



## بررسی مقادیر ضریب فشار القایی باد بر وجوه ساختمان‌هایی با پلان مربع

سیده حمیده موسوی<sup>۱\*</sup>، شهرام دلفانی<sup>۲</sup>

۱. کارشناسی ارشد، فناوری معماری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران  
۲. دانشیار، مهندسی مکانیک، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران  
\* تهران، کدپستی ۱۹۸۳۹۶۹۴۱۱، [hamideh.moosavi17@gmail.com](mailto:hamideh.moosavi17@gmail.com)

### چکیده

مطالعه ضریب فشار باد بر روی سطوح ساختمان‌ها از منظر سازه‌ای و تهویه حایز اهمیت است. زیرا ضریب فشار مثبت و منفی مسبب نیروی فشاری و مکشی باد پیرامون ساختمان‌هاست. در این پژوهش، جریان باد بر روی ۲۰ نمونه ساختمانی، شامل ۵ نمونه با ضرایب ارتفاع به عرض بین ۰/۵ تا ۲/۵ در ۴ زاویه ۰°، ۱۵°، ۳۰° و ۴۵°، با پلان مربع در مقیاس ۱:۱۰۰ به شیوه عددی شبیه‌سازی شده و ضریب فشار بر روی سطوح خارجی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. شبیه‌سازی باد به کمک روش میانگین‌گیری از رینولدز معادلات ناویر-استوکس (RANS) در حالت پایا انجام و جریان‌های آشفته به وسیله معادلات RNG k-ε مدل‌سازی شده است. به‌علاوه، از تأثیر لایه‌بندی حرارتی نزدیک به زمین بر حرکت هوا صرف‌نظر و جهت اعتبارسنجی، نتایج عددی با نتایج تجربی منتشر شده توسط پژوهشگران پیشین، مقایسه گردیده است. نتایج حاکی از این است که تغییر زاویه چرخش تأثیر مستقیمی در میزان ضریب فشار القایی باد به ساختمان دارد و همچنین، میزان تغییرات آن بر روی نمای ساختمان با افزایش نسبت ارتفاع به عرض (H/D)، بیشتر می‌شود. تا زاویه چرخش ۱۵° همچنان تنها یک جبهه ساختمان (جبهه رو به باد) فشار مثبت را تجربه می‌کند، ولی با افزایش بیشتر این زاویه هر دو وجه رو به باد، فشار مثبت را تجربه خواهند کرد.

کلیدواژه‌ها

ساختمان، پلان مربع، باد، ضریب فشار، شبیه‌سازی عددی (CFD)

## Evaluating the Amount of Wind Induced Pressure Coefficient on Square Plan Building's Faces

Seyedeh Hamideh Moosavi<sup>1\*</sup>, Shahram Delfani<sup>2</sup>

1. Urban and Architecture Department, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran  
2. Department of Mechanical Engineering, Road, Housing, and Urban Development Research Center, Tehran, Iran  
\* P.O. Box 1983969411, Tehran, Iran, [hamideh.moosavi17@gmail.com](mailto:hamideh.moosavi17@gmail.com)

### Abstract

Assessing wind pressure coefficient on building's exterior surfaces is essential for studying natural ventilation and structural issues. Positive and negative pressure coefficients are the main reasons of generating pressure and suction on facades. In this study, wind flow has been numerically simulated on 20 building models with the scale of 1:100 and pressure coefficient has been computed on building's exterior faces. Models were consisted of 5 different heights to width (H/D) ratios, ranging between 0.5 and 2.5 in 4 different angles: 0°, 15°, 30° and 45°. Wind simulation has been carried out based on Reynolds Average Navier-Stokes equations in steady state and turbulent flow has been modeled by RNG k-ε equations. The simulation has been done in isothermal condition and validation is performed by comparing the results with previous published data. Results illustrate that rotating angle has direct influence on the induced wind pressure coefficient of building's surfaces and its variety domain expands as well as H/D increases. Until 15°, only one face experiences positive pressure but as the rotating angle gets further, two windward faces will experience positive pressure.

### Keywords

Building, Square Plan, Wind Pressure Coefficient, Computational Fluid Dynamics

### ۱- مقدمه

داخلی، آسایش حرارتی ساکنان و کاهش مصرف انرژی به‌شمار می‌رود [۴، ۵] و در نتیجه‌ی اثر نیروی شناوری که مبنای آن اختلاف فشار است، ایجاد می‌شود [۶]. تهویه طبیعی یک طرفه یا عرضی در ساختمان‌ها از جمله دغدغه‌های امروزی پژوهشگران در ساخت ساختمان‌های سبز و محیط‌های شهری پایدار است [۷-۱۰]. نرخ تهویه طبیعی تحت تأثیر عوامل زیادی مثل

بررسی توزیع فشار بر روی سطوح خارجی ساختمان از منظر سازه‌ای و تهویه مطبوع حایز اهمیت است [۱، ۲]. تهویه طبیعی فرآیندی است که طی آن هوا از فضای بیرون به درون اتاق یا ساختمان راه پیدا می‌کند و درون فضای گسترش می‌یابد [۳]. این امر رویکردی مهم برای بهبود کیفیت هوای فضای

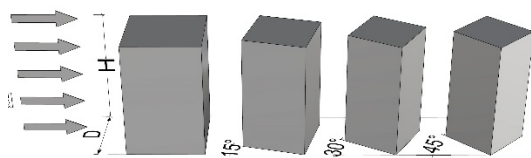
دادن آزمایش‌های تجربی مانند تونل باد از عوامل محبوبیت این روش هستند. در میان روش‌های متداول شبیه‌سازی جریان به کمک دینامیک سیالات محاسباتی، روش میانگین‌گیری از رینولدز معادلات نویر-استوکس، فراگیرتر است [۱، ۱۹، ۲۰]. هرچند دقت این شیوه نسبت به دیگر روش‌های عددی مانند شبیه‌سازی مستقیم عددی<sup>۱</sup> و شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ<sup>۲</sup>، کمتر است ولی به دلیل صرف زمان و هزینه محاسباتی کمتر به شیوه‌های متداول و مورد قبول بین پژوهشگران علوم ساختمانی تبدیل شده است.

با توجه به اهمیت موضوع ضریب فشار باد در علوم ساختمان، در این پژوهش ۲۰ بلوک ساختمانی با پلان مربع به طور مجزا در مقابل جریان باد با سرعت مبنای ۴ m/s قرار گرفته‌اند و سپس الگوی توزیع ضریب فشار بر روی وجوه خارجی ساختمان‌ها محاسبه و ارایه گردیده است. به این منظور نسبت ارتفاع به عرض (H/D) ساختمان‌های متداول ملاک عمل بوده و لذا نمونه‌هایی با نسبت ارتفاع به عرض ۰/۵، ۱/۰، ۱/۵، ۲/۰، ۲/۵ در ۴ زاویه‌ی چرخش ۰°، ۱۵°، ۳۰° و ۴۵° مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

## ۲- مدلسازی عددی

متغیرها در این پژوهش نسبت ارتفاع به عرض (عرض عمود به جهت جریان باد) و زاویه چرخش ساختمان است که به ترتیب با علامت اختصاری H/D و  $\theta$  معرفی شده‌اند (شکل ۱). مقدار H/D نمونه‌ها بین ۰/۵ تا ۲/۵ با فاصله ۰/۵، متفاوت و زاویه‌های مورد بررسی ۰°، ۱۵°، ۳۰° و ۴۵° در نظر گرفته شده است. در مرحله بعد، اثر جریان بادی با سرعت مبنای ۴ m/s در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین (در مقیاس واقعی) بر روی ۲۰ نمونه ساختمانی توسط روش دینامیک سیالات محاسباتی شبیه‌سازی شده و در پایان اثر جریان باد بر روی نمونه‌های مختلف توسط مقدار ضریب فشار (Cp) مقایسه گردیده است.

