

ترجمه انگلیسی این مقاله نیز با عنوان:
Utilization of Solar Chimney and Thatch Roof to Enhance the Efficiency
of Natural Ventilation (A Case Study: Residential Building in Babol City)
در همین شماره مجله به چاپ رسیده است.

مقاله پژوهشی

بهره‌گیری از دودکش خورشیدی و سقف گالی پوش جهت افزایش راندمان تهویه طبیعی

(مطالعه موردی: ساختمان مسکونی در شهر بابل)*

محمدعلی هاشم‌زاده بهنمیری^۱، حمیدرضا فرشچی^{۲*}، ابوالفضل فتاحی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه معماری و انرژی، پژوهشکده انرژی، دانشگاه کاشان، ایران.

۲. استادیار، گروه مهندسی معماری، پژوهشکده انرژی، دانشگاه کاشان، ایران.

۳. استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۱۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱

چکیده

بیان مسئله: با پیشرفت فناوری، به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در طراحی ساختمان‌ها، به‌ویژه در اقلیم‌های معتدل و مرطوب، کمتر توجه شده است. انرژی باد می‌تواند با بهینه‌سازی مصرف انرژی، کاهش رطوبت و بهبود آسایش حرارتی، نیاز به تأسیسات مکانیکی و سوخت‌های فسیلی را کاهش دهد. راهکارهایی مانند دودکش خورشیدی و سقف گالی پوش نیز می‌توانند تهویه طبیعی را بهبود بخشد و کارایی انرژی در ساختمان‌ها را افزایش دهند.

هدف پژوهش: هدف این پژوهش بررسی تأثیر دودکش خورشیدی به‌عنوان راهکاری نوین و سقف گالی پوش به‌عنوان راهکاری بومی بر میزان تعادل حرارتی از طریق افزایش راندمان تهویه طبیعی در ساختمان‌های اقلیم معتدل و مرطوب بابل است.

روش پژوهش: روش پژوهش شامل مطالعات اسنادی-نظری، مطالعات میدانی و شبیه‌سازی کاربردی است. در بخش کاربردی بهره‌وری دودکش خورشیدی و سقف گالی پوش با استفاده از نرم‌افزار دیزاین بیلدر در دو بخش شبیه‌سازی انرژی و دینامیک سیالات محاسباتی تحلیل می‌شود.

نتیجه‌گیری: استفاده هم‌زمان از تهویه دودکش خورشیدی با برنامه زمان‌بندی از ساعت هشت شب تا هشت صبح و سقف گالی پوش با عملکرد ۲۴ ساعته در ساختمان، طی شش ماه بهار و تابستان، به‌طور قابل توجهی بر شرایط حرارتی ساختمان تأثیر می‌گذارد. این ترکیب در مقایسه با ساختمان مجهز به سقف سفال پوش و بدون دودکش خورشیدی در همین بازه زمانی، به‌طور میانگین موجب کاهش ۴۳۸/۴ کیلووات‌ساعت از کل حرارت فضای داخلی ساختمان از طریق تهویه طبیعی می‌شود، نرخ تعویض هوا را به میزان ۹/۹ بار در ساعت افزایش می‌دهد و جذب حرارت را تا ۳۶۱۳ کیلووات‌ساعت کاهش می‌دهد.

واژگان کلیدی: آسایش حرارتی، تهویه طبیعی، اقلیم معتدل و مرطوب، دودکش خورشیدی، سقف گالی پوش.

مقدمه

انرژی‌های تجدیدپذیر مانند خورشیدی، باد و زمین‌گرمایی به‌عنوان گزینه‌های پایدار برای کاهش وابستگی به منابع غیرتجدیدپذیر مطرح شده‌اند (Sartori et al., 2012). این منابع به طراحی ساختمان‌های سبز و پایدار کمک می‌کنند و می‌توانند هزینه‌های انرژی و آلودگی را پایین آورند (Yeh et al., 2016). منابع تجدیدپذیر

فقط ۱۴ درصد از تقاضای جهانی انرژی را تأمین می‌کنند (بهادری‌نژاد و یعقوبی، ۱۳۸۵). پایداری در معماری یعنی طراحی و ساخت ساختمان‌هایی که نیازهای انسانی را برآورده می‌کنند و هم‌زمان آسیب‌های زیست‌محیطی را کم کرده و منابع طبیعی را بهینه مصرف می‌کنند (Heath & Gidley, 2012). تهویه طبیعی یک راه حل برای کاهش مصرف انرژی و بهبود آسایش حرارتی و کیفیت هوا است که به‌عنوان بخشی از معماری پایدار شناخته می‌شود (Kohler & Lichtensteiger, 2017). آسایش حرارتی به حالتی اشاره دارد که در آن فرد در دمای محیط، احساس راحتی می‌کند (Ashrae, 2017). این محدوده به حالتی اشاره دارد که

*این مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد «محمدعلی هاشم‌زاده بهنمیری» با عنوان «طراحی مجموعه مسکونی ویلاهای در شهر بابل با رویکرد کاهش مصرف انرژی (باتا‌کیدیبر نقش تهویه طبیعی)» است که به راهنمایی دکتر «حمیدرضا فرشچی» و دکتر «ابوالفضل فتاحی» در پژوهشکده انرژی، آب و محیط‌زیست دانشگاه کاشان انجام شده است.
*** نویسنده مسئول: ۰۹۱۳۱۶۱۷۵۹۱ Farshchi46@kashanu.ac.ir

ویژگی‌های طبیعی گالی، تهویه بهتری نسبت به خانه‌های با سقف فلزی دارند (Knudsen et al., 2020). جریان هوا در لایه‌های گالی، تنفس‌پذیری را بالا می‌برد (Simpson, 2022). سقف‌های گالی پوش از ساقه‌های سفت (مانند گندم و نی) و نرم (مانند برگ درخت نارگیل، نخل و ساقه برنج) ساخته می‌شوند که دوام متفاوتی دارند؛ نوع سفت در مناطق معتدل تا ۷۰ سال و در گرمسیری تا ۳۰ سال عمر دارد. در حالی که نوع نرم معمولاً کمتر از ۱۰ سال و گاهی تنها دو سال دوام داشته و با برخی تکنیک‌ها تا ۱۲ سال قابل افزایش است (Hall, 1998). در مازندران، به‌ویژه بابل، منابع مصالح بومی مانند گندم، برنج و نی در رودخانه‌ها و مرداب‌ها به‌وفور در دسترس است. نیروی انسانی ماهر محلی هم موجب کاهش چشم‌گیر هزینه‌های اجرایی می‌شود. مطالعات نشان می‌دهد هزینه اجرای سقف گالی پوش در مناطق دارای منابع محلی، به‌طور میانگین ۴۰ تا ۶۰ درصد کمتر از انواع صنعتی مانند سقف فلزی است (Ejstrup & Beim, 2023). هزینه نگهداری سقف‌های گالی پوش پایین و محدود به تعویض پوشش سطحی است اما برای تهویه مناسب، نگهداری منظم ضروری بوده و بروز ناهمواری یا خزه‌زدگی نشانگر نیاز به تعمیرات است (Hunnisett, 2021). همچنین نوع ساقه بر دوام نهایی اثر گذار است و نوع سفت عمر بیشتری دارد. با دوام بالای ساختار اصلی و نیاز احتمالی به تعویض سطحی هر ۱۰ تا ۱۵ سال، دوره بازگشت سرمایه با مصالح بومی و نیروی محلی سه تا پنج سال برآورد می‌شود. در تمامی پژوهش‌های بررسی شده، استفاده از دودکش خورشیدی یا سقف گالی پوش را برای بهبود تهویه طبیعی در اقلیم‌های معتدل و مرطوب، پیشنهاد داده‌اند اما ترکیب این دو سیستم بررسی نشده است. این پژوهش به بررسی تأثیر ترکیب این دو سیستم تهویه طبیعی می‌پردازد.

مبانی نظری

تهویه طبیعی، هوای داخل و خارج ساختمان را بدون انرژی مکانیکی با استفاده از باد و اختلاف دما جابه‌جا می‌کند. این فرایند موجب کاهش مصرف انرژی و بهبود کیفیت هوای می‌شود (Kasmai, 2003). در مقایسه با سیستم‌های مکانیکی، تهویه طبیعی با حذف تجهیزات مکانیکی، مصرف انرژی و آلاینده‌گی را به‌طور چشمگیر کاهش می‌دهد، در حالی که سامانه‌های مکانیکی با وجود کارایی، مصرف بالا و آثار زیست‌محیطی دارند (Guardigli & Barbolini, 2014). سیستم‌های مکانیکی، کنترل دقیقی بر کیفیت و دمای هوای داخلی دارند اما تهویه طبیعی، کنترل‌پذیری کمتری دارد که با طراحی مناسب مانند شفت‌های تهویه و عناصر نما بهبود می‌یابد (Coşar et al., 2023). در همین راستا، تهویه برای خنک‌سازی هوای داخلی، ساختار ساختمان و بدن انسان از فرایندهای همرفت و تبخیر بهره می‌برد (Kasmai, 2003). تهویه طبیعی به سه دسته تقسیم می‌شود: تهویه یک‌طرفه، تهویه عبوری و تهویه مکشی. این دسته‌ها براساس جریان هوا و اختلاف چگالی بین داخل و خارج ساختمان عمل می‌کنند (Kalyon, 2010). در مناطق معتدل و مرطوب از تهویه دوطرفه در ساختمان‌ها بهره‌برداری می‌شود (قبادیان, ۱۳۹۲).

۸۰ درصد افراد در آن احساس راحتی کنند (Seyyed Sadr, 2009). عواملی مانند شکل بدن، وضعیت سلامت، جنسیت و سن می‌توانند بر تجربه آسایش حرارتی تأثیر گذارند (Holger, 2006). رطوبت بالا در اقلیم معتدل و مرطوب باعث مشکلات آسایش حرارتی و افزایش مصرف انرژی ساختمان می‌شود. استفاده از انرژی باد و تهویه طبیعی در فضای داخلی به کاهش رطوبت، تأمین آسایش حرارتی و کاهش نیاز به سیستم‌های مکانیکی و الکتریکی کمک می‌کند. در سیستم‌های تهویه طبیعی، دودکش‌های خورشیدی در اقلیم‌های گرم و مرطوب یا معتدل و مرطوب مؤثراند اما در اقلیم معتدل و مرطوب ایران، به‌ویژه در مازندران، این روش برای تهویه و کاهش مصرف انرژی به کار نمی‌رود. همچنین، گالی که از مصالح بومی و پایدار مازندران است و در گذشته برای پوشش سقف استفاده می‌شد، امروزه به دلیل ظهور پوشش‌های جدید مانند ایرانیت و سفال کمتر استفاده می‌شود. این پژوهش به بررسی تأثیر دودکش خورشیدی به عنوان راهکاری نوین و سقف گالی پوش به عنوان راهکاری بومی در بهبود تهویه داخلی و تعادل حرارتی ساختمان‌های اقلیم معتدل و مرطوب بابل می‌پردازد.

