (Albedo)	حدود ۰.۳۰	بام معمولی
نوع پنجره‌ها	پنجره دو جداره ساده	متداول بوده؛ در مدارس جدید
نسبت سطح پنجره به دیوار	حدود ۳۰٪	برای تأمین نور طبیعی
سیستم سرمایش	سیستم سرمایش متداول	وضعیت مرجع برای مقایسه
داده‌های اقلیمی	فایل اقلیمی شهر یزد	شامل دما، رطوبت و تابش خورشیدی



شکل ۳. مقطع ساختمان مورد مطالعه. تدوین: نویسنده

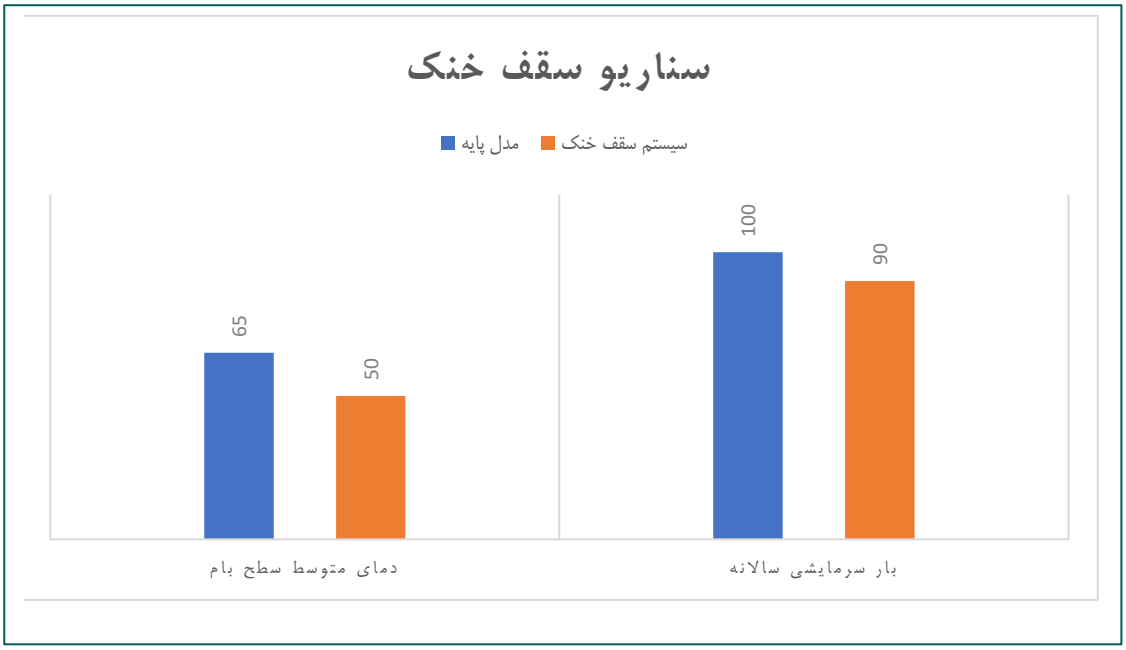
۱.۱. سناریوی اول: تأثیر استفاده از سقف خنک بر عملکرد انرژی ساختمان

در گام بعدی پژوهش، به منظور بررسی تأثیر استفاده از راهبردهای غیرفعال کاهش بار حرارتی، سناریوی استفاده از سقف خنک در ساختمان مورد مطالعه شبیه‌سازی شد. در این سناریو، مشخصات بام ساختمان نسبت به مدل پایه تغییر داده شد و یک لایه پوشش با ضریب بازتاب خورشیدی بالا بر سطح بام در نظر گرفته شد. هدف از این تغییر، کاهش میزان جذب تابش خورشیدی توسط بام و در نتیجه کاهش انتقال حرارت به فضای داخلی ساختمان بود. در مدل شبیه‌سازی، ضریب بازتاب سطح بام از مقدار متداول بام‌های معمولی به مقدار بالاتری افزایش داده شد تا عملکرد یک سقف خنک شبیه‌سازی گردد. این تغییر موجب کاهش دمای سطح بام در ساعات اوج تابش خورشیدی شد و در نتیجه میزان شار حرارتی منتقل شده از طریق سقف به فضاهای داخلی کاهش یافت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که استفاده از سقف خنک می‌تواند به طور قابل توجهی دمای سطح بام را در ساعات گرم روز کاهش دهد. کاهش دمای سطح بام موجب کاهش انتقال حرارت به داخل کلاس‌های آموزشی شده و در نتیجه بار سرمایشی مورد نیاز برای حفظ شرایط آسایش حرارتی در فضاهای داخلی کاهش می‌یابد. همچنین بررسی نتایج مصرف انرژی سالانه ساختمان نشان می‌دهد که استفاده از سقف خنک باعث کاهش مصرف انرژی سیستم سرمایش در ماه‌های گرم سال می‌شود. این موضوع در اقلیم گرم و خشک یزد که شدت تابش خورشیدی بالا و دوره‌های گرمایی طولانی است، اهمیت

بیشتری پیدا می‌کند. کاهش بار سرمایشی علاوه بر کاهش مصرف انرژی، می‌تواند موجب افزایش کارایی سیستم‌های تهویه و بهبود شرایط آسایش حرارتی در فضاهای آموزشی گردد.

جدول ۶. مشخصات بام در نظر گرفته شده براساس دو مدل پایه و سقف خنک. تدوین: نویسنده

سناریو	دمای متوسط سطح بام	بار سرمایشی سالانه	تغییر نسبت به مدل پایه
مدل پایه	65°C	100%	—
سقف خنک	45–50°C	85–90%	کاهش حدود ۱۰–۱۵٪



