



بررسی تجربی تأثیر سازه‌های بالادست بر عملکرد بادگیرهای یک‌طرفه

محمد کاظمی اسفه^۱، علی اکبر دهقان^{۲*}، مجتبی دهقان منشادی^۳

۱- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

۲- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

۳- استادیار مجتمع دانشگاهی مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، پردیس اصفهان

* یزد، صندوق پستی ۷۴۱-۸۹۱۹۵، adehghan@yazd.ac.ir

چکیده- در این پژوهش تأثیر دنباله سازه‌های بالادست بر توانایی بادگیرها در جذب هوای محیط و انتقال آن به فضای ساختمان به صورت آزمایشگاهی و به کمک تونل باد و روش‌های مرئی‌سازی جریان بررسی شده است. از آنجا که بادگیرها معمولاً در محیط شهری با تراکم ساختمانی بالا، مورد استفاده قرار می‌گیرند سازه‌ها و موانع بالادست بی‌شک بر توانایی آنها در ایجاد تهویه طبیعی ساختمان تأثیرگذار هستند. به همین دلیل در این تحقیق موانعی با ارتفاعات مختلف و در فواصل گوناگون، در بالادست یک مدل بادگیر یک‌طرفه قرار داده شده و میزان دبی هوای القایی توسط بادگیر به کمک جریان سنج سیم داغ و در سرعت‌های جریان آزاد ۱۰ m/s و ۱۵ m/s محاسبه شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که میزان دبی هوای جذب شده توسط بادگیر و جهت حرکت آن وابسته به ارتفاع و فاصله مانع بالادست از بادگیر می‌باشد، به گونه‌ای که قرار گرفتن موانعی با ارتفاع کم در نزدیکی بادگیر باعث افزایش دبی هوای القایی می‌شود، اما با افزایش ارتفاع مانع درجه بادگیر در دنباله مانع بالادست قرار می‌گیرد و هوای داخل ساختمان از طریق درجه‌های بادگیر به محیط بیرون ساختمان تخلیه می‌شود.

کلیدواژه‌ها: تهویه طبیعی، بادگیر یک‌طرفه، مرئی‌سازی جریان، جریان سنج سیم داغ.

Experimental investigation of upstream structures influence on the ventilation performance of one-sided wind-catchers

M. Kazemi Esfeh¹, A. A. Dehghan^{2*}, M. Dehghan Manshadi³

1- MSc. Mech. Eng., Yazd Univ., Yazd, Iran

2- Assoc. Prof., Mech. Eng., Yazd Univ., Yazd, Iran

3- Assis. Prof., Mech. Eng., Malek Ashtar Univ., Esfahan, Iran

* P. O. B. 89195-741 Yazd, Iran. adehghan@yazd.ac.ir

Abstract- In the present study, the ventilation performance of a one-sided wind-catcher positioned in the wake of an upstream structure is experimentally investigated by measuring the induced airflow rates and employing smoke flow visualization techniques. Wind-catchers are usually used in places of high urban densities in Middle East regions; however, their potential to provide natural ventilation depends on the presence of upstream structures. The present study focuses on the ventilation performance evaluation of a one-sided wind-catcher located in the wake of an upstream structure model. The influence of the upstream structure height and its distance relative to the wind-catcher on the flow structure within and around the wind-catcher is investigated. Moreover, the ventilation performance is evaluated by measuring the ventilation flow rate using a hot wire anemometer for upstream air velocities of 10 and 15 m/s. The results show that the presence of an upstream object influences the rate and the direction of air flowing from the wind-catcher to the house. Placing a short upstream object increases the induced air flow rate. However, by increasing the height of upstream object, the airflow direction is reversed inside the wind-catcher and the air may flow backward from the ventilated space to the wind-catcher.

Keywords: Natural Ventilation, One-Sided Wind-Catcher, Smoke Flow Visualization, Hot Wire.

۱- مقدمه

امروزه به دلیل مشکلات زیست محیطی و همچنین افزایش هزینه‌های مربوط به تهویه ساختمان‌ها، بسیاری از محققان تلاش گسترده‌ای را به منظور استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در تهویه ساختمان آغاز کرده‌اند. تهویه طبیعی ایجاد روشی به منظور ورود و خروج جریان هوا به یک ساختمان با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر است. به طور کلی دو روش برای تهویه طبیعی در ساختمان‌ها وجود دارد: تهویه طبیعی با استفاده از باد و تهویه با استفاده از خاصیت دودکشی در ساختمان‌ها.

بادگیرها یک نمونه از وسایلی هستند که با ایجاد جریان هوا در ساختمان، شرایط مطلوبی را برای ساکنان در طول ماه‌های گرم تابستان ایجاد می‌کنند. به طور خلاصه، بادگیرها جریان هوا را از ارتفاعاتی بالاتر از سطح زمین گرفته و آن را به داخل ساختمان هدایت می‌کنند. در مناطقی که باد اغلب در یک جهت می‌وزد، بادگیرها تنها یک دهانه به عنوان ورودی هوا دارند. اما در مناطقی که جهت باد متغیر است، معمولاً از بادگیرهای چهارطرفه استفاده می‌شود [۱]. عملکرد بادگیرها بستگی به سرعت و جهت وزش باد و زمان استفاده از آنها دارد [۲]. در طراحی سیستم‌های تهویه مطبوع طبیعی، فراهم ساختن حداقل هوای مورد نیاز برای تهویه ساختمان به همراه تنظیم دمای محیط باید به صورت همزمان در نظر گرفته شود. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که بادگیرها قادر به تامین این دو پارامتر می‌باشند.

هاگز و عبدالغنی [۳] توانایی یک بادگیر چهارطرفه را برای تهویه یک اتاق درس استاندارد به صورت عددی بررسی کردند. نتایج بدست آمده نشان داد که حتی در سرعت‌های کم باد نیز، بادگیر قادر به تامین چندین برابر مقدار هوای مورد نیاز است. اولین بررسی‌های آیرودینامیکی بادگیرها توسط کاراکاتسانیس و همکاران [۴] انجام گرفته است. آنها میزان دبی هوای القایی توسط بادگیری با مقیاس ۱:۷۰ به داخل ساختمان را با استفاده از تعیین ضرایب فشار تعیین کردند. آزمایش‌های آنها در سه حالت بادگیر به صورت منفرد، بادگیر به همراه خانه متصل به آن و بادگیر به همراه خانه و حیاط انجام شده است. بررسی‌های آنها نشان می‌دهد که در هندسه بادگیر-خانه، جریان هوا از خانه به سمت بادگیر در حرکت است، در حالی که در هندسه بادگیر-خانه-حیاط، بادگیر جریان هوای خارجی را به داخل ساختمان هدایت می‌کند. منتظری و دهقان [۵] یک هندسه دو

بعدی از بادگیر دوطرفه، فضای مسکونی و حیاط خانه را به کمک نرم‌افزار تجاری فلوئنت مدل‌سازی کردند. آنها با بررسی بردارهای سرعت در دهانه بادگیر متوجه شدند، که به علت جدایش جریان از لبه پایینی بادگیر، یک گردابه کوچک درست در مجاورت آن تشکیل می‌شود. کاظمی و همکاران [۶] با مرئی‌سازی توسط دود توانستند این ناحیه را به خوبی نشان بدهند. آنها اعلام داشتند که با تغییر هندسه سقف بادگیر می‌توان اندازه ناحیه جدایش را کاهش داد.

لی و مک [۷] عملکرد یک بادگیر چهارطرفه را در سرعت‌ها و زوایای مختلف حمله باد به صورت عددی بررسی کردند. نتایج بدست آمده نشان داد که میزان دبی هوای ورودی به ساختمان به شدت وابسته به جهت باد است.