پیشینه پژوهش

دودکش‌های خورشیدی با بهره‌گیری از اثر شناوری ایجاد شده توسط گرمایش خورشیدی، تهویه طبیعی و آسایش حرارتی ساختمان را بهبود می‌بخشند. این سیستم در ساختمان‌های مسکونی و غیرمسکونی مطالعه شده و به کاهش مصرف انرژی برای سرمایش و گرمایش کمک می‌کند. امکان ادغام دودکش‌های خورشیدی در ساختمان‌های چندطبقه نیز وجود دارد (Zhao et al., 2024). تهویه دودکش خورشیدی با افزایش عرض کلکتور و تابش خورشیدی بهبود یافته و با افزایش دما و طبقات کاهش می‌یابد (Fine et al., 2022). نصب صفحه‌های خورشیدی در کانال دودکش به بهبود انتقال گرما به هوا کمک می‌کند (He & Lv, 2022). خانه‌های دارای دودکش خورشیدی معمولاً هزینه ساخت اولیه بالاتری نسبت به ساختمان‌های معمولی دارند که بسته به ارتفاع دودکش، ابعاد حفره، نوع شکاف و مصالح، متغیر است (Zhang & Shi, 2018). مطالعات نشان داده‌اند این افزایش هزینه برای خانه‌های کوچک ۳/۷۲ درصد، خانه‌های متوسط ۲/۱۶ درصد و خانه‌های بزرگ ۱/۸۸ درصد است. با این حال، این سیستم مصرف برق را ۱۰ تا ۲۰ درصد کاهش داده و در بلندمدت هزینه اولیه را جبران می‌کند. طراحی آن برای دوام ۴۰ تا ۵۰ ساله و با نگهداری حداقلی است (Ratanachotinun et al., 2016). تنها نیاز آن، بازرسی‌های دوره‌ای برای حفظ مصالح و جلوگیری از انسداد است (Singh et al., 2023). برآوردها نشان می‌دهد دوره بازگشت سرمایه برای این سیستم، براساس ابعاد بنا، بین ۶ تا ۱۳ سال متغیر است (Ratanachotinun et al., 2016). در ادامه رویکرد غیرفعال، سقف‌های گالی پوش با طراحی لبه‌های باز در سقف شیبدار، تهویه مؤثر را فراهم کرده و هوای گرم را از ساختمان خارج می‌کنند (Mandal et al., 2021). خانه‌های با سقف گالی پوش به دلیل



تصویر ۱. نمودار اصول معماری بومی مازندران. مأخذ: Kasmai, 2003.

محاسباتی (CFD)^۲ برای بررسی جریان هوا است. نتایج این پژوهش از بررسی یک نمونه در بابل به‌دست آمده که به‌دلیل ویژگی‌های اقلیمی و رعایت اصول معماری بومی، نمایانگر معماری پایدار در اقلیم معتدل و مرطوب است. برای تعمیم نتایج به سایر ساختمان‌ها، مطالعات بیشتری لازم است.

مطالعات میدانی

با بررسی بناهای بومی بابل، مؤلفه‌های اقلیمی مؤثر بر تهویه طبیعی و آسایش حرارتی شناسایی شدند. ساختمان‌ها معمولاً به‌صورت شرقی-غربی طراحی می‌شوند تا از جریان هوا و تابش خورشید در زمستان استفاده شود. قرارگیری در ارتفاع بالاتر همراه با گره‌رو و کرسی چینی، از رطوبت سطحی محافظت می‌کند. بافت پراکنده و دیوارهای کوتاه، تهویه طبیعی را بهبود می‌بخشند و پنجره‌های بزرگ، جریان هوا را تسهیل می‌کنند. بام‌های شیب‌دار برای دفع سریع آب باران و فضاهای نیمه‌باز مانند ایوان‌ها و تراس‌ها برای جریان هوای مطبوع طراحی شده‌اند. طبقات اقامتی در همکف قرار گرفته و از مصالح طبیعی مانند سنگ، چوب و سفال برای پایداری بهره می‌برند. **تصاویر ۲ و ۳** نمونه‌هایی از بناهای بومی منطقه و برداشت‌های میدانی رانشان می‌دهند.

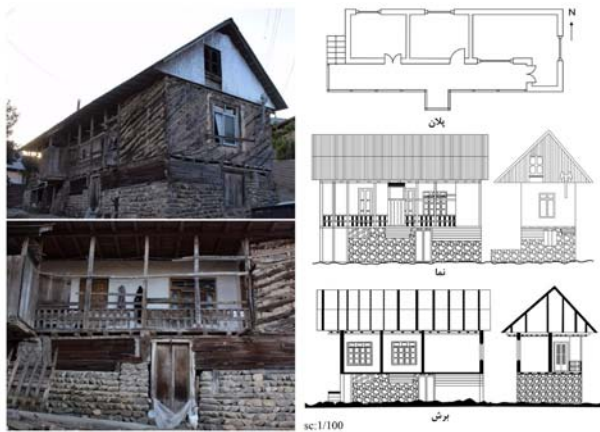
• معرفی مطالعه موردی

سایت انتخابی در شهر بابل با مساحت ۱۰۰۰۰ مترمربع یکی از چهار تیپ طراحی شده در مجموعه مسکونی است. تیپ بررسی شده با زاویه چرخش ۲۰ درجه و فاصله ۱۲ متری از ساختمان‌های مجاور قرار دارد. بنا شامل سه طبقه تریبلکس^۳ با مساحت‌های همکف ۱۳۵ مترمربع، طبقه اول ۷۰ مترمربع، طبقه دوم ۱۲۰ مترمربع و طبقه سوم ۸۵ مترمربع و اتاق زیرشیروانی ۴۵ مترمربع است. دودکش خورشیدی برای بهبود تهویه طبیعی در بخش میان و جنوبی بنا قرار دارد. در فونداسیون نیز از گره‌رو برای تهویه و حذف رطوبت استفاده شده است. **تصویر ۴** مدارک معماری مطالعه موردی رانشان می‌دهد.

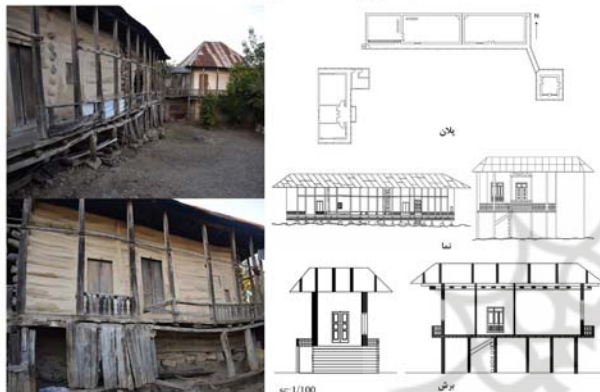
ساختمان‌ها در جهت شرق به غرب ساخته می‌شوند تا تهویه دوطرفه از طریق بازشوهای شمالی جنوبی ایجاد شود (Kasmai, 2003). برای بهبود تهویه طبیعی و کاهش رطوبت، خانه‌ها بر روی پی‌های چوبی سنگی و گلی ساخته می‌شوند (معماریان، ۱۳۷۶). همچنین در مناطق ساحلی از پوشش گالی، به‌عنوان سیستم تهویه طبیعی غیرفعال استفاده می‌شود (قبادیان، ۱۳۹۲). گالی، نوعی بام سبز است که از بقایای گیاهی مانند کاه برنج ساخته می‌شود (Koulet al., 2022). گالی به‌عنوان عایق طبیعی با حفره‌های هوا، ساختمان را در برابر گرما و سرما محافظت می‌کند و باعث می‌شود فضای داخل در تابستان خنک و در زمستان گرم باشد (Madhumathi et al., 2014). رطوبت سقف‌های گالی تحت تأثیر بارش و تابش آفتاب قرار دارد و بعد از بارندگی سریعاً کاهش می‌یابد (Simpson, 2022). در ساختمان‌های با سقف گالی پوش، مصرف انرژی و تقاضای سرمایش تا ۱۰/۵ درصد کاهش می‌یابد (Pragati et al., 2023). گالی به‌دلیل ضخامت بیشتر، عایق بهتری نسبت به پوشش‌های سقفی دیگر دارد و در برابر شرایط آب‌وهوایی مقاوم است (Simpson & Nevell, 2022). یکی دیگر از سیستم‌های غیرفعال تهویه طبیعی در مناطق مرطوب که به‌عنوان بادخیز عمل می‌کند، دودکش خورشیدی است (Shaeri et al., 2022). دودکش خورشیدی از یک کلکتور خورشیدی ساخته می‌شود که دو دیوار را به یک اتاق وصل می‌کند (Soto et al., 2021). حرکت هوا در دودکش به‌دلیل تغییر چگالی ناشی از تفاوت دما بین فضای داخلی و دودکش است (Shi et al., 2018). در مقایسه با بادگیر، دودکش خورشیدی می‌تواند دمای داخلی را در اقلیم‌های گرم و مرطوب بین سه تا هفت درجه سانتی‌گراد کاهش دهد اما بادگیرها در اقلیم‌های گرم و خشک عملکرد بهتری داشته و کاهش دمایی تا سه درجه سانتی‌گراد ایجاد می‌کنند (Khakzand et al., 2024). از نظر تهویه، دودکش خورشیدی در مطالعات میدانی جریان هوایی با سرعت ۰/۵ تا ۲/۵ متر بر ثانیه فراهم کرده است (Huang et al., 2023). در حالی که بادگیرها با ایجاد جریان بادی ۰/۳ تا ۱/۸ متر بر ثانیه، تهویه مؤثری در اقلیم‌های گرم و خشک فراهم می‌کنند (Farouk, 2020).