نمودار ۱. مقایسه نتایج سناریو در سقف خنک. تدوین: نویسنده

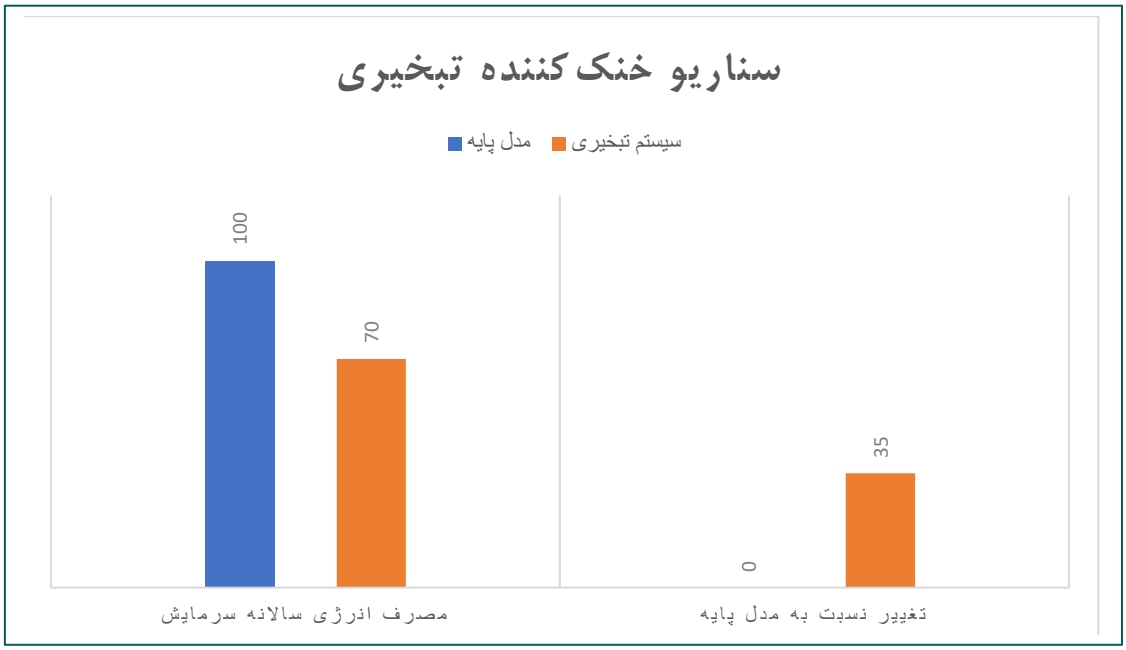
۱.۲. سناریوی دوم: تأثیر استفاده از سیستم خنک‌کننده تبخیری بر عملکرد انرژی ساختمان

در این مرحله از پژوهش، به منظور بررسی عملکرد سیستم‌های سرمایشی سازگار با اقلیم گرم و خشک یزد، سناریوی استفاده از سیستم خنک‌کننده تبخیری برای ساختمان مورد مطالعه شبیه‌سازی شد. در این سناریو، سیستم سرمایش متداول مدل پایه با یک سیستم خنک‌کننده تبخیری مرکزی جایگزین گردید. عملکرد سیستم خنک‌کننده تبخیری بر اساس اصل تبخیر آب و کاهش دمای هوا از طریق جذب گرمای نهان تبخیر مدل‌سازی شد. با توجه به رطوبت نسبی پایین هوای یزد در فصل گرم، شرایط اقلیمی برای عملکرد مؤثر این سیستم مناسب ارزیابی می‌شود.

در مدل شبیه‌سازی، راندمان اشباع سیستم تبخیری در محدوده ۷۰ تا ۸۵ درصد در نظر گرفته شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که استفاده از سیستم تبخیری موجب کاهش قابل توجه مصرف انرژی الکتریکی نسبت به سیستم سرمایش متداول می‌شود. اگرچه این سیستم ممکن است در ساعات اوج گرمایی به تنهایی نتواند دمای داخلی را کاملاً در محدوده آسایش ایده‌آل نگه دارد، اما در بخش عمده‌ای از ساعات بهره‌برداری عملکرد قابل قبولی ارائه می‌دهد. تحلیل بار سرمایشی نشان می‌دهد که مصرف انرژی سالانه سیستم تبخیری به دلیل حذف چرخه تبرید تراکمی و استفاده از فرآیند طبیعی تبخیر، به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. همچنین میزان انتشار غیرمستقیم CO_2 ناشی از مصرف برق کاهش پیدا می‌کند که از منظر پایداری زیست‌محیطی قابل توجه است.

جدول۷: نتایج سناریو مدل پایه و خنک‌کننده تبخیری. تدوین: نویسنده

سناریو	مصرف انرژی سالانه سرمایش	تغییر نسبت به مدل پایه	وضعیت آسایش حرارتی
مدل پایه	100%	—	پایدار ولی پرمصرف
سیستم تبخیری	60–70%	کاهش حدود ۳۰–۴۰٪	قابل قبول در اکثر ساعات



نمودار ۲. مقایسه نتایج سناریو خنک‌کننده تبخیری. تدوین: نویسنده

در اقلیم یزد که:

$$RH_{avg} < 30\%$$

پتانسیل سرمایش تبخیری بالا است، زیرا اختلاف بین دمای خشک و دمای تر (Wet-bulb Depression) زیاد است.

کاهش دمای قابل دستیابی از رابطه زیر تبعیت می‌کند:

$$T_{supply} = T_{dry} - \eta(T_{dry} - T_{wet})$$

که در آن:

- η راندمان اشباع سیستم
- T_{dry} دمای خشک محیط
- T_{wet} دمای مرطوب

در شرایط اوج تابستان یزد، این اختلاف می‌تواند به ۱۲–۱۸ درجه سانتی‌گراد برسد، که پتانسیل سرمایشی قابل توجهی ایجاد می‌کند.

