

Numerical Investigation of Interference Effects of Two Rectangular Tall Buildings on Aerodynamic Response

Meysam Shirzadeh Germi¹, Houshyar Eimani Kalehsar^{2*}

1- Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2- Associate professor, Department of Civil Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

ABSTRACT

In this numerical investigation, the effect of upstream and downstream interference of two identical tall buildings was evaluated using the computational wind engineering (CWE) method. In order to simulate three-dimensional turbulent wind flow with Reynolds numbers in the range of $1.4 \times 10^4 < Re < 8 \times 10^4$, the Large Eddy Simulation (LES) model was used. Mean and fluctuating coefficients of drag and lift and pressure distribution were used as the main criteria to evaluate the aerodynamic response of the principal building in different conditions of interference. Streamlines and vorticity contours were presented and their relationship to aerodynamic results was interpreted to provide a better understanding of the physics of the problem. According to the results, the shielding effect of the interfering building in most interference cases led to a reduction of the mean drag coefficient of the principal building compared to the isolated case. Compared to the isolated building, depending on the location of the interfering building, the fluctuating lift coefficient either increases or decreases. Upstream interfering buildings with sufficient distance to the principal building lead to an increase in the fluctuating lift coefficient of approximately about 50 percent. While, the fluctuating lift coefficient of the principal building decreases up to 37 percent, due to the closely spaced tandem interference states. While the mean pressure coefficient at the windward surface is not significantly sensitive to the interference states, it is strongly influenced by the different states of the interference at the lateral and leeward surfaces. Aerodynamic parameters were less sensitive to Reynolds number variations due to the fixed position of the flow separation in the sharp corners of the rectangular section and the zero angle of attack in this study. Changes in the Reynolds number resulted in variations of about 4 to 10% in the drag and lift coefficients of the principal building.

ARTICLE INFO

Receive Date: 07 December 2020

Revise Date: 17 March 2021

Accept Date: 07 April 2021

Keywords:

Computational wind
engineering
Tall buildings
Interference effect
Flow structure
Aerodynamic response

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.261009.2305>

*Corresponding author: Houshyar Eimani Kalehsar

Email address: hek@uma.ac.ir

بررسی عددی آثار همجواری دو ساختمان بلند با مقطع مستطیلی بر پاسخ آئرودینامیکی

میثم شیرزاده گرمی^۱، هوشیار ایمانی کله سر^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری مهندسی سازه، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- دانشیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده

در این مطالعه، اثر همجواری بالادست و پایین دست دو ساختمان بلند یکسان با استفاده از روش مهندسی باد محاسباتی ارزیابی شد. به منظور شبیه سازی های سه بعدی جریان آشفته باد با اعداد رینولدز در بازه $1/4 \times 10^4$ الی 8×10^4 ، مدل آشفتگی شبیه سازی گردابه بزرگ (LES) به کار گرفته شد. پاسخ آئرودینامیکی ساختمان اصلی در حالات مختلف همجواری با استفاده از ضرایب متوسط و نوسانی نیروهای در امتداد باد (طولی) و عمود بر باد (عرضی) و توزیع فشار بررسی شد. به منظور تحلیل نتایج و درک بیشتر از فیزیک مساله، خطوط جریان و تصاویر جریان گردبادی در فضای دوبعدی و سه بعدی ارائه شده و ارتباط آن با نتایج آئرودینامیکی تفسیر شد. با توجه به نتایج، اثر حفاظتی ساختمان همجوار در اغلب حالات همجواری، منجر به کاهش نیروی متوسط وارد بر ساختمان اصلی در امتداد باد در مقایسه با حالت منفرد شد. بسته به موقعیت ساختمان همجوار، نیروی عمود بر باد در ساختمان اصلی، نسبت به ساختمان منفرد دچار افزایش و کاهش گردید. به طوریکه، نیروی برا در حالات همجواری بالادست با فاصله کافی تا ساختمان اصلی، تا ۵۰ درصد افزایش داشته و در حالات همجواری پشت سر هم با فاصله نزدیک، حدوداً ۳۷ درصد کاهش یافت. ضریب فشار متوسط در سطح رو به باد حساسیت چندانی نسبت به حالات همجواری نداشت. در حالی که در سطوح جانبی و پشت به باد، این ضریب به شدت تحت تاثیر حالات مختلف همجواری قرار گرفت. با توجه به ثابت بودن نقاط جدایش جریان در گوشه های تیز رو به باد در ساختمان بلند با مقطع مستطیلی و زاویه حمله صفر درجه باد، پارامترهای آئرودینامیکی حاصل، حساسیت و وابستگی ناچیزی نسبت به تغییرات عدد رینولدز در این مطالعه نشان دادند. به نحوی که به ازای تغییرات عدد رینولدز، ضرایب نیروی پسا و برا در حدود ۴ الی ۱۰ درصد دچار تغییر شدند.

کلمات کلیدی: مهندسی باد محاسباتی، ساختمان بلند، اثر همجواری، ساختار جریان، پاسخ آئرودینامیکی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.261009.2305	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: 10.22065/jsce.2021.261009.2305	۱۴۰۰/۱۰/۳۰	۱۴۰۰/۰۱/۱۸	۱۴۰۰/۰۱/۱۸	۱۳۹۹/۱۲/۲۷	۱۳۹۹/۰۹/۱۷
هوشیار ایمانی کله سر hek@uma.ac.ir				*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

جریان پیرامون اجسام هوا بند دارای مقاطع دایره‌ای، مربع و مستطیل در پژوهش‌های فراوانی مورد بررسی قرار گرفته است. از دیدگاه مهندسی سازه، مطالعه دقیق آثار جریان باد بر ساختمان‌های بلند در فرآیند طراحی از اهمیت بالایی برخوردار است. در این راستا، مطالعات آزمایشگاهی در تونل‌های باد و در برخی موارد ارزیابی‌های میدانی بعنوان روش و ابزار اصلی مهندسی باد شناخته شده‌اند. در دهه‌های اخیر با توسعه علوم رایانه و پیشرفت در ارائه الگوریتم‌های عددی، مهندسی باد محاسباتی (CWE^۱) به عنوان شاخه‌ای از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD^۲) مورد استفاده محققان قرار گرفت [۱].

نیروهای آئرو دینامیکی و الگوی ریزش‌های گردبادی پیرامون دو جسم هوا بند، در مقایسه با حالت قرارگیری منفرد یک جسم، متفاوت خواهد بود. این اثر که به نام اثر همجواری^۳ معروف است، منجر به کاهش یا افزایش نیروهای حاصل از جریان بر یک جسم خواهد شد. عوامل اصلی تاثیرگذار بر اندرکنش بین ساختمان‌های همجوار شامل بافت زمین بالادست، شکل و اندازه ساختمان‌ها، جهت وزش باد و در نهایت نحوه قرارگیری و فاصله ساختمان‌ها نسبت به هم می‌باشند. پیچیدگی مسئله همجواری و وجود متغیرهای زیاد در آن، کمبود داده‌های آزمایشگاهی کافی و باور عموم مبنی بر اثر محافظتی^۴ ساختمان‌های همجوار در همه حالات، منجر به کمبود و فقدان راهنماهای جامع در خصوص اعمال اثر همجواری در طراحی‌ها شده است [۲]. در ادامه، مروری بر مطالعات گذشته در زمینه اثر همجواری مقاطع دایره‌ای و سپس مقاطع مستطیلی ارائه شده است.

زدراکوویچ [۳] آرایش‌های مختلف قرارگیری دو سیلندر در مقابل جریان را به سه دسته طبقه‌بندی کرد. در یک گروه، سیلندرها یکی پشت سر دیگری^۵ با فواصل طولی مختلف قرار می‌گیرند. در گروه دوم سیلندرها کنار همدیگر^۶ با فواصل عرضی مختلف با جریان مواجه می‌شوند. هر حالت قرارگیری دیگری که ترکیبی از دو حالت قبلی با فواصل طولی و عرضی مختلف باشد، به عنوان آرایش شطرنجی^۷ معرفی شده است. در این مطالعه مروری، تحقیقاتی پیرامون ضرایب آئرو دینامیکی نیروی در امتداد باد (پسا^۸) و عمود بر باد (بر^۹)، فشار پایه و در برخی موارد عدد استروهال حالت‌های مختلف همجواری دو سیلندر دایره‌ای انجام شده است. زدراکوویچ [۴] در تحقیقی دیگر، به دسته‌بندی آرایش‌های خوشه‌ای^{۱۰} دو، سه، چهار و چندین سیلندر دایره‌ای پرداخته است. او رژیم‌های اصلی جریان در حالت‌های مختلف همجواری را به سه دسته طبقه‌بندی کرد. ایگارش [۵] و [۶] در دو گزارش به بررسی آزمایشگاهی ویژگی‌های جریان پیرامون دو سیلندر دایره‌ای در حالت قرارگیری پشت سر هم پرداخت. اعداد رینولدز در بازه زیر بحرانی حدود $7/8 \times 10^3$ الی $5/2 \times 10^4$ و فاصله سیلندرها از ۱ تا ۵ برابر قطر مقطع متغیر بوده است. تغییرات الگوی جریان و پارامترهای آئرو دینامیکی نظیر ضریب پسا و ضریب فشار ناشی از حالات مختلف همجواری مورد بررسی و تفسیر قرار گرفته است. سان و گو [۷] مروری مختصر بر تحقیقات انجام شده پیرامون اثر همجواری دو مقطع دایره‌ای، مقاطع مستطیلی و برج‌های خنک کننده ارائه کردند. ایشان بر اهمیت و ضرورت مطالعات اثر همجواری، از هر دو دیدگاه تحقیق بنیادی در شاخه دینامیک سیالات و کاربردهای مهندسی تاکید کرده‌اند. سومنر و همکاران [۸] با انجام آزمایش‌ها در تونل باد نیروهای متوسط آئرو دینامیکی و فرکانس‌های ریزش‌های گردبادی را برای دو سیلندر دایره‌ای با آرایش شطرنجی با قطر یکسان اندازه‌گیری کردند. عدد رینولدز در بازه $3/2 \times 10^4$ الی $7/4 \times 10^4$ بوده و فاصله مرکز به مرکز سیلندرها از $1/125$ الی ۴ برابر قطر مقطع متغیر می‌باشد. زاویه حمله باد در آزمایش‌ها از ۰ الی ۹۰ درجه متغیر بوده است. نتایج برای سه حالت قرارگیری با فاصله کم، متوسط و زیاد ارائه و تفسیر شده‌اند. زو و آلام [۹] در یک مطالعه مروری به بررسی و جمع‌بندی مطالعات پیرامون دو سیلندر دایره‌ای و ناحیه پشت آن‌ها پرداخته‌اند. نکاتی مانند ساختار جریان، اعداد استروهال، نیروهای حاصل از سیال و آثار عدد رینولدز در این مطالعه پوشش داده شده است. گیرونی و

¹ Computational Wind Engineering

² Computational Fluid Dynamic

³ Interference effect

⁴ Shielding effect

⁵ Tandem

⁶ Side by side

⁷ Staggered

⁸ Drag

⁹ Lift

¹⁰ Cluster

همکاران [۱۰] جریان پیرامون دو سیلندر دایره‌ای در حالت قرارگیری پشت سر هم را با استفاده از مدل توربلانسی SAS^{۱۱} برای عدد رینولدز 2×10^5 شبیه‌سازی کردند. در این تحقیق شبیه‌سازی سه‌بعدی برای فواصل مختلف مرکز تا مرکز سیلندرها انجام گرفته است. نتایج شامل ضرایب متوسط و نوسانی نیرو، توزیع فشار و ساختار جریان در ناحیه پشت سیلندرها ارائه شده و آثار فاصله بین دو سیلندر تفسیر شده است.