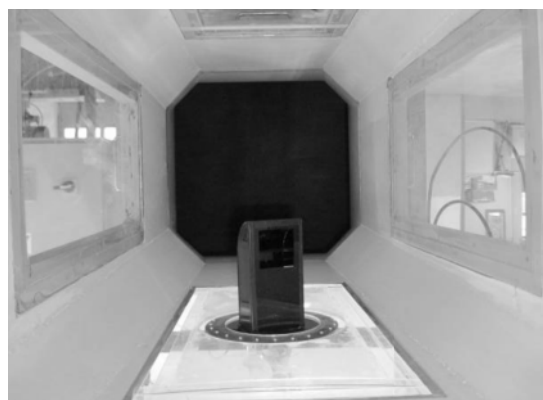
برای آنکه از حساسیت بادگیرها نسبت به تغییر جهت باد کاسته شود، بعضی از محققان، بادگیر با سطح مقطع دایره را پیشنهاد کرده‌اند [۸، ۹]. منتظری [۱۰] عملکرد پنج بادگیر با سطح مقطع دایره را به صورت آزمایشگاهی بررسی کرد. سطح مقطع این بادگیرها به صورت داخلی به دو، سه، چهار، شش و دوازده قسمت تقسیم شده بود. او اعلام کرد که حساسیت بادگیرها با افزایش تعداد دریچه‌ها نسبت به تغییر جهت باد کاهش می‌یابد، اما از میزان دبی ورودی به ساختمان نیز کاسته می‌شود. علاوه بر عملکرد آیرودینامیکی بادگیرها، بسیاری از محققان عملکرد سرمایشی آنها را نیز به صورت تجربی و عددی بررسی کرده‌اند [۱۱، ۱۲].

در مناطق کویری ایران خانه‌ها معمولاً مجهز به بادگیر بوده و به صورت گروهی و چسبیده به یکدیگر ساخته می‌شدند. به این ترتیب سطحی از آنها که در معرض تابش شدید نور خورشید است کاهش می‌یابد و انرژی گرمایی کمتری جذب ساختمان می‌شود (شکل ۱-الف). نزدیکی بیش از حد ساختمان‌ها به یکدیگر در این مناطق باعث می‌شود که میزان دبی القایی توسط بادگیرها، به وجود سازه‌ها و موانعی که در بالادست آن قرار دارد، وابسته شود. علاوه بر این در طراحی ساختمان‌های مدرنی که از بادگیرها به منظور ایجاد تهویه استفاده می‌شود، معمولاً بادگیرها بسیار نزدیک به یکدیگر و در آرایش پشت سر هم قرار می‌گیرند (شکل ۱-ب). بنابراین به نظر می‌رسد، که در این شرایط بررسی تأثیر سازه‌های اطراف بر عملکرد تهویه طبیعی توسط بادگیر ضروری است.

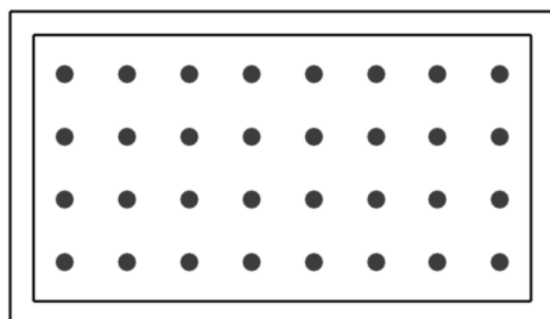
بادگیر به فاصله ۵۸۰ mm از ورودی اتاق آزمون نصب شده است. در شکل ۲ نمایی از اتاق آزمون تونل باد دانشگاه یزد به همراه مدل بادگیر نشان داده شده است.

شکل ۳ ابعاد مدل بادگیر یک‌طرفه تحت بررسی را به همراه محل قرار گرفتن سنسورهای فشار و سرعت نشان می‌دهد. در این پژوهش به منظور بررسی میدان جریان در اطراف بادگیر، توزیع سرعت در صفحه $z=0$ در حالت‌های مختلف اندازه‌گیری شده است. مکان نقاط داده برداری در شکل ۳- ب نشان داده شده است (تعداد کل نقاط داده برداری در صفحه $z=0$ در حالت‌های مختلف بین ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ نقطه می‌باشد).

مدل بادگیر مورد استفاده از جنس پلکسی گلاس ساخته شده است و مقیاس ۱:۴۰ از یک نمونه بادگیر واقعی در یزد می‌باشد. در مطالعات آیرودینامیک درباره سازه‌ها با لبه‌های تیز مشخص شده است که به دلیل وجود گوشه‌های تیز و جدایش اجباری که در این گوشه‌ها اتفاق می‌افتد، الگوی جریان در اطراف ساختمان‌ها مستقل از عدد رینولدز می‌باشد.



الف- نحوه نصب مدل بادگیر در اتاق آزمون تونل باد



ب- مکان نقاط داده برداری در دهانه خروجی بادگیر به منظور اندازه‌گیری دبی القایی

شکل ۲ نمایی از اتاق آزمون تونل باد به همراه مدل بادگیر



الف- نمایی از ساختمان‌های شهر میبد مجهز به بادگیرهای یک‌طرفه



ب- استفاده از بادگیرها برای تهویه ساختمان‌های مدرن

شکل ۱ استفاده از بادگیرها به صورت سنتی و مدرن به منظور ایجاد تهویه طبیعی در ساختمان‌ها

از این‌رو در این پژوهش سعی شده است که تأثیر سازه‌هایی با ارتفاعات مختلف که در بالادست بادگیر قرار گرفته‌اند، بر عملکرد تهویه طبیعی آنها بررسی شود. تمام این پژوهش به صورت آزمایشگاهی در داخل تونل باد انجام شده و علاوه بر این با مرئی سازی جریان به کمک دود الگوی جریان هوا در داخل و خارج بادگیر، با و بدون حضور سازه بالادست، بررسی شده است. در طول تمام آزمایشات جهت جریان هوا در داخل بادگیر به کمک دود مشخص شده است.

۲- تجهیزات آزمایشگاهی و روند انجام آزمایش‌ها

آزمایش‌ها در تونل باد مدار باز مادون صوت (TQ TE44) دانشگاه یزد انجام شده است. سطح مقطع اتاق آزمون تونل باد مورد نظر $457(mm) \times 457(mm)$ و حداکثر اغتشاشات جریان آزاد ۰/۲٪ می‌باشد. طول اتاق آزمون ۱۲۰۰ mm است که مدل

کالبره شده است. به منظور اندازه‌گیری دقیق شدت جریان هوای القایی، سرعت جریان هوا در ۳۲ نقطه مختلف در مقطع خروجی کانال بادگیر اندازه‌گیری گردیده (شکل ۲) و سپس با استفاده از انتگرال سطح، میزان دبی القایی تعیین شده است. مهمترین عاملی که بر عملکرد یک بادگیر تأثیر می‌گذارد میدان فشار ایجاد شده در دهانه ورودی بادگیر، توسط جریان باد است. وقتی که باد نسبت به بادگیر و ساختمان متصل به آن می‌وزد، فشاری به نام فشار باد در تمام دهانه‌های بادگیر و در سطوح مختلف ساختمان به وجود می‌آید [۱۴]. فشار باد ایجاد شده را می‌توان از رابطه (۱) محاسبه کرد:

$$P = \frac{1}{2} \rho C_p U_o^2 \quad (1)$$

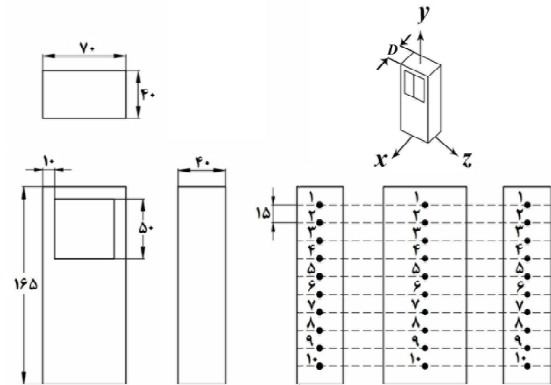
که P فشار ایجاد شده توسط جریان باد، U_o سرعت باد، ρ چگالی هوا و C_p ضریبی است که به ضریب فشار باد معروف است. با تعیین ضرایب فشار و با استفاده از معادله (۲) می‌توان میزان دبی القایی را به صورت نیمه تحلیلی بدست آورد [۱۴].

