



Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir



Parametric Study of the Crosswind Response of Tall Buildings Using Frequency Domain Analysis and Random Vibration Method

Nahmat Khodaie*

Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Khormoj branch, Khormoj, Iran

ABSTRACT

By increasing the height and slenderness of tall buildings, the wind-induced dynamic response especially crosswind response becomes the governing parameter in the occupant comfort requirement of tall buildings. In the present study, crosswind response of tall buildings has been investigated using the frequency domain analysis of multi-degrees-of-freedom systems based on the random vibration method. The tall structure has been modeled as a vertical cantilever beam with the masses lumped at the nodes. All the modeling and analysis procedure, including element meshing, determining the transfer matrix, calculating the matrix of crosswind force spectrum, and the numerical integration to obtain the root-mean-square (RMS) displacement and acceleration responses are carried out using MATLAB software. The effect of different parameters, such as basic wind speed, aspect ratio, side ratio for rectangle section and top to bottom width ratio for tapered tall buildings has been investigated. The results show that the slenderness ratio has an important role on the across-wind response. For tapered buildings, the crosswind displacement response decreases considerably with increasing the top to bottom width ratio. For the studied tall buildings, the crosswind acceleration response is higher than the occupant comfort level and it requires to be reduced using an appropriate control strategy.

ARTICLE INFO

Receive Date: 18 June 2019
Revise Date: 24 July 2019
Accept Date: 08 August 2019

Keywords:

Crosswind response;
Tall building;
Frequency domain analysis;
Random vibration;
Parametric study

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.190732.1884

*Corresponding author: Nahmat Khodaie
Email address: nahmat.khodaie@uma.ac.ir

مطالعه پارامتری پاسخ عرضی ساختمان های بلند در برابر باد بر مبنای تحلیل حوزه فرکانس و ارتعاشات تصادفی

نهمت خدائی*

استاد یار، مهندسی سازه، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خورموج، خورموج، ایران

چکیده

با افزایش روزافزون ارتفاع و لاغری ساختمان های بلند، پاسخ دینامیکی در مقابل باد به ویژه پاسخ عرضی از عوامل تعیین کننده در معیار آسایش ساکنین ساختمان های بلند محسوب می شود. در این تحقیق، پاسخ عرضی ساختمان های بلند در برابر باد به صورت پارامتری، با استفاده از تحلیل حوزه فرکانس سیستم های چند درجه آزادی و مبانی ارتعاشات تصادفی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. سازه بلند به صورت تیر طره ای قائم با جرم های متمرکز در گره ها مدل سازی گردیده است. کلیه مراحل مدل سازی و تحلیل سازه، شامل المان بندی، تعیین ماتریس انتقال سازه، استخراج ماتریس های تابع طیفی نیروهای عرضی باد و انتگرال گیری عددی برای محاسبه انحراف معیار جابجایی و شتاب عرضی، با برنامه نویسی در محیط نرم افزار متلب انجام شده است. تاثیر پارامترهای مختلف از قبیل سرعت مبنای باد، لاغری سازه، نسبت طول به عرض در پلان برای ساختمان های با مقطع مستطیل و نسبت بعد فوقانی به تحتانی برای ساختمان های مقطع متغیر، مورد تحلیل و بحث قرار گرفته است. از نتایج حاصله می توان به نقش مهم نسبت لاغری در پاسخ عرضی سازه اشاره نمود. برای ساختمان های با مقطع متغیر در ارتفاع، با کاهش نسبت عرض فوقانی به عرض تحتانی، جابجایی عرضی تراز فوقانی به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. همچنین مطابق نتایج، شتاب عرضی ساختمان های مطالعه شده فراتر از حد آسایش ساکنین بود که نیاز به تمهیدات کنترل ارتعاشات می باشد.

کلمات کلیدی: پاسخ عرضی باد، ساختمان بلند، تحلیل حوزه فرکانس، ارتعاشات تصادفی، مطالعه پارامتری

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/JSCE.2019.190732.1884	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.190732.1884	۱۴۰۰/۰۴/۳۰	۱۳۹۸/۰۵/۱۷	۱۳۹۸/۰۵/۱۷	۱۳۹۸/۰۵/۰۲	۱۳۹۸/۰۳/۲۸
نهمت خدائی					*نویسنده مسئول:	
Nahmat.khodaie@uma.ac.ir					پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

افزایش تقاضا برای ساختمان‌های مسکونی و تجاری مرتفع از یک طرف و پیشرفت‌های اخیر در تکنولوژی طراحی و ساخت و همچنین به‌کارگیری مصالح با مقاومت بالا و وزن کم، موجب لاغرتر شدن و کاهش میرایی ساختمان‌های بلند مدرن گردیده است. در نتیجه، حساسیت ساختمان‌های بلند در مقابل بارهای دینامیکی از جمله نیروی باد، افزایش یافته است. در طراحی ساختمان‌های بلند، کنترل الزامات جابجایی و شتاب، برای تامین آسایش ساکنین از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد. در این نوع سازه‌ها، نیروهای دینامیکی باد عامل تعیین‌کننده می‌باشد. اثر نیروهای باد بر سازه‌های بلند، در دو امتداد طولی یا جهت وزش باد و عرضی یا عمود بر امتداد وزش باد، مورد بررسی قرار می‌گیرد. پاسخ سازه در جهت عرضی، غالباً در اثر تحریک ریزش گردبادی در ناحیه پشت سازه اتفاق می‌افتد. برای ساختمان‌های با نسبت لاغری بیش از 5، پاسخ عرضی ساختمان‌های بلند عموماً از پاسخ طولی آن‌ها بیشتر می‌باشد [1-3]. بنابراین، تعیین پاسخ عرضی ساختمان‌های بلند در برابر باد، شامل محاسبه جابجایی و شتاب و نیروهای دینامیکی داخلی، برای تحلیل و طراحی این سازه‌ها حائز اهمیت می‌باشد. معیارهای بهره برداری ساختمان‌های بلند عموماً بر اساس شاخص‌های دریافت و شتاب ماکزیمم بیان می‌شود. برای حفظ عملکرد پوشش و نمای ساختمان، حداکثر چرخش بین طبقه‌ای ناشی از نیروهای جانبی و بدون ضریب به 1/400 تا 1/600 ارتفاع طبقه محدود می‌شود که این معیار بر حسب نوع پوشش ساختمان و اتصالات مربوطه متغیر می‌باشد. شتاب ماکزیمم مجاز با دوره بازگشت ۱۰ ساله برای ساختمان‌های مسکونی، ۱۰ تا ۱۵ سانتیمتر بر مجذور ثانیه می‌باشد [4].

مکانیزم نیروهای دینامیکی باد در جهت عرضی بر روی ساختمان‌های بلند، خیلی پیچیده‌تر از نیروهای طولی باد می‌باشد. نیروی عرضی باد بر روی ساختمان‌های بلند، تحت اثر سه مکانیزم اصلی اتفاق می‌افتد: آشفتگی باد در جهت عرضی، آشفتگی باد در جهت طولی و تحریک ناحیه پشت. ریزش گردبادی در ناحیه پشت سازه نقش مهم‌تری در ارتعاش عرضی سازه دارد [5]. پاسخ عرضی سازه‌های لاغر بلند با مقطع عرضی دایره‌ای در مطالعات متعددی مورد ارزیابی قرار گرفته است که از جمله این سازه‌ها به دودکش‌های صنعتی می‌توان اشاره نمود. ویکری و کلارک [6] پاسخ عرضی دودکش‌های با مقطع متغیر را مورد مطالعه قرار دادند و پارامترهای موثر را معرفی نمودند. ویکری و باسو [7، 8] رابطه ساده شده‌ای را برای تخمین پاسخ عرضی دودکش‌های با مقطع دایره‌ای ارائه دادند. منون و رائو [9] روش‌های آیین‌نامه‌ای برای تخمین پاسخ عرضی دودکش‌های بتن‌آرمه را مورد مطالعه قرار دادند و شرایطی را که پاسخ عرضی نسبت به پاسخ طولی تعیین‌کننده‌تر می‌باشد تشریح نمودند. آروناچالام [10] و آروناچالام و لاکشمنان [11] روابط نیمه تجربی را برای تخمین پاسخ عرضی دودکش‌های بلند ارائه نمودند. ایمانی و خدایی [12] پاسخ‌های دینامیکی طولی و عرضی ناشی از باد دودکش‌های بتنی بلند در محدوده ارتفاعی ۱۰۰ تا ۴۰۰ متر را با روش تحلیل حوزه فرکانس مورد مطالعه و ارزیابی قرار دادند. مطالعات انجام یافته بر روی پاسخ عرضی ساختمان‌های بلند با مقطع مستطیلی، نسبتاً محدود می‌باشد و عمده تحقیقات در این زمینه، برای استخراج مبانی محاسباتی و فرمول‌های تجربی تخمین نیروهای عرضی باد انجام گرفته است. ماتسوموتو [13] ارتعاشات ساختمان‌های بلند را در جهت عرضی باد مورد مطالعه قرار داد و رابطه بین سرعت جریان و انحراف معیار جابجایی عرضی ساختمان‌های بلند را برای سه نسبت طول به عرض مقطع عرضی ساختمان بدست آورد. یانگ و همکاران [14] نیروهای عرضی و طولی باد را به کمک روش‌های تحلیلی و بر مبنای طیف نیروهای عرضی و طولی باد، در حوزه زمان شبیه‌سازی نمودند و پاسخ‌های ساختمان بلندی را تحت تاثیر نیروهای شبیه‌سازی شده، در حوزه زمان مورد محاسبه قرار دادند. خدایی [15] تاثیر تعداد مودهای تعیین‌کننده در پاسخ دینامیکی ناشی از باد ساختمان‌های بلند را به روش تجزیه مودال در حوزه فرکانس مورد مطالعه قرار داد. یانگ و همکاران [16] با استفاده از آزمایش تونل باد، تاثیر شیب قائم مخروطی و نسبت میرایی ساختمان‌های بلند را بر روی پاسخ آن‌ها در مقابل نیروهای عرضی باد مورد بررسی قرار دادند. مینگ و یانگ [17] تحقیق مروری بر روی مطالعات انجام یافته در مورد نیروهای عرضی باد بر روی ساختمان‌های فوق بلند انجام دادند و مکانیزم بارهای عرضی باد، نیروهای آیرودینامیکی و میرایی آیرودینامیکی عرضی باد را بررسی نمودند. لیانگ و همکاران [18] بر پایه اندازه‌گیری فشار روی مدل‌های ساختمان‌های بلند، با مقادیر مختلف نسبت‌های لاغری و نسبت ابعادی در پلان، فرمول‌های تخمینی برای برآورد پاسخ دینامیکی ساختمان‌های بلند با پلان مستطیلی ارائه دادند. چن [19] پاسخ عرضی ساختمان‌های بلند و سازه‌های انعطاف‌پذیر را در محدوده سرعت بالاتر از حد قفل‌شدگی ریزش گردبادی، که در آن تاثیر میرایی آیرودینامیکی منفی مهم می‌باشد، مورد تحقیق قرار داد.

