

سنجش میزان اثربخشی دودکش‌های خورشیدی در تأمین تهویه و آسایش حرارتی ساختمانهای مسکونی شهر قزوین عاطفه السادات موسوی کیا^۱

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۵/۰۳/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۵/۲۸

چکیده

دودکش خورشیدی به عنوان یکی از راهکارهای پایدار در حوزه تهویه طبیعی ساختمان‌ها، با بهره‌گیری از تابش خورشید، جریان هوای طبیعی را در فضای داخلی ایجاد می‌کند. این سیستم ضمن کاهش چشمگیر مصرف انرژی، نقشی کلیدی در ارتقای کیفیت هوای درون ساختمان ایفا می‌نماید. پژوهش پیشرو با اتخاذ رویکردی تحلیلی، به بررسی تأثیر متغیرهای مستقل نظیر مشخصات طراحی دودکش (از جمله ارتفاع، زاویه قرارگیری و نوع مصالح به کاررفته) بر عملکرد تهویه‌ای و میزان صرفه‌جویی انرژی می‌پردازد. در این میان، اقلیم نیمه‌خشک شهر قزوین به عنوان متغیر مداخله‌گر اصلی مطرح است که با اعمال شرایط دمایی، رطوبتی و نوسانات فصلی، بر کارایی نهایی سیستم تأثیر گذاشته و نتایج ارزیابی را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد. ضرورت انجام این تحقیق از یک سو ناشی از رشد فزاینده تقاضا برای استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و از سوی دیگر، لزوم کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی در بخش ساختمان است. این نیاز به‌ویژه در مناطقی با اقلیم گرم و نیمه‌خشک نظیر قزوین، که با چالش‌های جدی در زمینه افزایش دمای محیط و هزینه‌های سرسام‌آور انرژی مواجه هستند، بیش از پیش احساس می‌شود. از این رو، به‌کارگیری سیستم‌های تهویه پایدار همچون دودکش خورشیدی، به رویکردی اساسی در طراحی زیست‌محیطی و بهینه‌سازی ساختمان‌های معاصر بدل گشته است. روش‌شناسی این تحقیق مبتنی بر شبیه‌سازی‌های عددی دویعدی و بهره‌گیری از روابط هندسی تحلیلی به منظور ارزیابی عملکرد سیستم است؛ همچنین، یافته‌های حاصل با مطالعه نمونه‌های موردی موجود، اعتبارسنجی و مقایسه شده‌اند. در واقع، این پژوهش می‌کوشد تا ضمن شبیه‌سازی عملکرد حرارتی-تهویه‌ای دودکش خورشیدی، میزان اثربخشی آن را در شرایط اقلیمی خاص قزوین مورد سنجش قرار دهد. نتایج حاصل از این مطالعه گویای آن است که دودکش خورشیدی، به عنوان فناوریای کارآمد و مقرون به صرفه، توانایی قابل توجهی در تأمین آسایش حرارتی ساکنان و بهبود شاخص‌های تهویه در مناطق گرم و خشک داراست. همچنین، طراحی هوشمندانه و انتخاب مصالح بهینه، از عوامل تعیین‌کننده در افزایش بازدهی این سیستم محسوب می‌شوند و می‌توانند آن را به راه‌حلی مؤثر در مسیر بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش اثرات زیست‌محیطی ساختمان‌ها تبدیل نمایند.

کلمات کلیدی: دودکش خورشیدی، تهویه طبیعی، انرژی، آسایش حرارتی

۱. کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران و معماری، دانشکده فنی مهندسی دانشگاه رجا، قزوین، ایران

۱. مقدمه

با افزایش توجه به مشکلات زیست‌محیطی و ضرورت کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر و پایدار در ساختمان‌ها به یک رویکرد مهم در طراحی و معماری تبدیل شده است. در این میان، سیستم‌های تهویه طبیعی، به‌ویژه دودکش خورشیدی، به عنوان راهکاری کارآمد برای کاهش مصرف انرژی و افزایش آسایش حرارتی در ساختمان‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند. دودکش خورشیدی سیستمی است که از انرژی خورشیدی برای ایجاد جریان هوای طبیعی استفاده می‌کند و از طریق تفاوت دما بین هوای داخلی و خارجی، تهویه‌ای پایدار و کم‌مصرف را فراهم می‌آورد. دودکش با رویکرد خورشیدی یک فناوری باستانی است که ایرانی‌ها و رومی‌ها برای دستیابی به تهویه طبیعی در خانه‌های خود از آن استفاده می‌کردند. همچنین می‌تواند برای ایجاد تهویه طبیعی غیرفعال در ساختمان‌های واقع در مناطق معتدل آب و هوایی استفاده شود. در این ایده، انرژی گرمایی به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود و در نتیجه جریان هوا حاصل می‌شود. در واقع دودکش خورشیدی مورد استفاده برای تهویه ساختمان می‌تواند از نوع دیوار عمودی، نوع سقف و ترکیبی از هر دو نوع باشد. این پیکربندی‌ها را می‌توان بر اساس ظرفیت حرارتی سطح جاذب آنها به عنوان واحدهای تهویه روزانه و تهویه شبانه نیز طبقه‌بندی کرد. دودکش‌های تهویه روزانه برای آب و هوای گرمسیری ترجیح داده می‌شوند در حالی که دودکش‌های تهویه شبانه برای آب و هوای گرم ترجیح داده می‌شوند (T. Long, ۲۰۲۲).

در واقع این فناوری پایدار در حوزه تهویه طبیعی است که از انرژی خورشیدی برای تهویه و خنک‌سازی ساختمان‌ها استفاده می‌کند (Smith, ۲۰۱۸). این سیستم از تفاوت دما برای ایجاد جریان هوای طبیعی استفاده می‌کند که منجر به تهویه مطبوع می‌شود و میزان وابستگی به سیستم‌های تهویه مصنوعی را کاهش می‌دهد (Jones & Lee, ۲۰۲۰). دودکش خورشیدی سازه‌ای عمودی و توخالی است که از طریق ایجاد ارتباط میان فضای داخلی ساختمان و محیط خارج، شرایط لازم برای شکل‌گیری جریان طبیعی هوا را فراهم می‌کند. اساس عملکرد این سیستم بر پدیده شناوری و اثر دودکشی استوار است. هنگامی که تابش خورشید به سطح جاذب دودکش می‌تابد، بخشی از انرژی تابشی به انرژی حرارتی تبدیل شده و سطح جاذب گرم می‌شود. این گرما از طریق انتقال حرارت به هوای موجود در کانال دودکش منتقل شده و دمای هوای داخل آن را افزایش می‌دهد. با افزایش دمای هوا، چگالی آن کاهش می‌یابد و در نتیجه، هوای گرم‌تر و سبک‌تر تحت تأثیر نیروی شناوری به سمت قسمت‌های بالاتر دودکش حرکت می‌کند (اقتداری، ۱۴۰۰). حرکت هوای گرم به سمت بالا موجب ایجاد اختلاف فشار میان قسمت‌های مختلف سیستم می‌شود. این اختلاف فشار به عنوان نیروی محرک جریان هوا عمل کرده و هوای گرم را از دهانه بالایی دودکش به خارج از ساختمان هدایت می‌کند. هم‌زمان با خروج هوای گرم، فشار داخل فضای مورد تهویه کاهش نسبی پیدا می‌کند و هوای تازه با دمای پایین‌تر و چگالی بیشتر از طریق بازشوها و ورودی‌های تعبیه‌شده در قسمت‌های پایین‌تر ساختمان وارد فضای داخلی می‌شود. در نتیجه، یک چرخه پیوسته از ورود هوای تازه و خروج هوای گرم شکل می‌گیرد که بدون استفاده مستقیم از فن یا تجهیزات مکانیکی، موجب تجدید هوای داخل ساختمان می‌شود. به عبارت دیگر، می‌توان عملکرد دودکش خورشیدی را به صورت یک چرخه حرارتی و جریانی در نظر گرفت.

ابتدا تابش خورشیدی باعث گرم شدن سطح جاذب می‌شود؛ سپس سطح گرم، هوای موجود در کانال را گرم می‌کند؛ هوای گرم به دلیل کاهش چگالی به سمت بالا حرکت می‌کند و از طریق خروجی دودکش از ساختمان خارج می‌شود. هم‌زمان، هوای تازه از مسیرهای ورودی جایگزین هوای خارج‌شده می‌شود. ادامه این فرآیند باعث ایجاد جریان طبیعی و مداوم هوا در ساختمان خواهد شد. شدت این جریان به میزان انرژی خورشیدی دریافتی، اختلاف دمای هوای داخل و خارج، ارتفاع دودکش، ابعاد کانال، ویژگی‌های حرارتی مصالح و مقاومت مسیرهای ورود و خروج هوا وابسته است. نکته مهم در این فرآیند آن است که دودکش خورشیدی در اصل خودِ هوا را به صورت مکانیکی جابه‌جا نمی‌کند، بلکه با ایجاد شرایط حرارتی مناسب، نیروی محرک لازم برای حرکت هوا را به وجود می‌آورد.

از دیدگاه انتقال حرارت، عملکرد دودکش خورشیدی حاصل تعامل چند فرآیند هم‌زمان است. تابش خورشیدی ابتدا از سطح شفاف عبور کرده و به سطح جاذب می‌رسد. سطح جاذب بخشی از این تابش را جذب و به گرما تبدیل می‌کند. سپس این انرژی حرارتی از طریق هدایت در جداره و به‌ویژه از طریق همرفت به هوای داخل کانال منتقل می‌شود. در نتیجه، دمای هوای کانال افزایش یافته و جریان صعودی ایجاد می‌شود. میزان انتقال حرارت از سطح جاذب به هوا، به عواملی مانند اختلاف دما، سرعت جریان هوا، جنس و ویژگی‌های سطح جاذب و هندسه کانال وابسته است. بنابراین، طراحی مناسب سطح جاذب و فضای هوایی بین سطح جاذب و جداره شفاف، نقش مهمی در افزایش کارایی سیستم دارد. این سازوکار را می‌توان از منظر آسایش حرارتی نیز

مورد توجه قرار داد. خروج هوای گرم و جایگزینی آن با هوای تازه می‌تواند به کاهش دمای هوای داخل و افزایش سرعت حرکت هوا در محدوده اشغال شده توسط کاربران کمک کند. افزایش سرعت هوا نیز در شرایط مناسب می‌تواند احساس خنکی بیشتری برای افراد ایجاد کند، حتی در شرایطی که کاهش قابل توجه دمای هوا رخ نداده باشد. از این رو، دودکش خورشیدی می‌تواند علاوه بر تأمین هوای تازه، به عنوان بخشی از راهبرد سرمایش غیرفعال ساختمان مورد استفاده قرار گیرد. با وجود این، ورود هوای تازه به ساختمان تنها زمانی می‌تواند به خنک‌سازی منجر شود که شرایط هوای خارج از نظر دما و کیفیت برای تهویه مناسب باشد. برای مثال، در مناطق گرم و در ساعات اوج تابش، اگر دمای هوای بیرون بسیار بالا باشد، ورود مداوم هوای خارجی ممکن است الزاماً موجب کاهش دمای فضای داخلی نشود. همچنین، اگر سطح جاذب دودکش بیش از اندازه گرم شود و طراحی سیستم به گونه‌ای باشد که گرمای جذب شده به فضای داخلی منتقل شود، ممکن است عملکرد حرارتی نامطلوبی ایجاد شود. بنابراین، طراحی دودکش خورشیدی باید متناسب با اقلیم و الگوی استفاده از ساختمان انجام شود و شرایط دمایی و تابشی در ساعات مختلف شبانه‌روز مورد توجه قرار گیرد. علاوه بر اختلاف دما و نیروی شناوری، باد خارجی نیز می‌تواند در عملکرد دودکش خورشیدی نقش مهمی داشته باشد. جریان باد در اطراف ساختمان باعث ایجاد توزیع متفاوت فشار در سطوح مختلف آن می‌شود. این اختلاف فشار ممکن است با نیروی شناوری ناشی از گرمایش خورشیدی هم‌جهت یا در خلاف جهت آن عمل کند. در صورتی که فشار باد به خروج هوای گرم کمک کند، نرخ تهویه افزایش می‌یابد؛ اما اگر جهت یا شدت باد باعث ایجاد فشار نامناسب در دهانه خروجی شود، ممکن است جریان ناشی از دودکش کاهش یافته یا حتی الگوی جریان در سیستم تغییر کند. از این رو، جهت‌گیری ساختمان، موقعیت دودکش نسبت به جهت باد غالب و طراحی دهانه‌های ورودی و خروجی از عوامل مهم در عملکرد واقعی سیستم محسوب می‌شوند.