$$Q_{semi-theoretical} = A C_d U_o (C_{p1} - C_{p2})^{0.5} \quad (2)$$

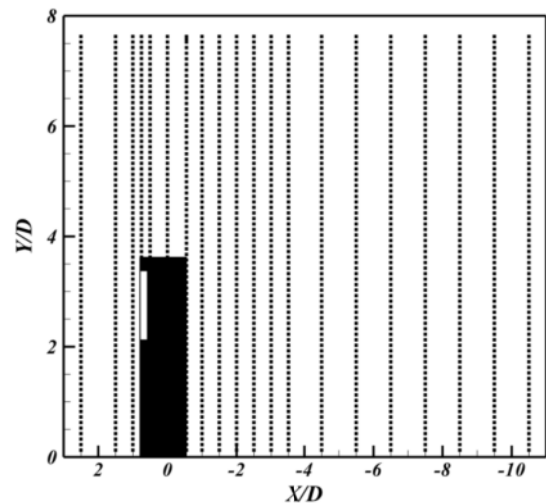
در رابطه (۲)، A مساحت دریچه بادگیر، C_d ضریب تخلیه و C_{p1} و C_{p2} به ترتیب ضرایب فشار در دهانه های ورودی و خروجی بادگیر است. با استفاده از معادله (۲) می‌توان، میزان دبی القایی توسط بادگیر در حضور مانع را نسبت به بادگیر منفرد به صورت نیمه تحلیلی طبق رابطه (۳) پیش‌بینی کرد.

$$\left(\frac{Q}{Q_o}\right)_{Semi-theoretical} = \left(\frac{C_{p1} - C_{p,atm}}{C_{p0} - C_{p,atm}}\right)^{0.5} \quad (3)$$

در رابطه (۳)، پارامترهای Q و Q_o به ترتیب میزان دبی القایی توسط بادگیر در حضور مانع و بادگیر منفرد می‌باشند. C_{p1} میانگین ضرایب فشار در دهانه ورودی بادگیر با حضور مانع، C_{p0} میانگین ضرایب فشار در دهانه ورودی بادگیر منفرد و $C_{p,atm}$ ضریب فشار در دهانه خروجی بادگیر (ضریب فشار اتمسفر) می‌باشند. به منظور بررسی میدان فشار ایجاد شده در بادگیر، ۳۰ سنسور یا تپ فشار^۱ به ضخامت ۱ میلی‌متر بر روی سطوح داخلی کانال بادگیر نصب شده‌اند. محل قرار گرفتن این تپ‌های فشار در شکل ۳ نشان داده شده است. به منظور اندازه‌گیری ضرایب فشار، از یک دستگاه فشارسنج ۱۶ کاناله از



الف- ابعاد مدل بادگیر به همراه محل نصب سنسورهای فشار (ابعاد مدل بر حسب میلی‌متر است).

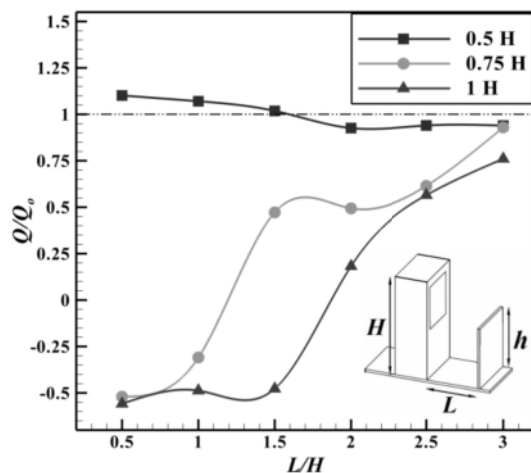


ب- نقاط داده برداری در صفحه $Z=0$

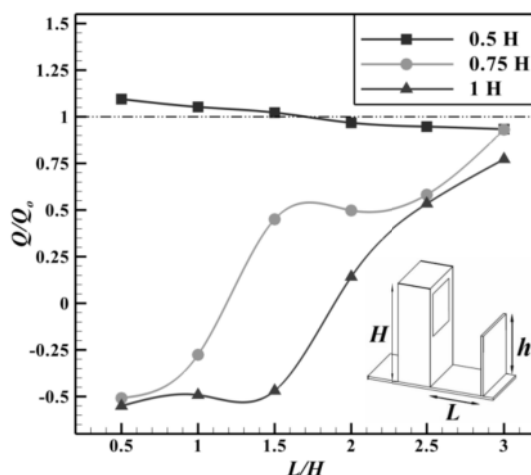
شکل ۳ هندسه تحت بررسی در این پژوهش و نقاط داده برداری در صفحه $Z=0$

بنابراین به شرط آنکه سرعت جریان آزاد از یک مقدار مشخص بیشتر در نظر گرفته شود، تغییرات گسترده‌ای در سرعت جریان آزاد تأثیر خاصی بر توزیع سرعت و فشار نخواهد داشت [۱۳]. برای مدل مورد بررسی در این پژوهش، این سرعت حدود ۱۰ m/s است. با توجه به ابعاد مدل بادگیر، نسبت انسداد تونل باد برابر با ۴/۸٪ می‌باشد. اندازه‌گیری میزان دبی القایی توسط بادگیر و همچنین بررسی توزیع سرعت در اطراف آن با جریان سنج سیم داغ انجام شده است. سنسور این جریان سنج، از سیمی از جنس تنگستن، به ضخامت ۵ μm و به طول تقریبی ۱/۵ mm ساخته شده است. قبل از شروع اندازه‌گیری، دستگاه جریان سنج سیم داغ به صورت استاتیکی و دینامیکی

1. Pressure Tap



الف- سرعت جریان بالادست ۱۰ m/s



ب- سرعت جریان بالادست ۱۵ m/s

شکل ۴ دبی هوای القایی توسط بادگیر در حضور موانعی با ارتفاعات مختلف در فواصل مختلف از بادگیر

به منظور تحلیل دقیق‌تر داده‌ها، دبی القایی محاسبه شده در حضور مانع (Q) بر مقدار دبی القایی توسط بادگیر منفرد (Q_0) تقسیم شده است. مقادیر مثبت نشان دهنده آن است که جهت جریان هوا از بادگیر به سمت خانه است و بادگیر به عنوان یک وسیله دمنده عمل می‌کند و مقادیر منفی نشان دهنده آن است که جهت جریان هوا معکوس شده و از خانه به سمت بادگیر حرکت می‌کند.

