



Numerical Investigation of Aeroelastic Behavior of Tall Buildings Considering Wind-Structure Interaction

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Shirzadeh Gerami M.¹ MSc,
Eimani Kalehsar H.*¹ PhD

How to cite this article

Shirzadeh Gerami M, Eimani Kalehsar H. Numerical Investigation of Aeroelastic Behavior of Tall Buildings Considering Wind-Structure Interaction. Modares Mechanical Engineering, 2019;19(3):719-730.

¹Civil Engineering Department, Engineering Faculty, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

*Correspondence

Address: Civil Engineering Department, Engineering Faculty, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran Postal Code: 5619911367
Phone: +98 (45) 33512910
Fax: +98 (45) 33512904
hek@uma.ac.ir

Article History

Received: June 10, 2018
Accepted: November 12, 2018
ePublished: March 01, 2019

ABSTRACT

The application of computational fluid dynamics is being developed in recent years in order to evaluate the numerical impact of wind damage on high-rise buildings due to the increasing computing power of computers. With regard to the turbulent downturns around flexible, slender and long-winded buildings with relatively high Reynolds numbers, the study of aeroelastic behavior of tall buildings is essential. In this paper, the turbulent wind flow is simulated numerically with four different velocities around the high standard CAARC building. Large Eddy Simulation has been used to solve the turbulence effect in solving fluid flow equations and the response of tall buildings to wind forces is determined by solving the differential equation of motion. A two-way coupling method is used to transfer data between two areas of fluid and structural solution in each step of time. According to the results of the numerical simulation, the pressure coefficients, streamlines and instantaneous pressure field around the tall building are in good agreement with the common characteristics of the flow around the airborne objects. The critical speed corresponding to the lock in phenomenon in this problem is calculated using a Strouhal number equal to 100m/s. Also, the history of displacement of the roof of the building in the direction of the wind and perpendicular to its length have been extracted for different wind velocities and the mean and their standard deviations respectively have been calculated. The continuous increase in the range of the fluctuations of the building under the wind blowing at 100m/s is observed. This point indicates the efficiency and capability of the numerical process in detecting aeroelastic instability with a predicted speed.

Keywords Computational Fluid Dynamics; Fluid-Structure Interaction; Wind Engineering; Lock-in; Large Eddy Simulation

CITATION LINKS

[1] Wind engineering-Past, present and future [2] 50 years of computational wind engineering: Past, present and future [3] Computational wind engineering [4] Towards practical use of LES in wind engineering [5] Numerical evaluation of wind effects on a tall steel building by CFD [6] Turbulent wind flow simulation over Tarbiat Modares University [7] Numerical analysis of the performance of four-sided wind tower attached to parlor and courtyard in different wind incident angles [8] Analysis of various non-linear k-ε models accuracy to predict flow field and pollutant dispersion around a model building [9] Numerical simulation of wind interference effects around a group of tall buildings [10] Numerical simulation on fluid-structure interaction of wind around super-tall building at high Reynolds number conditions [11] CFD best practice guidelines for CFD code validation for reactor-safety applications [12] Numerical simulation of turbulent flow over surface-mounted obstacles with sharp edges and corners [13] A two-degree-of-freedom base hinged aeroelastic (BHA) model for response predictions [14] Flow around surface-mounted, three-dimensional obstacles [15] Comparison of measurements on the CAARC standard tall building model in simulated model wind flows [16] Wind-induced lock-in excitation of tall structures [17] Tall rectangular building response to cross-wind excitation [18] Aerodynamic and aeroelastic analyses on the CAARC standard tall building model using numerical simulation

بررسی عددی رفتار آئروالاستیک ساختمان‌های بلند با لحاظ اندرکنش سازه و باد

میثم شیرزاده‌گرمی MSc

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

هوشیار ایمانی‌کله‌سر* PhD

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده

کاربرد دینامیک سیالات محاسباتی به‌منظور ارزیابی عددی آثار باد بر ساختمان‌های بلند با توجه به افزایش توان محاسباتی رایانه‌ها در سال‌های اخیر در حال توسعه است. با توجه به ریزش‌های گردبادی پیرامون ساختمان‌های انعطاف‌پذیر، لاغر و بلند ناشی از جریان باد با اعداد رینولدز نسبتاً بالا، بررسی رفتار آئروالاستیک ساختمان‌های بلند امری ضروری است. در این مقاله، جریان آشفته باد با ۴ سرعت متفاوت پیرامون ساختمان بلند استاندارد CAARC به‌صورت عددی شبیه‌سازی شده است. از مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ برای لحاظ اثر آشفته‌گی در حل معادلات جریان استفاده شده و پاسخ ساختمان‌های بلند به نیروهای حاصل از باد با حل معادله دینامیک حرکت تعیین شده است. به‌منظور انتقال داده‌ها بین دو حوزه حل سیالاتی و سازه‌ای در هر گام زمانی، از روش کوپل‌شدگی دوطرفه استفاده شده است. طبق نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی، ضرایب فشار، خطوط جریان و میدان فشار لحظه‌ای پیرامون ساختمان بلند مطابقت خوبی با مشخصه‌های متداول جریان پیرامون اجسام هواپند دارد. سرعت بحرانی متناظر با پدیده قفل‌شدگی در این مساله با استفاده از عدد استروهمال، برابر با ۱۰۰ متر بر ثانیه محاسبه شده است. همچنین تاریخچه زمانی جابه‌جایی بام ساختمان در جهت باد و عمود بر امتداد آن به‌ازای سرعت‌های متفاوت ورزش باد استخراج شده و به‌ترتیب میانگین و انحراف‌معیار آنها محاسبه شده است. افزایش مداوم دامنه نوسان‌های عرضی ساختمان تحت ورزش باد با سرعت ۱۰۰ متر بر ثانیه مشاهده شده است. این نکته بیانگر کارایی و قابلیت فرآیند عددی حاضر در تشخیص ناپایداری آئروالاستیک به‌ازای سرعت پیش‌بینی‌شده است.

کلیدواژه‌ها: دینامیک سیالات محاسباتی، اندرکنش سازه و سیال، مهندسی باد، قفل‌شدگی، شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۲۱

* نویسنده مسئول: hek@uma.ac.ir

۱- مقدمه

بررسی اندرکنش باد و سازه‌های انعطاف‌پذیر نقش مهمی در مهندسی عمران ایفا می‌کند. این مساله به‌صورت گسترده، در قالب آزمایش‌های تونل باد و در برخی موارد به‌صورت بررسی میدانی (آزمایش مقیاس کامل) مطالعه شده است. علاوه بر ابزار فوق‌الذکر، افزایش سرعت پردازش رایانه‌های مدرن و پیشرفت در رایانه الگوریتم‌های تحلیلی منجر به استفاده از روش‌های عددی در مهندسی باد شده است. مهندسی باد محاسباتی (CWE) به‌عنوان شاخه‌ای از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) در دو دهه اخیر رشد قابل توجهی داشته است. بیکر^[1] پیدایش و ظهور مهندسی باد محاسباتی را از رخداد‌های مهم دوران مدرن مهندسی باد (از سال ۱۹۸۰ تا به حال) قلمداد کرده است. در ادبیات پژوهشی از روش مهندسی باد محاسباتی به‌عنوان مکمل روش‌های قبلی مانند تونل باد و بررسی میدانی یاد شده است. از مزایای روش محاسباتی نسبت به آزمایش در تونل باد می‌توان به صرفه‌جویی در زمان، فضا، هزینه و نیروی انسانی اشاره کرد. از سوی دیگر، در مورد عوامل متغیر در جریان در محدوده محاسباتی، اطلاعات و داده‌ها با جزئیات بیشتری در دسترس است. قابل ذکر است که نتایج

شبیه‌سازی عددی به دور از انواع خطاهای عددی نیست و فرآیند صحت‌سنجی این نتایج با توجه به نتایج معتبر آزمایشگاهی ضروری خواهد بود.

بلوکن^[2] به گردآوری رویدادها و مطالب قابل توجه پیرامون مهندسی باد محاسباتی شامل بهترین راهنمایی‌ها، توصیه‌ها، گردهمایی‌ها و مقالات انتشاریافته در این زمینه و همچنین مقایسه روش دینامیک سیالات محاسباتی با آزمایش‌های تونل باد و صحت‌سنجی آن پرداخته است. همچنین کاربردهایی از مهندسی باد محاسباتی نظیر شرایط باد در تراز پیاده‌رو و آسایش عابران، شبیه‌سازی تهویه طبیعی ساختمان‌ها و شبیه‌سازی برخورد باران با نمای ساختمان در اثر جریان باد را تشریح نموده است.

موراکامی^[3] نکات مهمی پیرامون شبیه‌سازی عددی جریان آشفته هوا در مهندسی باد ارائه نموده است. وی به لزوم استفاده از معادلات ناویر-استوکس میانگین‌گیری شده در مسایل مهندسی باد که عموماً شامل جریان با عدد رینولدز بالا هستند، تاکید کرده است. در این راستا، معادلات مدل‌های مختلف آشفته‌گی بر مبنای میانگین‌گیری زمانی (RANS) و میانگین‌گیری مکانی با استفاده از فیلتر LES؛ موسوم به شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ) بررسی و ارائه شده است. سپس انواع راهکارهای گسسته‌سازی فضای محاسباتی شامل روش‌های اختلاف محدود، حجم کنترل، المان محدود و طیفی مورد بررسی قرار گرفته و با توجه به برقراری اصل بقای کمیت‌های فیزیکی در روش حجم کنترل، این روش به‌عنوان مدل پیشرو در مسایل دینامیک سیالات محاسباتی معرفی شده است. در بخش نتایج، استفاده از مدل آشفته‌گی شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، ابزاری بسیار مفید در تحلیل جریان آشفته موجود در مهندسی باد عنوان شده است.

تامور^[4] به ارزیابی امکان اعمال مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ در مسایل مهندسی باد از قبیل طراحی مقاوم در برابر باد، پیش‌بینی سرعت باد متاثر از شرایط محیطی، بررسی ساختار آشفته‌گی و مطالعه انتشار گازهای مضر و خطرناک در محیط شهری پرداخته است. طبق نتایج حاصل، روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ قادر به تامین مقادیر پاسخ‌های صحیح و قابل مقایسه با نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های تونل باد است. هزینه و زمان محاسباتی در این روش (بیشتر از روش‌های میانگین‌گیری زمانی)، با توجه به توسعه روزافزون روش‌های پردازش موازی و رشد سخت‌افزاری، نگران‌کننده نخواهد بود.