روش پژوهش

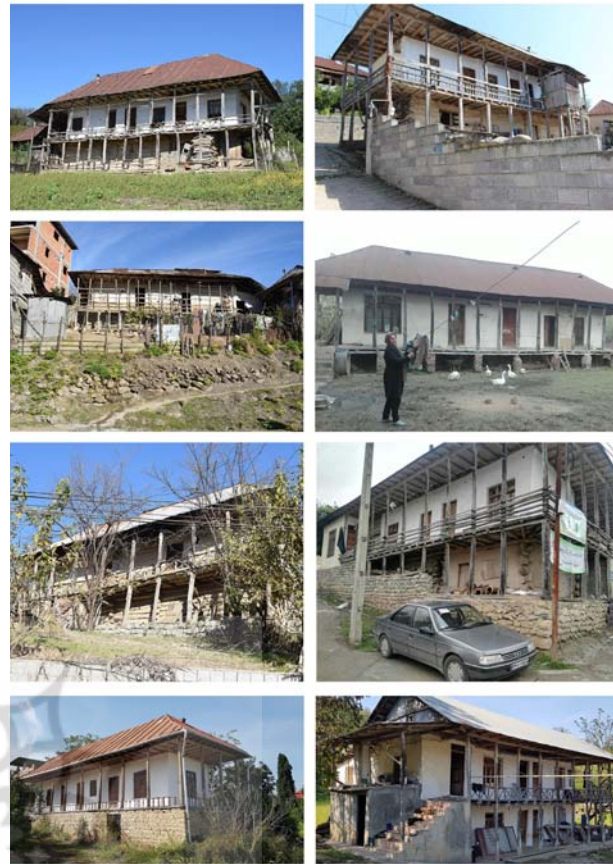
روش این پژوهش شامل سه بخش اصلی است: اسنادی-نظری، مطالعات میدانی و شبیه‌سازی کاربردی. در بخش اول، مفاهیم تهویه طبیعی، اقلیم معتدل و مرطوب، سیستم‌های دودکش خورشیدی و سقف گالی پوش و پیشینه این دو سیستم بررسی شد. همچنین، مؤلفه‌های اقلیمی مؤثر بر آسایش حرارتی و تهویه طبیعی شناسایی و در طراحی ساختمان مدنظر قرار گرفت. **تصویر ۱** نمودار اصول معماری بومی مازندران رانشان می‌دهد. در بخش دوم، داده‌های کیفی براساس مشاهدات میدانی و ویژگی‌های طبیعی و اقلیمی منطقه برای طراحی و شبیه‌سازی تهویه طبیعی در ساختمان بررسی شد. بخش سوم به شبیه‌سازی انرژی و تهویه طبیعی در یک ساختمان مسکونی در بابل اختصاص دارد و شامل شبیه‌سازی انرژی با نرم‌افزار دیزاین بیلدر^۱ و تحلیل دینامیک سیالات



مدارک معماری برداشت شده مطالعه موردی اول



مدارک معماری برداشت شده مطالعه موردی دوم



تصویر ۲. نمونه‌هایی از بناهای بومی روستاهای بابل. مأخذ: آرشیو نگارندگان.

تصویر ۳. نمونه برداشت‌های میدانی از معماری بومی بابل. مأخذ: آرشیو نگارندگان.

بحث

• خروجی‌های نرم‌افزار کلایمت کانسلتنت^۴

• به‌دلیل نبود فایل آب‌وهوایی اختصاصی شهر بابل، از اطلاعات ایستگاه هواشناسی بابلسر که دقت بالاتری دارد، استفاده شده است. تصویر ۵ شامل نمودارهای دما/رطوبت و گلباد برای سه ماه تابستان است که برای تحلیل اقلیمی و تهیه ورودی‌های نرم‌افزار دیزاین بیلدر، از نرم‌افزار کلایمت کانسلتنت استخراج شده‌اند. نمودار دما/رطوبت نشان می‌دهد در فصل‌های گرم، برای ایجاد آسایش حرارتی به ۱۲/۷ درصد تهویه طبیعی، ۱۷/۴ درصد رطوبت زدایی و ۶۰/۵ درصد بار سرمایشی نیاز است. نمودار گلباد نشان می‌دهد باد غالب از غرب با سرعت بالای ۱۰ متر بر ثانیه و دمای ۲۷ تا ۳۸ درجه سانتی‌گراد می‌وزد که این شرایط برای تهویه طبیعی مناسب نیست اما بادهایی که از جهت جنوب و جنوب شرقی با دمای ۲۰ تا ۲۷ درجه سانتی‌گراد با سرعت بین چهار تا شش متر بر ثانیه می‌وزد مناسب تهویه طبیعی است زیرا دما و سرعت آن‌ها در محدوده آسایش است.

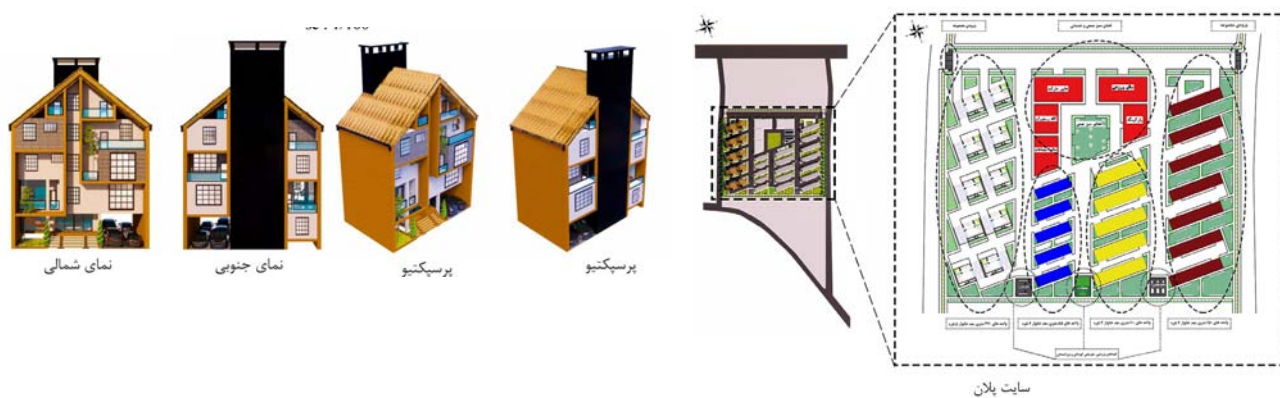
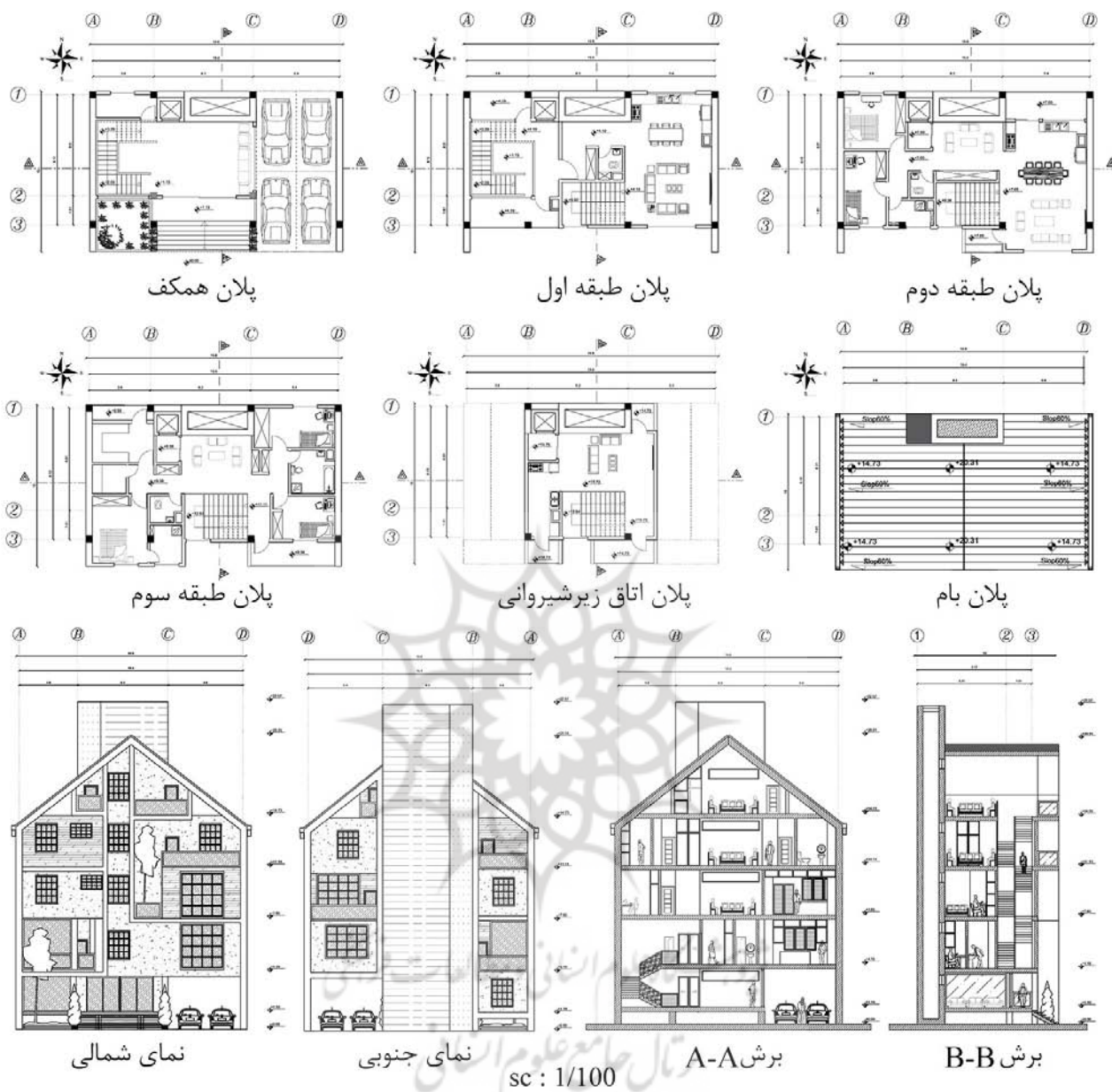
• اعتبار سنجی نرم‌افزار

