



## تحلیل عددی عملکرد بادگیر چهار جهته متصل به تالار و حیاط مرکزی در زوایای مختلف برخورد باد

حسین دهقانی محمدآبادی<sup>1</sup>، سید عباس یزدانفر<sup>2</sup>، علی اکبر دهقان<sup>3\*</sup>، ابوالفضل دهقانی محمدآبادی<sup>4</sup>

1- کارشناسی ارشد، مهندسی معماری، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- دانشیار، مهندسی معماری، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

4- کارشناسی ارشد، مهندسی معماری، دانشگاه یزد، یزد

\* یزد، صندوق پستی 89195-741، adehghan@yazd.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 09 مرداد 1395

پذیرش: 04 آبان 1395

ارائه در سایت: 13 آذر 1395

کلید واژگان:

بادگیر چهار جهته

حیاط مرکزی

تهویه طبیعی

زاویه حمله

تحلیل عددی

### چکیده

در این تحقیق رفتار هیدرودینامیکی بادگیر چهارجهته متصل به تالار و حیاط مرکزی در یک مدل کوچک شده از یک خانه تاریخی موجود و در حال استفاده در قالب تحلیل عددی با متغیر زاویه حمله مورد بررسی قرار گرفته است. بادگیر خانه حظیره‌ای، دارای شش کانال با مقطع مستطیلی است که به همراه حیاط مرکزی و تالار، از رایج‌ترین گونه‌ها در معماری بومی یزد به شمار می‌رود. هدف این مقاله شناخت رفتار بادگیرهای چهار جهته از نظر میزان مکش و دمش هوا به‌عنوان راهکار پاسخ‌ده بومی در تهویه طبیعی ساختمان است تا در کاربرد نوین راهنمای مهندسان باشد. مطالعه عددی بر روی مدلی با مقیاس 1:25 در سیزده زاویه حمله با فواصل 15 درجه صورت گرفته و پارامترهای مورد بررسی دبی و جهت جریان در کانال‌های بادگیر هستند. شبکه مورد استفاده از نوع ساختارمند انتخاب شده و از نرم‌افزار فلونت از مجموعه تجاری انسیس برای حل معادلات استفاده شده است. نتایج مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایش تجربی که بر روی همین مدل با مقیاس یکسان انجام شده، اعتبارسنجی شده و توافق خوبی میان آن‌ها مشاهده شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد بادگیر چهارجهته در 68.5 درصد زوایای حمله در حالت برآیند به‌صورت مکشی، و در بقیه زوایا با نسبت تقریباً برابر ورودی و خروجی جریان در نقش تعویض‌کننده هوا عمل می‌کند. بر این اساس می‌توان خارج از بحث پدیده شناوری، استفاده از بادگیرهای چهارجهته در کویر ایران را بیشتر برای دفع حرارت ساختمان و کمتر برای جذب هوای خنک محیط دانست.

## Numerical analysis of the performance of four-sided wind tower attached to parlor and courtyard in different wind incident angles

Hossein Dehghani Mohammadabadi<sup>1</sup>, Seyed Abbas Yazdanfar<sup>1</sup>, Ali Akbar Dehghan<sup>2\*</sup>, Abolfazl Dehghani Mohammadabadi<sup>3</sup>

1- School Of Architecture and Environmental Design, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

3- School of Architecture and Environmental Design, Yazd University, Yazd, Iran

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

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 09 August 2016  
Accepted 25 October 2016  
Available Online 03 December 2016

### Keywords:

Nanofluid  
Mixed Convection  
Sinusoidal Channel  
Magnetic Field  
Entropy Generation

### ABSTRACT

In this study, hydrodynamic behavior of four-sided wind tower attached to parlor and courtyard of a scaled model from existing historical house with wind incident angle as variable was numerically investigated. Hazire-ai house wind tower, which has six channels with rectangular cross section, integrated with parlor and courtyard is considered among the most typical ones in the vernacular architecture of Yazd city. This article seeks to investigate the performance of four-sided wind tower regarding suction and supply amount of air, and the way it was used as a vernacular solution for natural ventilation in order to provide engineers with design guidelines for contemporary use. Numerical study was conducted on a 1:25 scaled model and for 13 wind incident angles with 15 degree intervals. Interested parameters are mass flow rate and flow direction in each channel. A structured mesh was generated and ANSYS Fluent software was used for numerical simulation. Numerical modeling results were validated against experimental tests conducted on the same scaled model and good agreement was observed. Results indicate that in 61.5% of incident angles, four-sided wind tower acts to draw the air out of building and in other incident angles with approximately equal amount of supply and extract rate, it operates as an air exchange unit. Accordingly, it can be concluded that putting aside stack effects, four-sided wind towers in dry regions of Iran are mostly employed for heat dissipation rather than inducing outdoor cool breezes.

### 1- مقدمه

در دهه‌های گذشته استفاده از تجهیزات مکانیکی در سرمایش و تهویه ساختمان‌ها مرسوم بوده است. اما این روند به‌علت ارزش انرژی و پیامدهای زیست‌محیطی ناگزیر به توقف است. با رجوع به راه کارهای سرمایش غیرفعال

Please cite this article using:

H. Dehghani Mohammadabadi, S. A. Yazdanfar, A. A. Dehghan, A. Dehghani Mohammadabadi, Numerical analysis of the performance of four-sided wind tower attached to parlor and courtyard in different wind incident angles, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 125-134, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

و بومی نظیر بادگیر در تهویه ساختمان می‌توان در جهت کاهش میزان مصرف انرژی گام برداشت [1].

بادگیر، از شاهکارهای معماری ایران است که با استفاده از انرژی تجدیدپذیر باد آسایش حرارتی را در فصول گرم تأمین می‌کند. به‌طور کلی عملکرد بادگیر در فرایند تهویه طبیعی متأثر از دو پدیده نیروی باد و اثر دودکشی است. بادگیر می‌تواند علاوه بر تأمین باد، با خارج کردن حرارت از کالبد ساختمان فضای داخلی را خنک کند [2]. نتایج یک آزمایش با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی نشان می‌دهد کارایی تهویه بادگیر به کمک وزش باد در قیاس با عملکرد شناوری 76 درصد بیشتر است [3].

تحقیقات انجام شده بر روی بادگیر در دو حوزه مطالعات جریان شناسی و مطالعات حرارتی دسته‌بندی می‌شوند که در ادامه به‌مرور حوزه جریان‌شناسی می‌پردازیم.

تحقیقات کولوکوترونی نشان می‌دهد کارایی بادگیر متأثر از سرعت هوای بیرون، تفاوت دما و محل و تعداد بازشوهای بنا است [4].

علموعلمیم [5] با مقایسه تهویه به کمک بادگیر نصب شده روی بام و تهویه از طریق یک پنجره دریافت که تهویه توسط بادگیر به‌طور قابل‌توجهی مؤثرتر از تهویه توسط پنجره باز است.

کاراکاتسانیس و همکاران [1] برای اولین بار در بررسی جریان‌شناسی، مدلی از بادگیر با مقیاس 1:70 را در سه حالت بادگیر منفرد، بادگیر متصل به اتاق و بادگیر متصل به اتاق و حیاط، مورد مطالعه قرار دادند. آنان توسط اندازه‌گیری ضرایب فشار<sup>1</sup> بر سطوح بادگیر چهار جهته و بازشوهای خانه میزان دبی جریان<sup>2</sup> را تخمین زدند و دریافته‌اند که میزان جریان هوا از بادگیر به خانه به ضریب فشار بازشوهای اتاق بستگی دارد، به‌طوری‌که با کاهش ضریب فشار بازشوهای اتاق جریان از بادگیر به اتاق افزایش می‌یابد. نتایج همچنین نشان داد که بسته به وجود حیاط داخلی و همچنین جهت وزش باد، جریان از بادگیر به اتاق و یا در جهت مخالف حرکت می‌کند، این تحقیق نوع رفتار بادگیر را بر اساس ضریب فشار سطوح و بدون برقراری جریان در داخل اتاق و بادگیر تخمین زده و از تعیین جزئیات دقیق رفتار بادگیر در زوایای مختلف حمله باز مانده است.

کالویت و هاگز [7] با انجام آزمایش تونل باد به همراه تحلیل عددی و تجسم جریان بر روی مدل بادگیر نصب شده بر روی یک کلاس درس با مقیاس 1:10، به بررسی کارایی تهویه بادگیر در سرعت‌ها و زوایای مختلف حمله پرداختند و دریافته‌اند که بادگیر چهار جهته مدرن قادر به تأمین نرخ مناسب تهویه حتی در سرعت 2 متر بر ثانیه است. نتایج همچنین نشان داد بیشترین میزان کارایی بادگیر در زاویه برخورد 45 درجه با بادهی 32% بیشتر از زاویه صفر رخ می‌دهد. آنان در ادامه تحقیقاتشان، [6] مشخصه‌های جابجایی جریان هوا را در یک اتاق تهویه شده توسط بادگیر بررسی کردند. برای این کار آنان چندین پارامتر از جمله "متوسط عمر هوا"<sup>3</sup> را معرفی کردند که جابجایی عددی هوا را نشان می‌دهد. عمر هوا که با حل یک معادله دیفرانسیل جزئی در تحلیل عددی محاسبه می‌شود، می‌تواند نقاط قوت و ضعف گردش هوا در یک فضا را نشان دهد.