یک مطالعه عددی در مورد اثر باد بر ساختمان بلند استاندارد انجمن مشاوران هوانوردی مشترک‌المنافع (CAARC) توسط هو/تگ و همکاران انجام شده است^[5]. تکنیک‌های دینامیک سیالات محاسباتی مانند شبیه‌سازی گردابه بزرگ و مدل‌های متوسط زمانی رینولدز ناویر-استوکس موجود در نرم‌افزار FLUENT در این مطالعه برای پیش‌بینی بار باد بر ساختمان به کار گرفته شده است. هدف اصلی این مطالعه، بررسی و دستیابی به ضرایب فشار و الگوی خطوط جریان ناشی از باد پیرامون ساختمان‌های بلند است. نتایج به‌دست‌آمده با داده‌های آزمایشگاهی موجود از هفت تونل باد مقایسه شده‌اند. با توجه به بررسی‌ها مشاهده شده است که یک مدل شبیه‌سازی گردابه بزرگ با مقیاس زیرشبکه (SGS) دینامیک، پیش‌بینی‌های مناسبی از بارهای باد متوسط و دینامیک را بر ساختمان‌های بلند ارائه می‌کند. طبق نتایج، پروفیل سرعت باد ورودی به محیط مورد نظر عموماً ضرایب فشار متوسط در سطح ساختمان را تحت تاثیر قرار می‌دهد و پروفیل شدت آشفته‌گی جریان اثر مهمی بر بارهای باد نوسانی

بزرگ پرداخته‌اند. در این تحقیق، جریان باد در محیط نرم‌افزار FLUENT و با اعمال مدل شبیه‌سازی گردابه بزرگ در نظر گرفته شده و برای حل معادلات دینامیک سازه‌ای از حلگر نرم‌افزار ANSYS 12 با لحاظ رفتار تغییر مکان‌های بزرگ استفاده شده است. سپس طی یک فرآیند کوپل دوطرفه، اطلاعات نظیر بردارهای نیرو و لنگر پیچشی حاصل از تحلیل دینامیک سیالاتی به محیط حلگر دینامیک سازه‌ای انتقال داده شده است. پاسخ ساختمان بلند به نیروهای ناشی از اثر سیال نیز در قالب بردار جابه‌جایی و دوران به محیط حلگر دینامیک سیالاتی منتقل می‌شوند. در این مطالعه به بررسی موردی پاسخ برج تایپه ۱۰۱ به جریان باد دارای عدد رینولدز 1×10^8 پرداخته شده است.

در تحقیق حاضر به تحلیل اندرکنش سازه و باد از نوع کوپل‌شدگی دوطرفه پرداخته شده است. بدین منظور ساختمان بلند استاندارد CAARC به‌صورت آئرواستاتیک، شبیه‌سازی عددی شده و با استفاده از تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی در معرض جریان باد با چهار سرعت مختلف (طبق بخش ۲-۴) قرار گرفته است. نکته شاخص در پژوهش حاضر، بررسی ارتباط الگوی جریان و توزیع فشار پیرامون ساختمان با تاریخچه زمانی جابه‌جایی‌های عرضی و طولی سازه در گام‌های مختلف زمانی است. طبق این بررسی، پدیده ریزش گردبادی در سرعت‌های بحرانی جریان باد مشهود است. با دقت در تاریخچه زمانی جابه‌جایی طولی (در امتداد باد) و جابه‌جایی عرضی (عمود بر باد) ساختمان تحت جریان با سرعت‌های متفاوت، ناپایداری آئرواستاتیک قفل‌شدگی نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- روش تحقیق

در این پژوهش از شبیه‌سازی عددی به‌منظور بررسی جابه‌جایی‌های طولی و عرضی ساختمان بلند استاندارد CAARC ناشی از جریان باد با سرعت‌های مختلف استفاده شده است. در این راستا برای شبیه‌سازی جریان باد به‌عنوان سیال از تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی و حل معادلات ناویر-استوکس بهره گرفته شده است. به‌منظور حل این معادلات، گسسته‌سازی فضای محاسباتی به روش حجم محدود انجام شده است. برای لحاظ اندرکنش سازه و باد، ارتعاشات ساختمان بلند در برابر باد نیز با حل معادله دیفرانسیل حرکت جسم مرتعش محاسبه شده است. برای تبادل اطلاعات بین دو حوزه حل سیالاتی و سازه‌ای از سیستم کوپل دوطرفه استفاده شده است.

۲-۱- معادلات حاکم بر محیط دینامیک سیالاتی

معادلات حاکم بر مدل شبیه‌سازی گردابه بزرگ از فیلترکردن معادلات پیوستگی و مومنومم به‌ترتیب طبق روابط ۱ و ۲ به‌شرح 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 سیال (برابر با ۱/۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب)، \bar{u} مولفه سرعت سیال، \bar{P} فشار وارد بر سطح سیال توسط سیال خارجی احاطه‌کننده، σ_{ij} تانسور تنش ناشی از لزجت مولکولی طبق رابطه ۳ و τ_{ij} تنش مقیاس زیرشبکه طبق رابطه ۴ هستند.

دارد.

به‌منظور شبیه‌سازی جریان متلاطم باد روی پردیس دانشگاه تربیت مدرس و با هدف ارزیابی آسایش عابران تحت جریان باد غربی در سه رژیم ضعیف، متوسط و قوی، یک مطالعه عددی توسط *حیدری‌نژاد* و *جدیدی* [6] انجام پذیرفت. در این تحقیق از روش ترکیبی (DES) میانگین‌گیری زمانی و میانگین‌گیری مکانی برای مدل آشفتگی بهره گرفته شده است. به‌طوری که مدل به‌طور خودکار در نزدیکی مرز تبدیل به روش میانگین زمانی می‌شود و در نواحی دورتر شبیه یک مدل گردابه بزرگ یک‌معادله‌ای عمل می‌کند. برای حل معادلات حاکم از نرم‌افزار OpenFOAM و برای جداسازی معادلات حاکم از روش حجم محدود استفاده شده است. در بخش نتایج، نقاط دارای حداکثر سرعت در محوطه مورد بررسی در هر سه رژیم جریان باد به‌عنوان نقاط پرخطر معرفی شده‌اند. اثر همجواری ساختمان‌های کم‌ارتفاع و مرتفع بررسی شده است و طبق نتایج، نواحی با گردادبان بالا در کناره‌های ساختمان بلند مشاهده می‌شود. تحقیقی دیگر از کاربرد دینامیک سیالات محاسباتی در شبیه‌سازی جریان باد، برای مطالعه رفتار بادگیر چهارچپته متصل به تالار و حیاط مرکزی در یک بنای موجود و در حال استفاده در کویر مرکزی ایران توسط *دهقانی‌محمدآبادی* و *همکاران* [7] صورت گرفته است. به‌منظور انجام محاسبات از نرم‌افزار ANSYS 16 با حلگر FLUENT برای گسسته‌سازی معادلات از روش حجم محدود و برای مدل آشفتگی از میانگین‌گیری زمانی K-omega SST استفاده شده است. نتایج مورد بررسی شامل سرعت متوسط جریان، دبی مکش و دمش بادگیر و ضریب فشار سطوح بنا تحت زوایای حمله متفاوت باد است.

قابلیت مدل‌های مختلف کی-اِپسیلون غیرخطی با روش‌های میانگین‌گیری زمانی معادلات ناویر-استوکس برای پیش‌بینی میدان جریان و پراکندگی آلاینده‌ها در اطراف یک ساختمان مکعبی‌شکل توسط *بازدیدنی‌تهرانی* و *همکاران* [8] ارزیابی شد. طبق نتایج، مدل‌های غیرخطی به‌دلیل داشتن جمله‌های مربعی و مکعبی قادر بودند که میدان غلظت را بهتر از مدل کی-اِپسیلون استاندارد پیش‌بینی نمایند. مدل مکعبی ارهارد از میان مدل‌های آشفتگی بررسی‌شده بهترین توافق را با نتایج تجربی نشان داد. *حجازی* و *همکاران* [9] آثار تداخل بار باد در اطراف گروهی از ساختمان‌های بلند را با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی شبیه‌سازی نمودند. در این مطالعه، ضرایب فشار و تداخل گروهی از ساختمان‌های بلند با ارتفاع متغیر، فواصل متفاوت قرارگیری و زوایای مختلف بارگذاری باد بررسی شده‌اند. برای حل معادلات جریان، مدل کی-اِپسیلون به کار گرفته شده و برای اعتبارسنجی تحقیق از نتایج حاصل از تونل باد استفاده شده است.

مرور مطالعات شاخص گذشته نشان می‌دهد که اغلب تحقیقات انجام‌شده در زمینه مهندسی باد محاسباتی شامل مطالعه مدل‌های هواپند صلب بوده است و نتایج حاصل بیانگر الگوی جریان در دامنه محاسباتی و ضرایب فشار روی مدل هستند. به‌منظور بررسی دقیق‌تر پاسخ سازه‌های انعطاف‌پذیر و ارزیابی ناپایداری‌های آئرواستاتیک محتمل، بایستی از مدل‌های ارتجاعی در فرآیند مهندسی باد محاسباتی بهره گرفت، به‌طوری که امکان شبیه‌سازی مساله جریان باد کوپل‌شده با یک سازه متحرک مهیا شود. در ادبیات پژوهشی این مساله به‌عنوان اندرکنش سازه و سیال (FSI) شناخته می‌شود.

هوانگ و *همکاران* [10] به شبیه‌سازی عددی اندرکنش سازه و سیال ناشی از جریان باد پیرامون ساختمان بلند در شرایط اعداد رینولدز

باد است.

۲-۳- نحوه برقراری اندرکنش سازه و باد

در این پژوهش به‌منظور تحلیل اندرکنش سازه و باد، روش حل تفکیک‌شده به کار گرفته شده است. در این روش، معادلات حاکم بر حرکت سازه و سیال به‌طور جداگانه و با استفاده از حلگرهای مجزا در حوزه زمان حل می‌شوند. به‌طوری که هنگام حل معادله حرکت سازه، جریان سیال تغییر نمی‌کند و ثابت فرض می‌شود. نیروی حاصل از حل معادلات سیال به‌عنوان شرایط مرزی سازه در نظر گرفته می‌شود. به‌منظور تبادل اطلاعات، از روش کوپل‌شدگی دوطرفه استفاده شده است.

در این مساله، جریان سیال تحت تاثیر عکس‌العمل سازه قرار می‌گیرد و شبکه‌بندی محیط اطراف سازه در گام‌های زمانی تغییر می‌یابد. برای به‌روزرسانی و تولید مجدد شبکه‌بندی در نواحی مشترک سازه و سیال از ویژگی شبکه‌بندی دینامیک نرم‌افزار FLUENT استفاده شده است.

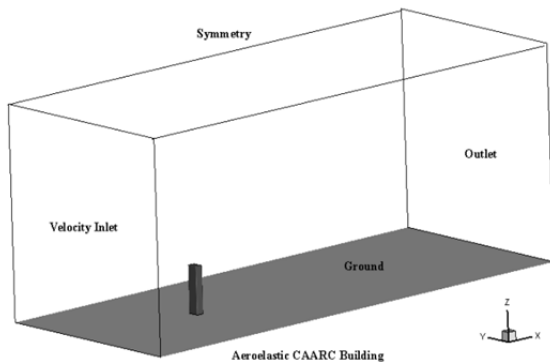
۲-۴- هندسه، خصوصیات مدل مورد بررسی و شرایط مرزی

مدل مورد بررسی در پژوهش حاضر، ساختمان بلند استاندارد CAARC دارای پلان مستطیلی به ابعاد ۳۰متر در امتداد باد، ۴۵متر در امتداد عمود بر باد و به ارتفاع ۱۸۰متر است. مشخصات مکانیکی ساختمان در جدول ۱ ارایه شده است.