برای ارزیابی دقت شبیه‌سازی انرژی این پژوهش، الگوی آزمایشی نمونه ۶۰۰ از استاندارد اشری^۵ انتخاب شد. شرایط مرزی و هندسه طبق مشخصات استاندارد، در محیط نرم‌افزار تعریف شده و شبیه‌سازی

سالیانه با استفاده از فایل آب‌وهوای انرژی پلاس^۶ انجام گرفت. مدل شامل یک بلوک مستطیلی ۶/۲×۸/۲ متر با ارتفاع ۲/۷ متر و ضخامت دیوار ۰/۱۷ متر است؛ دو پنجره ۲×۳ متری در دیوار جنوبی با لبه پایینی در ارتفاع ۰/۲ متر و عمق فرورفتگی ۰/۵ متر قرار گرفتند. مصالح دیوار، سقف، کف و شیشه‌ها مطابق مشخصات اشری وارد شده‌اند. نرخ نفوذ هوا^۷ ۰/۵ در ساعت و با برنامه زمانی دائم تعریف شد. شرایط داخلی شامل دمای مطلوب ۲۰ درجه سانتی‌گراد (گرمایش) و ۲۷ درجه سانتی‌گراد (سرمایش) با برنامه زمانی دائم است. سیستم گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع^۸ به صورت ساده^۹ و سایر تجهیزات غیرفعال تنظیم شده است؛ ضریب عملکرد سیستم‌ها^{۱۰} نیز برابر واحد در نظر گرفته شد. برای اعتبار سنجی، دمای خشک محیط بیرونی و تابش خورشیدی دریافتی دیوار جنوبی بررسی شد که انحراف آن‌ها از مقادیر مرجع کمتر از یک درصد بوده و دقت بالای شبیه‌سازی را تأیید می‌کند. جدول ۱، مقایسه نتایج مدل‌سازی در الگوی آزمایشی نمونه ۶۰۰ با مقادیر استاندارد اشری را نشان می‌دهد.

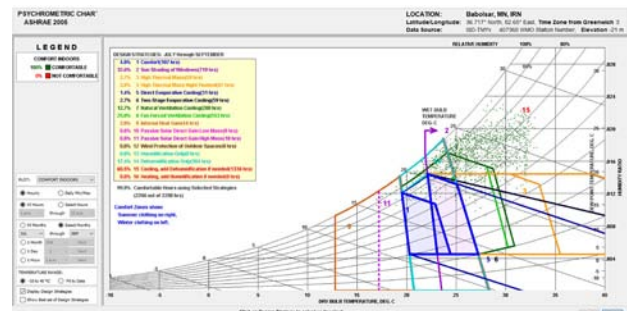
• مدل‌سازی و داده‌های ورودی به نرم‌افزار دیزاین بیلدر

برای شبیه‌سازی دقیق عملکرد حرارتی، شرایط مرزی طبق جدول ۲ در دیزاین بیلدر تعریف شد. کاربری فضای مسکونی با دمای هدف ۲۲ درجه سانتی‌گراد و بازتنظیم سرمایش ۲۶ درجه سانتی‌گراد و نرخ

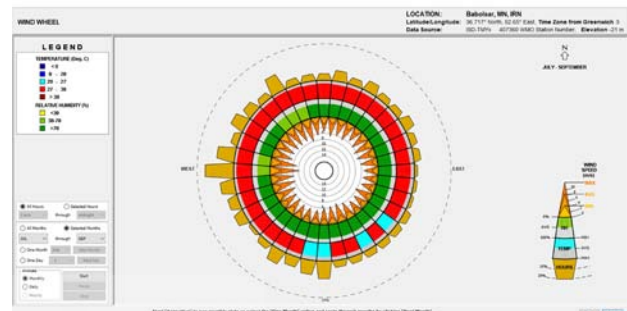


تصویر ۴. مدارک معماری مطالعه موردی. مأخذ: نگارندگان.

۲/۵ متر، فاصله از کف ۰/۸ متر است. برنامه زمان‌بندی سیستم گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع با ترکیبی از تهویه طبیعی و سرمایش مکانیکی برای ماه‌های فروردین تا شهریور تنظیم شده است: کولرگازی هشت صبح تا هشت شب، تهویه طبیعی و دودکش هشت شب تا هشت صبح فعال‌اند و سقف گالی پوش دائماً عمل می‌کند. نورپردازی داخلی براساس الگوی ال‌ای‌دی^{۱۱} تنظیم شده است. داده‌های آب‌وهوایی از فایل اقلیمی معتبر شهر بابلسر (نزدیک‌ترین ایستگاه به بابل) مربوط به دوره ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۸ استخراج شده است. در ادامه، ویژگی‌های هندسی و مصالح به کاررفته در طراحی دودکش خورشیدی به تفصیل بررسی شده‌اند. نسبت عرض به ارتفاع دودکش به عوامل زیادی از جمله تراز فشار خنثی، دمای محیط خارج و داخل، مساحت بازشوهای ورود هوای تازه، مساحت بازشوهای خروج هوای نامطلوب و نرخ تعویض هوای کاربری‌های مختلف بستگی دارد (Ashrae, 2017). عرض بهینه حفره هوا در دودکش خورشیدی بررسی شده و مشخص شده است که در الجزایر این مقدار برابر با $10/H$ است، که در آن H ارتفاع دودکش محسوب می‌شود (Bouchair, 1994). به‌طور مشابه، عرض بهینه حفره هوا در دودکش خورشیدی در ایران نیز بررسی شده و نتایج نشان داده‌اند که همین نسبت بین عرض حفره و ارتفاع دودکش بهینه است (Fakhari & Heidari, 2013). بر این اساس، ارتفاع دودکش ۲۰ متر و عرض حفره (عمق دودکش) دو متر در نظر گرفته شده است. دیوار فاصله بین فضای مسکونی و دودکش که به‌عنوان جاذب گرما عمل می‌کند، شامل پنج سانتی‌متر عایق و ۱۰ سانتی‌متر بتن است. لایه عایق موجود در این ساختار مانع از انتقال حرارت از دودکش خورشیدی به فضای اتاق می‌شود، که این امر از افزایش دمای فضای اصلی و همچنین هدررفت گرما جلوگیری می‌کند. هواکش‌های دودکش خورشیدی در هر طبقه از ساختمان نصب شده‌اند و دارای طول چهار متر، عرض ۰/۷ متر و ارتفاع ۲/۴۰ متر از سطح کف هستند. در تصویر ۶ جزئیات دودکش خورشیدی و تصویر ۷ مدل‌سازی ساختمان در نرم‌افزار



نمودار دما/رطوبت



نمودار گنبد

تصویر ۵. خروجی‌های نرم‌افزار کلاسیک کانسلنت. مأخذ: نگارندگان.

نفوذ هوای ۰/۷ بار در ساعت تعیین شد. دیوار خارجی با ۱۰ سانتی‌متر بلوک بتنی و پنج سانتی‌متر عایق با ضریب هدایت حرارتی W/m^2K ۰/۸۹۲، دیوار داخلی با ۱۰ سانتی‌متر بلوک بتنی با ضریب هدایت حرارتی W/m^2K ۰/۰۹۷، سقف گالی پوش به ابعاد $16/5 \times 10$ متر دارای ضخامت ۴۵ سانتی‌متر با ضریب هدایت حرارتی W/m^2K ۰/۲۲۶، سقف سفال پوش با ۲/۵ سانتی‌متر سفال، دو سانتی‌متر عایق هوا و پنج میلی‌متر نمد با ضریب هدایت حرارتی W/m^2K ۲/۹۳ و دودکش خورشیدی با ۱۰ سانتی‌متر فلز چدن آهنی و پنج سانتی‌متر عایق با ضریب هدایت حرارتی W/m^2K ۳/۲۱۹ و سایر لایه‌ها به‌طور دقیق مدل‌سازی شده‌اند. نسبت سطح پنجره به دیوار ۳۰ درصد، ارتفاع پنجره

جدول ۱. خروجی داده‌های دیوار جنوبی در شبیه‌سازی برای اعتبارسنجی. مأخذ: نگارندگان.

منبع	تاریخ / زمان	دمای حباب خشک هوای خارج (درجه سانتی‌گراد)	توان تابشی دریافتی خورشید (کیلووات)
Ashrae, 2017	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۰۱:۰۰	۲۰/۷۰۸۳۳	۰
	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۰۲:۰۰	۱۹/۶۵	۰
	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۰۳:۰۰	۱۹/۱۰۸۳۳	۰
	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۰۴:۰۰	۱۸/۵۵	۰
	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۰۵:۰۰	۱۸/۳	۰/۰۴۱۲۳۷
	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۰۶:۰۰	۱۸/۹۴۱۶۷	۰/۷۲۸۱۲
	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۰۷:۰۰	۲۱/۳۸۳۳۳	۱/۹۱۲۰۹۵
	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۰۸:۰۰	۲۴/۴۳۳۳۳	۲/۹۵۳۸۵۳
	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۰۹:۰۰	۲۷/۵۲۵	۵/۵۸۲۸۴۶
	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۱۰:۰۰	۲۹/۵۴۱۶۷	۸/۲۴۶۲۳۳

ادامه جدول ۱.