ساکاموتو و هانیو [۱۱] در یک تحقیق آزمایشگاهی نیروهای آئرو دینامیکی شامل ضرایب پسا و برا یک سیلندر مربعی با نسبت ارتفاع به عرض ۳ را بررسی و گزارش کرده‌اند. هر سه حالت همجواری طبق دسته‌بندی زدراکوویچ مورد ارزیابی قرار گرفته است. خی و گو [۱۲] اثر همجواری بین دو و سه ساختمان بلند را در آزمایش‌های تونل باد بررسی و ارزیابی کردند. آثار حفاظتی و کانال‌گونه ناشی از همجواری در این تحقیق مورد بحث قرار گرفته است. ضریب همجواری برابر با لنگر پای ساختمان تحت اثر همجواری نسبت به لنگر در حالت منفرد، در حالات مختلف محاسبه و ارائه شده است. در تحقیقی دیگر توسط خی و گو [۱۳]، اثر همجواری دو و سه ساختمان بلند بر پاسخ عرضی در برابر باد به روش آزمایشگاهی مطالعه شده است. ضریب همجواری به ازای بافت‌های زمین بالادست متفاوت محاسبه شده و با حالت منفرد مقایسه شده است. لانکاداسو و ونگاداسان [۱۴] جریان پیرامون دو سیلندر مربعی یکسان در حالت قرارگیری پشت سر هم را به صورت عددی و دوبعدی شبیه‌سازی کردند. آثار فواصل قرارگیری سیلندرها و پارامتر برشی بی‌بعد k بر روی ضرایب آئرو دینامیکی مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به سرعت جریان و عرض سیلندر، در تمامی موارد عدد رینولدز برابر ۱۰۰ در نظر گرفته شده است. یک مطالعه سیستماتیک آزمایشگاهی به منظور ارزیابی اثر همجواری دو سیلندر مربعی در حالت قرارگیری کنار همدیگر توسط آلام و همکاران [۱۵] انجام گرفته است. آزمایش‌ها در تونل باد و با در نظرگیری عدد رینولدز برابر $4/7 \times 10^4$ به ازای فواصل قرارگیری متنوع اجرا شده است. نتایج حاصل در مورد مقطع مربعی تفاوت‌های بارزی در مقایسه با مقطع دایره‌ای دارد که ناشی از طبیعت متفاوت جدایش جریان در دو مقطع است. قولیا و همکاران [۱۶] در یک مطالعه مروری به دسته‌بندی پارامترهای مطالعه شده در زمینه اثر همجواری پرداخته و پیشنهادهاتی از نیازهای آینده ارائه کرده‌اند. سوهانکار [۱۷] مطالعه عددی جامعی پیرامون اثر همجواری دو مقطع مربعی در حالت قرارگیری پشت سر هم انجام داده است. با استفاده از شبیه‌سازی گردابه بزرگ، معادلات فیلتر شده ناویر-استوکس حاکم بر جریان با اعداد رینولدز در بازه 10^3 الی 10^5 تحلیل شده است. برای مطالعه جریان، پارامترهایی نظیر جریان گردبادی، توزیع فشار بر سطوح و ضرایب آئرو دینامیکی به ازای فواصل قرارگیری و اعداد رینولدز متفاوت ارائه و تفسیر شده‌اند. یو و همکاران [۱۸] همجواری دو ساختمان با قرارگیری‌های پشت سر هم، کنار همدیگر و شطرنجی را به صورت آزمایشگاهی مطالعه کرده و آثار آن بر توزیع فشار باد را ارزیابی کردند. در پیکربندی مدل‌ها نسبت‌های متفاوت عرض و ارتفاع ساختمان همجوار به ساختمان اصلی در نظر گرفته شده است. آثار محافظتی و کانال‌گونه (به ویژه در حالت قرارگیری کنار همدیگر) بر تغییرات فشار باد بر سطوح ساختمان به خوبی ارزیابی شده است. شارما و همکاران [۱۹] همجواری دو ساختمان بلند با نسبت ابعادی ۷:۱ را در حالت قرارگیری پشت سر هم با فواصل متفاوت مرکز به مرکز، به صورت عددی مطالعه کردند. در شبیه‌سازی سه‌بعدی از تکنیک DDES^{۱۲} استفاده شده است. رژیم‌های متفاوت جریان تحلیل و بررسی شده و آثار محافظتی ساختمان همجوار در برخی موارد مشاهده شده است.

در مطالعه حاضر، اثر همجواری دو ساختمان بلند استاندارد CAARC^{۱۳} در برابر جریان باد دارای عدد رینولدز در بازه $1/4 \times 10^4$ الی 8×10^4 با استفاده از روش مهندسی باد محاسباتی ارزیابی شده است. بررسی پارامترهای آئرو دینامیکی و ساختار جریان در حالات مختلف همجواری و تفسیر ارتباط آن‌ها در پیشینه تحقیق کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. از این رو، یکی از اهداف این تحقیق، افزایش درک فیزیکی طراحان ساختمان‌های بلند در مورد اثر همجواری در برابر باد است. بدین منظور خطوط جریان و توزیع فشار لحظه‌ای به همراه جریان‌های گردبادی آنی در فضای دوبعدی و سه‌بعدی در حالات مختلف همجواری در این پژوهش مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج آئرو دینامیکی بر مبنای ساختار جریان تفسیر شده است.

¹¹ Scale Adaptive Simulation

¹² Delayed Detached- eddy Simulation

¹³ Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council

۲- معادلات حاکم و مدل آشفتگی

در حال حاضر، استفاده از مدل آشفتگی شبیه‌سازی گردابه بزرگ (LES) به منظور تعیین بار باد با استفاده از تکنیک CFD توصیه شده است. این روش تقاضای محاسباتی کمتری نسبت به روش شبیه‌سازی عددی مستقیم (DNS) داشته و دقت و قابلیت اعتماد بیشتری نسبت به مدل‌های ترکیبی و ناویر - استوکس رینولدز متوسط (RANS) دارد [۲۰]. مدل LES گردابه‌های بزرگ مقیاس را با حل معادلات فیلتر شده ناویر - استوکس شبیه‌سازی کرده و آثار گردابه‌های کوچک را با به کارگیری مدل زیر - شبکه (SGS^{۱۴}) محاسبه می‌کند. معادلات فیلتر شده ناویر - استوکس طبق روابط (۱) و (۲) به شرح زیر به دست می‌آیند:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\sigma_{ij}) - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

در روابط فوق، ρ چگالی هوا (برابر 1.25 کیلوگرم بر متر مکعب)، \bar{u} مولفه‌ی سرعت سیال، \bar{P} فشار وارد بر سطح سیال توسط سیال خارجی احاطه کننده، σ_{ij} تانسور تنش ناشی از لزجت مولکولی طبق رابطه (۳) و τ_{ij} تنش مقیاس زیر شبکه طبق رابطه (۴) می‌باشند.

$$\sigma_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (3)$$

$$\tau_{ij} = \rho \bar{u}_i \bar{u}_j - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j, \tau_{ij} = -2\mu_t \bar{S}_{ij} \quad (4)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

در این روابط، μ لزجت، μ_t لزجت آشفته مدل زیر - شبکه، \bar{S}_{ij} تانسور نرخ کرنش و δ_{ij} دلتای کرونیکر می‌باشند. در این تحقیق، از مدل زیرشبکه WALE^{۱۵} ارائه شده توسط نیکود و داکروس [۲۱] به منظور محاسبه μ_t استفاده شده است. این مدل، جریان پیرامون دیواره را بدون یک فرآیند دینامیکی اما با دقت مناسب حل کرده و در نتیجه هزینه محاسباتی کمتری دارد [۲۰]. ویکرت و همکاران [۲۲] کارایی مدل زیرشبکه WALE را برای رژیم‌های مختلف جریان ارزیابی کردند. طبق نتایج، این مدل یک رهیافت موثر و سریع محسوب شده و در پیش‌بینی انتقال جریان از رژیم آرام به آشفته رضایت بخش است. در این مدل، μ_t لزجت جریان آشفته^{۱۶} طبق رابطه (۶) معرفی شده است.

$$\mu_t = \rho L_s^2 \frac{(S_{ij}^d S_{ij}^d)^{3/2}}{(\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{5/2} + (S_{ij}^d S_{ij}^d)^{5/4}} \quad (6)$$

L_s و S_{ij}^d به ترتیب در روابط (۷) و (۸) تعریف شده‌اند.

$$L_s = \min(\kappa d, C_w V^{1/3}) \quad (7)$$

$$S_{ij}^d = \frac{1}{2} (\bar{g}_{ij}^2 + \bar{g}_{ji}^2) - \frac{1}{3} \delta_{ij} \bar{g}_{kk}^2, \bar{g}_{ij} = \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (8)$$

در روابط فوق، κ ثابت ون کارمن^{۱۷}، d فاصله تا نزدیک‌ترین دیواره، C_w ثابت مدل WALE برابر ۰/۳۲۵ و V حجم سلول محاسباتی می‌باشند.

¹⁴ Sub-Grid Scale

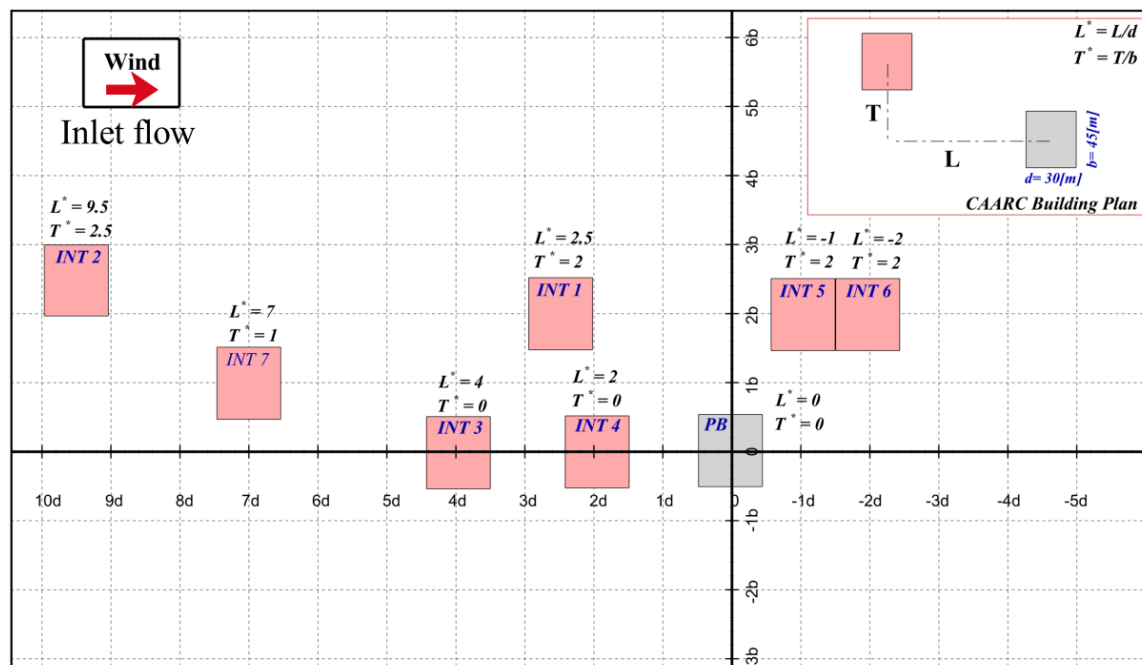
¹⁵ Wall Adapting Local Eddy-Viscosity

¹⁶ Turbulent Viscosity

¹⁷ Von Karman Constant

۳- موقعیت ساختمان‌های همجوار، دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

در این تحقیق، اثر همجواری بالادست و پایین‌دست دو ساختمان بلند استاندارد CAARC در حالات قرارگیری پشت سر هم و شطرنجی ارزیابی شده است. موقعیت‌های بحرانی قرارگیری ساختمان‌های همجوار طبق نتایج مطالعه آزمایشگاهی ارائه شده توسط تنگ و



شکل ۱: موقعیت ساختمان همجوار (IB) نسبت به ساختمان اصلی (PB) در حالات مختلف همجواری مورد مطالعه

کواک [۲۳] انتخاب شده است. در نتیجه، حالت همجواری بالادست و ۲ حالت همجواری پایین‌دست با نام‌های اختصاری INT1 الی INT7 طبق شکل ۱ مورد مطالعه قرار گرفت. فواصل طولی و عرضی بین ساختمان اصلی^{۱۸} و ساختمان همجوار^{۱۹} به ترتیب با L و T در شکل ۱ نمایش داده شده است. این فواصل در هر یک از حالات همجواری مورد مطالعه، به صورت بی‌بعد شده نسبت به ابعاد ساختمان و با نمادهای $L^* = L/d$ و $T^* = T/b$ ارائه شده‌اند. به منظور مقایسه نتایج و بررسی اثر همجواری و صحت‌سنجی فرآیند عددی، یک مدل منفرد از ساختمان CAARC نیز شبیه‌سازی شده است. ساختمان بلند استاندارد CAARC دارای پلان مستطیلی به ابعاد ۳۰ متر در امتداد باد (d)، ۴۵ متر در امتداد عمود بر باد (b) و به ارتفاع ۱۸۰ متر (به نسبت ابعادی ۱ : ۱.۵ : ۶) می‌باشد. با توجه به مشخصات استاندارد ارائه شده توسط انجمن تحقیقات هوانوردی (CAARC)، جرم مخصوص مدل ساختمانی برابر ۱۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب، فرکانس طبیعی ارتعاش مدل انعطاف‌پذیر ساختمان برابر ۰/۲ هرتز و نسبت میرایی برابر ۱٪ می‌باشند.

قرارگیری ساختمان اصلی در دامنه محاسباتی (تونل باد عددی) به نحوی است که فاصله مرز ورودی جریان از دیوار رو به باد ساختمان، $3H$ و فاصله مرز خروجی جریان تا دیوار پشت به باد ساختمان، $8H$ می‌باشد. عرض دامنه محاسباتی $4.7H$ و ارتفاع آن $4.5H$ در نظر گرفته شده است. به طوریکه H ارتفاع ساختمان استاندارد CAARC می‌باشد. نسبت بلوکه^{۲۰} (برابر نسبت سطح مقطع رو به باد ساختمان به سطح مقطع مرز ورودی جریان در دامنه محاسباتی)، در این پژوهش برابر $1/182$ درصد می‌باشد. مقدار مجاز نسبت بلوکه توسط باینکه و همکاران [۲۴] حداکثر ۳ درصد پیشنهاد شده است. در شکل ۲ نمایی از دامنه محاسباتی و ساختمان همجوار در حالت INT1 به همراه معرفی شرایط مرزی ارائه شده است.