کروز-سالاس و همکاران [8] با انجام آزمایش تجربی توسط کانال آبی باز بر روی یک اتاق با پنجره‌ای در جداره و بادگیری در سقف، دریافته‌اند که کارایی تهویه توسط این سامانه به‌طور عمده به بازشوهای بادگیر و جهت

قرارگیری آن‌ها بستگی دارد.

دهقان و همکاران [9] با انجام آزمایش تونل باد و همچنین تجسم جریان به بررسی تأثیر سقف بادگیر بر کارایی تهویه آن پرداختند. مطالعه آنان شامل بررسی تأثیر سرعت و جهت باد بر بادگیر یک‌طرفه با سه نوع سقف صاف، قوسی و شیب‌دار بود. بدین منظور با اندازه‌گیری ضریب فشار سطوح و محاسبه نرخ جریان در کانال بادگیر و همچنین اندازه‌گیری مستقیم سرعت خروجی بادگیر با سرعت‌سنج سیم و مقایسه اطلاعات به‌دست‌آمده، مزایا و معایب سقف‌های مختلف را بیان نمودند و به این نتیجه رسیدند که شکل سقف بادگیر قویاً بر الگوی جریان، حوزه فشار داخلی و نرخ جریان تأثیرگذار است.

کاطمی و همکاران [10] با آزمایش تجربی و تجسم جریان، تأثیر دنباله سازه‌های بالادست بر عملکرد بادگیر یک‌طرفه با سقف تخت را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که در صورتی که سازه بالادست کوتاه باشد باعث افزایش نرخ تهویه به فضا می‌شود، اما در حالتی که ارتفاع سازه زیاد باشد دهانه بادگیر در دنباله جریان آن قرار می‌گیرد و به‌صورت مکشی عمل می‌کند.

منتظری و همکاران [11] با انجام آزمایش تونل باد، تجسم جریان و تحلیل عددی بر روی بادگیر دوطرفه و محاسبه نرخ جریان به کمک ضریب فشار سطوح دریافته‌اند که کارایی تهویه در بادگیر دوطرفه قویاً به ضرایب فشار در بازشوهای بادگیر بستگی دارد. نتایج همچنین نشان داد پدیده "مسیر میان‌بر"<sup>4</sup> در بادگیر که در آن جریان ورودی قبل از وارد شدن به اتاق از کانال‌های مکشی خارج می‌شود، از زاویه صفر به 90 درجه افزایش می‌یابد. منتظری معتقد است بادگیر دوطرفه در زاویه حمله 90 درجه بیشترین کارایی را دارد.

در پژوهشی دیگر منتظری [12] با هدف کاهش اثر تغییر زاویه حمله بر کارایی بادگیر، پنج مدل بادگیر با تقسیمات داخلی دو، سه، چهار، شش و دوازده‌تایی را به‌صورت تجربی و عددی آزمایش کرد و به این نتیجه رسید که حساسیت بادگیر استوانه‌ای نسبت به جهت جریان با افزایش تعداد تقسیمات داخلی کاهش می‌یابد، درحالی‌که از میزان دبی جریان نیز کاسته می‌شود.

سو و همکاران [13] با اندازه‌گیری نرخ خالص جریان در بادگیر تجاری استوانه‌ای در تحلیل عددی و آزمون تجربی به این نتیجه رسیدند که نوع جریان بالادست در میزان خروجی بادگیر تأثیر عمده دارد. آنان همچنین دریافته‌اند که زاویه برخورد در عملکرد بادگیر استوانه‌ای اثر کم‌رنگی دارد.

علموعلمیم و اوبی [14] با مقایسه تجربی و عددی دو بادگیر با هندسه مربعی و دایره‌ای دریافته‌اند که هر دو مورد تحت تأثیر سرعت و جهت باد هستند. نتایج آزمایش نشان داد از زاویه صفر به 45 درجه نرخ تهویه در هر دو نوع کاهش می‌یابد. اما در نهایت آن‌ها بادگیر مربعی را به خاطر ایجاد جدایش در اثر لبه‌های تیز و در نتیجه ایجاد اختلاف فشار بیشتر از لحاظ تهویه کارا تر دانستند.

بادگیرها از لحاظ سوی دریافت باد به انواع یک‌جهته، دوجهته، چهارجهته، شش‌جهته و هشت‌جهته تقسیم می‌شوند. بادگیرهای یک‌جهته و دوجهته بیشتر در مناطق دارای باد غالب کاربرد دارند و استفاده از بادگیرهای چهارجهته و بیشتر نشانگر این است که استفاده از باد در هر جهت وزش اهمیت زیادی دارد [2].

در اقلیم گرم و خشک ایران ابنیه به‌صورت فشرده در کنار یکدیگر قرار

<sup>1</sup> Pressure coefficient ( $C_p$ )

<sup>2</sup> Flow rate ( $\dot{m}$ )

<sup>3</sup> (MAA) Mean age of air

<sup>4</sup> Short circuit

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \nabla \times (\rho\omega u) = \nabla \times (\Gamma_\omega \nabla \omega) + \tilde{G}_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (4)$$

در این معادلات  $\tilde{G}_k$ ، نشانگر تولید انرژی جنبشی آشفتگی در اثر گرادیانهای سرعت متوسط است.  $\tilde{G}_\omega$  عبارت نشانگر تولید و ترمهای  $\Gamma_k$  و  $\Gamma_\omega$  به ترتیب ضرایب پخش مؤثر  $k$  و  $\omega$  هستند،  $Y_k$  و  $Y_\omega$  به ترتیب بیانگر عبارات استهلاک انرژی جنبشی آشفتگی،  $k$  و استهلاک مخصوص،  $\omega$  می‌باشند و  $D_\omega$  نشانگر نفوذ عرضی است. عبارات  $S_k$  و  $S_\omega$  ترمهای چشمه هستند که در صورت لزوم توسط کاربر تعیین می‌شوند.

## 2-2- روش حل

در مطالعه حاضر به منظور انجام محاسبات از نرم‌افزار آنسیس 16<sup>2</sup> با حلگر فلونت 3<sup>3</sup>، برای گسسته‌سازی معادلات از روش حجم محدود<sup>4</sup> در ترکیب با مدل آشفتگی  $k-\omega$  SST<sup>5</sup>، برای گسسته‌سازی عبارات جابجایی روش بالادست مرتبه دوم<sup>6</sup> و برای تصحیح کوپلینگ بین فشار و سرعت از الگوریتم سیمپل<sup>7</sup> استفاده شده است.

## 2-3- هندسه مورد بررسی

مسئله مورد بررسی شامل مدلی از خانه حظیره‌ای یزد است که با مقیاس 1:25 تهیه شده و تلاش شده در تمامی جزئیات شبیه نمونه واقعی باشد. معیار انتخاب این بنا نوع بادگیر، ارتفاع و موقعیت آن، تعداد کانال‌ها و وجود حیاط مرکزی و تالار به‌عنوان الگوی غالب بناها در شهر کویری یزد بوده است [2]. مطابق "شکل 1" هندسه شامل بادگیری است که به اتاقی نیمه بسته (تالار) متصل است و به سمت حیاط داخلی قرار دارد. به‌منظور شبیه‌سازی خانه در بافت شهری فشرده فرض بر آن شده که کل مجموعه در زیر سطح جریان آزاد واقع شده و تنها بادگیر در معرض مستقیم جریان آزاد قرار می‌گیرد. بادگیر دارای سطح مقطع مستطیلی است و توسط تیغه‌های داخلی به 6 کانال تقسیم می‌شود. ابعاد و مشخصات هریک از اجزای مدل در جدول (1) ارائه شده است.

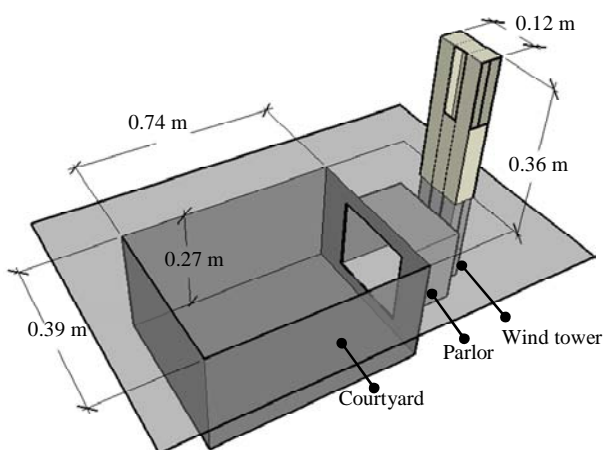


Fig. 1 investigated geometry

شکل 1 هندسه مورد بررسی

می‌گیرند و با استفاده از حیاط مرکزی از گرمای سوزان و طوفان‌های شدید مصون می‌مانند. خانه‌ها شامل دو بخش تابستان‌نشین و زمستان‌نشین هستند. اصلی‌ترین فضای تابستان‌نشین، تالار نام دارد که فضایی نیمه بسته است و دهانه‌های باز و مرتفع رو به حیاط دارد. بادگیر معمولاً در اتصال با یکی از جوانب تالار و غالباً در سمت جنوب غربی بنا قرار می‌گیرد. الگوی بادگیر چهار جهته متصل به تالار و حیاط، ساختار غالب ابنیه در اقلیم کویری چون یزد است [2].