جدول ۱) مشخصات مکانیکی ساختمان

مقدار	مشخصه
۱۶۰	جرم مخصوص (kg/m^3)
۰/۲	فرکانس طبیعی ارتعاش (Hz)
$۲/۳ \times ۱۰^۴$	مدول الاستیسیته (N/m^2)
۰/۲۵	ضریب پواسون
۱	نسبت میرایی (%)

قرارگیری ساختمان در دامنه محاسباتی (تونل باد عددی) به نحوی بوده که فاصله مرز ورودی جریان از دیوار رو به باد ساختمان، ۳H و فاصله مرز خروجی جریان تا دیوار پشت به باد ساختمان، ۸H است. عرض دامنه محاسباتی ۴/۷H و ارتفاع آن ۴/۵H در نظر گرفته شده، به‌طوری که H ارتفاع ساختمان استاندارد CAARC است. نسبت بلوکه (برابر نسبت سطح مقطع رو به باد ساختمان به سطح مقطع مرز ورودی جریان در دامنه محاسباتی)، در این پژوهش برابر با ۱/۱۸۲% بوده که از مقدار حداکثر مجاز (۳%) پیشنهاد شده توسط بیتکی و همکاران [12] کمتر است. در شکل ۱ نمایی از دامنه محاسباتی و ساختمان مورد بررسی به‌همراه معرفی شرایط مرزی ارایه شده است.



شکل ۱) دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

$$\sigma_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \right] \quad (۳)$$

$$\tau_{ij} = \rho \bar{u}_i \bar{u}_j - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j, \tau_{ij} = -2\mu_t \bar{S}_{ij} \quad (۴)$$

در این روابط، μ لزجت و δ_{ij} دلتای کرونیکر هستند. تنش‌های مقیاس زیرشبکه حاصل از اعمال فیلتر بر معادلات حرکت سیال، در این پژوهش با به‌کارگیری مدل آشفتگی WALE ارایه‌شده در FLUENT مدل‌سازی شده‌اند. در این مدل، لزجت جریان آشفته طبق رابطه ۵ معرفی شده است.

$$\mu_t = \rho L_s^2 \frac{(S_{ij}^d S_{ij}^d)^{3/2}}{(\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{5/2} + (S_{ij}^d S_{ij}^d)^{5/4}} \quad (۵)$$

در رابطه ۵، \bar{S}_{ij} تانسور نرخ کرنش، L_s و S_{ij}^d به‌ترتیب در روابط ۶-۸ تعریف شده‌اند.

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (۶)$$

$$L_s = \min(\kappa d, C_w V^{1/3}) \quad (۷)$$

$$S_{ij}^d = \frac{1}{2} (\bar{g}_{ij}^2 + \bar{g}_{ji}^2) - \frac{1}{3} \delta_{ij} \bar{g}_{kk}^2, \bar{g}_{ij} = \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (۸)$$

در روابط فوق، κ ثابت ون‌کارمن، d فاصله تا نزدیک‌ترین دیواره، C_w ثابت مدل WALE برابر با ۰/۳۲۵ و V حجم سلول محاسباتی هستند.

در شبیه‌سازی‌های ناپایا، مقدار گام زمانی یک پارامتر مهم برای دستیابی به نتایج صحیح و دقیق است. طبق گزارش‌های منتر [11]، با توجه به محدوده فرکانسی، زمان تناوب متناظر بایستی حداقل به ۱۰ تا ۲۰ گام زمانی تقسیم شود. از سوی دیگر، اندازه گام زمانی بر مبنای معیار عدد کورانت طبق رابطه ۹ نیز قابل تعیین است، به‌طوری که به‌ازای اعداد کورانت کمتر از یک، شرط پایداری محاسبات به‌خوبی برقرار خواهد شد.

$$C = \frac{|u| \Delta t}{\Delta x} \quad (۹)$$

در رابطه ۹، C بیانگر عدد کورانت، $|u|$ سرعت حداکثر، Δx کوچک‌ترین اندازه المان و Δt مقدار گام زمانی است. با لحاظ معیارهای فوق‌الذکر، در این تحقیق گام زمانی ۰/۱ ثانیه متناظر با عدد کورانت ۰/۵ در تمامی محاسبات انتخاب شده است.

۲-۲- معادلات حاکم بر محیط سازه‌ای

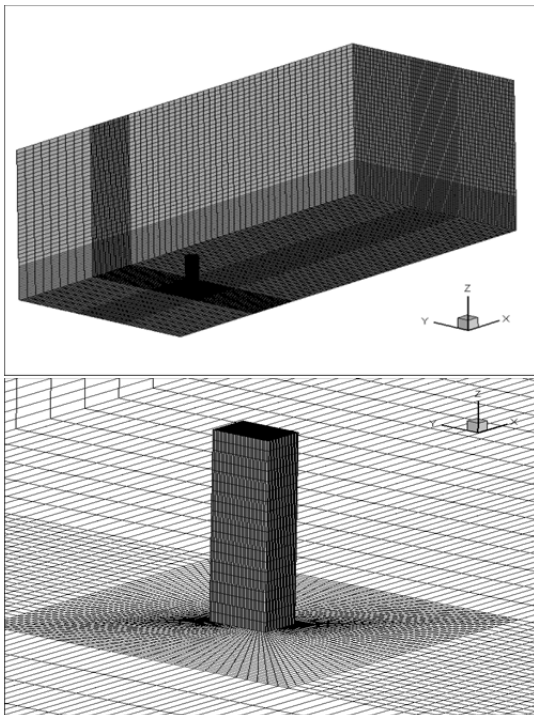
به‌منظور تعیین پاسخ‌های سازه‌ای شامل بردارهای جابه‌جایی و شتاب در بازه زمانی دلخواه از تحلیل دینامیک گذرا یا تاریخچه زمانی در نرم‌افزار ANSYS استفاده شده، به‌طوری که معادله حرکت دینامیک سیستم (طبق رابطه ۱۰) در هر گام زمانی با استفاده از روش نیومارک حل شده است.

$$[M]\{\ddot{y}\} + [C]\{\dot{y}\} + [k]\{y\} = f(t) \quad (۱۰)$$

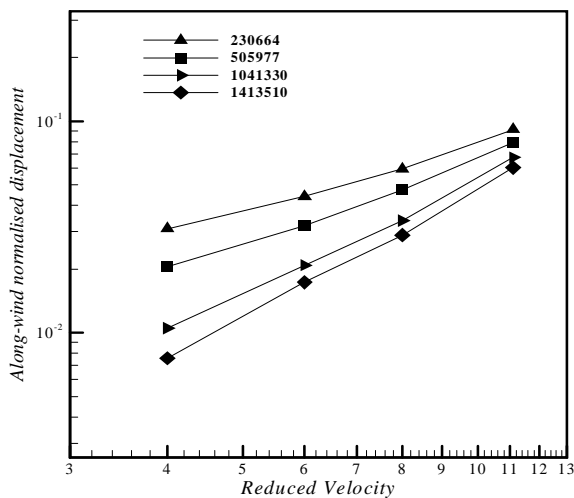
در رابطه فوق، $[M]$ ، $[C]$ و $[k]$ به‌ترتیب بیانگر ماتریس جرم، ماتریس میرایی و ماتریس سختی ساختمان و \dot{y} و y به‌ترتیب نشانگر بردار شتاب، بردار سرعت و بردار جابه‌جایی ساختمان هستند. $f(t)$ بیانگر نیروی متغیر با زمان بوده و ناشی از جریان

تعداد سلول‌های ۲۳۰۶۶۴، ۵۰۵۹۷۷، ۱۰۴۱۳۳۰ و ۱۴۱۳۵۱۰ برای حل مساله استفاده شد. مطابق با شکل ۲، تراکم بیشتر شبکه در محل قرارگیری ساختمان و ناحیه پشت آن به منظور مطالعه دقیق‌تر جدایش جریان در گوشه‌های تیز ساختمان و نیز ریزش‌های گردبادی در ناحیه پشت اعمال شده است.

برای تعیین شبکه‌بندی نهایی، تاریخچه زمانی جابه‌جایی طولی نقطه‌ای از بام ساختمان به‌ازای ۴ شبکه‌بندی فوق‌الذکر و تحت تاثیر ۴ سرعت وزش باد (ارایه‌شده در جدول ۲) استخراج شده است. مقدار متوسط جابه‌جایی طولی ساختمان در هر حالت تعیین و به‌صورت بی‌بعد در مقابل سرعت کاهش‌یافته متناظر در نمودار ۱ ترسیم شده است. با توجه به تغییرات اندک پاسخ طولی ساختمان به‌ازای شبکه‌بندی‌ها به تعداد ۱۰۴۱۳۳۰ و ۱۴۱۳۵۱۰، برای شبکه‌بندی دامنه محاسباتی در شبیه‌سازی جریان باد در این پژوهش، تعداد سلول‌ها ۱۰۴۱۳۳۰ انتخاب شده است.



شکل ۲) شبکه‌بندی ساختاریافته برای دامنه محاسباتی و ساختمان CAARC



نمودار ۱) ارزیابی استقلال حل از شبکه

به‌منظور تعریف ویژگی جریان در مرزهای دامنه محاسباتی از شرایط مرزی موجود در نرم‌افزار FLUENT استفاده شده است. در مرز ورودی دامنه محاسباتی، شرط ورودی سرعت با استفاده از فراخوانی تابع تعریف‌شده توسط کاربر (UDF) لحاظ شده است. توزیع سرعت باد در ارتفاع دامنه محاسباتی با به‌کارگیری قانون توانی طبق رابطه ۱۱ در نظر گرفته شده است.

$$U_h = U_H \left(\frac{h}{H}\right)^\alpha \quad (11)$$

در رابطه ۱۱، h بیانگر ارتفاع متغیر از کف تا رأس دامنه محاسباتی و H ارتفاع ساختمان (۱۸۰ متر) است. α ضریب قانون توانی بوده و وابسته به زبری محیط اطراف است که در این پژوهش برابر با ۰/۱۹ فرض می‌شود. این فرض تقریباً بیانگر محیط حومه شهری بوده و در مطالعه آزمایشگاهی مورد استناد در بخش صحت‌سنجی این پژوهش به کار گرفته شده است.

به‌منظور بررسی دقیق‌تر پاسخ ساختمان بلند در برابر باد و دسترسی به سرعت بحرانی باد که منجر به ناپایداری محتمل آئرواستاتیک (پدیده قفل‌شدگی) خواهد شد، ۴ مقدار متفاوت برای سرعت باد طبق مقادیر جدول ۲ در این پژوهش در نظر گرفته شده است. در نتیجه عدد رینولدز جریان در این پژوهش در بازه $2/8 \times 10^4$ تا 8×10^4 خواهد بود.