همچنین دبی هوای القایی توسط بادگیر بدون حضور مانع، به وسیله یک خط‌چین نشان داده شده است. بررسی نتایج شکل ۴ نشان می‌دهد که تغییر سرعت جریان بالادست، تأثیر چندانی بر الگوی تغییرات دبی بدون بعد و همچنین تغییر

نوع اختلافی^۱ استفاده شده است. سنسورهای این دستگاه فشار، قادر به اندازه‌گیری حداقل مقدار فشار تا ۰/۱ Pa می‌باشند. حداکثر فشار قابل اندازه‌گیری توسط این دستگاه، ۱۲۵۰ Pa است. به منظور اندازه‌گیری سرعت جریان آزاد، یک لوله پیتوت در بالادست مدل قرار داده شده و مقدار سرعت توسط فشار سنج ۱ کاناله اندازه‌گیری می‌شود. آزمایش‌های مربوط به مرئی‌سازی در یک تونل دود^۲ انجام شده است. برای نورپردازی از دو فلش استفاده شده است. این دو فلش با استفاده از دو گیرنده و یک فرستنده رادیویی، با یک دوربین عکس‌برداری هماهنگ شده‌اند. این دوربین توانایی عکس‌برداری در سرعت‌های بالا را دارد. سرعت عکس‌برداری در این پژوهش برابر ۲۵۰۰ Frame/s بوده است.

نتیجه یک اندازه‌گیری، تنها زمانی کامل است که همراه با شرح عدم قطعیت آن ارائه شود. عدم قطعیت سرعت لحظه‌ای به عوامل مختلفی بستگی دارد که برخی از آنها عبارتند از: عدم قطعیت جریان‌سنج (نویزها، تکرارپذیری، پاسخ فرکانسی و غیره)، عدم قطعیت کالیبراسیون، عدم قطعیت مربوط به موقعیت قرارگیری پراب، عدم قطعیت ناشی از تغییرات دما و غیره. در این تحقیق عدم قطعیت‌هایی که در بالا به آنها اشاره شد مطابق با روند مطرح شده در مراجع [۱۵] و [۱۶]، با یکدیگر ترکیب شده تا عدم قطعیت کلی بدست آید. ماکزیمم عدم قطعیت سرعت متوسط ۱٪ تخمین زده شد. این مقدار، تخمینی از مقدار بیشینه عدم قطعیت مرتبط با سرعت متوسط اندازه‌گیری شده در یک نقطه می‌باشد. مقدار حداکثر عدم قطعیت در محاسبه دبی جریان نیز برابر ۲٪ (با اطمینان ۹۵٪) برآورد شده است.

۳- بررسی و تحلیل نتایج

به منظور بررسی تأثیر حضور سازه‌های بالادست بر شدت جریان القایی توسط بادگیرها، سازه‌هایی با ارتفاعات مختلف، در فواصل گوناگون از بادگیر قرار گرفتند. دبی هوای ورودی از دریچه بادگیر در سرعت‌های جریان آزاد ۱۰ m/s و ۱۵ m/s با استفاده از جریان سنج سیم داغ اندازه‌گیری شده و نتایج بدست آمده در شکل ۴ ارائه شده است.

1. Honeywell, DC005NDC4
2. Plint

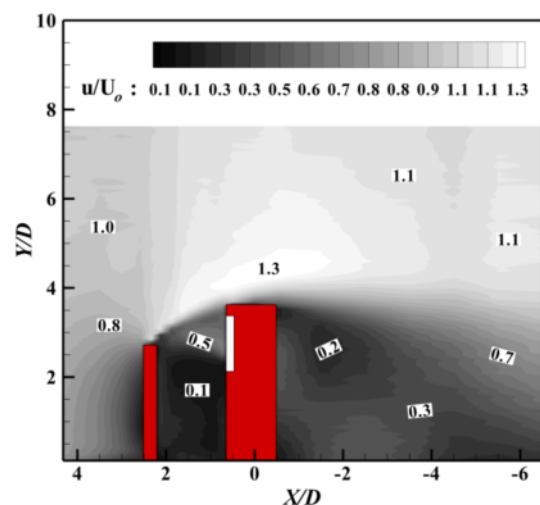
با افزایش فاصله موانع با ارتفاع $0.75H$ و $1H$ از بادگیر، میزان دبی خروجی از آن کاهش می‌یابد تا سرانجام به صفر برسد (حالت دوم). این فاصله که می‌توان آن را فاصله بحرانی نامید، برای مانع با ارتفاع $0.75H$ ، $1H$ < فاصله بحرانی $1.5H$ و برای مانع با ارتفاع $1H$ ، $1.5H$ < فاصله بحرانی $2H$ است. در این حالت جریان بسیار ناچیزی وارد بادگیر می‌شود و یا از آن خارج می‌شود.

در حالت سوم با گذر از فاصله بحرانی، دریچه بادگیر از دنباله مانع بالادست خارج می‌شود و بادگیر به عنوان یک وسیله دمنده عمل می‌کند و جریان هوا را از محیط اطراف گرفته و به داخل ساختمان هدایت می‌نماید. در این حالت با افزایش فاصله موانع بلند ($h = 1H$ و $h = 0.75H$) از بادگیر عملکرد آن به عنوان یک وسیله دمنده بهبود می‌یابد. بررسی نتایج شکل ۴ نشان می‌دهد، که میزان دبی القایی توسط بادگیر در حضور مانعی با ارتفاع $1H$ در فاصله $3H$ از آن، حدود ۷۵٪ بادگیر منفرد است. از همین رو توصیه می‌شود که حداقل فاصله بین بادگیر و مانع بالادست حدود $3H$ باشد تا کمترین تأثیر را بر عملکرد آن داشته باشند. دبی اندازه‌گیری شده توسط جریان سنج سیم داغ نشان می‌دهد که بادگیر در حضور مانع با ارتفاع $0.5H$ که در فواصل کمتر از $1.5H$ از آن قرار گرفته است عملکرد بهتری نسبت به بادگیر منفرد دارد. هرچند با افزایش فاصله، میزان دبی هوای ورودی به بادگیر به میزان ناچیزی کاهش پیدا می‌یابد. به منظور بررسی ساختار جریان در داخل و اطراف بادگیر، در شکل ۶ نحوه ورود جریان به داخل بادگیر منفرد به کمک دود در دو نما مرئی‌سازی شده است.

همان‌گونه که در شکل ۶-الف مشاهده می‌شود در اثر جدایش جریان از لبه پایینی دریچه بادگیر، سطح مؤثر عبور جریان به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. علاوه بر این گردابه‌های بسیار بزرگی (گردابه نوع ۱) در ناحیه جدایش تشکیل می‌شود که بخش بزرگی از دهانه ورودی بادگیر را احاطه کرده و باعث ایجاد یک جریان چرخشی شده‌اند. ناحیه جدایش و گردابه‌های تشکیل شده، باعث ائتلاف انرژی سیال شده و در نتیجه توانایی بادگیر را در القای جریان هوا به فضای مسکونی کاهش می‌دهند.

بررسی شکل ۶-ب نشان می‌دهد، که علاوه بر تشکیل گردابه در ناحیه جدایش، دو گردابه کوچک (گردابه نوع ۲) نیز در گوشه‌های دریچه بادگیر تشکیل می‌شود.