نوآوری این پژوهش از این حیث است که با محدود کردن هندسه‌ی پلان به شکل مربع، درصد بررسی دقیق‌تر تأثیر H/D و زاویه‌ی چرخش بر توزیع فشار القایی بر نمای ساختمان است؛ ایجاد این محدودیت امکان بررسی دو متغیر را در طیف وسیع‌تری فراهم کرده است. شایان ذکر است محدوده‌ی انتخابی برای نسبت H/D، در گستره‌ی ساختمان‌های متداول (ساختمان‌های کوتاه مرتبه و میان مرتبه) قرار می‌گیرد.



شکل ۱ معرفی متغیرهای مسأله

## ۲-۱- دامنه حل

بر اساس دستورالعمل‌های معتبر در زمینه بررسی عددی جریان هوا در معماری و شهرسازی [۲۱، ۲۲] اندازه این محدوده بر مبنای ارتفاع ساختمان تعیین می‌شود. در صورتی که ارتفاع ساختمان را H در نظر بگیریم، ساختمان باید از مقطع ورودی باد، کناره‌ها و صفحه‌ی بالایی حداقل به میزان H و از مقطع خروج باد ۶ تا ۱۰ برابر ارتفاع فاصله داشته باشد. این کمینه‌ی فاصله‌ها

سرعت باد مینا، هندسه بازشوها، مشخصات محیط پیرامونی و محل قرارگیری در طبقات ساختمان، قرار دارد [۷، ۱۱، ۱۲].

توزیع فشار بر روی دیواره‌های خارجی ساختمان نیز تا حد زیادی وابسته به هندسه ساختمان، جهت وزش باد و شرایط محیطی بستر هستند [۱، ۱۳]. در این راستا، منتظری و همکارش [۱۱] به بررسی تأثیر حضور بالکن‌ها در نمای ساختمان و بر الگوی توزیع فشار روی وجوه ساختمانی بلندمرتبه پرداخته‌اند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد حضور بالکن‌ها تأثیر به‌سزایی در توزیع فشار القایی به ساختمان و در نتیجه، آسایش ساکنان در بالکن خواهد داشت. مطالعات عددی و تجربی لی و همکارانش [۱۴] بر توزیع فشار سطحی مدل‌هایی با پلان‌های مستطیل شکل در ارتفاع ثابت و زوایای مختلف حاکی از این است که تغییر نسبت اضلاع و زاویه‌ی برخورد باد به طور مؤثری بر جریان باد پیرامون نمونه‌ها و متوسط ضریب فشار روی سطوح ساختمان‌ها تأثیرگذار است. به نحوی که تغییر زاویه‌ی ۳۰ درجه‌ای باد می‌تواند ضریب فشار ناحیه‌ای را از مثبت به منفی یا بالعکس تغییر دهد. به علاوه، تغییرات اندازه‌ی وجهی از ساختمان که در معرض وزش باد است بر رژیم جریان پرنگ‌تر و مؤثرتر است و هرچه این اندازه بزرگتر باشد، فشار مکشی سطح بر روی سقف و دیواره‌های اطراف بیشتر خواهد بود. این پژوهش همچنین می‌تواند مرجع مفیدی برای مقایسه‌ی داده‌های عددی با نتایج آزمایشگاهی در نسبت‌های طول به عرض متفاوت باشد. هانگ و همکارش [۱۵] نیز به بررسی تجربی تأثیر هم‌زمان تغییر فشار بر روی وجوه مختلف دو ساختمان با پلان مربع به ارتفاع ۲۰ و ۵۰ طبقه در ۳ زاویه پرداخته‌اند. هدف از این پژوهش بررسی تغییرات فشار بر عملکرد سازه‌ی ساختمان بوده است. اختلاف فشار بین سطوح مختلف ساختمان و یا حتی توزیع نامتوازن و لحظه‌ای فشار بر روی وجوه ساختمان‌های بلند مرتبه‌ی انعطاف‌پذیر (مقاوم در برابر زلزله) سبب حرکات ارتعاشی در جهت وزش باد خواهد شد [۱۵، ۱۶] که خود زمینه‌ساز بسیاری از مشکلات سازه‌ای و مخل آسایش ساکنان است. ساو و همکارانش [۱۷] نیز در پژوهشی اثر گردباد و فشار القا شده توسط بادهای شدید بر سقف مسطح و شیب‌دار ساختمان‌های کوتاه مرتبه را مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که توزیع فشار القایی باد به ساختمان به هنگام وقوع گردباد در مقایسه با حالت عادی بسیار متفاوت بوده و اندازه و نحوه توزیع فشار باد پیرامون ساختمان بسیار وابسته به هندسه ساختمان و فاصله‌ی آن از مرکز گردباد است. هاتم و همکارش [۱۸] فشار القایی باد را بر سقف ساختمان‌های کوتاه مرتبه‌ی وسیع با پلان مربع، در حالی که اضلاع نمونه‌ها بین ۶۰ متر تا ۱۸۰ متر انتخاب شده بود، در چندین جهت وزش باد بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که میزان فشار القایی باد بر روی سقف ساختمان‌های کوتاه مرتبه با ابعاد وسیع، در مقایسه با ساختمان‌های متداول بسیار متفاوت است و اندازه پلان ساختمان نقش مهمی را ایفا می‌کند. نگارندگان این پژوهش توصیه می‌کنند قوانین متداول بارگذاری باد باید برای ساخت چنین ساختمان‌هایی اصلاح شود، چرا که اعمال قوانین متداول کنونی به چنین سازه‌هایی منجر به ارایه طرحی بسیار غیراقتصادی و بیش از حد سختگیرانه به لحاظ سازه‌ای می‌گردد.

شبیه‌سازی جریان باد به شیوه‌های: (۱) اندازه‌گیری واقعی، (۲) آزمایش‌های تونل باد و (۳) با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی انجام می‌پذیرد. امروزه شیوه عددی شبیه‌سازی جریان باد، به شیوه‌ای متداول برای محاسبات پارامتریک تبدیل شده است. دقت قابل قبول این شیوه، دسترسی آسانتر، فراهم کردن داده‌های بیشتر و هزینه کمتر نسبت به انجام

<sup>1</sup> DNS  
<sup>2</sup> LES

به این دلیل است تا اثر دیواره‌ی محدوده دامنه‌ی شبیه‌سازی، بر روی جسم مورد مطالعه به حداقل برسد.

### ۲-۲- معادلات حاکم

معادلات نویر استوکس، معادلات حاکم بر حرکت سیال، شامل سه معادله بقای جرم، بقای ممنتوم و بقای انرژی هستند. در این پژوهش از تأثیر لایه‌بندی حرارتی هوا در نزدیکی زمین صرف‌نظر شده، لذا نیازی به حل معادلات بقای انرژی در پیش‌بینی حرکت سیال نیست. برای پیش‌بینی رفتار توربولانسی باد علاوه بر معادلات مذکور به معادله‌ی کمکی دیگری موسوم به مدل توربولانسی نیاز است. در مطالعات ایرودینامیکی ساختمان‌ها و فضای شهری مدل‌های توربولانسی متنوعی به کار برده شده است، اما مدل k-ε RNG در مقایسه با دیگر مدل‌ها، نتایج دقیقتری در تحلیل ساختمان‌های مجزا، ارائه داده است [۲۳]. k بیانگر انرژی جنبشی توربولانس و ε بیانگر میزان اتلاف انرژی توربولانس است. همچنین، معادلات مورد استفاده برای شبیه‌سازی عددی جریان باد بر مبنای جریان آشفته، پایا<sup>۱</sup> و تراکم‌پذیر انتخاب شده است.