¹⁸ Principal Building (PB)

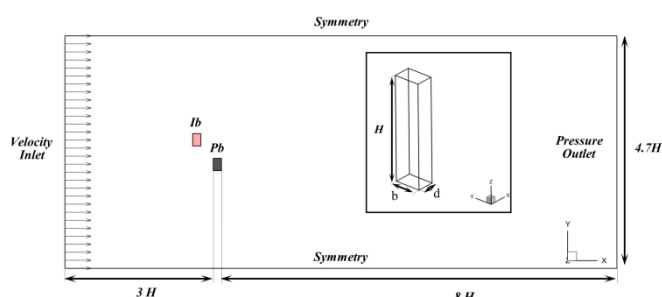
¹⁹ Interfering Building (IB)

²⁰ Blockage Ratio

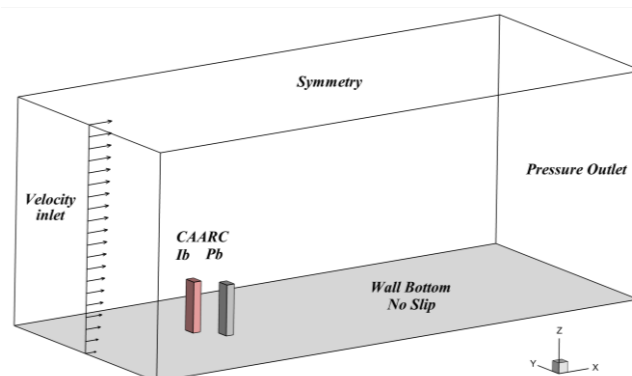
به منظور تعریف ویژگی جریان در مرزهای دامنه محاسباتی از شرایط مرزی موجود در نرم افزار انسیس فلونت استفاده شده است. برای تعریف پروفیل باد در مرز ورودی، شرط ورودی سرعت^{۲۱} با استفاده از توابع تعریف شده توسط کاربر^{۲۲} اعمال شده است. توزیع سرعت باد در ارتفاع دامنه محاسباتی با به کارگیری قانون توانی طبق رابطه (۹) و پروفیل شدت آشفتگی طبق رابطه (۱۰) در نظر گرفته شده است.

$$U_z = U_H \left(\frac{z}{H}\right)^\alpha \quad (9)$$

$$I_z = I_H \left(\frac{z}{H}\right)^{-\alpha-0.05} \quad (10)$$



(ب) پلان دامنه محاسباتی



(الف) نمای سه بعدی

شکل ۲: دامنه محاسباتی و شرایط مرزی: (الف) نمای سه بعدی، (ب) پلان

در روابط فوق، z بیانگر ارتفاع متغیر از کف تا راس دامنه محاسباتی، I_H و U_H به ترتیب شدت آشفتگی و سرعت باد در راس ساختمان (سرعت مبنا) و α ضریب قانون توانی می باشند. I_H و α وابسته به زبری محیط اطراف می باشند که در این پژوهش به ترتیب برابر ۰/۰۹ و ۰/۱۹ فرض شده اند. این فرض تقریباً بیانگر محیط حومه شهری بوده و در اغلب مطالعات آزمایشگاهی و عددی مورد استناد در بخش صحت سنجی این تحقیق، به کار گرفته شده است. به منظور پوشش دامنه وسیعی از مناطق جغرافیایی، سرعت مبنای باد در شبیه سازی ها در بازه ۱۰ الی ۷۲ متر بر ثانیه در مقیاس واقعی در نظر گرفته شده است.

در مرز خروجی جریان از شرط خروجی فشار^{۲۳} با لحاظ فشار استاتیک متوسط برابر با فشار اتمسفریک استفاده شده است. برای دیواره های جانبی از شرط مرزی تقارن^{۲۴} و برای کف دامنه محاسباتی و سطوح ساختمان نیز از شرط مرزی دیواره^{۲۵} بدون لغزش بهره گیری شده است. تکیه گاه و محل اتصال ساختمان به کف دامنه محاسباتی از نوع ثابت و مقید در برابر انتقال و دوران فرض شده است.

۴- فرآیند عددی

۴-۱- تنظیمات حل گر، شبکه بندی و همگرایی

معادلات حاکم بر جریان آشفته باد پیرامون ساختمان بلند استاندارد CAARC به روش حجم محدود و با به کارگیری نرم افزار انسیس فلونت^{۲۶} حل شده اند. در این مطالعه، از حل گر کوپل شده مبتنی بر چگالی با روش ضمنی استفاده شده است. در حل معادلات

²¹ Velocity Inlet

²² User Defined Function (UDF)

²³ Pressure outlet

²⁴ Symmetry

²⁵ Wall

²⁶ Ansys Fluent 17

از روش درون‌یابی مرتبه دوم^{۲۷} بهره‌گیری شد و به منظور تعیین گرادیان متغیرهای حل و گسسته‌سازی‌های مرتبه بالاتر از روش حداقل مربعات بر مبنای هر سلول^{۲۸} استفاده شد.

هنگام به کارگیری مدل LES، یک شبکه‌بندی با کیفیت، شامل شبکه ریزتر پیرامون ساختمان و در ناحیه پشت^{۲۹} مورد نیاز است. مش ریزتر در پیرامون ساختمان و ناحیه پشت آن به منظور مطالعه دقیق‌تر جدایش جریان در گوشه‌های تیز ساختمان و نیز ریزش‌های گردبادی در ناحیه پشت ضروری می‌باشد. در شبیه‌سازی اثر همجواری، کیفیت شبکه در فاصله بین دو ساختمان نیز از اهمیت بالایی برخوردار است.

در این مطالعه، به منظور دسترسی به نتایج مستقل از شبکه، از ۴ شبکه‌بندی با نام‌های G1، G2، G3 و G4 برای شبیه‌سازی مدل منفرد استفاده شد. با توجه به هندسه منظم و مستطیلی مدل‌های مورد بررسی، از شبکه ساختاریافته و مکعب شش وجهی بهره‌گیری شده است. تعداد سلول‌ها و نتایج بدست آمده به ازای شبکه‌بندی‌های متفاوت در جدول ۱ ارائه شده است. طبق نتایج، ضریب پسا متوسط و ضریب برا نوسانی به ازای شبکه‌بندی‌های G1، G2 و G3 تغییرات قابل توجهی نشان می‌دهند. در حالی که این اختلاف بین شبکه‌بندی G3 و G4 ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن است. در نتیجه G3 الگوی مناسبی جهت شبکه‌بندی دیگر مدل‌ها است. به منظور حفظ کیفیت شبکه، با افزایش فاصله ساختمان همجوار با ساختمان اصلی، تعداد سلول‌های شبکه در مدل‌های همجواری افزایش یافته‌اند. نمونه‌ای از شبکه‌بندی مدل‌های منفرد و INT1 با به کارگیری الگوی G3 در شکل ۳ ارائه شده است. نتایج مطالعه عددی براون و آوروچ [۲۵] در مورد ضرایب آئرو دینامیکی ساختمان بلند استاندارد CAARC به منظور مقایسه در جدول ۱ ارائه شده است.

جهت کنترل کیفیت شبکه‌بندی و حل دقیق‌تر جریان نزدیک دیواره، حداکثر مقدار کمیت بی‌بعد y^+ در نزدیکی سطوح و دیوارهای ساختمان بلند کمتر از ۵ است. این مقدار مطابقت مناسبی با توصیه توردال و همکاران [۲۰] داشته و شرایط حل جریان نزدیک دیواره با استفاده از مدل LES و مدل زیر-شبکه WALE را برآورده می‌سازد. گسسته‌سازی زمانی در این مطالعه با گام زمانی $\Delta t = 0.005$ (s) صورت گرفته است که منجر به عدد کورانت $(C = \frac{|u|\Delta t}{\Delta x})$ کمتر از ۲ در اغلب موقعیت‌های دامنه محاسباتی می‌گردد. این مقدار با توجه به شرایط حل گر مبتنی بر چگالی ضمنی، رضایت بخش است. با استفاده از تنظیمات فوق، مقادیر باقیمانده حل معادلات پیوستگی و مومنوم در حد 10^{-6} کنترل شده‌اند.

جدول ۱: معرفی شبکه‌بندی‌ها و مطالعه استقلال نتایج از شبکه‌بندی

عنوان شبکه-بندی	تعداد سلول	ضریب پسا متوسط (\bar{C}_d)	ضریب برا نوسانی ($C_{L,rms}$)
G1	۵۸۱۲۱۰	۱/۹۶	۰/۱۵۱
G2	۱۵۲۸۳۰۰	۱/۸۱	۰/۱۳۵
G3	۳۱۵۴۶۵۱	۱/۷۲	۰/۱۲۱
G4	۵۲۱۵۶۲۱	۱/۷۰	۰/۱۱۸
براون و آوروچ [۲۵]	--	۱/۶۶	۰/۱۰۶

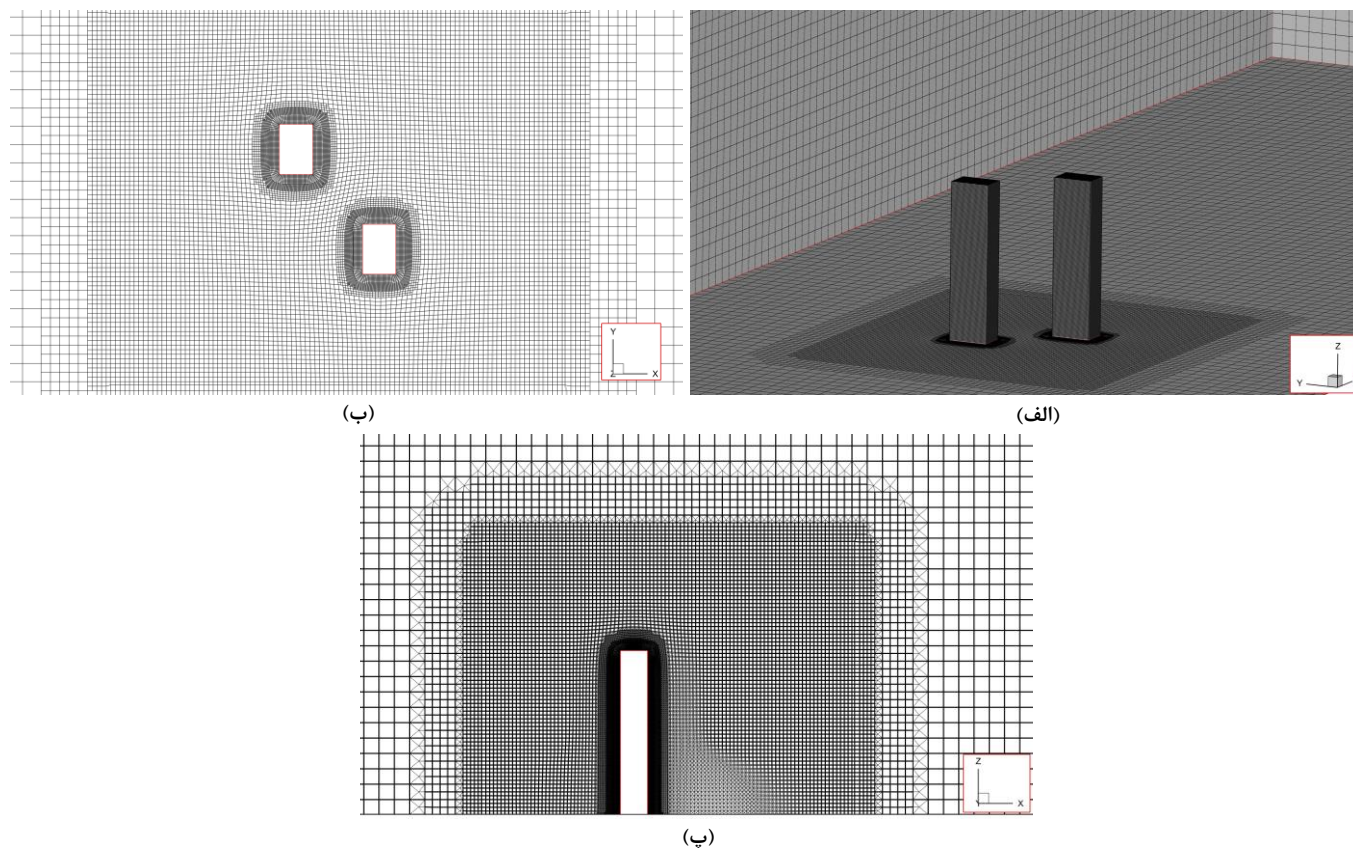
²⁷ Second-Order Upwind

²⁸ Least square cell based

²⁹ Wake

۴-۲- اعتبارسنجی فرآیند عددی

نتایج شبیه‌سازی عددی عاری از انواع خطاهای عددی نمی‌باشد. بنابراین، بررسی صحت نتایج شبیه‌سازی عددی با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش‌های تونل باد ضروری می‌باشد [۲۶]. تطبیق شرایط مرزی و فیزیکی شبیه‌سازی عددی مانند پروفیل سرعت باد ورودی و درصد بلوکه با شرایط موجود در مطالعه آزمایشگاهی مرجع، در فرآیند اعتبارسنجی بسیار مهم می‌باشد. بر این اساس، صحت نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی در این تحقیق با استفاده از نتایج آزمایشگاهی معتبر به شرح زیر مورد ارزیابی قرار گرفت.