منبع	تاریخ/ زمان	دمای حباب خشک هوای خارج (درجه سانتیگراد)	توان تابشی دریافتی خورشید (کیلووات)
Ashrae, 2017	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۱۱:۰۰	۳۰/۳۵	۹/۸۹۱۰۳۵
	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۱۲:۰۰	۳۱/۸۸۳۳۳	۱۰/۳۲۵۵
	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۱۳:۰۰	۳۳/۰۹۱۶۷	۱۰/۱۳۷۰۶
	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۱۴:۰۰	۳۳/۹۴۱۶۷	۸/۸۱۵۷۶۶
	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۱۵:۰۰	۳۴/۴	۶/۷۳۱۵۸۵
	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۱۶:۰۰	۳۴/۱۰۸۳۳	۳/۹۴۹۴۶۸
	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۱۷:۰۰	۳۳/۵۵	۱/۸۰۵۱۱۹
	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۱۸:۰۰	۳۱/۰۲۵	۱/۱۵۹۳۰۴
	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۱۹:۰۰	۲۸/۴۶۶۶۷	۰/۳۵۳۵۹۴
	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۲۰:۰۰	۲۷/۱۵۸۳۳	۰/۰۱۷۴۲۶
	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۲۱:۰۰	۲۶/۰۵۸۳۳	.
	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۲۲:۰۰	۲۴/۶۰۸۳۳	.
	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۲۳:۰۰	۲۳/۹	.
	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۰۱:۰۰	۲۰/۷۰۸۳۳	.
	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۰۲:۰۰	۱۹/۶۵	.
	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۰۳:۰۰	۱۹/۱۰۸۳۳	.
	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۰۴:۰۰	۱۸/۵۵	.
	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۰۵:۰۰	۱۸/۳	۰/۰۴۱۲۳۷
	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۰۶:۰۰	۱۸/۹۴۱۶۷	۰/۷۲۸۱۲
	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۰۷:۰۰	۲۱/۳۸۳۳۳	۱/۹۱۲۰۹۵
	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۰۸:۰۰	۲۴/۴۳۳۳۳	۲/۹۵۳۸۵۳
نگارندگان	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۰۹:۰۰	۲۷/۵۲۵	۵/۵۸۲۸۴۶
	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۱۰:۰۰	۲۹/۵۴۱۶۷	۸/۲۴۶۲۳۳
	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۱۱:۰۰	۳۰/۳۵	۹/۸۹۱۰۳۵
	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۱۲:۰۰	۳۱/۸۸۳۳۳	۱۰/۳۲۵۵
	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۱۳:۰۰	۳۳/۰۹۱۶۷	۱۰/۱۳۷۰۶
	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۱۴:۰۰	۳۳/۹۴۱۶۷	۸/۸۱۵۷۶۶
	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۱۵:۰۰	۳۴/۴	۶/۷۳۱۵۸۵
	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۱۶:۰۰	۳۴/۱۰۸۳۳	۳/۹۴۹۴۶۸
	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۱۷:۰۰	۳۳/۵۵	۱/۸۰۵۱۱۹
	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۱۸:۰۰	۳۱/۰۲۵	۱/۱۵۹۳۰۴
	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۱۹:۰۰	۲۸/۴۶۶۶۷	۰/۳۵۳۵۹۴
	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۲۰:۰۰	۲۷/۱۵۸۳۳	۰/۰۱۷۴۲۶
	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۲۱:۰۰	۲۶/۰۵۸۳۳	.
	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۲۲:۰۰	۲۴/۶۰۸۳۳	.
	۷/۲۷/۲۰۰۲ ۲۳:۰۰	۲۳/۹	.

جدول ۲. اطلاعات فعالیت، بازشو، نور، تأسیسات مکانیکی، ساخت در نرم‌افزار دیزاین بیلدر. مأخذ: نگارندگان.

فعالیت			
الگوی فعالیت	فضای مسکونی	داده	
کنترل محیطی (دما سانتی‌گراد)	گرم کردن	۲۲	
	تنظیم مجدد گرمایش	۱۸	
	خنک‌کننده	۲۲	
	تنظیم مجدد سرمایش	۲۶	
جزئیات اجرایی			
هوادهی	نرخ ثابت	۰/۷	داده
مصالح (ضریب انتقال حرارت)	دیوار خارجی	۰/۸۹۲	بلوک بتنی
	دیوار داخلی	۱/۰۹۷	بلوک بتنی
	سقف	۰/۲۲۶	گالی
		۲/۹۳	سفال
	دودکش خورشیدی	۳/۲۱۹	فلز
نورپردازی			
ال‌ای‌دی	ال‌ای‌دی		
بازشو			
الگوی پنجره	دوبل با ضخامت و فاصله شش میلی‌متر	داده	
	نسبت پنجره به دیوار (درصد)	۳۰	
	ارتفاع پنجره (متر)	۲/۵	
ابعاد	فاصله از کف ساختمان (متر)	۰/۸	
گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع			
الگوی گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع	مجزا بدون هوای تازه		
	(ترکیبی از سرمایش مکانیکی و تهویه طبیعی)		
سرمایش مکانیکی		کولرگازی	
تهویه طبیعی		از طریق هوای خارج، دودکش خورشیدی و سقف گالی پوش	
برنامه زمان‌بندی	سرمایش مکانیکی	هشت صبح تا هشت شب شش ماه گرم سال (فروردین تا شهریور)	
	تهویه طبیعی	هشت شب تا هشت صبح شش ماه گرم سال (فروردین تا شهریور)	
	دودکش خورشیدی	هشت شب تا هشت صبح شش ماه گرم سال (فروردین تا شهریور)	
	سقف گالی پوش	۲۴ ساعت از شبانه‌روز شش ماه گرم سال (فروردین تا شهریور)	

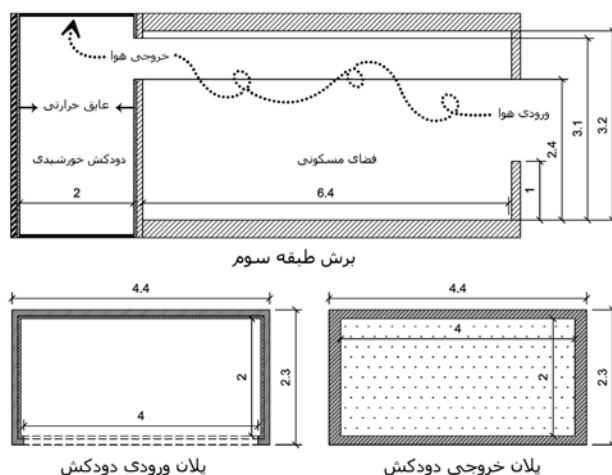
دیزاین بیلدر نشان داده شده است، باید اشاره کرد که فرایند شبیه‌سازی همواره با محدودیت‌هایی همراه است. در این پژوهش نیز مدل‌سازی تابش خورشیدی، جریان هوای طبیعی و برخی عوامل محیطی با ساده‌سازی‌هایی مواجه بوده که ناشی از ماهیت مدل‌سازی عددی و محدودیت در بازنمایی دقیق تمام شرایط واقعی است. با این وجود، نرم‌افزار تأثیر قابل توجهی بر نتیجه‌گیری نهایی پژوهش ندارد.

نرم‌افزار دیزاین بیلدر به عنوان یکی از ابزارهای معتبر در حوزه شبیه‌سازی انرژی ساختمان، توانایی بالایی در مدل‌سازی تهویه طبیعی دارد. در این پژوهش، با وجود ساده‌سازی‌های ناگزیر، پارامترهای کلیدی مرتبط با تهویه طبیعی با دقت مناسبی شبیه‌سازی شده‌اند و محدودیت‌های نرم‌افزار تأثیر قابل توجهی بر نتیجه‌گیری نهایی پژوهش ندارد.

انرژی ۲۱۲/۵۹ کیلووات ساعت بر مترمربع بود که با هدف کاهش مصرف انرژی مغایرت داشت. در حالت سوم، ترکیب تهویه طبیعی و سرمایش مکانیکی با حفظ شرایط آسایش حرارتی مشابه حالت دوم، مصرف انرژی را به ۱۶۴/۲۰ کیلووات ساعت بر مترمربع کاهش داد که ۲۳ درصد صرفه جویی نسبت به سرمایش مکانیکی داشت؛ بنابراین، ترکیب تهویه طبیعی و سرمایش مکانیکی به عنوان راهکار بهینه برای ماههای فروردین، تاشهر یور استفاده شد.

- تأثیر دودکش خورشیدی در میزان تعادل حرارتی از طریق تهویه طبیعی و میزان کل هوای تازه

در این بخش، تأثیر دودکش خورشیدی بر تعادل حرارتی^{۱۴} و کل هوای تازه^{۱۵} از طریق دو نمودار بررسی می‌شود. نمودار تعادل حرارتی برای هر ماه میزان حرارت دریافتی یا از دست‌رفته در بخش‌های مختلف ساختمان را نشان می‌دهد. اعداد منفی نشان‌دهندهٔ از دست‌دادن حرارت و اعداد مثبت نشان‌دهندهٔ به دست آوردن حرارت به کیلووات ساعت هستند. بخش تهویه طبیعی داخلی^{۱۶} که تأثیر دودکش خورشیدی را نشان می‌دهد، با رنگ بنفش مشخص شده است. نمودار کل هوای تازه و تعداد تعویض هوا را هر ماه جداگانه نشان می‌دهد و شامل تهویه مکانیکی، طبیعی و نفوذ هوا است. **تصویر ۸** تعادل حرارتی از طریق تهویه طبیعی و میزان هوای تازه در مدل گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع با ترکیب تهویه طبیعی و سرمایش مکانیکی در کل طبقات ساختمان، با دودکش خورشیدی و بدون دودکش خورشیدی در شش ماه گرم سال را نشان می‌دهد. مقایسهٔ دو حالت نشان می‌دهد، تهویه با دودکش خورشیدی در چهار ماه گرم سال (فروردین، اردیبهشت، خرداد، شهریور) به‌طور میانگین ۷۰۷ کیلووات ساعت بیشتر از حالت بدون دودکش خورشیدی، حرارت ساختمان را کاهش داده و در دو ماه گرم سال (تیر و مرداد) ۳۰۷ کیلووات ساعت بیشتر از حالت بدون دودکش خورشیدی، حرارت را افزایش می‌دهد. بنابراین، استفاده از دودکش خورشیدی در چهار ماه از شش ماه گرم سال، تعادل حرارتی را بهبود می‌بخشد. تهویه با دودکش خورشیدی در این شش ماه، هوای



تصویر ۶. جزئیات دودکش خورشیدی. مأخذ: نگارندگان.

بافتها

- ارزیابی عملکرد حرارتی و مصرف انرژی سیستم تهویه ترکیبی نسبت به روش‌های منفرد تهویه طبیعی و سرمایش مکانیکی

در این پژوهش، سیستم گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع برای شش ماه گرم (فروردین تا شهریور) در سه حالت بررسی شد. برای اندازه‌گیری آسایش حرارتی براساس استاندارد آشری ۵۵، میزان آسایش حرارتی افراد^{۱۲} باید در محدوده بین ۰/۵- تا ۰/۵+ باشد و میزان نارضایتی حرارتی افراد^{۱۳} کمتر از ۱۵ درصد باشد. در حالت اول، فقط تهویه طبیعی با مصرف انرژی ۰/۳ تا ۲۳ کیلووات ساعت بر مترمربع، شرایط آسایش حرارتی را تأمین نکرد؛ آسایش حرارتی در محدوده نامناسب بالاتر از ۰/۵+ و پایین‌تر از ۰/۵- و نارضایتی حرارتی بیش از ۱۵ درصد بود. در حالت دوم، فقط سرمایش مکانیکی، آسایش حرارتی را در تمامی شش ماه تأمین کرد و شاخص‌های آسایش حرارتی بین ۰/۵- تا ۰/۵+ و نارضایتی کمتر از ۱۵ درصد در دامنه مجاز قرار گرفت اما مصرف



تصویر ۷. مدل سازی ساختمان در نرم افزار دیزاین بیلدر. مأخذ: نگارندگان.