در مجموع، دودکش خورشیدی را می‌توان یک سامانه غیرفعال دانست که با تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی حرارتی و سپس تبدیل این انرژی حرارتی به انرژی جنبشی جریان هوا، امکان تهویه طبیعی ساختمان را فراهم می‌کند. در این فرآیند، انرژی خورشیدی مستقیماً برای به حرکت درآوردن هوا استفاده نمی‌شود، بلکه ابتدا موجب افزایش دمای هوای داخل کانال و کاهش چگالی آن شده و در نهایت نیروی شناوری حاصل از این اختلاف دما جریان هوا را ایجاد می‌کند. به همین دلیل، عملکرد دودکش خورشیدی به شدت به ارتباط میان تابش خورشیدی، انتقال حرارت، اختلاف دما، اختلاف فشار و مقاومت جریان وابسته است. شناخت دقیق این روابط می‌تواند مبنای مناسبی برای بهینه‌سازی هندسه دودکش، انتخاب مصالح و تعیین موقعیت مناسب آن در ساختمان باشد. از این منظر، می‌توان گفت دودکش خورشیدی تنها یک کانال برای خروج هوای گرم نیست، بلکه یک سیستم حرارتی سیالاتی یکپارچه است که عملکرد آن تحت تأثیر هم‌زمان عوامل معماری، اقلیمی و فیزیکی قرار دارد. بنابراین، برای دستیابی به بیشترین میزان تهویه و کمترین مصرف انرژی، لازم است پارامترهایی مانند ارتفاع و عرض دودکش، فاصله کانال، نوع شیشه، جنس سطح جاذب، جهت‌گیری نسبت به خورشید، اندازه بازشوها، اختلاف دمای داخل و خارج و شرایط باد به صورت هم‌زمان مورد بررسی قرار گیرند. چنین رویکردی می‌تواند زمینه را برای طراحی دودکش‌های خورشیدی کارآمدتر و سازگارتر با شرایط اقلیمی و معماری هر منطقه فراهم کند (اقتداری، ۱۴۰۰). تابش خورشیدی از شیشه عبور می‌کند و در سطح دیوار جذب می‌شود. سپس هوای دودکش توسط همرفت و تابش جاذب گرم می‌شود. کاهش چگالی هوا باعث بالا آمدن آن می‌شود و در نتیجه هوا از پایین، یعنی از اتاق متصل، جایگزین می‌شود. سرعتی که هوا از داخل اتاق کشیده می‌شود به نیروی شناوری تجربه شده (اختلاف دما)، مقاومت در برابر جریان از طریق دودکش و مقاومت در برابر ورود هوای تازه به اتاق بستگی دارد (Maghrabie, ۲۰۲۲).

۲. اهداف پژوهش

هدف اصلی این تحقیق به شرح ذیل می‌باشد:

- ارزیابی عملکرد دودکش خورشیدی در بهبود تهویه طبیعی و کاهش مصرف انرژی ساختمان‌های مسکونی در شرایط اقلیمی شهر قزوین و بررسی میزان کارایی آن به‌عنوان یک راهکار غیرفعال در تأمین آسایش حرارتی ساکنان
- اهداف فرعی این پژوهش نیز شامل مواردی است که در ادامه به آنها پرداخته می‌گردد.
- بررسی قابلیت استفاده از دودکش خورشیدی به‌عنوان یک راهکار غیرفعال برای تأمین تهویه طبیعی در ساختمان‌های مسکونی شهر قزوین

سنجش میزان اثربخشی دودکش‌های خورشیدی در تأمین تهویه و آسایش حرارتی ساختمان‌های مسکونی شهر قزوین

بررسی تأثیر ویژگی‌های مصالح و اجزای تشکیل‌دهنده دودکش، به‌ویژه سطح جاذب خورشیدی و جداره شفاف، بر میزان جذب انرژی خورشیدی و عملکرد سیستم

۳. سوالات تحقیق

چگونه می‌توان از سیستم دودکش خورشیدی برای بهینه‌سازی تهویه و کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌های قزوین استفاده کرد؟

۴. متغیرهای تحقیق

در این تحقیق، به‌منظور دستیابی به ارزیابی دقیق از عملکرد سیستم دودکش خورشیدی در اقلیم قزوین، متغیرهای پژوهش در سه سطح مستقل، مداخله‌گر و وابسته تعریف شده‌اند که هر یک به‌نحو معناداری بر فرآیند تحقیق و نتایج نهایی تأثیرگذارند. متغیرهای مستقل، که عوامل اصلی و کنترل‌شده توسط پژوهشگر محسوب می‌شوند، شامل سه مؤلفه کلیدی هستند: نخست، طراحی کلی سیستم دودکش خورشیدی که بیانگر ساختار هندسی، نحوه جانمایی و اصول حاکم بر چیدمان اجزای سیستم است؛ دوم، ارتفاع و زاویه قرارگیری دودکش که تأثیر مستقیمی بر شدت جریان هوا و میزان دریافت تابش خورشید دارد؛ و سوم، نوع مصالح به‌کاررفته و فناوری‌های بهینه از جمله جنس صفحات جاذب، عایق‌های حرارتی و پوشش‌های سطحی که بازده جذب و انتقال حرارت را تعیین می‌کنند. این متغیرها به‌عنوان ورودی‌های اصلی پژوهش، مبنای طراحی سناریوهای مختلف شبیه‌سازی قرار می‌گیرند. در کنار متغیرهای مستقل، متغیر مداخله‌گر پژوهش، شرایط اقلیمی نیمه‌خشک شهر قزوین است که برخلاف متغیرهای مستقل، خارج از کنترل پژوهشگر بوده و می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی بر عملکرد سیستم تأثیر بگذارد. این متغیر خود شامل پارامترهای متعددی نظیر دمای محیط، میزان رطوبت نسبی هوا، شدت و زاویه تابش خورشید در ساعات مختلف روز، و نوسانات فصلی دما و سرعت باد می‌باشد. اقلیم قزوین با تابستان‌های گرم و خشک و زمستان‌های سرد، شرایطی متغیر را برای سیستم فراهم می‌آورد که ارزیابی عملکرد دودکش خورشیدی را نسبت به اقلیم‌های یکنواخت‌تر، حساستر و پیچیده‌تر می‌سازد. این متغیر به‌عنوان بستر آزمایش، نحوه تعامل سیستم با شرایط واقعی محیطی را نمایان ساخته و نتایج شبیه‌سازی‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در نهایت، متغیر وابسته پژوهش که در واقع خروجی و نتیجه نهایی اعمال متغیرهای مستقل در بستر متغیر مداخله‌گر است، به دو شاخص اصلی اطلاق می‌شود: عملکرد سیستم تهویه طبیعی که از طریق معیارهایی نظیر نرخ جریان هوا، سرعت خروجی و توزیع دما در فضای داخلی قابل سنجش است؛ و میزان کاهش مصرف انرژی که نشان‌دهنده صرفه‌جویی حاصل از جایگزینی تهویه مکانیکی با سیستم خورشیدی در بازه‌های زمانی مختلف سال می‌باشد. این متغیر وابسته، معیار نهایی موفقیت یا عدم موفقیت سیستم در شرایط اقلیمی هدف بوده و کلیه تحلیل‌های عددی و مقایسه‌ای پژوهش بر اساس تغییرات آن صورت می‌پذیرد. بدین ترتیب، پژوهش حاضر با ایجاد رابطه‌ای نظام‌مند میان متغیرهای مستقل، مداخله‌گر و وابسته، می‌کوشد تا ضمن شناسایی تأثیر هر یک از عوامل طراحی بر عملکرد نهایی، پاسخی عملی برای بهینه‌سازی سیستم دودکش خورشیدی در اقلیم نیمه‌خشک قزوین ارائه دهد.

۵. ضرورت و اهمیت پژوهش

رشد جمعیت، توسعه شهرنشینی و افزایش سطح رفاه در دهه‌های اخیر موجب افزایش قابل توجه تقاضای انرژی در بخش ساختمان شده است. ساختمان‌های مسکونی به دلیل نیاز مداوم به تأمین شرایط آسایش حرارتی، تهویه و کیفیت مناسب هوای داخل، سهم قابل توجهی از مصرف انرژی را به خود اختصاص می‌دهند. استفاده گسترده از سیستم‌های مکانیکی سرمایش و تهویه، اگرچه امکان کنترل شرایط محیطی را فراهم می‌کند، اما وابستگی ساختمان‌ها به انرژی الکتریکی و سوخت‌های فسیلی را افزایش داده و پیامدهایی همچون افزایش هزینه‌های انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و تشدید آثار زیست‌محیطی را به همراه دارد. از این رو، حرکت به سمت راهکارهای غیرفعال و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در طراحی ساختمان‌ها، یکی از رویکردهای مهم در دستیابی به ساختمان‌های کم‌مصرف و پایدار محسوب می‌شود. تهویه طبیعی یکی از مهم‌ترین راهکارهای غیرفعال برای کاهش وابستگی ساختمان به تجهیزات مکانیکی است. این روش با استفاده از نیروهای طبیعی همچون اختلاف فشار ناشی از باد و اختلاف چگالی ناشی از اختلاف دما، امکان جابه‌جایی و تجدید هوای داخل ساختمان را فراهم می‌کند. با وجود مزایای تهویه طبیعی، عملکرد آن به شدت تحت تأثیر شرایط اقلیمی، هندسه ساختمان، موقعیت بازشوها، سرعت و جهت باد و اختلاف دمای داخل و خارج قرار دارد. بنابراین، در شرایطی که نیروی باد یا اختلاف دمای طبیعی برای ایجاد جریان هوای کافی مناسب نباشد، استفاده از سامانه‌هایی که بتوانند نیروی محرک تهویه را تقویت کنند، اهمیت پیدا می‌کند. دودکش خورشیدی یکی از

راهکارهای غیرفعال است که با بهره‌گیری از انرژی تابشی خورشید و ایجاد اختلاف دما و چگالی در یک کانال، می‌تواند جریان هوای طبیعی را تقویت کرده و به تهویه ساختمان کمک کند.

