



Augmenting the Performance of the Traditional Wind Catcher Equipped with Solar Energy Absorber Plate

Azam Noroozi^{*1} and Yannis S. Veneris²

Received 14/Jan/2025

Revised: 09/Apr/2025

Accepted: 14/Jun/2025

(PP.: 23-36)

Abstract

Introduction: Before the advent of modern mechanical systems, the windcatcher constituted one of the essential building elements in hot and arid climates, employed for cooling and natural ventilation of interior spaces. The operation of windcatchers requires a driving force; however, the traditional system is predominantly applied for heat dissipation rather than supplying ambient cool air through the interior, and in the absence of adequate external airflow, the stack effect becomes negligible.

Research Method: In this study, a windcatcher equipped with a solar energy absorber plate was proposed. Computational fluid dynamics (CFD) simulations were conducted to evaluate the influence of incoming solar radiation on the volume flow rate at the room entrance and the airflow pattern within the interior. To validate the simulation model, a series of experiments was carried out.

Results and Discussion: The simulation results demonstrated that the zone of air circulation inside the room is improved with increasing solar radiation, which intensifies the buoyancy force. Under conditions of no wind flow and a solar radiation intensity of 1000 W/m^2 , the airflow rate was measured at approximately 0.006 kg/s , indicating the system achieves better performance when wind speed is zero.

Conclusion: The findings confirm that integrating a solar absorber plate effectively enhances the windcatcher's buoyancy-driven ventilation, making it a viable passive cooling strategy particularly advantageous under windless conditions in hot and arid regions.

Keywords: Solar Chimney, Ventilation, Wind Speed, Solar Energy.

¹**Assistant Prof.**, Department of Civil Engineering and Architecture, Faculty of Engineering, University of Torbat Heydarih, Torbat Heydarih, Iran. (Corresponding Author) a.noroozi@torbath.ac.ir

²**Prof.**, Department of Architecture, National Technical Uni. of Athens, Athens, Greece.

ارتقاء عملکرد بادگیر سنتی با بهره‌گیری از صفحه جاذب انرژی

خورشیدی

اعظم نوروزی¹ و یانی ونریس²

تاریخ پذیرش: 1404/تیر/24	تاریخ بازنگری: 1404/فروردین/20	تاریخ دریافت: 1403/دی/25
(صفحات: 23-36)		

چکیده

مقدمه: اقلیم گرم و خشک، با تابستان‌های سوزان و بارندگی اندک در طول سال، پیش از ظهور سیستم‌های مکانیکی نوین، به معماری سنتی وابسته بود و بادگیر به عنوان یکی از اجزای بنیادین در سرمایش و تهویه فضاهای داخلی مورد استفاده قرار می‌گرفت. سازوکار عملکردی بادگیرها بر پایه دو نیروی باد و شناوری استوار است؛ با این حال، بادگیرهای مرسوم عمدتاً نقش سیستم تخلیه هوای داخلی را ایفا می‌کند و در مناطق و بازه‌های زمانی با سرعت باد پایین از کارایی لازم برخوردار نیست.

روش تحقیق: در پژوهش حاضر، با حفظ شاکله کلی و عملکردی بادگیر سنتی و اعمال کمترین تغییرات، یک صفحه جاذب خورشیدی به سیستم افزوده شد تا کارایی آن ارتقا یابد. با بهره‌گیری از روش عددی مبتنی بر دینامیک سیال محاسباتی، تأثیر سرعت باد ورودی و شدت تابش بر سرعت جریان هوا در دریچه ورودی به اتاق، الگوی توزیع جریان در فضای داخلی و نرخ جریان هوا مورد بررسی قرار گرفت و صحت مدل از طریق اعتبارسنجی تجربی تأیید شد.

نتایج و بحث: یافته‌های پژوهش نشان داد که افزایش شدت تابش، سرعت هوا در دریچه ورودی اتاق را به طور معناداری افزایش داده و ناحیه گردش هوا در فضای داخلی را گسترش می‌دهد؛ این اثر در سرعت‌های پایین‌تر باد ورودی بارزتر است. در شرایط سرعت باد نزدیک به صفر و شدت تابش 1000 وات بر مترمربع، نرخ جریان هوا به حدود 0.006 کیلوگرم بر ثانیه ارتقا می‌یابد.

نتیجه‌گیری: سیستم پیشنهادی، با ایجاد افزایش چندبرابری در دبی جرمی هوا و ارتقای نزدیک به سه‌برابری سرعت جریان در دریچه ورودی اتاق در سرعت‌های پایین باد، در بهبود کارایی بادگیر هنگام نبود وزش باد محیطی نقشی مؤثر و چشمگیر ایفا می‌کند.

واژگان کلیدی: دودکش خورشیدی، تهویه ساختمان، سرعت جریان باد، انرژی خورشیدی.

¹ استادیار، گروه عمران و معماری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربت حیدریه، تربت حیدریه، ایران. (نویسنده مسئول) a.noroozi@torbath.ac.ir

² استاد، معماری، معماری، پلی تکنیک، آتن، یونان.

1-مقدمه

در سال‌های اخیر تهویه طبیعی روشی برای کاهش مصرف انرژی در ساختمان شناخته شده است. علاوه بر این نتایج چندین تحقیق نارضایتی ساکنان از شرایط محیطی کنترل شده به صورت مکانیکی را نشان می‌دهد. بر اساس برخی از مطالعات عملکرد سیستم مکانیکی که کاملاً از محیط بیرون جدا شده است، حتی می‌تواند به‌دوراز آسایش و سلامت باشد (Looman et al., 2004). بادگیرها صدها سال پیش در کشورهای خاورمیانه ساخته شدند. این سیستم شامل برجی بلند شبیه دودکش است که یک سر آن در فضای تابستان‌نشین و قسمت بالای آن در ارتفاع معینی روی پشت بام قرار دارد (Zarandi, 2009). این سیستم یک استراتژی کارآمد و قابل اجرا برای هدایت باد مناسب به محیط زندگی جهت تعدیل گرما و تنظیم دما از نظر آسایش حرارتی است (Jazayeri & Gorginpour, 2011).

1-1-مروری بر پیشینه پژوهشی

نتایج محاسبات با استفاده از دینامیک سیالات نشان داده است که راندمان تهویه سیستم بادگیر توسط باد خارجی 76 درصد بیشتر از اثر شناوری است (Saadatian et al., 2012). مطالعه بر روی بادگیر چهار طرفه نشان می‌دهد که در 61.5 درصد از زوایای برخورد باد، هوای خروجی به بیرون بیشتر از هوای مکیده شده از فضای بیرون است، اگرچه نسبت این دو جریان در بقیه زوایای برخورد تقریباً با یکدیگر برابر است (Mohamadabadi et al., 2018). بنابراین در زمان وزش باد، عملکرد بادگیرهای سنتی بیشتر در مکش هوای داخل به بیرون ساختمان خواهد بود.