مرور مطالعات گذشته نشان می‌دهد دیدگاه‌های مطرح شده در مورد بادگیر عموماً معطوف به استفاده از آن به‌عنوان سامانه‌ای غیرفعال برای جذب هوای محیط و هدایت آن به فضای داخلی ساختمان هستند، این برداشت برای بادگیرهای یک‌طرفه هنگامی که رو به باد غالب قرار گیرند، صادق است. اما در مورد بادگیرهای چندجهته باید توجه داشت که عملکرد القای جریان به داخل و مکش آن به بیرون هم‌زمان صورت می‌گیرد. نوع کارکرد بادگیر از نظر میزان مکش و دمش هوا در اینجا شفاف نیست و نیاز به مطالعه بیشتری دارد. پژوهش حاضر تلاش دارد میزان اتکای بادگیر به هرکدام از نقش‌های مکشی و دمشی را در تهویه ساختمان مشخص کند. برای نیل به این هدف مطالعه بر روی بادگیر چهارجهته متصل به تالار و حیاط مرکزی در یک بنای تاریخی و در حال استفاده واقع در محله فهادان یزد صورت گرفته است.

## 2- روش تحقیق

در این پژوهش از روش شبیه‌سازی و تحلیل عددی برای بررسی عملکرد بادگیر چهارطرفه استفاده شده است. هم‌زمان یک مطالعه تجربی بر روی مدل مذکور با مقیاس یکسان در حال انجام است که بخشی از داده‌های آن برای صحت‌سنجی نتایج عددی ارائه شده است. دینامیک سیالات محاسباتی شامل مدل‌های متنوع برای حل عددی جریان سیال است. از مهم‌ترین این روش‌ها می‌توان به روش معادلات متوسط‌گیری شده زمانی<sup>1</sup> اشاره کرد. همچنین از روش استدلال منطقی برای نتیجه‌گیری استفاده شده است.

## 2-1- معادلات حاکم

بقاء جرم:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \times (\rho u) = 0 \quad (1)$$

در این معادله  $\rho$ ، چگالی و  $u$ ، بردار سرعت است.

بقاء مومنتوم:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \times (\rho u u) = -\nabla p + \rho g + \nabla \times (u \nabla u) - \nabla \times \tau_t \quad (2)$$

در این رابطه  $p$  فشار،  $g$  بردار شتاب گرانشی،  $\mu$  لزجت دینامیکی و  $\tau_t$  تانسور تنش‌های آشفتگی یا تنش‌های رینولدز در اثر نوسانات سرعت است.

در معادلات بقاء مومنتوم، مقادیر نوسانی به شکل مجهول جدید و با عنوان تنش‌های رینولدز در معادلات شرکت می‌کنند که اثرات آن‌ها باید توسط مدل‌های آشفتگی تعیین شوند. یکی از مدل‌های آشفتگی معروف مدل آشفتگی  $k-\omega$  SST است که به سبب دقت مناسب در شبیه‌سازی لایه مرزی به علت وجود دیواره‌های زیاد در مدل و همچنین پیش‌بینی جدایش جریان انتخاب شده و با معادلات کمکی زیر معرفی می‌شود [15].

انرژی جنبشی آشفتگی:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \times (\rho k u) = \nabla \times (\Gamma_k \nabla k) + \tilde{G}_k - Y_k + S_k \quad (3)$$

نرخ انتشار آشفتگی:

<sup>1</sup> Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS)

<sup>2</sup> ANSYS

<sup>3</sup> FLUENT

<sup>4</sup> Finite Volume

<sup>5</sup> K-omega SST turbulence model

<sup>6</sup> Second Order Upwind

<sup>7</sup> Simple

0.00001 اعمال شده است.

### 2-5- شبکه بندی و بررسی حل مستقل از شبکه

در این مطالعه با توجه به پیچیدگی مسئله و همچنین جزئیات و گوشه های 90 درجه در هندسه از شبکه ساختارمند استفاده شده است. نرم افزار مورد استفاده برای شبکه بندی با نام آی سی آی ام<sup>9</sup> از مجموعه انسیس 16 انتخاب شده است.

برای بررسی استقلال حل از شبکه، انجام حل برای چهار شبکه با تعداد 3,500,000، 5,300,000، 7,300,000 و 10,000,000 سلول تکرار شده است. انتخاب تعداد سلول های شبکه ها براساس بررسی نحوه تغییر نتایج در مناطق دارای گرادبان های شدید و در صورت لزوم تراکم سازی شبکه در این نقاط صورت گرفته است. سپس سرعت در راستای محور قائم بر روی خطی در مرکز کانال C2 (شکل 4) در زاویه حمله صفر درجه، از نرم افزار استخراج شده است. با توجه به شکل نمودار به ازای تغییر تعداد شبکه از 7,300,000 به 10,000,000 تغییر چندانی در مقادیر دیده نمی شود، لذا شبکه با تعداد سلول 7,300,000 به عنوان شبکه مناسب برای انجام محاسبات انتخاب می شود.

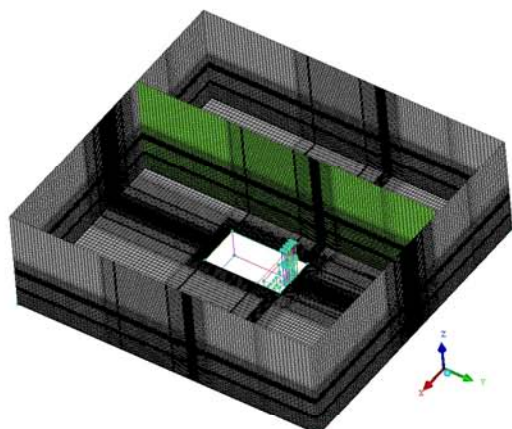


Fig. 3 structured grid for computational domain

شکل 3 شبکه بندی ساختارمند برای فضای محاسباتی

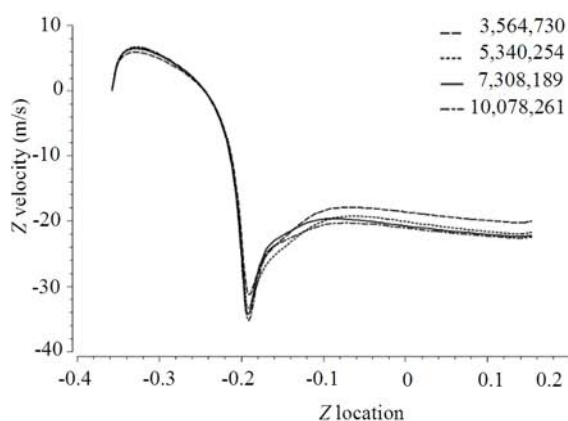


Fig. 4 investigation of solution independency from grid

شکل 4 بررسی حل مستقل از شبکه

در شبکه بندی تلاش شده تا در نزدیکی مرزها و دیوارها با ایجاد 10 لایه

جدول 1 مشخصات موقعیت و ابعاد بخش های مختلف هندسه

Table 1 location and dimensions of the different parts of the geometry

اجزاء	ابعاد (L×W×H)	توضیحات
بادگیر	12×5×51 (cm)	-
کانال ها	2.2×4×35.2 (cm)	شروع کانال تا دریچه ورودی
بازشوهای ورودی (منفرد)	15.8×2.2 (cm)	دریچه های شمال شرقی و جنوب غربی
بازشوهای ورودی (دوتایی)	15.8×4 (cm)	دریچه های شمال غربی و جنوب شرقی
اتاقک زیر بادگیر	12.1×6.5×8.6 (cm)	از یک جداره متصل به تالار
تالار	21.7×15.8×19.4 (cm)	دارای جداره های باز رو به حیاط
حیاط	52×39×27 (cm)	دارای جداره های باز در کف محدوده محاسباتی

### 2-4- شرایط مرزی

از آن جا که در این مطالعه به منظور افزایش دقت و کیفیت نتایج از مدلی با مقیاس 1:25 استفاده شده، برای تشابه عدد بی بعد رینولدز<sup>1</sup>، در شرط مرزی ورودی سرعت<sup>2</sup>، سرعتی معادل 25.5 متر بر ثانیه اعمال شده است که معادل 3.6 کیلومتر بر ساعت در مقیاس واقعی است، هر چند ثابت شده است که در هندسه های تیز گوشه و زاویه دار به علت جدایش جریان از گوشه های تیز رفتار هیدرودینامیکی و الگوی جریان به عدد رینولدز وابسته نیست [16]. در مرز ورودی سرعت، برای فشار میانگین شرط گرادبان صفر و شدت آشفتگی<sup>3</sup> مطابق با شرایط آزمایش تونل باد، 0.28 درصد منظور شده است. در مرز خروجی فشار<sup>4</sup>، فشار استاتیک متوسط برابر با فشار اتمسفریک، و مشخصه های آشفتگی جریان برگشتی نیز مانند شرایط ورودی سرعت اعمال شده است.