جدول ۲) مقادیر سرعت باد در بام ساختمان

سرعت باد در بام (U_H, ms^{-1})	سرعت کاهش‌یافته (R_p)	سرعت متناظر در ارتفاع مرجع (U_{10}, ms^{-1})
۳۶	۴	۲۰/۷۵
۵۴	۶	۳۱/۱
۷۲	۸	۴۱/۵۷
۱۰۰	۱۱/۱	۵۷/۷

سرعت کاهش‌یافته از تقسیم سرعت میانگین ساعتی باد در بام ساختمان بر حاصلضرب بعد عمود بر باد ساختمان (B) در فرکانس ارتعاش آن (n_0) طبق رابطه ۱۲ محاسبه می‌شود.

$$R_v = \frac{U_H}{n_0 B} \quad (12)$$

سرعت باد در ارتفاع مرجع (۱۰ متر از سطح زمین) در آیین‌نامه‌ها و ادبیات فنی یک شاخص برای بررسی دوره بازگشت باد در منطقه و نیز میزان شدت تخریبی آن محسوب می‌شود. این مقدار طبق رابطه ۱۱، محاسبه و در ستون سوم جدول ۲ ارایه شده است. برای نمونه، طبق آیین‌نامه بارگذاری ایران (مبحث ۶ مقررات ملی ساختمان) برای مناطق بادخیز ایران، سرعت طرح در ارتفاع مرجع برابر با ۱۳۰ کیلومتر بر ساعت معادل ۳۶/۱ متر بر ثانیه گزارش شده است.

در مرز خروجی جریان از شرط خروجی فشار با لحاظ فشار استاتیک متوسط برابر با فشار اتمسفریک استفاده شده است. برای دیواره‌های جانبی از شرط مرزی تقارن و برای کف دامنه محاسباتی و سطوح ساختمان نیز از شرط مرزی دیواره بدون لغزش بهره‌گیری شده است.

۲-۵- شبکه‌بندی دامنه محاسباتی

در این پژوهش از نرم‌افزار ICGM از زیرمجموعه ANSYS 17 برای شبکه‌بندی دامنه محاسباتی استفاده شده است. با توجه به هندسه منظم و دارای گوشه‌های ۹۰ درجه مدل مورد بررسی از شبکه ساختاریافته و مکعب شش‌وجهی بهره‌گرفته شده است.

به‌منظور دسترسی به نتایج مستقل از شبکه، از ۴ شبکه‌بندی با

۳- صحت‌سنجی شبیه‌سازی عددی

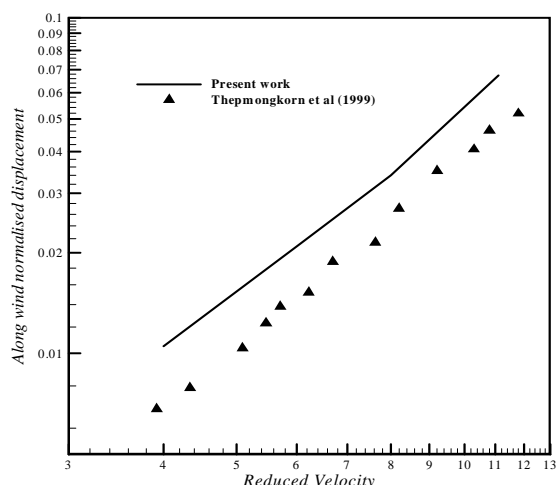
به‌منظور صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی، از نتایج ارایه‌شده توسط تیمونگکورن و همکاران [13] استفاده شده است که یک سری آزمایش‌های تجربی روی مدل آئروالاستیک ساختمان بلند CAARC در لایه مرزی تونل باد دانشگاه سیدنی انجام داده‌اند. در این مطالعه آزمایشگاهی، تاریخچه زمانی جابه‌جایی طولی و عرضی مدل ساختمان بلند تحت جریان باد در تراز بام اندازه‌گیری شده است. میانگین پاسخ طولی و انحراف‌معیار پاسخ عرضی ساختمان بلند، استخراج و به‌ترتیب طبق روابط ۱۳ و ۱۴ به جابه‌جایی طولی بی‌بعدشده و جابه‌جایی عرضی بی‌بعدشده تبدیل شده‌اند.

$$\frac{\bar{X}}{L} \quad (13)$$

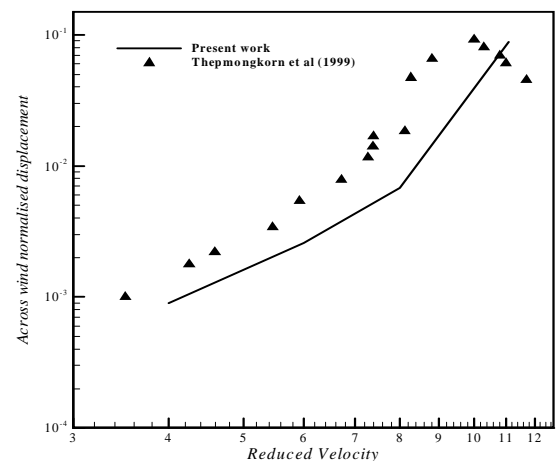
$$\frac{\sigma_y}{B} \quad (14)$$

در روابط فوق، \bar{X} میانگین زمانی جابه‌جایی طولی ساختمان در تراز بام، L بعد ساختمان در امتداد باد، σ_y انحراف‌معیار جابه‌جایی عرضی ساختمان در تراز بام و B بعد ساختمان در امتداد عمود بر باد هستند.

در نمودارهای ۲ و ۳ به‌ترتیب جابه‌جایی طولی و عرضی بی‌بعدشده ساختمان به‌ازای سرعت‌های کاهش‌یافته حاصل از آزمایش تجربی تونل باد و شبیه‌سازی عددی ارایه شده است. روند صعودی مقادیر جابه‌جایی در هر دو حالت، تطبیق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.



نمودار ۲) جابه‌جایی طولی بی‌بعدشده به‌ازای سرعت‌های کاهش‌یافته



نمودار ۳) جابه‌جایی عرضی بی‌بعدشده به‌ازای سرعت‌های کاهش‌یافته

پاسخ طولی ساختمان به‌ازای سرعت‌های کاهش‌یافته بیشتر از ۸، اختلاف کمتری نسبت به نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد. بیشترین اختلاف نتایج عددی و آزمایشگاهی در پاسخ طولی، حدوداً ۱۹٪ بوده که در مورد سرعت کاهش‌یافته ۴ مشاهده شده است.

پاسخ عرضی حاصل از مطالعه عددی حاضر به‌ازای سرعت کاهش‌یافته حدوداً ۱۱، منطبق بر مقدار ارایه‌شده در مطالعه آزمایشگاهی است. اختلاف متوسط بین نتایج عددی و آزمایشگاهی در مورد پاسخ عرضی حدوداً ۱۷/۸٪ است.

اختلاف موجود بین نتایج عددی و آزمایشگاهی را می‌توان ناشی از تفاوت‌های موجود در شبیه‌سازی پروفیل سرعت باد در ورودی تونل باد عددی و آزمایشگاهی قلمداد کرد. از سوی دیگر، عدم انعطاف‌پذیری ایده‌آل مدل آزمایشگاهی ساختمان به اندازه مدل عددی در نرم‌افزار و نیز عدم لحاظ اندرکنش بین مودهای ارتعاشی در آزمایش‌های تونل باد منجر به اختلاف نتایج شده است.

۴- بررسی نتایج و تفسیر آنها

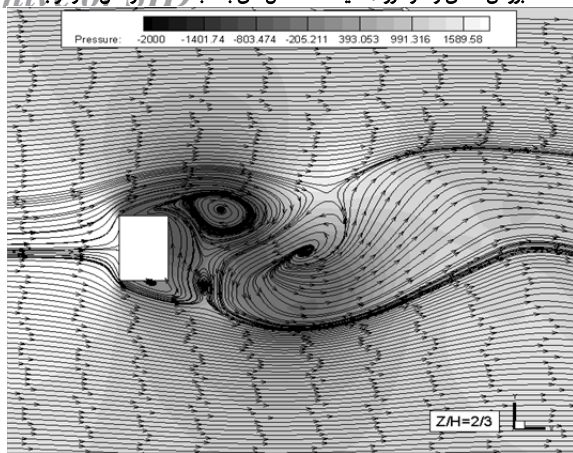
در این بخش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی جریان باد با سرعت‌های مختلف و آثار آن بر ساختمان بلند استاندارد CAARC در دو قسمت مطالعات آئرودینامیک و آئروالاستیک ارایه می‌شود.

۴-۱- رفتار آئرودینامیک ساختمان‌های بلند

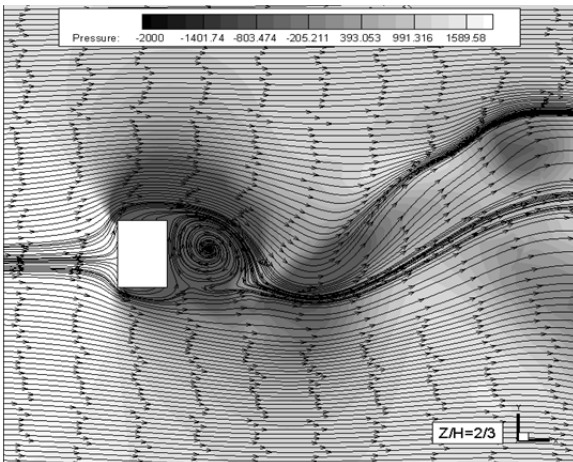
به‌منظور بررسی رفتار آئرودینامیک ساختمان‌های بلند در برابر باد، توزیع فشار و الگوی خطوط جریان پیرامون ساختمان به‌ازای سرعت‌های مختلف وزش باد استخراج شده‌اند. مشخصه‌های متداول جریان پیرامون اجسام سه‌بعدی، توسط لاروسی و همکاران [14] در پژوهشی تحت عنوان جریان پیرامون مانع سه‌بعدی نصب‌شده روی سطح ارزیابی و مشاهده شده است. طبق گزارش لاروسی و همکاران، هنگام برخورد جریان سیال با مانع، یک جریان گردبادی نعل‌اسبی که از ناحیه جدایش سیال در سطح بالادست سرچشمه می‌گیرد، در اطراف جسم پیچیده و به ناحیه پشت هدایت می‌شود. جریان در گوشه‌های تیز بالادست جسم مکعبی جدا می‌شود و نواحی جدایش قابل توجهی در اطراف و پشت جسم به وجود می‌آیند که با گردبادهای نعل‌اسبی اندرکنش خواهند داشت. تشکیل یک گردباد قوسی در ناحیه پشت جسم هوابند گزارش شده که از سطح زمین سرچشمه گرفته است.