نصب یک منبع حرارتی در داخل هر بادگیر، حرکت جریان هوا را به دلیل اثر شناوری تسهیل می‌کند. بر اساس مطالعاتی که توسط گروهی از محققان در مورد آسایش حرارتی ساکنان سه ساختمان انجام شد، مشخص شد که بین آسایش حرارتی و داشتن منبع گرما قوی مانند تابش شدید خورشیدی رابطه منفی وجود دارد (Saadatian et al., 2012). با این حال، نتیجه تصویرسازی دود و شبیه‌سازی نشان داد که نصب یک

منبع حرارتی عملکرد بادگیر را به‌ویژه در سرعت‌های پایین باد بهبود می‌بخشد (Elmualim, 2006b). دودکش خورشیدی یک استراتژی ایستای مناسب در افزایش تهویه طبیعی بوده که استفاده از انرژی‌های کمکی را در تأمین تهویه لازم ساختمان و آسایش حرارتی کاهش می‌دهد. ادغام دودکش خورشیدی با سایر فناوری‌ها مانند بادگیر توسط چندین کار برای افزایش عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفته است (Monghasemi & Vadiie, 2018). نوانگو و همکاران (Nouanégué et al., 2008) در تحلیلی عددی تأثیر ترکیب دودکش خورشیدی با بادگیر را در زمان‌هایی که وزش باد وجود ندارد و یا سرعت آن کم است مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که افزایش متناسبی در عملکرد تهویه با نسبت ابعاد برج، به‌ویژه در اعداد ربلی بالا وجود داشت. همچنین برای دستیابی به بهترین عملکرد تهویه، نسبت ابعاد باید در این مورد بهینه شود. در پژوهشی دیگر موسوی و همکاران (Moosavi et al., 2020) سیستم ترکیبی از بادگیر و دودکش خورشیدی را برای یک ساختمان اداری دو طبقه مطالعه کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که سیستم می‌تواند ضریب نفوذ هوایی حدود 9 در داخل ساختمان به دست آورد. علاوه بر این، در اوج ساعات کاری در تابستان، پیش‌بینی می‌شود که تا 90 درصد صرفه‌جویی در مصرف انرژی حاصل شود.

معرفت و حقیقی (Maerefat & Haghighi, 2010) استفاده از یک سیستم متشکل از یک دودکش خورشیدی و یک حفره خنک‌کننده تبخیری را پیشنهاد کرده‌اند. یافته‌ها نشان می‌دهد که این سیستم می‌تواند شرایط مناسب تهویه داخلی را در شرایط مختلف ایجاد کند. در چند پژوهش دیگر، محققان الگوهای مختلفی از ترکیب بادگیر و دودکش خورشیدی ایجاد کردند. علاوه بر این، آنها تأثیر پارامترهای دودکش خورشیدی را بر بادگیر بررسی نمودند. نتایج حاکی از آن است که سیستم‌ها در روزهای مختلف سال عملکرد مطلوبی داشته‌اند (Abdallah et al., 2013) و (Abdallah et al., 2014) و (Mahdavinejad & Khazforoosh, 2014) و (Jomehzadeh et al., 2020). در تلاشی دیگر خاکزند و

همکاران (Khakzand et al., 2024) بادگیر سنتی را با یک دودکش خورشیدی را به دو شکل ترکیب کردند و در موقعیت‌های مشابه مورد ارزیابی قرار دادند. نتیجه ارزیابی نشان داد که هر دو شکل ترکیبی باعث بهبود نرخ تهویه و کاهش دما در محیط داخل بنا می‌شود.

در پژوهشی دیگر کارایی یک سیستم ایستا مرکب از بادگیر و سیستم سرمایش تبخیر و دودکش خورشیدی در اقلیم نیمه‌خشک الجزیره مورد تحلیل قرار گرفت. این مطالعه موفقیت سیستم خنک‌کننده خورشیدی غیر فعال را در ایجاد یک محیط راحت و دارای تهویه مناسب در آب‌وهوای نیمه‌خشک مشخص ساخت. همچنین ایده-هایی در مورد آسایش کم‌مصرف ارائه داده و راه‌حلی عملی و پایدار برای به حداقل رساندن نیازهای انرژی ساختمان نشان می‌دهد (Saifi et al., 2024).

در یک پژوهش انجام شده در ارتقای بادگیر سنتی، ادغام بادگیر سنتی با سیستم سرمایش تبخیری پیشنهاد شد (Noroozi & Veneris, 2018). نتایج مطالعه تئوری و تجربی آن نشان داد که حتی در شرایط سرعت صفر جریان هوای محیطی، بادگیر پیشنهادی قادر به ایجاد جریان هوا با سرعت بیش از 0.5 متر بر ثانیه است. همچنین جعفری و کلانتر مطالعاتی در تهویه طبیعی با سیستم بادگیر ادغام شده با دودکش مورب و سیستم اسپری آب را در زمان سرعت وزش باد صفر انجام دادند. نتایج نشان‌دهنده بهبود کارایی سیستم در نبود وزش باد بود (Jafari & Kalantar, 2022).

مطالعات متعددی در خصوص دودکش‌های خورشیدی با استفاده از روش دینامیک سیال محاسباتی انجام شده که بیانگر توانایی مدل‌های دینامیک سیال محاسباتی موجود، در پیش‌بینی دقیق توزیع سرعت و دما همراه با سایر مشخصات جریان است (Ghadiri et al., 2012). در تحقیقی از شبیه‌سازی بر اساس دینامیک سیال محاسباتی برای تحلیل اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی ضریب فشار در یک‌چهارم رو به باد و پشت به باد یک بادگیر مربعی در سرعت نرمال وزش باد استفاده شد، نتایج معین ساخت که همخوانی مناسبی (1% خطا) در نتایج مربوط به جهت رو به باد و انطباق کمتری در نتایج سمت پشت به باد وجود دارد (Elmualim, 2006a).

لی و مک (Li & Mak, 2007) نتایج شبیه‌سازی بر پایه دینامیک سیال محاسباتی خود را با اندازه‌گیری‌های تونل باد انجام شده در تحقیقات دیگری مقایسه کردند. این مقایسه در بادگیر مربعی به طول 500 میلی‌متر انجام گرفت و در نتیجه هماهنگی خوبی بین دو نتیجه حاصل شد. در پژوهش‌های دیگری برای ارزیابی عملکرد بادگیر دایره‌ای، پیش‌بینی نرخ جریان در بادگیر و سنجش کارایی سیستم ترکیبی بادگیر و دودکش خورشیدی از روش دینامیک سیال محاسباتی استفاده شد (Casey & Wintergerste, 2000) و (Franke et al., 2004) و (Khakzand et al., 2024).

مطالعات انجام شده توسط غدیری و همکارانش (Ghadiri et al., 2012)، پاسخ‌های شبیه‌سازی‌های مبتنی بر دینامیک سیال محاسباتی را با آزمایش‌های دقیق تونل باد تأیید کرد. نتایج نشان داد که این روش راهکاری قابل اعتماد برای مطالعه بادگیر است، اما در پیش‌بینی مدل‌هایی با جهت وزش باد غیر عمودی دقت کمتری دارد. همین‌طور در بررسی تحلیل‌های متفاوت از بادگیرها و روش‌های سرمایشی، روش مدل‌سازی بر اساس دینامیک سیال محاسباتی روشی مناسب برای ارزیابی تعیین شد (Calautit et al., 2013).