اهمیت بررسی این سیستم در شهر قزوین از آن جهت است که عملکرد دودکش خورشیدی ارتباط مستقیمی با شرایط اقلیمی محل دارد و نمی‌توان نتایج حاصل از یک منطقه را بدون بررسی به منطقه‌ای دیگر تعمیم داد. میزان تابش خورشیدی، دمای هوا، سرعت و جهت باد و تغییرات این پارامترها در طول شبانه‌روز و فصل‌های مختلف می‌توانند بر میزان گرمایش سطح جاذب، شدت نیروی شناوری، نرخ جریان هوا و در نهایت عملکرد سیستم تأثیرگذار باشند. از این رو، ارزیابی عملکرد دودکش خورشیدی در شرایط واقعی اقلیمی قزوین می‌تواند مشخص کند که این سامانه تا چه اندازه قابلیت استفاده در ساختمان‌های مسکونی این شهر را دارد و تحت چه شرایطی می‌تواند بیشترین کارایی را ارائه دهد. از سوی دیگر، ساختمان مسکونی به دلیل الگوی متفاوت حضور ساکنان، نیازهای متنوع تهویه و حساسیت بیشتر کاربران نسبت به شرایط آسایش حرارتی، نیازمند توجه ویژه در طراحی سامانه‌های تهویه طبیعی است. عملکرد نامناسب دودکش خورشیدی ممکن است نه تنها باعث کاهش نرخ تهویه شود، بلکه در برخی شرایط با افزایش بیش از حد دمای کانال یا انتقال ناخواسته گرما به فضای داخلی، اثر نامطلوبی بر شرایط حرارتی ساختمان داشته باشد. بنابراین، ارزیابی هم‌زمان عملکرد تهویه‌ای و حرارتی سیستم برای تعیین قابلیت کاربرد آن در ساختمان‌های مسکونی ضروری است. همچنین، کارایی دودکش خورشیدی به پارامترهای مختلفی از جمله ارتفاع و عرض دودکش، فاصله کانال، نوع و ویژگی‌های سطح جاذب، مشخصات جداره شفاف، جهت‌گیری سیستم و اندازه بازشوهای ورودی و خروجی وابسته است. انتخاب نامناسب این پارامترها می‌تواند موجب کاهش جریان هوا و افزایش انتقال حرارت ناخواسته شود، در حالی که طراحی مناسب می‌تواند نیروی شناوری و نرخ تهویه را افزایش دهد. بنابراین، بررسی اثر پارامترهای طراحی و شناسایی شرایط مناسب برای استفاده از دودکش خورشیدی می‌تواند نقش مهمی در افزایش کارایی این سامانه داشته باشد (Maghrabie et al., 2022). از جنبه زیست‌محیطی و انرژی نیز بررسی این موضوع اهمیت دارد. استفاده مؤثر از تهویه طبیعی می‌تواند در شرایط مناسب، نیاز به استفاده از تجهیزات مکانیکی سرمایش و تهویه را کاهش دهد و در نتیجه موجب کاهش مصرف انرژی ساختمان شود. مطالعات جدید نیز بر اهمیت ارزیابی دودکش‌های خورشیدی از دیدگاه هم‌زمان انرژی، عملکرد حرارتی و پیامدهای زیست‌محیطی تأکید کرده‌اند (Peng & Wang, 2024).

بنابراین، ضرورت انجام این پژوهش را می‌توان در نیاز به شناسایی راهکارهای مناسب برای کاهش مصرف انرژی، بهبود تهویه طبیعی و افزایش آسایش حرارتی در ساختمان‌های مسکونی شهر قزوین دانست. ارزیابی عملکرد دودکش خورشیدی در شرایط اقلیمی این شهر می‌تواند ضمن مشخص کردن ظرفیت و محدودیت‌های این فناوری، اطلاعات ارزشمندی درباره پارامترهای مؤثر بر عملکرد آن ارائه دهد. نتایج این پژوهش می‌تواند زمینه‌ای برای استفاده آگاهانه‌تر از سامانه‌های غیرفعال خورشیدی در طراحی ساختمان‌های مسکونی فراهم کرده و به ارائه راهکارهای معماری متناسب با شرایط اقلیمی قزوین در جهت کاهش وابستگی به سیستم‌های مکانیکی و مصرف انرژی کمک کند.

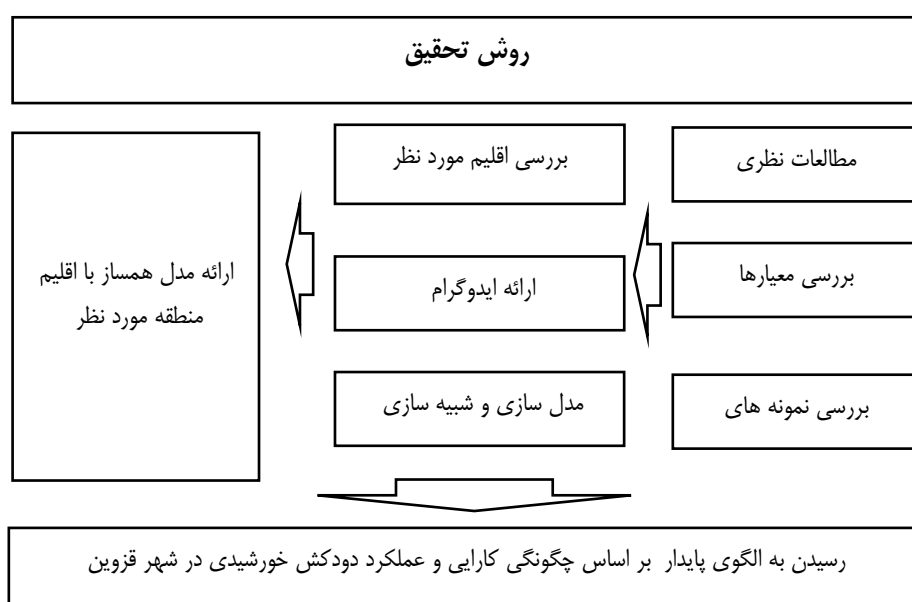
۶. روش تحقیق

روش‌شناسی پیشنهادی برای این تحقیق به منظور بررسی و بهینه‌سازی سیستم دودکش خورشیدی در اقلیم قزوین و ارائه یک رویکرد نوآورانه در طراحی و شبیه‌سازی، شامل مراحل زیر است: در ابتدا بررسی نمونه‌های اجرایی در ساختمان‌های قدیمی و جدید و تحلیل آنها و در مرحله بعد طراحی مدل دو بعدی دودکش خورشیدی برای نسل آینده ساختمان‌ها و ارایه یک ایدیوگرام نوآورانه ابزارهای مورد استفاده در این تحقیق نرم‌افزارهای مدل‌سازی دو بعدی اتوکد برای طراحی مدل اولیه از سیستم دودکش خورشیدی. این مدل بر اساس شرایط اقلیمی قزوین و خصوصیات معماری نمونه موردی در نمودار ۱ طراحی می‌شود.

۷. پیشینه پژوهش

تکنولوژی دودکش خورشیدی در واقع از سه عنصر اصلی تشکیل شده است که اولی جمع‌کننده هوا و عنصر بعدی برج یا همان دودکش و قسمت آخر نیز توربین‌های باد آن است و همه عناصر آن برای قرن‌ها است که بصورت شناخته شده درآمده‌اند و ترکیب آنها نیز برای تولید برق در سال ۱۹۳۱ توسط گونتر مورد بحث قرار گرفته است. در سال ۸۴-۱۹۸۳ نیز نتایج آزمایشات و بحث‌های نمونه‌ای از دودکش خورشیدی که در منطقه مانزانارس در کشور اسپانیا ساخته شده بود، ارائه شد.

در سال ۱۹۹۰ شلایش و همکاران در مورد قابل تعمیم بودن نتایج بدست آمده از این نمونه دودکش بحثی را ارائه کردند. در سال ۱۹۹۵ شلایش در ادامه در سال ۱۹۹۷ کریتز طرحی را برای قرار دادن کیسه‌های پر از آب در زیر سقف جمع‌آوری کننده حرارت ارایه کرد تا از این طریق انرژی حرارتی ذخیره‌سازی شود (Kreetz, H., ۱۹۹۷).



در حال حاضر در استرالیا طرح نیروگاه دودکش خورشیدی با ظرفیت ۲۰۰ مگاوات و در صحرای آریزونای آمریکا نیروگاهی با ارتفاع دودکش ۱۰۰۰ متر در مرحله طراحی و اجرا می‌باشد. باید گفت که استرالیا و کشورهایی مثل ایران مکان مناسبی برای این فناوری است چون شدت تابش خورشید در این کشورها زیاد بوده و زمینهای صاف و بدون پستی و بلندی نیز در آنها زیاد است و دیگر اینکه تقاضا برای برق از رشد بالایی برخوردار است (Haaf, ۱۹۸۳).

چن و همکاران به بررسی نسبت ابعاد و زاویه شیب دودکش خورشیدی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که حداکثر سرعت جریان هوا در دودکش خورشیدی با زاویه ۴۵ درجه ایجاد می‌شود که حدود ۴۵ درصد بیشتر از یک دودکش عمودی با تمام شرایط مشابه بود. دخی و بکمن نشان دادند که مقدار بهینه شیب دودکش خورشیدی جهت به حداکثر رساندن جریان هوا به عرض جغرافیایی محل بستگی دارد و از ۴۰ تا ۶۰ درجه متغیر می‌باشد. بنسل تاثیر دودکش خورشیدی همراه با بادگیر را جهت افزایش تهویه طبیعی در ساختمان‌ها مورد بررسی قرار داد. بنسل بیان میدارد زمانی که سرعت باد محیط ۱ متربر ثانیه است بادگیر به تنهایی قادر به تولید جریان جرمی ۰/۷۵ کیلوگرم بر ثانیه است اما با کمک دودکش خورشیدی می‌تواند جریان جرمی هوای ۱/۴ کیلوگرم بر ثانیه در ۷۰۰ وات بر متر مربع تابش خورشیدی تولید نماید (Nasef et al., ۲۰۲۱).

فونیاسومپن و همکاران نتیجه گرفتند که دمای اتاق با دودکش خورشیدی ۴ تا ۵ درجه سلسیوس پایین‌تر از حالت بدون دودکش خورشیدی است که این مقدار کاهش حرارت، زمانیکه حداکثر دمای هوا ۴۰ درجه سلسیوس باشد ناکافی است. هدف این تحقیق طراحی سیستم ترکیبی سرمایشی ایستا PCHS شامل دو سیستم متمایز دودکش خورشیدی SC و کانال خنک‌کننده تبخیری ECC می‌باشد تا با استفاده از انرژی‌های پاک موجب تهویه ساختمان با حداقل مصرف انرژی شده و مانع تخریب محیط زیست شود (Punyasompun S, ۲۰۰۹).

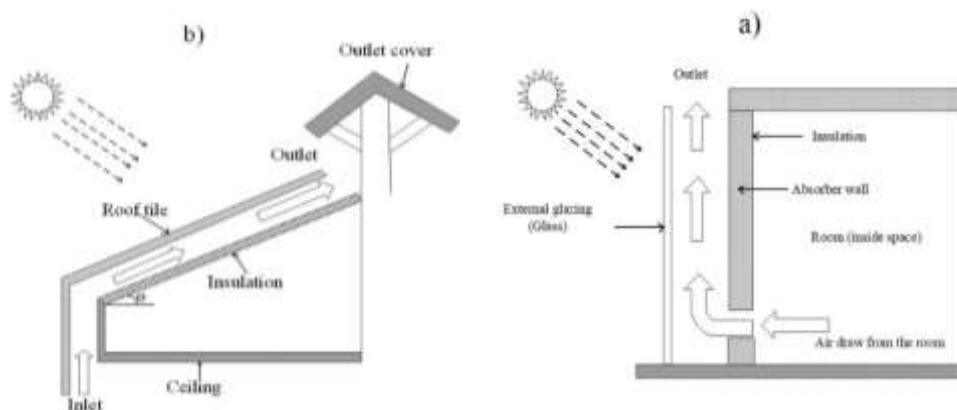
۷-۱. مبانی نظری و چارچوب مفهومی

۷-۱-۱. دودکش خورشیدی

وظیفه اصلی دودکش خورشیدی، ایجاد و تقویت جریان طبیعی هوا در داخل ساختمان با استفاده از انرژی خورشیدی است. در این سیستم، انرژی تابشی خورشید ابتدا توسط سطح جاذب جذب شده و به انرژی حرارتی تبدیل می‌شود. سپس گرمای ایجادشده از طریق انتقال حرارت به هوای موجود در کانال دودکش منتقل می‌شود. افزایش دمای هوا موجب کاهش چگالی آن شده و در نتیجه، هوای گرم‌تر تحت تأثیر نیروی شناوری به سمت بالا حرکت می‌کند. به این ترتیب، انرژی حرارتی دریافت‌شده از خورشید به صورت غیرمستقیم موجب ایجاد انرژی جنبشی و حرکت توده هوا در کانال می‌شود.