### ۳-۲- شرایط مرزی

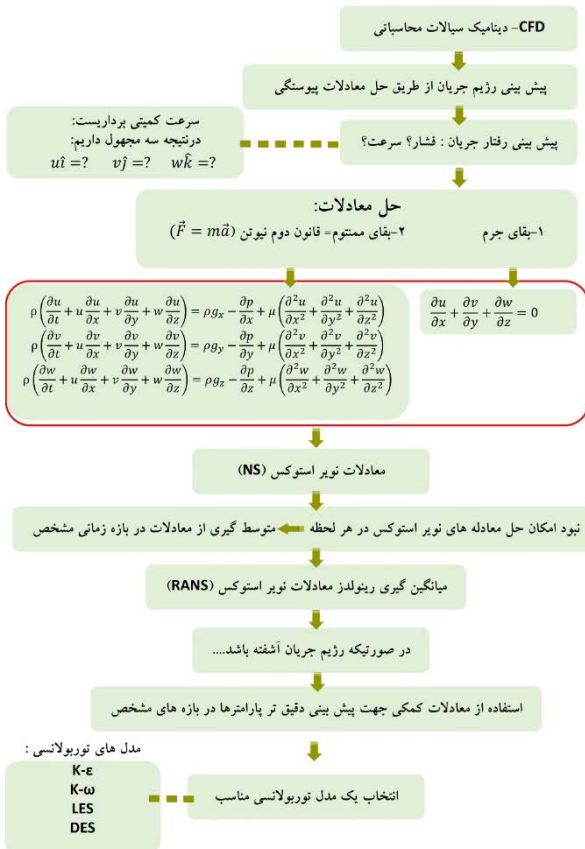
قدم بعدی در شبیه‌سازی عددی جریان هوا، مشخص کردن شرایط مرزی برای دیواره‌های دامنه حل است. به ورودی جریان، شرط مرزی سرعت ورودی<sup>۲</sup> اختصاص داده شده است. به دلیل اینکه در محیط طبیعی سرعت باد با فاصله گرفتن از سطح زمین افزایش می‌یابد، اعمال پروفیل باد در مقطع ورودی جریان، شرایط شبیه‌سازی را به شرایط طبیعی نزدیکتر می‌کند (شکل ۲).

به صورت تئوری، پروفیل باد از معادله ۱ تبعیت می‌کند. این پروفیل بر اساس یک سرعت مرجع و α که ضریبی برای بیان میزان زبری سطح است، تعریف می‌شود [۲۴].

$$\frac{V_z}{V_{z10}} = \left(\frac{z}{z_{10}}\right)^\alpha \quad (1)$$

در این معادله Z ارتفاع مشخص از سطح زمین و Vz سرعت باد در ارتفاع z، Vz10 سرعت در ارتفاع ده متری (z10) است. α معیاری از ناهمواری زمین است که در اینجا برابر با ۰/۲۷ در نظر گرفته شده است. پروفیل انرژی جنبشی توربولانس (k) نیز منطبق با پروفیل تونل باد نمونه‌ی مرجع (نمونه‌ای که برای اعتبارسنجی از آن استفاده شده است) انتخاب و پروفیل اتلاف انرژی توربولانس بر اساس معتبرترین دستورالعمل‌ها در حوزه ایرودینامیک ساختمان [۲۱، ۲۲] با استفاده از معادله ۲ محاسبه گردیده است.

$$\varepsilon(z) = \sqrt{C_u} k(z) \frac{U_s}{z_s} \alpha \left(\frac{z}{z_s}\right)^{\alpha-1} \quad (2)$$



شکل ۲ مراحل پیشرو در شبیه‌سازی عددی جریان باد

در معادله ۲ ε(Z) میزان اتلاف انرژی توربولانس در ارتفاع مورد نظر z، C<sub>u</sub> عدد ثابت در مدل k-ε (معمولاً برابر با ۰/۰۹ در نظر گرفته می‌شود)، U<sub>s</sub> سرعت مرجع (معمولاً در بالادست جریان در نظر گرفته می‌شود)، z<sub>s</sub> ارتفاع سرعت مرجع و α ضریب بیان‌کننده میزان ناهمواری زمین است [۲۲] که در این پژوهش برابر با ۰/۲۷ در نظر گرفته شده است (پروفیل سرعت باد و انرژی جنبشی توربولانس نیز با همین ضریب α ارائه شده‌اند [۲۵]). در ادامه، شرط مرزی در خروجی جریان به‌گونه‌ای در نظر گرفته می‌شود که گرادینان کلیه متغیرها (از جمله فشار) در جهت جریان برابر با صفر است. برای دیواره‌های اطراف و همچنین سقف دامنه‌ی حل شرط مرزی متقارن<sup>۳</sup> اعمال گردیده است. این شرط مرزی زمانی به کار برده می‌شود که انتظار می‌رود صفحات انتخابی با الگوی عمومی جریان باد در دامنه حل هم‌راستا باشند، این شرط مرزی اثر دیواره بر جریان هوا را به حداقل می‌رساند. برای دیگر مرزها شامل کف و دیواره‌های ساختمان از شرط مرزی دیواره<sup>۴</sup> یا شرط عدم لغزش<sup>۵</sup> استفاده شده است. در این حالت سرعت باد بر روی مرز برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود و به تناسب زبری سطح و اثر متقابل آن بر رژیم جریان باد، با فاصله گرفتن از دیواره سرعت باد افزایش می‌یابد [۲۶] (شکل ۳).

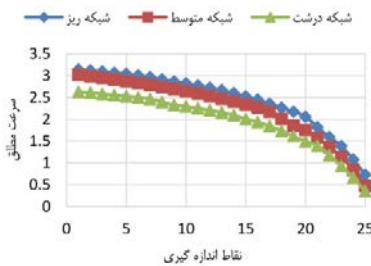
<sup>3</sup> Symmetry  
<sup>4</sup> Wall  
<sup>5</sup> No Slip