2-1- چارچوب نظری

بادگیرها برای تهویه ساختمان به نیروی محرکه نیاز دارند. تهویه طبیعی از دو نیروی طبیعی سرچشمه می‌گیرد، اختلاف فشار ایجاد شده توسط باد در اطراف ساختمان و اختلاف دما به‌عنوان نیروی محرکه. وزش جریان باد باعث ایجاد فشار مثبت در سمت روبه باد ساختمان و یک فشار منفی نسبی در سمت پشت به باد خواهد شد. این اختلاف فشار و همچنین اختلاف فشار در داخل ساختمان باعث ایجاد جریان هوا می‌شود (Ma. et al., 2024).

دودکش خورشیدی سیستمی وابسته به خورشید است که بر اساس اثر شناوری حرارتی، تهویه را بهبود می‌بخشد و با حداکثر بهره از انرژی خورشیدی حرکت هوا را به حداکثر می‌رساند. پدیده دودکش نتیجه نیروی محرک شناوری است که تفاوت دما بین داخل و خارج ساختمان‌ها باعث ایجاد آن می‌شود. هنگامی که دمای

بادگیر و نرخ جریان هوا در اتاق مطالعه شد. برای انجام این پژوهش نمونه ساده شده‌ای از بادگیر سنتی در مناطق مرکزی ایران انتخاب شد. انتخاب جزئیات و ویژگی‌های مدل باتوجه به پژوهش ارزیابی حرارتی یک بادگیر خنک‌کننده تبخیری (Noroozi & Veneris, 2018) انجام گرفت.

2- روش تحقیق

1-2- طرح پیشنهادی

بادگیرها سیستم‌های سرمایشی قدیمی هستند که برای تأمین تهویه طبیعی در مناطق مختلف جهان به‌ویژه در منطقه خاورمیانه مورد استفاده قرار می‌گرفت. همان‌طور که در بالا ذکر شد، هنگام وزش باد، بادگیر بیشتر برای خروج گرما از طریق مکش هوای داخلی و جایگزینی ورود هوای خنک خارجی کاربرد دارد. علاوه بر این در زمان‌هایی که جریان کافی هوای خارجی وجود ندارد، اثر دودکش ناچیز بوده که باعث کاهش راندمان سیستم می‌گردد.

سیستم بادگیر پیشنهادی تلاش می‌کند سهم نیروی شناوری را در جریان هوای دمیده شده به داخل ساختمان افزایش دهد. برای این هدف، در برخی از کانال‌های بادگیر که در جهت دریافت تابش حداکثری خورشید در روزهای گرم سال قرار دارند، صفحات جاذب خورشیدی تعبیه شده است. این سیستم یک بادگیر چهارطرفه با مقطع چهارگوشه، شامل یک سر در قسمت بالایی سازه است. قسمت سر سازه دربرگیرنده یک سقف مسطح، تعدادی بازشو ورودی هوا در چهار طرف، دو بازشو خروجی هوا، صفحات جذب خورشیدی و صفحه شبکه‌ای است که برای جلوگیری از ورود حشرات نصب شده است.

ستون، قسمت میانی بادگیر، از چند دیواره سرامیکی تشکیل شده است که در وسط پایه ستون قرار گرفته و تا بالای سازه به شکل «H» امتداد یافته است. تیغه‌ها از بالای دریچه ورود هوا به اتاق تا پایین بازشوی ورودی هوا کشیده می‌شوند. علاوه بر این، دو کانال کوچک که بین خروجی‌های هوای گرم اتاق و خروجی‌های هوا در سر قرار دارند، به عنوان یک دودکش خورشیدی عمل

داخل ساختمان بالاتر از بیرون باشد، هوای گرم داخلی بالا رفته و از آن خارج می‌شود و در نتیجه با هوای سردتر و متراکم‌تر از پایین جایگزین می‌شود. یعنی هوای گرم بالا می‌آید و از مجرا خارج می‌شود و در عوض هوای سرد تازه را جایگزین می‌کند.

مسئله بادگیرهای سنتی، عملکرد بیشتر بادگیر به‌عنوان سیستم تهویه و خروج هوای داخل بناست که این فرایند در ترکیب با حیاط مرکزی انجام‌پذیر بوده است (Dehghani Mohammadabadi et al., 2017). در جامعه امروزی باتوجه به کاهش مساحت ساختمان‌ها و حذف حیاط مرکزی تهویه از طریق بادگیر دچار چالش شده است به نحوی که بادگیرهای سنتی در زمان‌ها و مناطق با سرعت باد پایین ناکارآمد هستند. برای مواجهه با این چالش و تولید جریان هوا در مطالعات ذکر شده در بالا، راهکار افزودن صفحه جاذب خورشیدی و تبدیل کانال خروجی (پشت به جریان) به دودکش خورشیدی ارائه شده است. در بادگیرهای ترکیب شده با دودکش خورشیدی که مورد مطالعه قرار گرفته، دودکش به طور معمول به صورت مجزا و حتی در مواردی در بخش مستقلی از ساختمان قرار گرفته است و براین اساس اصلاح بادگیرهای موجود غیر ممکن و یا دشوار است. همچنین در برخی موارد برای مواجهه با چالش‌های ناکارآمدی بادگیر در شرایط بدون جریان هوای محیطی ادغام بادگیر با سیستم سرمایش تبخیری پیشنهاد شده است. مصرف آب و نیاز به سیستم گردش جریان آب را می‌توان نقطه ضعف اصلی این بادگیر ترکیب شده با سرمایش تبخیری دانست.

برای رفع مشکلات استفاده از فضای مستقل در بادگیرهای ادغام شده با دودکش خورشیدی، همچنین میزان مصرف آب و گردش آب در بادگیرهای ادغام شده با سیستم تبخیری، بادگیر سنتی مجهز شده به صفحه جاذب خورشیدی پیشنهاد شد. بررسی منابع پیشین نشان می‌دهد که ارتقای بادگیر سنتی با صفحه جاذب تاکنون بررسی نشده است. هدف از این پژوهش بررسی تئوری و تجربی بادگیر پیشنهادی است. برای این منظور اثر سرعت باد محیطی و شدت تابش خورشیدی بر صفحه جاذب بر سرعت جریان هوا در ورودی اتاق متصل به

می‌کنند. از سوی دیگر در پایین این کانال‌ها دمپرهای یک سوپه‌ای قرار گرفته که اجازه خروج مستقیم هوا از طریق این کانال‌ها را نمی‌دهند. در این حالت سایر کانال‌ها منبع تأمین هوای تازه جایگزین خواهند بود. پنجره‌ای که در انتهای پایین ستون قرار می‌گیرد، هوای تازه و سرد (که از بادگیر می‌آید) را در داخل ساختمان پخش می‌کند. پنجره‌های دیگر، بالای آن، هوای آلوده را از طریق کانال پشت به جریان به بیرون تخلیه می‌کنند. (شکل 1) طراحی و ساخت بادگیر مورد بررسی در تحقیق حاضر مطابق مدل ارائه شده توسط نوروزی و همکاران انجام شد.