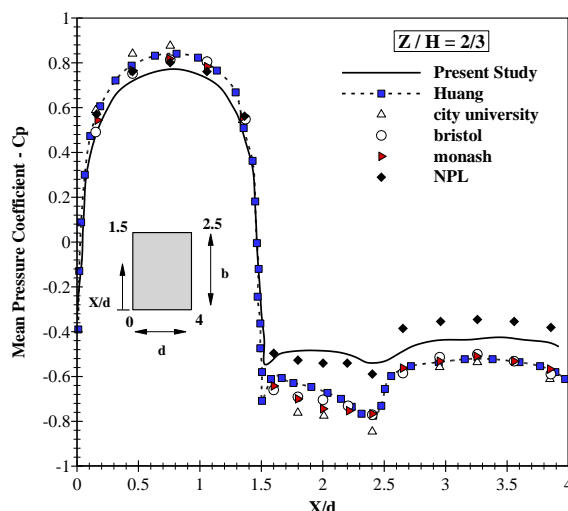
شکل ۳: نمونه‌ای از شبکه‌بندی ساختار یافته: الف) نمای سه‌بعدی مدل IJNT1، ب) پلان، پ) نمای جانبی

ضریب فشار متوسط پیرامون ساختمان بلند استاندارد CAARC در تراز ۰/۶۶ ارتفاع حاصل از شبیه‌سازی عددی حاضر در مقایسه با نتایج ۴ آزمایش تونل باد انجام گرفته در دانشگاه سیتی - انگلیس، دانشگاه بریستول - انگلیس، دانشگاه موناش - استرالیا و لابراتوار ملی فیزیک انگلیس (NPL) در شکل ۴ ارائه شده است. جزئیات این مطالعات آزمایشگاهی به همراه ضرایب فشار حاصل، توسط ملبورن [۲۷] به طور کامل ارائه شده است. ضریب فشار متوسط ارائه شده در کار عددی هوانگ و همکاران [۲۸] نیز به منظور مقایسه بهتر، گزارش شده است.

با توجه به شکل ۴، ضرایب فشار حاصل از مطالعات آزمایشگاهی و عددی پیشین، در دیوار رو به باد از مقدار صفر در $X/L=0$ به صورت صعودی تا میانه‌های دیوار افزایش یافته و به حداکثر مقدار خود تقریباً در وسط دیوار می‌رسد، سپس به صورت نزولی تا انتهای دیوار به مقدار صفر کاهش می‌یابد. در ابتدای دیواره کناری، گرادیان فشار منفی شدیدی رخ داده که متناظر با جدایش جریان و پدیده ریزش گردبادی می‌باشد. در دیواره کناری، مقادیر ضریب فشار نوسان داشته و سپس مقدار قدر مطلق آن در دیواره پشت به باد کاهش می‌یابد. طبق شکل ۴، مقادیر، الگو و آهنگ تغییرات ضریب فشار متوسط حاصل از کار عددی حاضر مطابقت مناسبی با مطالعات پیشین دارد.

۵- بررسی نتایج و تفسیر آن‌ها

نتایج شبیه‌سازی جریان آشفته باد پیرامون دو ساختمان بلند استاندارد CAARC در حالات همجواری مختلف برای اعداد رینولدز $(Re = \frac{UL}{\nu})$ در بازه $1/4 \times 10^4$ الی 8×10^4 در این بخش گزارش شده است. ابتدا آثار موقعیت قرارگیری ساختمان همجوار و تغییرات عدد رینولدز بر پارامترهای آئرو دینامیکی ساختمان اصلی، نظیر نیروهای پسا، برا و توزیع فشار روی سطح، ارزیابی شده‌اند. سپس، ساختار جریان با استفاده از خطوط جریان، توزیع فشار و گردبادهای آبی بررسی شده و ارتباط آن با نتایج آئرو دینامیکی تفسیر شده است.



شکل ۴: ضریب فشار متوسط در پیرامون ساختمان در تراز 0.66 ارتفاع، مقایسه نتایج تحقیق حاضر و مطالعات آزمایشگاهی و عددی پیشین

تعیین پاسخ ساختمان‌های بلند در برابر باد در فرآیند طراحی امری ضروری می‌باشد. نیروهای موثر بر ساختمان در امتداد باد و عمود بر باد اغلب مد نظر طراحان قرار دارند. این نیروها به صورت بی‌بعد بعنوان ضرایب پسا و برا به ترتیب طبق روابط ۱۱ و ۱۲ ارائه می‌گردند.

فشار سطحی وارد بر ساختمان نیز از پارامترهای مهم در ارزیابی اثر باد بر ساختمان‌های بلند می‌باشد. ضریب فشار متوسط بی‌بعد شده نسبت به فشار سرعتی در ارتفاع مرجع، طبق رابطه ۱۳ در این بخش ارائه شده است.

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2}\rho U_H^2 bH} \quad (11)$$

$$C_l = \frac{F_l}{\frac{1}{2}\rho U_H^2 bH} \quad (12)$$

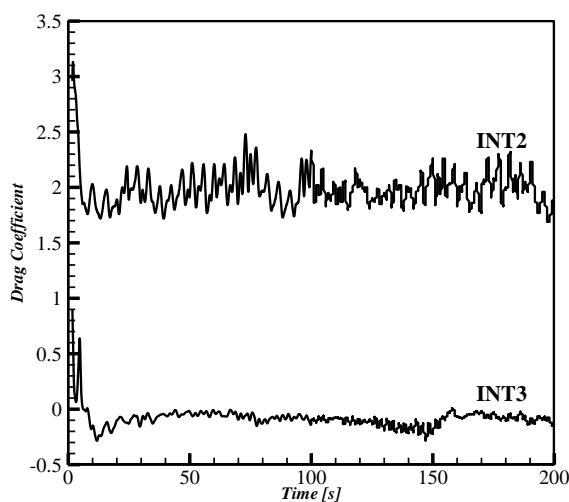
$$C_p = \frac{\bar{p} - p_0}{\frac{1}{2}\rho U_H^2} \quad (13)$$

در روابط فوق، F_d ، F_l و \bar{p} به ترتیب نیروی در امتداد باد، نیروی عمود بر باد و فشار متوسط اندازه‌گیری شده در سطح ساختمان می‌باشند. p_0 فشار استاتیک و U_H سرعت باد در ارتفاع مرجع (تراز بام ساختمان) می‌باشند.

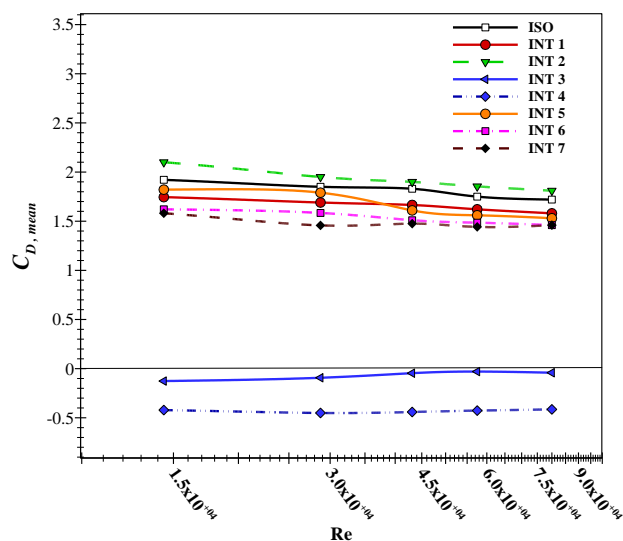
۵-۱- ضریب پسا متوسط ساختمان اصلی تحت حالات همجواری

در شکل ۵ ضرایب پسا متوسط ساختمان اصلی به ازای حالات مختلف همجواری و سرعت‌های مختلف وزش باد متناظر با اعداد رینولدز $1/4 \times 10^4$ الی 8×10^4 ارائه شده است. علاوه بر آن، نمونه‌هایی از تاریخچه زمانی تغییرات ضریب نیروی پسا برای حالات همجواری INT2 و INT3 در شکل ۵ (ب) قابل مشاهده می‌باشند. قرارگیری ساختمان همجوار در اغلب حالات شطرنجی، پشت سر هم و پایین‌دست منجر به کاهش ضریب پسا متوسط ساختمان اصلی شده و در نتیجه، اثر محافظتی در اغلب موارد مشهود می‌باشد. در حالت همجواری

INT2 ضریب پسا ساختمان اصلی نسبت به حالت منفرد حدودا ۵ الی ۹ درصد افزایش داشته است. این حالت مربوط به قرارگیری شطرنجی با فاصله کافی برای توسعه جریان‌های برشی ناشی از جدایش جریان و ریزش گردبادی در پشت ساختمان همجوار بالادست می‌باشد. در دیگر حالات همجواری شطرنجی (INT1 و INT7) ضریب پسا متوسط ساختمان اصلی در مقایسه با حالت منفرد، به ترتیب حدودا ۸ و ۱۵ درصد کاهش یافته است. در حالت پشت سر هم و فاصله $L^*=2$ (مورد INT4)، ساختمان اصلی کاملا در ناحیه پشت ساختمان همجوار مستغرق شده و در سطح رو به باد آن نیز فشار منفی ایجاد می‌گردد. در واقع اختلاف فشار بین سطوح رو به باد و پشت به باد ساختمان اصلی ناچیز بوده و منجر به ضریب پسا منفی می‌گردد. این نکته در شکل ۷ (توزیع ضریب فشار متوسط پیرامون ساختمان اصلی) قابل مشاهده می‌باشد. در این حالت همجواری، ریزش‌های گردبادی در فاصله بین دو ساختمان شدت کمتری داشته و ریزش‌های عمده در ناحیه پشت ساختمان اصلی اتفاق افتاده است (شکل ۹ ج). در نتیجه به ازای هر ۵ سرعت وزش باد، ضریب پسا متوسط حالت همجواری INT4 حدودا در بازه -0.4 الی -0.45 در نوسان است. با افزایش فاصله L^* به ۴ (مورد INT3) ضریب پسا افزایش یافته و به سمت مقادیر مثبت حرکت می‌کند. به طوریکه در این حالت ضریب پسا متوسط هنوز منفی بوده و نزدیک صفر هست. طبق شکل ۹ (ث)، در حالت همجواری INT3 در فاصله بین دو ساختمان نیز ریزش‌های گردبادی مشاهده شده است. حالات همجواری پایین دست شامل موارد INT5 و INT6 منجر به کاهش ضریب پسا متوسط ساختمان اصلی نسبت به ساختمان منفرد به ترتیب در حدود ۱۱ و ۱۵ درصد شده است. قرارگیری ساختمان همجوار در پایین دست، منجر به تضعیف ریزش‌های گردبادی شده و سبب کاهش فشار منفی در سطح پشت به باد ساختمان اصلی شده است (اشکال ۹ ح و چ را ببینید). با توجه به شکل ۵، تغییرات عدد رینولدز در بازه مورد مطالعه، تاثیر ناچیزی بر ضریب پسا متوسط ساختمان اصلی دارد. این امر با توجه به موقعیت ثابت جدایش جریان در گوشه‌های تیز مقطع مستطیلی ساختمان استاندارد CAARC و زاویه حمله صفر مورد انتظار بود. علاوه بر این، نسبت طول در جهت جریان (d) به عرض عمود بر جریان ساختمان (b) در این تحقیق برابر 0.66 می‌باشد. این نسبت هندسی منجر به عدم بازگشت مجدد جریان روی دیواره‌های کناری شده و در نتیجه آثار عدد رینولدز کمتر می‌شود.



