

بررسی اثر اندرکنش باد - سازه بر پاسخ طولی ساختمان‌های بلند

بهنام شیرخانقاه^۱، هوشیار ایمانی کله‌سر^{۲*}

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

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

چکیده

افزایش سریع جمعیت، محدودیت فضا، عوامل اقتصادی و اجتماعی از دلایلی هستند که باعث احداث ساختمان‌های بلند شده است. از طرفی، ابداع مصالح سبک و مقاوم باعث شده است که ساختمان‌های بلند دارای میرایی کم و پیوند ارتعاشی زیاد باشند. بدین سبب، بررسی و آنالیز ساختمان‌های بلند تحت اثر نیروهای باد ضروری به نظر می‌رسد. در این پژوهش، با استفاده از روش دینامیک سیال محاسباتی (CFD) و دینامیک سازه محاسباتی (CSD)، اثر اندرکنش باد و سازه بر روی ساختمان بلند استاندارد CARRC، با استفاده از نرم افزار اجزای محدود آباکوس انجام شده است. پروفیل سرعت میانگین باد در لایه مرزی اتمسفر با فرمول نمایی و آشفتگی جریان با استفاده از روش پیچک‌های بزرگ ضمنی (ILES) شبیه‌سازی شد و یک روش هم-شبیه‌سازی برای انتقال بارهای غیریکنواخت از قلمرو سیال به گره‌های سازه‌ای به کار برده شد. میرایی سازه‌ای نیز توسط روش رایلی تعیین شد و صحت‌سنجی مدل‌سازی‌ها با نتایج آزمایشگاهی و عددی معتبر انجام شدند. نتایج حاصل نشان می‌دهند که پاسخ سازه‌های فاقد میرایی در برابر باد، به طور قابل توجهی بیشتر از پاسخ سازه‌های دارای میرایی است. نتیجه‌گیری شد که مشخصات متوسط سرعت باد بر توزیع فشار میانگین باد روی ساختمان‌های بلند خیلی تأثیر گذار است، لذا به منظور اطمینان در طراحی ساختمان‌های بلند در برابر باد مسئله اندرکنش باد و سازه باید مد نظر قرار بگیرد.

کلمات کلیدی: ساختمان CAARC، اندرکنش باد - سازه، شبیه‌سازی ILES، روش هم-شبیه‌سازی، تحلیل آئرودینامیک، تحلیل آئروالاستیک.

*نویسنده مسئول: هوشیار ایمانی کله‌سر

پست الکترونیکی: hek@uma.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۰۰۰۰/۰۰/۰۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۰۰۰۰/۰۰/۰۰

۱- مقدمه

در جوامع کنونی به دلیل رشد سریع جمعیت شهرهای بزرگ، محدودیت فضا و همچنین عوامل اقتصادی و اجتماعی، رشد بلند مرتبه سازی پیشرفت قابل توجهی داشته است. این موضوع بر جنبه‌های مختلف زندگی انسان‌ها تأثیرات مهمی داشته است، مانند شرایط آب و هوایی شهرها، محیط زیست، شرایط سلامتی و همچنین امنیت سازه‌ها [۱]. با توجه به موارد بیان شده و گسترش ساخت و سازهای بلند مرتبه، بررسی و آنالیز سازه‌های بلند تحت اثر فشار باد، جهت تأمین امنیت و رفاه ساکنان شهرها، ضروری می‌باشد [۲]. به عنوان مثال فشار و مکش ناشی از باد در وجه‌های مختلف سازه‌های بلند مرتبه، یکی از پارامترهای مؤثر در طراحی معماری و سازه‌ای ساختمان‌های بلند مرتبه می‌باشد [۳]. فشار و مکش ناشی از باد، نوعی بارگذاری تصادفی است که به پارامترهای مختلفی بستگی دارد، مانند شکل سازه، ابعاد سازه، تراکم محیط، بادخیزی منطقه و خصوصیات معماری و سازه‌ای ساختمان مورد نظر [۴]. از آنجا که بیش تر سازه‌های بلند مرتبه دارای معماری پیچیده هستند، گردبادهایی که در اطراف آن‌ها پدید می‌آید می‌تواند بر رفتار سازه تأثیر بگذارد [۵]. به علاوه بافت و تراکم محیطی نیز می‌تواند بر فشار باد وارد بر سازه مؤثر باشد. اگر سازه‌ی مورد نظر توسط تعدادی ساختمان بلند احاطه شده باشد، سرعت باد در راستاهای افقی و قائم افزایش یافته و در نتیجه فشار وارد بر ساختمان افزایش خواهد یافت [۶]. همچنین خصوصیات باد وارد بر سازه، مانند سرعت باد، راستای باد، مدت وزش باد و شدت آشفتگی باد از جمله پارامترهایی هستند که بر فشار باد وارد بر ساختمان مؤثر هستند [۷].

از دهه‌ی ۱۹۶۰ که مطالعات محققان پیرامون بار باد وارد بر سازه‌ها آغاز شد، چهار روش مختلف برای انجام تحقیقات مورد استفاده قرار گرفته است. این چهار روش عبارتند از: استفاده از سازه‌های واقع شده در محل و با اندازه‌ی واقعی جهت محاسبه بار باد [۸]، استفاده از تونل باد در مقیاس‌های کاهش یافته [۹]، مطالعات تئوری [۱۰] و شبیه‌سازی‌های عددی مانند روش دینامیک سیال محاسباتی (CFD). در بین این روش‌ها، استفاده از روش‌های تونل باد و همچنین روش CFD از رایج‌ترین روش‌های محاسبه و آنالیز بارهای باد وارد بر سازه‌ها هستند.

از بین سازه‌های واقع شده در محل با اندازه‌ی واقعی که تحت اثر بار باد مورد بررسی قرار گرفته‌اند، می‌توان به یک ساختمان دو طبقه در آیلنسوری انگلستان [۱۱]، یک ساختمان کوتاه مرتبه در دانشگاه تگزاس آمریکا [۱۲]، ساختمان ۷۸ طبقه‌ی سنترال پلاز در هنگ‌کنگ [۱۳]، ساختمان ۶۹ طبقه دیوانگ در شن‌ژن چین [۱۴] و برج ۸۸ طبقه‌ی جینمایو در چین [۱۵] اشاره کرد.

استفاده از روش تونل باد به محققین این امکان را می‌دهد که شرایط مرزی و خصوصیات باد وارد بر ساختمان را تا حد زیادی مشابه با شرایط واقعی تنظیم کنند [۱۶]. مشخصات مدل‌سازی استاندارد برای آزمایشات تونل باد در مورد آئرو دینامیک سازه‌ها ابتدا توسط وردلو و موس معرفی شد که در آن یک مدل ساختمانی ساده (CAARC) پیشنهاد شد. چندین اندازه‌گیری آزمایشگاهی بر روی مدل ساختمان CAARC در دوره ۱۹۷۰ تا ۱۹۷۵ پس از کار وردلو و موس انجام شد [۱۷]. در این روش، با وجود سختی‌های زیادی که در شبیه‌سازی شرایط آزمایش با شرایط واقعی وجود دارد، نمی‌توان نتایج را به صورت تضمینی و صددرصد صحیح دانست. به علاوه تعداد نقاطی که می‌توان به عنوان نقاط اندازه‌گیری واکنش‌های سازه در نظر گرفت، به علت فضای محدود آزمایش، بسیار محدود است [۱۸]. مطالعات زیادی برای بررسی اثر باد بر سازه‌ها با استفاده از آزمایش تونل باد انجام شده است. از جمله مطالعات اخیر انجام شده توسط تونل باد می‌توان به بررسی ارتعاشات ایجاد شده در سازه‌هایی با میرایی‌های مختلف تحت اثر وزش باد با زوایای بین صفر تا ۲۰ درجه و برای عدد رینولدز بین ۱۸۰۰۰ تا ۱۶۸۸۰۰ توسط ژیانوکینگ و همکاران [۱۹]، بررسی اثر بادهای شدید بر بام‌های کف پوش شده توسط سیمان یا خاک رس به همراه فوم توسط هوانگ و همکاران [۲۰]، بررسی تأثیر شیار در بدنه‌ی سازه‌های بلند بر اندرکنش سازه و باد و مقدار ضریب پسا در سازه توسط یوان و همکاران [۲۱]، بررسی ضریب فشار باد در سازه‌هایی با پلان نامتعارف، مانند پلان L شکل، توسط باتاچاریا و همکاران [۲۲] و بررسی تأثیر مقدار عدد رینولدز در سازه‌های منشوری مستطیل شکل با نسبت ابعادی متفاوت و گوشه‌های گرد شده با شعاع‌های متفاوت توسط ژانگ و مینگ [۲۳] اشاره کرد.

تحقیقات عددی در زمینه‌ی آئرو دینامیک سازه‌ها از اوایل دهه ۱۹۸۰ انجام شد. یکی از اولین مقالات مربوط به شبیه‌سازی عددی اثر باد بر روی اجسام، توسط هیرت و همکاران ارائه شده است [۲۴]. در این کار، مدل تفاضل محدود، بر روی آئرو دینامیک اجسام بادگیر اعمال شد. هانسون و همکاران [۲۵] و سامرز و همکاران [۲۶] را نیز می‌توان جزء اولین محققانی در نظر گرفت که شبیه‌سازی آئرو دینامیک ساختمان را به صورت عددی انجام دادند. پس از آن، مطالعات تحلیلی زیادی به منظور ارزیابی تأثیر پارامترهای مؤثر بر رفتار سازه‌ها در برابر باد انجام شد. الشار و همکاران، تأثیر شکل گوشه‌های ساختمان را بر عملکرد آئرو دینامیکی ساختمان بررسی کردند [۲۷]. هم‌چنین الشار و همکاران تأثیر افزایش تراکم ساختمان‌ها در مجاورت سازه‌ی مورد بررسی را بر فشار باد وارد بر ساختمان با استفاده از روش CFD بررسی کردند [۲۸]. مو و همکاران [۲۹] و هم‌چنین ژایو و همکاران [۳۰] تأثیر فشار باد بر سازه‌های مستطیلی شکل و بیضوی شکل را به صورت عددی بررسی کردند. منتظری و بلاکن به منظور بررسی تأثیر میزان اغتشاش جریان باد و سرعت باد بر سازه‌ها، بررسی‌هایی را بر سازه‌ی CAARC به روش شبیه‌سازی CFD انجام دادند [۱۶]. آلمی‌هانا و همکاران در یک مطالعه عددی بر مدل استاندارد CAARC با استفاده از شبیه‌سازی CFD، تأثیر اصلاح شکل گوشه‌های ساختمان را بر عملکرد آئرو دینامیکی سازه مورد بررسی قرار دادند [۳۱]. از دیگر مطالعات انجام شده برای بررسی اثر باد بر سازه‌ها با استفاده از مطالعات تحلیلی و شبیه‌سازی CFD می‌توان به بررسی و مقایسه‌ی تأثیر گردبادها بر ضریب فشار و نیروی ایجاد شده در سازه‌های منشوری و سازه‌های گنبدی توسط یوسف و همکاران [۳۲]، بررسی ضریب فشار باد ایجاد شده در سازه‌های جدار نازک با شکل نامنظم توسط رودریگز و همکاران [۳۳]، بررسی تأثیر شرایط محیطی سازه‌ی مورد نظر، میزان تراکم بافت شهری و نحوه‌ی چیدمان ساختمان‌های اطراف (منظم یا نامنظم بودن) توسط عبدی و همکاران [۳۴] و بررسی فشار باد ایجاد شده در سازه‌های نامنظم در پلان توسط چاکرابورتی و همکاران [۳۵] اشاره کرد.