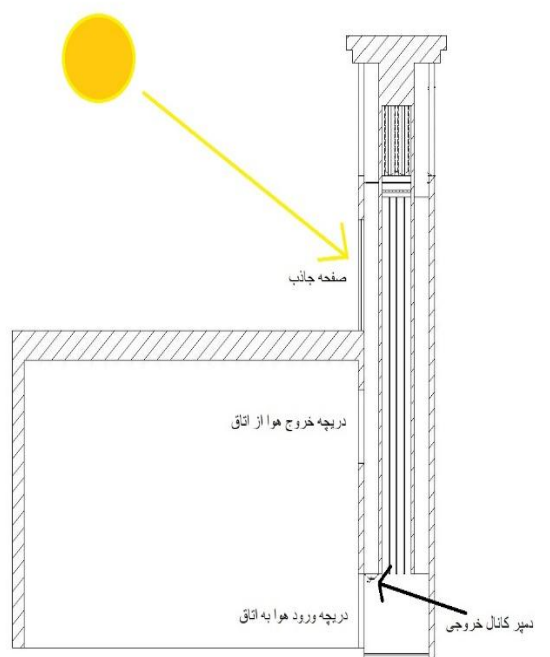
2-2- نرم‌افزار شبیه‌ساز

بسیاری از محققان روش‌های مختلفی را برای بررسی عملکرد بادگیر پیشنهاد کرده‌اند. یکی از آنها برنامه‌های مبتنی بر دینامیک سیال محاسباتی است که در مقایسه با سایرین مزایای بیشتری داشته و گزارش جامعی از جریان هوا را ارائه می‌دهد. روش‌های مدل‌سازی بر اساس دینامیک سیال محاسباتی در تعیین ویژگی‌های حرارتی و جریان هوای داخلی ساختمان به منظور طراحی دقیق سیستم تهویه، برای اطمینان از توزیع یکنواخت جریان

و جلوگیری از ناراحتی‌های محلی مرتبط با هوای کهنه، بسیار مفید است (Hughes & Ghani, 2009). با توجه به بررسی ادبیات پیشین که شرح آن در بخش مروری بر پیشینه پژوهش آورده شده، می‌توان نتیجه گرفت که روش دینامیک سیال محاسباتی برای مدل‌سازی و تحلیل سازه ترکیبی دودکش خورشیدی و بادگیر روشی کارآمد است؛ بنابراین، در پژوهش حاضر این روش برای تحلیل اثر استفاده از صفحه جاذب خورشیدی در بادگیر انتخاب شد.

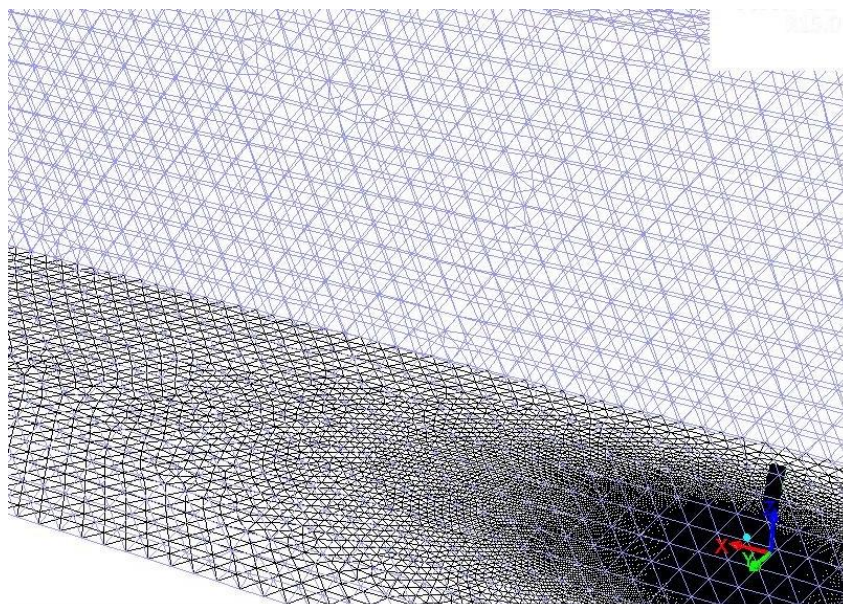
3-2- توسعه مدل عددی دینامیک سیال محاسباتی، شبکه‌بندی و استقلال شبکه

بر اساس مطالعات بررسی شده، شبیه‌سازی عددی جریان هوای داخل اتاق متصل به بادگیر ترکیبی با تعریف پارامترهای ساختاری، شامل ابعاد، جنس و خواص جریان، و شرایط محیطی به عنوان شرایط مرزی با استفاده از روش دینامیک سیال محاسباتی با حلگر ANSYS Fluent 15 انجام شد. برای این منظور در نرم‌افزار FLUENT از شبکه‌بندی حجمی نامنظم بر پایه ساختار مثلثی استفاده شد (شکل 2).



شکل 1- اجزای بادگیر پیشنهادی

Fig. 1- The Components of the Proposed Wind Catcher



شکل 2- شبکه‌بندی طراحی شده در مدل‌سازی بادگیر

Fig. 2- The view of mesh design of wind catcher model with triangular meshes on the surface of the geometry

محاسباتی نسبتاً کم، برای مدل‌سازی شناوری استفاده شد (Abdo et al., 2020). معادلات حاکم بر حرکت هوا برای جریان آشفته تراکم‌ناپذیر در جدول 1 آمده است.

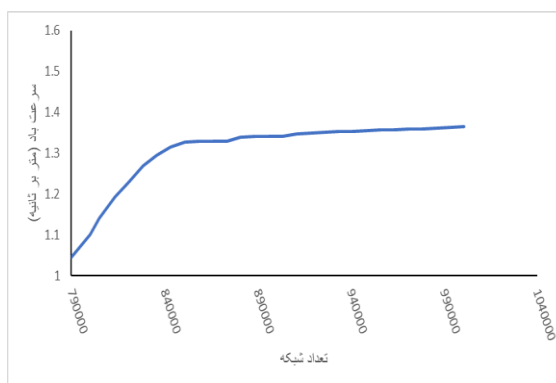
جدول 1- معادلات حاکم بر حرکت هوا

Tab. 1- Equations for incompressible turbulent

ردیف	نام معادله	معادله	flow
1	معادله پیوستگی	$\nabla \cdot \vec{V} = 0$	
2	معادله مومنتیوم	$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{V} + \vec{f}$	
3	معادله انرژی	$\rho C_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) T \right] = k \nabla^2 T + \phi$	
4	معادله اتلاف لزجت	$\phi = \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]$	

معیار همگرایی پیش‌فرض در FLUENT برای معادله انرژی 10^{-6} و در سایر معادلات 10^{-3} است.

به‌منظور تعیین اندازه و تعداد شبکه، آزمون استقلال شبکه بر اساس میانگین سرعت هوا در دریچه ورودی به اتاق با تعداد شبکه‌های 790000 تا 1000000 انجام شد که نتایج در شکل 3 ارائه و با توجه به شکل از یک شبکه‌بندی با تعداد 840000 شبکه استفاده شد.