و سرمایه‌های مکانیکی، در کل طبقات ساختمان، در مقایسه سقف گالی پوش و سفال پوش در شش ماه گرم سال نشان می‌دهد. سقف گالی پوش از طریق تهویه طبیعی به‌طور میانگین ۳۸/۴ کیلووات ساعت حرارت بیشتری نسبت به سقف سفال پوش دفع کرده است. همچنین، سقف گالی پوش در این بازه زمانی ۳۶۱۳ کیلووات ساعت حرارت کمتری دریافت کرده است. اختلاف میزان تعویض هوادر ساختمان در مقایسه سقف گالی پوش و سفال پوش تقریباً برابر است. **جدول ۴** میزان اختلاف تعادل حرارتی از طریق تهویه طبیعی و میزان اختلاف تعادل حرارتی از طریق سقف خارجی را در کل طبقات ساختمان، در مقایسه سقف گالی پوش و سفال پوش در شش ماه گرم سال نشان می‌دهد.

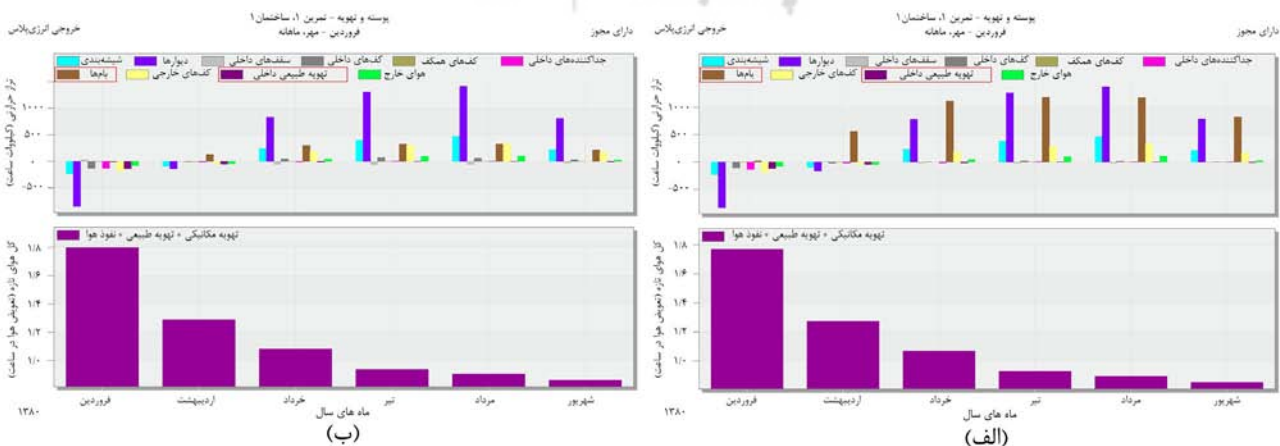
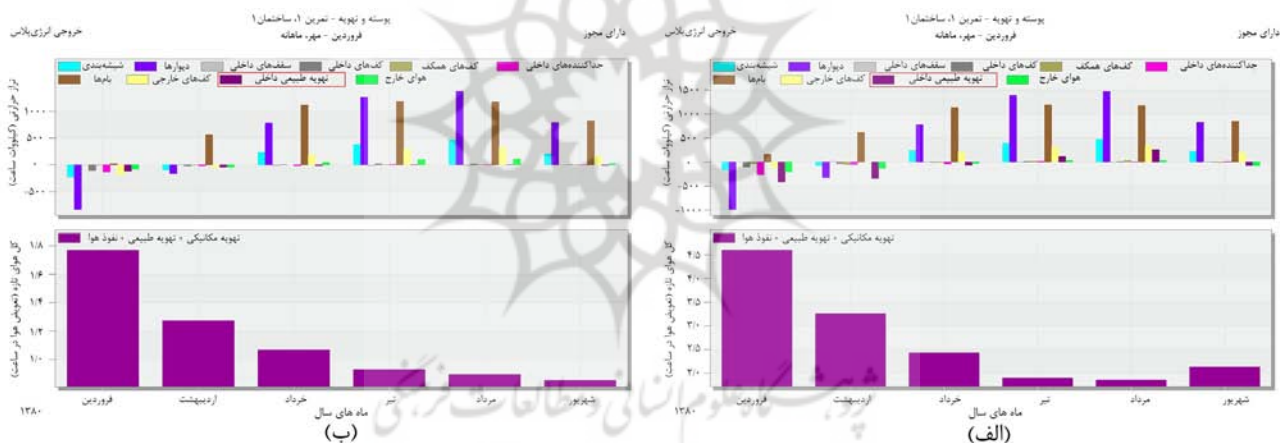
• تأثیر دودکش خورشیدی بر میزان تهویه طبیعی از طریق دینامیک سیالات محاسباتی

در بررسی تأثیر دودکش خورشیدی بر تهویه طبیعی طبقه دوم، شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی طی بازه ۴ تا ۱۰ اردیبهشت، ساعت سه صبح انجام شد. شبکه‌بندی باسول‌های محاسباتی مکعبی به‌صورت یکنواخت، با ابعاد پایه ۲۰ و تلو رانس پنج سانتی‌متر، ایجاد شد.

ساختمان را ۹/۹ بار بیشتر از حالت بدون دودکش خورشیدی تعویض کرده است. **جدول ۳** میزان اختلاف تعادل حرارتی و میزان اختلاف کل هوای تازه در طبقات ساختمان، با دودکش خورشیدی و بدون دودکش خورشیدی در شش ماه گرم سال را نشان می‌دهد.

• تأثیر سقف گالی پوش در میزان تعادل حرارتی از طریق تهویه طبیعی و سقف خارجی و میزان کل هوای تازه

در این بخش، با استفاده از نمودارهای تعادل حرارتی و میزان هوای تازه، تأثیر سقف گالی پوش در تعادل حرارتی از طریق تهویه طبیعی و سقف خارجی بررسی می‌شود. همچنین، مقایسه‌ای بین سقف گالی پوش و سقف سفال پوش انجام شده است. انتخاب سقف سفال پوش به دلیل استفاده گسترده آن در ساختمان‌های قدیمی و جدید شهر بابل در اقلیم معتدل و مرطوب است. برای این ارزیابی، بخش تهویه طبیعی داخلی و سقف خارجی^{۱۷} در نمودار تعادل حرارتی بررسی می‌شود که با رنگ‌های بنفش و قهوه‌ای نشان داده شده است. **تصویر ۹** میزان تعادل حرارتی از طریق تهویه طبیعی و سقف خارجی و میزان هوای تازه را در مدل گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع، با ترکیبی از تهویه طبیعی



جدول ۳. میزان اختلاف تعادل حرارتی از طریق تهویه طبیعی ساختمان و اختلاف کل هوای تازه با وجود و عدم وجود تهویه دودکش خورشیدی. مأخذ: نگارندگان.

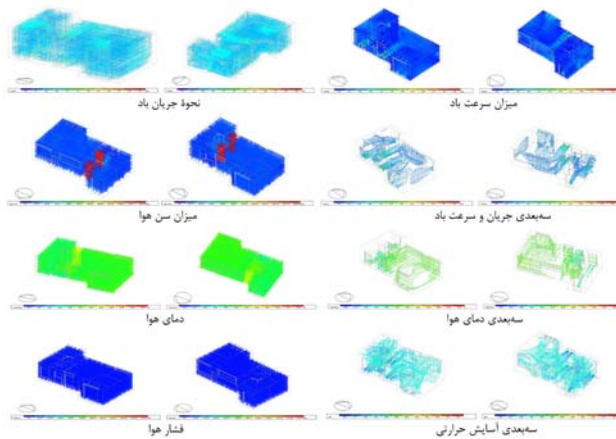
نوع شاخص	شرح شرایط	ماه‌های سال					
		فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
میزان حرارت	میزان کاهش یا افزایش حرارت از ساختمان از طریق تهویه دودکش خورشیدی بر حسب کیلووات ساعت	-۴۱۵	-۳۳۸	-۶۴	۱۱۹	۲۵۳	-۷۰
	میزان کاهش یا افزایش حرارت از ساختمان در نبود تهویه دودکش خورشیدی بر حسب کیلووات ساعت	-۱۱۶	-۴۴	-۱۳	۱	۰/۷	-۷
	میزان اختلاف حرارت ساختمان با وجود و عدم وجود تهویه دودکش خورشیدی بر حسب کیلووات ساعت	-۲۹۹	-۲۹۴	-۵۱	۱۱۸	۲۵۲	-۶۳
میزان تعویض هوا	میزان تعویض هوا در ساختمان از طریق تهویه دودکش خورشیدی بر حسب تعداد در ساعت	۴/۶	۳/۲	۲/۴	۱/۹	۱/۸	۲/۱
	میزان تعویض هوا در ساختمان در نبود تهویه دودکش خورشیدی بر حسب تعداد در ساعت	۱/۷	۱/۲	۹/۰	۸/۰	۷/۰	۰/۸
	میزان اختلاف تعویض هوا در ساختمان با وجود و عدم وجود تهویه دودکش خورشیدی بر حسب تعداد در ساعت	۹/۲	۲	۱/۵	۱/۱	۱/۱	۱/۳

جدول ۴. میزان اختلاف تعادل حرارتی ساختمان از طریق تهویه طبیعی و اختلاف تعادل حرارتی ساختمان از طریق سقف خارجی در مقایسه سقف گالی پوش و سفال پوش. مأخذ: نگارندگان.