<sup>1</sup> Steady  
<sup>2</sup> Velocity Inlet

۲-۶- شبکه‌بندی دامنه حل

اساس کار بیشتر نرم‌افزارهای شبیه‌ساز جریان هوا، روش حجم محدود<sup>۲</sup> است که برای گسسته‌سازی معادلات حاکم، دامنه‌ی حل را به شبکه‌های ریز تقسیم می‌کنند، در نتیجه نتایج داده‌ها به میزان زیادی وابسته به نوع و کیفیت شبکه‌بندی است. لذا تعداد شبکه‌ها باید به حدی دقیق باشد که در نواحی مد نظر، بتوان مقادیر فیزیکی را با تعداد مناسبی از معادلات حل و حدس زد. جهت مقایسه تعداد شبکه‌ها، و اثبات این موضوع که اندازه‌ی شبکه‌بندی تأثیر قابل‌توجهی در نتایج نهایی ندارد، باید حداقل سه شبکه با اندازه‌های متفاوت بررسی شود. در بیشتر مسایل مهندسی اگر ۷۵٪ تا ۸۵٪ نتایج یکسان باشند، مش بزرگتر، به دلیل صرفه‌جویی در زمان و هزینه شبیه‌سازی مورد قبول خواهد بود. خاطر نشان می‌شود که ریزترین سلول‌ها پیرامون دیواره‌ی ساختمان‌ها و زمین (پیرامون اجسام صلب) قرار می‌گیرند. همچنین، یکای بدون بعد دیواره، موسوم به  $y^+$  مبنای اندازه‌گذاری کوچکترین سلول (اولین سلول نزدیک به مدل مورد مطالعه) است که مقدار بهینه‌ی آن در شبیه‌سازی باد پیرامون ساختمان‌ها بین ۳۰ تا ۱۰۰ در نظر گرفته می‌شود [۳۰]. هرچه مقدار  $y^+$  کاهش یابد، اندازه شبکه‌بندی نیز کاهش می‌یابد. همچنین کاهش مقیاس در محاسبات عددی سبب افزایش دقت نتایج [۳۰] و کاهش قابل توجه زمان اجرا می‌شود.

جهت اثبات عدم وابستگی نتایج به تعداد سلول‌های دامنه‌ی حل، ۳ شبکه: (۱) شبکه درشت با ۱۶۳,۵۹۲ سلول (۲) شبکه متوسط با ۳۳۶,۴۰۲ سلول و شبکه ریز با ۶۵۳,۳۶۰ سلول مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، مقایسه بین داده‌های حاصل از سه شبکه فوق حاکی از انحراف ناچیز بین نتایج شبکه ریز و متوسط است. لذا شرایط شبکه‌بندی متوسط به دیگر نمونه‌ها اعمال گردیده است. در هر نمونه ریزترین سلول‌ها در نزدیکی سطوح صلب- دیواره جسم و سطح زمین- قرار می‌گیرند.

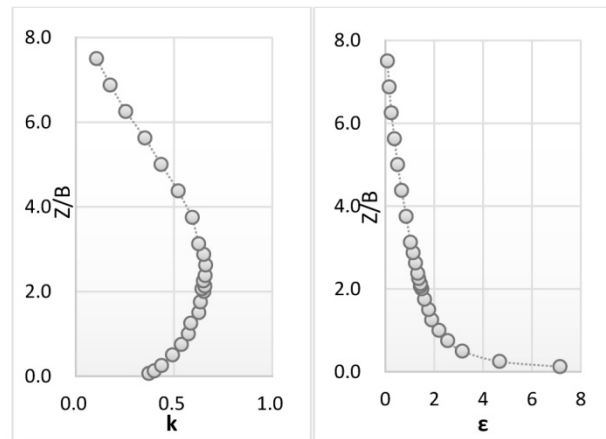


شکل ۵ مقایسه نتایج شبکه‌بندی‌های متفاوت

۲-۳ نتایج

ضریب فشار (Cp) بر روی صفحات خارجی ساختمان از طریق معادله ۳ محاسبه می‌گردد [۳۱].

$$C_p = \frac{p - p_0}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (3)$$



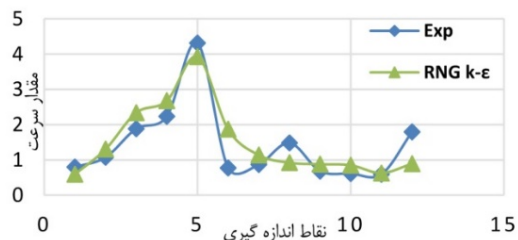
شکل ۳ پروفیل‌های ورودی جریان باد [۲۵]

۲-۴- حل عددی

از نرم‌افزار ANSYS FLUENT 17 برای حل معادلات حاکم بر حرکت سیالات موسوم به معادلات نویر- استوکس استفاده شده است. شیوه‌ی حل مبتنی بر فشار و همچنین برای حل معادلات بقای جرم و ناویر- استوکس از الگوریتم سیمپل<sup>۱</sup> (روش نیمه ضمنی برای حل معادلات مرتبط با فشار) استفاده شده است؛ سیال جاری، هوا با چگالی  $1/225 \text{ kg/m}^3$  و گرانیوی  $10^{-5} \text{ kg/m.s}$  است. درون‌یابی متغیرها تا مرتبه دوم ادامه می‌یابد و جهت بررسی همگرایی، تکرار حل تا جایی ادامه پیدا می‌کند که خطای محاسبات معادلات فوق، به طور میانگین به کمتر از  $10^{-3}$  کاهش یابند.

۲-۵- اعتبارسنجی

به هنگام استفاده از روش عددی برای پیش‌بینی رفتار سیال، اعتبارسنجی و مقایسه داده‌های حاصل با نمونه‌های تونل باد الزامی است؛ این امر به منظور اطمینان پیدا کردن از صحت کدهای نرم‌افزار صورت می‌گیرد [۲۸]. مقایسه در این مقاله، اطلاعات به‌دست آمده از آزمایش تونل باد لایه مرزی پیرامون مدلی مکعبی شکل با نسبت ارتفاع: طول: عرض برابر با ۲: ۱: ۱ است [۲۹]. همان‌طور که در شکل ۴ نمایان است، میانگین انحراف نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی توسط نگارندگان مقاله و نتایج تونل باد منتشر شده، در محدوده‌های قابل قبول قرار می‌گیرد.



شکل ۴ مقایسه نتایج تونل باد و نتایج عددی نگارندگان مقاله

<sup>2</sup> Finite Volume

<sup>1</sup> SIMPLE

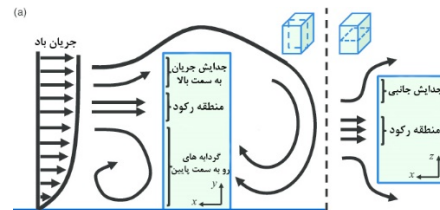
در معادله شماره ۳،  $P$  فشار موضعی،  $P_0$  فشار استاتیکی مرجع (در این پژوهش برابر با صفر در نظر گرفته شده است)،  $\rho$  چگالی هوا در دامنه‌ی حل، برابر با  $1/225 \text{ kg/m}^3$  و  $U$  سرعت بالادست جریان باد در پروفیل ورودی و برابر با  $7/6 \text{ m/s}$  تعیین شده است. خاطر نشان می‌گردد ضریب فشار منفی مسبب نیروی مکشی و ضریب فشار مثبت مسبب نیروی فشار بر روی وجوه ساختمان است.

به هنگام برخورد باد به ساختمان، در جبهه رو به سمت باد فشار دینامیکی جریان هوا پس از برخورد به ساختمان در نقطه رکود تبدیل به فشار استاتیکی شده که این امر موجب تقسیم جریان باد به دو ناحیه می‌گردد (شکل ۶). به همین دلیل انتظار می‌رود ضریب فشار در جبهه رو به سمت باد مثبت بوده و در نقطه رکود بیشترین مقدار را داشته باشد. زیر نقطه رکود جریان هوا به سمت بالا حرکت کرده و هنگام رسیدن به تراز بام پدیده جدایش<sup>۱</sup> رخ داده و ناحیه‌ی جریان چرخشی بر فراز بام و همچنین در ناحیه پشت به سمت باد به وجود می‌آید [۳۲]. به دلیل اتلاف‌های اصطکاکی و لزجتی، فشار جریان افت نموده و به همین دلیل در تراز بام، اطراف ساختمان و همچنین جبهه پشت به سمت باد فشار به شدت کاهش پیدا کرده و مقادیر ضریب فشار منفی می‌شود.