شکل 3- نتایج آزمون استقلال شبکه

Fig. 2- Investigation of solution independency from grid

مفروضات اساسی برای شبیه‌سازی بر پایه دینامیک سیال محاسباتی شامل جریان هوای کاملاً آشفته¹ و پایدار تراکم‌ناپذیر²، سه‌بعدی و غیر همدم³ است. استاندارد صنعت برای شبیه‌سازی آشفتگی، مدل آشفتگی k-ε است که به دلیل قدرت آن با هزینه

4-2- تعریف مدل شبیه‌سازی شده و شرایط مرزی

شبیه‌سازی شامل یک فضای اتاق با بادگیر دوطرفه (کانال ورودی هوا و کانال خروجی) است. بخش خروجی دربرگیرنده یک کلکتور براق در دمای ثابت است. دیوارهای جانبی دیگر بادگیر عایق‌بندی شده‌اند. فرض بر این است که دیوارهای فضای مسکونی در انتقال حرارت شرکت نمی‌کنند، به‌طوری که بادگیر تنها مسئول اثرات شناوری حرارتی بر روی هوا است. ابعاد دامنه⁴ بر اساس دستورالعمل‌های توصیه شده در منابع، پنج برابر ارتفاع بادگیر برای جلو و دو طرف دامنه بوده است (Casey & Wintergerste, 2000) و (Tominaga et al., 2008).

در پشت بادگیر ارتفاع (جهت خروجی) 15 برابر ارتفاع تنظیم شده تا جریان امکان توسعه داشته باشد. شرایط مرزی شامل سرعت باد ورودی بر روی ورودی حوزه محاسباتی و شدت تابش خورشید روی صفحه جاذب نور در نظر گرفته شد که مقدارهای آن در جدول 2 آورده شده است.

جدول 2- شرایط مرزی

Tab. 2- boundary conditions

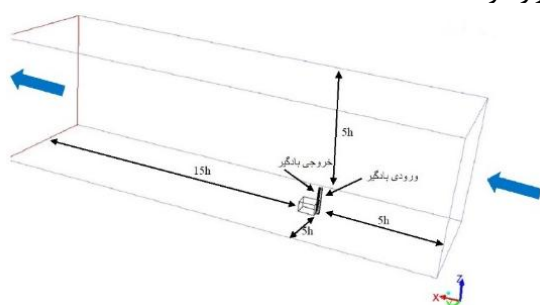
ردیف	شرایط مرزی	مقدار
1	سرعت باد ورودی	0, 3, 5 متر بر ثانیه
2	تابش خورشیدی بر صفحه جاذب	0, 1000 وات بر متر مربع

تأثیر جذب‌کننده‌های داخلی (ساکنان، تجهیزات) و افزایش حرارت از طریق دیوارها در این کار بررسی نشد. تمام دیوارهای فضای مسکونی برای جریان هوا دارای شرایط مرزی بدون خطا تعیین شد. (شکل 4)

5-2- روش شبیه‌سازی

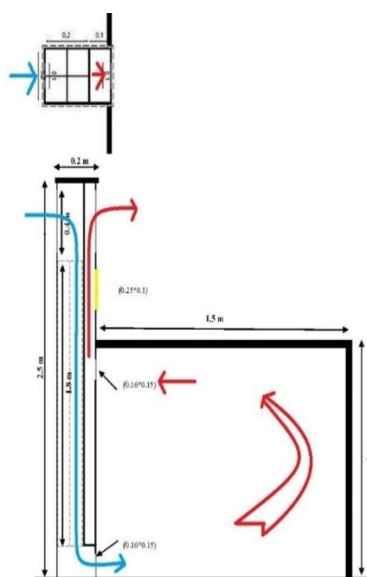
در این مطالعه، شبیه‌سازی‌های بر پایه دینامیک سیال محاسباتی برای ارزیابی تأثیر تابش خورشیدی در صفحه جاذب بر نرخ جریان حجمی و سرعت هوا در ورودی اتاق انجام شد. برای انجام شبیه‌سازی یک بادگیر دوسویه طراحی شد. این بادگیر شامل دو کانال عمودی، کانال ورود هوا و کانال خروجی هوا (دودکش خورشیدی)، است. صفحه جاذب یک صفحه تیره‌رنگ آلومینیومی با

ضریب جذب نور 90% در دیواره کانال خروجی قرار گرفته و ابعاد اتاق متصل به سیستم به ابعاد $1.5 \times 2.5 \times 1$ متر (طول، عرض و ارتفاع) است. این اتاق یک اتاق بسته و بدون بازشو است و سیستم در میانه طول آن قرار گرفته. قسمت پایین کانال پشت به جریان هوا (کانال دودکش) مسدود است تا هوا به‌صورت مستقیم از بادگیر وارد کانال خروجی نشود و پس از سیر در اتاق از طریق دریچه ورود هوای اتاق به کانال خروجی خارج شود. ابعاد بادگیر مورد ارزیابی در شکل 5 مشخص شده و سایر جزئیات فنی بادگیر توسط نوروزی و همکاران مورد بحث قرار گرفته است.



شکل 4- نمای شماتیک دامنه محاسباتی و شرایط مرزی برای شبیه‌سازی

Fig. 4- Schematic view of computational domain and boundary conditions for simulations on the combinatorial system.



شکل 5- ابعاد سازه پیشنهادی ساده شده جهت شبیه‌سازی

Fig. 5- The section of simple wind catcher and room



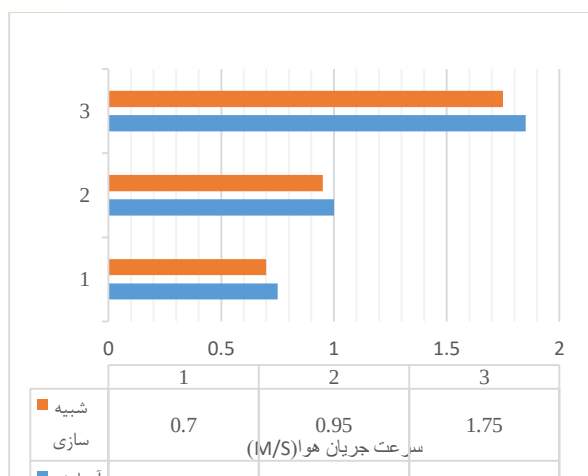
شکل 6- نصب سنسورهای اندازه‌گیری دما و شدت تابش با اتصال به کامپیوتر

Fig. 6- Installation of sensors for measuring temperature and radiation intensity by connecting to a computer.