جهت جریان از بادگیر به سمت خانه یا بلعکس ندارد. رفتار بادگیر را با توجه به ارتفاع و فاصله مانع بالادست می‌توان به سه حالت تقسیم کرد. در اولین حالت، بادگیر به عنوان یک وسیله مکند عمل می‌کند و هوای داخل ساختمان را به محیط بیرون تخلیه می‌کند تا هوای تازه از طریق درها و پنجره‌ها وارد اتاق‌ها شود. همان‌گونه که از شکل ۴ مشاهده می‌شود، این حالت زمانی رخ می‌دهد که مانعی با ارتفاع $0.75H$ یا $1H$ به ترتیب در فواصلی کمتر از $1H$ یا $1.5H$ از بادگیر قرار گیرند (H ارتفاع بادگیر است). در این زمان دریچه بادگیر در دنباله مانع بالادست قرار می‌گیرد و فشار دردهانه بادگیر نسبت به محیط اتمسفر کمتر می‌شود. در نتیجه جریان هوا از داخل ساختمان به سمت بادگیر حرکت می‌کند. به عنوان نمونه‌ای از این حالت در شکل ۵ توزیع سرعت متوسط بدون بعد در صفحه $z=0$ در اطراف بادگیر با حضور مانعی با ارتفاع $0.75H$ که در فاصله $0.5H$ از آن قرار دارد، نشان داده شده است (دریچه بادگیر به رنگ سفید است). سرعت جریان آزاد 10 m/s است. همان‌طور که به وضوح مشاهده می‌شود، تمام بادگیر در زیر لایه بررشی جدا شده از لبه مانع قرار دارد که این امر باعث کاهش شدید فشار در دهانه بادگیر می‌شود. از آنجا که در تحقیق حاضر از پراب یک بعدی استفاده شده است و این گونه پراب‌ها قادر به نشان دادن جهت جریان نیستند، در شکل ۵ حرکت جریان هوا از داخل بادگیر به سمت بیرون مشخص نیست (هرچند افزایش سرعت در مقابل دریچه بادگیر به دلیل خروج جریان هوا از دریچه به سمت بیرون است).

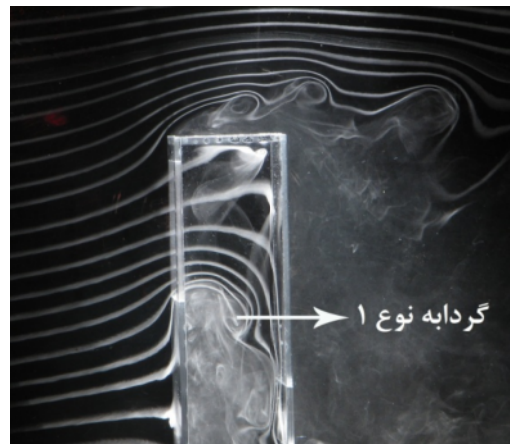


شکل ۵ کانتور سرعت متوسط بدون بعد برای بادگیر

حدود ۱۰٪ افزایش یافته است. نکته قابل توجهی که در شکل ۷ مشاهده می‌شود آن است که با قرار گرفتن موانعی با ارتفاع کم ($0.5H$) در نزدیکی بادگیر، یک گردابه ثانویه در نیمه بالایی و چسبیده به سقف بادگیر تشکیل می‌شود.

این گردابه‌های ثانویه یک جریان چرخشی شدیدی را در این ناحیه به وجود می‌آورند و باعث می‌گردند که قسمتی از بادگیر بدون استفاده شود. باید توجه داشت که با افزایش فاصله مانع از بادگیر اندازه این گردابه ثانویه بزرگتر شده و ناحیه بیشتری را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد.

از آنجا که عملکرد تهویه بادگیرها، وابسته به اختلاف فشار به وجود آمده بین دهانه ورودی و خروجی آن است، در ادامه توزیع فشار بر روی سطوح داخلی بادگیر و تأثیری که ایجاد گردابه‌های ثانویه بر این توزیع فشار دارند، بررسی می‌شود.

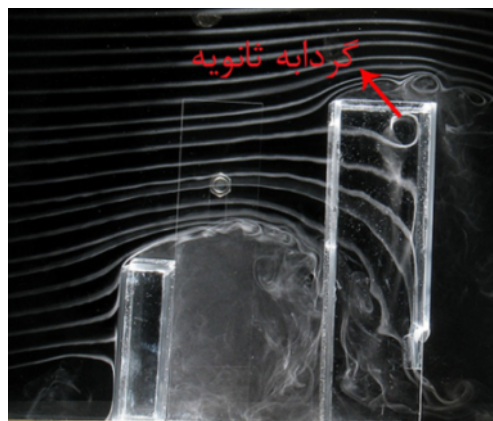


الف- نمای جانبی الگوی جریان

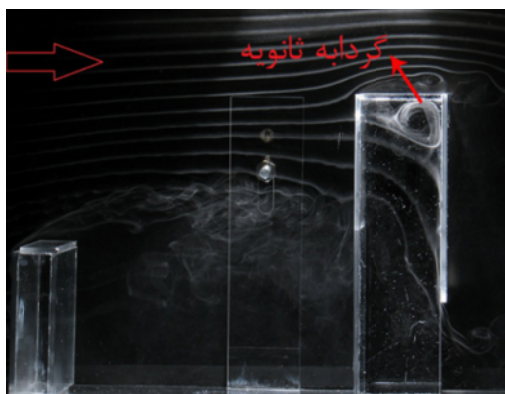


ب- نمای بالایی الگوی جریان

شکل ۶ الگوی جریان در داخل و اطراف بادگیر منفرد



الف- بادگیر در حضور مانعی با ارتفاع $0.5H$ در فاصله $0.5H$



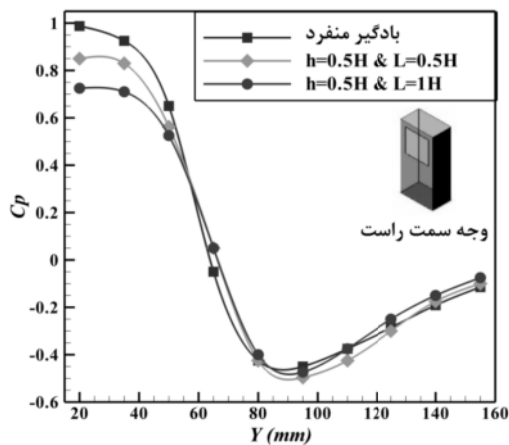
ب- بادگیر در حضور مانعی با ارتفاع $0.5H$ در فاصله $1H$

شکل ۷ الگوی جریان در داخل و اطراف بادگیر در حضور مانعی با ارتفاع کم و در نزدیکی آن

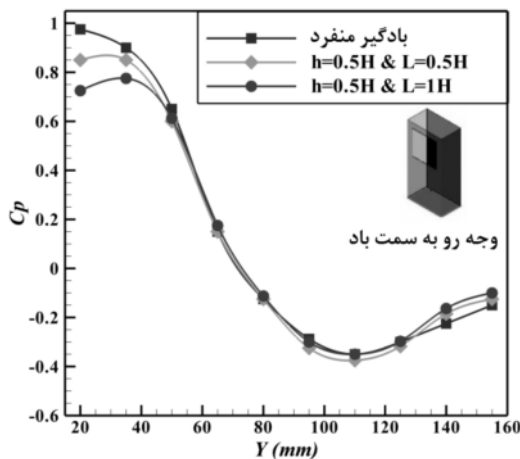
البته از آنجایی که این گردابه‌ها بسیار کوچک می‌باشند و فضای کمی را اشغال کرده‌اند، به نظر می‌رسد که تأثیر چندانی در کاهش دبی القایی ندارند. در شکل ۷ رفتار جریان در داخل و اطراف بادگیر با حضور مانعی با ارتفاع $0.5H$ که به ترتیب در فواصل $0.5H$ و $1H$ از آن قرار گرفته، نشان داده شده است.