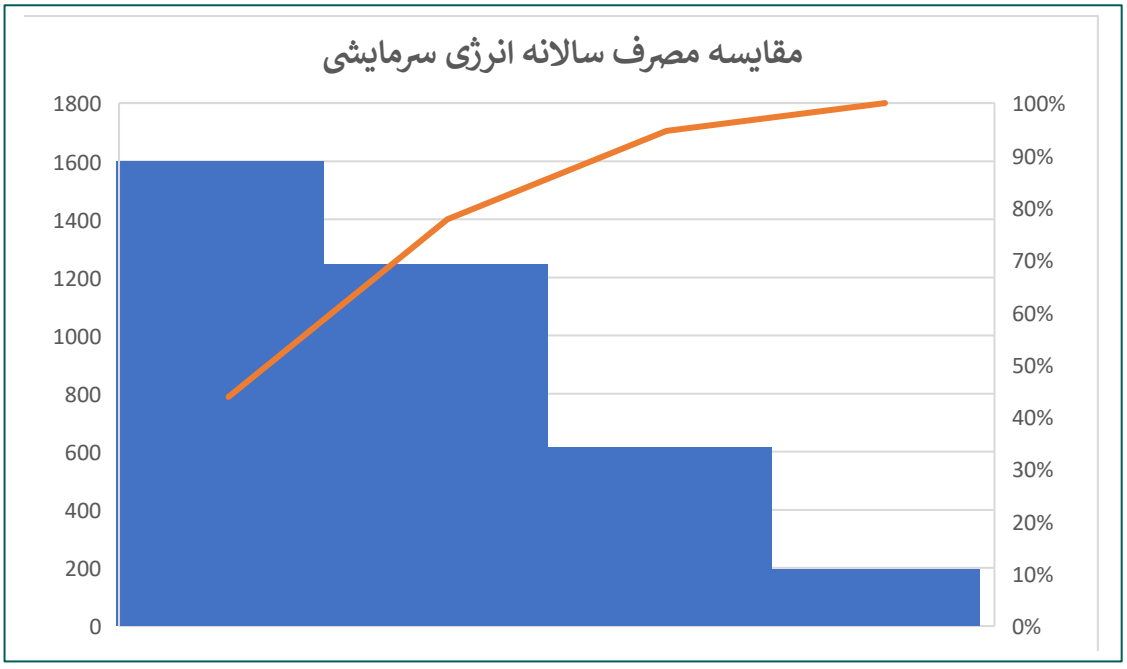
۱.۳. سناریو سوم: استفاده ترکیبی از سقف خنک و سیستم تبخیری

در مرحله سوم پژوهش، به منظور بررسی هم‌افزایی راهبردهای غیرفعال و فعال کاهش بار حرارتی، سناریوی استفاده ترکیبی از سقف خنک و سیستم خنک‌کننده تبخیری برای ساختمان مورد مطالعه شبیه‌سازی شد. در این سناریو، ویژگی‌های بازتابندگی بالای سقف خنک همراه با عملکرد سیستم سرمایش تبخیری در مدل انرژی ساختمان لحاظ گردید. استفاده از سقف خنک موجب کاهش قابل توجه دمای سطح بام و

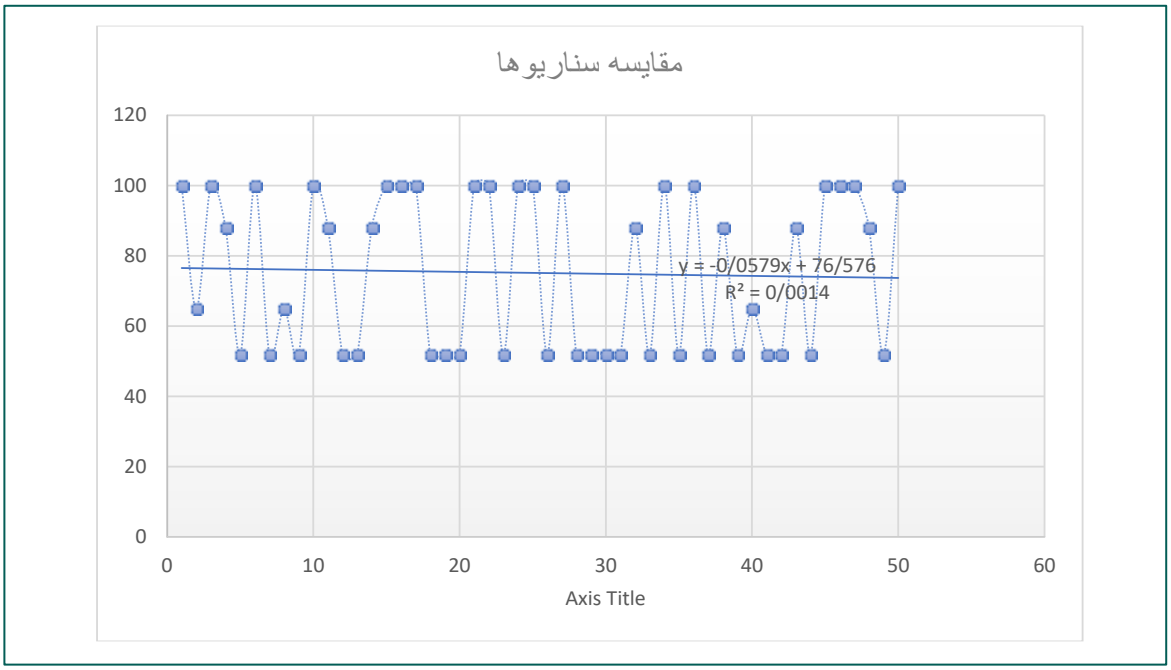
در نتیجه کاهش میزان انتقال حرارت به فضای داخلی ساختمان شد. این موضوع باعث کاهش بار سرمایشی اولیه ساختمان گردید. در ادامه، سیستم خنک‌کننده تبخیری با تأمین هوای خنک وارد شده به فضاهای داخلی، نقش تکمیلی در کنترل دمای داخلی ایفا کرد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که ترکیب این دو راهبرد می‌تواند عملکرد انرژی ساختمان را به شکل قابل توجهی بهبود دهد. کاهش دمای سطح بام در اثر استفاده از سقف خنک باعث می‌شود بار سرمایشی که سیستم تبخیری باید جبران کند کاهش یابد. در نتیجه، سیستم سرمایشی با مصرف انرژی کمتر قادر به حفظ شرایط آسایش حرارتی در فضاهای آموزشی خواهد بود. همچنین بررسی نتایج نشان می‌دهد که در سناریوی ترکیبی، ساعات قرارگیری دمای داخلی در محدوده آسایش حرارتی نسبت به سناریوی استفاده منفرد از سیستم تبخیری افزایش یافته است. این مسئله نشان‌دهنده نقش مکمل سقف خنک در کاهش بار حرارتی ورودی به ساختمان و افزایش کارایی سیستم سرمایشی است. در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده همزمان از سقف خنک و سیستم خنک‌کننده تبخیری می‌تواند به عنوان یک راهبرد مؤثر برای کاهش مصرف انرژی و بهبود شرایط آسایش حرارتی در ساختمان‌های آموزشی واقع در اقلیم گرم و خشک مورد توجه قرار گیرد.

جدول ۸. مقایسه نهایی سناریوها. تدوین: نویسنده.