جدول 3- گزارش داده‌های آب‌وهوایی در مراحل مختلف آزمایش تجربی

Tab. 3- Reporting weather data

ردیف	$T_a(^{\circ}\text{C})$	$V_i(\text{m/s})$	$I_s(\text{W/m}^2)$	RH
1	30	1	805	12
2	29.5	1.5	778	13
3	30.2	2.5	820	12



شکل 7- مقایسه نتایج مربوط به سرعت جریان هوا در ورودی اتاق حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش تجربی

Fig. 7- Air flow speed at the entrance of the room of experimental and calculated outlet air under the conditions of experimental test

جریان هوا در نمونه دو مسیر دارد. در قسمت بادگیر، جریان هوا با ایجاد یک شناور منفی به سمت پایین حرکت می‌کند. از سوی دیگر جذب انرژی خورشیدی باعث جریان مثبت هوا از طریق کانال خروجی و حرکت به سمت بالا می‌شود. سرعت هوای ورودی در دهانه ورودی (0, 3, 5 m/s) فرض شده و همچنین تأثیر افزایش میزان تابش خورشید بر عملکرد سیستم بادگیر در نظر گرفته شده است. میزان تابش خورشیدی ($I=0$, $I=1000 \text{ W/m}^2$) به عنوان شار حرارتی بر روی صفحه جاذب (کلکتور) اعمال شد. دمای هوای ورودی روی 30 درجه سانتیگراد ثابت شده است. چون میزان تابش بر صفحه جاذب مقادیر مشخصی فرض شده، زاویه صفحه جاذب و جهت بادگیر در نتایج تأثیری نداشته است.

6-2- اعتبارسنجی مدل

در این پژوهش به منظور اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی از نتایج آزمایش تجربی در محیط واقعی استفاده شده است. این آزمایش در فضای باز در شهر قاین- خراسان جنوبی ($33^{\circ}43'36'' \text{ N}$ and $59^{\circ}11'04'' \text{ E}$) ایران انجام شد. یک فن با سرعت چرخشی قابل تنظیم برای ارائه سرعت ثابت هوا (1, 1.5, 2.5 m/s) در زمان‌های مختلف در داخل مجرای بادگیر مورد استفاده قرار گرفت. سرعت جریان هوا در پنجره ورودی اتاق، همچنین دما و رطوبت محیط و شدت تابش بر صفحه جاذب اندازه‌گیری و ثبت شد (شکل 6). نمونه ساخته شده دارای ارتفاع 2.5 متر، مقطع 0.20×0.40 متر، شامل یک مجرای ورودی و مجرای خروجی هواست و سایر ابعاد بادگیر مطابق شکل 5 و مشابه ابعاد شبیه‌سازی در نظر گرفته شده.

3- نتایج و بحث

3-1- نتایج اعتبارسنجی مدل

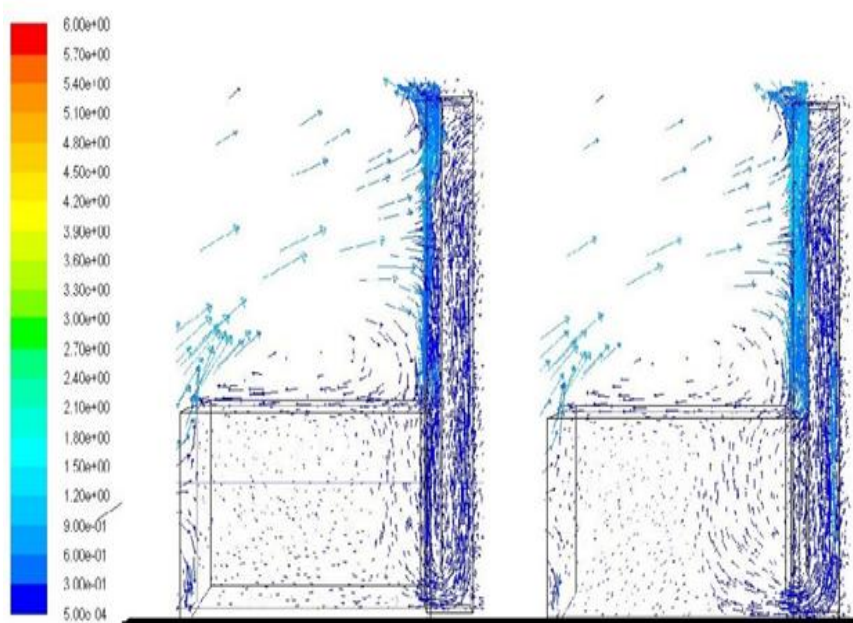
نتایج آزمایش تجربی که به منظور اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی انجام گرفت در جدول 3 ارائه شد. در این اعتبارسنجی نتایج اندازه‌گیری شده از شرایط محیطی به عنوان داده‌های اولیه محیط شبیه‌سازی تعریف و سرعت هوای ورودی به فضای اتاق در آزمایش تجربی با مقادیر حاصل از شبیه‌سازی مدل مقایسه شد. (شکل 7)

نتایج به دست آمده از آزمایش تجربی و مدل شبیه سازی شده نشان دهنده توافق نزدیک سرعت جریان در دو روش است.

2-3- تأثیر سرعت باد و تابش خورشید بر الگوی جریان هوا

الگوی جریان هوای پیش بینی شده در اطراف و داخل بادگیر طراحی شده در سرعت های مختلف باد (0، 3 و 5 متر بر ثانیه)، تابش های خورشیدی روی صفحه جاذب 0 و 1000 وات بر متر مربع در شکل های 8، 9 و 10 نشان داده شده است. از اشکال مختلف جریان می توان دریافت که هوای تازه از طریق دریچه ورودی که در پایین بادگیر قرار دارد به داخل اتاق جریان می یابد. هوای گرم شده در داخل اتاق از طریق پنجره خروجی در دیواره فضای کانال خروجی (دودکش) به بیرون جریان می یابد و تحت

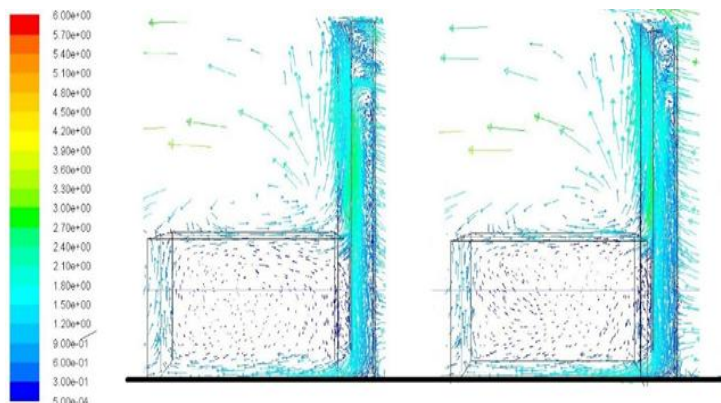
تأثیر نیروی شناوری از قسمت دودکش خورشیدی خارج می شود. سرعت هوا در دریچه ورودی، جایی که هوا وارد اتاق می شود و متعاقباً منطقه گردش هوا در داخل اتاق با بالا رفتن شدت تابش خورشیدی که نیروی شناوری را تشدید می کند، افزایش می یابد. مقایسه الگوی جریان هوای سرعت های مختلف باد در تابش خورشیدی ثابت نشان داد که افزایش سرعت باد از 0 تا 5 متر بر ثانیه به طور قابل توجهی باعث افزایش سرعت هوا در داخل بادگیر می شود. علاوه بر این، می توان مشاهده کرد که تأثیر تابش خورشیدی بر سرعت هوای داخل بادگیر در سرعت های بالاتر باد کمتر بود. به عبارت دیگر، می توان نتیجه گرفت که تأثیر نیروی شناوری بر روی سرعت در مقایسه با نیروی خارجی باد بسیار ناچیز است و تأثیر آن در سرعت های پایین تر ملموس تر است.