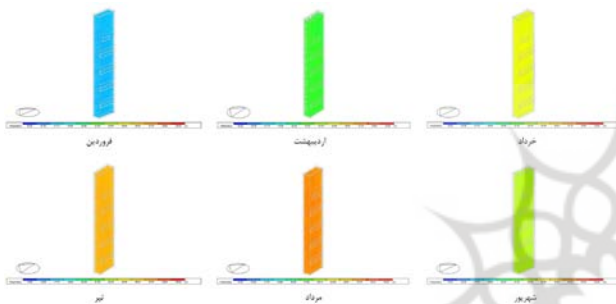
نوع شاخص	شرح شرایط	ماه‌های سال					
		فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
میزان حرارت	میزان کاهش یا افزایش حرارت از طریق تهویه با وجود سقف گالی پوش بر حسب کیلووات ساعت	-۱۳۷	-۵۳	-۱۴	-۰/۹	-۰/۸	-۱۱
	میزان کاهش یا افزایش حرارت از طریق تهویه با وجود سقف سفال پوش بر حسب کیلووات ساعت	-۱۱۶	-۴۴	-۱۳	۱	۰/۷	-۷
	میزان اختلاف حرارت ساختمان از طریق تهویه در مقایسه سقف گالی پوش و سفال پوش بر حسب کیلووات ساعت	-۲۱	-۹	-۱	-۱/۹	-۱/۵	-۴
میزان حرارت	میزان دریافت حرارت از ساختمان از طریق سقف گالی پوش بر حسب کیلووات ساعت	-۱۵	۱۲۶	۲۹۶	۳۲۳	۳۲۵	۲۱۱
	میزان دریافت حرارت از ساختمان از طریق سقف سفال پوش بر حسب کیلووات ساعت	۲۴	۵۶۱	۱۱۱۳	۱۱۸۴	۱۱۷۴	۸۲۳
	میزان اختلاف کاهش حرارت با وجود سقف گالی پوش نسبت به سقف سفال پوش بر حسب کیلووات ساعت	۳۹	۴۳۵	۸۱۷	۸۶۱	۸۴۹	۶۱۲

داخلی در محدوده ۲۰ تا ۲۲ درجه سانتی گراد (آسایش حرارتی) بوده و فشار مثبت هوا باعث می شود هوای تازه وارد شده بیشتر از هوای خروجی باشد که تهویه طبیعی را تضمین می کند. شاخص سن هوا (مدت زمان گردش هوا) به حداکثر ۳۰۰ ثانیه می رسد که نشان دهنده تعویض کامل هوا هر سه تا چهار دقیقه است و کیفیت هوای داخلی حفظ می شود. این شرایط به تعادل حرارتی مطلوب در طبقه دوم منجر می شود. همچنین عملکرد حرارتی دودکش خورشیدی از طریق دینامیک سیالات محاسباتی برای دوره ۴ تا ۱۰ ماه های فروردین، اردیبهشت، خرداد، تیر، مرداد و شهریور در ساعت سه صبح بررسی شد که دمای هوای دودکش به ترتیب ماه ها به صورت میانگین، ۱۸،

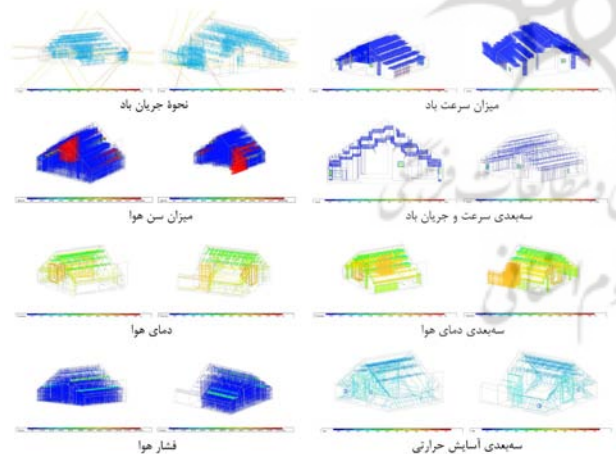
با توجه به اینکه برای بررسی دودکش خورشیدی از طبقه دوم استفاده شد، تعداد کل سلول های این طبقه ۱۱۵۴۴۴ و نسبت بیشینه به کمینه طول اضلاع سلول ها ۹/۶۰۰ و در ناحیه دودکش خورشیدی تعداد کل سلول ها ۱۵۸۷۶ و نسبت بیشینه به کمینه طول اضلاع ۲/۹۰۱ به دست آمد که نشان دهنده کیفیت مناسب شبکه محاسباتی است. مدل آشفته دو معادله ای $k-\epsilon$ و روش عددی ترکیبی برای حل جریان استفاده شد و ۱۰۰۰۰ تکرار برای تضمین همگرایی در نظر گرفته شد. **تصویر ۱۰** خروجی های دینامیک سیالات محاسباتی را نشان می دهد. جریان هوا از هواکش های دودکش خورشیدی به تهویه طبیعی طبقه دوم کمک کرده و هوای تازه را به طور یکنواخت پخش می کند. دمای



تصویر ۱۰. خروجی‌های دینامیک سیالات محاسباتی در بررسی تأثیر دودکش خورشیدی بر میزان تهویه طبیعی در طبقه دوم. مأخذ: نگارندگان.



تصویر ۱۱. خروجی‌های دینامیک سیالات محاسباتی دمای هوای دودکش خورشیدی در شش ماه بهار و تابستان. مأخذ: نگارندگان.



تصویر ۱۲. خروجی‌های دینامیک سیالات محاسباتی در بررسی تأثیر سقف گالی پوش بر میزان تهویه طبیعی در طبقه زیر شیروانی. مأخذ: نگارندگان.

فراهم می‌کند. تهویه با سقف گالی پوش ۲۴ ساعت شبانه‌روز به‌طور میانگین ۳۸/۴ کیلووات‌ساعت بیشتر از سقف سفال پوش حرارت فضای ساختمان را کاهش داده و ۳۶۱۳ کیلووات‌ساعت حرارت کمتری دریافت کرده است. ترکیب تهویه دودکش خورشیدی و سقف گالی پوش در شش ماه بهار و تابستان به‌طور قابل توجهی تعادل حرارتی ساختمان را بهبود می‌بخشد. این ترکیب در مقایسه با سقف سفال پوش و بدون دودکش خورشیدی، به‌طور میانگین ۴۳/۴ کیلووات‌ساعت

۲۱، ۲۴، ۲۶، ۲۷ و ۲۳ درجه قرار گرفته است. کمینه دما در فروردین و بیشینه دما در مرداد ثبت شد که ناشی از تفاوت تابش، زاویه خورشید و دمای بیرون است. تصویر ۱۱، خروجی‌های دینامیک سیالات محاسباتی دمای هوای دودکش خورشیدی را نشان می‌دهد.

• تأثیر سقف گالی پوش بر میزان تهویه طبیعی از طریق دینامیک سیالات محاسباتی

در بررسی تأثیر سقف گالی پوش بر تهویه طبیعی طبقه زیر شیروانی، شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی طی بازه ۴ تا ۱۰ اردیبهشت، ساعت سه صبح انجام شد. شبکه‌بندی، مدل آشفتگی، تعداد تکرار و سایر تنظیمات مانند طبقه دوم انجام شد. تعداد کل سلول‌ها ۴۹۹۳۸ و نسبت بیشینه به کمینه ضلع سلول‌ها ۶۹۹/۱ به دست آمد که نشان‌دهنده کیفیت مناسب شبکه محاسباتی است. تصویر ۱۲، خروجی‌های دینامیک سیالات محاسباتی را نشان می‌دهد. جریان هوا از سقف گالی پوش به‌طور یکنواخت در فضای زیر شیروانی توزیع شده و تهویه طبیعی را تسهیل می‌کند. دمای هوا در این فضا بین ۲۰ تا ۲۳ درجه سانتی‌گراد (محدوده آسایش) است و فشار مثبت داخلی نشان‌دهنده ورود هوای تازه بیشتر از هوای خروجی است که تأثیر تهویه طبیعی مؤثر را نشان می‌دهد. شاخص سن هوا حداکثر ۳۰۰ ثانیه است که به معنای تعویض کامل هوا هر سه تا چهار دقیقه است و کیفیت هوای داخلی حفظ می‌شود. این شرایط باعث ایجاد تعادل حرارتی مطلوب در زیر شیروانی می‌شود.

نتیجه‌گیری

در اقلیم معتدل و مرطوب بابل، مؤلفه‌های بومی مانند جهت‌گیری شرقی-غربی، گریه‌رو، کرسی چینی، پنجره‌های بزرگ، بام‌های شیب‌دار، فضاهای نیمه‌باز مانند ایوان‌ها و تراس‌ها و مصالح طبیعی تأثیر زیادی بر تهویه طبیعی و آسایش حرارتی دارد. این مؤلفه‌ها همراه با تهویه طبیعی، تعادل حرارتی را در ماه‌های گرم بهبود می‌دهند و نیاز به تجهیزات مکانیکی را کاهش داده و مصرف انرژی را کم می‌کنند. سیستم‌های تهویه طبیعی مانند دودکش خورشیدی و سقف گالی پوش به بهبود تعادل حرارتی کمک می‌کنند. استفاده از دودکش خورشیدی در چهار ماه گرم سال (فروردین، اردیبهشت، خرداد، شهریور) باعث بهبود تعادل حرارتی می‌شود. تهویه از طریق دودکش خورشیدی با برنامه زمان‌بندی از هشت شب تا هشت صبح در این ماه‌ها به‌طور میانگین ۷۰۷ کیلووات‌ساعت بیشتر از حالت بدون دودکش خورشیدی حرارت فضا را کاهش می‌دهد اما در دو ماه دیگر (تیر و مرداد) به‌طور میانگین ۳۰۷ کیلووات‌ساعت بیشتر از حالت بدون دودکش خورشیدی حرارت فضا را افزایش می‌دهد. در کل، تهویه با دودکش خورشیدی در شش ماه بهار و تابستان به‌طور میانگین ۴۰۰ کیلووات‌ساعت حرارت بیشتر از حالت بدون دودکش کاهش می‌دهد. همچنین، تهویه با دودکش خورشیدی در این دوره شش ماهه، هوای ساختمان را در هر ساعت ۹/۹ بار بیشتر از حالت بدون دودکش تعویض کرده است. استفاده از سقف گالی پوش در شش ماه بهار و تابستان به بهبود تعادل حرارتی را