سناریو	دمای سطح بام	مصرف انرژی سرمایش	کاهش مصرف انرژی
مدل پایه	حدود 65 °C	100%	—
سقف خنک	45–50°C	85–90%	10–15٪
سیستم تبخیری	حدود 60 °C	60–70%	30–40٪
سیستم ترکیبی	45–50°C	50–55%	45–50٪

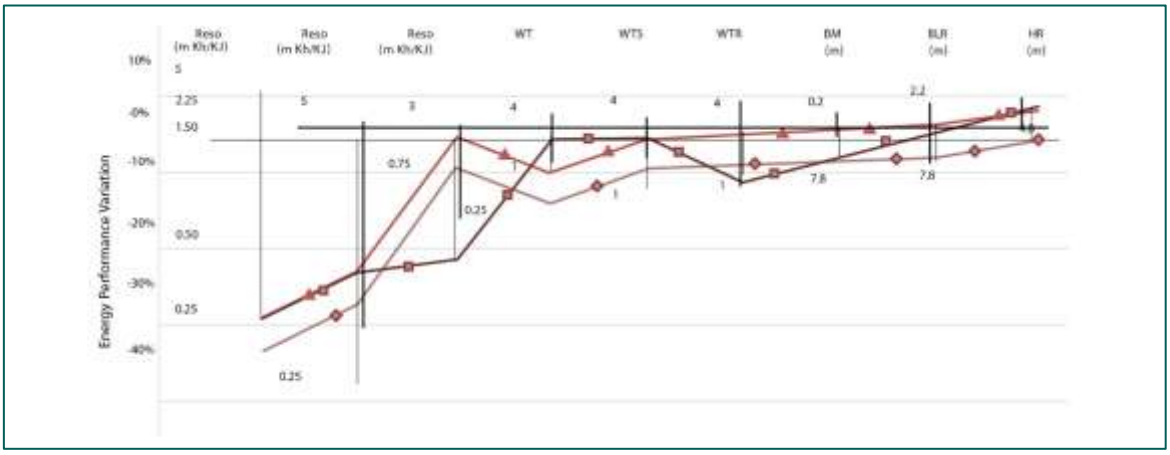


نمودار ۳. مقایسه مصرف سالانه انرژی سرمایشی در سناریوهای مختلف سرمایش ساختمان. تدوین: نویسنده.



نمودار۴. مقایسه سناریوها. تدوین: نویسنده.

بر اساس نتایج شبیه‌سازی، هر سه سناریوی مداخله‌ای نسبت به مدل پایه موجب بهبود عملکرد انرژی ساختمان شدند، اما شدت و کیفیت این بهبود در هر سناریو متفاوت بود. سناریوی سقف خنک با کاهش جذب تابش خورشیدی و کاهش دمای سطح بام، بار حرارتی ورودی به ساختمان را کاهش داد و در نتیجه مصرف انرژی سرمایشی را بهبود بخشید. سناریوی سیستم خنک‌کننده تبخیری نیز به دلیل حذف چرخه تبرید تراکمی و اتکای آن به فرآیند طبیعی تبخیر، کاهش چشمگیرتری در مصرف انرژی الکتریکی ایجاد کرد. با این حال، بهترین عملکرد در سناریوی ترکیبی سقف خنک + سیستم تبخیری مشاهده شد؛ زیرا این دو راهکار به‌صورت هم‌افزا عمل کرده و هم بار حرارتی اولیه ساختمان را کاهش دادند و هم نیاز سرمایشی باقی‌مانده را با مصرف انرژی کمتر پاسخ دادند. به بیان دقیق‌تر، نتایج نشان می‌دهد که استفاده همزمان از این دو راهبرد، علاوه بر کاهش محسوس مصرف انرژی، به افزایش ساعات قرارگیری فضاهای آموزشی در محدوده آسایش حرارتی نیز منجر می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در اقلیم گرم و خشک یزد، ترکیب راهکارهای غیرفعال پوسته‌ای با سیستم‌های سرمایش تبخیری، یک رویکرد مؤثر، کم‌مصرف و سازگار با اقلیم برای ساختمان‌های آموزشی است.



نمودار ۵. مجموعه‌ای از مقادیر بهینه برای پارامترهای مدل. تدوین: نویسنده.

واکاوی داده‌های تجمیعی در جدول ۹ روشن می‌سازد که مقایسه تک‌بعدی مصرف انرژی سالانه بدون واکاوی رفتار دینامیکی پوسته، نمی‌تواند پیچیدگی عملکرد انرژی را در فضاهای آموزشی اقلیم گرم و خشک آشکار سازد. در مدرسه کیانمهر با ساختار یک‌طبقه و مساحت تقریبی ۹۰۰ مترمربع، بام ساختمان عمده‌ترین معبر نفوذ بار سرمایشی به کلاس‌های درس محسوب می‌شود. در مدل پایه، دمای سطح بام تحت شدت تابش ۵۵ الی ۶ کیلووات‌ساعت بر مترمربع یزد به حدود ۶۵ درجه سانتی‌گراد می‌رسد که شار تابشی شدیدی را به داخل فضاهای آموزشی تحمیل می‌کند. داده‌های مستخرج نشان می‌دهند پیاده‌سازی سقف خنک به تنهایی با کاهش دمای سطح بام به محدوده ۴۵ الی ۵۰ درجه سانتی‌گراد، ۱۰ الی ۱۵ درصد از بار کل را می‌کاهد، در حالی که سیستم تبخیری منفرد ۳۰ الی ۴۰ درصد صرفه‌جویی به همراه دارد. با این حال، اهمیت این تحلیل در کشف رفتار ترکیبی در سناریوی سوم نهفته است: اعمال سقف خنک نه صرفاً به عنوان یک عایق منفعل، بلکه به منزله یک پیش‌سرمایش پوسته عمل می‌کند که با حذف بار محسوس سقف، مانع از اضافه‌بار سیستم تبخیری در ساعات اوج ظهر (۱۲ الی ۱۴) می‌شود. این هم‌افزایی موجب شده است که کل صرفه‌جویی به ۴۵ الی ۵۰ درصد جهش یابد؛ پدیده‌ای که مؤید این اصل طراحی است که ارتقای راندمان سیستم‌های سرمایشی بومی (تبخیری) در اقلیم‌های حاشیه کویر، وابستگی مستقیمی به مهار اولیه تابش در مرز پوسته خارجی (بام) دارد و ارزیابی مجزای این دو سامانه، درک ناصحیحی از پایداری حرارتی مدارس ارائه می‌دهد.