شکل شماره ۱۰ توزیع ضریب فشار القایی باد بر روی ساختمانی با زاویه چرخش  $45^\circ$  را نشان می‌دهد. در این حالت به دلیل اینکه دو وجه شماره ۱ و ۲ به صورت متقارن در مقابل جریان باد قرار می‌گیرند، خطوط توزیع ضریب فشار نسبت به محل برخورد دو وجه ۱ و ۲ به صورتی متقارن می‌باشد. انتظار می‌رود به دلیل اینکه دو جبهه ساختمان فشار منفی و دو جبهه دیگر فشار مثبت را تجربه می‌کنند، تهویه طبیعی در ساختمان‌های با زاویه چرخش  $45^\circ$  به صورت کارآمدتری انجام پذیرد (شکل ۱۰).

شکل شماره ۷ نقاط هم‌ارز ضریب فشار باد روی جبهه‌های مختلف ساختمان با پلان مربع را در حالتی که  $\theta = 0^\circ$  و نسبت  $H/D$  نمونه‌های  $A$  تا  $E$  به ترتیب برابر با  $0/5$ ،  $1/0$ ،  $1/5$ ،  $2/0$  و  $2/5$  است، نشان می‌دهد. در این وضعیت تنها یک وجه ساختمان دارای ضریب فشار مثبت است. لذا تهویه همواره به‌گونه‌ای صورت می‌پذیرد که هوا از جبهه شماره ۱ وارد ساختمان می‌شود و از ۳ جبهه دیگر خارج می‌شود. همچنین، نتایج نشان می‌دهد با افزایش نسبت  $H/D$ ، شاهد افزایش مقادیر ضریب فشار روی سطح رو به سمت باد خواهیم بود به نحوی که در  $H/D = 0/5$  بیشترین مقدار ضریب فشار برابر با  $0/3$  و در  $H/D = 2/5$  برابر با  $0/8$  است. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، تراز نقطه رکود معمولا بین  $0/7$  تا  $0/8$  ارتفاع ساختمان است [۲۳]. به‌علاوه، توزیع فشار منفی در دو وجه ۲ و ۴ به صورت متقارن شکل گرفته است (شکل ۷).

شکل شماره ۸ نقاط هم‌ارز ضریب فشار باد القایی به ساختمان را هنگامی که ساختمان نسبت به جریان باد زاویه‌ای برابر با  $15^\circ$  درجه دارد، نشان می‌دهد. هر چند ساختمان در موقعیتی زاویه‌دار نسبت به جریان باد قرار گرفته ولی همچنان بر روی یک وجه، ضریب فشار مثبت دیده می‌شود که نظیر شکل ۷ با افزایش ارتفاع مقادیر بیشتری می‌یابد. از مقایسه شکل‌های ۷ و ۸ مشهود است منطقه‌ای که در آن بیشترین ضریب فشار

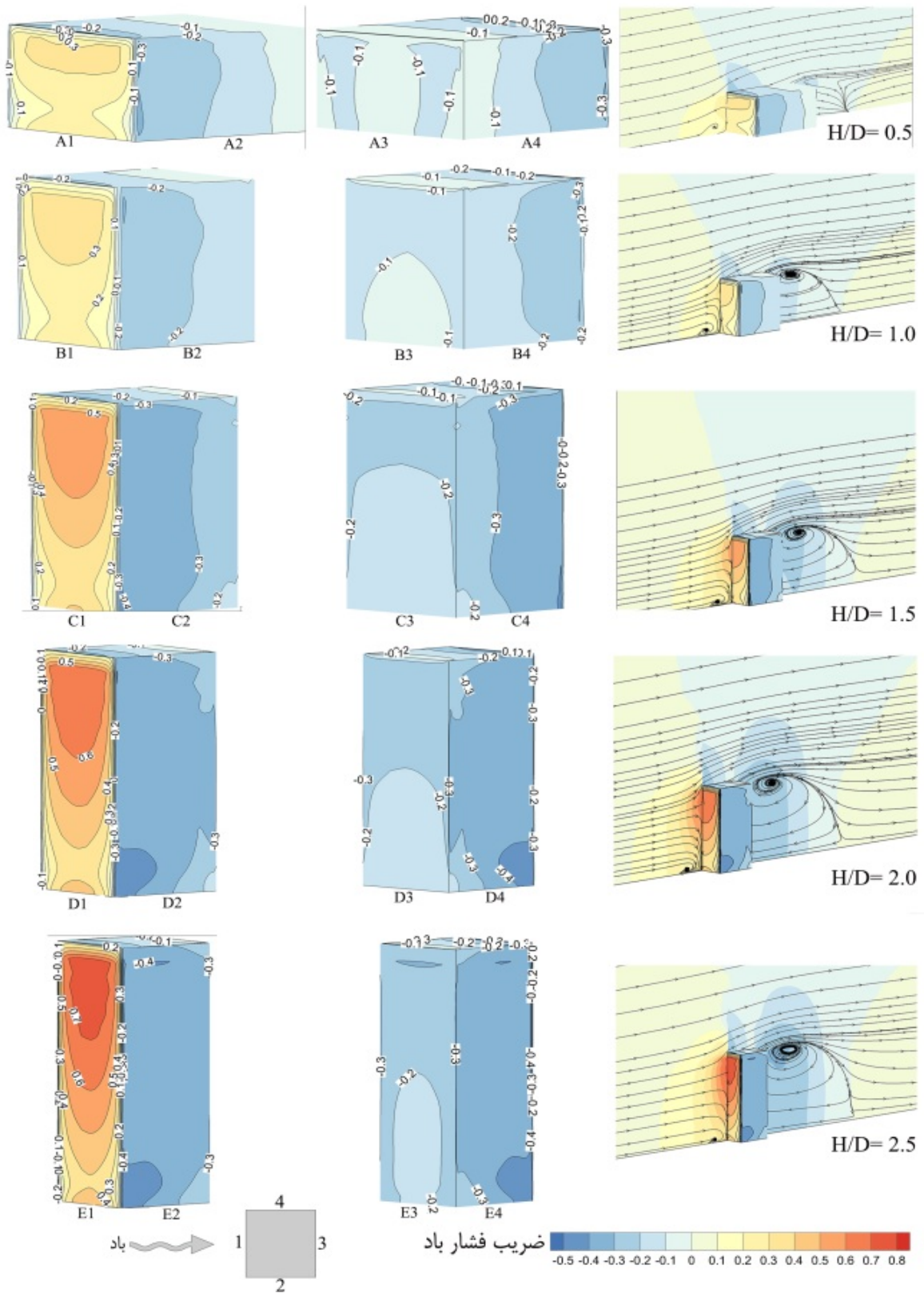


شکل ۶ رژیم جریان باد اطراف ساختمان به صورت شماتیک [۳۳]