برای دیوارهای جانبی دامنه محاسباتی، شرط لغزش<sup>5</sup> و برای تمامی

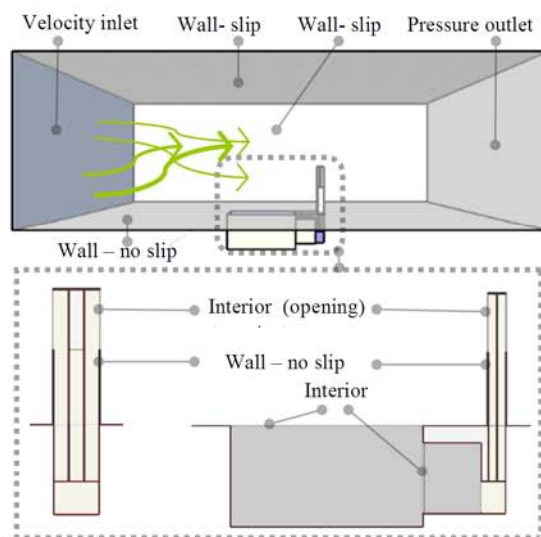


Fig. 2 boundary conditions

شکل 2 شرایط مرزی

دیوارها در مدل شرط عدم لغزش<sup>5</sup> با ضریب زبری<sup>6</sup> 0.5<sup>7</sup> و ارتفاع زبری<sup>8</sup>

<sup>1</sup> Reynolds

<sup>2</sup> Velocity inlet

<sup>3</sup> Turbulence intensity (I)

<sup>4</sup> Pressure outlet

<sup>5</sup> Slip

<sup>6</sup> No-slip

<sup>7</sup> Roughness constant

<sup>8</sup> Roughness height

<sup>9</sup> ICEM

زوایایی مانند زاویه حمله 45 درجه که جریان به طور مایل به بادگیر برخورد می کند، شکل جریان در کانال ها به در بدو ورود به صورت گردابه ای با سرعت چرخش بالا است که رفته رفته از سرعت آن کاسته می شود. در این شرایط اندازه گیری فشار توسط لوله پیتوت خطا ایجاد می کند. ایجاد این خطا از آن جهت است که لوله پیتوت تنها زمانی فشار کل را کاملاً دریافت می کند که راستای جریان بر دهانه آن عمود باشد [12].

#### 4- پارامترهای مورد بررسی

سازوکار بادگیر چهار طرفه بدین صورت است که هنگام وزش باد در اثر اعمال فشار مثبت بر سطوح رو به باد، میان دهانه بازشوهای بادگیر (مثلاً C2 در شکل 9) و دریچه های منتهی به اتاق اختلاف فشار ایجاد می شود، در نتیجه

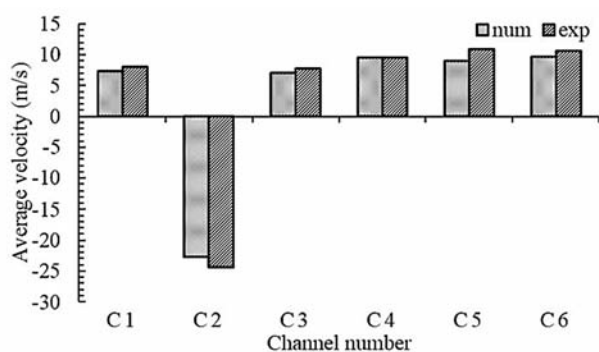


Fig. 6 Comparison of current study and experiment results in zero wind incident angel

شکل 6 مقایسه نتایج مطالعه حاضر و نتایج تجربی در زاویه حمله صفر

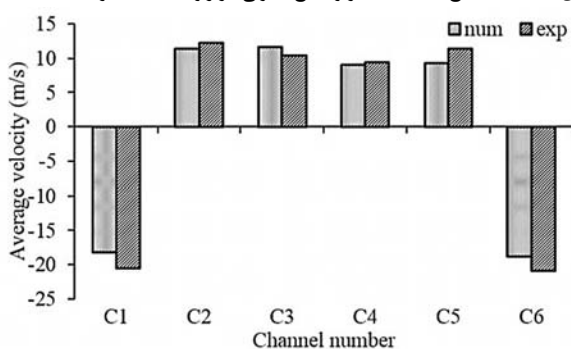


Fig. 7 Comparison of current study and experiment results in 90° wind incident angel

شکل 7 مقایسه نتایج مطالعه حاضر و نتایج تجربی در زاویه حمله 90°

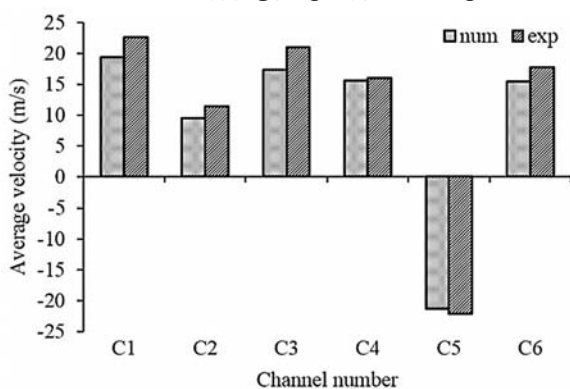


Fig. 8 Comparison of current study and experiment results in 180° wind incident angel

شکل 8 مقایسه نتایج مطالعه حاضر و نتایج تجربی در زاویه حمله 180°

سلول با ضریب رشد 1.2 تا حد امکان لایه مرزی پوشش داده شود. مقدار وای پلاس دیواره<sup>1</sup> در تمامی محاسبات کمتر از 5 به دست آمده که نشانگر انتخاب مناسب اندازه سلول های نزدیک جداره در ارتباط با مدل آشفتگی  $k-\omega$  SST است.

#### 3- صحت سنجی نتایج

در این مطالعه برای صحت سنجی نتایج شبیه سازی از نتایج آزمایش تجربی تونل باد که در زوایای مختلف حمله با فواصل 15 درجه صورت گرفته، استفاده شده است. از میان این زوایا، تناظر نتایج عددی و تجربی برای سه زاویه 0، 90 و 180 صورت گرفته است. مطابق "شکل 5" برای ارزیابی تجربی عملکرد بادگیر در مقطع تمامی کانال های مدل بادگیر، فشار کل در سه نقطه و فشار استاتیک در یک نقطه به طور هم زمان اندازه گیری شده، سپس توسط رابطه (5) سرعت جریان در نقاط مذکور به دست آمده و در انتها میانگین سه سرعت محاسبه شده است. از آن جا که جهت جریان در کانال های بادگیر در اثر تغییر زاویه حمله تغییر می کند، اندازه گیری سرعت با در نظر گرفتن لوله پیتوت های نصب شده در بالا و پایین هر کانال (شکل 5) با جهات مخالف صورت گرفته تا جریان در هر جهتی پس از یکنواخت شدن نسبی در کانال اندازه گیری شود.

$$p - p_s = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (5)$$

در "شکل های 6، 7 و 8" مقادیر سرعت متوسط اندازه گیری شده در کانال های شش گانه بادگیر در آزمایش تونل باد و مطالعه عددی ارائه شده اند. بیشترین میزان اختلاف بین مقادیر حاصل از شبیه سازی عددی و نتایج تجربی 17.7 درصد است که در زاویه حمله 45 درجه دیده می شود. علت این

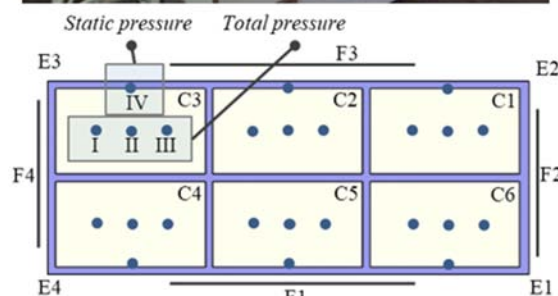


Fig. 5 location of pitots and statics in all windcatcher channels

شکل 5 موقعیت نقاط اندازه گیری فشار کل و استاتیک در کانال های بادگیر اختلاف را می توان حساسیت لوله پیتوت به راستای حرکت جریان دانست. در

<sup>1</sup> Wall y plus

از زوایای حمله و همچنین اجزای هندسه از جمله وجوه بادگیر، لبه‌ها یا یال‌ها، کانال‌ها و دریچه‌های ورودی آن‌ها در "شکل 9" شماره‌گذاری شده‌اند که در بیان نتایج به آن‌ها ارجاع داده می‌شود.

از آن‌جا که مطالعه عددی در سیزده زاویه حمله انجام شده است، به منظور پرهیز از شکل‌ها و کانتورهای زیاد، تنها برخی از زوایای حمله انتخاب و کانتورهای مربوط به آن‌ها ارائه شده‌اند.

در کلیه کانتورهای ارائه شده، با میل به رنگ تیره سرعت در جهت منفی محور قائم افزایش می‌یابد که نشانگر دمشی بودن کانال (حرکت جریان از بادگیر به بنا)، و با میل به رنگ روشن سرعت در راستای مثبت محور قائم افزایش می‌یابد که نشانگر مکشی بودن کانال (هدایت جریان به بیرون ساختمان) است. در میان این طیف رنگ خاکستری نشان‌دهنده سرعت صفر است.