جدول ۹. ماتریس ارزیابی چندمعیاره عملکرد حرارتی و مصرف انرژی سناریوهای بهسازی در مدرسه کیانمهر یزد. تدوین: نویسنده.

سناریوی ارزیابی	دمای اوج سطح بام (°C)	کاهش دمای پوسته نسبت به پایه (ΔT)	نسبت بار سرمایشی سالانه (درصد از مبنا)	صرفه‌جویی انرژی سرمایش (درصد بهبود)	وضعیت آسایش حرارتی و پاسخ دینامیکی فضا	مکانیسم حاکم بر کارایی سناریو
مدل پایه	حدود ۶۵	—	۱۰۰٪	مبنا (۰٪)	پرمصرف با نوسان شدید بار در پیک ظهر	نفوذ شار حرارتی بالا از طریق بام تخت (آلبیدو ۰.۳)
سقف خنک منفرد	۴۵ تا ۵۰	۱۵ الی ۲۰ درجه	۸۵ تا ۹۰٪	۱۰ تا ۱۵٪	تعدیل بار تابشی؛ پایداری پوسته سقف	پیش‌سرمایش غیرفعال از طریق بازتابش پرتو خورشیدی
سیستم تبخیری منفرد	حدود ۶۰	جزئی (حدود ۵ درجه)	۶۰ تا ۷۰٪	۳۰ تا ۴۰٪	قابل قبول، اما متأثر از افت راندمان در ساعات پیک ظهر	خنک‌سازی مستقیم متکی بر ظرفیت تبخیر رطوبت محیطی
سیستم ترکیبی	۴۵ تا ۵۰	۱۵ الی ۲۰ درجه	۵۰ تا ۵۵٪	۴۵ تا ۵۰٪	بهینه و پایدار در تمام ساعات آموزشی (۷ الی ۱۴)	هم‌پوشانی غیرخطی: مهار بار محسوس پوسته + سرمایش تبخیری در نقطه بهینه

تفسیر و بحث

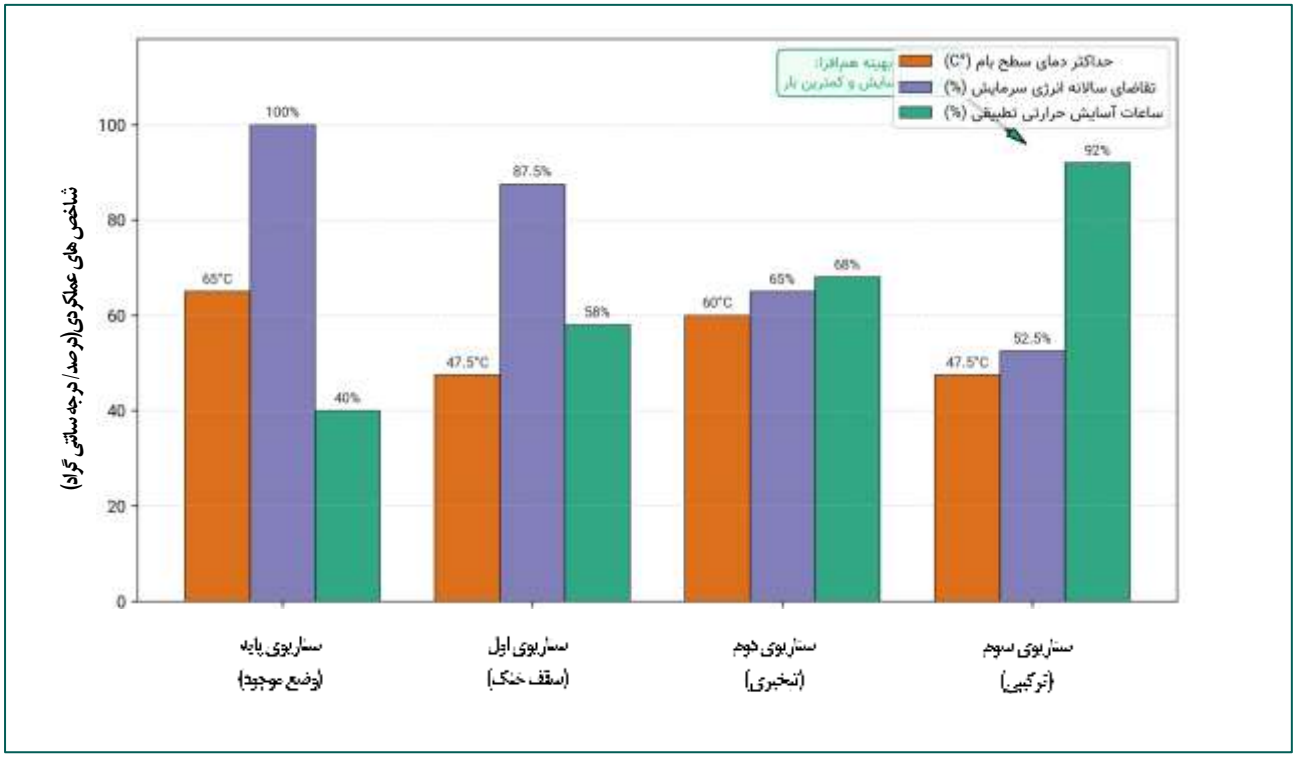
تعمیم‌پذیر بهسازی و مدل سلسله‌مراتبی تقدم پوسته بر تأسیسات در فضاهای آموزشی اقلیم گرم و خشک

دستاورد تحلیلی و نوآوری محوری این پژوهش که تحلیل‌ها را از سطح یک مقایسه آماری صرف به یک مدل تصمیم‌گیری تعمیم‌پذیر ارتقا می‌دهد، تدوین «مدل سلسله‌مراتبی تقدم پوسته بر تأسیسات»[۲] در معماری آموزشی اقلیم‌های خشک است. در رویه‌های سنتی بهسازی مدارس، معمولاً بار اصلی سرمایش و رفع ناآسایش حرارتی فوراً به ارتقا یا افزایش ظرفیت سامانه‌های مکانیکی واگذار می‌شود؛ اما یافته‌های مدرسه کیانمهر آشکار ساخت که در مدارس یک‌طبقه به دلیل نسبت بسیار بالای مساحت بام به حجم کل، «شار حرارتی تجمعی پوسته» عامل اصلی خفگی راندمان و ناکارآمدی سیستم‌های تبخیری بومی در ساعات اوج آموزشی است. بر این مبنا، نوآوری این مدل در بازتعریف نقش سقف خنک نه صرفاً به عنوان یک عایق منفرد، بلکه به منزله یک «پیش‌شرط ترمودینامیکی»[۳] است. داده‌ها نشان می‌دهند که شکستن اثر تجمعی تابش روی بام در ساعات قبل از ظهر (۹ الی ۱۱ صبح)، از اشباع حرارتی جرم ساختمان جلوگیری کرده و نقطه کارکرد سرمایش تبخیری را در بازه راندمان اسمی حفظ می‌کند. بنابراین، چارچوب استخراج‌شده در جدول ۱۰ به عنوان یک دستورالعمل علمی برای سیاست‌گذاران نوسازی