ب) تاریخچه زمانی ضریب پسا در حالات همجواری INT2 و INT3، $Re = 8 \times 10^4$



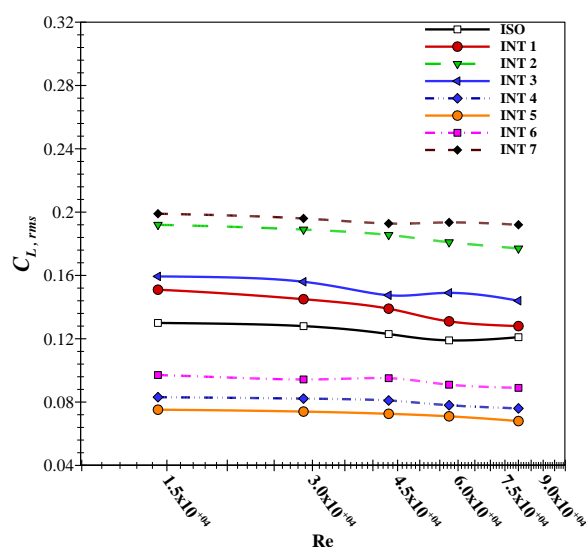
الف) ضریب پسا متوسط ساختمان اصلی

شکل ۵: مقادیر متوسط و تاریخچه زمانی ضریب پسا ساختمان اصلی در مقابل تغییرات سرعت باد و حالات مختلف همجواری

۵-۲- ضریب برا نوسانی ساختمان اصلی تحت حالات همجواری

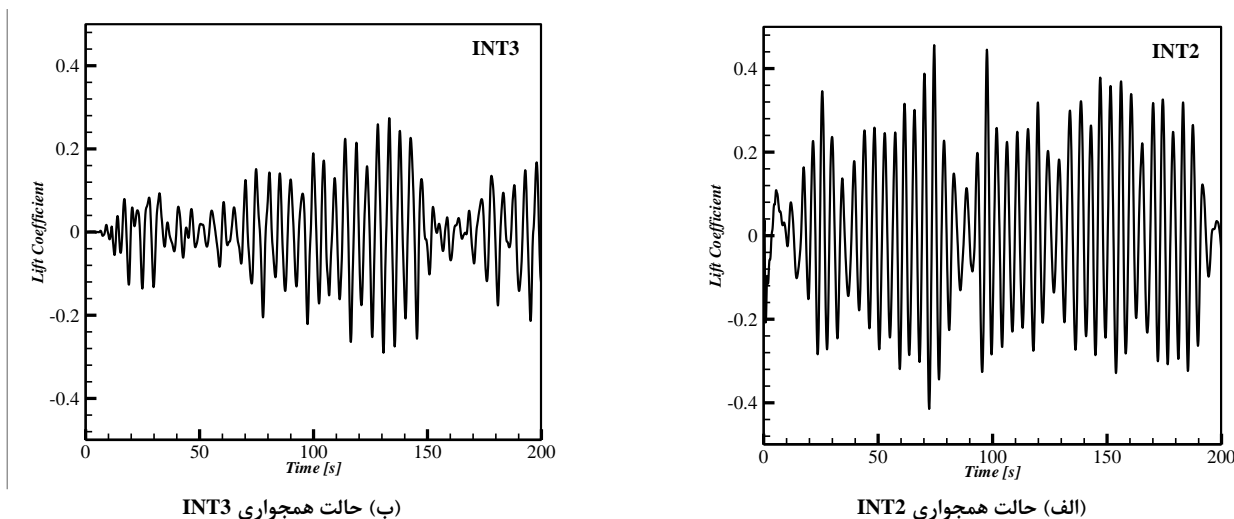
به منظور بررسی آثار دینامیکی و نوسانی باد بر ساختمان بلند استاندارد CAARC ضریب برا نوسانی برای حالات مختلف همجواری در شکل ۶ ارائه شده است. بدین منظور جذر میانگین مربعات (RMS) تاریخچه زمانی ضریب پسا در نظرگیری حداقل ۱۰ چرخه ریزش

گردبادی محاسبه شده است. نمونه‌ای از تاریخچه زمانی ضریب برا ساختمان اصلی در حالات همجواری INT2 و INT3 در شکل ۷ ارائه شده است. در بررسی حالات همجواری شطرنجی دو رفتار متفاوت مشاهده شد. در موارد INT2 و INT7 به ترتیب در فواصل طولی بی‌بعد ۷ و ۹/۵، ضریب برا نوسانی ساختمان اصلی در مقایسه با حالت منفرد، حدوداً ۵۵ و ۴۶ درصد افزایش یافته است. در این حالات ساختمان اصلی در معرض ناحیه پشت ساختمان همجوار بالادست بوده و لایه‌های برشی جدا شده از ساختمان همجوار سرعت بالایی دارند. این رفتار در ادبیات تحقیق به اندرکنش ناحیه پشت^{۳۰} موسوم است. در همجواری شطرنجی با فاصله نزدیک‌تر به ساختمان اصلی (مورد INT1)، که فاصله طولی بی‌بعد کمتر از ۳ باشد، مقدار ضریب برا نوسانی نسبت به دو حالت دیگر کاهش یافته و به طور متوسط ۱۰ درصد بیشتر از حالت منفرد می‌باشد. در این حالت، فاصله کافی جهت گسترش و توسعه لایه‌های برشی جدا شده از ساختمان بالادست فراهم نبوده و ریزش‌های گردبادی بین دو ساختمان شدت کمتری دارند (شکل ۱۰ (ب، پ، ت) را ببینید). در حالت همجواری پشت سر هم با فاصله $L^*=2$ ضریب برا نوسانی ساختمان اصلی نسبت به حالت منفرد، حدوداً ۳۷ درصد کاهش یافته است. با افزایش فاصله به $L^*=4$ ضریب برا نوسانی افزایش یافته و حدوداً ۲۰ درصد بیشتر از حالت منفرد می‌باشد. (شکل ۶ را ببینید). در حالت پشت سر هم با فواصل نزدیک، ریزش‌های گردبادی در ناحیه پشت ساختمان بالادست حالت تناوبی نداشته در حالی که با افزایش فاصله، ریزش‌های تناوبی شکل گرفته است. دو حالت همجواری پایین‌دست INT5 و INT6 منجر به کاهش ضریب برا نوسانی ساختمان اصلی به ترتیب برابر ۴۰ و ۲۵ درصد نسبت به حالت قرارگیری منفرد شدند. حساسیت کم ضریب برا نوسانی به تغییرات عدد رینولدز مشابه ضریب پسا متوسط در شکل ۶ مشاهده می‌گردد.



شکل ۶: ضریب برا نوسانی ساختمان اصلی در مقابل تغییرات سرعت باد و حالات مختلف همجواری

³⁰ Wake Interaction



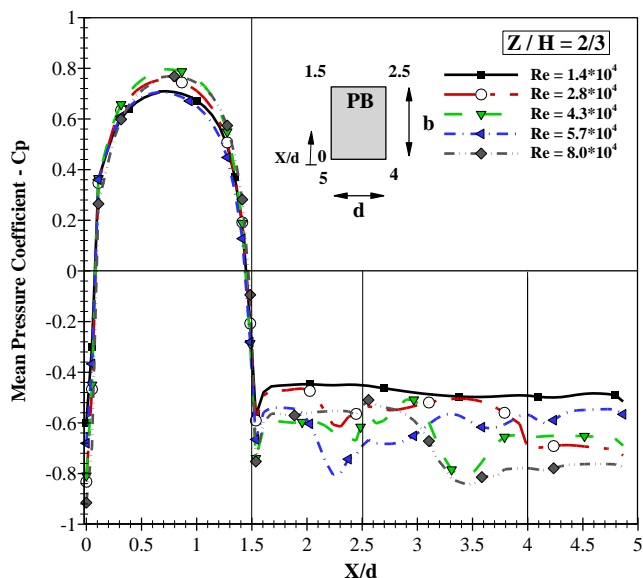
شکل ۷: تاریخچه زمانی ضریب برا ساختمان اصلی در حالات همجواری INT2 و INT3، $R_e = 8 \times 10^4$

۵-۳- ضریب فشار متوسط و توزیع فشار در وجوه قائم ساختمان اصلی تحت حالات همجواری

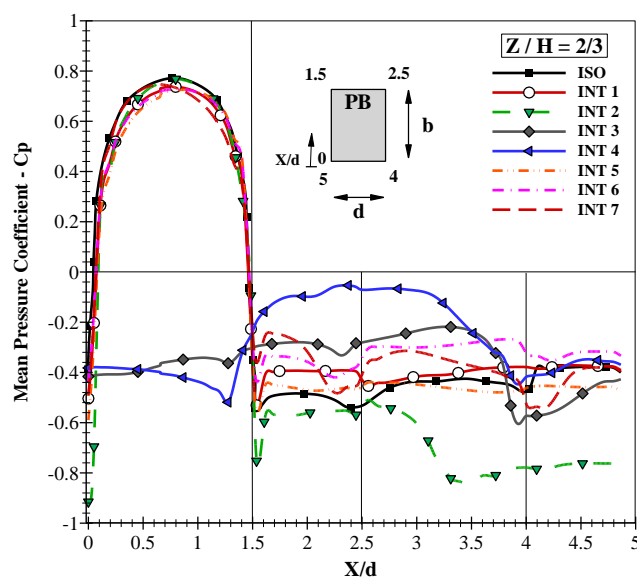
ضریب فشار متوسط روی محیط ساختمان استاندارد CAARC در تراز ۰/۶۶ ارتفاع به ازای حالات مختلف همجواری و عدد رینولدز 8×10^4 در شکل ۸ ارائه شده است. ضریب فشار متوسط در دیواره رو به باد ساختمان ($0 < x/d < 1.5$) در حالات همجواری شطرنجی و پایین دست رفتاری مشابه به حالت منفرد داشته و مقدار آن در وسط دیواره به حداکثر رسیده است. در حالت همجواری پشت سر هم (موارد INT3 و INT4) به دلیل قرارگیری کامل ساختمان اصلی در ناحیه کم فشار پشت ساختمان بالادست، وجه رو به باد نیز دارای فشار منفی می باشد. ضریب فشار متوسط در دیواره های کناری و پشت به باد در همه حالات همجواری منفی بوده و بیانگر حالت مکشی جریان باد می باشد. برخلاف دیواره رو به باد، ضریب فشار در سایر دیوارها نوسانات قابل توجهی دارد. در موارد INT2 و INT7 اختلاف ضریب فشار بین دو دیواره کناری، بیشتر از سایر حالات همجواری می باشد. در نتیجه، ضریب برا نوسانی این دو مورد طبق شکل ۶ بیشتر از سایر موارد بوده است.

به منظور بررسی آثار تغییرات سرعت جریان باد بر توزیع فشار روی محیط و سطوح جانبی ساختمان بلند استاندارد CAARC، ضریب فشار متوسط در تراز ۰/۶۶ ارتفاع به ازای ۵ سرعت جریان باد در شکل ۹ ارائه شده است. تغییرات عدد رینولدز تاثیر ناچیزی بر ضرایب فشار در سطح رو به باد داشته است. در حالی که در نواحی با فشار منفی، تغییرات عدد رینولدز تاثیر قابل توجهی بر ضرایب فشار دارد. طبق شکل ۸، با افزایش عدد رینولدز، مقدار قدر مطلق ضریب فشار منفی افزایش یافته و به بیشترین مقدار خود در اعداد رینولدز 8×10^4 و $5/7 \times 10^4$ رسیده است. این نتایج مطابقت مناسبی با یافته های منگ و همکاران [۲۹] دارد.

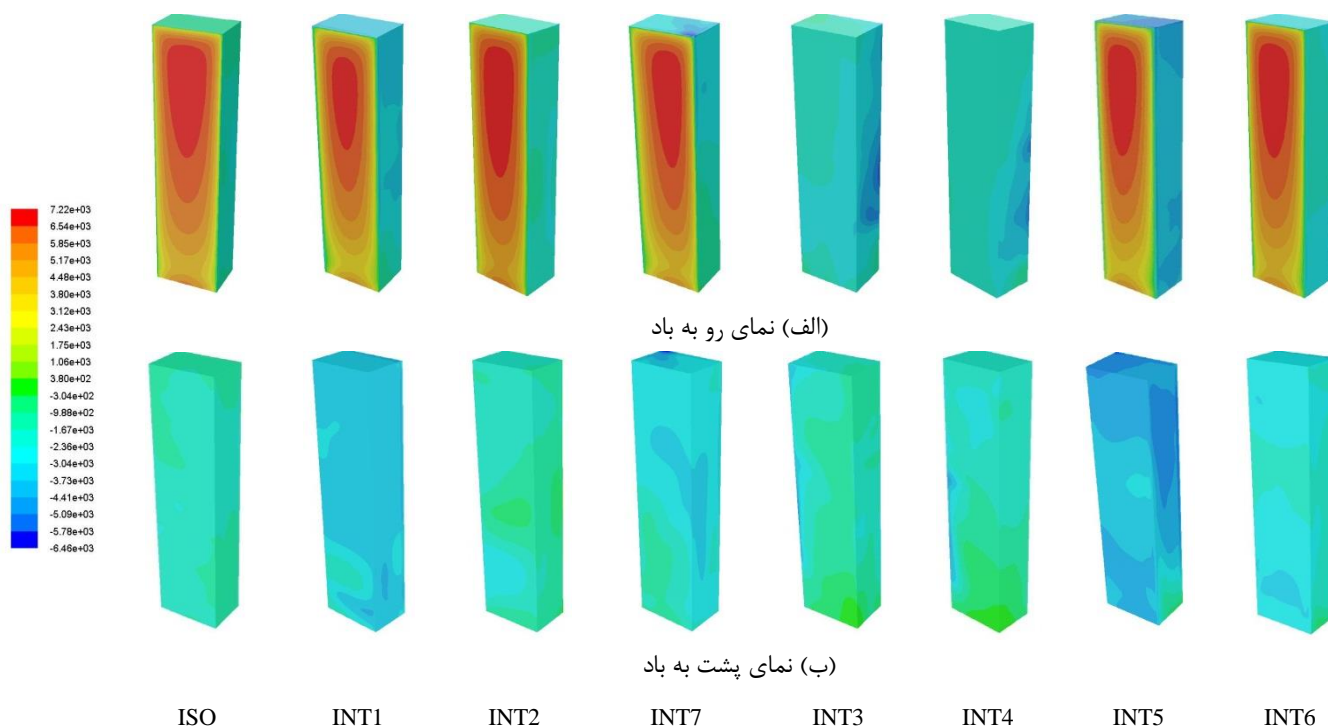
در شکل ۱۰، توزیع فشار در وجوه قائم ساختمان اصلی تحت همه حالات همجواری و نیز حالت قرارگیری منفرد ساختمان بلند ارائه شده است. در حالات همجواری شطرنجی بالادست و پایین دست، وجه رو به باد ساختمان اصلی در معرض فشار مثبت (دمش) بوده و شدت و نحوه توزیع آن مشابه به حالت منفرد می باشد. در حالی که، در حالات همجواری پشت سرهم بالادست (INT3, INT4) وجه رو به باد ساختمان اصلی تحت تاثیر ناحیه پشت ساختمان همجواری بوده و دارای فشار منفی (مکش) می باشد. وجوه جانبی و پشت به باد ساختمان اصلی در همه حالات همجواری دارای فشار منفی می باشند. الگوی توزیع فشار و شدت آن در این وجوه تحت تاثیر موقعیت قرارگیری ساختمان همجواری بوده و در مقایسه با حالت منفرد متفاوت می باشد.