"شکل 10" نمودار کلی عملکرد بادگیر را در زوایای حمله 0 تا 180 درجه با فواصل 15 درجه‌ای نشان می‌دهد. در این نمودار محور افقی نشانگر زوایای حمله و محور قائم شامل دبی کانال‌های بادگیر است. به ازای هر زاویه حمله شش میله که نشانگر رفتار کانال‌های بادگیر در آن زاویه است، به ترتیب از چپ به راست از کانال C1 تا C6، ارائه شده‌اند. تمام نمودارهای میله‌ای با مقادیر مثبت، نشان‌دهنده دبی هوای مکش شده و تمامی مقادیر منفی نشانگر دبی جریان دمیده شده به بنا توسط بادگیر هستند. بر طبق این نمودار می‌توان عملکرد بادگیر را در گروه‌های زیر دسته‌بندی کرد:

#### 5-1- زوایای صفر، 15 و 30 درجه

در این سه زاویه رفتار بادگیر تقریباً مشابه است، به طوری که یک کانال به صورت دمشی و پنج کانال به صورت مکشی عمل می‌کنند. مطابق "شکل 11" جریان پس از برخورد به وجه F3 (وجه رو به باد در زاویه حمله صفر) با اعمال فشار بر دهانه بازشوی کانال C2 از لبه پایینی آن جدا می‌شود و سپس افزایش سرعت داده و به سمت پایین هدایت می‌شود. این جدایش که در تمامی زوایا در لبه پایینی کانال‌های ورودی اتفاق می‌افتد، قبلاً در مطالعه تجربی بادگیرهای یک‌طرفه توسط دهقان و همکاران مشاهده شده است [9]. در هنگام برخورد جریان به بادگیر در زاویه حمله صفر، توزیع فشار به گونه‌ای است که وجه رو به باد دارای ضریب فشار مثبت و دو وجه جانبی و وجه پشت به باد دارای ضریب فشار منفی می‌شوند [2]. جریان از دو لبه E2 و E3 جدا شده و با ایجاد نواحی فشار منفی باعث خروج هوا از کانال‌های C1، C3، C4 و C6 که در دو وجه جانبی F2 و F4 قرار دارند، می‌شود. در وجه پشت به باد (F1) نیز فشار منفی باعث خروج جریان از کانال C5 می‌شود.

با توجه به آن‌که ضریب فشار سطوح عامل اساسی در تعیین جهت حرکت جریان از بادگیر به اتاق و یا برعکس است، و از آن‌جا که تالار در این زوایا پشت به باد و در ناحیه فشار منفی قرار دارد، انتظار می‌رود جهت جریان از بادگیر به تالار باشد، اما مشاهده می‌شود جریان در حالت برآیند به سمت بادگیر حرکت می‌کند. دلیل این امر وجود 5 کانال مکشی است که در نهایت جریان را به سمت بادگیر می‌کشاند. عملکرد مکشی بادگیر در زاویه حمله صفر در آزمایش عددی و تجربی انجام شده توسط کالوتیت و هاگز [7] نیز استنتاج شده است.

با میل از زاویه صفر به 30 درجه، با کاهش ضریب فشار وجه رو به باد و همچنین تمایل جریان به چرخش گردابه‌ای در کانال ورودی، دبی جریان ورودی کاهش می‌یابد که چنین رفتاری در تحقیقات پیشین نیز مشاهده شده است [7، 14].

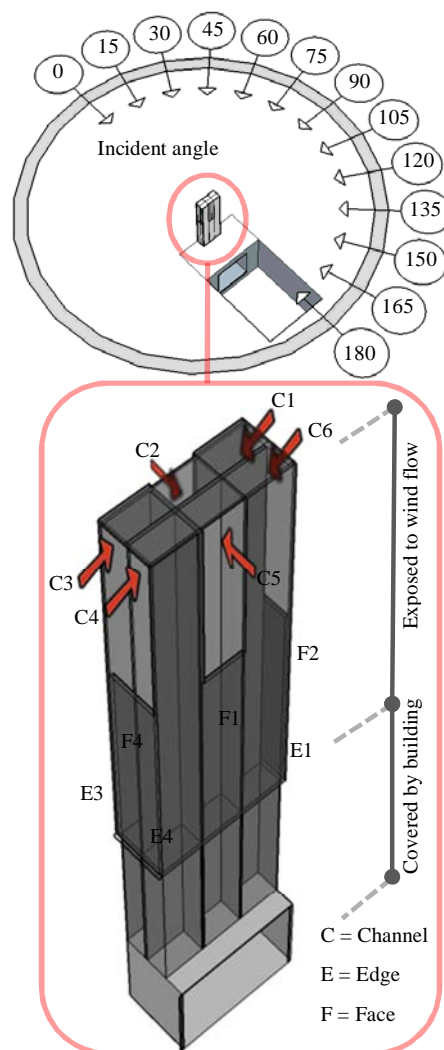


Fig. 9 wind incident angles and naming windcatcher details

شکل 9 زوایای حمله و نام‌گذاری جزئیات بادگیر

جریان به سمت اتاق حرکت می‌کند. همچنین در دهانه‌های جانبی و پشت به باد، با شکل‌گیری ناحیه کم‌فشار، جریان از اتاق به سمت بادگیر کشیده می‌شود [2]. به منظور بررسی عملکرد بادگیر در اثر تغییر زاویه حمله (متغیر مستقل تحقیق) دبی و جهت جریان به عنوان متغیرهای وابسته در هر یک از کانال‌های بادگیر در زوایای مختلف برخورد از نرم‌افزار استخراج شده است. لازم به ذکر است علی‌رغم توافق نزدیک مقادیر آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی، تحقیق حاضر تأکید خود را به جای کمیت مقادیر متوجه تغییرات آن‌ها در زوایای مختلف حمله می‌سازد. این مهم در ارزیابی عملکرد بادگیر به عنوان یک عنصر دمش باد و یا مکش آن، نقشی اساسی ایفا می‌کند. برای سنجش کارایی بادگیر در هر زاویه حمله نسبت دبی خروجی کل به دبی ورودی کل محاسبه شده است. بدیهی است که برای مقدار بزرگ‌تر از یک بادگیر به صورت مکشی و برای مقدار کوچک‌تر از یک بادگیر به صورت دمشی و برای مقادیر نزدیک به یک بادگیر با میزان برابر ورود و خروج هوا در نقش تعویض‌کننده هوا عمل می‌کند.

#### 5- نتایج

در این بخش از مطالعه جزئیات و نتایج شبیه‌سازی عددی رفتار بادگیر در زوایای مختلف برخورد ارائه می‌شود. به منظور سهولت در ارائه نتایج، هر یک

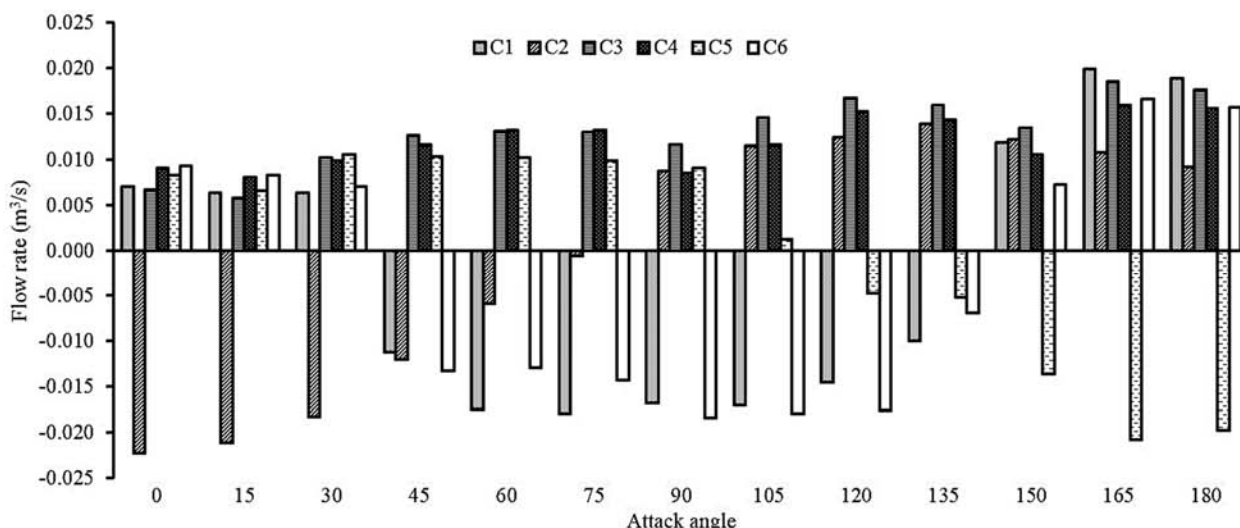


Fig. 10 Comparison of extract and total supply flow rate of windcatcher channels in all wind incident angles

شکل 10 مقایسه دبی خروجی و ورودی کانال‌های بادگیر در تمام زوایای حمله باد

پایین شکل برشی افقی از قسمت تحتانی بازشوهای بادگیر (خط چین روی مقاطع) ارائه شده است.