در این تحقیق، تحلیل‌های آئرو دینامیکی و آئرو الاستیکی برای ارزیابی تأثیر سرعت باد و میرایی سازه بر اندرکنش باد و سازه انجام شده است. در این پژوهش، مدل‌سازی ساختمان استاندارد CAARC و شبیه‌سازی CFD به وسیله نرم افزار اجزای محدود آباکوس انجام شده و بادهایی با سرعت‌های مختلف بر سازه‌های دارای میرایی و فاقد میرایی اعمال می‌شود. پروفیل باد در لایه مرزی اتمسفر با روش نمایی مدل‌سازی شده و سپس آشفتگی جریان با روش ILES شبیه‌سازی شده و یک روش هم- شبیه‌سازی^۱ برای انتقال بارهای غیریکنواخت از سیال به گره‌های سازه‌ی استفاده شده است. میرایی سازه‌ی نیز توسط روش رابلی تعیین می‌گردد. با استفاده از نتایج حاصل از تحلیل‌های انجام شده، تأثیر تغییر این پارامترها بر ضریب فشار باد، رفتار آئرو دینامیکی و آئرو الاستیکی سازه بررسی می‌گردد.

۲- معادلات بنیادی و روش‌های عددی

۲-۱- مدل عددی برای شبیه‌سازی جریان باد

در مهندسی باد محاسباتی، فرض می‌شود جریان باد دارای خصوصیات زیر است [۳۱]:

- (۱) جریان‌های طبیعی باد در محدوده جریان تراکم ناپذیر می‌باشند.
- (۲) جریان‌های طبیعی باد در محدوده جریان آشفته هستند.
- (۳) باد با دمای ثابت (ایزوترمال) جریان دارد.
- (۴) نیروی جاذبه در قلمرو سیال نادیده گرفته می‌شود.
- (۵) باد به عنوان یک سیال نیوتنی در نظر گرفته می‌شود.

¹ Co- simulation

معادلات اساسی سیالات، فرض‌های فوق را که در جهت ساده‌سازی روابط و معادلات است، در نظر گرفته و به صورت روابط ساده شده‌ی ناویر-استوکس و معادلات دیگری که در ادامه می‌آیند، بیان می‌گردند [۳۶]. در مورد شبیه‌سازی رفتار آئرو‌دینامیک سیالات، روابط توصیفی ویلیرین استفاده می‌شود. هم‌چنین مشکلات عددی که در محاسبات عددی آشفتگی جریان سیالات وجود دارد، می‌تواند با استفاده از شبیه‌سازی ILES مرتفع گردد [۳۷]. معادلات اساسی سیستم به صورت روابط ۱ و ۲ بیان می‌گردد [۳۱]:

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \delta_{ij} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_j} \delta_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu + \mu_t}{\rho} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\lambda}{\rho} \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right] \quad i, j, k = 1, 2, 3 \quad \text{in } \Omega^f \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + v_j \frac{\partial p}{\partial x_j} + \rho c^2 \frac{\partial v_j}{\partial x_i} = 0 \quad j = 1, 2, 3 \quad \text{in } \Omega^f \quad (2)$$

در این روابط v_i مؤلفه‌های بردار سرعت، δ_{ij} مؤلفه‌های تابع دلتای کرونگر، μ و λ به ترتیب ویسکوزیته‌ی حجمی و دینامیکی سیال، μ_t ویسکوزیته گردابی، p فشار ترمودینامیکی، ρ جرم مخصوص سیال، c سرعت صوت درون سیال و Ω^f دامنه فضایی سیال است که با شرایط مرزی محدود می‌شود [۳۱].

همان‌طور که بیان شد مدل‌سازی آشفتگی جریان باد بوسیله‌ی شبیه‌سازی LES انجام می‌شود. مؤلفه‌های تانسور تنش زیرشبکه‌ی رینولدز، با استفاده از فرضیات بوزینکس به صورت رابطه‌ی ۳ تخمین زده می‌شود [۳۸]:

$$\tau_{ij}^{SGS} = \rho (\overline{v'_i v'_j}) = 2\mu_t \overline{S_{ij}} \quad (3)$$

در این رابطه μ_t ویسکوزیته گردابی و $\overline{S_{ij}}$ مؤلفه‌های تانسور نرخ کرنش هستند. ویسکوزیته گردابی با استفاده از رابطه‌ی ۴ به دست می‌آید [۳۱]:

$$\mu_t = \rho C(\bar{x}, t) \bar{\Delta}^2 |\bar{S}| \quad (4)$$

در این رابطه $C(\bar{x}, t)$ ضریب دینامیکی، $|\bar{S}|$ مدول تانسور نرخ کرنش و $\bar{\Delta}$ متناسب با ریشه‌ی سوم حجم شبکه‌های ایجاد شده می‌باشد.

۲-۲- مدل عددی برای شبیه‌سازی دینامیک ساختمان

واکنش سازه‌های ساختمان‌ها تحت تأثیر باد، با استفاده از آزمایش تونل باد و با استفاده از روش‌های سفت و یا انعطاف‌پذیر تعیین می‌شوند. از سوی دیگر، ساختمان‌های بلند به‌عنوان سازه‌های لاغر با فرکانس طبیعی اصلی پایین (معمولاً کمتر از ۱ هرتز) شناخته می‌شوند. بنابراین، این سازه‌ها ممکن است در معرض جابجایی‌های زیاد در راستای طولی جریان باد و یا در راستای عرضی جریان باد قرار گیرند. به‌همین خاطر، یک مدل تحلیلی مناسب برای توصیف دینامیک ساختمان باید ویژگی‌های زیر را داشته باشد:

(۱) مواد تشکیل دهنده ساختمان الاستیک خطی است.

(۲) تعادل انرژی بدون تبادل حرارت (ایزوترمال) حفظ می‌شود.

(۳) روش غیرخطی هندسی برای توصیف تعادل میکانیکی سازه لازم است.

تقریب اجزای محدود برای معادله تعادل دینامیکی ساختمان به‌صورت رابطه ۵ بیان می‌گردد:

$$M^{NM}\ddot{u}^M + I^N - P^N = 0 \quad (5)$$

در معادله‌ی فوق M^{MN} ماتریس جرم سازگار، I^N بردار نیروی داخلی و P^N بردار نیروی خارجی بوده و به صورت روابط (الف-ج) تعریف می‌شوند:

$$M^{MN} = \int_{V_0}^M \rho_0 N^N \cdot N^M dV_0 \quad (الف)$$

$$I^N = \int_{V_0}^M \beta^N : \sigma dV_0 \quad (ب)$$

$$P^N = \int_S^M N^N \cdot t dS + \int_V^M N^N \cdot F dV \quad (ج)$$

که در آن N تابع درون‌یابی، β ماتریس تغییرات کرنش، σ ماتریس تنش کوشی، t کشش سطح، V حجمی که توسط بخشی از جسم اشغال شده و S سطح محدود شده توسط این حجم است.

۳- صحت‌سنجی مدل اجزای محدود

از آنجا که مدل‌سازی‌ها و نتایج بررسی‌های عددی، تحت تأثیر فاکتورهای مختلفی مانند ابعاد مدل، هندسه‌ی مدل، شبکه‌بندی، خصوصیات مصالح، شرایط مرزی و خصوصیات بادهای وارد بر سازه قرار می‌گیرد، بنابراین نتایج حاصل از بررسی‌های عددی باید با توجه به نتایج معتبر آزمایشگاهی موجود اصلاح و صحت‌سنجی گردد [۳۹]. مدل سازه‌ی بلند استاندارد CAARC به عنوان یک مدل معیار جهت صحت‌سنجی نتایج عددی پذیرفته شده است. نتایج بررسی‌های انجام شده بر روی تغییرات ضریب فشار باد بر سازه‌ی بلند استاندارد CAARC توسط مراکز مختلفی مانند دانشگاه سیتی انگلستان، دانشگاه پرستول انگلستان، دانشگاه موناخ استرالیا، آزمایشگاه ملی فیزیک انگلستان و مؤسسه هوانوردی کانادا در پنجمین کنفرانس بین‌المللی تأثیر باد بر سازه‌ها منتشر گردید [۴۰، ۴۱]. در جدول ۱ خلاصه‌ای از نتایج بررسی‌های انجام شده توسط آزمایش‌های تونل باد بر ساختمان CAARC نشان داده شده است [۲]. از نتایج حاصل از این تحقیقات به‌طور گسترده در صحت‌سنجی مدل‌سازی‌های عددی استفاده می‌شود.