تفاوت چگالی هوا در بخش‌های مختلف دودکش و در نتیجه اختلاف فشار ایجادشده، یکی از عوامل اصلی تعیین‌کننده سرعت جریان هوا در دودکش محسوب می‌شود.

میزان جریان هوای ایجادشده در دودکش به شدت تحت تأثیر اختلاف دمای هوای داخل کانال و محیط اطراف قرار دارد. هرچه سطح جاذب انرژی بیشتری از خورشید دریافت کند و دمای هوای داخل کانال افزایش یابد، اختلاف چگالی میان هوای گرم داخل دودکش و هوای محیط بیشتر شده و نیروی شناوری قوی‌تری ایجاد می‌شود. در نتیجه، هوای گرم با سرعت بیشتری به سمت خروجی حرکت کرده و هوای تازه از طریق دهانه‌های ورودی جایگزین آن می‌شود. بنابراین، عملکرد دودکش خورشیدی حاصل برهم‌کنش میان انتقال حرارت، اختلاف چگالی، اختلاف فشار و مقاومت جریان هوا در مسیر ورود و خروج است. در عمل، دودکش خورشیدی را می‌توان به دیوار یا سقف همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است متصل نمود.



شکل ۱. (الف) دودکش خورشیدی عمودی؛ (ب) دودکش خورشیدی سقف‌شیدار (Zhai et al., ۲۰۱۱)

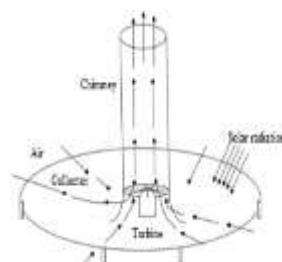
هوایی که در زیر شیشه بوسیله خورشید گرم می‌شود توسط دودکش کشیده می‌شود و در اثر این جریان توربین ژنراتور را به گردش وامی‌دارد. هوای گرم به این دلیل که سبک‌تر از هوای سرد است به سمت بالای برج حرکت می‌کند. این حرکت باعث ایجاد مکش در پایین برج می‌شود تا هوای گرم بیشتری را به درون بکشد و هوای سرد پیرامونی به زیر سقف شفاف وارد می‌شود. انرژی حرارتی که به وسیله برکه‌های خورشیدی ایجاد می‌شود را می‌توان از طریق خطوط توزیع ناحیه‌ای بر گرمایش و سرمایش فضای ساختمانی بکار برد. از دمای بیشتری که توسط متمرکزکننده‌ها ایجاد می‌شود می‌توان برای گرمای فرایندی در صنایع همراه یا ذخیره حرارتی در مخزن استفاده نمود. هوا در زیر یک سقف شفاف که تشعشع خورشیدی را عبور می‌دهد، گرم می‌شود. باید توجه داشت که وجود این سقف و زمین زیر آن به عنوان یک کلکتور یا جمع‌کننده خورشیدی عمل می‌کند. در وسط این سقف شفاف یک دودکش یا برج عمودی وجود دارد که هوای زیادی از پایین آن وارد می‌شود. باید محل اتصال سقف شفاف و این برج به‌صورتی باشد که منفذی نداشته باشد و اصطلاحاً «هوا بند» شده باشد. بر همگان روشن است که هوای گرم چون سبک‌تر از هوای سرد است به سمت بالای برج حرکت می‌کند.

این حرکت باعث ایجاد مکش در پایین برج می‌شود تا هوای گرم بیشتری را به درون بکشد و هوای سرد پیرامونی به زیر سقف شفاف وارد شود. برای اینکه بتوان این فناوری را به صورت ۲۴ ساعته مورد استفاده قرارداد می‌توان از لوله‌ها یا کیسه‌های پر شده از آب در زیر سقف استفاده کرد. این موضوع بسیار ساده انجام می‌شود یعنی در طول روز آب حرارت را جذب کرده و گرم می‌شود و در طول شب این حرارت را آزاد می‌کند. قابل ذکر است که باید این لوله‌ها را فقط برای یکبار با آب پر کرده و به آب اضافی نیازی نیست؛ بنابراین اساس کار بدین صورت است که تشعشع خورشیدی در این برج باعث ایجاد یک مکش به سمت بالا می‌شود که انرژی حاصل از این مکش توسط چند مرحله توربین تعبیه شده در برج به انرژی مکانیکی تبدیل شده و سپس به برق تبدیل می‌شود (Huang, ۲۰۲۴).

سنجش میزان اثربخشی دودکش‌های خورشیدی در تأمین تهویه و آسایش حرارتی ساختمان‌های مسکونی شهر قزوین

جدول ۱. اجزا و مصالح دودکش خورشیدی

مصالح ساخت دودکش خورشیدی	اجزا دودکش خورشیدی
شیشه‌های رنگی	جمع‌کننده هوا
شیشه‌های دوجداره عایق	برج یا همان دودکش
آجر و فلز	توربین‌های باد

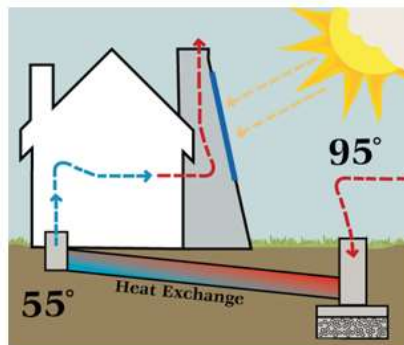


در شرایط آب‌وهوایی سرد، چنانچه دمای محیط کمتر از دمای هوای داخل ساختمان باشد، نحوه عملکرد دودکش می‌تواند با هدف بهره‌گیری از انرژی خورشیدی و تأمین گرمای مورد نیاز ساختمان تنظیم شود. در این شرایط، هوای گرم‌شده در کلکتور خورشیدی می‌تواند به فضای داخلی هدایت شود و به افزایش دمای محیط کمک کند. بنابراین، دودکش خورشیدی در این حالت می‌تواند به عنوان یک سامانه گرمایش خورشیدی غیرفعال مورد استفاده قرار گیرد و با استفاده مستقیم از انرژی خورشیدی، وابستگی ساختمان به تجهیزات گرمایشی را کاهش دهد.

در مقابل، در شرایط آب‌وهوایی گرم، هدف اصلی استفاده از دودکش خورشیدی می‌تواند دفع گرمای اضافی و افزایش تهویه طبیعی ساختمان باشد. در صورتی که دمای هوای محیط از دمای مطلوب فضای داخلی بالاتر باشد، نحوه عملکرد سیستم باید به گونه‌ای تنظیم شود که از ورود گرمای اضافی به فضای داخلی جلوگیری شود. در این حالت، کانال دودکش می‌تواند به عنوان یک لایه واسطه حرارتی میان فضای داخلی و محیط خارجی عمل کرده و با هدایت هوای گرم به سمت خارج، بخشی از گرمای تجمع‌یافته در پوسته ساختمان را دفع کند. در نتیجه، استفاده صحیح از دودکش خورشیدی می‌تواند به کاهش بار سرمایشی ساختمان و کاهش وابستگی به سیستم‌های مکانیکی تهویه و سرمایش کمک کند. از نظر معماری، دودکش خورشیدی را می‌توان به روش‌های مختلفی در ساختمان ادغام کرد. این سیستم می‌تواند به صورت عمودی در دیوار خارجی، در نمای ساختمان یا در بخش‌هایی از بام طراحی شود. انتخاب محل مناسب برای قرارگیری دودکش اهمیت زیادی دارد، زیرا جهت‌گیری آن نسبت به خورشید، میزان دریافت تابش و در نتیجه دمای سطح جاذب و هوای داخل کانال را تعیین می‌کند. در نیمکره شمالی، قرارگیری سطح جاذب در جهت مناسب نسبت به مسیر حرکت خورشید می‌تواند دریافت انرژی خورشیدی را افزایش داده و شرایط مناسب‌تری برای ایجاد جریان طبیعی هوا فراهم کند.

همچنین، هندسه دودکش نقش مهمی در عملکرد آن دارد. ارتفاع دودکش، عرض کانال و فاصله میان سطح جاذب و جداره شفاف از جمله پارامترهایی هستند که بر انتقال حرارت و جریان هوا تأثیر می‌گذارند. افزایش ارتفاع می‌تواند نیروی محرک ناشی از اثر دودکشی را افزایش دهد، در حالی که فاصله نامناسب کانال ممکن است موجب افزایش مقاومت جریان یا کاهش انتقال حرارت مؤثر شود. از این رو، طراحی دودکش نیازمند ایجاد تعادل میان جذب انرژی خورشیدی، انتقال حرارت و حرکت هوا است. در نهایت، عملکرد دودکش خورشیدی را نمی‌توان مستقل از شرایط اقلیمی و ویژگی‌های ساختمان ارزیابی کرد. میزان تابش خورشیدی، دمای هوای بیرون، سرعت و جهت باد، ویژگی‌های حرارتی مصالح و نحوه ارتباط دودکش با فضاهای داخلی، همگی می‌توانند بر عملکرد سیستم اثرگذار باشند. نحوه عملکرد دودکش خورشیدی در شکل ۲ نمایش داده شده است. بنابراین، برای استفاده مؤثر از دودکش خورشیدی در ساختمان‌های مسکونی، لازم است طراحی و عملکرد آن متناسب با شرایط اقلیمی محل مورد مطالعه بررسی شود. این موضوع در پژوهش حاضر، با توجه به شرایط اقلیمی شهر قزوین، اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا تعیین نحوه استقرار، ابعاد، مصالح و شرایط بهره‌برداری مناسب می‌تواند نقش مهمی در میزان موفقیت دودکش خورشیدی در تأمین تهویه طبیعی و کاهش مصرف انرژی ساختمان‌های مسکونی داشته باشد (Y. Quoc Nguyen, ۲۰۲۰).

در واقع دودکش خورشیدی سازه‌ای است که با استفاده از اثر دودکش به تهویه هوا کمک می‌کند. دودکش خورشیدی عمودی یا مایل نصب شود؛ آزمایش‌ها نشان می‌دهد که شیب بهینه برای یک دودکش خورشیدی در عرض جغرافیایی ۲۸٫۴°، بین ۴۵° تا ۷۰° است که همان زاویه مناسب برای یک کلکتور خورشیدی است؛ این زاویه در طول روز تغییر می‌کند. در مناطق بسیار گرم که آفتاب در مدت زیادی از روز می‌تابد، ممکن است از دو دودکش خورشیدی یکی در غرب (تهویه در بعد از ظهر) و دیگری در شرق ساختمان (برای تهویه در صبح‌هنگام) استفاده شود.