### 5-2- زوایای 45 و 60 درجه

رفتار جریان در این دو زاویه مشابه است. عملکرد بادگیر از زاویه 30 به 45 درجه دچار تغییر اساسی می‌شود. جریان از یال‌های E1 و E3 جدا شده و وجوه F2 و F3 را تحت فشار مثبت و وجوه F1 و F4 را تحت فشار منفی قرار می‌دهد. بدین‌صورت سه کانال C1، C2 و C6 در وجوه رو به باد به‌صورت دمشی و سه کانال C3، C4 و C5 در وجوه پشت به باد به‌صورت مکشی عمل می‌کنند. همان‌گونه که در مطالعات پیشین اشاره شده [7]، در زاویه 45 درجه بادگیر با سطح مقطع راست‌گوشه با بیشترین سطح در معرض جریان قرار می‌گیرد، لذا اختلاف فشار در دو سوی بازشوهای بادگیر افزایش می‌یابد و در نتیجه نسبت به زاویه قبلی در دبی دمشی بادگیر افزایش چشمگیری مشاهده می‌شود. علاوه بر این مطابق "شکل 10" در این زاویه بادگیر دارای کمترین دبی مکشی است، لذا بادگیر در زاویه 45 درجه دارای بیشترین کارایی از لحاظ دمش هوا به فضای داخل است که این مهم توسط کالوتیت و هاگز [7] نیز استنتاج شده است. در این زاویه دبی جریان ورودی دو برابر میزان معادل برای زاویه 30 درجه است و تنها در این زاویه است که میزان دمش بادگیر در حالت برآیند 6% بیشتر از مکش آن است. به‌طور کلی در بازه زوایای 45 تا 105 درجه، قابلیت دمشی بادگیر افزایش می‌یابد و نسبت مکش به دمش هوا به عدد یک نزدیک می‌شود و بادگیر در نقش تعویض‌کننده هوا عمل می‌کند (شکل 10).

در این دو زاویه دهانه تالار همچنان در جبهه پشت به باد حیاط قرار دارد و دارای ضریب فشار منفی است که چنین شرایطی عملکرد دمشی بادگیر را تقویت می‌کند.

### 5-3- زوایای 75، 90 و 105 درجه

مطابق "شکل 12" در زاویه 90 درجه دو کانال C1 و C6 به‌صورت ورودی و کانال‌های C2 و C3، C4 و C5 به‌صورت خروجی عمل می‌کنند. رفتار جریان در مورد دو زاویه دیگر مشابه زاویه 90 درجه است، با این تفاوت که در زاویه 75 درجه کانال C2 و در زاویه 105 درجه کانال C5 به‌علت قرارگیری بازشوی

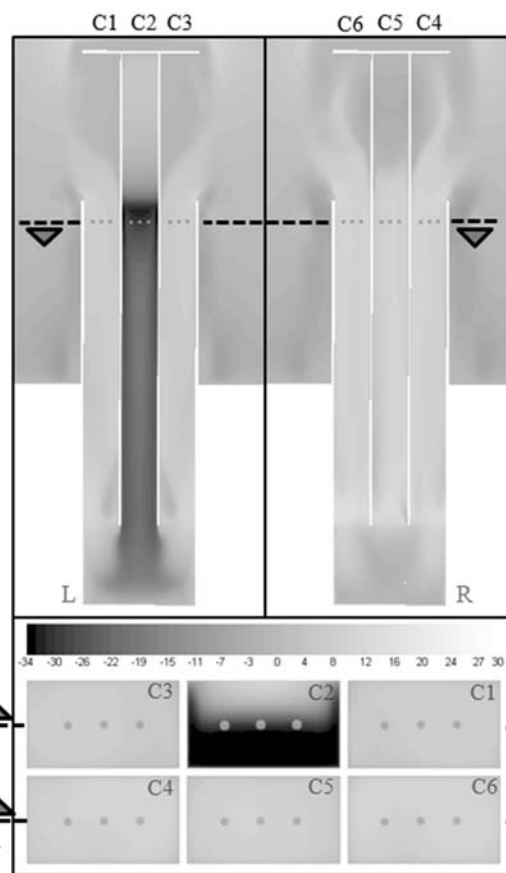


Fig. 11 Contour of z velocity (m/s) in cross sections of windcatcher at zero wind incident angle

شکل 11 کانتور سرعت (m/s) در راستای محور قائم در مقاطع طولی بادگیر برای زاویه حمله صفر

"شکل 11" نشان‌دهنده کانتورهای سرعت در راستای محور قائم برای مقاطع عمودی و افقی بادگیر در زاویه حمله صفر است که جزئیات جریان در داخل بادگیر، عملکرد مکشی یا دمشی بودن کانال‌ها و همچنین نقاط اندازه‌گیری سرعت در آزمایش تجربی را در محل ارائه کانتورها (به‌صورت نقاط کم‌رنگ) نشان می‌دهد. در قسمت بالای "شکل 11" دو برش عمودی و در قسمت

در این دو زاویه سه کانال به صورت دمشی و سه کانال به صورت مکشی عمل می‌کنند. در این زوایا جریان دو وجه F1 و F2 را تحت فشار مثبت قرار می‌دهد، سپس از دو یال E2 و E4 جدا شده و دو وجه F3 و F4 را تحت مکش قرار می‌دهد. لذا کانال‌های C1، C5 و C6 به صورت دمشی و کانال‌های C2، C3 و C4 به صورت مکشی عمل می‌کنند (شکل 10).

زوایای 120 و 135 درجه از نظر شکل جریان در اطراف بادگیر به ترتیب قرینه زوایای 60 و 45 درجه هستند. با مقایسه نظیر به نظیر این زوایا در "شکل 10" مشخص می‌شود تفاوت آشکار در این‌جا افزایش دبی کانال‌های خروجی و کاهش دبی کانال‌های ورودی بادگیر است که به علت اعمال فشار مثبت بر دهانه تالار رخ می‌دهد. لذا مشخص می‌شود که ضریب فشار سطوح و بازشوهای بنا در هنگام برخورد باد تا چه اندازه در عملکرد بادگیر و همچنین جهت جریان از بادگیر به بنا و بالعکس مؤثر است [1]. در این دو زاویه بادگیر در حالت برآیند در نقش مکشی عمل می‌کند.

#### 5-5- زوایای 150، 165 و 180 درجه

در این زوایا نسبت به دو زاویه قبل، تغییری عمده صورت می‌گیرد و آن تغییر جهت جریان در کانال‌های C1 و C6 است که از حالت دمشی به مکشی تغییر می‌کنند (شکل 10). علت این امر تغییر مکان جدایش جریان از یال E2 به E1 و در نتیجه تحت مکش قرار گرفتن وجه F2 است. جریان در این زوایا وجه F1 را تحت فشار مثبت قرار می‌دهد، سپس از دو یال E1 و E4 جدا شده و سه وجه دیگر بادگیر را تحت فشار منفی قرار می‌دهد. بنابراین تنها کانال ورودی کانال C5 است و بقیه کانال‌ها به صورت خروجی عمل می‌کنند (شکل 13). در واقع این سه زاویه قرینه زوایای 0 تا 30 درجه هستند، با این تفاوت که با اعمال فشار مثبت به دهانه تالار در بازه 150 تا 180 درجه عملکرد بادگیر به کلی دگرگون می‌شود. دهانه تالار در جداره رو به باد حیاط قرار می‌گیرد و جریان مستقیماً وارد تالار می‌شود. با افزایش فشار بر دهانه تالار و متعاقب آن افزایش فشار بر بازشوی اتاقک بادگیر، اختلاف فشار در دو سوی کانال ورودی C5 کاهش می‌یابد و باعث کاهش دبی این کانال می‌شود. در مقابل در دو سوی کانال‌های مکشی اختلاف فشار فزونی می‌یابد و باعث افزایش چشمگیر دبی این کانال‌ها می‌شود (شکل 10). با کاهش دبی ورودی و افزایش دبی خروجی در این زوایا نسبت مکش به دمش بادگیر به عدد 4 نزدیک می‌شود. در این سه زاویه، در نتیجه اعمال فشار مثبت به دهانه تالار پدیده "مسیر میان‌بر" رخ می‌دهد. لذا هیچ جریانی از سمت بادگیر به بنا وارد نمی‌شود و جریان کانال C5 نیز به محض ورود از کانال‌های دیگر خارج می‌شود، بنابراین جهت کلی جریان از سمت حیاط به تالار و بادگیر است.

#### 6- جمع بندی

برای ارزیابی عملکرد مکشی - دمشی بادگیر چهارجهته در هر یک از زوایای حمله لازم است میزان مکش و دمش بادگیر در حالت برآیند محاسبه شود. در "شکل 14" هر یک از نقاط روی منحنی با مقادیر مثبت نشانگر مجموع دبی کانال‌های مکشی و نقاط منحنی دارای مقادیر منفی نشانگر مجموع دبی کانال‌های دمشی برای هر زاویه حمله (محور افقی) هستند. با محاسبه نسبت مکش به دمش بادگیر برای هر زاویه می‌توان عملکرد بادگیر را در دسته‌بندی زیر خلاصه کرد:

الف) در زوایای صفر، 15 و 30 درجه نسبت دبی مکش به دمش هوا توسط بادگیر به ترتیب 1.81، 1.66 و 2.42 است که می‌توان در این زوایا بادگیر را در حالت برآیند، دارای کارکرد مکشی دانست.