جدول ۱: خلاصه‌ای از نتایج بررسی‌های انجام شده توسط آزمایش‌های تونل باد بر ساختمان CAARC [۲]

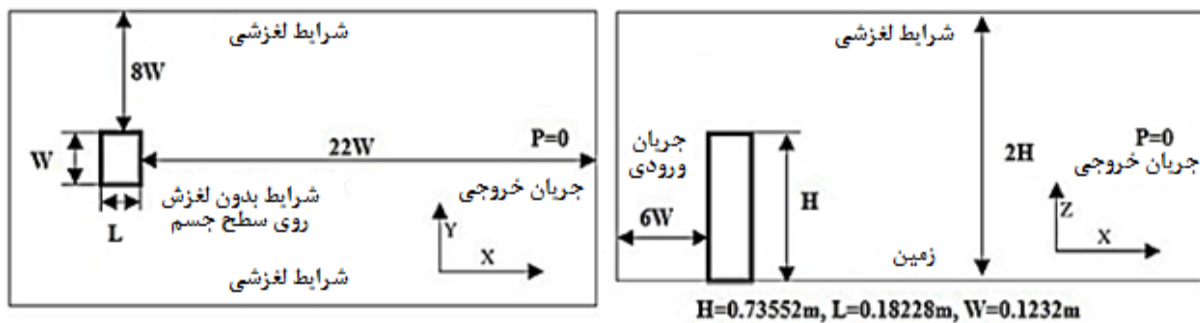
محل آزمایش	ابعاد مقطع کاری (m)	نسبت طولی	سرعت اندازه‌گیری فشار (m/s)	پروفیل باد	نسبت انسداد (%)	نسبت آشفتگی
CU	0.76×0.60	1/690	15	0.23	3.90	0.080
BU	2×1	1/500	12	>0.23	2.00	0.100
MU	2×2	1/400	30	0.25	1.30	0.090
NAE(a)	9.1×9.1	1/400	15	0.28	0.06	0.090
NAE(b)	9.1×9.1	1/400	15	0.28	0.06	0.100
NPL	2.7×2.1	1/240	18.3	0.25-0.30	2.50	0.085

TJ	3×2.5	1/300	12.7	0.30	1.25	0.110
----	-------	-------	------	------	------	-------

در ادامه به طور مختصر نحوه‌ی مدل‌سازی سازه‌ی CAARC تحت اثر باد و شبیه‌سازی CFD شرح داده می‌شود.

۱-۳- هندسه مدل

مدل سازه‌ی بلند استاندارد CAARC جهت بررسی و حصول نتایج قابل اطمینان و منطبق بر تست‌های آزمایشگاهی، در سال ۱۹۶۹ و به ابعاد (۳۰/۴۸×۴۵/۷۲×۱۸۲/۸۸) متر معرفی شد [۱۷]. اگرچه در مدل‌سازی‌های عددی می‌توان سازه را با اندازه‌ی واقعی مدل کرد، اما می‌توان با کاهش ابعاد و کاهش تعداد شبکه‌های مش‌بندی، زمان تحلیل را کاهش داد [۲]. در این پژوهش، سازه‌ی CAARC با مقیاس 1/250، یعنی با ابعاد (۰/۱۲۳۲×۰/۱۸۲۲×۰/۷۳۵۵) متر، در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس مدل‌سازی شده است. در شکل ۲ خصوصیات هندسی و شرایط مرزی نمونه‌ی مدل‌سازی شده در نرم‌افزار نشان داده شده است.



شکل ۲: خصوصیات هندسی و شرایط مرزی نمونه‌ی مورد نظر

۲-۳- خواص مکانیکی سازه

چگالی ساختمان مورد بررسی همان‌طور که توسط ملبورن پیشنهاد شده [۴۰]، به‌طور متوسط معادل ۱۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب فرض می‌شود. نسبت میرایی سازه‌ی ۱٪ است. عناصر سازه‌ای بصورت الاستیک، با لحاظ میرایی رایلی که در رابطه‌ی ۸ توصیف شده، مدل شده‌اند. با توجه به مطالعات رایان و پولانکو، ماتریس میرایی در روش رایلی، یک ترکیب خطی از مقادیر متناسب سختی و جرمی است [۴۲]:

$$[C] = \alpha [M] + \beta [K] \quad (8)$$

که در آن $[C]$ ، $[M]$ و $[K]$ ، به ترتیب ماتریس‌های میرایی، جرم و سختی هستند، α و β ضرایب مدل هستند که برای تعیین نسبت میرایی مدل در دو مود ارتعاشی مشخص، استفاده می‌شوند. با فرض نسبت میرایی یکسان (ξ) برای دو مود ارتعاشی با فرکانس‌های f_i و f_j ضرایب مدل α و β می‌توانند از روابط ۹ و ۱۰ بدست آیند [۴۲]:

$$\alpha = \xi \frac{2f_i f_j}{f_i + f_j} \quad (9)$$

$$\beta = \xi \frac{2}{f_i + f_j} \quad (10)$$

در این مطالعه، نسبت میرایی سازه (ξ) ۱٪ همراه با ضرایب مدل $\alpha = 0.2358$ و $\beta = 0.0004$ که بر اساس فرکانس موده‌های ارتعاشی اول و دوم سازه محاسبه شدند، در تحلیل دینامیکی استفاده شده است. خواص مکانیکی سازه در جدول ۲ بیان شده است.

جدول ۲: خواص مکانیکی سازه

جرم مخصوص - ρ	160 kg/m ³
فرکانس طبیعی - n	0.2
مدول یانگ - E	2.3x10 ⁸ kg/cm ²
نسبت پواسون - ν	0.25
نسبت میرایی - ξ	1%

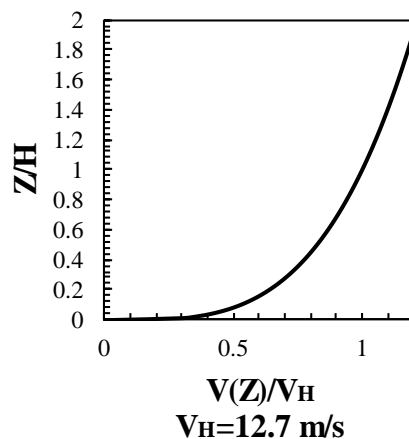
۳-۳- مدل‌سازی جریان باد و شرایط مرزی

از آنجا که سازه‌ی CAARC یک سازه‌ی بسیار بلند محسوب می‌شود، بنابراین پروفیل باد که برای نشان دادن جریان باد در شرایط مرزی اتمسفری استفاده می‌شود، به صورت معادله‌ی ۱۱ معرفی شده و در شکل ۳ نشان داده شده است [۴۳]:

$$\frac{V(z)}{V_H} = \left(\frac{z}{Z_H}\right)^\alpha \quad (11)$$

در این رابطه $V(z)$ سرعت باد در ارتفاع Z و V_H سرعت باد در ارتفاع فوقانی سازه است، یعنی در ارتفاع ۱۸۲/۸۸ متر، و معادل ۱۲/۷ متر بر ثانیه در نظر گرفته می‌شود. ضریب α نیز ضریب پروفیل باد است که بر اساس توصیه‌نامه AIJ برای بارهای وارد بر ساختمان معادل ۰/۲۸ می‌باشد [۴۳]. خواص مکانیکی سیال (باد) نیز در جدول ۳ معرفی شده است. با این ثابت‌ها عدد رینولدز ۱۵۶۵۷۵ ایجاد می‌شود.

$$V(Z) = V_H (Z/H)^{0.28}$$



شکل ۳: پروفیل سرعت باد [۴۳]

جدول ۳: خواص میکانیکی سیال

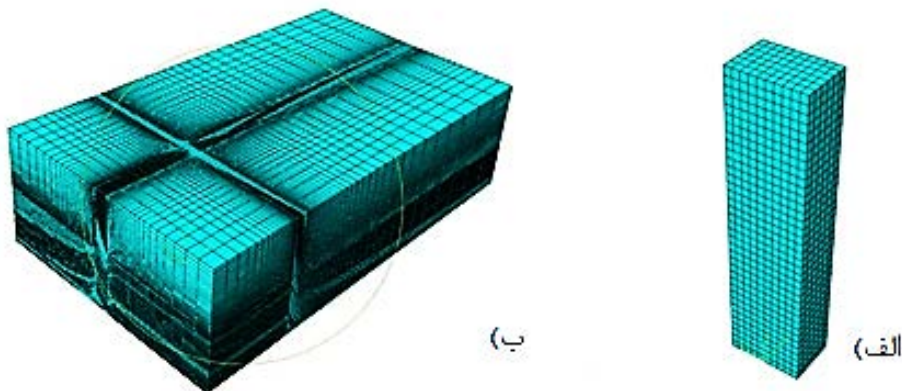
جرم مخصوص - ρ	1.225 kg/m ³
ویسکوزیته دینامیکی - μ	1.825x10 ⁻⁵
ویسکوزیته حجمی - λ	0
سرعت مرجع - V_H (سرعت ورودی در $Z=182.88$)	12.80 m/s
بعد مشخصه - W (عرض)	0.18m

۳-۴- مش بندی

علاوه بر ابعاد مدل هندسی ساخته شده در نرم افزار، یکی از پارامترهایی که بر دقت مدل سازی های انجام شده و همگرایی پاسخها تأثیر ویژه دارد، ابعاد شبکه‌ی مش بندی ایجاد شده روی مدل است. اگرچه انواع مختلفی از شبکه بندی ها تاکنون معرفی شده است، دو نوع شبکه بندی که در شبیه سازی های CFD کاربرد فراوانی دارند، شبکه بندی سازه‌ای و غیرسازه‌ای است. شبکه بندی سازه‌ای در مقایسه با شبکه بندی غیرسازه‌ای، دارای نظم بیش تری است و بین شبکه های مجاور شکل های یکسانی ایجاد می کند. بنابراین بهتر است از شبکه بندی سازه‌ای استفاده شود.

همان طور که بیان شد، در این مطالعه از سازه‌ی بلند استاندارد CAARC استفاده شده، که به صورت یک مکعب ساده مدل شده است. برای شبکه بندی این سازه، از ۲۲۲۰ المان منظم شش وجهی هشت گرهی به نام C3D8R و ۲۹۲۶ گره استفاده می شود. اندازه‌ی ابعاد شبکه‌ها در مدل ۰/۰۱۸ × ۰/۰۱۹ × ۰/۰۲۰ است. این ابعاد و تعداد شبکه‌های ایجاد شده روی مدل صحت سنجی شده، پس از سعی و خطاهای زیاد و تا زمانی که حساسیت نتایج تحلیل به اندازه‌ی مش‌ها از بین برود، حاصل شده است.