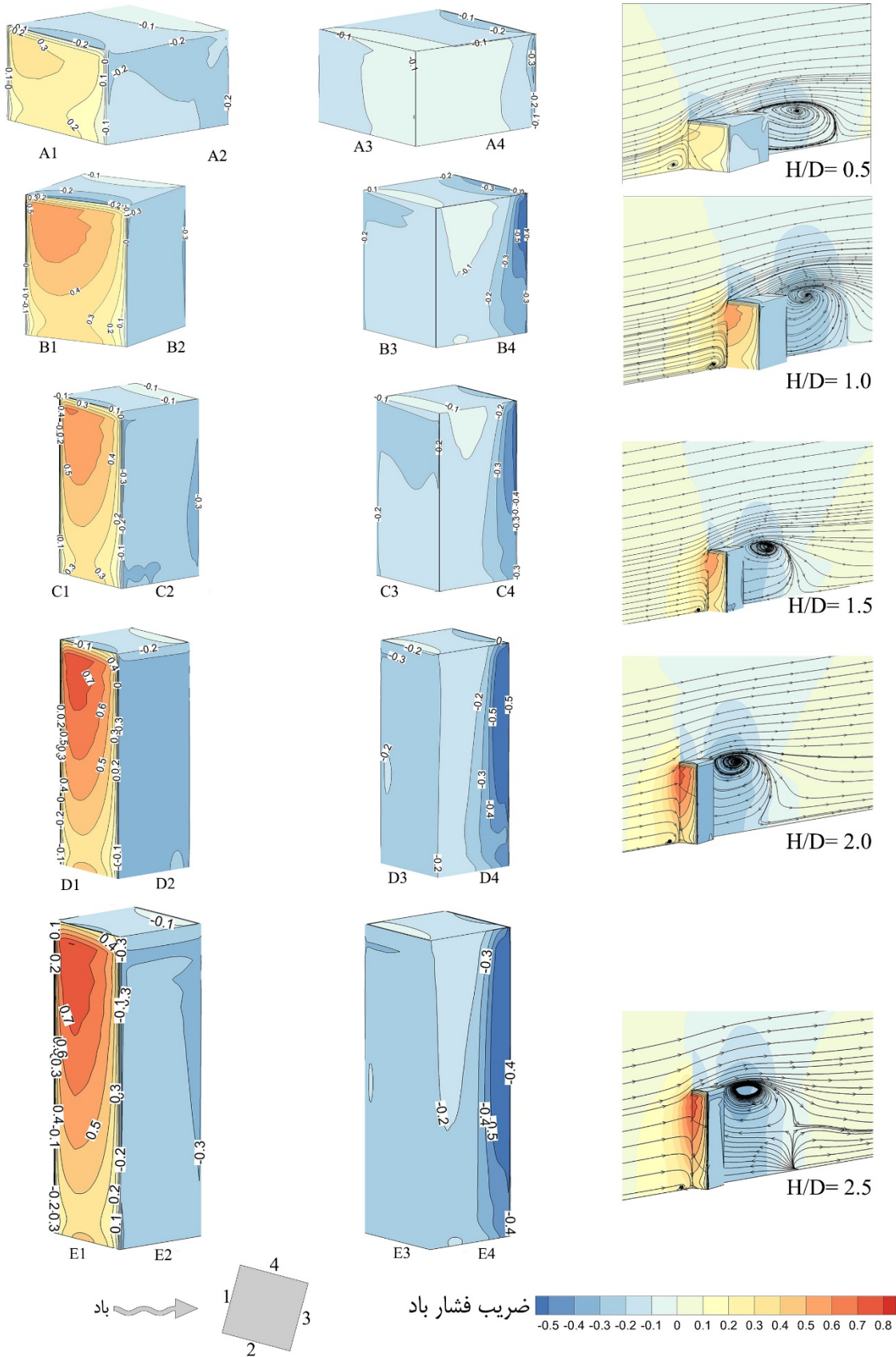
شکل شماره ۸ نقاط هم‌ارز ضریب فشار باد روی جبهه‌های مختلف ساختمان با پلان مربع را در حالتی که  $\theta = 0^\circ$  و نسبت  $H/D$  نمونه‌های  $A$  تا  $E$  به ترتیب برابر با  $0/5$ ،  $1/0$ ،  $1/5$ ،  $2/0$  و  $2/5$  است، نشان می‌دهد. در این وضعیت تنها یک وجه ساختمان دارای ضریب فشار مثبت است. لذا تهویه همواره به‌گونه‌ای صورت می‌پذیرد که هوا از جبهه شماره ۱ وارد ساختمان می‌شود و از ۳ جبهه دیگر خارج می‌شود. همچنین، نتایج نشان می‌دهد با افزایش نسبت  $H/D$ ، شاهد افزایش مقادیر ضریب فشار روی سطح رو به سمت باد خواهیم بود به نحوی که در  $H/D = 0/5$  بیشترین مقدار ضریب فشار برابر با  $0/3$  و در  $H/D = 2/5$  برابر با  $0/8$  است. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، تراز نقطه رکود معمولا بین  $0/7$  تا  $0/8$  ارتفاع ساختمان است [۲۳]. به‌علاوه، توزیع فشار منفی در دو وجه ۲ و ۴ به صورت متقارن شکل گرفته است (شکل ۷).

شکل شماره ۸ نقاط هم‌ارز ضریب فشار باد القایی به ساختمان را هنگامی که ساختمان نسبت به جریان باد زاویه‌ای برابر با  $15^\circ$  درجه دارد، نشان می‌دهد. هر چند ساختمان در موقعیتی زاویه‌دار نسبت به جریان باد قرار گرفته ولی همچنان بر روی یک وجه، ضریب فشار مثبت دیده می‌شود که نظیر شکل ۷ با افزایش ارتفاع مقادیر بیشتری می‌یابد. از مقایسه شکل‌های ۷ و ۸ مشهود است منطقه‌ای که در آن بیشترین ضریب فشار