محاسبه پاسخ عرضی ساختمان‌های بلند به روش ارتعاشات تصادفی، مستلزم داشتن طیف نیروی عرضی باد می‌باشد. با توجه به اهمیت موضوع، مطالعات متعددی برای استخراج نیروی عرضی باد بر روی ساختمان‌ها به کمک آزمایش تونل باد انجام گرفته‌است [20-25]. لیانگ و همکاران [25] بر مبنای مطالعات آزمایشگاهی روی مدل‌های ساختمان‌های بلند مستطیلی، فرمول‌های تجربی برای طیف نیروی عرضی باد، انحراف معیار ضریب نیروی عرضی و عدد استروهال¹ ارائه دادند. مدل ارائه شده انطباق مناسبی با نتایج تجربی داشته و برای محاسبه پاسخ عرضی ساختمان‌های با پلان مستطیلی قابل کاربرد می‌باشد. گو و کوان [26] نیروی دینامیکی عرضی باد تعمیم یافته برای مود اول ساختمان‌های بلند را از طریق انجام آزمایش تونل باد بر روی 15 تیپ ساختمان بلند استخراج نمودند. در تحقیق مذکور تاثیر پارامترهایی از قبیل شرایط ناحیه، نسبت بعد در پلان، نسبت لاغری ساختمان و شکل اصلاح شده گوشه‌های ساختمان بر روی نیروی عرضی باد مورد بررسی قرار گرفت.

اکثر تحقیقات پیشین در زمینه پاسخ دینامیکی سازه بلند در برابر باد، بر مبنای روابط آیین‌نامه‌ای و یا روابط ارائه شده در سایر مطالعات انجام گرفته است و یا با فرض ساده شده سازه یک درجه آزادی انجام گردیده است. نتایج مطالعات آزمایشگاهی نیز به دلیل محدودیت‌های زمان و هزینه، منحصر به چند نمونه آزمایشگاهی و پارامترهای محدودی می‌باشد. از طرف دیگر مطالعات انجام یافته بر روی پاسخ عرضی باد در مقایسه با ارتعاشات طولی محدودتر می‌باشد. همچنین با توجه به فرآیند نسبتاً پیچیده و حجم محاسبات بالای تحلیل عددی دینامیکی سازه بلند که مستلزم در نظر گرفتن سیستم چند درجه آزادی و محاسبه ماتریس‌های طیف نیروهای طولی و عرضی باد می‌باشد، مطالعات محدودی با روش تحلیل ارتعاشات تصادفی حوزه فرکانس و سیستم چند درجه آزادی انجام گرفته است. از این رو، در این پژوهش، پاسخ عرضی ساختمان‌های مستطیلی بلند با استفاده از تحلیل حوزه فرکانس سیستم چند درجه آزادی، به صورت پارامتری مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به رفتار غالب خمشی ساختمان‌های بلند، سازه مربوطه به صورت تیر طره‌ای قائم چند درجه آزادی با المان‌های تیر مدل‌سازی شده و ماتریس تابع انتقال سازه تعیین گردیده است. ماتریس تابع طیفی نیروهای عرضی باد برای حالت‌های مختلف، براساس طیف‌های متداول تعیین شده و پاسخ سازه بر مبنای تئوری ارتعاشات تصادفی محاسبه گردیده است. تاثیر پارامترهای مختلف از قبیل سرعت مبنای باد، لاغری سازه، نسبت طول به عرض در پلان برای ساختمان‌های با مقطع مستطیل و نسبت بعد فوقانی به تحتانی برای ساختمان‌های مقطع متغیر مورد تحلیل و بحث قرار گرفته است.

۲- مدل تحلیلی و ماتریس تابع انتقال

مدل ساختمان بلند تحت بار جانبی، مشابه تیر طره‌ای قائم چند درجه آزادی با جرم‌های متمرکز در نظر گرفته شده است. این مدل رفتاری در مطالعات متعددی برای محاسبه پاسخ دینامیکی سازه‌های بلند در برابر باد به کار گرفته شده است [18-21]. معادله حرکت سیستم چند درجه آزادی تحت بارهای دینامیکی به صورت زیر می‌باشد:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = \mathbf{F} \quad (1)$$

که در آن \mathbf{M} ، \mathbf{C} و \mathbf{K} به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سازه، \mathbf{X} بردار جابجایی‌های گرهی و \mathbf{F} بردار نیروهای خارجی می‌باشد. ماتریس سختی سازه با جمع اثر سختی المان‌های تیر محاسبه می‌شود و برای کاهش حجم محاسبات از روش تراکم درجات آزادی خمشی در درجات آزادی انتقالی استفاده می‌شود. جزئیات محاسبه ماتریس سختی و تراکم درجات آزادی و محاسبه ماتریس‌های جرم و سختی در مرجع [12] قابل مشاهده می‌باشد.

ماتریس تابع انتقال بین جابجایی‌های سازه و نیروهای خارجی با تبدیل فوریه معادله (1) به صورت زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$\mathbf{X}(\omega) = \mathbf{H}(\omega)\mathbf{F}(\omega) = (-\omega^2\mathbf{M} + j\omega\mathbf{C} + \mathbf{K})^{-1}\mathbf{F}(\omega) \quad (2)$$

¹ Strouhal number

که در آن ω فرکانس زاویه‌ای و j واحد موهومی می‌باشد. $H(\omega)$ ماتریس تابع انتقال و یا ماتریس تابع پاسخ فرکانسی نامیده می‌شود. تفسیر فیزیکی ماتریس تابع انتقال را به این شکل می‌توان بیان نمود: درایه (k, j) این ماتریس بیانگر پاسخ فرکانسی سیستم در درجه آزادی k به‌ازای نیروی تحریک هارمونیک با دامنه واحد و فرکانس ω در درجه آزادی j ام می‌باشد.

ماتریس تراکم طیفی پاسخ برای سیستم چند درجه آزادی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$S_x(\omega) = H(\omega)S_f(\omega)H^*(\omega) \quad (3)$$

که در آن $H(\omega)$ ماتریس تابع انتقال سیستم و علامت * بیان‌کننده ترانهاده مختلط ماتریس و $S_f(\omega)$ ماتریس تراکم طیفی نیروی تحریک می‌باشد. درنهایت، واریانس پاسخ جابجایی و شتاب سازه برای درجه آزادی i ام با استفاده از انتگرال عددی زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$E[x_i^2] = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{x_{ii}}(\omega) d\omega, \quad E[\ddot{x}_i^2] = \int_{-\infty}^{+\infty} \omega^4 S_{x_{ii}}(\omega) d\omega \quad (4)$$

که در آن $S_{x_{ii}}(\omega)$ عضو i ام روی قطر اصلی ماتریس تراکم طیفی پاسخ می‌باشد.

۳- خصوصیات مهندسی باد و طیف نیروهای عرضی باد

پاسخ ساختمان‌های بلند در برابر باد، شامل مولفه‌های طولی و عرضی باد می‌باشد. مولفه طولی باد شامل پاسخ استاتیکی و دینامیکی طولی می‌گردد. سرعت باد در امتداد وزش آن به دو مولفه سرعت میانگین و سرعت نوسانی قابل تجزیه می‌باشد. مولفه سرعت میانگین که مستقل از زمان فرض می‌شود پاسخ استاتیکی طولی سازه را در پی دارد و مولفه نوسانی سرعت طولی باد موجب ارتعاش سازه در امتداد وزش باد می‌گردد.

پاسخ عرضی سازه، عموماً ناشی از تحریک جریان‌های گردبادی و پیچک‌های ایجاد شده در ناحیه پشت سازه می‌باشد که موجب ارتعاش سازه در جهت عمود بر امتداد وزش باد می‌باشد. محاسبه پاسخ استاتیکی و دینامیکی سازه بلند در برابر باد، مستلزم داشتن سرعت میانگین باد و طیف تراکم نیروهای طولی و عرضی باد می‌باشد که در ادامه تشریح می‌گردد.

۳-۱- پروفیل سرعت متوسط باد و نیروی استاتیکی باد

تغییرات سرعت میانگین باد در امتداد طولی در لایه مرزی اتمسفر عموماً با قانون توانی بیان می‌شود که حالت عمومی رابطه آن به شکل زیر می‌باشد:

$$U(z) = aV_b \left(\frac{z}{b}\right)^\alpha \quad (5)$$

در رابطه فوق a ، b و α پارامترهای ناحیه‌ای و V_b سرعت مینای باد می‌باشد که در اکثر آیین‌نامه‌ها به‌عنوان مقدار سرعت میانگین باد در ارتفاع 10 متر در ناحیه باز، با یک دوره بازگشت معین تعریف می‌شود. نمونه ناحیه بندی مناطق تعریف‌شده استاندارد باد و ضرایب قانون توانی برای نواحی باز و زیر براساس آیین‌نامه کانادا [28] مطابق جدول ۱ می‌باشد.