برای شبکه بندی محدوده‌ی باد از ۴۹۷۰۰۰ المان منظم شش وجهی هشت گرهی به نام FC3D8 و ۵۱۹۷۲۶ گره استفاده شده است. ابعاد شبکه‌ها در مدل متغیر است. شبکه تا حد امکان در نزدیکی سازه ریز و ایزوتروپیک است تا دقت مطلوب در تمامی جهات به دست آید، و خواص آشفتگی را که به سرعت توسط شبکه‌های درشت از بین می رود را حفظ کند. در شکل ۴ تصویر شبکه بندی سازه و محدوده‌ی باد نشان داده شده است.



شکل ۴: تصویر شبکه بندی (الف) سازه بلند استاندارد CARRC (ب) محدوده‌ی باد

۳-۵- اندرکنش سیال و سازه:

در شبیه‌سازی عددی اندرکنش سازه و سیال (FSI)، روش کوپلینگ نقش عمده‌ای بازی می‌کند. در تحلیل FSI، تعادل مکانیکی و پیوستگی سینماتیکی باید بر روی مرزهای بین بخش‌های فیزیکی مختلف ارضا شوند، که با استفاده از الگوریتم‌های کوپلینگ عددی انجام می‌شوند. مطالعات فلیپا و همکاران [۴۴]، ژانگ و هیسادا [۴۵] نشان می‌دهند که الگوریتم‌های کوپلینگ به دو صورت یکپارچه و شبکه بندی شده، طبقه‌بندی می‌شوند. الگوریتم یکپارچه از یک سیستم واحد از معادلات حاکم برای تحلیل یک مسئله FSI استفاده می‌کند و الگوریتم شبکه بندی شده از راه حل مستقل در هر بخش فیزیکی استفاده می‌کند. از آنجایی که مدل‌های یکپارچه در هنگام کار با مسائل CWE از نظر محاسباتی ناکارآمد می‌باشند، روش کوپلینگ شبکه بندی شده در این کار استفاده می‌شود.

نرم‌افزار آباکوس از روش هم- شبیه سازی برای حل شبیه سازی‌های چند فازی استفاده می‌کند. این روش کوپلینگ برای شبیه‌سازی سازه- سیال استفاده می‌شود. Abaqus/Standard می‌تواند با Abaqus/CFD کوپل شود، به طوری که داده‌هایی مانند فشار اعمالی سیال بر سازه و جابجایی سازه به صورت هماهنگ بین Abaqus/CFD و Abaqus/Standard منتقل می‌شوند [۴۶].

۳-۶- آنالیز مدل عددی و صحت سنجی:

در آنالیز مدل عددی ساخته شده، برخی از پارامترهای آئرودینامیکی برای توصیف رفتار مدل ساختمان CAARC استفاده شده است. این پارامترها شامل ضریب فشار باد (C_{pi}) و ضریب آئرودینامیکی (C_{FX}) مربوط به نیروی آئرودینامیکی جهت X می‌باشد [۲]:

$$C_{pi} = \frac{P_i - P_H}{\frac{1}{2} \rho V_H^2} \quad (12)$$

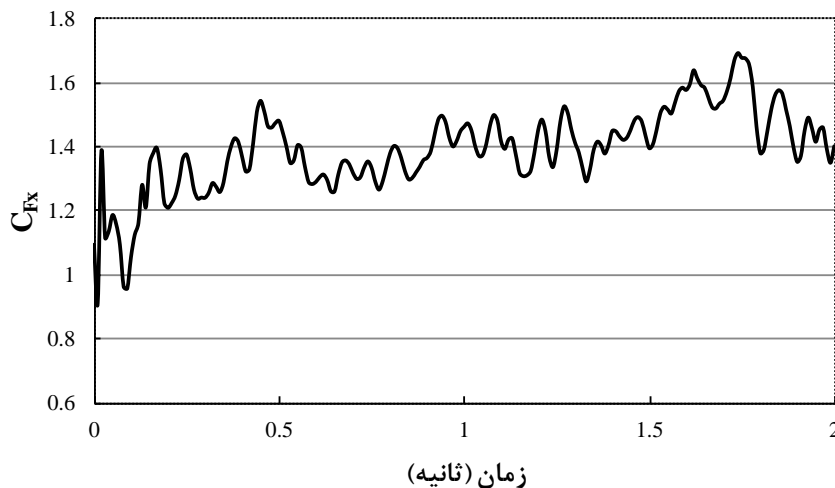
$$C_{FX} = \frac{\sum_{i=1}^{MN} F_{Xi}}{1/2 \rho W \int_0^H V^2 dZ} \quad (13)$$

در این رابطه C_{pi} ضریب میانگین فشار باد در نقطه‌ی i ام، P_i فشار باد در نقطه‌ی i ام، P_H فشار استاتیکی باد در تراز فوقانی سازه CAARC و C_{FX} ضریب آئرودینامیکی مربوط به نیروی آئرودینامیکی جهت X و V_H سرعت باد در ارتفاع فوقانی سازه و معادل $12/7$ متر بر ثانیه است. ρ چگالی هوا که معادل $1/225$ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده است و W نیز عرض سازه می‌باشد [۲].

تاریخچه زمانی ضریب آئرودینامیکی که در شبیه‌سازی حاضر به دست آمده است در شکل ۵ نشان داده شده است. میانگین زمانی و $r.m.s.$ نتایج مربوط به داده‌های عددی و تجربی داده شده توسط محققان مختلف در جدول ۴ مقایسه شده است. پیش‌بینی‌های انجام شده توسط مدل کنونی بسیار شبیه به اندازه‌گیری‌های تجربی داده شده توسط اباساجو [۴۷] برای شرایط جریان صاف است. با توجه به پیش-بینی‌هایی که توسط اباساجو در شرایط جریان صاف به عنوان نتایج مرجع انجام شده، اندازه‌گیری‌هایی انجام شده توسط مدل کنونی، در حدود ۶٪ خطا نشان می‌دهد.

جدول ۴: نتایج ضرایب آنرودینامیکی حاصل توسط محققان مختلف

شرایط ورودی	حالت	ضریب آنرودینامیکی	
		C_{Fx}	$C\sigma_{Fx}$
جریان ورودی آشفته	HUANG	1.83	0.06
جریان ورودی یکنواخت	OBASAJO	1.49	0.06
جریان ورودی آشفته	OBASAJO	1.31	0.28
کار حاضر		1.39	-

شکل ۵: منحنی تاریخچه زمانی ضریب آنرودینامیکی C_{Fx}

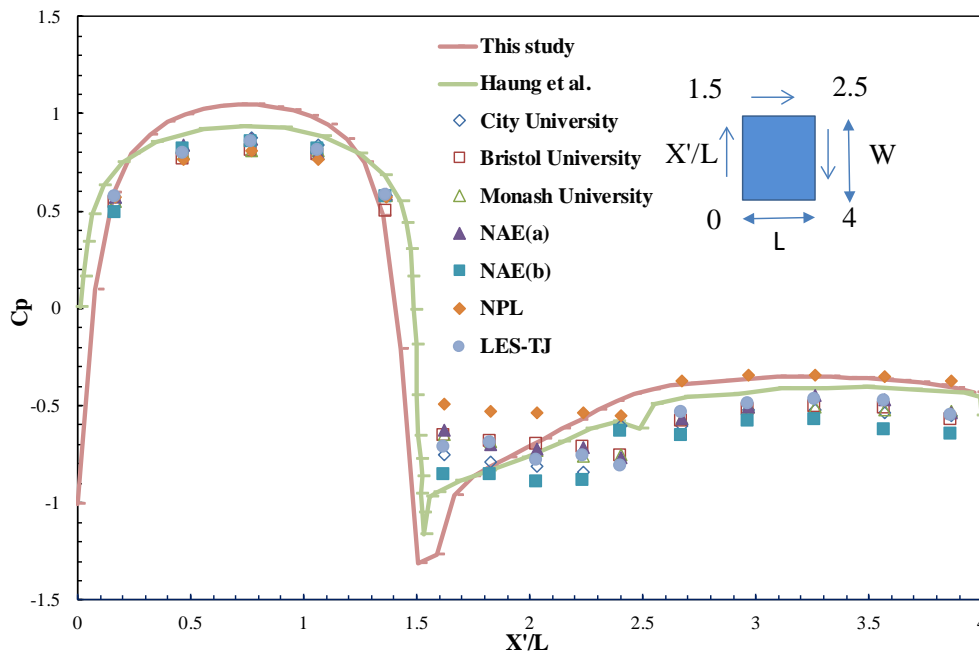
همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، برای صحت‌سنجی نمونه‌ی مدل‌سازی شده توسط نرم‌افزار آباکوس با نتایج آزمایشگاهی، نمودار تغییرات C_{pi} نسبت به تغییرات X'/L برای نتایج مطالعات عددی و آزمایشگاهی ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بین نتایج آزمایشات مختلف نیز تفاوت‌هایی وجود دارد که می‌تواند ناشی از تفاوت در تنظیمات دستگاه‌های آزمایش، ضریب پروفیل-های باد، شدت آشفتگی و نسبت ابعادی نمونه مورد بررسی در تونل باد باشد [۴۸].

بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد تطابق مناسبی بین پیش‌بینی‌های انجام شده در این پژوهش برای ضریب فشار متوسط و اندازه‌گیری‌های انجام شده به صورت تجربی و عددی مربوط به محققان دیگر وجود دارد.

همان‌طور که انتظار می‌رفت، توزیع فشار محاسبه شده در شبیه‌سازی حاضر، نزدیک به پیش‌بینی‌های تجربی مربوط به شرایط آشفتگی پایین است و مطابقت با این نتایج خوب است. تطابق بین اندازه‌گیری‌های مختلف انجام شده در $Z=2/3H$ ، زمانی که محدوده‌ی $0 < X'/L < 1.5$ که مربوط به وجه جلویی ساختمان است، در نظر گرفته شود، خیلی خوب و البته نتایج این شبیه‌سازی دست بالا است. همان

وضعیت در محدوده‌ی $2.5 < X'/L < 4$ که مربوط به وجه پشت ساختمان است، مشاهده می‌شود. در وجوه کناری که در آن‌ها $1.5 < X'/L < 2.5$ است، پراکندگی داده‌ها بیشتر آشکار است و در ابتدا نتایج شبیه‌سازی حاضر دست پایین و بعد از $X'/L=2$ دست بالا است.