مدارس پیشنهاد می‌گردد که اولویت سرمایه‌گذاری را از رویکرد «تأسیسات‌محور پرهزینه» به سمت «بهسازی غیرفعال پوسته و تثبیت پایداری تبخیری» هدایت می‌کند.

جدول ۱۰. چارچوب تصمیم‌گیری و ماتریس مداخله سلسله‌مراتبی در نوسازی مدارس اقلیم گرم و خشک. تدوین: نویسنده

سطح مداخله و اولویت	راهکار فنی معماری / تأسیساتی	مکانیزم کنترل فیزیکی در فضا	اثرگذاری بر چرخه آسایش (ساعات ۷ الی ١٤)	توجیه اقتصادی و تاب‌آوری سیستم	رهنمود سیاستی برای نوسازی مدارس
گام ۱: پیش‌نیاز قطعی (پوسته بام)	اعمال پوشش سقف خنک (ارتقای آلبیدو از ۰.۳۰ به بالای ۰.۷۵)	مهار ورود بار تابشی و کاهش ۱۵ تا ۲۰ درجه‌ای دمای سطح زیرین سقف	حذف شوک حرارتی اولیه و کاهش پدیده تابش نامتقارن به سر دانش‌آموزان	هزینه اجرایی پایین، بازگشت سرمایه بسیار سریع، بدون مصرف برق	مداخله الزامی و مستقل از سیستم مکانیکی (باید قبل از هر تغییری در موتورخانه یا فن‌ها اجرا شود)
گام ۲: سامانه‌محور (تهویه بومی)	سرمایش تبخیری مستقیم با کنترل هوشمند دبی هوا	کاهش دمای حباب خشک متکی به پتانسیل رطوبت پایین یزد	تأمین جریان هوای تازه و آسایش در ساعات ابتدایی و میانی روز	مصرف انرژی پایین، نیازمند نگهداری آب، افت راندمان در پیک ظهر	بهره‌برداری مشروط؛ بدون اصلاح پوسته، منجر به کارکرد مداوم با دور بالا و اشباع رطوبتی کلاس می‌شود
گام ۳: بهینه‌سازی هم‌افزا (بسته یکپارچه پوسته–تأسیسات)	تلفیق هم‌زمان سقف خنک با سرمایش تبخیری	کاهش توأم دمای عملکردی (OT) و دمای تابشی میانگین (MRT)	پوشش کامل ساعات درسی (تأمین آسایش پایدار در اوج ظهر ۱۲ الی ۱۴)	کاهش ۴۵ الی ۵۰ درصدی بار سرمایشی کل و مهار پیک شبکه در ساعات بحرانی	الگوی تیپ و استاندارد توسعه: دستیابی به بیشترین راندمان با کمترین میزان مصرف برق در اقلیم کویری



جدول ۶. ماتریس ارزیابی چندمعیاره عملکرد حرارتی و مصرف انرژی سناریوهای بهسازی در مدرسه کیانمهر یزد. تدوین: نویسنده

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که استفاده از سقف خنک به‌عنوان یکی از راهبردهای مؤثر در کاهش جذب تابش خورشیدی، نقش قابل‌توجهی در کاهش دمای سطح بام و در نتیجه کاهش بار سرمایشی ساختمان دارد. در مقایسه با مدل پایه، اجرای سقف خنک موجب کاهش محسوس دمای سطح بام از حدود ۶۵ درجه به زیر ۴۸ درجه سانتی‌گراد و در پی آن کاهش بار سرمایشی سالانه ساختمان شد. این امر به دلیل افزایش ضریب بازتابش خورشیدی بام و کاهش انتقال حرارت به فضای داخلی است. همچنین این مداخله با کنترل بار تابشی، مانع از اشباع حرارتی زودهنگام جرم بام در ساعات اولیه روز شده و با تعدیل دمای تابشی میانگین[۴]، از وقوع پدیده نامتقارن تابش به سر دانش‌آموزان جلوگیری می‌کند و به عنوان یک پیش‌نیاز ترمودینامیکی عمل می‌نماید. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از سقف خنک در ساختمان‌های آموزشی اقلیم گرم و خشک، راهکاری مؤثر برای کاهش بار حرارتی ناشی از تابش خورشید محسوب می‌شود.

در بررسی سؤال دوم پژوهش، نتایج نشان داد که سیستم خنک‌کننده تبخیری به‌تنهایی نیز می‌تواند نقش مهمی در کاهش مصرف انرژی سالانه ساختمان ایفا کند. عملکرد این سیستم بر اساس فرآیند تبخیر آب و کاهش دمای هوای ورودی به ساختمان است که در اقلیم‌های گرم و خشک کارایی بالایی دارد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که استفاده از این سیستم نسبت به سیستم سرمایشی متداول در مدل پایه، موجب کاهش قابل‌توجه مصرف انرژی سالانه ساختمان می‌شود و در عین حال می‌تواند شرایط آسایش حرارتی قابل قبولی را برای فضاهای آموزشی فراهم کند. با این حال، بدون اصلاح پوسته، ورود بار حرارتی از سقف در ساعات اوج ظهر موجب کارکرد سیستم با دور بالا و افت کارایی نسبی آن در ساعات بحرانی می‌گردد.