شکل ۹: ضریب فشار متوسط در پیرامون ساختمان اصلی به ازای سرعت‌های متفاوت باد، حالت همجواری INT2



شکل ۸: ضریب فشار متوسط در پیرامون ساختمان اصلی در حالات مختلف همجواری



شکل ۱۰: توزیع فشار در وجوه قائم ساختمان اصلی تحت حالات همجواری و قرارگیری منفرد: الف) نمای رو به باد، ب) نمای پشت به باد

۴-۵ ساختار جریان

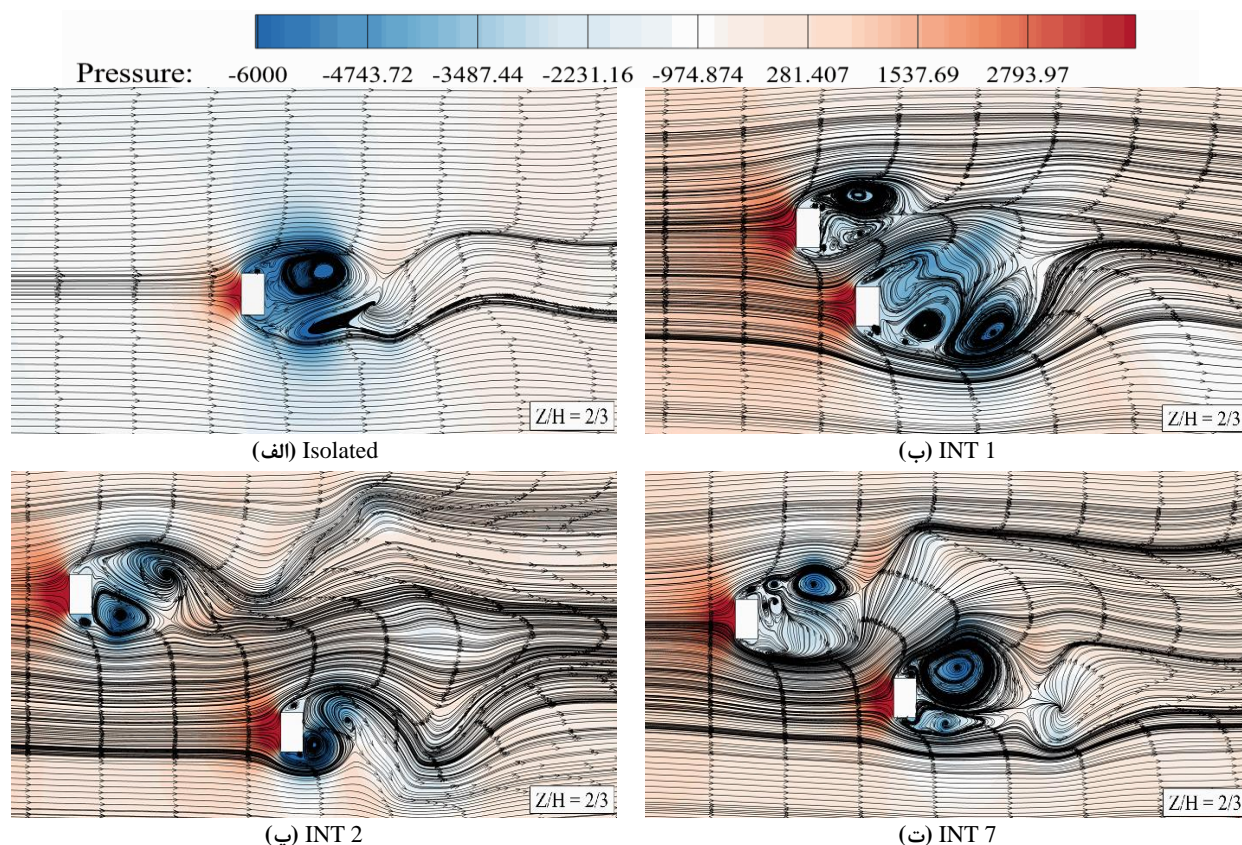
بررسی ساختار جریان پیرامون ساختمان‌های بلند به منظور افزایش درک فیزیکی طراحان سازه از جریان باد بسیار موثر می‌باشد. به ویژه تاثیر ساختمان همجوار بر ساختار جریان و بررسی ارتباط آن با نیروهای وارد بر ساختمان اصلی، امری ضروری می‌باشد که در

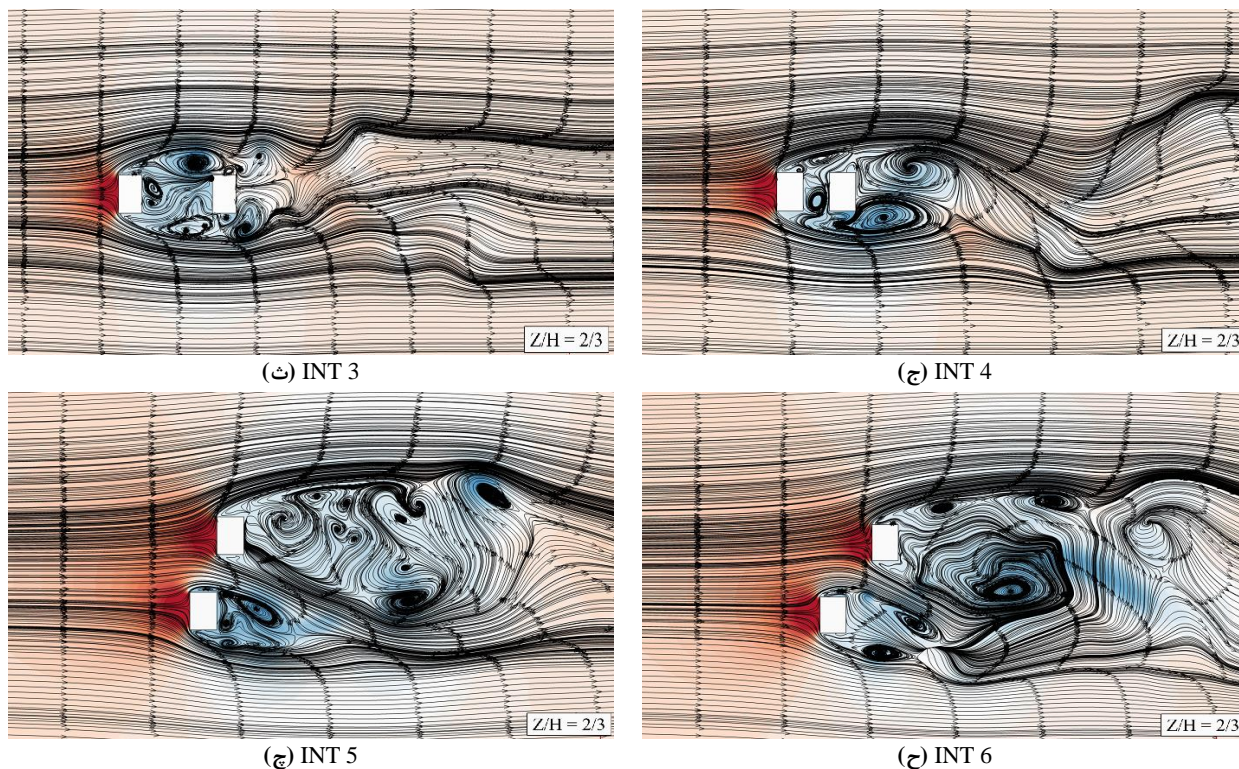
پیشینه تحقیق کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این بخش، ساختار جریان با استفاده از خطوط جریان، توزیع فشار و جریان گردبادی^{۳۱} مورد بررسی قرار گرفته است. در انتهای این بخش، تصاویر جریان باد و نحوه برخورد آن با ساختمان‌های بلند همجوار در فضای سه‌بعدی به منظور افزایش درک فیزیکی از تغییرات ساختار جریان پیرامون ساختمان‌های بلند، ارائه شده است.

۵-۴-۱- خطوط جریان و توزیع فشار پیرامون ساختمان‌های همجوار

خطوط جریان به همراه توزیع فشار لحظه‌ای پیرامون ساختمان‌های بلند در حالات مختلف همجواری تحت عدد رینولدز 8×10^4 و در تراز 0.66 ارتفاع در شکل ۱۱ ارائه شده است. طبق شکل ۱۱ (الف)، جریان در گوشه‌های تیز ساختمان منفرد جدا شده و به نواحی کناری و پشت منحرف می‌گردد. این نکته منجر به ریزش‌های گردبادی و در نتیجه ایجاد فشار منفی در نواحی کناری و پشت ساختمان شده است.

در موارد همجواری شطرنجی، توزیع فشار در قسمت رو به باد ساختمان اصلی مشابه حالت منفرد بوده و جدایش جریان از الگوی یکسان تبعیت می‌کند. در حالی که مقادیر فشار منفی در نواحی کناری و پشت ساختمان اصلی، تقارن و یکنواختی موجود در حالت منفرد را ندارد. افزایش سرعت لایه‌های برشی جدا شده در حالات همجواری شطرنجی و برخورد آن‌ها با ساختمان اصلی، منجر به تغییرات فشار منفی در دو قسمت کناری شده است. با توجه به اشکال ۱۱ (ب، پ، ت)، خطوط جریان و گردابه‌های تشکیل شده در ناحیه کناری و پشت ساختمان اصلی کاملاً نامتقارن بوده و از اندازه و شدت متفاوتی برخوردار هستند. این عوامل سبب افزایش ضریب برانوسانی ساختمان اصلی تحت همجواری‌های شطرنجی شده است.





شکل ۱۱: توزیع خطوط جریان و فشار پیرامون ساختمان‌های بلند، دید از پلان

در حالات همجواری پشت سر هم، ساختمان اصلی کاملاً در ناحیه پشت ساختمان بالادست مستغرق شده و تمام سطوح آن در معرض فشار منفی می‌باشد. طبق نمودار شکل ۸ و شکل ۱۱ (ث)، در مورد INT3 تغییرات فشار بین سطوح رو به باد و پشت به باد ناچیز بوده و این امر سبب ایجاد ضریب پسا منفی و نزدیک به صفر شده است. در مورد INT4 مکش سطح رو به باد شدیدتر از سطح پشت به باد بوده و در نتیجه ضریب پسا منفی و در خلاف جهت جریان حاصل شده است (شکل ۵). با توجه به شکل ۱۱ (ث)، جریان‌های گردبادی پشت ساختمان بالادست و در فاصله آزاد بین دو ساختمان همجوار تشکیل یافته است. در حالی که با کمتر شدن فاصله آزاد، دو ساختمان همجوار رفتاری شبیه ساختمان منفرد داشته و جریان گردبادی در ناحیه پشت ساختمان پایین دست شکل گرفته است (شکل ۱۱ (ج)). در ادبیات تحقیق به این رژیم جریان، حالت بازگشت مجدد^{۳۲} اطلاق شده است.

در دو حالت همجواری پایین دست (INT5 و INT6)، عرض ناحیه پشت ساختمان اصلی در مقایسه با همجواری‌های شطرنجی کمتر بوده و جریان‌های گردبادی تشکیل شده اندازه کوچک‌تری دارند (شکل ۱۱ (ج، ح)). مقادیر فشار منفی در ناحیه پشت ساختمان اصلی در این دو حالت کمتر از دیگر حالات همجواری می‌باشد. در نتیجه، ضرایب پسا متوسط و برا نوسانی ساختمان اصلی در حالات همجواری پایین دست در این تحقیق مقادیر کمتری نسبت به حالت منفرد دارند.