شکل ۲. نحوه عملکرد دودکش خورشیدی (https://solarinnovations.com/solar-chimney)

بررسی جنبه‌های صوتی بخش مهمی از طراحی سامانه‌های تهویه طبیعی هستند، طراحی باید به گونه‌ای باشد که ضمن تهویه قسمت‌های مختلف ساختمان بتوان حریم خصوصی صوتی اتاق‌های مختلف را محفوظ نگاه داشت (Qingyuan Wang, ۲۰۲۲).

جدول ۲. مزایا و معایب دودکش‌های خورشیدی

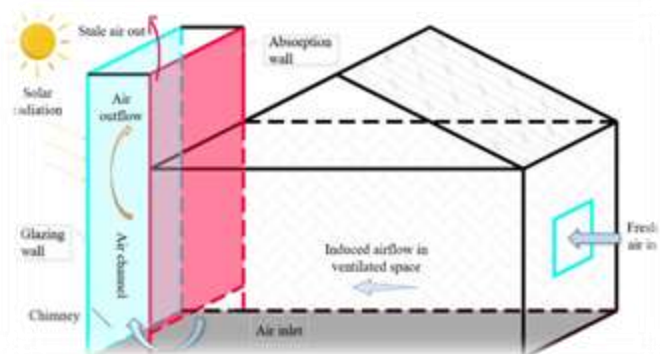
معیارها	توضیحات
مزایا	
صرفه‌جویی در انرژی	با کاهش نیاز به سیستم‌های تهویه مصنوعی، مصرف انرژی به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. (Zhang & Wang, ۲۰۲۱)
دوام و ماندگاری بالا	استفاده از مواد مقاوم در برابر تغییرات دما، طول عمر سیستم را افزایش می‌دهد. (Lee & Chen, ۲۰۲۰)
افزایش کیفیت هوای داخلی	دودکش‌های خورشیدی به دلیل تهویه طبیعی، کیفیت هوای داخل ساختمان را بهبود می‌بخشند. (Yang et al., ۲۰۱۸)
معایب	
هزینه نصب بالا	به دلیل استفاده از مواد و فناوری‌های جدید، هزینه اولیه برای نصب این سیستم‌ها ممکن است بیشتر از سیستم‌های تهویه مرسوم باشد (Xu & Huang, ۲۰۱۹).
نیاز به نگهداری و تعمیرات	برخی از مواد جدید به کار رفته در ساخت دودکش‌های خورشیدی نیاز به نگهداری دارند که می‌تواند هزینه‌بر باشد (Nasef et al., ۲۰۲۱).

۷-۱-۲. طراحی غیرفعال

روش طراحی غیرفعال می‌تواند به حفظ شرایط حرارتی آسایش در ساختمان‌ها و کاهش مصرف انرژی کمک کند. به‌طورخاص، اجرای دودکش‌های خورشیدی در جهت تهویه هوای داخلی ساختمان باعث کاهش راندمان انرژی می‌شود. در شکل ۳ یک دودکش معمولی که شامل یک دیوار جذب، یک دیوار لعاب، لوله‌ها/دریچه‌ها و مواد عایق حرارت است نمایش داده شده است. جریان هوا تحت تأثیر تفاوت چگالی هوا بین محیط داخلی و خارجی و باد خارجی است. هوای کهنه از دهانه‌های ساخته شده توسط اثر حرارتی سیفون خارج می‌شود. اجزای دودکش خورشیدی می‌توانند از انرژی مستقیم یا غیرمستقیم خورشیدی برای هدایت جریان هوا در فضا استفاده کنند (Qingyuan Wang, ۲۰۲۲).

کوسادا و همکاران در مطالعات خود، پژوهش‌های انجام‌شده طی ده سال گذشته در زمینه نماهای خورشیدی شفاف و نیمه‌شفاف را بر اساس مطالعات نظری و آزمایشگاهی به‌صورت جامع بررسی کرده و روند توسعه و کاربرد این نوع نماها را مورد ارزیابی قرار دادند. نماهای خورشیدی به‌عنوان یکی از فناوری‌های مرتبط با پوسته ساختمان، با هدف بهره‌گیری مؤثر از انرژی خورشیدی و بهبود عملکرد حرارتی ساختمان مورد توجه قرار گرفته‌اند. این نماها می‌توانند با کنترل نحوه ورود، جذب، انعکاس و انتقال تابش خورشیدی، نقش مهمی در مدیریت انرژی ساختمان ایفا کنند. نمای خورشیدی، تابش خورشیدی برخوردکننده به سطح خود را به روش‌های مختلف جذب، منعکس یا منتقل می‌کند و بخشی از انرژی تابشی را به انرژی حرارتی قابل استفاده تبدیل می‌نماید. میزان جذب و انتقال این انرژی به ویژگی‌های نوری و حرارتی مصالح، میزان شفافیت، ضخامت لایه‌ها و نحوه قرارگیری اجزای نما بستگی دارد. در نماهای شفاف و نیمه‌شفاف، بخشی از تابش خورشیدی می‌تواند از سطح نما عبور کرده و وارد فضای بین لایه‌ها یا فضای داخلی ساختمان شود، در حالی که بخش دیگری توسط مصالح جذب شده و موجب افزایش دمای آن‌ها می‌شو

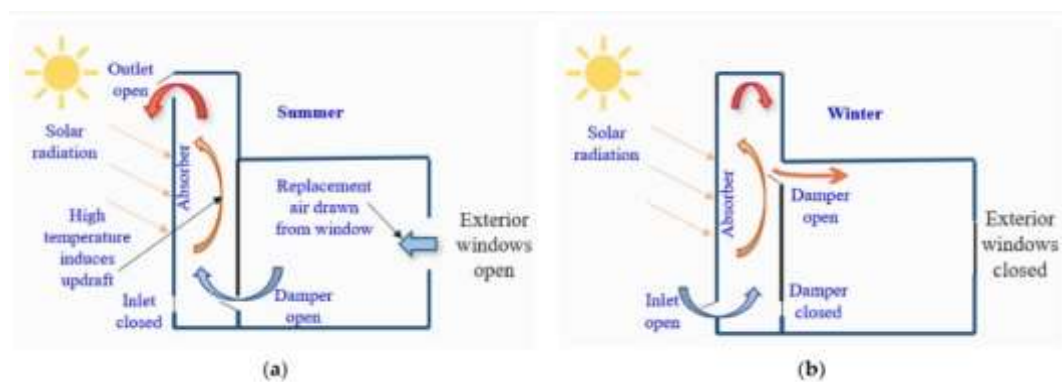
سنجش میزان اثربخشی دودکش‌های خورشیدی در تأمین تهویه و آسایش حرارتی ساختمان‌های مسکونی



شکل ۳. کاربرد نمایی و تابش خورشید بر دودکش خورشیدی (Qingyuan Wang, ۲۰۲۲)

یکی از ویژگی‌های مهم این نوع نماها، امکان ایجاد یک فضای میانی بین لایه خارجی و داخلی ساختمان است. این فضای میانی می‌تواند در صورت طراحی مناسب، به‌عنوان یک کانال حرارتی و جریان هوا عمل کند. با تابش خورشید، هوای موجود در این فضای میانی گرم شده و به دلیل کاهش چگالی به سمت بالا حرکت می‌کند. در نتیجه، شرایط لازم برای ایجاد جریان طبیعی هوا فراهم می‌شود. این سازوکار از نظر عملکرد، ارتباط نزدیکی با اصول مورد استفاده در دودکش خورشیدی دارد و نشان می‌دهد که پوسته ساختمان می‌تواند علاوه بر نقش محافظتی، به‌عنوان بخشی از سامانه تهویه طبیعی و مدیریت انرژی ساختمان نیز عمل کند. از این منظر، ترکیب نمای خورشیدی با دودکش خورشیدی می‌تواند امکان استفاده هم‌زمان از ظرفیت پوسته ساختمان برای جذب انرژی خورشیدی و ایجاد جریان طبیعی هوا را فراهم کند. در این حالت، سطح شفاف یا نیمه‌شفاف نما می‌تواند تابش خورشیدی را دریافت کرده و موجب افزایش دمای هوای موجود در کانال شود. هوای گرم‌شده نیز به دلیل اثر شناوری به سمت بالا حرکت کرده و در صورت طراحی مناسب، از ساختمان خارج می‌شود. این فرآیند می‌تواند ضمن کاهش گرمای ناخواسته در فضای داخلی، به افزایش نرخ تهویه و کاهش نیاز به سیستم‌های مکانیکی کمک کند. بنابراین، استفاده از نماهای خورشیدی شفاف و نیمه‌شفاف را می‌توان بخشی از رویکرد طراحی غیرفعال و اقلیمی ساختمان دانست. اهمیت این موضوع زمانی بیشتر می‌شود که طراحی نما، جهت‌گیری ساختمان و سیستم تهویه طبیعی به‌صورت یکپارچه مورد توجه قرار گیرند. در چنین شرایطی، نمای ساختمان تنها به‌عنوان یک عنصر زیبایی‌شناختی یا جداکننده فضای داخلی و خارجی عمل نمی‌کند، بلکه می‌تواند به‌عنوان یک عنصر فعال در دریافت انرژی خورشیدی، کنترل انتقال حرارت و ایجاد جریان هوا مورد استفاده قرار گیرد (Noguchi, ۲۰۲۳).

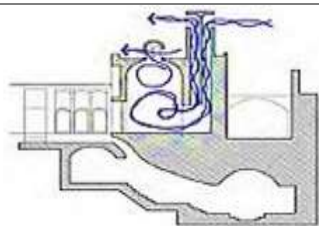
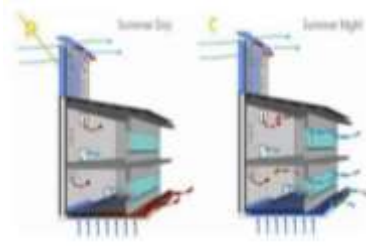
دودکش‌های خورشیدی در میان بسیاری از سیستم‌های تهویه طبیعی نه تنها به دلیل راحتی ویژگی‌های ساختاری آن‌ها هنگام ادغام در ساختمان‌ها یا در ارتباط با سایر سیستم‌های تهویه، بلکه به این دلیل که دودکش خورشیدی از طریق همکاری میرایی و بازو حالت‌های گرمایش و سرمایش دارد، متمایز است. ، که ساختار را پایدارتر می‌کند (Li et al., ۲۰۲۳). شکل ۴ دو حالت را نشان می‌دهد که یک دودکش خورشیدی می‌تواند در فصل سرمایش و فصل گرمایش به دست آورد. به منظور بهبود آسایش حرارتی و افزایش کاربرد تهویه طبیعی است. سیستم تهویه غیرفعال ترکیبی موجود مبتنی بر دودکش‌های خورشیدی را خلاصه کرد و تنظیم حرارتی سیستم‌های انتخاب شده و توانایی آنها را برای بهبود کارایی تهویه بررسی کرد (Haihua Zhang, ۲۰۲۱).