بررسی خطوط دود در شکل ۷ نشان می‌دهد که حضور مانعی با این ارتفاع ($0.5H$) در نزدیکی بادگیر باعث می‌شود، ناحیه متأثر از جدایش جریان از لبه پایینی دریچه بادگیر کاهش پیدا کند و در نتیجه سطح مؤثر عبور جریان افزایش یابد. به عبارت دیگر در این حالت دبی هوای بیشتری باید از طریق بادگیر القا شود. اندازه‌گیری‌های ارائه شده در شکل ۴ نیز نشان می‌دهد، که در این حالت دبی هوای القایی به ساختمان

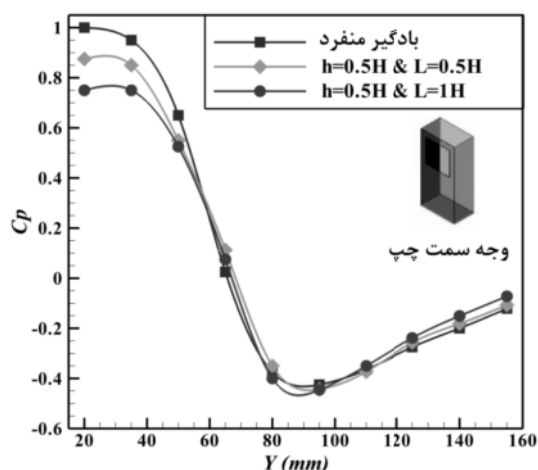
که ناشی از جدایش جریان می‌باشد.



الف- توزیع فشار بر وجه سمت راست



ب- توزیع فشار بر وجه روبرویی



ج- توزیع فشار بر وجه سمت چپ

شکل ۸ توزیع فشار بر روی سطوح داخلی بادگیر منفرد و بادگیر در حضور مانع

در شکل ۸ توزیع ضرایب فشار بر روی سطوح داخلی بادگیر برای سه حالت: بادگیر منفرد و بادگیر در حضور مانعی به ارتفاع $0.5H$ در فواصل $0.5H$ و $1H$ نشان داده شده است. بررسی ضرایب فشار در شکل ۸ نشان می‌دهد، که حضور مانعی با ارتفاع کم در بالادست جریان باعث کاهش ضرایب فشار در دهانه ورودی بادگیر می‌شود. علت این پدیده، افت فشار موضعی توسط گردابه‌های ثانویه تشکیل شده در دهانه بادگیر است. نکته بسیار جالب آن است که با افزایش فاصله مانع، این افت فشار موضعی نیز افزایش می‌یابد که دلیل این امر بزرگ شدن گردابه‌های ثانویه با افزایش فاصله مانع بالادست از بادگیر است (شکل ۷). در مطالعات مربوط به بررسی تهویه طبیعی در ساختمان‌ها معمولاً میزان دبی ورودی به ساختمان با اندازه‌گیری ضرایب فشار در ورودی‌های آن و با استفاده از معادلات (۲) و (۳) تخمین زده می‌شود. البته استفاده از این معادلات با محدودیت‌هایی نیز همراه است. به عنوان مثال در زوایای زیاد حمله باد، این معادلات تخمین چندان دقیقی در مورد میزان دبی القایی ارائه نمی‌دهند.

علاوه بر این نتایج بدست آمده در این بررسی نشان می‌دهد که تشکیل این گردابه‌های ثانویه نیز باعث ایجاد خطا در تخمین عملکرد بادگیر با استفاده از معادله (۳) می‌شوند. اندازه‌گیری‌های انجام شده نشان می‌دهد که تشکیل گردابه‌های ثانویه باعث می‌شود میانگین ضرایب فشار در ورودی بادگیر در حضور مانعی به ارتفاع $0.5H$ در فواصل $0.5H$ و $1H$ از آن، به ترتیب حدود ۱۱٪ و ۲۳٪ کاهش یابد. این کاهش در ضرایب فشار موجب کاهش به ترتیب حدود ۶٪ و ۱۳٪ در دبی تخمینی ورودی به ساختمان توسط معادله (۳) می‌شود. در صورتی که اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط جریان سنج سیم داغ، نشان می‌دهد که در این موارد میزان دبی القایی توسط بادگیر به ترتیب حدود ۱۰٪ و ۵٪ افزایش می‌یابد. به منظور بررسی کمی تأثیر سازه بالادست بر کاهش ناحیه جدایش از لبه پایینی دریچه بادگیر، در شکل ۹ توزیع سرعت متوسط بدون بعد جریان عبوری از دهانه خروجی بادگیر برای دو حالت بادگیر منفرد و بادگیر در حضور مانعی به ارتفاع $0.5H$ در فاصله $0.5H$ نشان داده شده است (سرعت جریان آزاد 10 m/s است).

همان‌طور که در شکل ۹-الف مشاهده می‌شود، برای بادگیر منفرد کمترین سرعت جریان هوا در قسمت میانی کانال است

با افزایش سرعت در قسمت میانی کانال، انتظار می‌رود که سرعت جریان هوا در گوشه‌های کانال بادگیر کاهش یابد. بررسی کمی توزیع سرعت در شکل ۹- ب این مطلب را تایید می‌کند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، برای بادگیر منفرد بیشترین مقدار سرعت در گوشه‌ها حدود $1/1$ جریان آزاد است. در صورتی که این مقدار برای بادگیر با حضور مانع حدود $1/0.5$ جریان آزاد است.

در شکل ۱۰ توزیع سرعت متوسط در صفحه $z=0$ در اطراف بادگیر منفرد و بادگیر با حضور مانعی با ارتفاع کم و در نزدیکی آن ($L=0.5H$ و $h=0.5H$) با یکدیگر مقایسه شده است (سرعت جریان آزاد 10 m/s است).

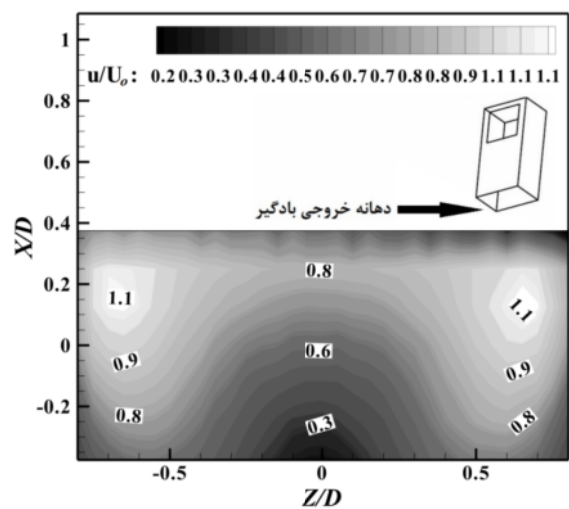
همان‌گونه که در شکل ۱۰- الف مشاهده می‌شود، با نزدیک شدن جریان آزاد به بادگیر از سرعت آن کاسته می‌شود، به گونه‌ای که سرعت جریان ورودی از دریچه بادگیر حدود 0.6 جریان آزاد است. اما حضور مانع و لایه بررشی جدا شده از لبه بالایی آن (شکل ۱۰- ب) باعث افزایش سرعت در دریچه ورودی بادگیر می‌شود. به گونه‌ای که حتی سرعت در بخش- هایی از دریچه بادگیر، به سرعت جریان آزاد می‌رسد.

لایه بررشی جدا شده از مانع به زیر لبه پایینی دریچه برخورد کرده و به سمت پایین حرکت می‌کند و باعث ایجاد یک جریان چرخشی بین مانع و بادگیر می‌گردد (این جریان چرخشی به وضوح در شکل ۷- الف مشخص است).