نیروی استاتیکی ناشی از مولفه سرعت میانگین طولی باد برای واحد طول ارتفاع سازه از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$f_w = \frac{1}{2} \rho_a U(z)^2 C_d B \quad (6)$$

که در آن ρ_a دانسیته هوا، $U(z)$ سرعت میانگین باد در ارتفاع z ، C_d ضریب پسا و B عرض سازه در جهت عمود بر امتداد وزش باد می‌باشد.

جدول ۱ ناحیه بندی مناطق و پارامترهای قانون توانی براساس آیین نامه کانادا [28]

ناحیه	توصیف ناحیه	a	b (m)	α	ارتفاع گرادیان
باز	ناحیه باز با درختان یا ساختمان های پراکنده	1	10	0.14	265
زبر	نواحی جنگلی یا حومه شهر با تعداد محدود و پراکنده ساختمان های بلند	0.707	12.7	0.25	317

۳-۲- طیف نیروی عرضی باد

با عبور جریان از اطراف هر جسم هوا بند، جریان های گردابی یا پیچک هایی در ناحیه پشت، در طرفین جسم شکل می گیرد. ریزش این جریان ها باعث تغییر الگوی فشار اطراف جسم و ایجاد نیروی عرضی می گردد. برای ساختمان بلند با پلان نشان داده شده در شکل 1، به ازای نسبت بعد $\frac{1}{2} \leq D/B < 2$ طیف نیروی عرضی باد از رابطه زیر تعیین می شود [25]:

$$\frac{nS(n)}{\sigma^2} = A \frac{H(C_1)}{(1 - \bar{n}^2)^2 + C_1 \bar{n}^2} + (1 - A) \frac{C_2^{0.5} \bar{n}^3}{1.56[(1 - \bar{n}^2)^2 + C_2 \bar{n}^2]} \quad (7)$$

که در رابطه فوق n فرکانس، $\bar{n} = n/n_g$ ، $n_g = S_t U(z)/B$ ، S_t عدد استروهال و σ انحراف معیار نیروی عرضی در ارتفاع z می باشد. مقادیر S_t و σ از روابط زیر تعیین می شوند:

$$\sigma = \frac{1}{2} \rho_a U^2(z) \bar{C}_L B \quad (8)$$

$$S_t = 0.002(D/B)^2 - 0.023(D/B) + 0.105 \quad (9)$$

\bar{C}_L انحراف معیار ضریب نیروی عرضی باد می باشد که مطابق رابطه زیر تابع نسبت D/B (شکل ۱) می باشد:

$$\bar{C}_L = 0.045(D/B)^3 - 0.335(D/B)^2 + 0.868(D/B) - 0.174 \quad (10)$$

سایر پارامترهای رابطه (7) به صورت زیر قابل تعیین می باشند [25]:

$$H(C_1) = 0.179C_1 + 0.65\sqrt{C_1} \quad (11)$$

$$C_1 = [0.47(D/B)^{2.8} - 0.52(D/B)^{1.4} + 0.24]/(H/\sqrt{S}) \quad (12)$$

$$C_2 = 2 \quad (13)$$

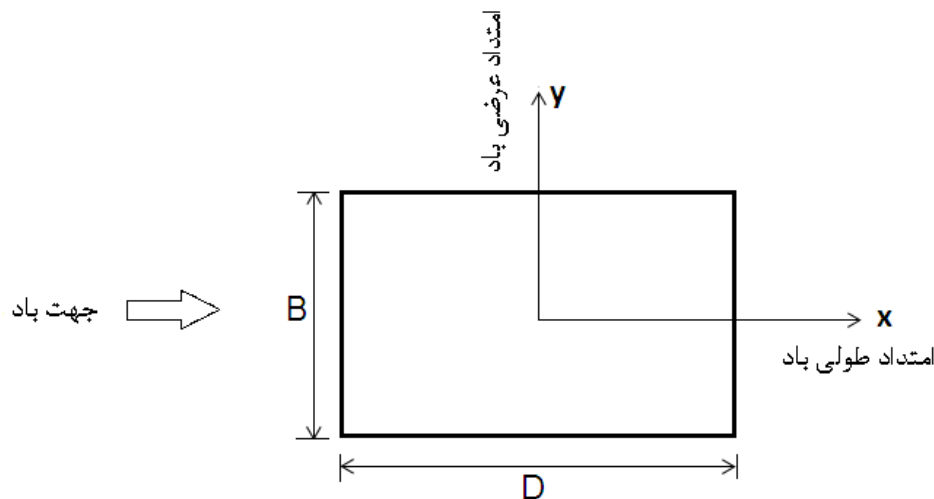
$$A = (H/\sqrt{S})[-0.118(D/B)^2 + 0.358(D/B) - 0.214] + [0.066(D/B)^2 - 0.26(D/B) + 0.894] \quad (14)$$

در روابط فوق نسبت H/\sqrt{S} ضریب لاغری و $S = B \times D$ سطح مقطع عرضی یا مساحت پلان ساختمان می باشد.

ضریب دیگر طیفی نیروهای عرضی باد بین دو نقطه coh_{jk} ، که با افزایش فاصله بین نقاط کاهش می یابد، مطابق رابطه زیر به دست می آید:

$$coh_{jk} = \exp\left[-\left(\frac{\Delta}{\alpha}\right)^2\right], \quad \Delta = \frac{|h_j - h_k|}{B} \quad (20)$$

که در آن h_j و h_k ارتفاع نقاط z و k می باشد و مقدار پارامتر α در رابطه فوق 5.56 می باشد [25].



شکل ۱: پلان ساختمان و جهت باد

۴- خصوصیات ساختمان‌های بلند مورد مطالعه و مراحل تحلیل

به منظور مطالعه پارامتری پاسخ عرضی ساختمان‌های بلند در برابر باد، برنامه کامپیوتری در محیط نرم‌افزار متلب نوشته شد و مثال‌های عددی مختلفی از سازه‌های مذکور مورد تحلیل قرار گرفت. نحوه مدل‌سازی و تحلیل سازه شامل مراحل المان‌بندی، تعیین ماتریس جرم، سختی و میرایی، استخراج ماتریس انتقال سازه، محاسبه نیروی استاتیکی و تعیین ماتریس طیف تراکم نیروی عرضی باد و در نهایت انتگرال‌گیری عددی برای محاسبه انحراف معیار پاسخ عرضی سازه، مطابق مبانی تشریح شده در بخش ۲ این مقاله انجام گرفت. فرضیاتی برای خصوصیات ابعادی و فیزیکی سازه و خصوصیات آیرودینامیکی در نظر گرفته شد که در این بخش تشریح می‌گردد. جرم واحد حجم ساختمان مشابه مثال‌های ارائه شده توسط سیمپو و اسکالنن $\rho_b = 200 \text{ kg/m}^3$ فرض گردید [27]. تغییرات ممان اینرسی در ارتفاع به صورت سهموی با معادله ذیل در نظر گرفته شد:

$$I(z) = (I_{base} - I_{top}) \left(1 - \frac{z}{H}\right)^2 + I_{top} \quad (15)$$

که I_{base} و I_{top} به ترتیب ممان اینرسی در تراز تحتانی و فوقانی ساختمان، z ارتفاع از سطح زمین و H ارتفاع سازه می‌باشد. ممان اینرسی تراز فوقانی I_{top} معادل ۱۰ درصد I_{base} در نظر گرفته شد. با توجه به معلوم بودن ماتریس جرم، با استفاده از برنامه کامپیوتری تهیه شده، ماتریس سختی سازه به نحوی محاسبه شد که جابجایی استاتیکی برای ساختمان بلند با نسبت لاغری ۸ به $h/1800$ محدود شود. با عنایت به اینکه ضریب تندباد برای ساختمان‌های بلند مورد مطالعه ۲ الی $2/5$ می‌باشد [29] پاسخ جابجایی ماکزیمم در امتداد وزش باد کمتر از $h/700$ خواهد بود که از نظر بهره برداری مجاز می‌باشد.

با توجه به مشخصات ارائه شده در این بخش، خصوصیات ساختمان بلند منشوری به ارتفاع ۳۵۰ متر و نسبت لاغری ۸ برای مدل ۲۰ درجه آزادی در جدول ۲ ارائه شده است. در تحلیل‌های به عمل آمده، با توجه به نتایج مطالعات قبلی از تعداد ۳۰ المان برای مدل ساختمان استفاده گردید [12]. اطلاعات ارائه شده در این جدول شامل ارتفاع، ممان اینرسی، جرم و سطح مقابل باد و سرعت میانگین طولی باد در گره‌های مختلف می‌باشد.