شکل ۴. شماتیک دودکش خورشیدی در حالت گرمایش و سرمایش

الف . حالت خنک کننده یک دودکش خورشیدی ب. حالت گرمایش یک دودکش خورشیدی (Haihua Zhang, ۲۰۲۱)

جدول ۳. بررسی نمونه‌های موردی داخلی و خارجی (منبع: نویسندگان)

نمونه موردی	توضیحات	تصاویر
داخلی	خانه رسولیان یزد	ترکیب بادگیر و دودکش خورشیدی به منظور بهبود آسایش حرارتی کاهش مصرف انرژی و افزایش راحتی ساکنان(حسینی و همکاران، ۱۳۹۷) 
ساختمان اداری در شیراز	بهبود تهویه طبیعی و کاهش نیاز به سیستم‌های مکانیکی(کریمی و همکاران، ۱۳۹۹)	
ساختمان اداری در کرمان	بهبود آسایش حرارتی و کاهش مصرف انرژی در اقلیم گرم و خشک کرمان(رضایی و همکاران، ۱۳۹۸)	
خارجی	ساختمان محیط زیست آلمان	تهویه طبیعی داخلی و کاهش وابستگی به سیستم‌های مکانیکی 
دانشگاه ناتینگهام	استفاده از دیوارهای جذب‌کننده حرارت و شیشه‌های دوجداره (Baker & Hughes, ۲۰۲۰)	
مرکز فرهنگی مادرید	استفاده از دودکش‌های خورشیدی به همراه پنل‌های خورشیدی باعث تهویه طبیعی و کاهش نیاز به سیستم‌های تهویه مکانیکی شده است (Garcia et al., ۲۰۲۲)	
مجموعه فرانسوی چارلز دوگل در دمشق	این مجموعه از ساختمان‌هایی دو طبقه، با ساختاری پاسیو شکل، تشکیل شده است که هر کدام بر روی یک باغ کوچک، پرپشت، سرسبز و سرپوشیده قرار گرفته اند.	
	با ایجاد یک خرد اقلیم، هوای سرد را از طریق لوله های پی وی سی، به درون سیستم تهویه هوا می فرستند که سیرکولاسیون آن، توسط دودکش های خورشیدی و استفاده از حرکت رو به بالای گازها تنظیم می گردد.	

۷-۱-۲-۱. نوآوری‌ها در طراحی و اجرای دودکش‌های خورشیدی

در سال‌های اخیر، نوآوری‌ها و تکنیک‌های جدید و نوظهور بسیاری در طراحی و اجرای دودکش‌های خورشیدی رخ داده است. یکی از این نوآوری‌ها استفاده از پوشش‌های هوشمند با توانایی جذب و بازتابش نور است که باعث بهبود عملکرد دودکش‌های خورشیدی شده و کارایی آن‌ها را در اقلیم‌های مختلف افزایش می‌دهد (Garcia et al., ۲۰۲۱). به عنوان مثال، استفاده از مواد تغییر فاز (PCM) در طراحی این سیستم‌ها، موجب بهبود ذخیره و انتقال حرارت شده است که کاربردهای متنوعی را در فصول مختلف امکان‌پذیر می‌سازد (Al-Obaidi & Woods, ۲۰۱۹). دودکش‌های خورشیدی به عنوان یکی از روش‌های تهویه طبیعی و بهره‌گیری از انرژی خورشیدی، در ایران مورد توجه قرار گرفته‌اند. در ادامه، چند نمونه موردی از کاربرد این سیستم در ساختمان‌های ایران در جدول ۳ ارائه شده است. این نمونه‌ها نشان‌دهنده پتانسیل استفاده از دودکش‌های خورشیدی در بهبود تهویه و کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌های مختلف ایران و جهان هستند.

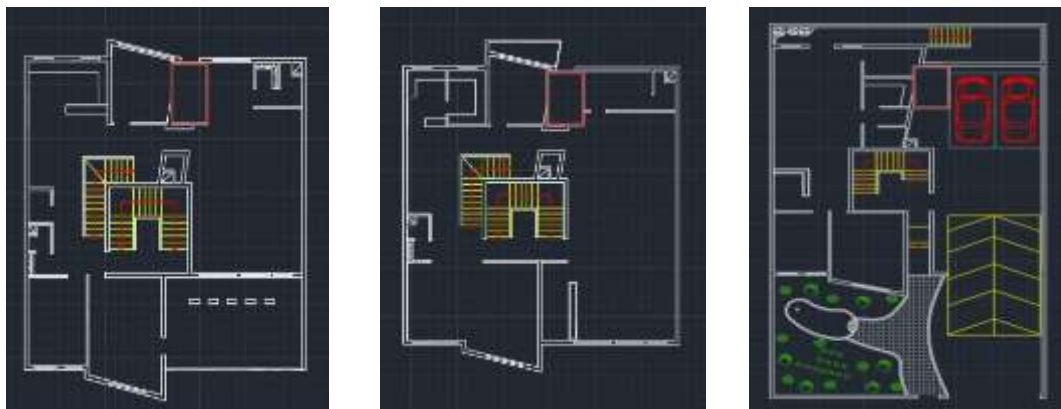
۷-۲. منطقه مورد نظر تحقیق

شناخت روش‌های همساز با اقلیم و همساز کردن این روش‌ها با ویژگی‌های اقلیمی و نیازهای زندگی مردمان مناطق مختلف از جمله اهداف طراحان ساختمان در دستیابی به اهداف طراحی اقلیمی است. بناهای بومی ایران بیشترین سازگاری و همسازي را با شرایط آسایش انسانی دارا هستند. شناخت روش‌های اقلیمی و به روز کردن آن می‌تواند محیطی مطلوب و مناسب را به همراه داشته باشد. قزوین از شهرهای قدیمی ایران و با بافت تاریخی محسوب می‌شود. براساس مطالعات هم‌دمای سالانه، ارتفاعات شمال شرقی و شمالی استان و ارتفاعات آوج در جنوب غرب استان دارای کمینه درجه حرارت و مناطق مرکزی دشت قزوین و اطراف دریاچه سد منجیل دارای بیشینه درجه حرارت است. میانگین درجه حرارت سالیانه ایستگاه‌های هواشناسی از دشت به سمت کوهپایه و مناطق کوهستانی به تدریج کاهش می‌یابد (به استثنای دره شاهرود که یک ۴۲ درجه در تیرماه و کمینه آن / اقلیم محلی محسوب می‌شود). بیشینه درجه حرارت ثبت شده در ایستگاه قزوین طی دوره سی ساله ۴/۱۹۴ درجه در دی ماه بوده است. بنابراین می‌توان چنین در نظر گرفت با ایده دودکش خورشیدی در ساختمان‌های امروزی شهر قزوین بتوان به پایداری و راه حلی برای ذخیره انرژی ارایه نمود.

در شهر قزوین، ایده دودکش خورشیدی به عنوان یکی از راهکارهای تهویه طبیعی و پایدار مورد بررسی قرار گرفته است. این سیستم از انرژی خورشیدی برای ایجاد جریان هوای طبیعی استفاده می‌کند و با بهره‌گیری از تفاوت دما میان فضای داخل و خارج، هوای گرم را به سمت بالا هدایت کرده و هوای تازه را به داخل می‌کشد. این فرآیند موجب کاهش نیاز به سیستم‌های مکانیکی تهویه، بهبود کیفیت هوای داخلی و کاهش مصرف انرژی می‌شود. شرایط اقلیمی نیمه‌خشک قزوین، از جمله دما و رطوبت بالا در فصول گرم و تغییرات فصلی، به عنوان یک متغیر مداخله‌گر در عملکرد دودکش خورشیدی اثر می‌گذارد. این سیستم با طراحی بهینه، ارتفاع و زاویه مناسب، و استفاده از مصالح بهینه می‌تواند به صورت موثری تهویه طبیعی را فراهم کرده و به کاهش مصرف انرژی کمک کند.

۷-۳. ایده و شبیه‌سازی

برای محاسبه کارایی و عملکرد دودکش خورشیدی، از رابطه‌های زیر می‌توان استفاده کرد که بر اساس مکانیزم انتقال حرارت و جریان هوا طراحی شده‌اند.



شکل ۵. پلان ساختمان مسکونی ۳ طبقه طراحی شده با اتوکد

سمت راست پلان طبقه همکف / دومین پلان: پلان طبقه اول / سومین پلان: پلان طبقه دوم

جدول ۴. فرمول محاسباتی اولیه دودکش خورشیدی

فرمول‌ها	مراحل محاسباتی اولیه
ΔP اختلاف فشار (Pa) $\Delta T/T \cdot H \cdot g \cdot \rho = \Delta P$ p چگالی هوا (kg/m^3) g شتاب گرانشی (m/s^2) H ارتفاع دودکش (m) ΔT اختلاف دمای هوا بین ورودی و خروجی ($^{\circ}\text{C}$) T دمای مطلق هوا (K)	اختلاف فشار ناشی از نیروی شناوری سرعت جریان هوا در دودکش $v = \sqrt{\frac{\Delta P \cdot 2}{\rho}}$ (m/s) نرخ جریان حجمی هوا $Q = A \cdot v$ (m ³ /s) A مساحت مقطع دودکش (m ²)

مطالعات نشان داده‌اند که زاویه ۴۵ تا ۷۰ درجه و افزایش ارتفاع، منجر به افزایش سرعت جریان هوا و بهبود عملکرد دودکش می‌شود.

۴-۷. طرح پیشنهادی برای شبیه‌سازی دودکش خورشیدی

با توجه به اطلاعات ارائه‌شده، مراحل زیر بصورت گام به گام می‌توانند پروژه را به صورت کامل پوشش دهند.

جدول ۵. توضیح مراحل گام به گام برای اجرای بهینه سازی پروژه دودکش خورشید در طراحی کاربردی و علم

مراحل پیشنهادی	اجرای مرحله‌ای دودکش خورشید در طراحی کاربردی و علمی
۱ طراحی هندسی	ایجاد یک ساختمان نمونه شامل دودکش خورشیدی با ارتفاع ۵ متر و مقطع مستطیلی. زاویه شیب دودکش را ۷۰ درجه تنظیم کنید. مصالح دیوار دودکش را از نوع آجر با خصوصیات حرارتی استاندارد تعریف کنید.
۲ تنظیم شرایط اقلیمی	ورود داده‌های آب‌وهوایی: فایل داده‌های آب‌وهوایی قزوین (EPW) را در نرم‌افزار بارگذاری کنید. شرایط روز زمستانی را انتخاب کنید (دما، تابش خورشیدی، و سرعت باد غالب غربی).
۳ تعیین شرایط مرزی برای شبیه‌سازی	دمای ورودی هوا: نزدیک به میانگین دمای زمستان قزوین (فرضاً 5°C تا 8°C) تابش خورشیدی: بررسی میزان تابش خورشیدی در یک روز زمستانی بر اساس فایل EPW سرعت باد: به‌طور متوسط ۲ تا ۵ متر بر ثانیه برای باد غالب غربی.
۴ انتخاب روش شبیه‌سازی	استفاده از ماژول‌های جریان هوا و انتقال حرارت DesignBuilder تحلیل انتقال حرارت هدایتی و همرفتی در دیوارهای دودکش.
۵ تحلیل دینامیک حرارتی	بررسی توزیع دما در دودکش و جریان هوا. تخمین نرخ جریان حجمی هوا در دودکش.
۶ تحلیل خروجی‌ها	نرخ جریان حجمی هوا (QQQ) بر حسب متر مکعب بر ثانیه اختلاف دمای ورودی و خروجی (ΔT) نرخ صرفه‌جویی انرژی برای تهویه ساختمان
۷ تصویرسازی داده‌ها	نمودارهای تغییرات دما و سرعت جریان هوا در طول روز نمایش گرافیکی مسیر جریان هوا
۸ بهینه‌سازی و پیشنهادات	تحلیل حساسیت بررسی تأثیر تغییر ارتفاع (مثلاً ۶ متر) یا زاویه دودکش (مثلاً ۶۰ درجه) بر عملکرد پیشنهادات طراحی:
۹ گزارش‌دهی	افزودن پوشش‌های حرارتی مانند شیشه یا PCM برای افزایش بهره‌وری حرارتی استفاده از دریچه‌های کنترل جریان هوا در ورودی دودکش تدوین نتایج شبیه‌سازی به صورت نمودار و جداول. مقایسه عملکرد دودکش خورشیدی در شرایط مختلف اقلیمی زمستانی