۴-۲-۵- جریان‌های گردبادی در ناحیه پشت ساختمان‌های همجوار

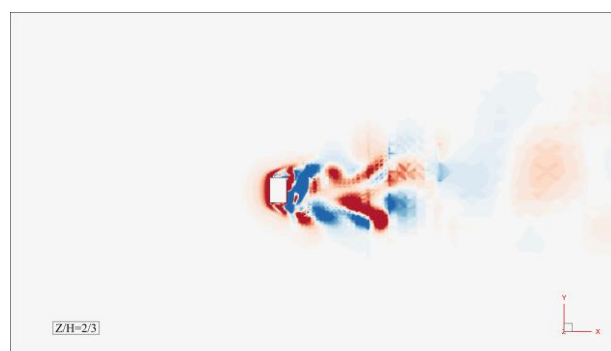
جریان‌های گردبادی آبی پیرامون ساختمان منفرد و همه حالات همجواری در تراز ۰/۶۶ ارتفاع و تحت جریان با عدد رینولدز 8×10^4 در شکل ۱۲ ارائه شده است. جریان‌های گردبادی بعنوان معیاری برای بررسی ریزش‌های گردبادی تولید شده در حالات مختلف همجواری در این تحقیق ارائه شده است. شدت جریان گردبادی وارد بر سطح رو به باد ساختمان‌های بالادست کم بوده و با عبور جریان از ساختمان‌ها افزایش می‌یابد و در نتیجه ریزش‌های گردبادی نیز تولید می‌شوند. بنابراین، نواحی با شدت جریان گردبادی بالا و فشار کم در منطقه پشت ساختمان بالادست تشکیل می‌یابند. تغییرات اندازه و شکل جریان‌های گردبادی نیز در این نواحی قابل توجه است [۱۷]. با توجه به شکل ۱۰، الگوی تغییرات ریزش‌های گردبادی حاصل از جریان باد پیرامون ساختمان اصلی در این تحقیق، مطابقت مناسبی با

³² Reattachment

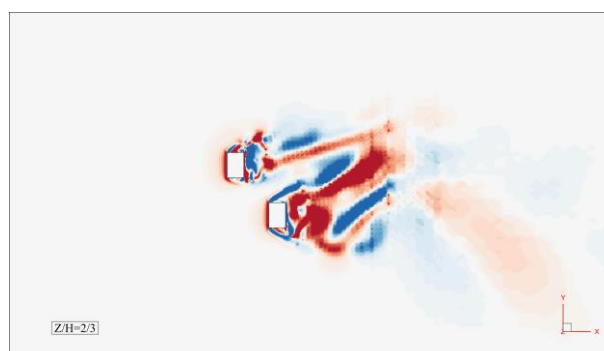
توزیع فشار ارائه شده در شکل ۱۱ دارد. با بررسی اندازه، شکل و آرایش جریان‌های گردبادی در ناحیه پشت ساختمان اصلی به ازای حالات مختلف همجواری در شکل ۱۲، تقویت ریزش‌های گردبادی در حالات همجواری شطرنجی (INT1, INT2, INT7) و تضعیف آن‌ها در حالات همجواری پایین دست و پشت سر هم در فاصله نزدیک (INT4, INT5, INT6) مشهود می‌باشد. این نکات را می‌توان در تفسیر افزایش و کاهش ضریب نوسانی برا طبق شکل ۶ در نظر گرفت.

۵-۴-۳- خطوط جریان در فضای سه‌بعدی

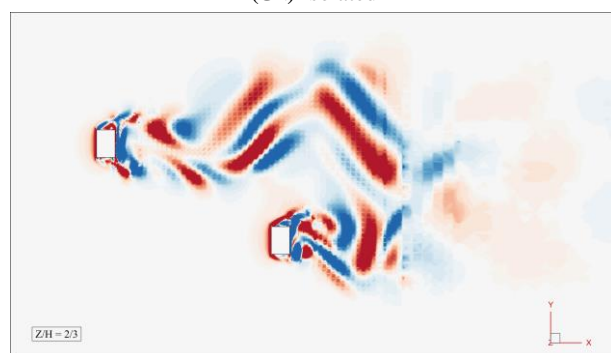
در این بخش، خطوط جریان در فضای سه‌بعدی در همه حالات همجواری مورد مطالعه در این پژوهش ارائه شده‌اند. الگوی ریزش‌های گردبادی تشکیل یافته پیرامون ساختمان‌های بلند مستغرق در جریان باد، در سه تراز ارتفاعی مختلف (۵ متری، ۸۰ متری و ۱۶۰ متری) در قالب خطوط جریان در شکل ۱۳ در حالات همجواری مختلف ارائه شده است. با توجه به شکل ۱۳، جدایش جریان در ترازهای ارتفاعی ۵ و ۸۰ متری در لبه‌های رو به باد ساختمان اصلی و همجوار رخ داده است. در ارتفاع ۱۶۰ متری علاوه بر لبه‌ها، جدایش جریان از روی بام ساختمان‌ها نیز با شدت بیشتری مشاهده می‌گردد. جریان‌های عبوری از روی بام ساختمان‌ها در ناحیه پشت و دورتر از ساختمان‌ها به سمت نواحی کم فشار در ارتفاع پایین‌تر حرکت کرده‌اند. با توجه به اشکال ۱۳ الف، ب و پ، در حالات همجواری شطرنجی با فواصل نزدیک‌تر، ریزش‌های گردبادی در ناحیه پشت دو ساختمان اصلی و همجوار تداخل بیشتری داشته و نظم و یکنواختی کمتری دارند. با افزایش فاصله بین دو ساختمان (مورد INT2)، ریزش‌های گردبادی دو ساختمان اصلی و همجوار شباهت زیادی داشته و هر کدام مانند یک ساختمان منفرد عمل می‌نمایند.



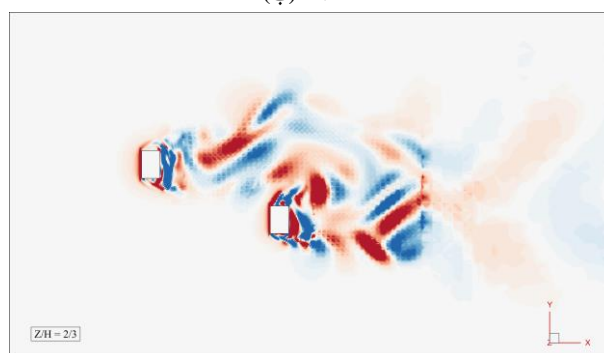
(الف) Isolated



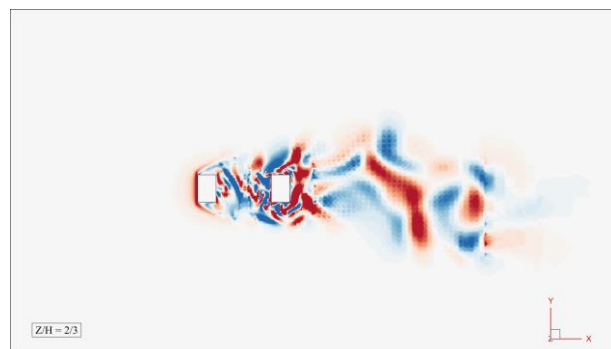
(ب) INT 1



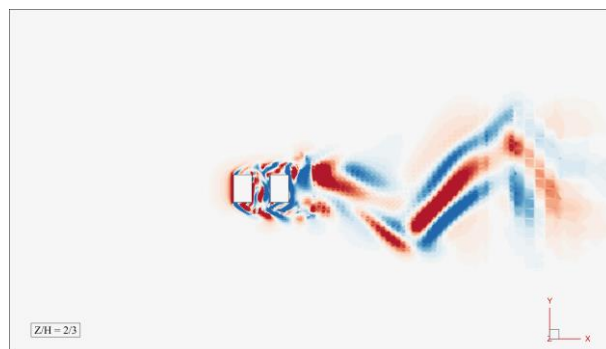
(پ) INT 2



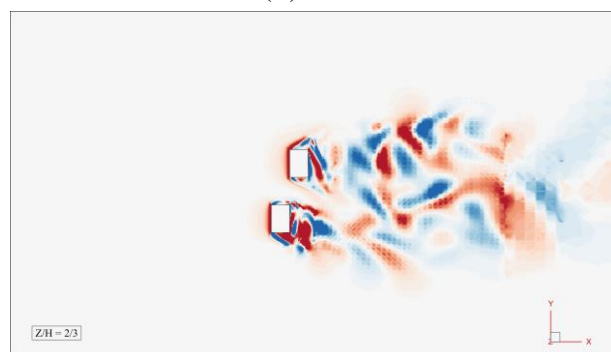
(ت) INT 7



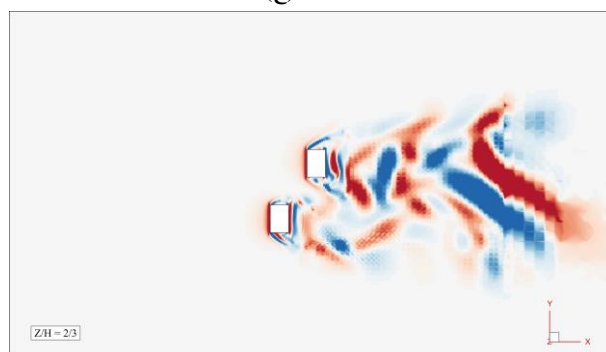
(ث) INT 3



(ج) INT 4



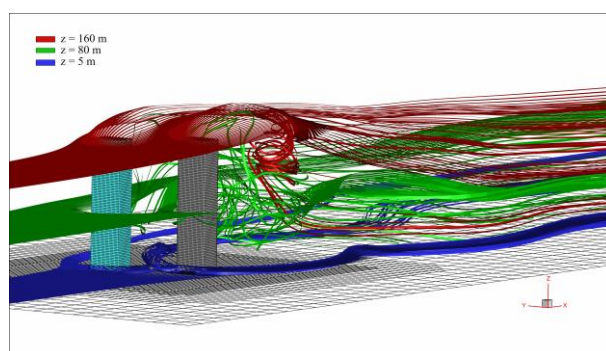
(چ) INT 5



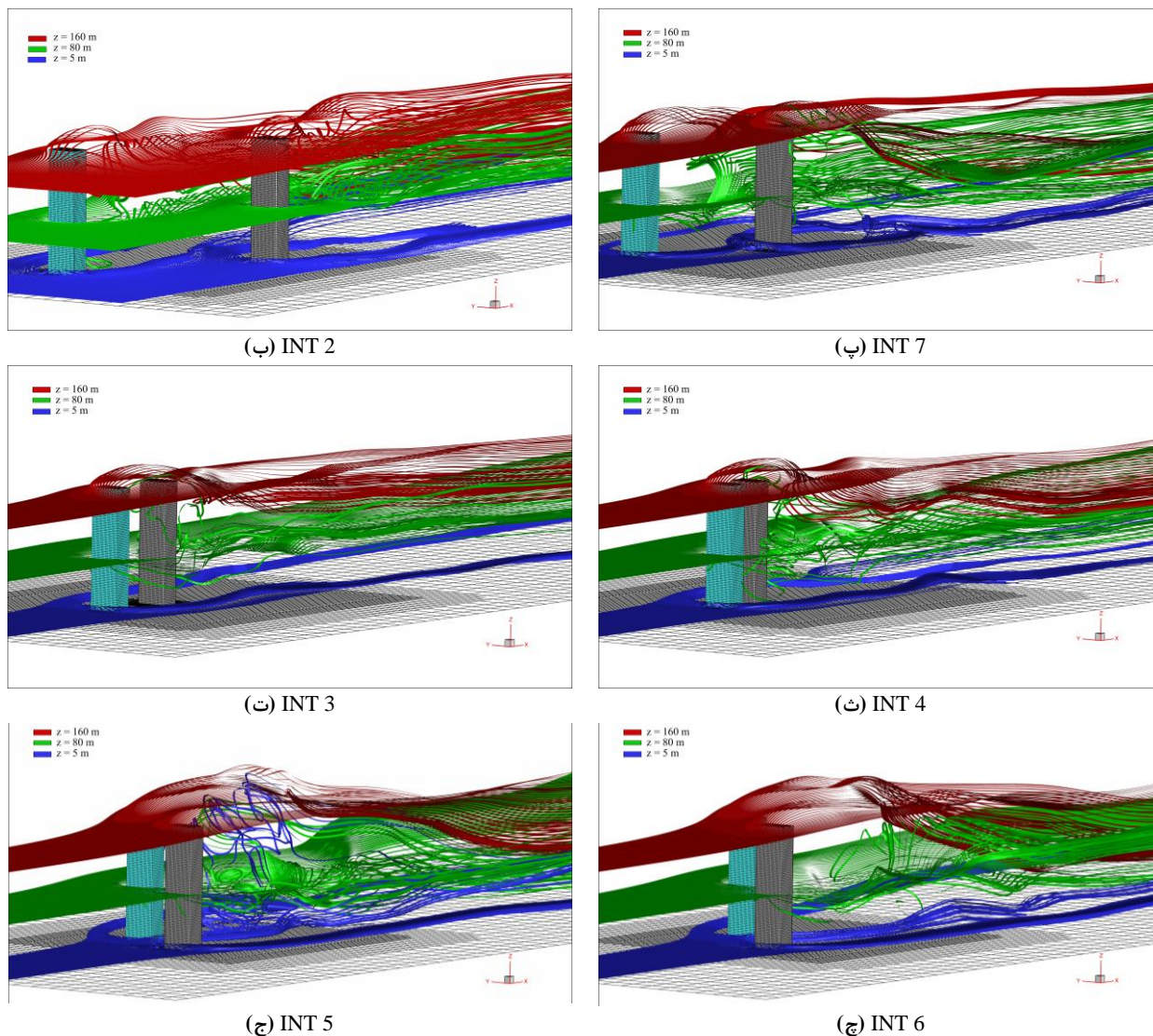
(ح) INT 6

شکل ۱۲: جریان‌های گردبادی در تراز ۰/۶۶ ارتفاعی ساختمان‌ها در حالات همجواری مختلف

در حالات همجواری پشت سر هم طبق اشکال ۱۳ ت و ث، جریان در تراز بام ساختمان‌ها پس از برخورد با ساختمان همجوار بالادست، به یک باره از روی هر دو ساختمان عبور کرده (به اصطلاح over shoot) و به ناحیه پشت ساختمان اصلی می‌رسد. در نتیجه ساختمان اصلی کاملاً در ناحیه پشت ساختمان همجوار مستغرق می‌باشد. از این رو، تمام سطوح ساختمان اصلی در حالات همجواری پشت سر هم در این مطالعه تحت تاثیر فشار منفی (مکش) هستند. در حالات همجواری پایین دست مطابق اشکال ۱۳ ج و چ، فضای کانال‌گونه بین دو ساختمان سبب تغییراتی در الگوی ریزش‌های گردبادی ناحیه پشت شده است. برای نمونه جریان با رنگ آبی از تراز ارتفاعی ۵ متری در ناحیه بالادست، پس از عبور از ساختمان‌ها به سمت بالا حرکت کرده است که در حالات قبلی همجواری چنین رفتاری مشاهده نشد.