الگوی خطوط جریان و توزیع فشار لحظه‌ای پیرامون ساختمان بلند تحت وزش باد با سرعت‌های کاهش‌یافته ۴، ۶، ۸ و ۱۱/۱ در صفحه افقی و ارتفاع ۲/۳ ساختمان به‌ترتیب در شکل‌های ۶-۳ ارایه شده است. با توجه به این شکل‌ها مشاهده می‌شود که خطوط جریان تشکیل‌یافته پیرامون ساختمان بلند حاصل از مطالعه عددی حاضر، مطابقت مناسبی با مشاهدات آزمایشگاهی لاروسی و همکاران [14] دارد، به‌طوری که جدایش جریان در گوشه‌های تیز بالادست ساختمان و در نتیجه تشکیل جریان‌های گردبادی در نواحی کناری و پشت ساختمان کاملاً مشهود است. سطح رو به باد ساختمان به‌ازای هر ۴ سرعت وزش باد تحت فشار مثبت (دمش) است و نقطه آرامش جریان در نواحی میانی دیوار رو به باد مشاهده می‌شود. نواحی اطراف دیوارهای موازی و پشت به باد تحت تاثیر جریان‌ها و ریزش‌های گردبادی قرار داشته و فشار منفی (مکش) حاصل از جریان باد در شکل‌ها نمایان است.

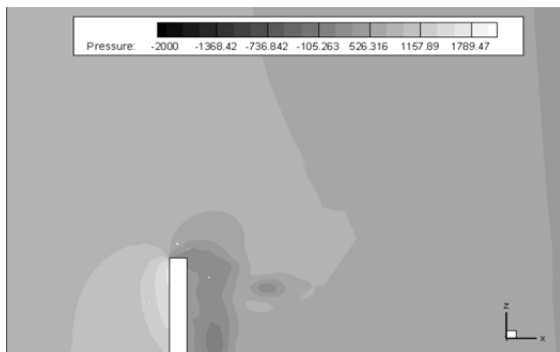
ریزش‌های گردبادی ناحیه پشت به‌ازای سرعت وزش باد کمتر به‌صورت دو گردباد تقریباً متقارن و در نزدیکی دیوار پشت به باد تشکیل می‌یابند. خطوط جریان در این حالت نزدیک‌تر به هم و منظم‌تر هستند. در شکل‌های ۳ و ۴، خطوط جریان ناشی از وزش باد با سرعت‌های کاهش‌یافته ۴ و ۶ از الگوی فوق‌الذکر تبعیت



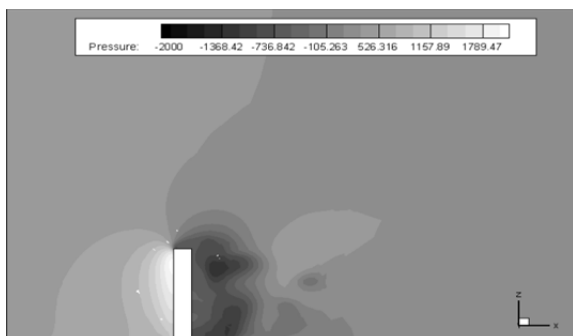
شکل ۵) خطوط جریان و میدان فشار لحظه‌ای در صفحه xy در تراز $2/3$ ارتفاع ساختمان، سرعت کاهش یافته ۸



شکل ۶) خطوط جریان و میدان فشار لحظه‌ای در صفحه xy در تراز $2/3$ ارتفاع ساختمان، سرعت کاهش یافته $11/1$



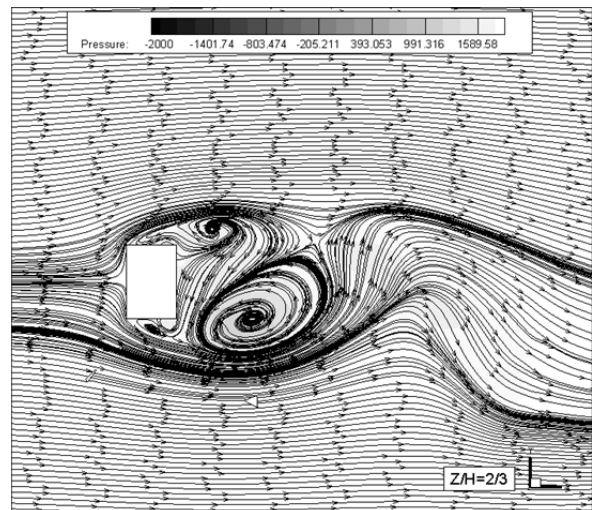
شکل ۷) میدان فشار لحظه‌ای در صفحه xz ، سرعت کاهش یافته ۴



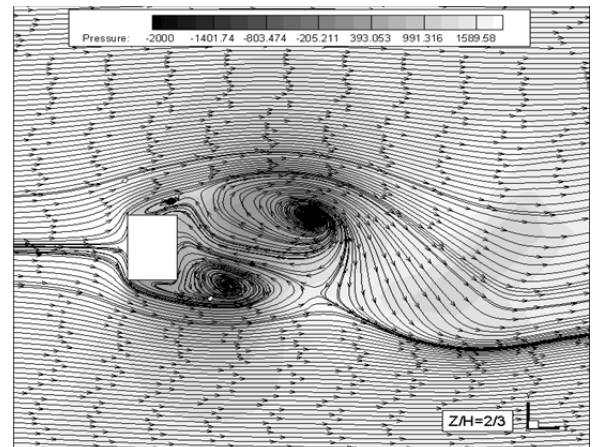
شکل ۸) میدان فشار لحظه‌ای در صفحه xz ، سرعت کاهش یافته ۶

می‌کنند. با افزایش سرعت وزش باد، گردبادهای تشکیل یافته در ناحیه پشت تقارن چندانی نداشته و از اشکال نامنظمی تشکیل یافته‌اند. در شکل‌های ۵ و ۶ با سرعت کاهش یافته وزش باد به ترتیب برابر با ۸ و $11/1$ تشکیل نواحی پشت با گردبادهای نامتقارن و کشیده شده به نواحی دورتر از محل ساختمان مشاهده می‌شود. این نکات در مورد الگوی ریزش‌های گردبادی به‌ازای سرعت‌های متفاوت جریان، ارتباط مستقیمی با پاسخ آئرواستاتیک ساختمان بلند در برابر باد خواهد داشت که در بخش ۴-۲ به تشریح آن پرداخته شده است.

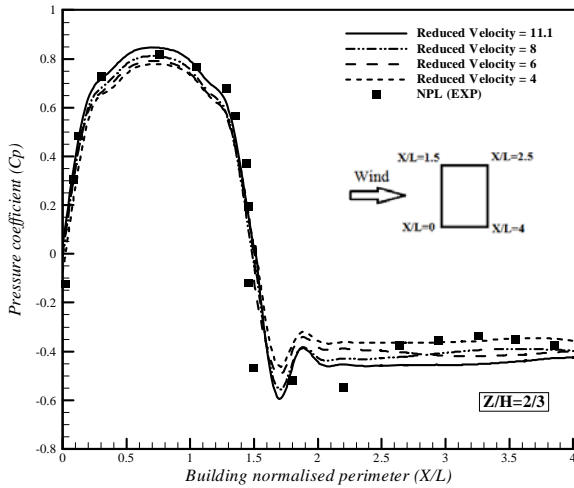
به‌منظور بررسی دقیق‌تر رفتار آئرودینامیک ساختمان بلند در برابر باد، در شکل‌های ۷-۱۰ توزیع فشار حداکثر لحظه‌ای در ارتفاع ساختمان به ترتیب به‌ازای سرعت‌های کاهش یافته ۴، ۶، ۸ و $11/1$ ارایه شده است. با توجه به این شکل‌ها، دیوار بالادست و رو به باد به‌ازای هر ۴ سرعت وزش باد تحت فشار مثبت بوده است و نواحی اطراف بام و دیوار پایین دست و پشت به باد ساختمان تحت فشار منفی قرار دارد. با تغییر سرعت وزش باد از ۳۶ به ۵۴ متر بر ثانیه، فشار لحظه‌ای حداکثر در دیوار رو به باد حدوداً $1/92$ برابر افزایش می‌یابد. به‌ازای سرعت وزش باد ۷۲ و ۱۰۰ متر بر ثانیه به ترتیب افزایشی حدوداً $3/12$ و ۶ برابر در فشار وارد بر دیوار رو به باد نسبت به سرعت وزش باد ۳۶ متر بر ثانیه حاصل شده است.



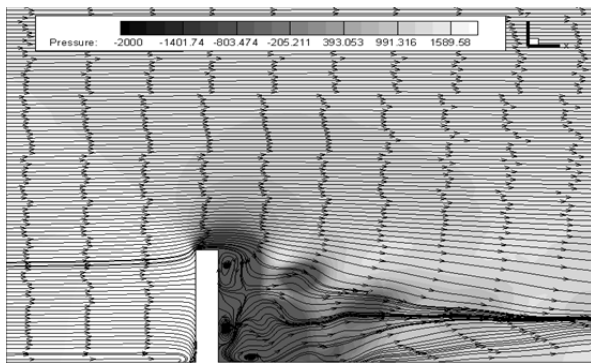
شکل ۹) خطوط جریان و میدان فشار لحظه‌ای در صفحه xy در تراز $2/3$ ارتفاع ساختمان، سرعت کاهش یافته ۴



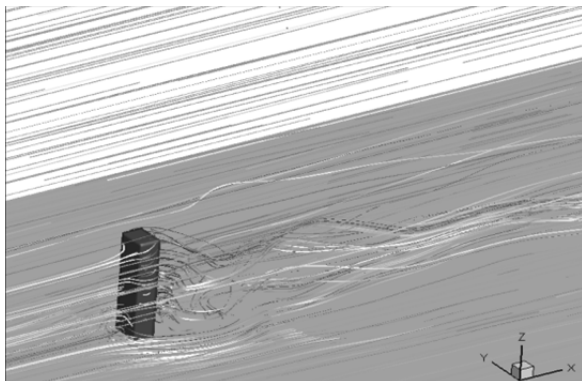
شکل ۱۰) خطوط جریان و میدان فشار لحظه‌ای در صفحه xy در تراز $2/3$ ارتفاع ساختمان، سرعت کاهش یافته ۶



نمودار ۴) ضرایب فشار در حول دیواره ساختمان در تراز ۲/۳ ارتفاع ساختمان



شکل ۱۱) خطوط جریان و میدان فشار لحظه‌ای در صفحه XZ، سرعت کاهش یافته ۱۱/۱



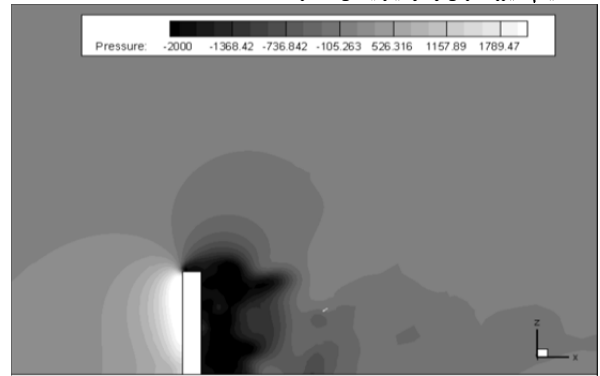
شکل ۱۲) خطوط جریان سه‌بعدی پیرامون ساختمان بلند

۴-۲ رفتار آنروالاستیک ساختمان‌های بلند

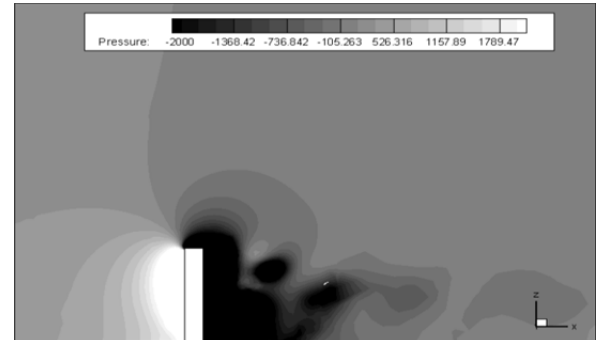
مشخصه مهم کار پژوهشی حاضر، لحاظ ویژگی‌های آنروالاستیک مدل ساختمان بلند CAARC است. اندرکنش سازه و باد به صورت کوپل شده مورد تحلیل قرار گرفته و جابه‌جایی‌های طولی و عرضی ساختمان در تحلیل موثر بوده است، در حالی که در آزمایش‌های رایج تونل باد عموماً مدل ساختمان صلب در نظر گرفته می‌شود. در این بخش ابتدا ناپایداری آنروالاستیک قفل‌شدگی ناشی از جریان باد در ساختمان‌های بلند مورد بررسی قرار می‌گیرد، سپس نتایج و مشاهدات حاصل در این مورد ارائه خواهند شد.