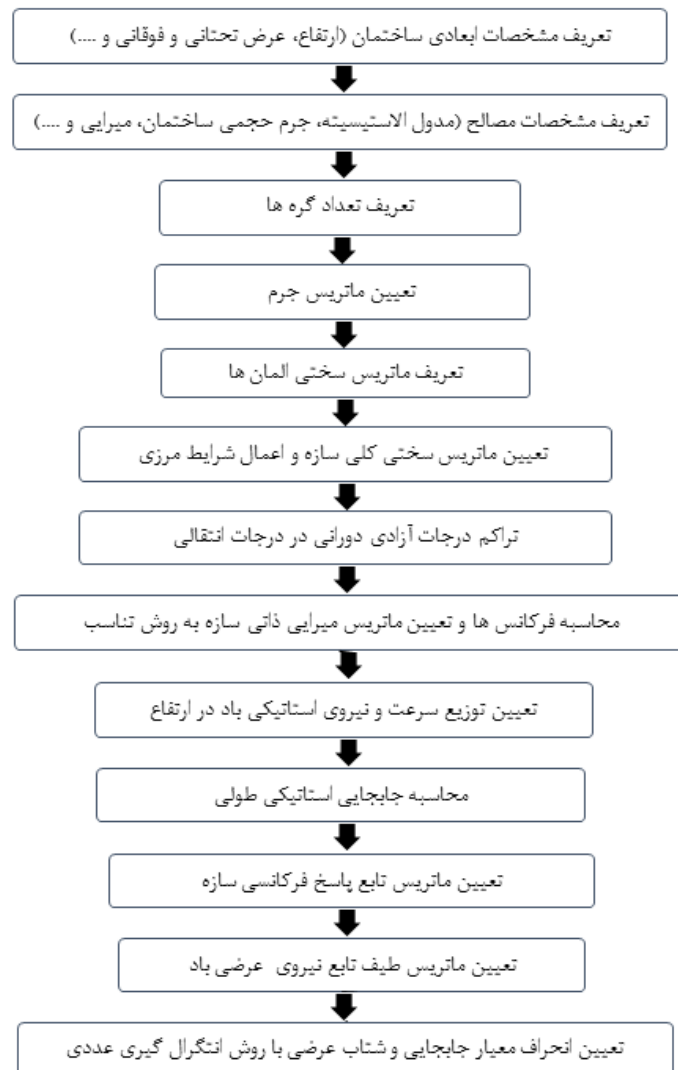
مقدار میرایی برای مود اول سازه، ۱ درصد و برای سایر مودها از رابطه زیر محاسبه گردید [30]:

$$\zeta_i = \zeta_1 \left(1 + 0.38 \left(\frac{f_i}{f_1} - 1\right)\right) \quad (16)$$

که در آن f_i و Z_i به ترتیب فرکانس و میرایی مود i ام و f_1 فرکانس اول سازه می باشند. سازه از نوع فلزی با مدول الاستیسیته $E=2.1e6 \text{ kg/cm}^2$ در نظر گرفته شد. اطلاعات آیرودینامیکی انتخاب شده به این شرح می باشد: دانسیته هوا $\rho_a=1.25 \text{ kg/m}^3$ ، مولفه های سرعت باد مطابق ناحیه زبر آیین نامه کانادا [28] $\alpha=0.25$ ، $b=12.7\text{m}$ و $a=0.707$ و ارتفاع گرادیان $z_g=317\text{m}$. ضریب پسا برای ساختمان های مستطیلی بلند برابر $C_D=1.3$. فلوجارت برنامه تهیه شده برای محاسبه پاسخ استاتیکی طولی و انحراف معیار جابجایی و شتاب عرضی مطابق شکل ۲ می باشد.

جدول ۲: خصوصیات ابعادی و سرعت میانگین طولی باد برای مدل ۲۰ درجه آزادی ساختمان بلند به ارتفاع ۳۵۰ متر و لاغری ۸

شماره گره	ارتفاع (متر)	سرعت مبنای باد (متر بر ثانیه)	سطح مقابل باد (متر مربع)	ممان اینرسی (متر مکعب)	جرم (تن)
1	17.5	0.00	765.63	3993.7	4287.5
2	35.0	22.98	765.63	3629.2	4287.5
3	52.5	27.33	765.63	3284.5	4287.5
4	70.0	30.24	765.63	2959.4	4287.5
5	87.5	32.50	765.63	2654.1	4287.5
6	105.0	34.36	765.63	2368.4	4287.5
7	122.5	35.97	765.63	2102.5	4287.5
8	140.0	37.38	765.63	1856.2	4287.5
9	157.5	38.65	765.63	1629.7	4287.5
10	175.0	39.80	765.63	1422.8	4287.5
11	192.5	40.86	765.63	1235.6	4287.5
12	210.0	41.85	765.63	1068.2	4287.5
13	227.5	42.77	765.63	920.4	4287.5
14	245.0	43.64	765.63	792.4	4287.5
15	262.5	44.45	765.63	684.0	4287.5
16	280.0	45.22	765.63	595.4	4287.5
17	297.5	45.96	765.63	526.4	4287.5
18	315.0	46.66	765.63	477.2	4287.5
19	332.5	47.33	765.63	447.6	4287.5
20	350.0	47.41	382.81	437.8	2143.8



شکل ۲: مراحل اصلی برنامه کامپیوتری تهیه شده برای محاسبه ارتعاشات عرضی ساختمان بلند

۵- بررسی نتایج

با توجه به مبانی ارائه شده در بخش‌های قبل، پاسخ استاتیکی و جابجایی و شتاب عرضی برای ساختمان‌های بلند، با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصله در این بخش ارائه گردیده است. در قسمت نخست، تاثیر تعداد المان‌های مدل در پاسخ استاتیکی و دینامیکی سازه مورد بررسی قرار گرفته است و در ادامه نقش پارامترهای مختلف از قبیل سرعت مبنای باد، نسبت طول به عرض برای ساختمان‌های مستطیلی، نسبت لاغری ساختمان‌های بلند و تغییر مقطع ساختمان با ارتفاع، در پاسخ استاتیکی و دینامیکی عرضی تحلیل و بررسی گردیده است.

۵-۱- صحت سنجی برنامه کامپیوتری از طریق کنترل تغییر شکل ساختمان

همانگونه که در بخش‌های قبلی تشریح گردید، رفتار ساختمان بلند تحت بارهای جانبی مشابه تیر طره‌ای قائم فرض می‌شود و بر همین اساس ماتریس‌های جرم و سختی و میرایی با فرض سیستم چند درجه آزادی تعیین می‌گردد. از مهمترین مشخصه‌های ساختمان بلند ماتریس سختی سازه می‌باشد که برای کنترل صحت ماتریس سختی سازه، می‌توان تغییر شکل‌های ساختمان را تحت بار معینی کنترل نمود. برای کنترل تغییر شکل ساختمان، از روش تحلیل سازه‌های تیر مزدوج استفاده می‌گردد و جابجایی افقی ساختمان تحت بار

باد، با دو روش تیر مزدوج و برنامه نوشته شده مورد مقایسه قرار می‌گیرد. مراحل روش تیر مزدوج برای یک تیر طره‌ای به این صورت می‌باشد: الف) تعیین شدت بار وارده بر تیر، ب) ترسیم دیاگرام نیروی برشی در طول تیر، ج) ترسیم لنگر خمشی در طول تیر، د) تقسیم منحنی لنگر خمشی بر سختی خمشی EI، ه) ترسیم تیر مزدوج برای تیر طره‌ای (که با جابجایی تکیه گاه گیردار به انتهای آزاد تیر اصلی انجام می‌پذیرد)، و) ترسیم دیاگرام منحنی به دست آمده در بند (د) و در نظر گرفتن آن به عنوان شدت بار برای تیر مزدوج، ز) بدست آوردن منحنی نیروی برشی برای تیر مزدوج که معادل دوران در تیر اصلی می‌باشد و ح) ترسیم منحنی لنگر خمشی تیر مزدوج که بیانگر جابجایی خیز در تیر اصلی می‌باشد.

مراحل ذکر شده مطابق روش تحلیلی تیر مزدوج، برای ساختمان به ارتفاع ۳۵۰ متر و نسبت لاغری ۸ که خصوصیات آن در جدول ۲ ارائه گردیده است برای سرعت مبنای باد ۳۰ متر بر ثانیه و سایر پارامترهای ذکر شده در بخش ۴ به کار گرفته شد. نتایج محاسبات شامل دوران و جابجایی افقی در نقاط ارتفاعی مختلف ساختمان با فرض ۲۰ گره، مطابق روش تیر مزدوج در جدول ۳ ارائه گردیده است. مقدار جابجایی افقی محاسبه شده به کمک برنامه کامپیوتری نیز در ستون آخر جدول ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود نتایج به دست آمده با دقت بسیار مناسبی نزدیک به هم می‌باشند. در روش تیر مزدوج، برای ترسیم دیاگرام‌های برش و خمش و تغییر شکل تیر، در محاسبه برآیند نیروهای المان‌های تیر از روش دوزنقه‌ای استفاده شده است که با تقریب اندکی همراه می‌باشد و می‌توان گفت روش استفاده شده در برنامه که جابجایی‌ها را با داشتن نیروهای وارده و ماتریس سختی سازه محاسبه می‌کند، نسبت به روش تیر مزدوج نیز دقیق‌تر می‌باشد.