در واقع یکی از دلایل اختلاف در نتایج مطالعات تجربی، مربوط به مدل‌سازی باد در تونل باد است که به شدت تحت تأثیر خواص نظیر ویژگی‌های لایه مرزی و نسبت انسداد قرار می‌گیرد. در این پژوهش نسبت انسداد تونل باد ۵٪ است که برای از بین بردن اثرات دیوار، کوچک می‌باشد. به‌علاوه کل زمان فیزیکی $t = 2$ ثانیه در نظر گرفته شده است.



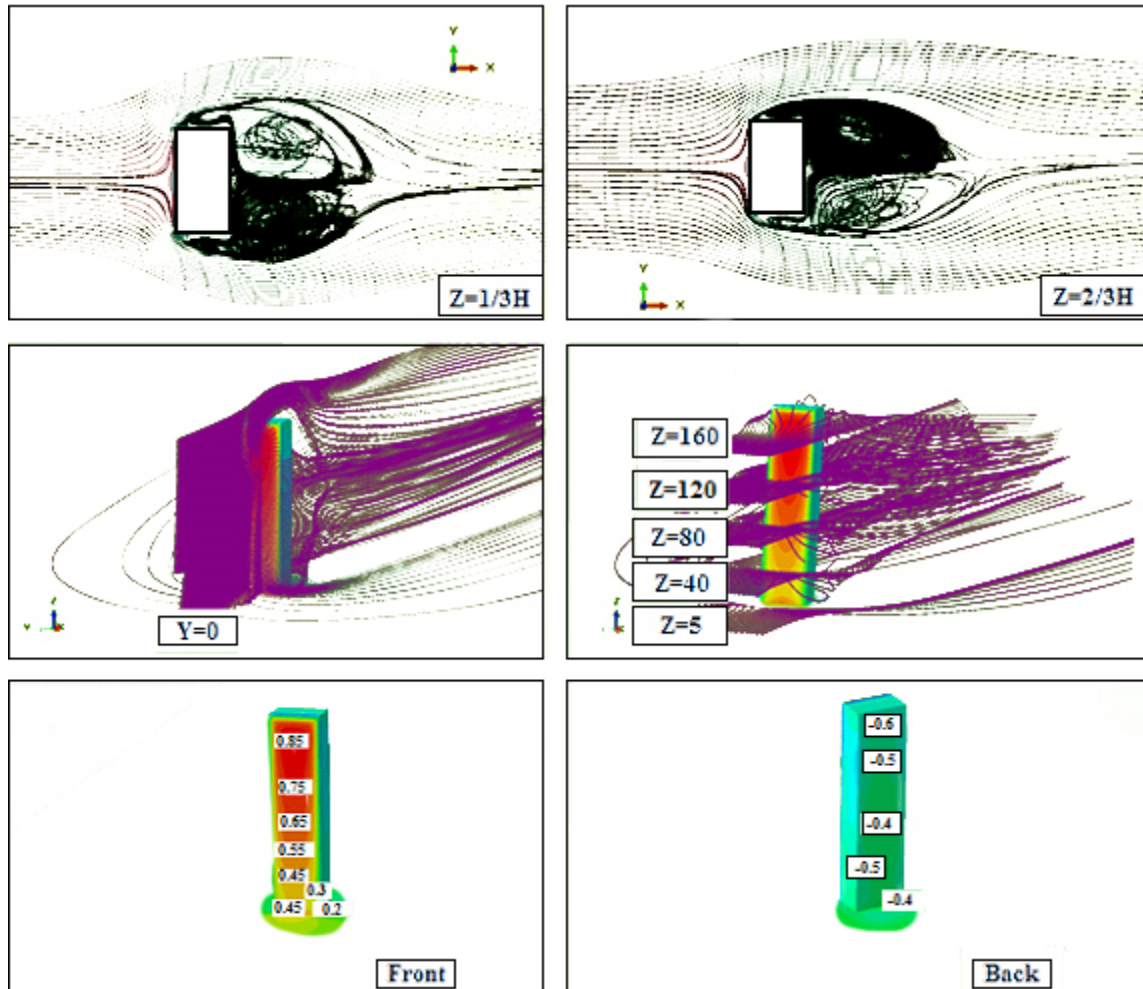
شکل ۶: نمودار تغییرات متوسط ضرایب فشار نسبت به X'/L روی محیط سازه و در ارتفاع $Z = 2/3H$

۴- آنالیز فشار باد بر مدل CAARC

الگوی توزیع فشار باد بر روی سطوح سازه‌ی بلند استاندارد CAARC بسیار پیچیده است و پدیده‌هایی مانند فشار، مکش، جریان معکوس و گردبادها همواره هنگام وزش باد در اطراف ساختمان رخ می‌دهد. کانتورهای توزیع ضرایب فشار باد که یکی از روش‌های مهم در تشریح خصوصیات و نحوه‌ی توزیع فشار باد بر روی ساختمان هستند، در شکل ۷ نشان داده شده است. در این شکل فشار و جریان در اطراف ساختمان بر روی صفحات افقی (X-Y) و عمودی (X-Z) ارائه شده است. به‌علاوه، الگوهای جریان سه بعدی متوسط که از امتداد یک خط عمودی واقع در بالادست ساختمان شروع می‌شوند، نمایش داده شده است.

میدان جریان تقریباً متقارن با دو گردباد بزرگ در منطقه پشت صفحه X-Y در $Z = 1/3H$ مشاهده می‌شود. با این حال، این ویژگی در $Z = 2/3H$ مشاهده نمی‌شود، جایی که گردبادهای نامتقارن در پشت ساختمان ایجاد شده است. هوانگ و همکاران [۳۹] متوجه شدند که میدان جریان در اطراف ساختمان عمدتاً تحت تأثیر خواص فیزیکی باد، مانند سرعت متوسط و شدت آشفتگی است. گردش جریان در مقابل ساختمان و در منطقه پشت می‌تواند به خوبی در صفحه X-Z در $Y=0$ متر دیده شود. جداسازی جریان در گوشه‌های جلو ساختمان یک منطقه مکش بزرگ با گردش زیاد در ناحیه پشت را ایجاد می‌کند. در جلوی ساختمان، یک میدان فشار بالا تولید می‌شود و جریان معکوس نزدیک به زمین مشاهده می‌شود.

شکل ۷ همچنین نشان دهنده مقادیر ضریب فشار متوسط به دست آمده در این کار بر روی وجه‌های مقابل و پشت به باد در مدل ساختمان CAARC است. توزیع فشار در وجه مقابل به باد، با پیش‌بینی‌های به دست آمده توسط هوانگ و همکاران توافق بسیار خوبی دارد [۳۹]. نتایج در وجه پشت به باد پراکنده‌تر است، ولی کار حاضر از نظر مقادیر عددی و همچنین موقعیت کانتور فشار با پیش‌بینی‌های موجود تطابق دارد.



شکل ۷: میدان‌های فشار متوسط و خطوط جریان روی ساختمان CAARC

۵- آنالیز حساسیت نتایج عددی در برابر پارامترهای مختلف

برای آنالیز حساسیت اندرکنش باد و سازه نسبت به پارامترهای مورد بررسی (سرعت باد و میرایی سازه)، مدل‌سازی‌های متعدد توسط نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس انجام شده است. برنامه‌ی کامل شبیه‌سازی‌ها و سرعت باد اعمال شده در جدول ۵ نشان داده شده است. در این جدول هر یک از حروف نام‌گذاری مفهوم خاصی دارد. حرف R نشان می‌دهد شرایط گیرداری تکیه‌گاه ثابت فرض شده است. حرف D بیانگر وجود میرایی در سازه مورد بررسی است. قرار داشتن سازه در شرایط فضای باز با حرف O نشان داده شده است.

جدول ۵: برنامه‌ی کامل شبیه‌سازی‌های انجام شده

حالت	میرایی سازه‌ای	نوع زمین	سرعت باد کاهش یافته (V_H/nW)
RO	نه	باز	$(V_H/nW) = 2, 4, 6, 8, 10$
ROD	بله	باز	$(V_H/nW) = 2, 4, 6, 8, 10$

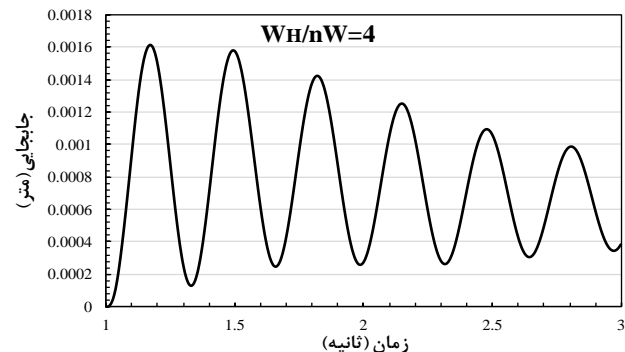
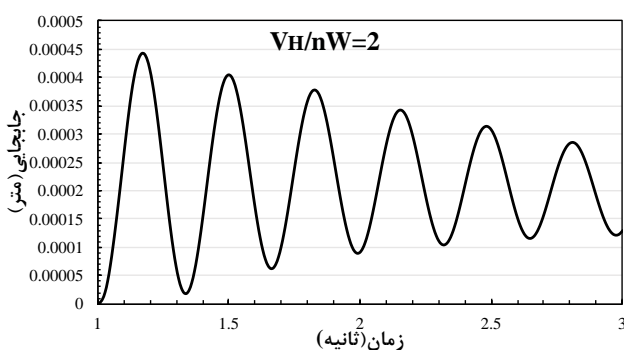
همان‌طور که مشاهده می‌شود رفتار آئروالاستیک مدل ساختمان CAARC در این کار با تحلیل پاسخ سازه‌ای آن تحت پنج سرعت مختلف سرعت باد، مطابق با سرعت‌های کاهش یافته (V_H/nW) برابر با ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه تأثیر پارامترهای مختلف در رفتار سازه در برابر فشار باد مورد بررسی قرار می‌گیرد.