شکل 8- الگوی جریان هوا در داخل نمونه اولیه بادگیر و اتاق با سرعت باد صفر (m/s)

سمت راست) تابش خورشیدی در صفحه جاذب 1000 (W/m²) سمت چپ) تابش خورشیدی در صفحه جاذب 0 (W/m²)

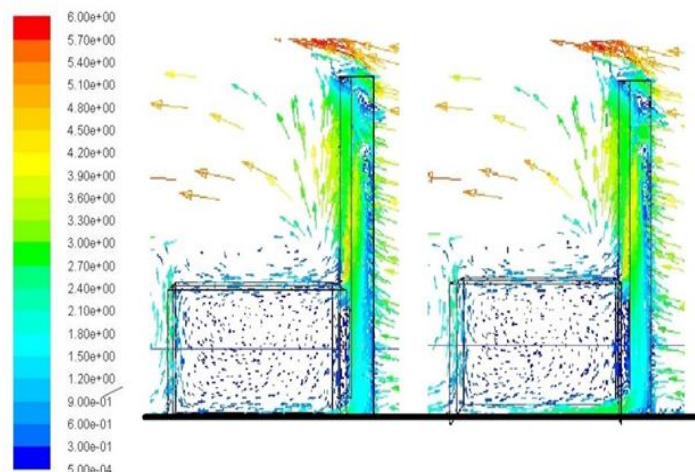
Fig. 8- The air flow pattern inside the prototype wind catcher and room at the wind speeds 0 m/s, 1) Solar irradiances on the absorber plate of 0W/m² , 2) Solar irradiances on the absorber plate of 1000 W/m²



شکل 9- الگوی جریان هوا در داخل نمونه بادگیر و اتاق با سرعت باد 3 (m/s)

سمت راست) تابش خورشیدی در صفحه جاذب 1000 (W/m²) سمت چپ) تابش خورشیدی در صفحه جاذب 0 (W/m²)

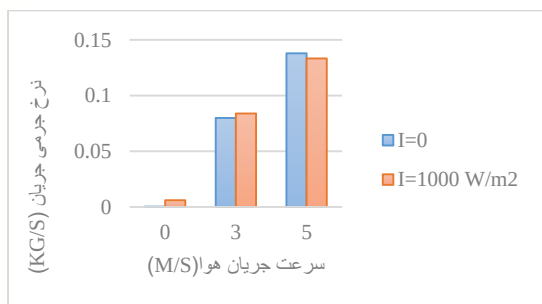
Fig. 9- The air flow pattern inside the prototype wind catcher and room at the wind speeds 3 m/s, 1) Solar irradiances on the absorber plate of 0W/m² , 2) Solar irradiances on the absorber plate of 1000 W/m²



شکل 10- الگوی جریان هوا در داخل نمونه بادگیر و اتاق با سرعت باد 5 (m/s)

سمت راست) تابش خورشیدی در صفحه جاذب 1000 (W/m²) سمت چپ) تابش خورشیدی در صفحه جاذب 0 (W/m²)

Fig. 10- The air flow pattern inside the prototype wind catcher and room at the wind speeds 5 m/s, 1) Solar irradiances on the absorber plate of 0W/m² , 2) Solar irradiances on the absorber plate of 1000 W/m²



شکل 11- مقایسه نرخ جرمی جریان هوا با سرعت باد مختلف در دریچه هوای ورودی

Fig. 11- Comparison of the airflow rate with different wind speed at inlet air window

3-3- تأثیر سرعت باد و تابش خورشید بر نرخ جریان هوا

نرخ جریان هوا یکی از پارامترهای مهم در سیستم‌های تهویه است. نرخ تهویه که به نرخ جریان هوا بستگی دارد، بر غلظت آلاینده‌ها، تولید گرما و آسایش حرارتی تأثیر می‌گذارد. شکل 11 جریان جرمی هوا در داخل بادگیر را در شرایط مختلف عملیاتی نشان می‌دهد. نرخ جریان هوا در شرایط بدون جریان باد با تابش خورشیدی 1000 (W/m²) حدود 0.006 کیلوگرم بر ثانیه بود.

افزایش می‌یابد و در سرعت‌های بالاتر این تأثیر کمتر است.

- نرخ جریان هوا در شرایط بدون جریان باد و شدت تابش $1000(W/m^2)$ بر صفحه جاذب حدود 0.006 کیلوگرم بر ثانیه بود. می‌توان گفت که بادگیر ادغام شده با صفحه جاذب خورشیدی در زمانی که سرعت باد کم باشد عملکرد بهتری دارد.

پی‌نوشت

¹ Fully Turbulent

² Steady-State Incompressible

³ Non-Isothermal

⁴ Domain

References

Abdallah, A. S. H., Hiroshi, Y., Goto, T., Enteria, N., Radwan, M. M., & Eid, M. A. (2014). Parametric investigation of solar chimney with new cooling tower integrated in a single room for New Assiut city, Egypt climate. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 5, 1-9. <https://doi.org/10.1007/s40095-014-0092-6>

Abdallah, A. S. H., Yoshino, H., Goto, T., Enteria, N., Radwan, M. M., & Eid, M. A. (2013). Integration of evaporative cooling technique with solar chimney to improve indoor thermal environment in the New Assiut City, Egypt. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 4, 1-15. <https://doi.org/10.1186/2251-6832-4-45>.

Abdo, P., Taghipour, R., & Huynh, B. P. (2020). Three-dimensional simulation of wind-driven ventilation through a windcatcher with different inlet designs. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 12(4), 041008. <https://doi.org/10.1115/1.4045513>

Bansal, N. K., & Minke, G. (1995). Climatic zones and rural housing in India: Publikationen vor 2000.

Calautit, J. K. S., Hughes, B. R., & Ghani, S. (2013). Numerical investigation of the integration of heat transfer devices into wind towers.

این موافق با نتایج به‌دست‌آمده در دو پژوهش مربوط Elumalim و همکاران (Elumalim & Awbi, 2002) و همچنین Bansal و همکارانش (Bansal & Minke, 1995) است. به عنوان مثال، Bansal و همکاران نشان دادند که در سرعت باد محیطی 1 متر بر ثانیه، بادگیر به تنهایی نرخ جریان جرمی 0.75 کیلوگرم بر ثانیه ایجاد می‌کند، در حالی که سیستم کمکی دودکش خورشیدی قادر به ایجاد جریان جرمی تا 1.4 کیلوگرم بر ثانیه در زمان شدت تابش خورشیدی 700 وات بر متر مربع است. نتایج نشان می‌دهد که اثر دودکش خورشیدی در سرعت کم باد اهمیت بیشتری داشته و سیستم ترکیبی باعث افزایش چند برابری دبی جرمی هوا در تهویه محل سکونت می‌شود.