۴-۲-۱- پدیده قفل‌شدگی

عامل اصلی تحریک و نوسان عرضی (عمود بر باد) ساختمان‌های



شکل ۹) میدان فشار لحظه‌ای در صفحه XZ، سرعت کاهش یافته ۸

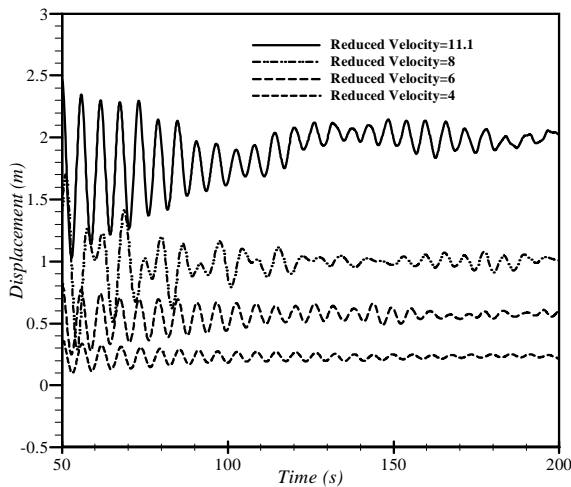


شکل ۱۰) میدان فشار لحظه‌ای در صفحه XZ، سرعت کاهش یافته ۱۱/۱

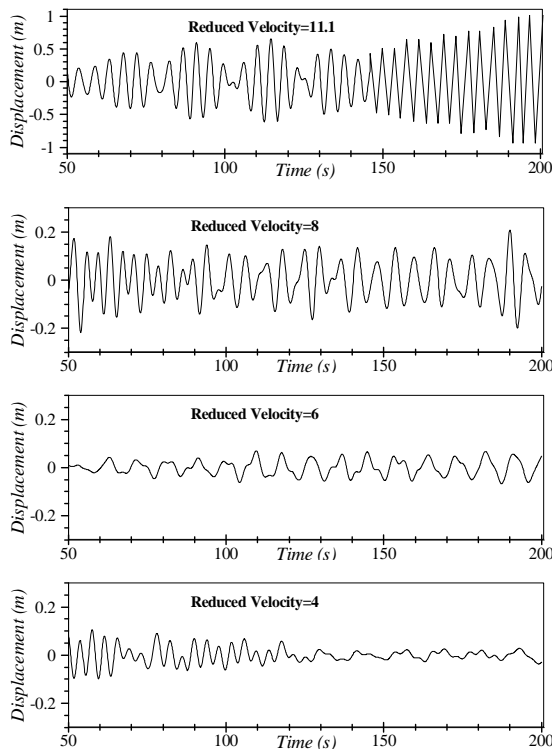
در نمودار ۴، تغییرات ضریب فشار حول دیواره ساختمان در تراز $Z/H = 2/3$ به‌ازای سرعت‌های کاهش‌یافته ۴، ۶، ۸ و ۱۱/۱ ارائه شده‌اند. ضرایب فشار در دیوار رو به باد از مقدار صفر در $X/L = 0$ به صورت صعودی تا میانه‌های دیوار افزایش می‌یابد و به حداکثر مقدار خود در نقطه آرامش جریان می‌رسد و سپس به صورت نزولی تا انتهای دیوار به مقدار صفر کاهش می‌یابد. در ابتدای دیواره کناری ($X/L = 1/5 \sim 1/7$)، گردایان فشار منفی شدیدی رخ داده که متناظر با جدایش جریان و پدیده ریزش گردادی است. در ادامه، مقادیر ضریب فشار با کمی افزایش حدوداً در $X/L = 2$ به مقدار ثابت می‌رسند. این مقدار ثابت ضریب فشار در دیواره پشت به باد نیز با کمی نوسان ادامه یافته است. با افزایش سرعت باد، مقادیر قدر مطلق ضرایب فشار در نواحی با فشار منفی افزایش می‌یابند، در حالی که این مقادیر در دیوار رو به باد، کمتر تحت تاثیر سرعت وزش باد هستند. مقادیر ضریب فشار حاصل از این پژوهش، مطابقت خوبی با مطالعه آزمایشگاهی NPL طبق گزارش ملبورن [15] دارد.

در شکل ۱۱ الگوی تشکیل خطوط جریان در صفحه قائم به‌ازای سرعت کاهش‌یافته وزش باد برابر با ۱۱/۱ ارائه شده است. در سطح رو به باد ناحیه‌ای با فشار بالا پدید می‌آید و جریان‌های بازگشتی در نزدیکی کف دامنه محاسباتی مشاهده می‌شوند. جدایش جریان در گوشه‌های رو به باد ساختمان در تراز بام مشهود است. جدایش جریان سبب تشکیل نواحی با فشار منفی و تولید جریان‌های گردبادی در ناحیه پشت شده‌اند. جریان‌های عبوری از بالای ساختمان در نواحی دورتر از گردبادهای ناحیه پشت، به سمت پایین، متمایل و به سمت نواحی با فشار کمتر هدایت شده‌اند. الگوی خطوط جریان سه‌بعدی پیرامون ساختمان بلند تحت وزش باد در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود. جدایش جریان در دیوارهای جانبی و بام ساختمان و ریزش‌های گردبادی در ناحیه پشت به خوبی قابل رویت است.

ریزش‌های گردبادی ناشی از وزش باد با سرعت کاهش یافته ۱۱/۱، حدوداً از لحظه $t=120$ ثانیه اتفاق افتاده است. این نکات با گزارش‌های *براون* و *آوروچ* [18] حاصل از شبیه‌سازی به روش برنامه‌نویسی المان محدود، در مورد ناپایداری آئروالاستیک حاصل از ریزش‌های گردبادی مطابقت مناسبی دارد.



نمودار ۵) تاریخچه زمانی جابه‌جایی‌های طولی اندازه‌گیری شده در بام ساختمان



نمودار ۶) تاریخچه زمانی جابه‌جایی‌های عرضی اندازه‌گیری شده در بام ساختمان

به‌منظور بررسی دقیق‌تر پاسخ عرضی ساختمان بلند CAARC تحت سرعت کاهش یافته ۱۱/۱ (به‌عنوان سرعت بحرانی وزش باد در این پژوهش طبق نکات بخش ۴-۲-۱)، خطوط جریان و میدان فشار لحظه‌ای در زمان‌های ۱۰، ۴۰، ۸۰، ۱۲۰، ۱۶۰ و ۲۰۰ ثانیه استخراج شده و به‌ترتیب در شکل‌های ۱۸-۱۳ ارائه شده است.

با توجه به شکل ۱۳ خطوط جریان در لحظه زمانی ۱۰ ثانیه، پس از جدایش در گوشه‌های بالادست ساختمان بلافاصله در ناحیه پشت و نزدیک ساختمان، دو گردباد متقارن و تقریباً هم‌شکل و هم‌اندازه

بلند در برابر باد، ریزش‌های گردبادی جریان پیرامون آنها است. برای هر ساختمان دلخواه، ریزش‌های گردبادی، دوره تناوب و فرکانس غالبی دارند که توسط عدد بی‌بعد استروهمال (طبق رابطه ۱۵) تعریف می‌شوند. در صورتی که فرکانس طبیعی ساختمان بر فرکانس ریزش‌های گردبادی منطبق شود، ساختمان دچار جابه‌جایی‌هایی با دامنه بزرگ خواهد شد. عبارت قفل‌شدگی معمولاً برای توصیف ارتعاش‌های عرضی ساختمان با دامنه بزرگ تحت جریان باد با سرعت بحرانی مورد استفاده قرار می‌گیرد [16]. سرعتی از وزش باد که به‌ازای آن فرکانس ریزش‌های گردبادی برابر با فرکانس طبیعی ساختمان شود، به‌عنوان سرعت بحرانی معرفی شده است.

$$St = \frac{n_v B}{U_H} \quad (15)$$

در رابطه ۱۵، St بیانگر عدد استروهمال و n_v فرکانس ریزش‌های گردبادی است. از برابری فرکانس طبیعی ساختمان با فرکانس ریزش‌های گردبادی و اعمال آن در رابطه ۱۵، سرعت بحرانی متناظر با پدیده قفل‌شدگی طبق رابطه ۱۶ به دست می‌آید.

$$U_{cr} = \frac{n_0 B}{St} \quad (16)$$

به‌منظور تخمین سرعت بحرانی متناظر با پدیده قفل‌شدگی در این پژوهش، با توجه به کار آزمایشگاهی کواک و ملبورن [16] و همچنین *ساندرز* و *ملبورن* [17]، عدد استروهمال برابر با ۰/۰۹ فرض شده است. در نتیجه سرعت بحرانی وزش باد متناظر با ناپایداری آئروالاستیک قفل‌شدگی در ساختمان بلند CAARC برابر با ۱۰۰ متر بر ثانیه در تراز بام پیش‌بینی می‌شود.

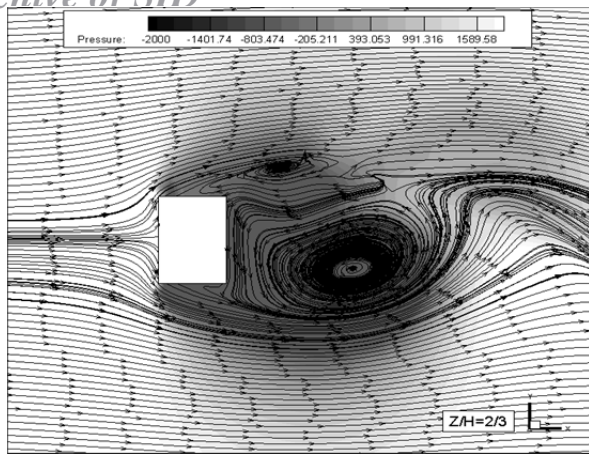
۴-۲-۲- تاریخچه زمانی جابه‌جایی طولی و عرضی ساختمان

به‌منظور بررسی پاسخ آئروالاستیک ساختمان بلند CAARC، در این پژوهش تحلیل‌های تاریخچه زمانی تحت ۴ سرعت کاهش یافته باد برابر ۴، ۶، ۸ و ۱۱/۱ اجرا شده است. تاریخچه زمانی جابه‌جایی طولی و عرضی اندازه‌گیری شده در بام ساختمان به‌ازای سرعت‌های کاهش یافته فوق‌الذکر، به‌ترتیب در نمودارهای ۵ و ۶ مشاهده می‌شوند.