آن‌ها در زاویه بسته نسبت به راستای جریان، تنها دارای چرخش گردابه‌ای در دهانه ورودی کانال هستند و دبی آن‌ها تقریباً صفر است (شکل 10). در زاویه 90 درجه بادگیر با وجه کم‌عرض خود (وجه F2) در معرض جریان قرار می‌گیرد. جریان از یال E1 و E2 جدا شده و دو وجه F1 و F3 را تحت مکش قرار می‌دهد و وجه F4 پشت به جریان قرار می‌گیرد. در این زاویه درحالی‌که مشابه زاویه حمله صفر، جریان به‌طور عمود به وجه بادگیر برخورد می‌کند، یک عامل باعث تفاوت عمده در رفتار بادگیر می‌شود و آن وجود دو کانال در وجه رو به باد (F2) است. درحالی‌که به علت مساحت کمتر وجه رو به باد و ضریب فشار کمتر، دبی هر کدام از کانال‌های دمشی در مقایسه با دبی تک کانال دمشی در زاویه حمله صفر کمتر است، اما مجموع دبی دو کانال دمشی 1.6 برابر مقدار مشابه برای زاویه حمله صفر می‌شود. اندازه قابل توجه دبی دمشی کل در زاویه حمله 90 درجه و برابری آن با دبی مکشی کل باعث می‌شود بادگیر در نقش تعویض‌کننده هوا عمل کند (شکل 10).

از نظر شکل جریان در اطراف بادگیر، زوایای 105 و 75 درجه قرینه و مشابه یکدیگرند. تفاوت این دو زاویه در این است که در زاویه 75 و 105 دهانه تالار به ترتیب تحت فشار منفی و مثبت است. این مهم باعث می‌شود در زاویه 105 درجه دبی خروجی کانال‌های C2، C3 و C4 نسبت به زاویه قبل افزایش یابد (شکل 10). در زوایای 75 و 90 درجه، بر دهانه تالار فشار مثبتی اعمال نمی‌شود، لذا تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر میزان دبی کانال‌های خروجی نمی‌گذارد.

#### 5-4- زوایای 120 و 135 درجه

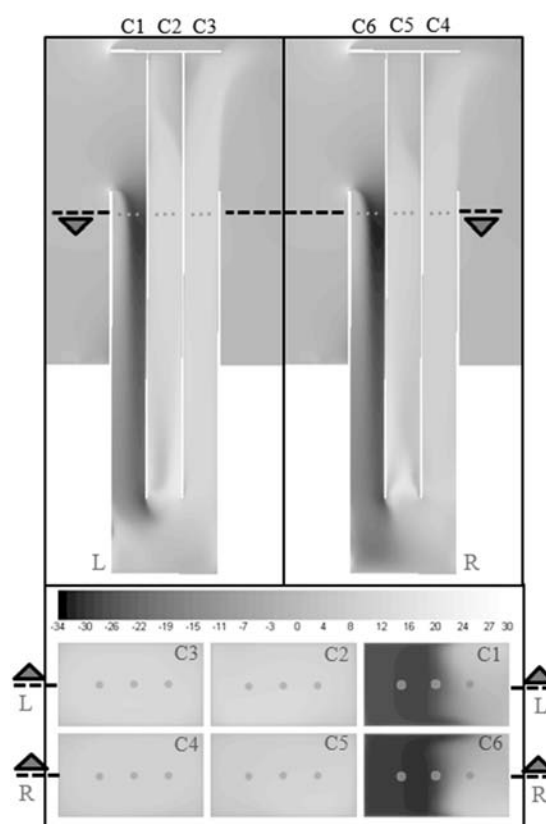


Fig. 12 Contour of z velocity (m/s) in cross sections of windcatcher at 90° wind incident angle

شکل 12 کانتور سرعت (m/s) در راستای محور قائم در مقاطع طولی بادگیر برای زاویه حمله 90 درجه



د) در زوایای 120 و 135 درجه نسبت دبی مکش به دمش هوا توسط بادگیر به ترتیب 1.20 و 2.00 است که می‌توان در این زوایا بادگیر را در حالت برآیند، دارای کارکرد مکشی دانست. تأثیر فشار مثبت تالار بر افزایش مکش کانال‌های بادگیر از زاویه 120 درجه به بعد مشهود است.

ه) در زوایای 150، 165 و 180 درجه بادگیر علاوه بر مکش، از جانب تالار تحت فشار مثبت قرار گرفته به طوری که جریانی از بادگیر وارد بنا نمی‌شود. نسبت دبی مکش به دمش هوا توسط بادگیر در این زوایا به ترتیب 4.07، 3.92 و 3.90 است که می‌توان در این زوایا بادگیر را در حالت برآیند، دارای کارکرد مکشی دانست.

### 7- نتیجه‌گیری

در این مطالعه رفتار بادگیر چهارجهته متصل به تالار و حیاط مرکزی در یک بنای موجود و در حال استفاده در کویر مرکزی ایران در قالب تحلیل عددی با متغیر زاویه حمله مورد بررسی قرار گرفته است. هدف آن شناخت رفتار بادگیرهای چهارجهته از نظر میزان مکش و دمش هوا و نحوه استفاده از آنها به عنوان راهکار پاسخ‌ده بومی در زمینه سرمایه‌گذاری طبیعی ساختمان است تا در کاربرد نوین راهنمای مهندسان باشد. به منظور سهولت در انجام شبیه‌سازی و همچنین حصول نتایج دقیق‌تر از مدلی با مقیاس 1:25 استفاده شده و جهت مشابه‌سازی در مرتبه عدد رینولدز سرعت ثابت 25.5 متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. شبکه مورد استفاده از نوع ساختارمند است و برای حل معادلات از مجموعه انسیس با حلگر فلونت استفاده شده است. اعتبارسنجی نتایج مدل‌سازی عددی توسط آزمایش تجربی انجام شده بر روی همین مدل با مقیاس یکسان، صورت گرفته و توافق نزدیک میان آن‌ها مشاهده شده است. جهت ارزیابی عملکرد بادگیر، دبی و جهت جریان در هر کانال در زوایای مختلف حمله از نرم‌افزار استخراج شده است. نتایج مطالعه حاضر را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

1- این مطالعه نشان می‌دهد در یک خانه متشکل از بادگیر چهارجهته، تالار و حیاط مرکزی، نسبت دبی جریان خارج شده از ساختمان توسط بادگیر به دبی جریان وارد شده به آن در 61.5 درصد زوایای حمله (8 زاویه از 13 زاویه) بیشتر از یک و در بقیه موارد تقریباً یک است. بدان مفهوم که بادگیر بیشتر به صورت مکند هوا و در مرتبه بعد به عنوان تعویض‌کننده هوا عمل می‌کند.

2- در حالت برآیند، از زاویه 0 تا 30 درجه بادگیر بیشتر مکش می‌کند، از زاویه 45 تا 105 درجه بادگیر با نسبت تقریباً برابر دفع به جذب باد در نقش تعویض‌کننده هوا عمل می‌کند و از زاویه 120 تا 180 درجه بادگیر علاوه بر مکش، از سوی حیاط و تالار تحت فشار مثبت قرار گرفته به طوری که جریانی از آن وارد بنا نمی‌شود. بر این اساس می‌توان خارج از بحث پدیده شناوری، استفاده از بادگیرهای چهارجهته در کویر ایران را بیشتر برای دفع حرارت ساختمان و کمتر برای جذب هوای خنک محیط دانست.

3- نسبت دبی مکش به دمش بادگیر در زاویه 45 و 150 درجه به ترتیب کمینه و بیشینه است؛ بدین مفهوم که بادگیر در زاویه 45 و 150 درجه به ترتیب از لحاظ دمش و مکش کارا تر است.

4- نتایج نشان می‌دهد ضریب فشار سطوح بنا و بازشوها در عملکرد بادگیر تأثیر بسزایی دارد. بر این اساس این مطالعه بر لزوم بررسی عملکرد بادگیر در ارتباط با ویژگی‌های ساختار و زمینه‌ای که از آن بهره‌برداری می‌شود مانند بافت شهری، فرم ساختمان، وجود حیاط مرکزی، تالار و بازشوها و جهت‌گیری بنا تأکید دارد، لذا از دیدگاه تحقیق حاضر در مطالعه عددی بادگیر اعمال شرط مرزی خروجی فشار برای بازشوها که در برخی از مطالعات