جدول ۳: اطلاعات مربوط به محاسبه جابجایی افقی ساختمان تحت بار استاتیکی باد و مقایسه با نتیجه برنامه کامپیوتری

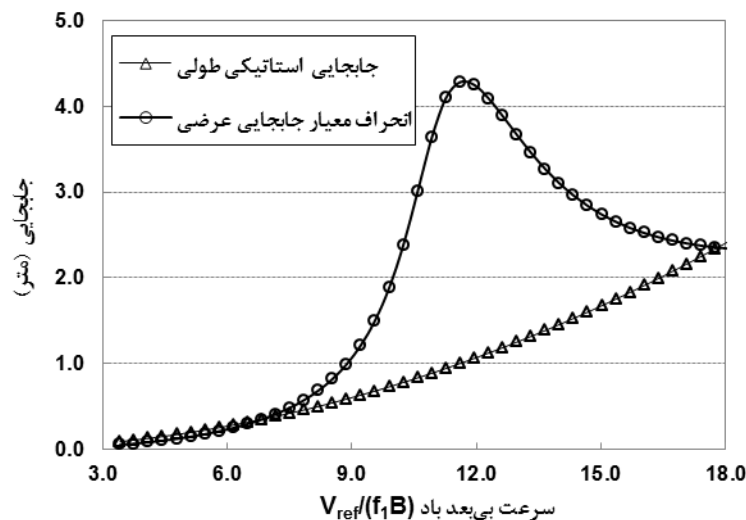
ارتفاع (m)	نیروی واحد طول باد (kN/m)	برش (kN)	خمش (kN.m)	سختی خمشی (EI) (kN.m ²)	M/EI (m ⁻¹)	شیب تیر محاسباتی (رادیان)	خیز تیر محاسباتی (cm)	خیز تیر برنامه (cm)
0.0	0.00	1.95E+04	4.09E+06	1.15E+12	3.56E-06	0.00E+00	0.00	0.00
17.5	18.77	1.93E+04	3.75E+06	1.05E+12	3.57E-06	6.24E-05	0.05	0.06
35.0	26.55	1.89E+04	3.41E+06	9.53E+11	3.58E-06	1.25E-04	0.22	0.22
52.5	32.51	1.84E+04	3.09E+06	8.62E+11	3.58E-06	1.88E-04	0.49	0.50
70.0	37.54	1.78E+04	2.77E+06	7.77E+11	3.57E-06	2.50E-04	0.88	0.88
87.5	41.97	1.71E+04	2.47E+06	6.97E+11	3.54E-06	3.12E-04	1.37	1.37
105.0	45.98	1.63E+04	2.17E+06	6.22E+11	3.50E-06	3.74E-04	1.97	1.98
122.5	49.66	1.55E+04	1.90E+06	5.52E+11	3.44E-06	4.35E-04	2.68	2.69
140.0	53.09	1.46E+04	1.63E+06	4.87E+11	3.35E-06	4.94E-04	3.49	3.50
157.5	56.31	1.36E+04	1.39E+06	4.28E+11	3.24E-06	5.52E-04	4.40	4.42
175.0	59.36	1.26E+04	1.16E+06	3.73E+11	3.10E-06	6.07E-04	5.42	5.44
192.5	62.26	1.15E+04	9.47E+05	3.24E+11	2.92E-06	6.60E-04	6.53	6.55
210.0	65.03	1.04E+04	7.55E+05	2.80E+11	2.69E-06	7.09E-04	7.73	7.75
227.5	67.68	9.25E+03	5.83E+05	2.42E+11	2.41E-06	7.54E-04	9.01	9.04
245.0	70.24	8.05E+03	4.32E+05	2.08E+11	2.08E-06	7.93E-04	10.36	10.40
262.5	72.70	6.80E+03	3.02E+05	1.80E+11	1.68E-06	8.26E-04	11.78	11.82
280.0	75.09	5.50E+03	1.94E+05	1.56E+11	1.24E-06	8.52E-04	13.24	13.29
297.5	77.40	4.17E+03	1.10E+05	1.38E+11	7.95E-07	8.70E-04	14.75	14.80
315.0	79.64	2.79E+03	4.89E+04	1.25E+11	3.91E-07	8.80E-04	16.28	16.34
332.5	79.89	1.40E+03	1.22E+04	1.18E+11	1.04E-07	8.84E-04	17.83	17.89
350.0	79.89	0.00E+00	0.00E+00	1.15E+11	0.00E+00	8.85E-04	19.37	19.44

۵-۲- تاثیر سرعت باد بر روی پاسخ عرضی باد

به منظور بررسی تاثیر سرعت باد بر روی پاسخ عرضی باد، پاسخ ساختمان 350 متری با نسبت لاغری 8 و مقطع مربع، به ازای مقادیر مختلف سرعت مبنای باد مورد تحلیل قرار گرفت. شکل 3 تغییرات جابجایی استاتیکی طولی و انحراف معیار جابجایی عرضی گره فوقانی سازه را در مقابل سرعت بی بعد باد نشان می دهد. در این شکل سرعت کاهش یافته یا بی بعد به صورت زیر محاسبه شده است:

$$V_n = V_{ref} / (B f_1) \quad (17)$$

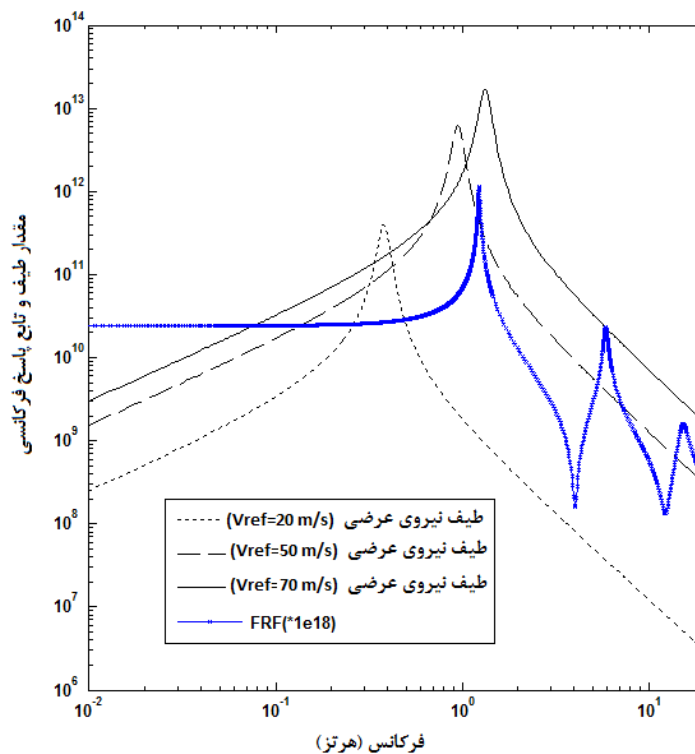
که در آن f_1 فرکانس اصلی سازه (که برای سازه مورد نظر برابر 0.196 می باشد)، V_{ref} سرعت مرجع باد می باشد که در ارتفاعی معادل دو سوم ارتفاع سازه تعیین می شود و B عرض سازه در مقابل باد می باشد. مطابق شکل فوق، پاسخ جابجایی استاتیکی به صورت پیوسته با افزایش سرعت بی بعد، افزایش می یابد در صورتی که انحراف معیار جابجایی عرضی به ازای سرعت بی بعد خاصی که حدود 11.5 می باشد به مقدار اوج 4.28 متر می رسد و مجددا کاهش می یابد. مطابق رابطه (9) مقدار عدد استروهل برای مقطع مربع 0.087 می باشد و معکوس آن که متناظر با سرعت بی بعد مربوط به پاسخ اوج می باشد حدود 11.5 می باشد که با سرعت بی بعد مربوطه در شکل 3 یکسان است و این موضوع نشان از صحت نتیجه به دست آمده می باشد. اگر ضریب اوج جابجایی عرضی، که با ضرب نمودن آن در انحراف معیار جابجایی، مقدار بیشینه ی جابجایی حاصل می شود را 3.5 فرض کنیم، مقدار جابجایی عرضی بیشینه حدود 15 برابر جابجایی استاتیکی خواهد بود که نشان دهنده تاثیر شدید یا نزدیکی فرکانس نیروهای عرضی با فرکانس طبیعی سازه می باشد. سرعت مبنای معادل با سرعت بی بعد حدود 68 متر بر ثانیه می باشد. حداکثر سرعت مبنای باد با میانگین ساعتی در کشورهای مختلف به بازه ی 30 تا 40 متر بر ثانیه محدود می باشد و در نتیجه برای سازه ی مطالعه شده، سرعت مبنای حالت شدید خیلی بیشتر از محدوده عملی می باشد. جهت تامین معیارهای آسایش ساکنین، معمولاً خصوصیات فیزیکی ساختمان بلند به نحوی در نظر گرفته می شود که سرعت مبنای باد، کم تر از سرعت مبنای شدید پاسخ عرضی باشد.



شکل 3: تغییرات پاسخ های جابجایی استاتیکی و انحراف معیار جابجایی عرضی در مقابل سرعت مبنای باد برای ساختمان به ارتفاع 350 متر و نسبت لاغری 8

شکل 4 طیف تراکم نیروی عرضی باد را برای سرعت های مبنای 20، 50 و 70 متر بر ثانیه، برای ساختمان 350 متری با نسبت لاغری 8 نشان می دهد. در این شکل، تابع پاسخ فرکانسی گره فوقانی سازه برای مقایسه با طیف نیروها آورده شده است. مطابق این شکل، ضمن اینکه با افزایش سرعت مبنای باد، دامنه طیف نیروی عرضی باد افزایش می یابد، فرکانس متناظر با نقطه بیشینه ی طیف به فرکانس

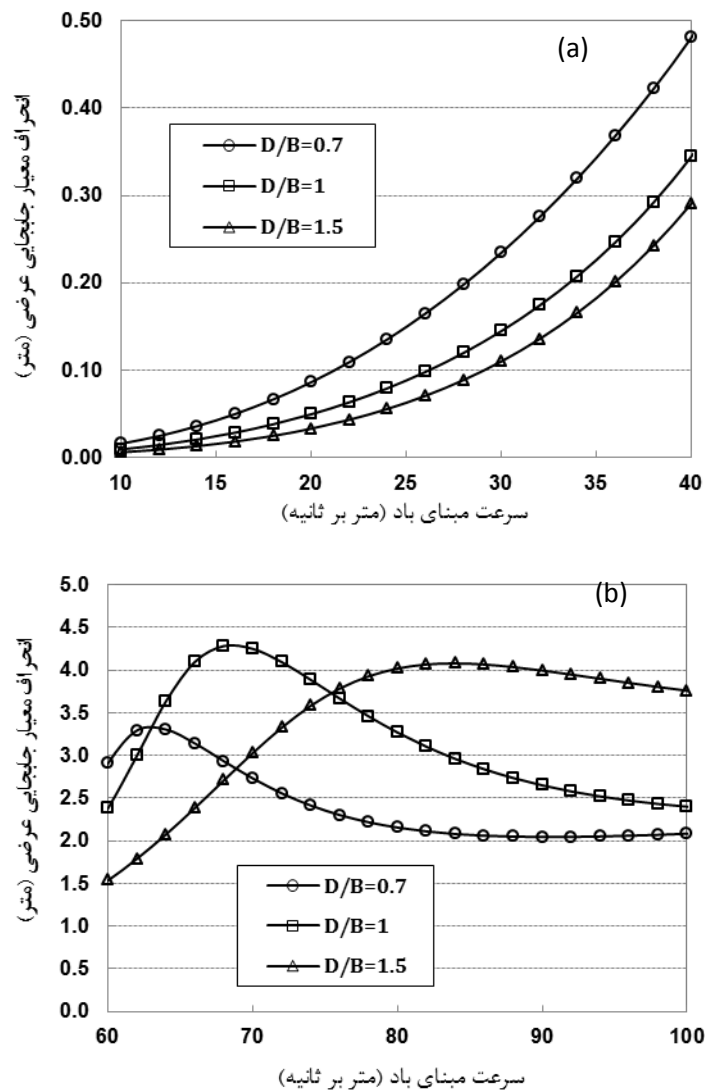
طبیعی اول سازه نزدیک تر می شود و همان طور که در شکل قبل نیز مشاهده شد در سرعت مبنای نزدیک 70 متر بر ثانیه، حالت تشدید رخ می دهد.