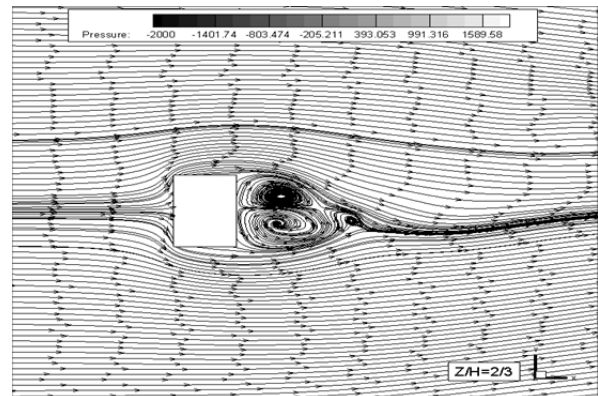
با توجه به نمودار ۵ با افزایش سرعت وزش باد، دامنه جابه‌جایی‌های طولی ساختمان نیز افزایش می‌یابد. این نکته با توجه به ارتباط مستقیم فشار حاصل از جریان باد با سرعت وزش باد کاملاً مورد انتظار است. به‌ازای تمامی سرعت‌های وزش باد، جابه‌جایی طولی ساختمان با گذر زمان رو به کاهش است و در اثر میرایی مستهلک می‌شود. قابل ذکر بوده که ارتعاش ساختمان در امتداد باد حول یک مقدار میانگین مشهود است و این مقدار با افزایش سرعت وزش باد بیشتر می‌شود.

تاریخچه زمانی نوسان ساختمان بلند در جهت عرضی به‌ازای سرعت‌های متفاوت وزش باد در نمودار ۶ ارائه شده است. در هر ۴ سرعت کاهش یافته مورد بررسی، ارتعاش عرضی ساختمان حول مقدار میانگین نزدیک به صفر رخ داده است. با افزایش سرعت وزش باد از سرعت کاهش یافته ۴ به مقادیر ۶ و ۸، دامنه نوسان‌های عرضی ساختمان کمی افزایش می‌یابد. به‌ازای سرعت کاهش یافته ۱۱/۱، نوسان‌های عرضی ساختمان طی ۲۰۰ ثانیه اول تحلیل، رفتاری مشابه با جابه‌جایی عرضی ناشی از سرعت‌های کمتر وزش باد دارد. در بازه زمانی ۱۲۰ تا ۲۰۰ ثانیه، دامنه جابه‌جایی عرضی ساختمان به‌صورت مداوم افزایش می‌یابد. این افزایش در جابه‌جایی عرضی ساختمان‌های بلند تحت یک سرعت مشخص وزش باد، نشانگر رخداد ناپایداری آئروالاستیک است. طبق نتایج حاصل، تداخل فرکانس طبیعی ارتعاش ساختمان با فرکانس

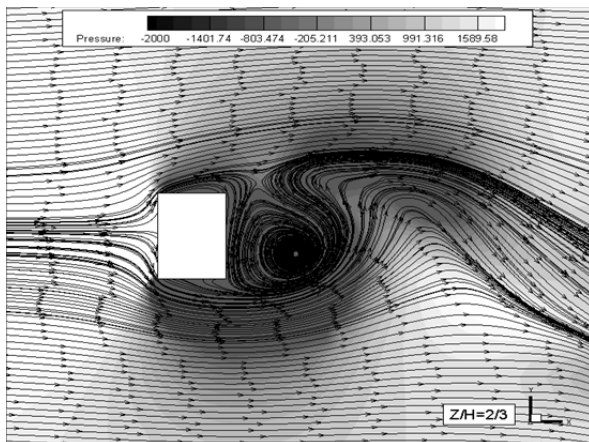
تشکیل می‌شود و آشفتگی چندانی در الگوی جریان مشاهده نمی‌شود. میدان فشار لحظه‌ای در نواحی بالادست و پایین‌دست جریان از توزیع و شدت یکنواختی برخوردارند. با افزایش زمان تحلیل به ۴۰ ثانیه، گردبادهای تشکیل‌شده از هم جدا شده و سطح بیشتری را در ناحیه پشت اشغال نموده‌اند. این گردبادهای به صورت تناوبی در پایین و بالا شکل می‌گیرند. توزیع فشار همچنان یکنواخت به نظر می‌رسد (شکل ۱۴). در لحظه زمانی ۸۰ ثانیه ابعاد و شکل دو جریان گردبادی در ناحیه پشت کمی تغییر کرده، اما حالت تناوبی آنها پابرجا است. در این لحظه فشار منفی در محل تشکیل گردبادهای نسبت به دیگر نواحی افزایش یافته است (شکل ۱۵).



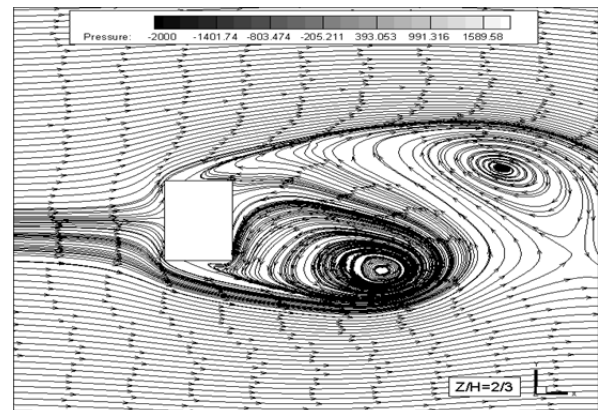
شکل ۱۶) خطوط جریان و میدان فشار لحظه‌ای در صفحه xy در تراز ارتفاع ساختمان، سرعت کاهش‌یافته ۱۱/۱، لحظه زمانی ۱۲۰ ثانیه



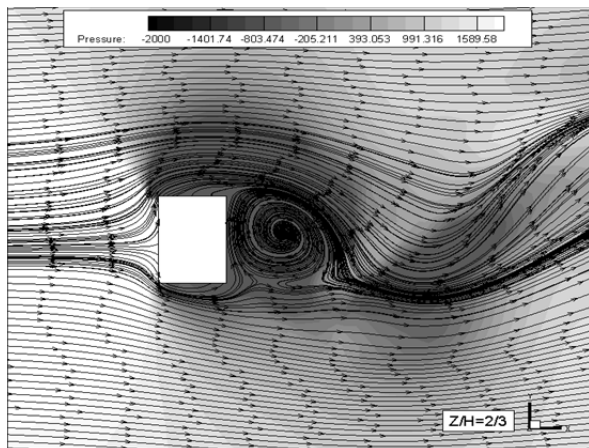
شکل ۱۳) خطوط جریان و میدان فشار لحظه‌ای در صفحه xy در تراز ارتفاع ساختمان، سرعت کاهش‌یافته ۱۱/۱، لحظه زمانی ۱۰ ثانیه



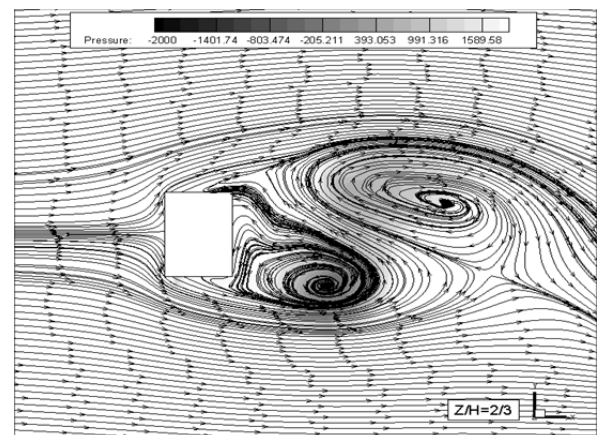
شکل ۱۷) خطوط جریان و میدان فشار لحظه‌ای در صفحه xy در تراز ارتفاع ساختمان، سرعت کاهش‌یافته ۱۱/۱، لحظه زمانی ۶۰ ثانیه



شکل ۱۴) خطوط جریان و میدان فشار لحظه‌ای در صفحه xy در تراز ارتفاع ساختمان، سرعت کاهش‌یافته ۱۱/۱، لحظه زمانی ۴۰ ثانیه



شکل ۱۸) خطوط جریان و میدان فشار لحظه‌ای در صفحه xy در تراز ارتفاع ساختمان، سرعت کاهش‌یافته ۱۱/۱، لحظه زمانی ۲۰۰ ثانیه



شکل ۱۵) خطوط جریان و میدان فشار لحظه‌ای در صفحه xy در تراز ارتفاع ساختمان، سرعت کاهش‌یافته ۱۱/۱، لحظه زمانی ۸۰ ثانیه

در لحظه زمانی ۱۲۰ ثانیه، فشار منفی در ناحیه پشت شدت و گسترش بیشتری داشته و نیز مقادیر فشار مثبت در ناحیه بالادست افزایش یافته است. در این لحظه، تقارن و حالت تناوبی موجود در ریزش‌های گردبادی بسیار کمتر شده، به طوری که یکی از گردبادهای نسبت به دیگری کاملاً تضعیف شده است و ابعاد کوچک‌تری دارد (شکل ۱۶). زمان ۱۲۰ ثانیه طبق نمودار ۶، به ازای سرعت کاهش‌یافته ۱۱/۱، حدوداً نقطه شروع افزایش دامنه جابه‌جایی عرضی ساختمان

کاهش می‌یابند. تحت وزش باد با سرعت کاهش یافته ۱۱/۱، پاسخ عرضی ساختمان در ۱۲۰ ثانیه اول تحلیل، رفتاری مشابه دیگر سرعت‌های کاهش یافته دارد. در بازه زمانی ۱۲۰ تا ۲۰۰ ثانیه، افزایش مداوم و تدریجی در دامنه جابه‌جایی عرضی ساختمان مشاهده شده است. خطوط جریان و ریزش‌های گردبادی ناحیه پشت در زمان‌های قبل از ۱۲۰ ثانیه متقارن و منظم بوده و میدان فشار لحظه‌ای در این بازه زمانی از شدت و توزیع یکنواختی برخوردار است. تقریباً با گذشت ۱۲۰ ثانیه از تحلیل عددی، تقارن و حالت تناوبی ریزش‌های گردبادی در ناحیه پشت بسیار کمتر شده است و فشار منفی در ناحیه پشت شدت و گسترش بیشتری دارد.