- Ashrae. (2017). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Bouchair, A. (1994). Solar chimney for promoting cooling ventilation in southern Algeria. *Building Services Engineering Research and Technology*, 15(2), 81-93. <https://doi.org/10.1177/014362449401500203>
- Coşar, M., Harputlugil, G. U., & De Wilde, P. (2023). Rethinking natural ventilation strategies in buildings through simulation. *Building Simulation Conference*. <http://hdl.handle.net/20.500.12416/8515>
- Ejstrup, H., & Beim, A. (2023). *prototyping thatched facades—global scaling of local knowledge*. in *world congress of architects* (pp. 483-490). Springer International Publishing.
- Farouk, M. (2020). Comparative study of hexagon & square windcatchers using CFD simulations. *Journal of Building Engineering*, 31, 101366. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2020.101366>
- Fakhari, M., & Heidari, S. (2013). The Study on ventilation performance of solar chimney and optimal dimensions. *Journal of Fine Arts: Architecture & Urban Planning*, 18(2), 83-88. <https://doi.org/10.22059/jfaup.2013.50536>
- Fine, J. P., Zhang, S., Li, Y., & Touchie, M. F. (2022). Analysis of solar chimney ventilation systems in high-rise residential buildings using parallel flow networks. *Building and Environment*, 218, 109096. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109096>
- Guardigli, L., & Barbolini, P. C. F. (2014). Passive cooling through ventilation shafts in high-density zero energy buildings: a design strategy to integrate natural and mechanical ventilation in temperate climates. 35th AIVC Conference: Ventilation and airtightness in transforming the building stock to high performance.
- Hall, N. (1988). *Thatching: A Handbook*. Intermediate Technology. Intermediate Technology Publications.
- He, G., & Lv, D. (2022). Distributed heat absorption in a solar chimney to enhance ventilation. *Solar Energy*, 238, 315-326. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.04.047>
- Heath, S., & Gidley, S. (2012). *The green building revolution*. Island Press.
- Huang, Y., Liu, X., Shi, L., Dong, B., & Zhong, H. (2023). Enhancing solar chimney performance in urban tunnels: Investigating the impact factors through experimental and theoretical model analysis. *Energy*, 282, 128329. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128329>
- Holger, K. (2006). *Stay cool: a design guide for the built environment in hot climates*. Khak.
- Hunnisset, J. (2021). Understanding thatched buildings. *Journal of Building Survey, Appraisal & Valuation*, 10(1), 46-61.
- Kasmai, M. (2003). *Climate architecture*. Khak.
- Kalyon, T. (2010). *Natural ventilation in buildings: architectural concepts, consequences and possibilities*. Tahan.
- Khakzand, M., Deljouiee, B., Chahardoli, S., & Siavashi, M. (2024). Radiative cooling ventilation improvement using an integrated system of windcatcher and solar chimney. *Journal of Building Engineering*, 83,

حرارت کمتری از فضای داخلی کاهش داده، نرخ تعویض هوا را ۹/۹ بار در ساعت افزایش داده و ۳۶۱۳ کیلووات ساعت جذب حرارت را کاهش می دهد. این یافته ها تأثیر مثبت دودکش خورشیدی و سقف گالی پوش را در بهبود مصرف انرژی، تعادل حرارتی و کیفیت هوای داخلی نشان می دهند. باید در نظر داشت که نمونه انتخاب شده در این مطالعه، از حیث ویژگی های کالبدی و اقلیمی، با طیف زیادی از ساختمان های مسکونی رایج در اقلیم معتدل و مرطوب شمال کشور، به ویژه در شهر بابل، هم خوانی دارد. از این رو، یافته های این پژوهش حداقل از منظر کیفی، قابلیت تعمیم به شرایط مشابه را دارا بوده و می تواند به عنوان مبنایی مؤثر جهت مطالعات آتی و طراحی های سازگار با شرایط اقلیمی منطقه مورد نظر قرار گیرد. باین حال، پیشنهاد می شود در پژوهش های آتی، نمونه های موردی متعددی با تمرکز بر پارامترهایی نظیر ارتفاع و ابعاد دودکش خورشیدی، نوع و شیب پوشش سقف گالی پوش، شکل هندسی، مساحت، نوع مصالح، جهت یابی نسبت به تابش خورشیدی و جریان هوا و سایر مؤلفه های مؤثر بررسی شوند تا امکان توسعه نتایج و دستیابی به الگوهای بهینه فراهم گردد.

اعلام عدم تعارض منافع

نویسندگان اعلام می دارند که در انجام این پژوهش هیچ گونه تعارض منفعی برای ایشان وجود نداشته است.

پی نوشت ها

- DesignBuilder.
- Computational Fluid Dynamics.
- Climate Consultant.
- Triplex.
- ASHRAE Standard / Case 600.
- EnergyPlus.
- Infiltration.
- HVAC.
- Simple.
- COP.
- LED.
- Pmv.
- Ppd.
- Heat Balance.
- Total Fresh Air.
- Internal Natural Ventilation.
- Roofs.
- Mesh.
- Tolerance.
- Turbulence Model.
- Hybrid.

فهرست منابع

- بهاری نژاد، مهدی و یعقوبی، محمود. (۱۳۸۵). تهویه و سرمایش طبیعی در ساختمان های سنتی ایران مرکز نشر دانشگاهی.
- قبادیان، وحید. (۱۳۹۲). بررسی اقلیمی ابنیه سنتی ایران، دانشگاه تهران.
- معماریان، غلامحسین. (۱۳۷۶). آشنایی با معماری مسکونی ایرانی گونه شناسی برونگر/ دانشگاه علم و صنعت ایران.

108409. <https://doi.org/10.1016/j.jobte.2023.108409>

- Knudsen, J. B., Pinder, M., Jatta, E., Jawara, M., Yousuf, M. A., Søndergaard, A. T., & Lindsay, S. W. (2020). Measuring ventilation in different typologies of rural Gambian houses: a pilot experimental study. *Malaria Journal*, 19, 1-11. <https://doi.org/10.1186/s12936-020-03327-0>
- Kohler, N., & Lichtensteiger, M. (2017). Sustainable architecture and design. *Energy and Buildings*, 157, 1220-1235. <http://dx.doi.org/10.3846/13923730.2013.871330>
- Koul, B., Yakoob, M., & Shah, M. P. (2022). Agricultural waste management strategies for environmental sustainability. *Environmental Research*, 206, 112285. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112285>
- Mandal, D. K., Mandal, A., Bhakat, C., & Dutta, T. K. (2021). Effect of heat stress amelioration through open-ridge ventilated thatched roof housing on production and reproduction performance of crossbred Jersey cows. *Tropical Animal Health and Production*, 53(1), 144. <https://doi.org/10.1007/s11250-021-02574-w>
- Madhumathi, A., Radhakrishnan, S., & Shanthi Priya, R. (2014). Sustainable roofs for warm humid climates—A case study in residential buildings in Madurai, Tamilnadu, India. *World Applied Sciences Journal*, 32(6), 1167-1180.
- Pragati, S., Shanthi Priya, R., Pradeepa, C., & Senthil, R. (2023). Simulation of the energy performance of a building with green roofs and green walls in a tropical climate. *Sustainability*, 15(3), 2006. <https://doi.org/10.3390/su15032006>
- Ratanachotinun, J., Kasayapanand, N., Hirunlabh, J., Visitsak, S., Teekasap, S., & Khedari, J. (2016). Technical and economical assessment of energy-saving roof and wall construction in Thailand. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 39(1), 1-11. <https://doi.org/10.1080/02533839.2015.1064784>
- Sartori, I., Hestnes, A. G., & Aas, S. (2012). Energy use in the buildings sector: A review of methods and sources. *Energy and Buildings*, 44(1), 1-9.
- Seyyed Sadr, S. A. (2009). *Encyclopedia of engineering*. Simay-e Danesh Azar.
- Shaeri, J., Mahdavienejad, M., & Pourghasemian, M. H. (2022). A new design to create natural ventilation in buildings: Wind chimney. *Journal of Building Engineering*, 59, 105041. <https://doi.org/10.1016/j.jobte.2022.105041>
- Shi, L., Zhang, G., Yang, W., Huang, D., Cheng, X., & Setunge, S. (2018). Determining the influencing factors on the performance of solar chimney in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 88, 223-238. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.033>
- Simpson, A. (2022). The effect of moisture on the thermal property of a reed thatch roof during the UK heating season. *Energy and Buildings*, 257, 111777. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111777>
- Simpson, A., & Nevell, M. (2022). Thermographic detection of hidden archaeological features in a Cheshire thatched cottage, and related aspects of thermal performance: case study at Roadside Cottage. *The Historic Environment: Policy & Practice*, 13(2), 196-215. <https://doi.org/10.1080/17567505.2022.2010924>
- Singh, VK., Kumar, R., Dewangan, VP., Sharma, M., & Yadu, A. (2023). Dimensional variation analysis in vehicle design and development: a world class quality assurance method. *Nano World Journal*, 9(1), 296-301. <https://doi.org/10.17756/nwj.2023-s1-058>
- Soto, A., Martínez, P. J., Martínez, P., & Tudela, J. A. (2021). Simulation and experimental study of residential building with north side wind tower assisted by solar chimneys. *Journal of Building Engineering*, 43, 102562. <https://doi.org/10.1016/j.jobte.2021.102562>
- Yeh, L. H., Li, Y. X., & Huang, M. H. (2016). Design and energy efficiency of sustainable buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 202-211.
- Zhang, G., & Shi, L. (2018). Improving the performance of solar chimney by addressing the designing factors. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 168(1), 012010.
- Zhao, Z., Li, L., Zhang, G., Chew, M. Y. L., Wu, Q., Wang, Q., & Shi, L. (2024). Solar chimney applications in multi-storey buildings: A critical review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 70, 103936. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103936>

COPYRIGHTS

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to the Bagh-e Nazar Journal. This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



نحوه ارجاع به این مقاله:
 هاشمزاده بهنمیری، محمدعلی، فرشچی، حمیدرضا و فتاحی، ابوالفضل. (۱۴۰۴). بهره‌گیری از دودکش خورشیدی و سقف گالی پوش جهت افزایش راندمان تهویه طبیعی (مطالعه موردی: ساختمان مسکونی در شهر بابل). *باغ نظر*, ۲۲ (۱۴۵), ۱۸-۵.

DOI: [10.22034/BAGH.2025.494195.5723](https://doi.org/10.22034/BAGH.2025.494195.5723)
 URL: https://www.bagh-sj.com/article_220383.html