شکل ۴: طیف تراکم نیروی عرضی باد برای مقادیر مختلف سرعت مبنای باد و تابع پاسخ فرکانسی گره فوقانی سازه برای ساختمان به ارتفاع 350 متر و نسبت لاغری 8

۵-۳- تاثیر نسبت طول به عرض برای ساختمان های مستطیلی بر روی پاسخ عرضی باد

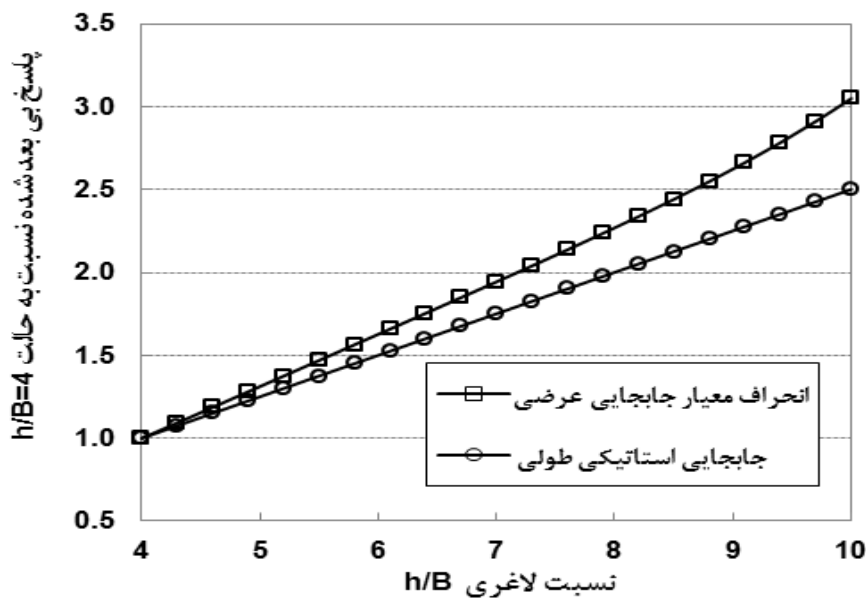
برای ساختمان های با پلان مستطیلی، به منظور بررسی تاثیر نسبت طول به عرض پلان در پاسخ عرضی سازه، جابجایی عرضی تراز فوقانی ساختمانی به ارتفاع 350 متر و نسبت لاغری 8 برای مقادیر مختلف نسبت طول به عرض و سرعت مبنای باد مورد تحلیل قرار گرفت. شکل های 5(a) و 5(b) تغییرات انحراف معیار جابجایی عرضی تراز فوقانی سازه را برای سه نسبت طول به عرض 0.7، 1 و 1.5 برای دو بازه سرعت 10 تا 40 و 60 تا 110 متر بر ثانیه نشان می دهد. بازه سرعت دوم در عمل غیر محتمل می باشد و فقط از این جهت که پاسخ تشدید سازه در آن قرار گرفته است، آورده شده است. برای محدوده سرعت شکل 5(a) که با سرعت های مبنای رایج در کشورهای مختلف مطابقت دارد، با افزایش نسبت طول به عرض، جابجایی عرضی سازه کاهش می یابد. به نحوی که برای سرعت مبنای 40 متر بر ثانیه، انحراف معیار جابجایی عرضی برای نسبت های طول به عرض 0.7، 1 و 1.5 به ترتیب 0.48، 0.35 و 0.29 متر می باشد. بر مبنای نتیجه فوق، مقدار جابجایی عرضی به ازای $D/B=1.5$ معادل 60 درصد پاسخ متناظر با نسبت $D/B=0.7$ می باشد. در شکل 5(b) برای محدوده دوم سرعت باد که پاسخ های مربوط به حالت تشدید در آن واقع است، با افزایش نسبت D/B ، سرعت مبنای متناظر با پاسخ اوج سازه افزایش می یابد. در این حالت بیشترین مقدار پاسخ به ازای نسبت $D/B=1$ یا پلان مربعی اتفاق می افتد. به نحوی که پاسخ های بیشینه معادل با نسبت های طول به عرض 0.7 و 1.5 به ترتیب 23 و 5 درصد کمتر از پاسخ سازه با پلان مربعی می باشد. دلیل این امر را می توان باریک تر بودن طیف نیروی عرضی باد و بزرگ تر بودن نقطه اوج منحنی طیف برای ساختمان های با پلان مربعی یا نسبت $D/B=1.0$ دانست که در خصوصیات طیف نیروی عرضی باد در مرجع [25] شرح داده شده است.



شکل ۵: تغییرات انحراف معیار جابجایی در مقابل سرعت مبنای باد: الف) سرعت مبنای 10 تا 40 متر بر ثانیه ب) سرعت مبنای 60 تا 110 متر بر ثانیه

۵-۴- تاثیر نسبت لاغری ساختمان‌های بلند بر روی پاسخ عرضی باد

برای بررسی تاثیر لاغری ساختمان‌های بلند بر روی پاسخ عرضی باد، پاسخ عرضی ساختمانی با مقطع مربع به ارتفاع 400 متر در سرعت مبنای باد 30 متر بر ثانیه، به ازای مقادیر مختلف نسبت لاغری مورد تحلیل قرار گرفت. نسبت لاغری در محدوده 4 تا 10 در نظر گرفته شد که برای سازه 400 متری معادل عرض 40 تا 100 متر می‌باشد. پاسخ‌های به دست آمده شامل جابجایی استاتیکی و انحراف معیار جابجایی و شتاب عرضی برای مقادیر مختلف نسبت لاغری، با تقسیم بر پاسخ متناظر ساختمان با نسبت لاغری 4 بی‌بعد گردید که بر مبنای آن، پاسخ‌های بی‌بعد شده برای سازه دارای نسبت لاغری 4، برابر با یک می‌باشند. شکل 6، تغییرات پاسخ‌های بی‌بعد را در مقابل نسبت لاغری نشان می‌دهد. مطابق شکل با افزایش نسبت لاغری، هر دو پاسخ جابجایی استاتیکی و جابجایی عرضی بالای سازه افزایش می‌یابند. به نحوی که برای ساختمان با نسبت لاغری 10، مقادیر پاسخ‌های جابجایی استاتیکی و جابجایی عرضی به ترتیب 2.5 و 3.05 برابر پاسخ‌های مربوطه برای ساختمان با نسبت لاغری 4 می‌باشند. بر اساس نتیجه حاصله، نسبت لاغری عامل بسیار کلیدی در پاسخ دینامیکی سازه در برابر باد می‌باشد و با توجه به افزایش روزافزون تقاضا برای احداث ساختمان‌های بلند و در نتیجه لاغرتر شدن آن‌ها، بایستی تمهیدات ویژه‌ای جهت کنترل و کاهش ارتعاشات دینامیکی این سازه‌ها در نظر گرفته شود.

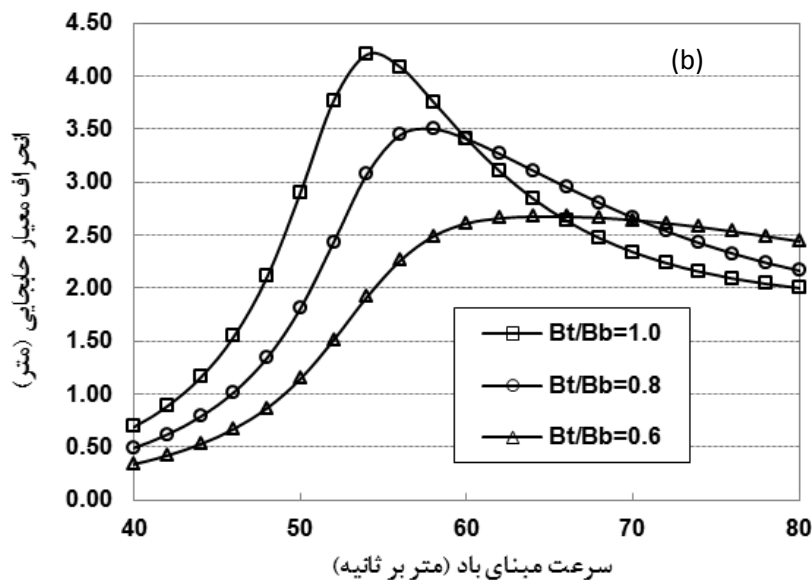
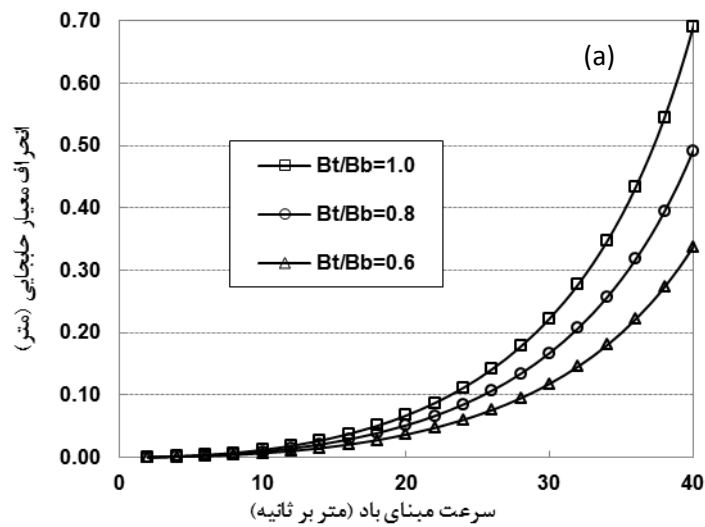