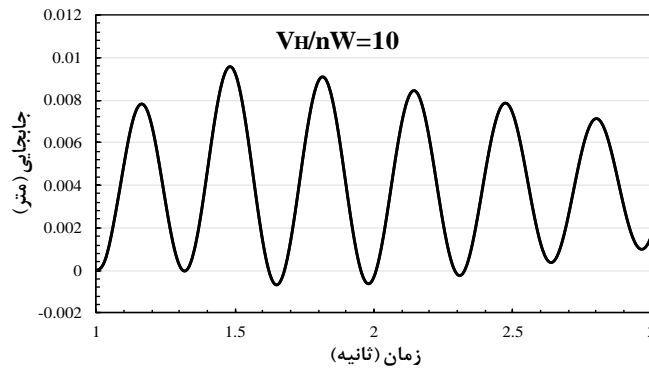
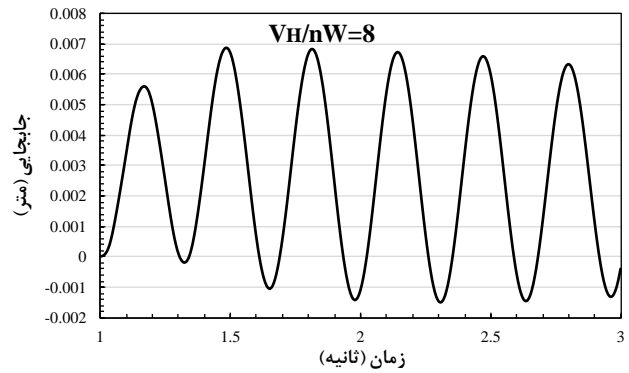
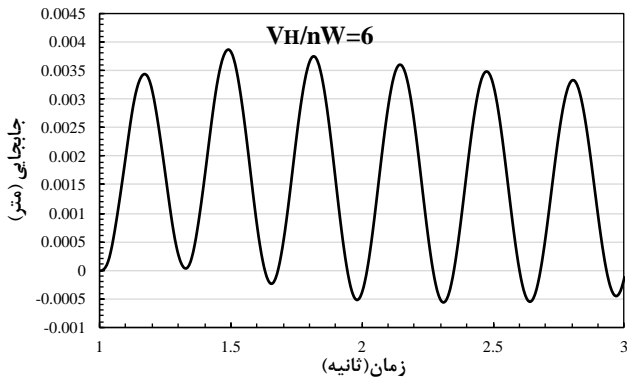
۵-۱- اثر میرایی سازه‌ای و اثر سرعت باد

شکل ۸ تاریخچه‌ی زمانی جابجایی‌های طولی در بالای ساختمان دارای میرایی و واقع در فضای باز را برای سرعت‌های مختلف باد که در تحلیل آئروالاستیک شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. نتایج مربوط به شبیه‌سازی‌های انجام شده برای ساختمان فاقد میرایی سازه‌ای که در فضای باز واقع شده نیز در شکل ۹ داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود، دامنه‌های جابجایی طولی با افزایش سرعت کاهش یافته، افزایش می‌یابد. در شکل ۸ اثر میرایی سازه‌ای بر واکنش طولی ساختمان در $(V_H/nW) = 2$ ، که در آن میرایی آئرودینامیکی بسیار کم است، نشان داده شده است. برای بقیه سرعت‌های باد بررسی شده، پاسخ طولی به تدریج توسط میرایی سازه‌ای کاهش می‌یابد. در محدوده‌های پایین‌تر سرعت کاهش یافته، میرایی سازه‌ای بسیار قوی‌تر از میرایی آئرودینامیکی است.

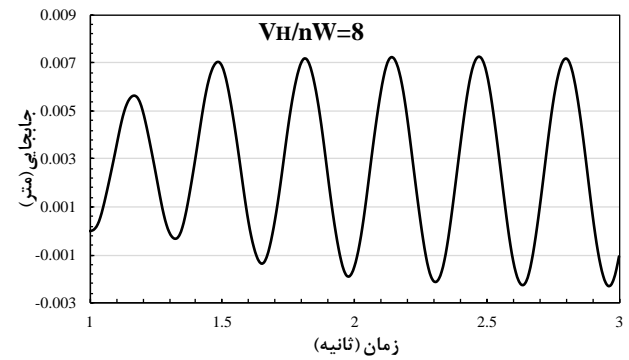
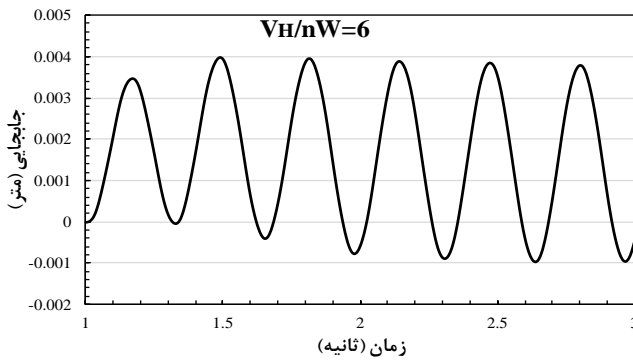
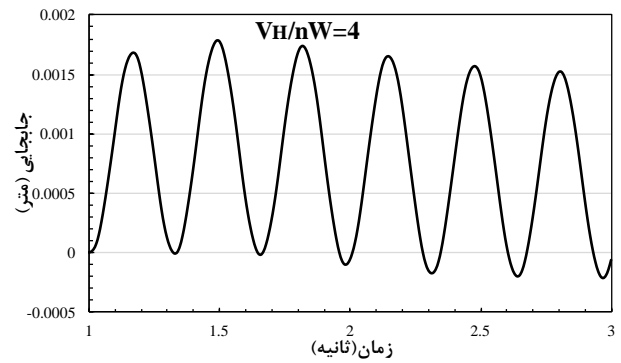
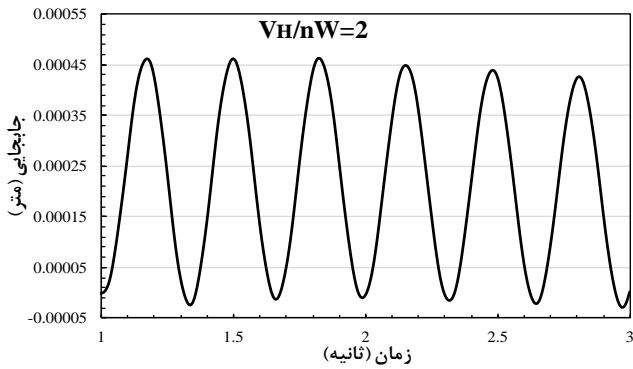
مقادیر میانگین و $r.m.s$ پاسخ‌های سازه‌ای به‌دست آمده از تاریخچه‌های زمانی نشان داده شده در شکل‌های ۸ و ۹، با بعد عرض ساختمان (W) نرمالیزه شده و بصورت تابعی از سرعت کاهش یافته (V_H/nW) در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در این شکل، تابع حداقل و حداکثر مربوط به داده‌های گزارش شده توسط ملبورن [۴۰] نیز ارائه شده است.

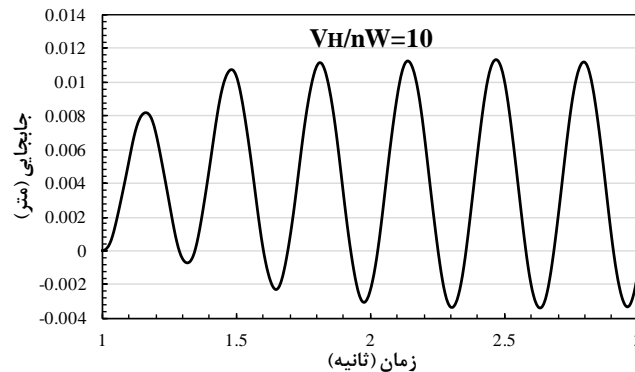
منحنی میانگین جابجایی‌های نرمال شده در طول باد (\bar{x}/L) که در این کار به‌دست آمده است، برای سازه‌ی دارای میرایی و سازه‌ی فاقد میرایی، با پیش‌بینی‌های تجربی ارائه شده توسط تمپونگکورن و همکاران تطابق بسیار مناسبی دارد. توافق بین نتایج کنونی و تابع پیشنهاد شده توسط ملبورن [۴۰] نیز قابل توجه است، اگر چه منحنی حاصل از شبیه‌سازی حاضر کمی بالاتر از تابع پیشنهاد شده توسط ملبورن است.