۸. یافته‌ها

در این پژوهش، عملکرد دودکش خورشیدی با تمرکز بر کاربرد آن در ساختمان‌های مسکونی شهر قزوین مورد بررسی قرار گرفت. ارزیابی انجام‌شده بر اساس سه محور اصلی شامل مکان‌یابی و طراحی هندسی دودکش، شرایط اقلیمی و تأثیر آن بر عملکرد سیستم، و مقایسه نسبی کارایی دودکش خورشیدی با روش‌های متداول تهویه انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که عملکرد دودکش خورشیدی به میزان قابل توجهی تحت تأثیر نحوه استقرار آن در ساختمان، میزان دریافت تابش خورشیدی، ویژگی‌های هندسی کانال و همچنین شرایط دمایی و باد منطقه قرار دارد. بر این اساس، یافته‌های پژوهش به شرح زیر ارائه می‌شوند. بررسی نشان می‌دهد که قرارگیری دودکش خورشیدی در بخش میانی پلان و در موقعیتی که امکان دریافت مناسب تابش خورشیدی را داشته باشد، می‌تواند به بهبود عملکرد سیستم کمک کند. قرارگیری مناسب دودکش موجب می‌شود مسیر حرکت هوا در ارتباط مناسب‌تری با فضاهای داخلی قرار گرفته و هوای گرم تولیدشده در کانال بتواند با سهولت بیشتری از ساختمان خارج شود. همچنین، انتخاب محل مناسب برای دودکش می‌تواند بر نحوه توزیع جریان هوا در فضاهای داخلی و میزان بهره‌گیری ساختمان از تهویه طبیعی تأثیرگذار باشد.

با توجه به شرایط باد غالب در شهر قزوین، که عمدتاً از سمت غرب گزارش شده است، جهت‌گیری و مکان‌یابی دودکش باید به گونه‌ای انجام شود که اثر نامطلوب باد بر عملکرد مکش حرارتی سیستم به حداقل برسد. قرارگیری دودکش در موقعیتی که از مواجهه مستقیم با بادهای شدید جلوگیری شود، می‌تواند به پایداری جریان صعودی هوای گرم کمک کند. در عین حال، استفاده صحیح از فشار باد در محل بازشوهای ورودی می‌تواند به ورود هوای تازه به ساختمان کمک کرده و در برخی شرایط، عملکرد تهویه طبیعی را تقویت کند. از نظر هندسی، استفاده از زاویه شیب حدود ۷۰ درجه می‌تواند گزینه مناسبی برای دریافت تابش خورشیدی، به‌ویژه در فصل زمستان، باشد. در این فصل ارتفاع خورشید نسبت به افق کاهش می‌یابد و بنابراین، تغییر زاویه سطح جاذب می‌تواند میزان تابش دریافتی و در نتیجه میزان انرژی قابل استفاده در دودکش را تحت تأثیر قرار دهد. انتخاب زاویه مناسب باید با توجه به مسیر حرکت خورشید، عرض جغرافیایی قزوین و دوره زمانی موردنظر برای بهره‌برداری از سیستم انجام شود. همچنین، استفاده از مقطع مستطیلی برای دودکش امکان ایجاد سطح تماس مناسب میان هوای عبوری و سطوح گرم‌کننده را فراهم می‌کند.

این نوع مقطع می‌تواند فضای کافی برای شکل‌گیری جریان طبیعی هوا ایجاد کرده و در صورت طراحی صحیح ابعاد، انتقال حرارت میان سطح جاذب و هوای داخل کانال را بهبود دهد. با این حال، افزایش بیش از حد عرض یا عمق کانال ممکن است موجب کاهش سرعت جریان و تغییر رفتار حرارتی سیستم شود؛ بنابراین، ابعاد مقطع باید متناسب با ارتفاع دودکش و میزان جریان مورد نیاز تعیین شود. شرایط اقلیمی قزوین و وجود اختلاف دمای قابل توجه میان ساعات شب و روز، ظرفیت مناسبی برای استفاده از راهکارهای تهویه طبیعی ایجاد می‌کند. در طول روز، تابش خورشیدی موجب گرم شدن سطح جاذب و افزایش دمای هوای داخل دودکش می‌شود. در نتیجه، اختلاف چگالی میان هوای گرم داخل دودکش و هوای خنک‌تر محیط افزایش یافته و نیروی شناوری لازم برای حرکت هوا ایجاد می‌شود. در ساعات شب نیز کاهش دمای محیط می‌تواند شرایط مناسبی برای تهویه شبانه و تخلیه گرمای ذخیره‌شده در ساختمان فراهم کند، مشروط بر آنکه سیستم از نظر طراحی امکان استفاده از جریان هوای شبانه را داشته باشد.

تابش خورشیدی یکی از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده عملکرد دودکش خورشیدی است. در فصل زمستان، اگرچه شدت تابش نسبت به فصل تابستان کمتر است، اما پایین‌تر بودن ارتفاع خورشید نسبت به افق اهمیت انتخاب زاویه مناسب برای سطح جاذب را افزایش می‌دهد. بنابراین، استفاده از سطحی با زاویه مناسب می‌تواند دریافت انرژی خورشیدی را افزایش داده و شرایط لازم برای گرم شدن هوای داخل کانال را فراهم کند. این موضوع به‌ویژه برای ساختمان‌های مسکونی قزوین اهمیت دارد، زیرا می‌تواند ظرفیت استفاده از انرژی خورشیدی را در دوره‌های سرد سال افزایش دهد.

باد غالب غربی در قزوین می‌تواند هم به عنوان یک عامل تقویت‌کننده و هم به عنوان عامل محدودکننده عملکرد دودکش خورشیدی عمل کند. در صورتی که بازشوهای ورودی ساختمان به شکل مناسبی نسبت به جهت باد قرار گیرند، فشار ناشی از باد می‌تواند ورود هوای تازه به فضای داخلی را تسهیل کند. در مقابل، قرارگیری نامناسب دهانه خروجی دودکش در مسیر باد شدید ممکن است موجب ایجاد فشار نامطلوب و کاهش اثر مکش حرارتی شود. بنابراین، جهت‌گیری ساختمان، موقعیت بازشوها و محل قرارگیری دودکش باید به صورت هماهنگ با الگوی باد غالب منطقه طراحی شوند. یکی از مهم‌ترین مزایای دودکش خورشیدی در مقایسه با سیستم‌های مکانیکی، امکان ایجاد جریان هوا بدون نیاز مستقیم به انرژی الکتریکی است. این ویژگی می‌تواند به کاهش مصرف انرژی ساختمان و کاهش وابستگی به تجهیزات مکانیکی تهویه کمک کند. همچنین، امکان استفاده از مصالح ساختمانی متداول و در دسترس، از جمله مصالح بومی مانند آجر، می‌تواند اجرای این سیستم را در ساختمان‌های مسکونی تسهیل کند و هزینه‌های ساخت و نگهداری آن را نسبت به برخی سامانه‌های مکانیکی کاهش دهد. دودکش خورشیدی همچنین می‌تواند در کنار سایر راهکارهای غیرفعال، مانند سایه‌اندازی، عایق‌کاری مناسب و

تهویه شبانه، مورد استفاده قرار گیرد. ترکیب این راهکارها می‌تواند عملکرد کلی پوسته ساختمان را بهبود داده و در شرایط مناسب، نیاز به استفاده از سیستم‌های سرمایشی و تهویه مکانیکی را کاهش دهد. با وجود مزایای ذکر شده، عملکرد دودکش خورشیدی به شدت به شرایط تابش خورشیدی وابسته است. در روزهای ابری، بارانی یا در شرایطی که تابش مستقیم خورشید کاهش می‌یابد، دمای سطح جاذب و در نتیجه اختلاف چگالی هوا کاهش پیدا می‌کند و نیروی شناوری ایجاد شده نیز ضعیف‌تر خواهد شد. بنابراین، نرخ تهویه سیستم در چنین شرایطی ممکن است نسبت به ساعات دارای تابش مناسب کاهش یابد. همچنین، عملکرد دودکش خورشیدی در قزوین باید با توجه به تفاوت شرایط اقلیمی فصل‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گیرد. در فصل زمستان، کاهش ارتفاع خورشید و شدت کمتر تابش می‌تواند میزان انرژی دریافتی سیستم را محدود کند.

از سوی دیگر، همین شرایط در صورت طراحی مناسب می‌تواند امکان استفاده از دودکش خورشیدی را به عنوان بخشی از سامانه گرمایش غیرفعال فراهم کند. بنابراین، عملکرد سیستم در قزوین باید به صورت فصلی بررسی شود و نمی‌توان یک الگوی عملکرد ثابت را برای تمام سال در نظر گرفت. در مجموع، یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که مکان‌یابی، زاویه قرارگیری، هندسه کانال، میزان تابش خورشیدی و شرایط باد از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر عملکرد دودکش خورشیدی در ساختمان‌های مسکونی شهر قزوین هستند. انتخاب محل مناسب برای دودکش و جهت‌گیری صحیح آن می‌تواند موجب افزایش دریافت انرژی خورشیدی و بهبود جریان طبیعی هوا شود. همچنین، بهره‌گیری از شرایط مناسب باد و اختلاف دمای شبانه‌روزی منطقه می‌تواند عملکرد سیستم را در دوره‌های مختلف سال تقویت کند. بر این اساس، دودکش خورشیدی می‌تواند به عنوان یکی از راهکارهای غیرفعال قابل استفاده در ساختمان‌های مسکونی قزوین مطرح باشد؛ با این حال، میزان موفقیت آن به طراحی متناسب با شرایط اقلیمی و معماری ساختمان وابسته است. بنابراین، استفاده از این سیستم بدون توجه به جهت‌گیری، ابعاد، مصالح، شرایط تابش و الگوی باد ممکن است به عملکرد مطلوب منجر نشود. نتایج حاصل بر ضرورت طراحی اقلیمی و متناسب‌سازی دودکش خورشیدی با شرایط خاص شهر قزوین تأکید دارد. لذا پیشنهادات به ترتیب ذیل نیز به منظور بهبود طراحی ارائه می‌گردد:

- ایجاد ورودی‌های قابل تنظیم هوا در مناطق مخالف جهت باد غالب، امکان کنترل بهتر جریان هوا را فراهم می‌کند.
- افزودن لایه‌های عایق در دیواره‌های دودکش برای کاهش تلفات حرارتی در شب‌ها و هوای سرد.
- استفاده از رنگ تیره یا مواد با ظرفیت حرارتی بالا در داخل دودکش برای جذب بهتر انرژی حرارتی.
- افزایش طول دودکش یا تغییر ابعاد مقطع مستطیل به نحوی که جریان هوای قوی‌تری ایجاد شود، بسته به محدودیت ارتفاع، ممکن است مفید باشد.
- دودکش خورشیدی در این طراحی با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی قزوین بهینه به نظر می‌رسد، اما عملکرد آن می‌تواند با تنظیمات خاصی (مثل موقعیت دقیق ورودی‌ها و بهبود عایق کاری) بهبود یابد. این سیستم تهویه طبیعی می‌تواند برای کاهش مصرف انرژی و بهبود کیفیت هوا در آپارتمان‌های این منطقه بسیار مؤثر باشد.