شکل ۶: تغییرات پاسخ‌های بی‌بعد شده در مقابل باد با نسبت لاغری h/B از $V_b=30$ m/s

۵-۵- تاثیر متغیر بودن مقطع ساختمان‌های بلند بر روی پاسخ عرضی باد

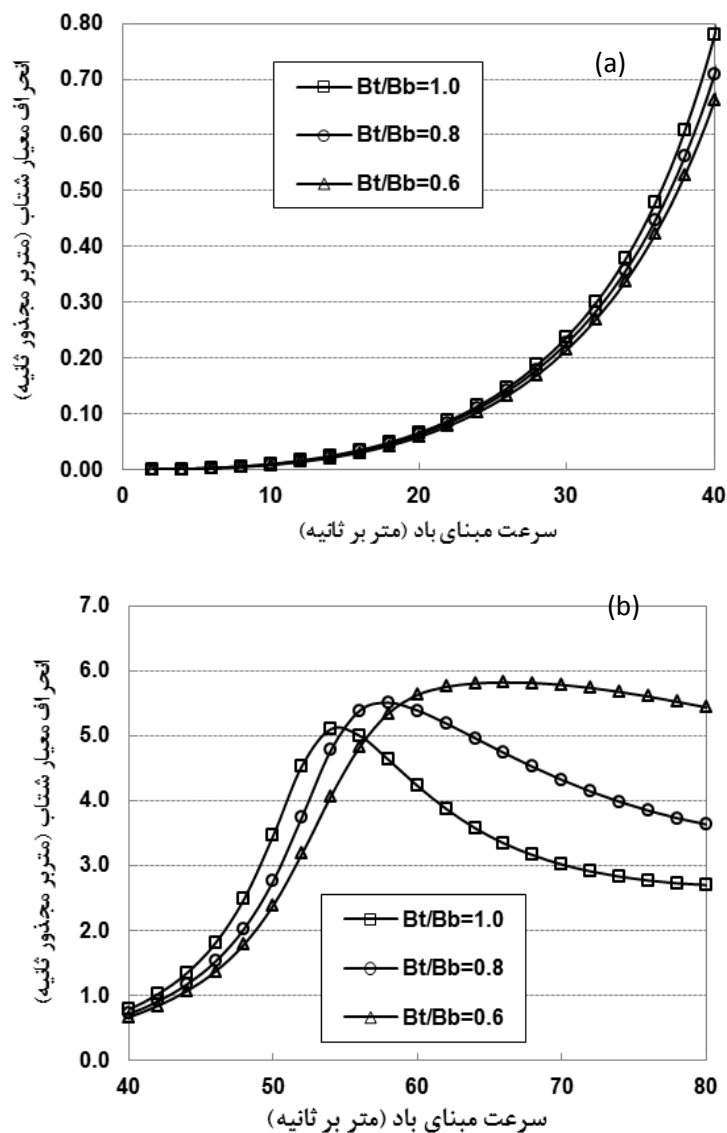
به منظور بررسی تاثیر متغیر بودن مقطع ساختمان در ارتفاع بر روی پاسخ عرضی باد، پاسخ عرضی ساختمانی با مقطع عرضی مربع به ارتفاع 400 متر، به ازای مقادیر مختلف نسبت‌های بعد فوقانی به بعد تحتانی ساختمان و سرعت مبنای باد مورد تحلیل قرار گرفت. در این بخش، برای ساختمان با مقطع یکنواخت، مقدار عرض 40 متر در نظر گرفته شد و برای ساختمان‌های مخروطی، عرض فوقانی و تحتانی به نحوی فرض شد که میانگین عرض فوقانی و تحتانی برابر 40 متر باشد. به طور مثال، در حالتی که نسبت عرض فوقانی به تحتانی 0.6 باشد، عرض‌های فوقانی و تحتانی به ترتیب برابر با 30 و 50 متر می‌باشند. توزیع سختی جانبی در هر دو حالت مقطع متغیر و ثابت، یکسان در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه با کاهش عرض ساختمان در ارتفاع، مقدار سطح بادگیر کاهش می‌یابد، لذا طبیعی است که با کاهش نسبت عرض فوقانی به تحتانی، پاسخ استاتیکی سازه کاهش یابد. بر اساس نتایج تحلیل به ازای سرعت مبنای 30 متر بر ثانیه، جابجایی استاتیکی برای نسبت‌های عرض 0.6، 0.8 و 1.0 به ترتیب 0.191، 0.234 و 0.278 متر می‌باشد. در نتیجه، پاسخ استاتیکی ساختمان مقطع متغیر با نسبت عرض فوقانی به تحتانی 0.6 در مقایسه با ساختمان مقطع ثابت، 31 درصد کاهش می‌یابد.

شکل‌های 7(a) و 7(b) تغییرات انحراف جابجایی بالای سازه را به ازای مقادیر مختلف نسبت عرض فوقانی به تحتانی، برای دو محدوده سرعتی 0 تا 40 متر بر ثانیه و 40 تا 80 متر بر ثانیه نشان می‌دهند. مطابق هر دو شکل، مقدار پاسخ انحراف معیار جابجایی سازه با کاهش نسبت عرض فوقانی به تحتانی سازه، کاهش می‌یابد. بر اساس شکل 7(a) به ازای سرعت مبنای 30 متر بر ثانیه، مقدار کاهش جابجایی عرضی برای ساختمان مقطع متغیر با نسبت‌های عرضی 0.6 و 0.8 در مقایسه با مقطع ثابت، به ترتیب 25 و 47 درصد می‌باشد. مطابق شکل 7(b) مقدار اوج پاسخ عرضی برای نسبت‌های مختلف عرض فوقانی به تحتانی، در محدوده سرعت مبنای باد 50 تا 60 متر بر ثانیه قرار دارد به نحوی که با کاهش نسبت عرض فوقانی به تحتانی سرعت مبنای متناظر با دامنه ماکزیمم افزایش می‌یابد. تغییر مقطع ساختمان در ارتفاع، باعث می‌شود فرکانس نیروی تحریک در ارتفاع تغییر نموده و محدوده فرکانسی نیروی عرضی باد پهن تر گردد که این موضوع موجب کاهش دامنه جابجایی ماکزیمم می‌گردد. مطابق شکل، مقدار کاهش دامنه ماکزیمم به ازای نسبت‌های عرضی 0.8 و 0.6 در مقایسه با مقطع ثابت، به ترتیب 18 و 38 درصد می‌باشد.



شکل ۷: تغییرات انحراف معیار جابجایی در مقابل سرعت مبنای باد: (a) سرعت مبنای 0 تا 40 متر بر ثانیه (b) سرعت مبنای 40 تا 80 متر بر ثانیه

شکل‌های 8(a) و 8(b) تغییرات انحراف معیار شتاب بالای سازه را به‌ازای مقادیر مختلف نسبت عرض فوقانی به تحتانی و دو محدوده سرعتی 0 تا 40 و 40 تا 80 متر بر ثانیه نشان می‌دهند. در ساختمان‌های با پلان متغیر یا مخروطی، توزیع جرم ساختمان با افزایش ارتفاع کاهش می‌یابد و عامل مذکور، در شرایط سختی ثابت، موجب افزایش فرکانس طبیعی ساختمان می‌گردد. با توجه به اینکه پاسخ شتاب ساختمان با مجذور فرکانس طبیعی سازه متناسب می‌باشد، لذا شتاب عرضی سازه در مقایسه جابجایی عرضی برای ساختمان‌های مقطع متغیر، کاهش کمتری نشان دهد. شتاب عرضی در محدوده سرعتی نخست، برای نسبت‌های عرضی مختلف، نزدیک به هم می‌باشد. در محدوده سرعتی دوم که پاسخ اوج ناشی از تشدید اتفاق می‌افتد، دامنه ماکزیمم شتاب عرضی با افزایش نسبت عرض فوقانی به تحتانی افزایش می‌یابد که تحت تاثیر دو عامل می‌باشد. عامل اول افزایش سرعت مبنای متناظر با پاسخ اوج با افزایش نسبت عرض فوقانی به تحتانی، و عامل دوم افزایش فرکانس طبیعی سازه با افزایش نسبت عرض فوقانی به تحتانی می‌باشد. با توجه به اینکه شتاب‌های بلند از معیارهای مهم در آسایش ساکنین می‌باشد لذا پاسخ مذکور در سازه‌های بلند مقطع متغیر، که در آن‌ها افزایش فرکانس طبیعی ساختمان محتمل است، بایستی مورد دقت و کنترل قرار گیرد.