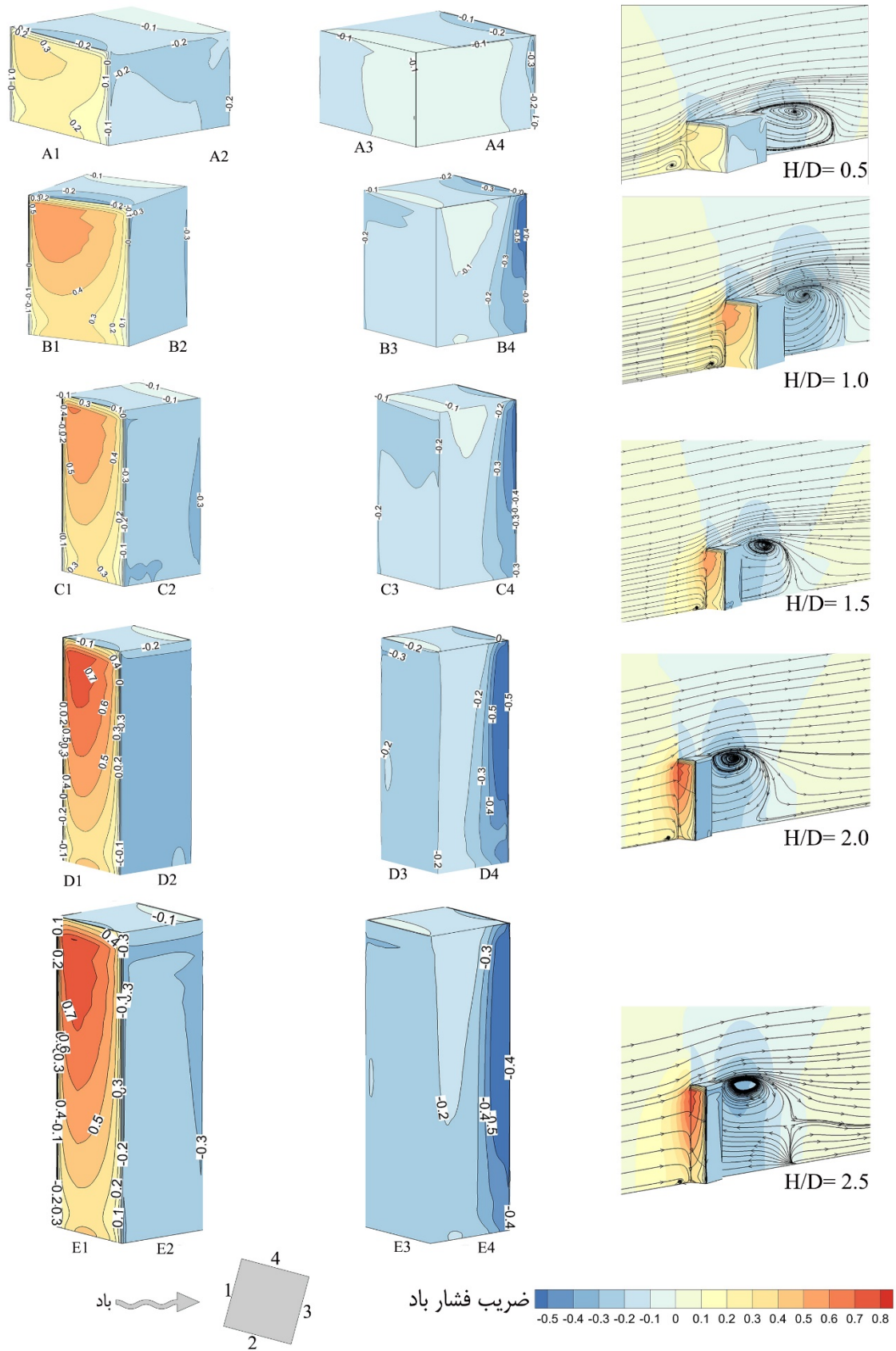
<sup>1</sup> Separation



شکل ۷ نقاط هم ارز ضریب فشار باد بر روی نمونه‌ها -  $\theta = 0^\circ$

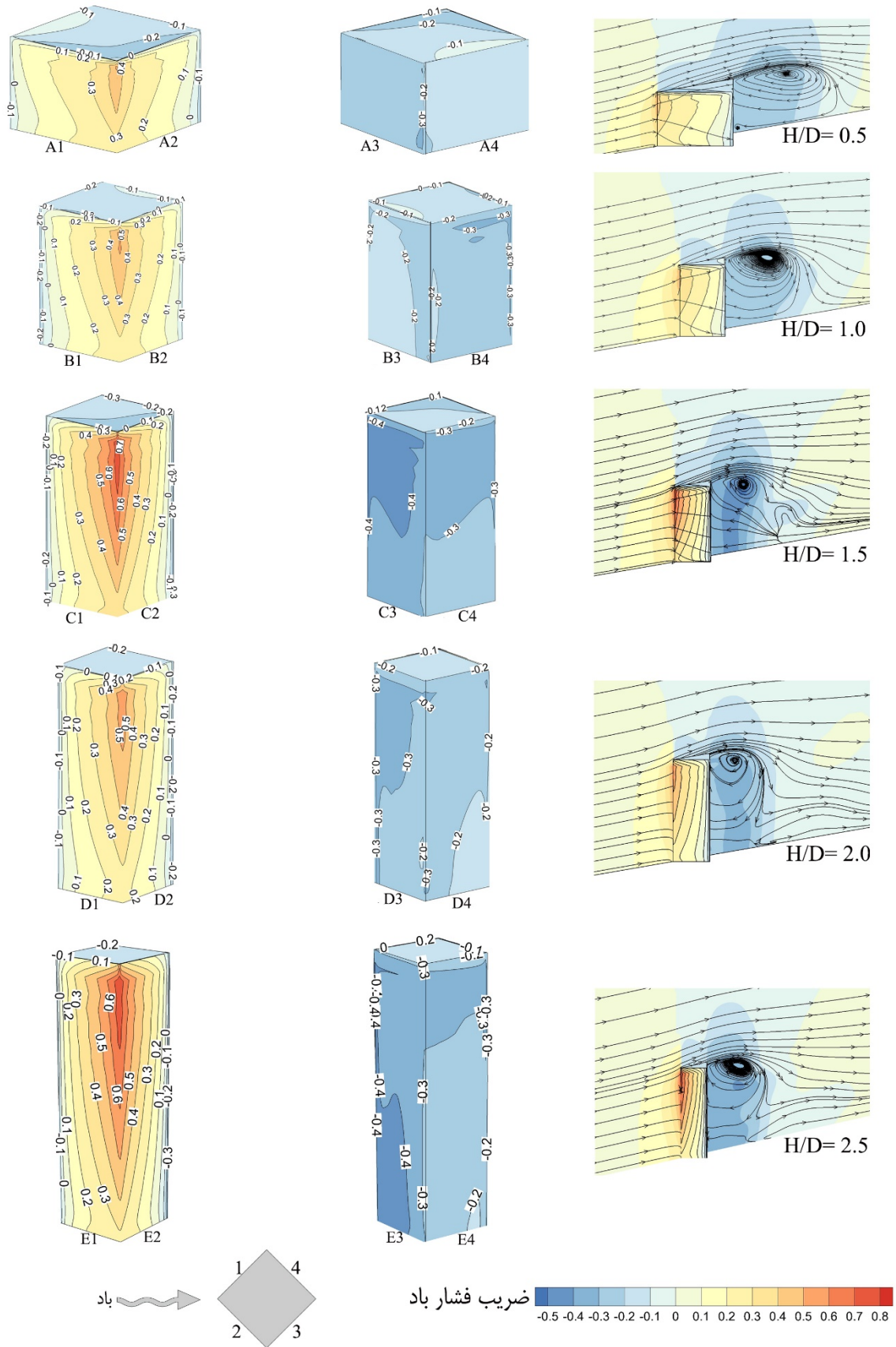


شکل ۸ نقاط هم ارز ضریب فشار باد بر روی نمونه‌ها -  $\theta = 15^\circ$



شکل ۹ نقاط هم ارز ضریب فشار باد بر روی نمونه‌ها -  $\theta = 30^\circ$





شکل ۱۰ نقاط هم ارز ضریب فشار باد بر روی نمونه‌ها -  $\theta = 45^\circ$

## ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر رژیم جریان باد بر روی ۴ جبهه‌ی ۲۰ نمونه ساختمانی در ۴ زاویه متفاوت ( $0^\circ$ ،  $15^\circ$ ،  $30^\circ$ ،  $45^\circ$ ) و نسبت H/D (۰/۵، ۱/۰، ۱/۵، ۲/۰ و ۲/۵) به کمک شیوه RANS، شبیه‌سازی و مورد بررسی قرار گرفته است. این شبیه‌سازی به صورت ۳ بعدی، در حالت پایا و بدون در نظر گرفتن اثر لایه‌بندی حرارتی انجام گرفته و همچنین، از مدل توربولانسی k-ε RNG برای شبیه‌سازی جریان آشفتنه استفاده شده است. علت بررسی عامل ضریب فشار در این پژوهش، اهمیت این عامل در مطالعات تهویه مطبوع و بررسی آسایش فیزیکی ساکنان ساختمان برای معماران و مهندسان ساختمان است. نتایج حاصل از بررسی نمونه‌های متفاوت به صورت موردی در ذیل ارائه می‌شود:

- ۱- الگوی توزیع ضریب فشار کاملا وابسته به جهت قرارگیری ساختمان است.
- ۲- همچنان که افزایش نسبت H/D سبب پیدایش گردابه‌های بزرگتر در جبهه پشت به باد ساختمان می‌گردد، سبب افزایش میزان ضریب فشار در جبهه رو به باد نیز می‌گردد.
- ۳- در زاویه چرخش  $15^\circ$  همچنان یک جبهه ساختمان فشار مثبت را تجربه می‌کند. ولی در زاویه چرخش  $30^\circ$ ، دو جبهه ساختمان تحت تأثیر ضریب فشار مثبت قرار می‌گیرند.
- ۴- الگوی توزیع ضریب فشار منفی در دو وجه کناری ساختمان در  $\theta=0^\circ$  به صورت متقارن است.
- ۵- در ساختمان‌های با پلان مربع، هنگامی که ساختمان نسبت به جهت وزش باد زاویه‌ای بیش از  $30^\circ$  داشته باشد، تهویه طبیعی بهتر صورت می‌پذیرد.
- ۶- نقطه رکود در ترازوی برابر با ۰/۷ تا ۰/۸ ارتفاع ساختمان رخ می‌دهد.
- ۷- با افزایش نسبت ارتفاع، در جبهه رو به باد ساختمان، مقادیر ضریب فشار افزایش می‌یابد.

## ۵- مراجع

- [9] W. Guo, X. Liu, X. Yuan, Study on Natural Ventilation Design Optimization Based on CFD Simulation for Green Buildings, *Procedia Engineering*, 121, p. 573-581, 2015.
- [10] H. Wang, Q. Chen, A new empirical model for predicting single-sided, wind-driven natural ventilation in buildings, *Energy and Buildings*, 54, p. 386-394, 2012.
- [11] A. Aflaki, et al., A review on natural ventilation applications through building façade components and ventilation openings in tropical climates, *Energy and Buildings*, 101, p. 153-162, 2015.
- [12] C. F. Gao, W. L. Lee, Evaluating the influence of openings configuration on natural ventilation performance of residential units in Hong Kong, *Building and Environment*, 46(4), p. 961-969, 2011.
- [13] M. Hejazi, Ebrahim Afshari, Numerical simulation of wind interference effects around a group of tall buildings, *Journal of solid and fluid mechanics*, 5, 2015.
- [14] Young Tea Lee, S. L. B. Hee Chang Lim, Kunio Misutani, pressure distribution on rectangular buildings with changes in aspect ratio and wind directions, *Wind and structures*, 23, p. 465-483, 2016.
- [15] G. Huang, X. Chen, Wind load effects and equivalent static wind loads of tall buildings based on synchronous pressure measurements, *Engineering Structures*, 29(10), p. 2641-2653, 2007.
- [16] N. Lin, et al., Characteristics of wind forces acting on tall buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 93(3), p. 217-242, 2005.
- [17] S. Cao, M. Wang, J. Cao, Numerical study of wind pressure on low-rise buildings induced by tornado-like flows, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 183, p. 214-222, 2018.
- [18] H. Alrawashdeh, T. Stathopoulos, Wind pressures on large roofs of low buildings and wind codes and standards, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 147, p. 212-225, 2015.
- [19] Y. Toparlak, B. B. B. Maiheu, G. J. F. Van Heijst, A review on the CFD analysis of urban microclimate, *Renewable and sustainable energy reviews*, 80, p. 1613- 1640, 2017.
- [20] M. Lateb, C. M. T. Stathopoulos, C. Be'dard, Comparison of various types of k-ε models for pollutant emissions around a two-building configuration, *Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 115, 2013.
- [21] COST, *Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment*, 2007.
- [22] Y. Tominagaa, A. M. Ryuichiro Yoshie, Hiroto Kataoka, Tsuyoshi Nozue, Masaru Yoshikawa, Taichi Shirasawa, AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings, *Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96, p. 1749-1761, 2008.
- [23] Y. Tominaga, S. I. A. Takuya Kitahara, Yuki Arinami, Air flow around isolated gabled roof buildings with different roof pitches: Wind tunnel experiments and CFD simulations, *Building and Environment*, 84, p. 204- 2013, 2015.
- [24] ASCE, *Wind Tunnel Studies of Buildings and Structures*, American Society of Civil Engineer, Reston, Virginia, 1999.
- [25] Y. Tominaga, A. M., Shuzo Murakami, Satoshi Sawaki, Comparison of various revised k-ε models and LES applied to flow around a high-rise building model with 1:1:2 shape placed within the surface boundary layer, *Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96, p. 389- 411, 2008.
- [26] A. YUNUS, J. M. C. ÇENGEL, Fluid mechanic fundamentals, America, New York, McGraw-Hill, 2006.
- [27] B. Blocken, T. Stathopoulos, J. Carmeliet, CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems, *Atmospheric Environment*, 41(2), 238-252, 2007.
- [28] B. Blocken, T. S. J. P. A. J. Van Beeck, Pedestrian level wind conditions around buildings: Review of wind tunnel and CFD techniques and their accuracy for wind comfort assessment, *Building and Environment*, 100, p. 50-81, 2016.
- [29] Y. H. K. Meng, Turbulent measurements of the flow field around a high-rise building, wind eng. Jpn, 76, 1998.
- [30] B. Blocken, J. C. Ted Stathopoulos, CFD evaluation of wind speed conditions in passage between parallel buildings- effect of wall-function roughness modifications for the atmospheric boundary layer flow, *Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 95, p. 941-962, 2007.
- [1] H. Montazeri, B. Blocken, CFD simulation of wind-induced pressure coefficients on buildings with and without balconies: Validation and sensitivity analysis, *Building and Environment*, 60, p. 137-149, 2013.
- [2] H. Montazeri, F. Montazeri, CFD simulation of cross-ventilation in buildings using rooftop wind-catchers: Impact of outlet openings, *Renewable Energy*, 118, p. 502-520, 2018.
- [3] H. Awbi, *Ventilation of buildings*, Taylor and Francis, 2003.
- [4] L. Yang, B. J. He, M. Ye, Application research of ECOTECT in residential estate planning, *Energy and Buildings*, 72, p. 195-202, 2014.
- [5] D. Zhao, X. B. J. He, Effects of architectural shapes on surface wind pressure distribution: Case studies of oval-shaped tall buildings, *Building Engineering*, 12, p. 219-228, 2017.
- [6] Y. Jiang, Q. Chen, Study of natural ventilation in buildings by large eddy simulation, *Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 89(13), p. 1155-1178, 2001.
- [7] Z. T. Ai, C. M. Mak, Wind-induced single-sided natural ventilation in buildings near a long street canyon: CFD evaluation of street configuration and envelope design, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 172, p. 96-106, 2018.
- [8] P. Karava, T. Stathopoulos, A. K. Athienitis, Airflow assessment in cross-ventilated buildings with operable façade elements, *Building and Environment*, 46 (1), p. 266-279, 2011.

- [31] B. Li, J. Liu, J. Gao, Surface wind pressure tests on buildings with various non-uniformity morphological parameters, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 137, p. 14-24, 2015.
- [32] *Environmental Wind Engineering and Design of Wind Energy Structures*, Springer Wien, New York, 2011.
- [33] R. Jin, et al., Numerical investigation of wind-driven natural ventilation performance in a multi-storey hospital by coupling indoor and outdoor airflow, *Indoor and Built Environment*, 25(8), p. 1226-1247, 2016.