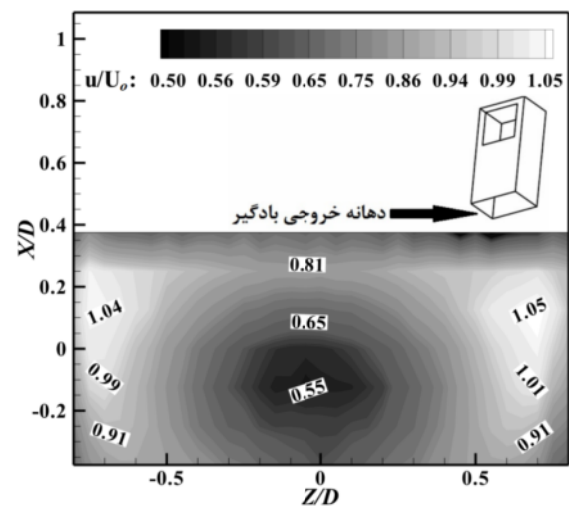
به منظور بررسی دقیق‌تر توزیع سرعت در ورودی بادگیر، در شکل ۱۱ پروفیل سرعت متوسط بدون بعد در بالادست بادگیر و در فاصله 4 میلی‌متر از وجه رو به جریان بادگیر ($x=4\text{mm}$)، برای دو حالت بادگیر منفرد و بادگیر با حضور مانعی با ارتفاع $0.5H$ و در فاصله $0.5H$ از آن نشان داده شده است. ناحیه روبروی دریچه بادگیر به وسیله دو خط چین مشخص شده است (سرعت جریان آزاد 10 m/s است).

بررسی توزیع سرعت برای بادگیر منفرد نشان می‌دهد که بیشترین میزان سرعت جریان ورودی، مربوط به نیمه پایینی دریچه می‌باشد و با حرکت به سمت نیمه بالایی دریچه از سرعت جریان ورودی کاسته می‌شود. حضور مانع و لایه بررشی جدا شده از لبه بالایی آن باعث می‌شود که سرعت جریان هوای ورودی به بادگیر افزایش یابد. هرچند این افزایش سرعت در نیمه پایینی دریچه نسبت به نیمه بالایی آن مشهودتر است. بنابراین

علاوه بر این، بیشترین سرعت جریان هوا مربوط به گوشه‌های دهانه خروجی می‌باشد. علت این امر آن است، که جدایش جریان باعث کاهش سطح مؤثر عبور جریان هوا شده و در نتیجه جریان هوا به سمت گوشه‌های کانال بادگیر هدایت شده است. اما شکل ۹- ب نشان می‌دهد که با قرار گرفتن مانع در بالادست بادگیر سرعت در قسمت میانی کانال افزایش می‌یابد. به گونه‌ای که در بادگیر منفرد کمترین سرعت در قسمت میانی کانال حدود 0.3 جریان آزاد است، در صورتی که برای بادگیر با حضور مانع این مقدار به 0.55 جریان آزاد افزایش می‌یابد.



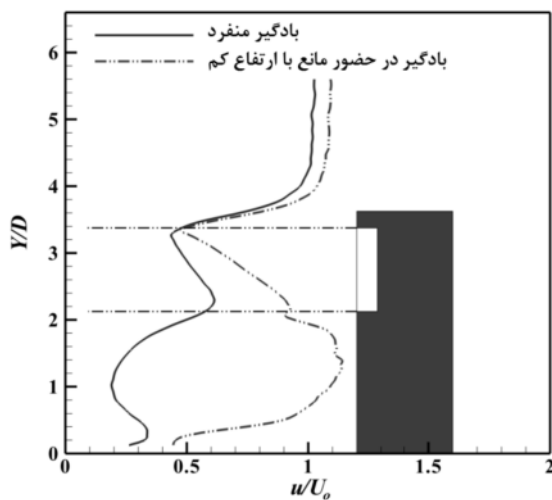
الف= توزیع سرعت در دهانه خروجی بادگیر منفرد



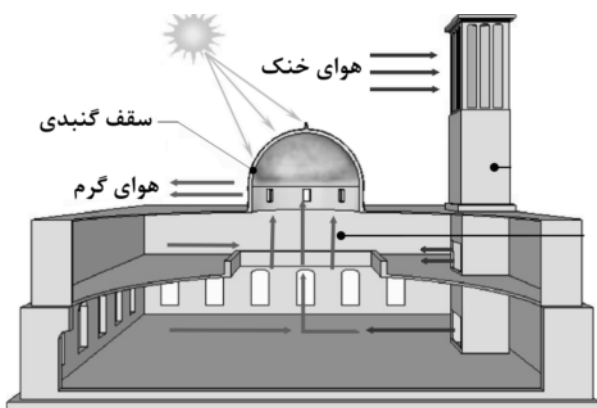
ب= توزیع سرعت در دهانه خروجی بادگیر با حضور مانعی به ارتفاع

$0.5H$ در فاصله $0.5H$

شکل ۹ مقایسه سرعت متوسط جریان عبوری از دهانه خروجی بادگیر برای بادگیر منفرد و بادگیر در حضور مانع



شکل ۱۱ توزیع سرعت در وجه روبرویی بادگیر برای حالت‌های بادگیر منفرد و بادگیر با حضور مانع



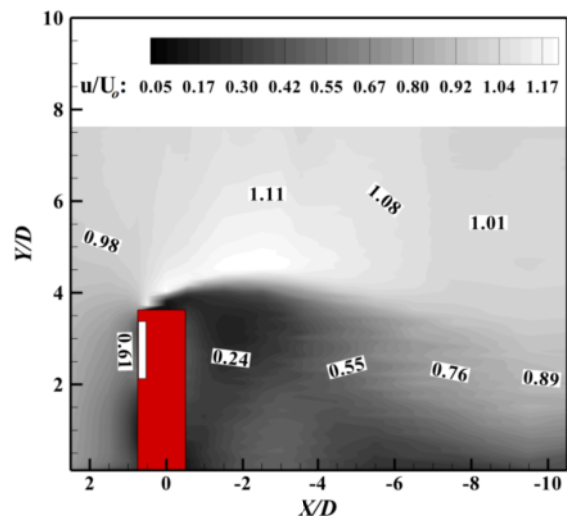
شکل ۱۲ ترکیب بادگیر و سقف گنبدی در معماری ساختمان‌های سنتی ایران

از آنجا که سرعت جریان باد در اثر عبور از روی این سقف‌های گنبدی افزایش می‌یابد، به نظر می‌رسد این سقف‌های گنبدی علاوه بر نقشی که در کاهش دمای ساختمان دارند، باعث افزایش سرعت جریان ورودی به داخل بادگیر نیز می‌شوند (دقیقاً همان نقشی را ایفا می‌کنند که مانع بالادست در این تحقیق ایفا می‌کند).

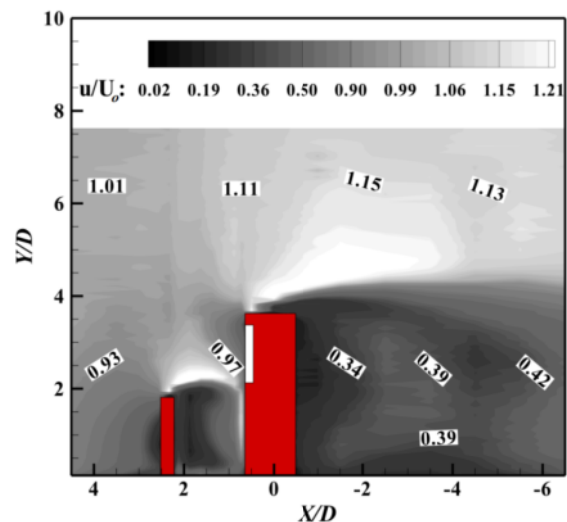
۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش نتایج بدست آمده از تأثیر حضور سازه بالادست بر عملکرد بادگیر یک‌طرفه به صورت تجربی و به کمک تونل باد ارائه شده است. آزمایش‌ها در تونل باد مدار باز و به کمک

حضور مانع، علاوه بر این که ناحیه جدایش جریان از لبه پایینی دریچه بادگیر را کاهش می‌دهد، با افزایش سرعت جریان ورودی باعث بهبود عملکرد تهویه طبیعی بادگیر می‌شود. بادگیرها و سقف‌های گنبدی دو عنصر اصلی در معماری ساختمان‌های موجود در مناطق مرکزی ایران هستند. در بسیاری از موارد بادگیرها در نزدیکی این سقف‌های گنبدی ساخته می‌شوند (شکل ۱۲).