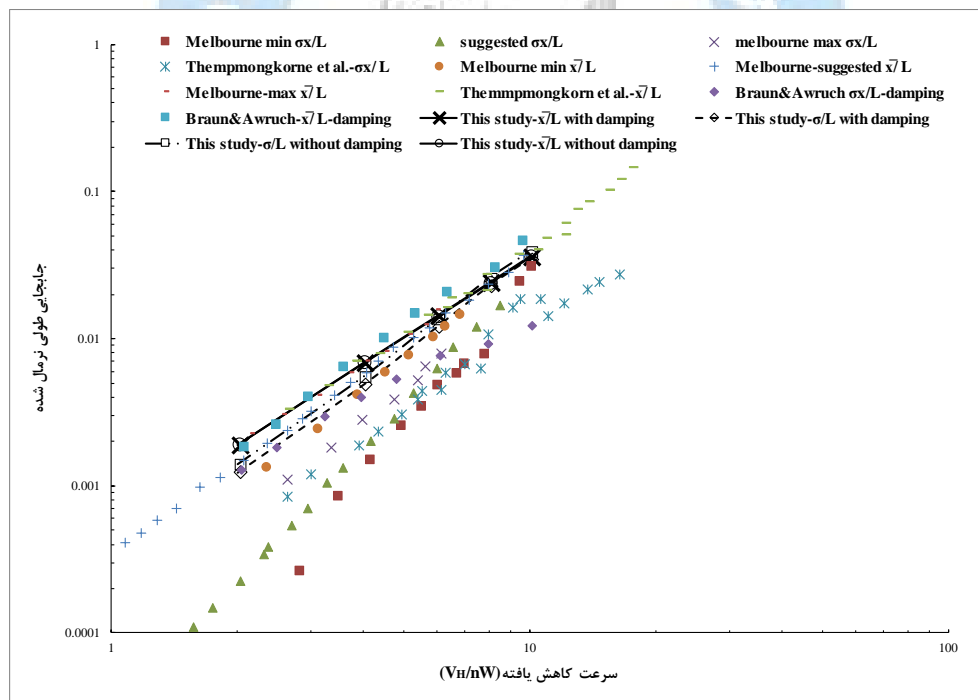
شکل ۸: تاریخچه‌های زمانی جابجایی‌های طولی بالای ساختمان CAARC در حالت ROD





شکل ۹: تاریخچه‌های زمانی جابجایی‌های طولی بالای ساختمان CAARC در حالت RO

منحنی مربوط به $r.m.s.$ جابجایی‌های نرمال شده باد طولی (σ_x/L) که در تحلیل حاضر به دست آمده، یک همبستگی معقول با پیش‌بینی‌هایی که توسط براون و اوروج [۴۹] برای سازه‌های دارای میرایی انجام داده‌اند، نشان می‌دهد. به علاوه نتایج اندازه‌گیری‌های تحلیلی در پژوهش انجام شده، در $(V_H/nW) = 5$ شروع به انحراف بیشتر از داده‌های براون و اوروج می‌کنند [۴۹]. هم‌چنین مشاهده می‌شود پیش‌بینی‌های مربوط به $r.m.s.$ جابجایی‌ها در طول باد در این پژوهش، بالاتر از محدوده‌ی داده‌های گزارش شده توسط ملبورن [۴۰] می‌باشد. بنابراین، منحنی پیشنهاد شده توسط ملبورن [۴۰] برای داده‌های σ_x/L ، غیر منطقی است. ولی تناسب میانگین پاسخ با مربع سرعت باد، که توسط ملبورن [۴۰] پیشنهاد شده، کاملاً منطقی است.



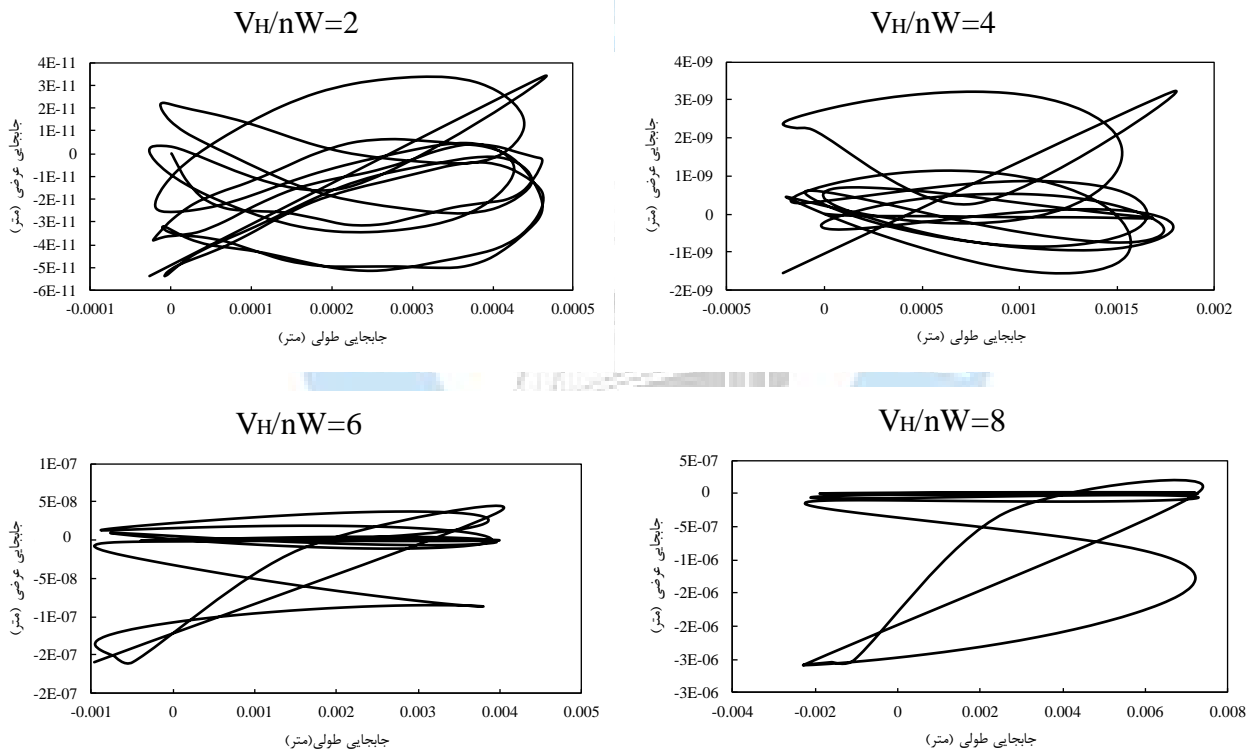
شکل ۱۰: جابجایی‌های طولی نرمال شده بصورت تابعی از سرعت کاهش یافته

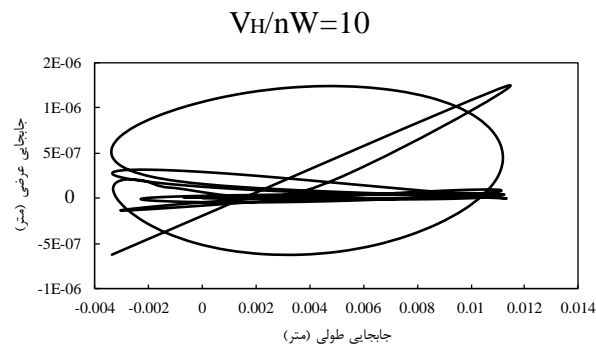
تفاوت بین نتایج تجربی و پیش‌بینی‌های عددی انجام شده در این کار را می‌توان با دلایل زیر توضیح داد: (الف) بر خلاف تونل باد که در آن واکنش‌های سازه‌ای مربوط به جهات اصلی مقطع معمولاً بدون در نظر گرفتن اثرات اندرکنش بین آن‌ها به دست می‌آید، مدل عددی کنونی به طور همزمان تمام مدهای ارتعاشی را شبیه‌سازی می‌کند؛ (ب) از آنجا که مدل ساختمان برای تحلیل آئرواستاتیک یک جسم توپر

قابل انعطاف می‌باشد، رفتار دینامیکی آن در مقایسه با آنچه که در آزمایش‌های تونل باد استفاده می‌شود، متفاوت است؛ (ج) آزمایش‌های تونل باد از فرکانس طبیعی یکسان در هر دو جهت اصلی مقطع استفاده می‌کنند، وقتی که در شبیه‌سازی از مقطع مستطیلی استفاده می‌شود، این فرض برقرار نمی‌شود؛ (د) چون پاسخ سازه‌ای تقریباً متناسب با سرعت کاهش یافته به توان ۲ تا ۳ است، هر گونه تفاوت کوچک در مشخصات باد به عنوان شرایط مرزی ورودی، ممکن است تغییر قابل توجهی در پاسخ اندازه‌گیری شده را نتیجه دهد.

تمام شبیه‌سازی‌های انجام شده بدون میرایی سازه‌ای باعث افزایش قابل توجه مقادیر *r.m.s.* پاسخ در جهت باد طولی شدند. بر اساس مطالعات ملبورن، پاسخ سازه به نسبت میرایی بحرانی به توان منفی نیم وابسته است، که نتایج حاصل از این کار در مورد اثر میرایی سازه‌ای بر جابجایی ساختمان آن را تأیید می‌کند [۴۰].

در شکل ۱۱ نیز نمودارهای دوبعدی که مسیر حرکت نقطه مرکزی سقف ساختمان را نشان می‌دهند در طول شبیه‌سازی آئروالاستیک بصورت توابعی از سرعت باد ارائه شده‌اند. می‌توان مشاهده کرد که نوسانات به‌طور عمده در جهت باد در سرعت‌های کم اتفاق می‌افتد. با افزایش سرعت باد، به دلیل تأثیر جریان‌های پشت نامتقارن که از جدایش جریان در دیواره‌های جانبی ساختمان ایجاد می‌شوند، جابه‌جایی‌ها اغلب در جهت عرضی باد اتفاق می‌افتند.





شکل ۱۱: مسیر جابجایی بالای ساختمان CAARC در پنج سرعت کاهش یافته $Vr = 2, 4, 6, 8, 10$

۶- نتیجه گیری

افزایش سریع جمعیت شهرهای بزرگ و محدودیت فضا و همچنین عوامل اقتصادی و اجتماعی از عواملی هستند که باعث توسعه ساخت و سازهای بلند مرتبه شده است. بنابراین بررسی و آنالیز سازه‌های بلند تحت اثر فشار باد ضروری می‌باشد. در این پژوهش با استفاده از روش شبیه‌سازی CFD و با استفاده از سازه بلند استاندارد CAARC که یک مدل شناخته شده جهت مدل‌سازی و صحت‌سنجی سازه‌ها تحت اثر بار باد است، تأثیر تغییرات سرعت باد، میرایی سازه‌ها بر اندرکنش‌های آئروپنماتیکی و آئروالاستیکی سازه و باد بررسی شده است. در این تحقیق، چندین مدل سه بعدی از سازه‌ی بلند استاندارد CAARC با استفاده از نرم افزار آباکوس مدل‌سازی شده و تحلیل غیرخطی هندسی آن‌ها تحت اثر بار باد انجام شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد:

- (۱) در همه سازه‌ها، دامنه جابجایی‌های طولی با افزایش سرعت، افزایش می‌یابند.
- (۲) در سازه‌های دارای میرایی، جابجایی‌های طولی به تدریج توسط میرایی سازه کاهش پیدا می‌کنند.
- (۳) اثر میرایی سازه در محدوده‌های پایین‌تر سرعت، بسیار قوی‌تر از اثر میرایی آئروپنماتیکی است.
- (۴) دامنه و مقدار پاسخ‌ها در سازه‌های فاقد میرایی به مراتب بزرگ‌تر از سازه‌های دارای میرایی است.
- (۵) نوسانات عمده در جهت باد، در سرعت کم اتفاق می‌افتد. با افزایش سرعت باد، اغلب جابجایی‌ها در جهت عرضی اتفاق می‌افتند.
- (۶) مدل ساختمانی که در این پژوهش (جسم الاستیک توپر) استفاده شد، بسیار متفاوت از مدل‌های ساختمانی است که معمولاً در آزمایشات تونل باد استفاده می‌شود. یک مدل ساختمان با یک مقطع توخالی و سخت کننده، با شرایطی که در مدل‌های تونل باد استفاده می‌شود، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر این، یک الگوریتم برای تولید نوسانات تصادفی روی پروفیل سرعت متوسط باید به منظور شبیه‌سازی شرایط آشفته‌گی اتمسفر در باد باید اعمال شود. نوسانات آشفته در شرایط مرزی ورودی مورد استفاده در این پژوهش اعمال نشده است.