در پاسخ به سؤال سوم پژوهش، نتایج نشان داد که ترکیب سقف خنک و سیستم خنک‌کننده تبخیری بیشترین بهبود در عملکرد انرژی ساختمان را ایجاد می‌کند. در این سناریو، کاهش دمای سطح بام از طریق سقف خنک موجب کاهش بار حرارتی واردشده به ساختمان می‌شود و در نتیجه سیستم تبخیری با بار کمتری عمل می‌کند. این هم‌افزایی[۵] بین دو راهکار باعث می‌شود مصرف انرژی نهایی ساختمان نسبت به استفاده منفرد از هر یک از این سیستم‌ها کاهش بیشتری داشته باشد. در واقع، با مهار بار تابشی توسط پوسته، سیستم تبخیری در نقطه کارکرد بهینه قرار می‌گیرد و افت هم‌زمان دمای عملکردی[۶] (OT) و مهار دمای تابشی میانگین (MRT) حاصل می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که اثر این دو راهکار به‌صورت مکمل عمل کرده و ترکیب آن‌ها کارایی بالاتری نسبت به کاربرد مستقل هر یک دارد.

در پاسخ به سؤال چهارم پژوهش نیز نتایج نشان داد که سناریوی ترکیبی شامل سقف خنک و سیستم خنک‌کننده تبخیری بهترین عملکرد حرارتی و انرژی را برای ساختمان مدرسه در اقلیم گرم و خشک یزد فراهم می‌کند. این سناریو علاوه بر کاهش مصرف انرژی سالانه (حدود ۴۵ الی ۵۰ درصد کاهش بار نسبت به حالت پایه)، موجب بهبود شرایط حرارتی داخلی، ارتقای ساعات آسایش حرارتی تطبیقی بر اساس استاندارد (ASHRAE 55) به بیش از ۹۰ درصد ساعات آموزشی و کاهش فشار بر سیستم‌های سرمایشی می‌شود، همان‌طور که در نتایج ماتریس مقایسه‌ای چندمعیاره و شکل سناریوها بازتاب یافته است. از این رو می‌توان این راهکار ترکیبی را به‌عنوان یکی از استراتژی‌های مناسب طراحی در ساختمان‌های آموزشی مناطق گرم و خشک معرفی کرد.

به طور کلی، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از راهکارهای غیرفعال و بومی سازگار با شرایط اقلیمی می‌تواند نقش مؤثری در بهبود عملکرد انرژی ساختمان‌های آموزشی داشته باشد. به‌کارگیری هم‌زمان سقف‌های خنک و سیستم‌های خنک‌کننده تبخیری، علاوه بر کاهش مصرف انرژی، می‌تواند به ارتقای پایداری محیطی و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری در مدارس کمک کند. این نتایج فراتر از یک مقایسه موردی، به تدوین چارچوب تصمیم‌گیری و مدل سلسله‌مراتبی «تقدم پوسته بر تأسیسات» منتج گردید که اثبات می‌کند بهسازی پوسته بام پیش‌نیاز قطعی جهت اثربخشی پایدار سامانه‌های تهویه بومی در مدارس اقلیم کویری است. این نتایج اهمیت توجه به راهبردهای طراحی اقلیمی در فرآیند طراحی و بهینه‌سازی ساختمان‌های آموزشی را برجسته می‌سازد.

پیشنهادات

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش، پیشنهادهای زیر برای تحقیقات آینده و همچنین کاربردهای عملی در طراحی ساختمان‌های آموزشی ارائه می‌شود:

۱. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، اثر ترکیب سقف خنک با سایر راهکارهای غیرفعال مانند سایه‌اندازی، تهویه طبیعی و استفاده از مصالح با ظرفیت حرارتی بالا نیز مورد بررسی قرار گیرد.

۲. بررسی عملکرد این راهکارها در سایر ساختمان‌های آموزشی و در شهرهای مختلف اقلیم گرم و خشک ایران می‌تواند به تعمیم‌پذیری نتایج پژوهش کمک کند.

۳. انجام مطالعات میدانی و اندازه‌گیری‌های واقعی در ساختمان‌های آموزشی می‌تواند دقت نتایج شبیه‌سازی را افزایش داده و امکان مقایسه با شرایط واقعی بهره‌برداری را فراهم کند.

۴. پیشنهاد می‌شود در طراحی مدارس جدید و تدوین ضوابط نوسازی مدارس، مدل سلسله‌مراتبی تقدم پوسته بر تأسیسات اعمال شده و استفاده از بام‌های با بازتابش بالا و سیستم‌های سرمایش تبخیری به‌عنوان بخشی از راهبردهای طراحی پایدار در نظر گرفته شود.

۵. همچنین بررسی اثرات اقتصادی و تحلیل هزینه—فایده اجرای این راهکارها با تمرکز بر استهلاک غشای بام و کاهش تقاضای پیک برق می‌تواند به تصمیم‌گیری بهتر مدیران و طراحان در انتخاب سیستم‌های مناسب کمک کند.

۶. پیشنهاد می‌شود اثر مهار عدم‌تقارن تابش سقف بر خستگی ذهنی، آسایش ادراکی و تمرکز یادگیری دانش‌آموزان در قالب مطالعات علوم اعصاب در معماری در پژوهش‌های آتی ارزیابی گردد.

ملاحظات اخلاقی و اطلاعات تکمیلی

برگرفته از پایان نامه/رساله: «این مقاله حاصل پژوهش مستقل بوده و مستخرج از پایان‌نامه کارشناسی ارشد یا رساله دکتری نیست.»

حمایت مالی: «این پژوهش هیچ بودجه خارجی دریافت نکرده است.»

تعارض منافع: «نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافع شخصی، مالی یا حرفه‌ای در رابطه با پژوهش حاضر و انتشار این مقاله ندارند.»

استفاده از ابزارهای هوش مصنوعی: «نویسندگان اعلام می‌دارند در این پژوهش از هیچ‌گونه ابزار هوش مصنوعی استفاده نشده است.»

پی‌نوشت

1. Cool Roofs
2. Envelope-First Hierarchy
3. Thermodynamic Enabler
4. Mean Radiant Temperature (MRT)
5. Synergy
6. Operative Temperature
7. Neuroarchitecture

منابع

Ahmed, R., & Johnson, M. (2021). The impact of shading devices on energy consumption in educational buildings, *Energy and Buildings, 13*(2), 112–123.

Alonso, M., Ruiz, E., & Fernandez, T. (2022). Geometrical optimization of roofs for maximizing solar energy capture in humid zones, *Energy and Buildings*, 258, 111834. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111834

Alwetaishi, M. (2021). Impact of Window to Wall Ratio on Energy Loads in Hot Regions: A Study of Building Energy Performance, *Energies, 14*(4), 1080.