(الف) INT 1



شکل ۱۲: خطوط جریان و ریزش‌های گردبادی در ترازهای ارتفاعی و حالات همجواری مختلف، نمای سه‌بعدی

۶- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، پاسخ آئروپنماتیکی ساختمان بلند استاندارد CAARC تحت اثر همجواری یک ساختمان یکسان در حالات همجواری بالادست شامل قرارگیری شطرنجی و پشت سر هم و همجواری پایین‌دست به صورت عددی ارزیابی شده است. از شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ به منظور مدل‌سازی جریان سه بعدی آشفته باد با اعداد رینولدز در بازه $1/4 \times 10^4$ الی 8×10^4 بهره‌گیری شد. زاویه حمله باد صفر در نظر گرفته شده و بعد کوچک ساختمان در امتداد باد^{۳۳} قرار گرفته است. اعتبارسنجی فرآیند عددی حاضر با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی و عددی پیشین در مورد ساختمان بلند استاندارد CAARC انجام شد و طبق نتایج، به کارگیری مدل LES در مهندسی باد محاسباتی رضایت بخش می‌باشد. به منظور ارزیابی اثر همجواری ساختمان‌های بلند، پارامترهای مهم پاسخ آئروپنماتیکی شامل ضرایب متوسط و نوسانی پسا و برا، ضریب فشار متوسط روی سطوح ساختمان، توزیع فشار و خطوط جریان پیرامون ساختمان و جریان‌های گردبادی آبی بررسی و تفسیر شدند. بعنوان یک نوآوری، ارتباط بین پاسخ آئروپنماتیکی ساختمان اصلی و ساختار جریان در هر یک از حالات همجواری بررسی شده و نتایج حاصل تفسیر شدند. برخی از نتایج مهم به شرح زیر ارائه شده است.

³³ Short After Body (SAB)

- (۱) ضریب پسا متوسط ساختمان اصلی در اغلب حالات همجواری کمتر از حالت منفرد می‌باشد. می‌توان این نکته را در ارتباط با اثر محافظتی ساختمان همجوار در نظر گرفت. در حالات همجواری پشت سر هم، ضریب پسا منفی و در خلاف جهت جریان مشاهده شد.
- (۲) ضریب برا نوسانی در اثر همجواری‌های شطرنجی با فواصل دورتر، حدوداً ۵۰ درصد و با فاصله نزدیک‌تر حدوداً ۱۰ درصد نسبت به حالت منفرد افزایش داشته است. در حالت همجواری پشت سر هم، با فاصله کم بین دو ساختمان، ضریب برا نوسانی در مقایسه با حالت منفرد حدوداً ۳۷ درصد کاهش یافته در حالی که با افزایش فاصله بین دو ساختمان، این ضریب تقریباً ۲۰ درصد نسبت به حالت منفرد افزایش یافته است. ساختمان همجوار پایین دست با فاصله قرارگیری کم منجر به کاهش حدوداً ۴۰ درصدی در ضریب برا نوسانی ساختمان اصلی شده است. در حالی که با افزایش فاصله ساختمان همجوار پایین دست، کاهشی حدوداً برابر ۲۵ درصد نسبت به ضریب برا در حالت منفرد مشاهده شد.
- (۳) ضریب فشار متوسط سطح رو به باد ساختمان اصلی در حالات همجواری شطرنجی و پایین دست تغییرات قابل توجهی در مقایسه با حالت منفرد نداشته در حالی که حالات همجواری پشت سر هم، منجر به فشار منفی (مکش) در سطح رو به باد ساختمان اصلی شد. بر خلاف سطح رو به باد، ضریب فشار سطوح کناری و پشت به باد ساختمان اصلی متاثر از همه حالات همجواری بوده و تغییراتی در مقایسه با حالت منفرد مشاهده شد. تغییرات عدد رینولدز بر ضریب فشار سطح رو به باد تاثیر ناچیزی داشته اما در دیگر سطوح با افزایش عدد رینولدز قدر مطلق ضریب فشار افزایش یافته است.
- (۴) پارامترهای آئرو دینامیکی شامل ضرایب نیروی پسا و برا حساسیت و وابستگی ناچیزی (در حدود ۴ الی ۱۰ درصد) به تغییرات عدد رینولدز در بازه مورد مطالعه در این پژوهش دارند. این نکته در ارتباط با موقعیت ثابت جدایش جریان در مقاطع مستطیلی تحت زاویه حمله صفر درجه باد و نسبت ابعادی مقطع مورد مطالعه می‌باشد.
- (۵) ساختار جریان پیرامون ساختمان‌ها با استفاده از خطوط جریان به همراه میدان توزیع فشار و جریان‌های گردبادی مورد مطالعه قرار گرفت. ارتباط نتایج آئرو دینامیکی حاصل با الگوی ریزش‌های گردبادی، مقادیر فشار و شدت گردبادها در حالات مختلف همجواری، به طور دقیق بررسی شده و درک فیزیکی از اثر همجواری برای مهندسان طراح سازه فراهم شد. طبق نتایج، ریزش‌های گردبادی نامتقارن با ابعاد و شدت‌های متفاوت، منجر به افزایش پاسخ دینامیکی ساختمان اصلی شدند. از سوی دیگر، کاهش در عرض ناحیه پشت و تقلیل مقادیر فشار منفی آن، بعنوان عوامل کاهش نیروهای آئرو دینامیکی موثر بر ساختمان اصلی قلمداد شدند.

مراجع

- [1] Baker, C. J. (2007). "Wind engineering—Past, present and future." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 95.9-11: 843-870. DOI: 10.1016/j.jweia.2007.01.011.
- [2] Khanduri, A. C., Stathopoulos, T., and Bédard, C. (1998). "Wind-induced interference effects on buildings—a review of the state-of-the-art." *Engineering structures*, 20.7: 617-630. doi.org/10.1016/S0141-0296(97)00066-7.
- [3] Zdravkovich, M. M. (1977). "Review of flow interference between two circular cylinders in various arrangements." *Journal of Fluid Engineering*, 99: 618-633. doi.org/10.1115/1.3448871.
- [4] Zdravkovich, M. M. (1987). "The effects of flow interference between two circular cylinders in various arrangements." *Journal of Fluids and Structures*, 1: 239-261. doi.org/10.1016/S0889-9746(87)90355-0.
- [5] Igarashi, T. (1981). "Characteristics of the flow around two circular cylinders arranged in tandem." *Bulletin of JSME*, 24: 323-331. doi.org/10.1299/jsme1958.24.323.
- [6] Igarashi, T. (1984). "Characteristics of the flow around two circular cylinders arranged in tandem: 2nd report, unique phenomenon at small spacing." *Bulletin of JSME*, 27.233: 2380-2387. doi.org/10.1299/jsme1958.27.2380.
- [7] Sun, T. F., and Gu, Z. F. (1995). "Interference between wind loading on group of structures." *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 54: 213-225. doi.org/10.1016/0167-6105(94)00051-E.
- [8] Sumner, D., Richards, M. D., and Akosile, O. O. (2005). "Two staggered circular cylinders of equal diameter in cross-flow." *Journal of Fluids and Structures*, 20.2: 255-276. doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2004.10.006.
- [9] Zhou, Yu, and Alam, M. M. (2016). "Wake of two interacting circular cylinders: a review." *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 62: 510-537. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2016.08.008.

- [10] Grioni, M., Elaskar, S. A., and Mirasso, A. E. (2020). "A Numerical Study of the Flow Interference between Two Circular Cylinders in Tandem by Scale-Adaptive Simulation Model." *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 13.1: 169-183. DOI: 10.29252/jafm.13.01.30185.
- [11] Sakamoto, H., and Haniu, H. (1988). "Aerodynamic forces acting on two square prisms placed vertically in a turbulent boundary layer." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 31.1: 41-66. doi.org/10.1016/0167-6105(88)90187-0.
- [12] Xie, Z. N., and Gu, M. (2004). "Mean interference effects among tall buildings." *Engineering Structures*, 26.9: 1173-1183. doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.03.007.
- [13] Xie, Z. N., and Gu, M. (2009). "Across - wind dynamic response of high - rise building under wind action with interference effects from one and two tall buildings." *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 18.1: 37-57. https://doi.org/10.1002/tal.393.
- [14] Lankadasu, A., and Vengadesan, S. (2008). "Interference effect of two equal - sized square cylinders in tandem arrangement: With planar shear flow." *International journal for numerical methods in fluids*, 57.8: 1005-1021. https://doi.org/10.1002/flid.1670.
- [15] Alam, M. M., Zhou, Y., and Wang, X. W. (2011). "The wake of two side-by-side square cylinders." *Journal of Fluid Mechanics*, 669: 432-471. DOI: https://doi.org/10.1017/S0022112010005288.
- [16] Goliya, R. K., Samaiya, N. K., Sabareesh, G. R., Gupta, A. (2013). "CURRENT STATUS OF INTERFERENCE EFFECT STUDIES ON TALL BUILDINGS." In: *Proceedings of the 8th Asia-Pacific Conference on Wind Engineering*, Chennai, India, 68-74. DOI: 10.3850/978-981-07-8012-8_250.
- [17] Sohankar, A. (2014). "A LES study of the flow interference between tandem square cylinder pairs." *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, 28.5: 531-548. doi.org/10.1007/s00162-014-0329-2.
- [18] Yu, X. F., Xie, Z. N., Zhu, J. B., Gu, M. (2015). "Interference effects on wind pressure distribution between two high-rise buildings." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 142: 188-197. DOI:10.1016/j.jweia.2015.04.008.
- [19] Sharma, A., Mittal, H., and Gairola, A. (2019). "Detached-eddy simulation of interference between buildings in tandem arrangement." *Journal of Building Engineering*, 21: 129-140. doi.org/10.1016/j.jobee.2018.10.004.
- [20] Thordal, M. S., Bennetsen, J. C., and Koss, H. H. (2019). "Review for practical application of CFD for the determination of wind load on high-rise buildings." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 186: 155-168. DOI: 10.1016/j.jweia.2018.12.019.
- [21] Nicoud, F., and Ducros, F. (1999) "Subgrid-scale stress modelling based on the square of the velocity gradient tensor." *Flow, turbulence and Combustion*, 62.3: 183-200. doi.org/10.1023/A:1009995426001.
- [22] Weickert, M., Teike, G., Schmdit, O., Sommerfeld, M. (2010). "Investigation of the LES WALE turbulence model within the lattice Boltzmann framework." *Computers & Mathematics with Applications*, 59.7: 2200-2214. doi.org/10.1016/j.camwa.2009.08.060.
- [23] Tang, U. F., and Kwok, K. C. (2004). "Interference excitation mechanisms on a 3DOF aeroelastic CAARC building model." *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 92.14-15: 1299-1314. DOI: 10.1016/j.jweia.2004.08.004.
- [24] Baetke, F., Werner, H., and Wengle, H. (1990). "Numerical simulation of turbulent flow over surface- mounted obstacles with sharp edges and corners." *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 35: 129-147. https://doi.org/10.1016/0167-6105(90)90213-V.
- [25] Braun, A. L., and Awruch, A. M. (2009). "Aerodynamic and aeroelastic analyses on the CAARC standard tall building model using numerical simulation." *Computers & Structures*, 87.9-10: 564-581. DOI: 10.1016/j.compstruc.2009.02.002.
- [26] Blocken, B. (2014). "50 years of computational wind engineering: past, present and future." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 129: 69-102. DOI: 10.1016/j.jweia.2014.03.008.
- [27] Melbourne, W. H. (1980). "Comparison of measurements on the CAARC standard tall building model in simulated model wind flows." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 6.1-2: 73-88. doi.org/10.1016/0167-6105(80)90023-9.
- [28] Huang, S., Li, Q. S., and Xu, S. (2007). "Numerical evaluation of wind effects on a tall steel building by CFD." *Journal of Constructional Steel Research*, 63.5: 612-627. DOI: 10.1016/j.jcsr.2006.06.033.

- [29] Meng, F. Q., He, B. J., Zhu, J., Zhao, D. X., Darko, A., Zhao, Z. Q. (2018). "Sensitivity analysis of wind pressure coefficients on CAARC standard tall buildings in CFD simulations." *Journal of Building Engineering*, 16: 146-158. DOI: 10.1016/j.jobe.2018.01.004.