سپاسگزاری

نویسندگان از مسؤولین محترم دانشگاه امیرکبیر و دانشگاه محقق اردبیلی برای ارائه ابرکامپیوتر، بسیار سپاسگزاری می‌کنند. همچنین نویسندگان این مقاله از تمام اعضای علمی این مجله کمال قدردانی را دارند.

مراجع

- [1] Ng, E. Yuan, C. Chen, L. Ren, C. and Fung, J.C. (2011). Improving the wind environment in high-density cities by understanding urban morphology and surface roughness: a study in Hong Kong. *Landscape and Urban Planning*, 101(1), 59-74.
- [2] Elshaer, A. Bitsuamlak, G. and El Damatty, A. (2017). Enhancing wind performance of tall buildings using corner aerodynamic optimization. *Engineering Structures*, 136, 133-148.
- [3] Huang, M. (2017). *High-Rise Buildings under Multi-Hazard Environment*, Singapore: Springer, 83-104.
- [4] Lin, N. Letchford, C. Tamura, Y. Liang, B. and Nakamura, O. (2005). Characteristics of wind forces acting on tall buildings. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 93(3), 217-242.
- [5] Tutar, M. and Oguz, G. (2002). Large eddy simulation of wind flow around parallel buildings with varying configurations. *Fluid Dynamics Research*, 31(5), 289-315.
- [6] Kim, Y.C. Yoshida, A. and Tamura, Y. (2012). Characteristics of surface wind pressures on low-rise building located among large group of surrounding buildings. *Engineering Structures*, 35, 18-28.
- [7] Tanaka, H. Tamura, Y. Ohtake, K. Nakai, M. and Kim, Y.C. (2012). Experimental investigation of aerodynamic forces and wind pressures acting on tall buildings with various unconventional configurations. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 107, 179-191.
- [8] Eaton, K.J. and Mayne, J.R. (1975). The measurement of wind pressures on two-storey houses at Aylesbury. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 1, 67-109.
- [9] Murakami, S. Mochida, A. and Hibi, K. (1987). Three-dimensional numerical simulation of airflow around a cubic model by means of large eddy simulation. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 25(3), 291-305
- [10] Chen, Q. (2009). Ventilation performance prediction for buildings: a method overview and recent applications. *Building and Environment*, 44(4), 848-858.
- [11] Sill, B.L. Cook, N.J. and Fang, C. (1992). The Aylesbury comparative experiment: a final report. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 43(1), 1553-1564.
- [12] Levitan, M.L. Mehta, K.C. Vann, W.P. and Holmes, J.D. (1991). Field measurements of pressures on the Texas Tech building. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 38(2-3), 227-234.
- [13] Li, Q.S. Xiao, Y.Q. Wong, C.K. and Jeary, A.P. (2003). Field measurements of wind effects on the tallest building in Hong Kong. *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 12(1), 67-82.
- [14] Li, Q.S. Xiao, Y.Q. Wong, C.K. and Jeary, A.P. (2004). Field measurements of typhoon effects on a super tall building. *Engineering Structures*, 26(2), 233-244.
- [15] Li, Q.S. Fu, J.Y. Xiao, Y.Q. Li, Z.N. Ni, Z.H. Xie, Z.N. and Gu, M. (2006). Wind tunnel and full scale study of wind effects on China's tallest building. *Engineering Structures*, 28(12), 1745-1758.
- [16] Montazeri, H. and Blocken, B. (2013). CFD simulation of wind-induced pressure coefficients on buildings with and without balconies: validation and sensitivity analysis. *Building and Environment*, 60, 137-149.
- [17] Wardlaw, R.L. and Moss, G.F. (1970). *A standard tall building model for the comparison of simulated natural winds in wind tunnels*, CAARC 25 (CC662m Tech).
- [18] Stathopoulos, T. (1997). Computational wind engineering: past achievements and future challenges. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 67, 509-532.
- [19] Xiaoqing, D. and Jiang, B. Dai, C. Wang, G. and Chen, S. (2018). Experimental study on wake-induced vibrations of two circular cylinders with two degrees of freedom. *Wind and Structures Journal*, 26(2), 57-68.
- [20] Huang, P. Lin, H. Hu, F. and Gu, M. (2018). Experimental study and FE analysis of tile roofs under simulated strong wind impact. *Wind and Structures Journal*, 26(2), 75-87.
- [21] Yuan, W.B. Yu, N.T. and Wang, Z. (2018). The effects of grooves on wind characteristics of tall cylinder buildings. *Wind and Structures Journal*, 26(2), 89-98.
- [22] Bhattacharyya, B. and Dalui, S.K. (2018). Investigation of mean wind pressures on 'E' plan shaped tall building. *Wind and Structures Journal*, 26(2), 99-114
- [23] Wang, X. and Gu, M. (2015). Experimental investigation of Reynolds number effects on 2D rectangular prisms with various side ratios and rounded corners. *Wind and Structures Journal*, 21(2), 183-202.
- [24] Hirt, C.W. Ramshaw, J.D. and Stein, L.R. (1978). Numerical simulation of three-dimensional flow past bluff bodies. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering Journal*, 14(1), 93-124.
- [25] Hanson, T. Summers, D. and Wilson, C.B. (1986). A three-dimensional simulation of wind flow around buildings. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 6, 113-127.
- [26] Summers, D.M. Hanson, T. and Wilson, C.B. (1986). Validation of a computer simulation of wind flow over a building model. *Building Environment Journal*, 21(2), 97-111.

- [27] Meng, F.Q. He, B.J. Zhu, J. Zhao, D.X. Darko, A. and 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.
- [28] Elshaer, A. Gairola, A. Adamek, K. and Bitsuamlak, G. (2017). Variations in wind load on tall buildings due to urban development. *Sustainable Cities and Society*, 34, 264-277.
- [29] Mou, B. He, B.J. Zhao, D.X. and Chau, K.W. (2017). Numerical simulation of the effects of building dimensional variation on wind pressure distribution. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 11(1), 293-309.
- [30] Zhao, D.X. and He, B.J. (2017). Effects of architectural shapes on surface wind pressure distribution: case studies of oval-shaped tall buildings. *Journal of Building Engineering*, 12, 219-228.
- [31] Alminhanea, G.W. Brauna, A.L. Souzaa, A.M.L. (2018). A numerical study on the aerodynamic performance of building cross sections using corner modifications. *Latin American Journal of Solis and Structures*, 15(7), 1-18.
- [32]. Yousef, M.A.A. Selvam, P.R. and Prakash, J. (2018). A comparison of the forces on dome and prism for straight and tornadic wind using CFD model. *Wind and Structures Journal*, 26(6), 369-382.
- [33] Rodrigues, A.M. Tomé, A. and Gomes, M.G. (2017). Computational study of the wind load on a free-form complex thin shell structure. *Wind and Structures Journal*, 25(2), 177-193.
- [34] Abdi, S.D. and Bitsuamlak, G.T. (2016). Wind flow simulations in idealized and real built environments with models of various level of complexity. *Wind and Structures Journal*, 22(4), 503-524.
- [35] Chakraborty, S. Dalui, S.K. and Ahuja, A.K. (2014). Wind load on irregular plan shaped tall building – a case study. *Wind and Structures Journal*, 19(1), 59-73.
- [36] Lateb, M. Masson, C. Stathopoulos, T. and Bédard, C. (2013). Comparison of various types of k-ε models for pollutant emissions around a two-building configuration. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic*, 115, 9-21.
- [37] Smagorinsky, J. (1963). General circulation experiments with primitive equations I, the basic experiment. *Monthly Weather Review*, 91, 99-165.
- [38] Lilly, D.K. (1992). A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method. *Physics of Fluids A*, 4, 633-5.
- [39] 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.
- [40] Melbourne, W.H. (1980). Comparison of measurements on the CAARC standard tall building model in simulated model wind flows. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 6(1-2), 73-88.
- [41] Qian, T. (2013). *Study of Wind Loads on High-rise Building with Different Length to Width Ratios*. Hangzhou: Zhejiang University.
- [42] Ryan, K.L. and Polanco, J. (2008). Problems with Rayleigh damping in base-isolated buildings. *Journal of Structural Engineering*, 134, 1780-1784.
- [43] AIJ, (1996). *AIJ Recommendations for Loads on Buildings*. Tokyo: Architectural Institutes of Japan.
- [44] Felippa, C.A. Park, K.C. and Farhat, C. (2001). Partitioned analysis of coupled mechanical systems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering Journal*, 190, 3247-3270.
- [45] Zhang, Q. and Hisada, T. (2004). Studies of the strong coupling and weak coupling methods in FSI analysis. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 60, 2013-2029.
- [46] ABAQUS User's Manual, V. 6.16.1.
- [47] Obasaju, E.D. (1992). Measurement of forces and base overturning moments on the CAARC tall building model in a simulated atmospheric boundary layer. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 40, 103-26.
- [48] Luo, P. (2004). *Wind Tunnel Test on Standard CAARC Tall Building Model*. Shanghai: Tongji University.
- [49] Braun, A.L. and Awruch, A.M. (2009). Aerodynamic and aero-elastic analyses on the CAARC standard tall building model using numerical simulation. *Computers and Structures*, 87, 564-581.