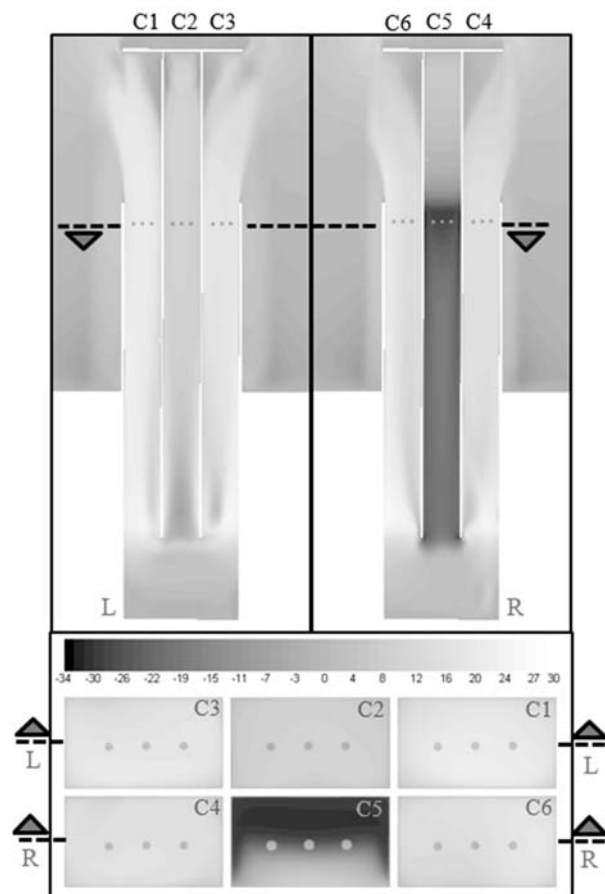


Fig. 13 Contour of z velocity (m/s) in cross sections of windcatcher at 180° wind incident angel

شکل 13 کانتور سرعت (m/s) در راستای محور قائم در مقاطع طولی بادگیر برای زاویه حمله 180 درجه

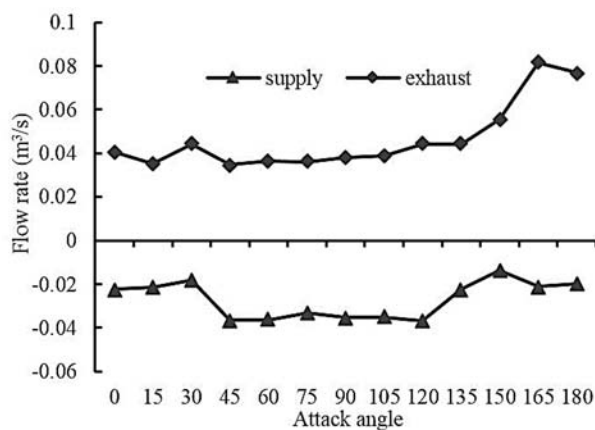


Fig. 14 comparison of total extract and total supply flow rate of windcatcher in all wind incident angles

شکل 14 مقایسه دبی کلی خروجی و ورودی بادگیر در تمام زوایای حمله باد

ب) در زوایای 45 و 60 درجه نسبت دبی مکش به دمش هوا توسط بادگیر به ترتیب 0.94 و 1.00 است که می‌توان در این زوایا بادگیر یک عنصر تعویض‌کننده هوا قلمداد کرد.

ج) در زوایای 75، 90 و 105 درجه نسبت دبی مکش به دمش هوا توسط بادگیر به ترتیب 1.09، 1.07 و 1.11 است که می‌توان در این زوایا بادگیر را دارای نقش تعویض‌کنندگی هوا دانست.

صنعتی امیرکبیر، آقای مهندس علیرضا موحدی دانشجوی دکتری مکانیک دانشگاه بزد از بابت همکاری در مطالعه تجربی و خانم مرضیه زینلی فهادان به خاطر مساعدت در برداشت جزئیات مدل، تشکر و امتنان به عمل آید.

### 10- مراجع

- [1] C. Karakatsanis, M. N. Bahadori, B. J. Vickery, Evaluation of pressure coefficients and estimation of air flow rates in buildings employing wind towers, *Solar Energy*, Vol. 37, No. 5, pp. 363-374, 1986.
- [2] M. N. Bahadori, A. Dehghani-sanij, A. Sayigh, *Wind Towers: Architecture, Climate and Sustainability*, pp. 1-17, Switzerland; London: Springer International Publishing, 2014.
- [3] B. R. Hughes, H. N. Chaudhry, S. A. Ghani, A review of sustainable cooling technologies in buildings, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No. 6, pp. 3112-3120, 2011.
- [4] M. Kolokotroni, A. Ayiomamitis, Y. Ge, The suitability of wind driven natural ventilation towers for modern offices in the UK: a case-study, *World Renewable Energy Congress VII (WREC)*, 2002.
- [5] A. A. Elmualim, Verification of design calculations of a wind catcher/tower natural ventilation system with performance testing in a real building, *International Journal of Ventilation*, Vol. 4, No. 4, pp. 393-404, 2006.
- [6] J. K. Calautit, B. R. Hughes, Wind tunnel and CFD study of the natural ventilation performance of a commercial multi-directional wind tower, *Building and Environment*, Vol. 80, No. 0, pp. 71-83, 2014.
- [7] J. K. Calautit, B. R. Hughes, Measurement and prediction of the indoor airflow in a room ventilated with a commercial wind tower, *Energy and Buildings*, Vol. 84, No. 0, pp. 367-377, 2014.
- [8] M. V. Cruz-Salas, J. A. Castillo, G. Huelsz, Experimental study on natural ventilation of a room with a windward window and different windexchangers, *Energy and Buildings*, Vol. 84, No. 0, pp. 458-465, 2014.
- [9] A. A. Dehghan, M. K. Esfeh, M. D. Manshadi, Natural ventilation characteristics of one-sided wind catchers: experimental and analytical evaluation, *Energy and Buildings*, Vol. 61, No. 0, pp. 366-377, 2013.
- [10] M. K. Esfeh, A. A. Dehghan, M. D. Manshadi, Experimental investigation of upstream structure on the ventilation performance of one-sided wind-catchers, *Tarbiat Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 1, pp. 49-60, 2013. (in persian)
- [11] H. Montazeri, F. Montazeri, R. Azizian, S. Mostafavi, Two-sided wind catcher performance evaluation using experimental, numerical and analytical modeling, *Renewable Energy*, Vol. 35, No. 7, pp. 1424-1435, 2010.
- [12] H. Montazeri, Experimental and numerical study on natural ventilation performance of various multi-opening wind catchers, *Building and Environment*, Vol. 46, No. 2, pp. 370-378, 2011.
- [13] Y. Su, S. B. Riffat, Y.-L. Lin, N. Khan, Experimental and CFD study of ventilation flow rate of a Monodraught™ windcatcher, *Energy and Buildings*, Vol. 40, No. 6, pp. 1110-1116, 2008.
- [14] A. A. Elmualim, H. B. Awbi, Wind Tunnel and CFD Investigation of the Performance of "Windcatcher" Ventilation Systems, *International Journal of Ventilation*, Vol. 1, No. 1, pp. 53-64, 2002.
- [15] F. Inc. FLUENT 6.3 User's Guide, Accessed on 14 may 2016; <https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/pdf/ug/flug.pdf>.
- [16] H. Montazeri, R. Azizian, Experimental study on natural ventilation performance of one-sided wind catcher, *Building and Environment*, Vol. 43, No. 12, pp. 2193-2202, 2008.

صورت گرفته، نتایجی متفاوت از آنچه در واقعیت رخ می‌دهد را به دست می‌دهد.

5- این مطالعه با اشاره به نقش مکشی بادگیر بر لزوم شناخت دقیق رفتار بادگیر پیش از ترکیب آن با تجهیزات سرمایشی تأکید دارد، چراکه در شرایطی که بادگیر دارای عملکرد مکشی است استفاده از تجهیزات سرمایشی در کانال‌ها تنها به اتلاف انرژی منجر می‌شود. از سوی دیگر مطالعه حاضر تلاش دارد تا توجه طراحان را به ابداع سامانه‌های تهویه طبیعی مبتنی بر مکش هوای داخل بنا به بیرون و جایگزینی هوای مطبوع به‌منظور کنترل بیشتر تهویه و همچنین کاهش آلودگی معطوف سازد.

6- نتایج همچنین نشان می‌دهد در ساختارهایی که بادگیر به تالار و حیاط مرکزی متصل است، زاویه برخورد جریان نقش تعیین‌کننده‌ای در رفتار هیدرودینامیکی بادگیر دارد.

### 8- فهرست علائم

$g$	شتاب گرانشی ( $\text{ms}^{-2}$ )
$H$	ارتفاع (m)
$I$	شدت آشفته‌گی
$i, j$	جهت‌های مختلف مختصاتی
$k$	انرژی جنبشی آشفته‌گی
$L$	طول (m)
$P$	فشار ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$ )
$P_t$	فشار کل ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$ )
$P_s$	فشار استاتیکی ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$ )
Re	عدد رینولدز
$u$	بردار سرعت ( $\text{ms}^{-1}$ )
$V$	اندازه سرعت ( $\text{ms}^{-1}$ )
$W$	عرض (m)

### علائم یونانی

$\Gamma$	ضریب پخش
$\Gamma_k$	ضریب پخش مؤثر $k$
$\Gamma_\omega$	ضریب پخش مؤثر $\omega$
$\mu$	لزجت دینامیکی ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ )
$\rho$	چگالی ( $\text{kgm}^{-3}$ )
$\tau_t$	تانسور تنش‌های آشفته‌گی
$\omega$	فرکانس آشفته‌گی

### زیرنویس‌ها

$C_p$	ضریب فشار
-------	-----------

### 9- تشکر و قدردانی

در این مجال لازم است از زحمات آقای دکتر محمود مانی در جهت فراهم‌سازی امکانات آزمایشگاه ایروودینامیک دانشکده هوافضای دانشگاه