4-نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش اصلاح بادگیر سنتی و متداول با حداقل تغییرات ظاهری و عملکردی به منظور بهبود آن و ارزیابی عملکرد آن با استفاده از یک سیستم نمونه اولیه به‌عنوان یک مدل ساده شده از بادگیر اصلی پیشنهادی بود. برخی از کانال‌های مدل با افزودن یک صفحه جاذب خورشیدی تبدیل به دودکش خورشیدی شد. مدل‌سازی با استفاده از روش دینامیک سیال محاسباتی برای بررسی عملکرد بادگیر پیشنهادی انجام و الگوی جریان هوا درون اتاق و سرعت جریان هوا در دریچه ورود جریان از بادگیر به اتاق و همچنین دبی جرمی در آن محاسبه شد. نتایج نشان داد که:

-سرعت هوا در دریچه ورودی، جایی که هوا وارد اتاق می‌شود و متعاقباً منطقه گردش هوا در داخل اتاق با تابش خورشیدی که نیروی شناوری را تشدید می‌کند، افزایش می‌یابد.

-مشاهده می‌شود که تأثیر تابش خورشیدی بر روی سرعت هوای در دریچه خروجی از بادگیر به اتاق در سرعت‌های بالاتر باد کمتر بود و این افزایش در سرعت‌های پایین‌تر باد بیشتر است.

-دامنه چرخش جریان در داخل اتاق در زمان عدم وجود باد در ورودی بادگیر با اعمال تابش به صفحه خورشیدی



Hughes, B. R., & Ghani, S. A. (2009). A numerical investigation into the effect of windvent dampers on operating conditions. *Building and Environment*, 44(2), 237-248. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.02.012>

Jafari, S.; Kalantar, V. (2022). Numerical simulation of natural ventilation with passive cooling by diagonal solar chimneys and windcatcher and water spray system in a hot and dry climate. *Energy and Buildings*, 256, 111714. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111714>

Jazayeri, E., & Gorginpour, A. (2011). Construction of windcatcher and necessity of enhancing the traditional windcatcher. *Magazine of Civil engineering*(6), 56-60.

Jomehzadeh, F., Hussen, H. M., Calautit, J. K., Nejat, P., & Ferwati, M. S. (2020). Natural ventilation by windcatcher (Badgir): A review on the impacts of geometry, microclimate and macroclimate. *Energy and Buildings*, 226, 110396. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110396>

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, 108409.

Li, L., & Mak, C. M. (2007). The assessment of the performance of a windcatcher system using computational fluid dynamics. *Building and Environment*, 42(3), 1135-1141.

Looman, R., Cauberg, H., van den Dobbelsteen, A., van Timmeren, A., & Tenpierik, M. (2004). Climate-responsiveness of Building Elements. Paper presented at the Proceedings of PLEA.

Ma, Q., Qian, G., Yu, M., Li, L., & Wei, X. (2024). Performance of Windcatchers in Improving Indoor Air Quality, Thermal Comfort, and Energy Efficiency: A Review. *Sustainability*, 16(20), 9039.

Maerefat, M., & Haghighi, A. (2010). Natural cooling of stand-alone houses using solar chimney

Chemical Engineering Transactions, 34, 43-48. <http://dx.doi.org/10.3303/CET1334008>

Casey, M., & Wintergerste, T. (2000). European research community on flow, turbulence and combustion. ERCOFTAC best practice guidelines: ERCOFTAC special interest group on "quality and trust in industrial CFD."

Dehghani Mohammadabadi, Hossein, Yazdanfar, Seyyed Abbas, Dehghan, Ali Akbar, & Dehghani Mohammadabadi, Abolfazl. (2017). Numerical analysis of the performance of four-sided wind tower attached to parlor and courtyard in different wind incident angles. *Modares Mechanical Engineering*, 16(12), 125-134.

Elmualim, A. A. (2006a). Dynamic modelling of a wind catcher/tower turret for natural ventilation. *Building Services Engineering Research and Technology*, 27(3), 165-182. <https://doi.org/10.1191/0143624406bse159oa>

Elmualim, A. A. (2006b). Effect of damper and heat source on wind catcher natural ventilation performance. *Energy and Buildings*, 38(8), 939-948. DOI: 10.1016/j.enbuild.2005.11.004

Elmualim, A. A., & Awbi, H. B. (2002). Wind tunnel and CFD investigation of the performance of "Windcatcher" ventilation systems. *International Journal of ventilation*, 1(1), 53-64. <https://doi.org/10.1080/14733315.2002.11683622>

Franke, J., Hirsch, C., Jensen, A., Krüs, H., Schatzmann, M., Westbury, P., Wright, N. (2004). Recommendations on the use of CFD in wind engineering, In Proceedings of the International Conference on Urban Wind Engineering and Building Aerodynamics, von Karman Insitute for Fluid Dynamics.

Ghadiri, M. H., Mohamed, M. F., & Ibrahim, N. L. N. (2012). Cfd analysis of natural ventilation behaviour in four sided wind catcher. *International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering*, 6(12), 2726-2730 .



Nouanégué, H., Alandji, L., & Bilgen, E. (2008). Numerical study of solar-wind tower systems for ventilation of dwellings. *Renewable Energy*, 33(3), 434-443.

Saadatian, O., Haw, L. C., Sopian, K., & Sulaiman, M. Y. (2012). Review of windcatcher technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), 1477-1495.

Saifi, N., Baadi, A., Ghedamsi, R., Guerrou, A., & Settou, N. (2024). An experimental study and numerical simulation of natural ventilation in a semi-arid climate building using a wind catcher with evaporative cooling system and solar chimney. *Journal of Building Engineering*, 85, 108475.

Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M., & Shirasawa, T. (2008). AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 96(10-11), 1749-1761.

Zarandi, M. M. (2009). Analysis on Iranian wind catcher and its effect on natural ventilation as a solution towards sustainable architecture (Case Study: Yazd). *International Journal of Humanities and Social Sciences*, 3(6), 668-673.

and evaporative cooling cavity. *Renewable Energy*, 35(9), 2040-2052.

Mahdavinejad, M., & Khazforoosh, S. (2014). Combination of wind catcher and chimney for more energy efficient architectural buildings. *Sustain Energy*, 2(1), 35-38.

Mohamadabadi, H. D., Dehghan, A. A., Ghanbaran, A. H., Movahedi, A., & Mohamadabadi, A. D. (2018). Numerical and experimental performance analysis of a four-sided wind tower adjoining parlor and courtyard at different wind incident angles. *Energy and Buildings*, 172, 525-536.

Monghasemi, N., & Vadiiee, A. (2018). A review of solar chimney integrated systems for space heating and cooling application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2714-2730.

Moosavi, L., Zandi, M., Bidi, M., Behroozizade, E., & Kazemi, I. (2020). New design for solar chimney with integrated windcatcher for space cooling and ventilation. *Building and Environment*, 181, 106785.

Noroozi, A., Veneris, Y.S. (2018) Thermal Assessment of a Novel Combine Evaporative Cooling Wind Catcher. *Energies*, 11(2), 442-452.