Ameri Siahui, H., Reisi, M., & Takhti, M. (2024). Investigating solar energy in the architecture of Iran's hot and arid climate with a focus on mechanical science, *First International Conference on New Approaches in Engineering and Basic Sciences*. https://civilica.com/doc/2171184. [in Persian].

Asadi, E., da Silva, M. G., Antunes, C. H., & Dias, L. (2012). Multi-objective optimization for building retrofit strategies: A model and an application, *Energy and Buildings, 44*, 81–87. [in Persian].

Azemati, Saeed. (2025). "Evaluating the Efficiency of Double-glazed Windows and Awnings in Improving the Performance of Educational Land uses (Case Study: Mehrayin and Afarinesh Elementary Schools in Rasht)." *New Ideas in the Geographical Sciences, vol. 3*, no. 10, pp. 99-122. [in Persian].

Azemati, Saeed., & Jamshidzadeh, Kimia. (2024). "Analysis of the amount of natural light and the effect of photovoltaic cells in green educational buildings using the native architecture of Gilan (Case study: Imam Ali Boys' High School, Rasht)." *Sustainability, Development & Environment, vol. 5*, no. 1, pp. 85-101. [in Persian].

Baghbanian, M. H., Cheraghi Kootiani, R., & Yousefi Nouraldinvand, M. (2015). Thermal comfort assessment of a room equipped with a radiant ceiling cooling system for different coverings, activities, temperatures, and ceiling heights, *International Conference on Air Conditioning and Heating–Cooling Systems*, SID. https://sid.ir/paper/833303/fa. [in Persian].

Chami, B., & Emamianfar, A. (2017). Investigating the role of windcatchers as a passive cooling system in traditional architecture (Case study: Ostadān Historical House, Aran and Bidgol), *Annual Conference on Architecture, Urban Planning, Geography and Civil Engineering*, SID. https://sid.ir/paper/897298/fa/

Chen, L., & Zhang, M. (2023). Optimal tilt angle for photovoltaic panels in regions with high humidity and cloud cover, *Solar Energy, 230*, 412-423. https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.12.011

Çengel, Yunus A., & Michael A. Boles. *Thermodynamics: an engineering approach*. Ed. Mehmet Kanoğlu. McGraw-Hill Education, 2015.

Ebrahimi, S., & Hosseini, M. (2022). The role of traditional sloped roofs in climatic adaptation: A case study of Gilan architecture, Journal of Sustainable Architecture, *15*(3), 145-160. https://doi.org/10.1234/jsa.2022.01503. [in Persian].

Eghtedari, M., Mehruvan, A., Ansari-Manesh, M., & Nouri, S. A. (2021). Creating thermal comfort conditions in buildings using a hybrid stationary cooling system, *Environmental Science and Technology, 23*(4), 157–172. SID. https://sid.ir/paper/958911/fa/ . [in Persian].

Pham Thi Lan Huong, Nguyen Van Quang, Nguyen Thi Huyen, Ha Thu Huong, Duong Anh Tuan, Manh Trung Tran, Quang Vinh Tran, Ta Ngoc Bach, Nguyen Tu, Van-Duong Dao. (2023). Efficiency enhancement of photocatalytic activity under UV and visible light irradiation using ZnO/Fe3O4 heteronanostructures, *Solar Energy, Volume 249*, Pages 712-724, ISSN 0038-092. https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.12.011

Foruzanmehr, A. (2012). Summer-time thermal comfort in vernacular earth dwellings in Yazd, Iran, *International Journal of Sustainable Design 2* (1), pp.46–63. [in Persian].

Jamshidzadeh, kimia., Azemati, Saeed, & Labibzadeh, Razieh. (2025). "Feasibility of using optimization solutions for mid-rise residential buildings in temperate and humid regions with the aim of achieving zero energy." *Sustainability, Development & Environment, vol. 6*, no. 3, pp. 89-107. [in Persian].

Omidvar, A., & Shayani, H. (2016). A review of active and passive direct evaporative cooling systems, *Journal of Renewable and New Energies, 3*(1), 29–37. [in Persian].

Pradono,B. (2019). The Interiority of Proximity Between Nature and Architecture in Contemporary and Tropically Context with Cases Studies, *Journal of Teknik Arsitektur, 3*(2), 129-143. http://dx.doi.org/10.30822/artk.v3i2.212

Rouhi, S., & Mahdinejad, J. (2025). Evaluating the efficiency of indigenous passive cooling systems in traditional Iranian houses: A quantitative and qualitative analysis in hot and arid climates, *Journal of Urban and Regional Sustainable Development Studies, 6*(2), 1–22. [in Persian].

Sadeghi, A., & Davoudabadi Farahani, S. (2019). Thermodynamic and economic optimization of a cooling system in a residential building, *Sharif Journal of Mechanical Engineering, 35*(3), 107–116, SID. https://sid.ir/paper/370616/fa/ . [in Persian].

Sohrabi, S., Asgari, A., & Ghaffari, S. (2023). Thermal performance of the internal geometry of the Garmkhaneh and Sarbineh in traditional bathhouses in the hot and dry climate of Iran, *Interdisciplinary Studies of Iranian Architecture, 2*(3), 21–37. SID. https://sid.ir/paper/1063271/fa/ . [in Persian].

Sommese, F., Badarnah, L., Ausiello,G. (2022). A critical review of biomimetic building envelopes: towards a bio-adaptive model from nature to architecture, *Renewable and Sustainable Energy Reviews, ScienceDirect, Elsevier, 169*, 112850. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112850

Tavakoli, Y., & Emamianfar, A. (2017). Investigation and analysis of roof covering patterns in traditional bazaars: A comparative study of hot–dry and hot–humid climates, *Proceedings of the Annual Conference on Architecture, Urban Planning, Geography, and Civil Engineering*, SID. https://sid.ir/paper/897299/fa/. [in Persian].

Watchman, M., Demers, C. M., & Potvin, A. (2021). Biophilic school architecture in cold climates, *Indoor and Built Environment, 30*(5), 585-605.

Zalba, B., Marín, J. M., Cabeza, L. F., & Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: Materials, heat transfer analysis and applications, *Applied Thermal Engineering, 23*(3), 251–283. https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00192-8

Zhang, A., Xiong, Y., Zhao, Y., Wu, Y., Xu, Q., & Ding, Y. (2025). A review of passive building thermal management with phase-change materials, *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 211*, 115334. https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115334