۸-۱. بحث

اهمیت و کارایی دودکش‌های خورشیدی به عنوان راهکاری برای بهینه‌سازی تهویه طبیعی و کاهش مصرف انرژی در اقلیم نیمه‌خشک، مانند قزوین، مورد تأکید قرار گرفته است. سیستم دودکش خورشیدی با استفاده از تفاوت دمایی میان فضای داخلی و خارجی ساختمان، جریان هوای طبیعی را به وجود می‌آورد. این جریان موجب کاهش وابستگی به سیستم‌های تهویه مکانیکی می‌شود و از این طریق مصرف انرژی را کاهش می‌دهد. این کاهش مصرف انرژی نه تنها به افزایش بهره‌وری و صرفه‌جویی اقتصادی کمک می‌کند، بلکه از منظر زیست‌محیطی نیز مؤثر بوده و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهد. از آنجا که طراحی و اجرای بهینه این سیستم‌ها، شامل تعیین ارتفاع، زاویه و مصالح مناسب، می‌تواند بهبود چشمگیری در کارایی سیستم داشته باشد، لازم است متغیرهای اقلیمی منطقه‌ای نظیر دما، رطوبت و تغییرات فصلی نیز در نظر گرفته شوند. در قزوین، به عنوان منطقه‌ای با اقلیم نیمه‌خشک، بهره‌برداری از سیستم‌های تهویه پایدار مانند دودکش خورشیدی، به کاهش نیاز به سیستم‌های تهویه مکانیکی و افزایش آسایش حرارتی ساکنان کمک می‌کند. استفاده از فناوری‌های جدید، نظیر شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات، به بررسی و بهینه‌سازی دقیق‌تر این سیستم‌ها کمک می‌کند و امکان طراحی دقیق‌تری را فراهم می‌آورد. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی‌ها نشان داده است که تغییر در ارتفاع و زاویه دودکش می‌تواند جریان هوای طبیعی و فشار منفی در ساختمان را بهینه کند.

در کنار مزایای فنی، ملاحظات اقتصادی و زیست‌محیطی نیز حائز اهمیت هستند. نصب و استفاده از سیستم‌های دودکش خورشیدی می‌تواند به کاهش هزینه‌های انرژی و افزایش پایداری زیست‌محیطی ساختمان‌ها منجر شود. به عنوان یک راهکار مقرون‌به‌صرفه،

سنجش میزان اثربخشی دودکش‌های خورشیدی در تأمین تهویه و آسایش حرارتی ساختمان‌های مسکونی

این سیستم‌ها امکان بهبود تهویه، کاهش مصرف انرژی و ارتقاء کیفیت هوای داخلی را فراهم می‌کنند. این تحلیل نشان می‌دهد که دودکش‌های خورشیدی به عنوان راهکاری پایدار و مقرون‌به‌صرفه برای طراحی و بهینه‌سازی ساختمان‌ها، به‌ویژه در مناطق با اقلیم‌های گرم و خشک، پتانسیل بسیاری دارند. با استفاده بهینه و همگام با شرایط اقلیمی خاص، می‌توان به دستاوردهای مهمی در زمینه انرژی و پایداری محیطی دست یافت.

۹. نتیجه‌گیری

این مطالعه بر روی استفاده از انرژی خورشیدی برای تهویه طبیعی متمرکز است و با هدف کاهش مصرف انرژی و بهبود کیفیت هوای داخلی از طریق طراحی بهینه، ارتفاع، زاویه و مواد سیستم دودکش تأکید می‌کند که:

۱. کاهش انرژی و کیفیت هوا: دودکش‌های خورشیدی می‌توانند نیازهای تهویه مکانیکی را به میزان قابل توجهی کاهش دهند، کیفیت هوای داخل خانه را بهبود بخشند و انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش دهند. آنها با استفاده از اختلاف دما برای ایجاد جریان هوای طبیعی و افزایش راحتی حرارتی عمل می‌کنند.

۲. ملاحظات اقلیمی: اقلیم نیمه خشک با تغییرات دمایی فصلی و روزانه، به عنوان یک متغیر مداخله‌ای عمل می‌کند که بر عملکرد سیستم تأثیر می‌گذارد و نیاز به راه حل‌های طراحی مناسب در قزوین را برجسته می‌کند.

۳. بهینه‌سازی طراحی: طراحی مؤثر و انتخاب مواد باعث افزایش کارایی سیستم می‌شود. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که تنظیمات در ارتفاع و زاویه، جریان هوا و اختلاف فشار را بهینه می‌کند.

۴. مزایای اقتصادی و زیست محیطی: دودکش‌های خورشیدی یک راه حل مقرون به صرفه با بازگشت سریع سرمایه به دلیل صرفه جویی در انرژی ارائه می‌دهند که آنها را برای طراحی ساختمان‌های پایدار و آگاهانه از محیط زیست در آب و هوای مشابه ایده آل می‌کند. در این تحقیق، تأثیر و کارایی سیستم دودکش خورشیدی به عنوان راهکاری برای تهویه طبیعی و کاهش مصرف انرژی در اقلیم نیمه‌خشک قزوین مورد بررسی قرار گرفته است. سیستم دودکش خورشیدی با بهره‌گیری از اختلاف دما میان فضای داخل و خارج ساختمان، به شکلی طبیعی هوای گرم را به سمت بالا هدایت کرده و هوای تازه را به داخل می‌کشد، که این فرآیند نه تنها موجب کاهش نیاز به سیستم‌های مکانیکی تهویه می‌شود، بلکه به بهبود کیفیت هوای داخلی و ایجاد آسایش حرارتی برای ساکنان نیز کمک می‌کند. در نهایت، این تحقیق نشان می‌دهد که سیستم دودکش خورشیدی می‌تواند به عنوان راهکاری مؤثر و مقرون‌به‌صرفه در طراحی ساختمان‌های سبز، بهبود تهویه و کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌ها مورد استفاده قرار گیرد. این سیستم در طراحی ساختمان‌های آینده با توجه به پایداری زیست محیطی و اقتصادی، به یک راهکار کاربردی و علمی برای شهرهایی با اقلیم‌های گرم و خشک تبدیل شده و پتانسیل فراوانی در کاهش اثرات زیست محیطی و ایجاد محیطی سالم‌تر و پایدارتر دارد.

۸. منابع فارسی و انگلیسی

- برزگر، ز و افشون، ع. (۱۳۹۷). سنجش عملکرد آسایش حرارتی در تلفیق بادگیر و دودکش خورشیدی (نمونه موردی: خانه رسولیان یزد)، نشریه انرژی ایران.
- پورسیستانی، ح و همکاران. (۱۴۰۲). بررسی نقش مکان‌گزینی شومینه‌های خورشیدی در تأمین آسایش در یک ساختمان اداری در اقلیم گرم و خشک، مورد مطالعاتی: شهر کرمان، نشریه آرمان شهر.
- پورسیاحی، ز و رهایی، ا. (۱۴۰۱). بررسی عملکرد اقلیمی دودکش‌های خورشیدی برای خانه‌های اهواز در اتاق‌های آفتابگیر جنوبی، نشریه معماری و شهرسازی.

-Alaidroos, A., & Krarti, M. (۲۰۱۶). Numerical modeling of ventilated wall cavities with spray evaporative cooling systems. *Energy and Buildings*, 130, ۳۵۰-۳۶۵.

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.046>

-Al-Obaidi, K., & Woods, D. (۲۰۱۹). Thermal performance of PCM-based solar chimneys. *Renewable Energy*.

-Biswas, N., Mandal, D. K., Bose, S., Manna, N. K., & Benim, A. C. (۲۰۲۳). Experimental treatment of solar chimney power plant—A comprehensive review. *Energies*, 16(۱۷), ۶۱۳۴.

<https://doi.org/10.3390/en16176134>

-Bosu, I., Mahmoud, H., Ookawara, S., & Hassan, H. (۲۰۲۳). Applied single and hybrid solar energy techniques for building energy consumption and thermal comfort: A comprehensive review. *Solar Energy*, ۲۵۹, ۱۸۸-۲۲۸. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.05.006>

-Chen, D., Bhandopadhyay, P., Halldorsson, J., Byrjalsen, C., Heiselberg, P., & Li, Y. (۲۰۰۳). An

- experimental investigation of a solar chimney model with uniform wall heat flux. *Building and Environment*, 38(۷), ۸۹۳-۹۰۶. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(03\)00057-X](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(03)00057-X)
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (۱۹۹۱). *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons.
- Garcia, M., et al. (۲۰۲۱). Advanced materials in solar chimney design. *Journal of Building Science*.
- Givoni, B. (۱۹۹۱). Performance and applicability of passive and low-energy cooling systems. *Energy and Buildings*, 17, ۱۷۷-۱۹۹. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(91\)90106-D](https://doi.org/10.1016/0378-7788(91)90106-D)
- Huang, Y., Wang, B., Shi, L., Zhong, H., & Dong, B. (۲۰۲۴). Performance evaluation of solar chimney in tunnel for passive ventilation and smoke exhaustion: A numerical approach. *Applied Thermal Engineering*, ۲۳۸, ۱۲۲۲۲۷. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.122227>
- Jones, P., & Lee, T. (۲۰۲۰). Innovative ventilation solutions for modern buildings. *Journal of Sustainable Architecture*.
- Lee, S., & Chen, H. (۲۰۲۰). Durability of solar chimneys. *International Journal of Sustainable Development*.
- Li, W., et al. (۲۰۲۳). Structural design principles of solar chimneys. *Journal of Solar Energy Engineering*.
- Long, T., Li, W., Lv, Y., Li, Y., Liu, S., Lu, J., Huang, S., & Zhang, Y. (۲۰۲۲). Benefits of integrating phase-change material with solar chimney and earth-to-air heat exchanger system for passive ventilation and cooling in summer. *Journal of Energy Storage*, 48, ۱۰۴۰۳۷. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104037>

Performance Evaluation of a Solar Chimney in Qazvin City for Residential Buildings

Atefeh sadat Mousavi-Kia^۱

Abstract

A solar chimney is considered one of the sustainable systems for natural ventilation in buildings. It utilizes solar energy to generate natural airflow and can play an effective role in reducing energy consumption and improving indoor air quality. In this study, the independent variables include the design of the solar chimney system, its height and inclination angle, as well as the use of optimized materials and technologies. The aim is to investigate the effects of these factors on the performance of the ventilation system and energy consumption reduction. The intervening variable in this research is the semi-arid climatic condition of Qazvin, which can affect the performance and efficiency of the solar chimney system and directly influence the results of the assessment. This variable includes temperature, humidity, and daily and seasonal variations in climatic conditions. The necessity of this research arises from the increasing need to utilize renewable energy sources and reduce energy consumption in buildings, particularly in regions with semi-arid climates such as Qazvin. Given climate change, environmental challenges, and rising energy costs, the use of sustainable ventilation systems, including solar chimneys, has become an important approach in the design and optimization of modern buildings. The research methodology is based on two-dimensional simulations, together with geometric formulations, to evaluate the feasibility and performance of the proposed concept based on observations of selected case studies. In this study, the effectiveness of the solar chimney system in improving natural ventilation and reducing energy consumption under the semi-arid climatic conditions of Qazvin is investigated. The results indicate that a solar chimney, as a sustainable and economical technology, has the potential to improve thermal comfort and enhance building ventilation in hot and dry climates. Moreover, optimized design and appropriate material selection are among the key factors that can enhance the efficiency of the system and make it an effective solution for optimizing building energy consumption.

Keywords: Solar Chimney, Natural Ventilation, Energy, Thermal Comfort

^۱ Master of Architecture, Department of Civil Engineering and Architecture, Faculty of Engineering and Technology, Raja University, Qazvin, Iran.