الف- توزیع سرعت در اطراف بادگیر منفرد.



ب- توزیع سرعت در اطراف بادگیر با حضور مانعی به ارتفاع $0.5H$ در فاصله $0.5H$

شکل ۱۰ مقایسه توزیع سرعت برای بادگیر منفرد و بادگیر با حضور مانعی با ارتفاع کم در نزدیکی آن

C_d	ضریب تخلیه
C_p	ضریب فشار
H	ارتفاع بادگیر (cm)
h	ارتفاع مانع (cm)
L	فاصله مانع تا بادگیر (cm)
P	فشار ایجاد شده توسط جریان باد (Pa)
Q_o	دبی القایی توسط بادگیر منفرد (m^3/s)
Q	دبی القایی توسط بادگیر در حضور مانع (m^3/s)
u	سرعت متوسط (m/s)
U_o	سرعت جریان آزاد (m/s)

۶- مراجع

- [1] Bahadori M. N., "Viability of Wind Towers in Achieving Summer Comfort in the Hot Arid Regions of the Middle East", *Renewable Energy*, Vol. 5, 1994, pp. 879-892.
- [2] Bahadori M. N., "Passive Cooling Systems in Iranian Architecture", *Scientific American*, Vol. 238, No. 2, 1978, pp. 144-154.
- [3] Hughes B. R., Abdul Ghani S. A. A., "Investigation of a Windvent Passive Ventilation Device against Current Fresh Air Supply Recommendations", *Energy and Buildings*, Vol. 40, 2008, pp. 1651-1659.
- [4] Karakatsanis C., Bahadori M. N., Vickery B. J., "Evaluation of Pressure Coefficient and Estimation of Air Flow Rates in Buildings Employing Wind Towers", *Solar Energy*, Vol. 37, No. 4, 1986, pp. 363-374.
- [5] منتظری ح، دهقان ع. ا، "بررسی عددی جریان هوای القا شده توسط یک بادگیر به عنوان عامل تهویه طبیعی در داخل یک ساختمان نمونه"، دهمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها، یزد، ۱۳۸۵.
- [6] Kazemi Esfeh M., Dehghan A. A., Dehghan Manshadi M., Mohagheghian S., "Visualized Flow Structure around and inside of One-Sided Wind-Catchers", *Energy and Buildings*, 2012, DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.09.015.
- [7] Li L., Mak C. M., "The Assessment of the Performance of a Wind Catcher System Using Computational Fluid Dynamics", *Building and Environment*, Vol. 42, 2007, pp. 1135-1141.
- [8] Su Y., Riffat S. B., Lin Y. L., Khan N., "Experimental and CFD study of ventilation flow rate of a Monodraught™ wind catcher", *Energy and Buildings*, Vol. 40, 2008, pp. 1110-1116.
- [9] Elmualim A. A., Awbi H. B., "Wind Tunnel and CFD Investigation of the Performance of Wind Catcher Ventilation Systems", *International Journal of Ventilation*, Vol. 1, 2002, pp. 53-64.

جریان‌سنج سیم داغ و دستگاه فشارسنج انجام گرفته است. علاوه بر این، به منظور بررسی دقیق رفتار جریان در داخل و اطراف بادگیر از روش‌های مرئی سازی جریان به کمک دود نیز استفاده شده است.

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که عملکرد بادگیر در مناطق شهری با تراکم ساختمانی بالا، وابسته به ارتفاع موانع بالادست و فاصله آنها تا بادگیر است. بر همین اساس رفتار بادگیرها را می‌توان به سه حالت زیر تقسیم کرد:

۱- قرار گرفتن موانعی با ارتفاع $0.75H$ یا H در فاصله کمتر از H یا $1/5H$ باعث می‌شود بادگیر در دنباله مانع بالادست قرار بگیرد و جریان هوا از ساختمان به سمت بادگیر حرکت کند (در این حالت بادگیر به عنوان یک وسیله مکنده عمل می‌کند). در این حالت، نرخ جریان هوای خروجی از بادگیر حدود ۵۰٪ نرخ جریان ورودی به بادگیر منفرد می‌باشد و افزایش سرعت و ارتفاع مانع بالادست تأثیری بر نرخ جریان خروجی ندارد.

۲- در دومین حالت دبی عبوری از بادگیر به کمترین مقدار خود می‌رسد. به عبارت دیگر نه جریانی وارد بادگیر می‌شود و نه از آن خارج می‌شود. به عنوان نمونه‌ای از این حالت، زمانی که مانعی با ارتفاع H در فاصله بین $1/5H$ تا $2H$ از بادگیر قرار گیرد، میزان دبی عبوری از بادگیر به کمترین مقدار خود می‌رسد.

۳- با خارج شدن دریاچه بادگیر از دنباله مانع بالادست، جریان هوا از طریق بادگیر وارد ساختمان می‌شود و بادگیر به عنوان یک وسیله دمنده عمل می‌کند. نتایج نشان داده‌اند که به منظور کاهش تأثیر سازه‌های بالادست، رعایت حداقل فاصله $3H$ بین بادگیر و سازه بالادست لازم است.

نتایج حاصل از اندازه‌گیری دبی القایی نشان می‌دهد، قرار گرفتن موانعی با ارتفاع کم ($0.5H$) در نزدیکی بادگیر باعث افزایش جریان ورودی به ساختمان تا حدود ۱۰٪ می‌شود. هرچند در این حالت گردابه‌های ثانویه‌ای در مجاورت سقف بادگیر تشکیل می‌شود. این گردابه‌های ثانویه با ایجاد افت فشار موضعی باعث ایجاد خطا تا ۲۰٪ در تخمین عملکرد یک بادگیر با استفاده از ضرایب فشار می‌شوند.

۵- فهرست علائم

A مساحت دریاچه ورودی (m^2)

- [13] Bahadori M. N., "Pressure coefficients to evaluate air flow pattern in wind towers", *International Passive and Hybrid Cooling Conference*, 1981, pp. 206-210.
- [۱۴] بهادری نژاد م.، یعقوبی م.، تهویه و سرمایش طبیعی در ساختمانهای سنتی ایران، مرکز نشر دانشگاهی، ۱۳۸۵، صص ۲۶۳-۲۶۵.
- [15] Jorgensen E., *How to Measure Turbulence with Hot-wire Anemometers*, Dantec Dynamics, 2002, pp. 40-44.
- [16] Yavuzkurt S., "A Guide to Uncertainty Analysis of Hot-Wire Data", *Fluids Engineering*, Vol. 106, 1984, pp. 181-186.
- [10] Montazeri H., "Experimental and numerical study on natural ventilation performance of various multi-opening wind catchers", *Building and Environment*, Vol. 46, 2011, pp. 370-378.
- [11] Kalantar V., "Numerical Simulation of Cooling Performance of Wind Tower (Baud-Geer) in Hot and Arid Region", *Renewable Energy*, Vol. 34, 2009, pp. 246-254.
- [12] Bahadori M. N., Mazidi M., Dehghani A. R., "Experimental Investigation of New Designs of Wind Towers" *Renewable Energy*, Vol. 33, 2008, pp. 2273-2281.