۶- سرعت بحرانی متناظر با ناپایداری آئرواستاتیک قفل‌شدگی با استفاده از تعریف عدد استروهال و برابری فرکانس ریزش‌های گردبادی با فرکانس طبیعی ارتعاش ساختمان برابر با ۱۰۰ متر بر ثانیه (معادل سرعت کاهش یافته ۱۱/۱) پیش‌بینی شد. با توجه به نتایج مشروح در بند ۵، به‌ازای سرعت کاهش یافته ۱۱/۱، تاریخچه جابه‌جایی عرضی ساختمان دچار افزایش مداوم در طول زمان شده که این نکته بیانگر رخداد ناپایداری آئرواستاتیک در اثر ریزش‌های گردبادی است.

تشکر و قدردانی: بخشی از پردازش‌های رایانه‌ای این پژوهش در سایت دانشکده فنی دانشگاه محقق اردبیلی انجام گرفته است که بدین وسیله تقدیر و تشکر می‌شود.

تأییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده و همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری فرستاده نشده است.

تعارض منافع: نویسندگان اعلام می‌کنند این اثر حاصل یک پژوهش مستقل بوده و هیچ گونه تضاد منافی با اشخاص دیگر یا سازمان‌ها ندارد.

سهم نویسندگان: میثم شیرزاده‌گرمی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ هوشیار ایمانی‌کله‌سر (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری (۵۰٪)

منابع مالی: این پژوهش از هیچ سازمانی حمایت مالی دریافت نکرده است.

۶- پی‌نوشت
علامه

بعد عمود بر باد ساختمان (m)	B
ثابت مدل آشفتگی WALE	C_w
عدد کورانته	C
فاصله تا نزدیک‌ترین دیواره (m)	d
نیروی ناشی از جریان سیال (N)	$f(t)$
ارتفاع متغیر از کف تا راس دامنه محاسباتی (m)	h
ارتفاع ساختمان (m)	H
بعد در امتداد باد ساختمان (m)	L
طول اختلاط در مقیاس زیر شبکه (m)	L_s
فرکانس ارتعاش ساختمان (Hz)	n_0
فرکانس ریزش‌های گردبادی (Hz)	n_p
فشار (Pa)	P
سرعت کاهش یافته	R_p
تانسور نرخ کرنش	S_{ij}
عدد استروهال	St
زمان (s)	t
سرعت (ms^{-1})	\bar{u}
سرعت در ارتفاع دلخواه h (ms^{-1})	U_h
سرعت باد در راس ساختمان (ms^{-1})	U_H
سرعت بحرانی وزش باد (ms^{-1})	U_{cr}

بلند است. با افزایش زمان تحلیل به ۱۶۰ و ۲۰۰ ثانیه طبق شکل‌های ۱۷ و ۱۸ شدت فشار منفی در ناحیه پشت و نزدیکی دیوارهای پیرامونی ساختمان افزایش زیادی داشته است. این نکته در ارتباط مستقیم با افزایش دامنه جابه‌جایی عرضی ساختمان است و تطابق مناسبی با تاریخچه زمانی جابه‌جایی عرضی (نمودار ۶) دارد. علاوه بر آن، گردبادهای نامتقارن تشکیل یافته در ناحیه پشت و خطوط جریان آشفتنه در لحظه‌های زمانی فوق‌الذکر در افزایش مداوم پاسخ عرضی ساختمان بلند کاملاً موثر هستند.

۵- نتیجه‌گیری

نتایج یک فرآیند عددی برای شبیه‌سازی وزش باد با سرعت‌های متفاوت دارای اعداد رینولدز در بازه $2/8 \times 10^6$ تا 8×10^6 در این پژوهش ارائه شده است. آثار باد بر ساختمان بلند استاندارد CAARC با لحاظ اندرکنش بین سازه و سیال مورد بررسی قرار گرفت. علایم ناپایداری آئرواستاتیک با بررسی دقیق خطوط جریان و توزیع فشار پیرامون ساختمان و نیز تاریخچه زمانی جابه‌جایی عرضی ساختمان تحت وزش باد با سرعت کاهش یافته ۱۱/۱ مشاهده شد.

در این پژوهش، معادلات ناویر-استوکس با به‌کارگیری مدل آشفتگی شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و استفاده از تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی حل شده است. از روش نیومارک با لحاظ تغییر مکان‌های بزرگ برای حل معادله حرکت سیستم در محیط دینامیک سازه‌ای استفاده شده است. برقراری اندرکنش بین محیط سازه و سیال در هر گام زمانی به روش تفکیک شده و با استفاده از کوپل‌شدگی دوطرفه حاصل شده است. خلاصه‌ای از نتایج به‌دست آمده در این پژوهش به شرح زیر ارائه می‌شود:

۱- طبق نتایج حل مستقل از شبکه، شبکه‌بندی دامنه محاسباتی با تعداد سلول حدوداً 1×10^6 ، برای محاسبات با مدل آشفتگی شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ تطبیق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.

۲- به‌ازای سرعت‌های پایین وزش باد، ریزش‌های گردبادی ناحیه پشت از دو گردباد نسبتاً متقارن و هم‌اندازه تشکیل می‌شوند، در صورتی که با افزایش سرعت باد از نظم و تقارن خطوط جریان در ناحیه پشت به شدت کاسته می‌شود. جدایش جریان در گوشه‌های تیز رو به باد رخ داده و جریان‌های بازگشتی در نزدیکی کف دامنه محاسباتی در ناحیه رو به باد مشاهده شده است.

۳- در ناحیه بالادست جریان و سطح رو به باد ساختمان در تمامی سرعت‌های وزش باد فشار مثبت ایجاد شده است و در نواحی اطراف دیوارهای موازی و پشت به باد، فشار منفی (مکش) به وجود می‌آید. به‌ازای وزش باد با سرعت‌های ۵۴، ۷۲ و ۱۰۰ متر بر ثانیه به ترتیب افزایشی حدوداً برابر با ۱/۹۲، ۳/۱۲ و ۶ برابر در شدت فشار وارد بر دیوار رو به باد در مقایسه با سرعت وزش باد ۳۶ متر بر ثانیه ثبت شده است.

۴- تاریخچه زمانی جابه‌جایی طولی در نقطه‌ای از بام ساختمان تحت سرعت‌های متفاوت وزش باد استخراج شده است. ارتعاش ساختمان در جهت طولی حول مقادیر میانگین متفاوت مشاهده شده است و دامنه نوسان‌ها به‌مرور زمان، مستهلک و کاهش می‌یابند.

۵- به‌ازای هر ۴ سرعت وزش باد مورد بررسی در این پژوهش، جابه‌جایی عرضی ساختمان حول مقدار میانگین نزدیک به صفر رخ داده است. دامنه نوسان‌های عرضی ساختمان تحت وزش باد با سرعت‌های کاهش یافته ۴، ۶ و ۸ با مرور زمان میرا می‌شوند و

dispersion around a model building. *Modares Mechanical Engineering*. 2014;14(6):165-174. [Persian]

9- Hejazi M, Taghizadeh MA, Afshari E. Numerical simulation of wind interference effects around a group of tall buildings. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*. 2015;5(2):283-298. [Persian]

10- Huang Sh, Li R, Li QS. Numerical simulation on fluid-structure interaction of wind around super-tall building at high reynolds number conditions. *Structural Engineering and Mechanics*. 2013;46(2):197-212.

11- Menter F. CFD best practice guidelines for CFD code validation for reactor-safety applications [Internet]. Kelowna: ECORA; 2002 [cited 2018 Jun 01]. Available from: <https://epdf.tips/cfd-best-practice-guidelines-for-cfd-code-validation-for-reactor-safety-applicat.html>

12- Baetke F, Werner H, Wengle H. Numerical simulation of turbulent flow over surface-mounted obstacles with sharp edges and corners. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1990;35:129-147.

13- Thepmongkorn S, Kwok KCS, Lakshmanan N. A two-degree-of-freedom base hinged aeroelastic (BHA) model for response predictions. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1999;83(1-3):171-181.

14- Larousse A, Martinuzzi R, Tropea C. Flow around surface-mounted, three-dimensional obstacles. In: D urst F, Friedrich R, Launder BE, Schmidt FW, Schumann U, Whitelaw JH, editors. *Turbulent shear flows 8: Selected papers from the 8th international symposium on turbulent shear flow*, 9-11 September, 1991, Munich, Federal Republic of Germany. Heidelberg: Springer; 1991. pp. 127-139.

15- Melbourne WH. Comparison of measurements on the CAARC standard tall building model in simulated model wind flows. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1980;6(1-2):73-88.

16- Kwok KCS, Melbourne WH. Wind-induced lock-in excitation of tall structures. *Journal of the Structural Division*. 1981;107(1):57-72.

17- Saunders JW, Melbourne WH. Tall rectangular building response to cross-wind excitation. In: Eaton KJ, Editor. *Proceedings of the fourth international conference on wind effects on buildings and structures*. Cambridge: Cambridge University Press; 1977. pp. 369-379.

18- Braun AL, Awruch AM. Aerodynamic and aeroelastic analyses on the CAARC standard tall building model using numerical simulation. *Computers and Structures*. 2009;87(9-10):564-581.

حجم سلول محاسباتی (m^3)	V
میانگین زمانی جابه‌جایی طولی بام ساختمان (m)	\bar{X}
بردار جابه‌جایی (m)	y
بردار سرعت (ms^{-1})	\dot{y}
بردار شتاب (ms^{-2})	\ddot{y}
علامه یونانی	
ضریب قانون توانی	α
دلتای کرونیگر	δ_{ij}
گام زمانی (s)	Δt
اندازه کوچکترین المان (m)	Δx
ثابت ون کارمین	k
لرزه ($kgm^{-1}s^{-1}$)	μ
لرزه آشفته ($kgm^{-1}s^{-1}$)	μ_t
چگالی (kgm^{-3})	ρ
تانسور تنش (Pa)	σ_{ij}
انحراف معیار جابه‌جایی عرضی بام ساختمان (m)	σ_y
تنش مقیاس زیر شبکه (Pa)	τ_{ij}

منابع

1- Baker CJ. Wind engineering-Past, present and future. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2007;95(9-11):843-870.

2- Blocken B. 50 years of computational wind engineering: Past, present and future. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2014;129:69-102.

3- Murakami S. Computational wind engineering. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1990;36(Part 1):517-538.

4- Tamura T. Towards practical use of LES in wind engineering. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2008;96(10-11):1451-1471.

5- Huang Sh, Li QS, Xu Sh. Numerical evaluation of wind effects on a tall steel building by CFD. *Journal of Constructional Steel Research*. 2007;63(5):612-627.

6- Heidarinejad Gh, Jadidi AM. Turbulent wind flow simulation over Tarbiat Modares University. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;14(13):272-280. [Persian]

7- Dehghani Mohamadabadi H, Yazdanfar SA, Dehghan A, Dehghani Mohamadabadi A. Numerical analysis of the performance of four-sided wind tower attached to parlor and courtyard in different wind incident angles. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;16(12):125-134. [Persian]

8- Bazdidi-Tehrani F, Mohammadi-Ahmar A, Kiamansouri M. Analysis of various non-linear k-e models accuracy to predict flow field and pollutant