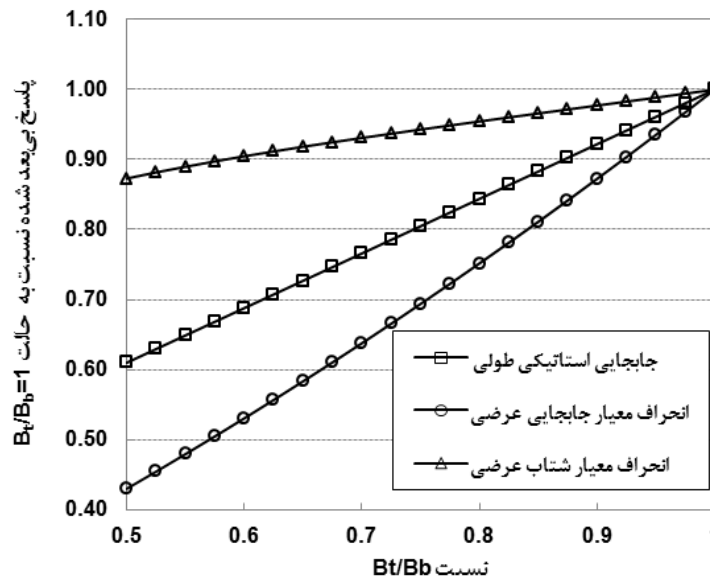


شکل ۸: تغییرات انحراف معیار شتاب عرضی در مقابل سرعت مبنای باد: الف) سرعت مبنای ۰ تا ۴۰ متر بر ثانیه ب) سرعت مبنای ۴۰ تا ۸۰ متر بر ثانیه

اشکال ۷ و ۸ نشان می‌دهد پاسخ انحراف معیار جابجایی و شتاب در تراز فوقانی ساختمان با ارتفاع ۴۰۰ متر و مقطع ثابت به ازای سرعت مبنای باد ۳۰ متر بر ثانیه، به ترتیب حدود $22/3$ سانتیمتر و $22/61$ سانتیمتر بر مجذور ثانیه می‌باشد. در صورتیکه ضریب اوج را $3/5$ در نظر بگیریم، دامنه ماکزیمم جابجایی و شتاب عرضی به ترتیب $78/05$ سانتیمتر و $79/13$ سانتیمتر بر مجذور ثانیه خواهد بود. با توجه به اینکه معیارهای دریافت و شتاب مجاز برای تامین آسایش ساکنین به ترتیب $1/400$ تا $1/600$ ارتفاع و 10 تا 15 سانتیمتر بر مجذور ثانیه می‌باشد [4]، مقدار شتاب عرضی سازه بالاتر از حد تحمل ساکنین می‌باشد و نیاز به پیش‌بینی تمهیدات لازم برای کنترل ارتعاشات سازه خواهد بود. نتایج مطالعات مشابه نیز نشان می‌دهد ارتعاشات عرضی ناشی از باد، به‌ویژه شتاب عرضی از پارامترهای مهم در معیار آسایش ساکنین می‌باشد که مستلزم کنترل ارتعاشات می‌باشد [31].

شکل ۹ تغییرات پاسخ‌های جابجایی استاتیکی، انحراف معیار جابجایی عرضی و شتاب عرضی بی‌بعد شده در مقابل باد را در مقابل نسبت عرض فوقانی به تحتانی ساختمان با ارتفاع ۴۰۰ متر و لاغری متوسط ۱۰ به‌ازای سرعت مبنای ۳۰ متر بر ثانیه نشان می‌دهد. پاسخ‌ها با تقسیم بر پاسخ متناظر با سازه دارای مقطع یکنواخت بی‌بعد شده‌اند. پاسخ‌های بی‌بعد در حالت $B_t/B_b=1$ برابر با یک می‌باشند. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود جابجایی عرضی سازه با کاهش نسبت بعد فوقانی به بعد تحتانی سازه، در مقایسه با دو پاسخ دیگر کاهش

بیشتری نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود تغییرات شتاب عرضی بی بعد به ازای مقادیر مختلف نسبت بعد فوقانی به تحتانی، در مقایسه با دو پاسخ دیگر کمتر است که نشان دهنده تاثیر کم کاهش مقطع عرضی در پاسخ شتاب سازه می باشد.



شکل ۹: تغییرات پاسخ های بی بعد شده در مقابل باد با نسبت عرض فوقانی به تحتانی ساختمان به ازای $V_b=30 \text{ m/s}$

۶- نتیجه گیری

با افزایش ارتفاع و لاغری ساختمان های بلند، ارتعاشات ناشی از باد در امتداد عرضی یا عمود بر جهت وزش باد از پارامترهای تعیین کننده در طراحی و آسایش ساکنین ساختمان های بلند محسوب می شود. با توجه به اینکه مطالعات محدودی در زمینه پاسخ عرضی ساختمان های بلند انجام گرفته است، در این تحقیق، پاسخ عرضی ساختمان های مستطیلی بلند در مقابل نیروهای دینامیکی عرضی باد با استفاده از تحلیل حوزه فرکانس سیستم چند درجه آزادی و براساس روش ارتعاشات تصادفی، به صورت پارامتری مورد ارزیابی قرار گرفت. سازه بلند به صورت تیر طره ای قائم با جرم های متمرکز در گره ها مدل سازی گردید. مراحل مدل سازی و تحلیل سازه، شامل المان بندی، تعیین ماتریس انتقال سازه، استخراج ماتریس های تابع طیفی نیروهای عرضی باد و انتگرال گیری عددی برای محاسبه انحراف معیار جابجایی و شتاب عرضی، با برنامه نویسی در محیط نرم افزار متلب انجام گردید. پاسخ سازه در تراز فوقانی سازه به عنوان مبنای بررسی و مقایسه انتخاب شد و تاثیر پارامترهای مختلف، از قبیل سرعت مبنای باد، نسبت ابعادی در پلان، نسبت لاغری ساختمان و نسبت بعد فوقانی به تحتانی برای ساختمان های بلند مخروطی، مورد بحث و بررسی قرار گرفت. براساس تحلیل به عمل آمده، نتایج ذیل در خصوص پاسخ عرضی ساختمان های بلند حاصل گردید:

نتایج حاصله برای ساختمان های بلند با کاهش ابعاد مقطع عرضی در ارتفاع، نشان می دهد این اصلاح آیرودینامیکی نقش مهمی در کاهش جابجایی عرضی باد دارد. در این شرایط، با توجه به کاهش عرض ساختمان و سطح بادگیر در ارتفاع، جابجایی استاتیکی کاهش می یابد. از طرف دیگر به دلیل متغیر بودن عرض سازه در امتداد قائم، طیف نیروی عرضی باد، بازتر شده و در محدوده فرکانسی بیشتری توزیع می یابد و در نتیجه، جابجایی عرضی سازه کاهش می یابد. در مطالعات پیشین در این زمینه که عموماً به صورت آزمایشگاهی انجام گرفته بودند [16] نقش موثر اصلاح آیرودینامیکی کاهش مقطع عرضی در کنترل جابجایی عرضی گزارش گردیده بود که نتایج مطالعات عددی انجام یافته در این مقاله نیز اهمیت موضوع فوق را برای محدوده وسیع تری از پارامترها تایید می کند. با توجه به اینکه در ساختمان های مقطع متغیر، فرکانس ساختمان نسبت به حالت منشوری افزایش می یابد، پاسخ شتاب به دلیل متناسب بودن با مجذور فرکانس کاهش موثری نشان نمی دهد.

- برای ساختمان‌های مطالعه شده، مقدار شتاب عرضی سازه به‌ازای محدوده سرعت طراحی باد، بیش از حد قابل تحمل ساکنین می‌باشد لذا در طراحی سازه‌های بلند، بایستی تمهیدات لازم برای کنترل و کاهش شتاب عرضی ناشی از باد در نظر گرفته شود.
- نسبت لاغری از پارامترهای مهم تاثیرگذار در ارتعاشات عرضی ساختمان بلند می‌باشد. با افزایش نسبت لاغری و کاهش سختی سازه جابجایی استاتیکی سازه افزایش می‌یابد. از طرف دیگر با کاهش عرض سازه، سرعت مبنای باد به سرعت بحرانی ریزش گردبادی نزدیکتر شده و موجب افزایش ارتعاشات عرضی سازه می‌شود.
- برای ساختمان‌های بلند مطالعه شده، سرعت بحرانی باد که به ازای آن‌ها حالت تشدید یا پاسخ اوج رخ می‌دهد در محدوده سرعت مبنای ۶۰ تا ۸۰ متر بر ثانیه قرار دارد. پاسخ عرضی باد در این محدوده به دلیل وقوع پدیده تشدید، با افزایش قابل توجهی همراه می‌باشد. اگرچه سرعت مبنای متداول باد، پایین‌تر از محدوده مذکور می‌باشد، به طور نمونه حداکثر سرعت مبنای باد در کشور ایران حدود ۳۶ متر بر ثانیه است، با این وجود، با عنایت به اهمیت ارتعاشات عرضی ناشی از باد در ساختمان‌های بلند بویژه ساختمان‌های لاغر و با میرایی پایین، خصوصیات فیزیکی ساختمان بایستی به نحوی در نظر گرفته شود که سرعت مبنای باد از محدوده سرعت بحرانی و یا تشدید، اختلاف قابل توجهی داشته باشد.
- برای ساختمان‌های با پلان مستطیلی، با افزایش نسبت طول به عرض، طیف نیروی باد عریض‌تر شده و در نتیجه پاسخ عرضی سازه کاهش می‌یابد و بیشترین مقدار پاسخ در حالت پلان مربعی اتفاق می‌افتد که ناشی از باریک‌تر بودن طیف نیروی عرضی باد و بزرگ‌تر بودن نقطه اوج منحنی در این حالت می‌باشد.

سیاس‌گذاری

مقاله حاضر، مستخرج از طرح پژوهشی شماره ۹۷۰۱۱۱۸۷ مورد حمایت صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور می‌باشد و نویسنده از حمایت به عمل آمده توسط صندوق نهایت تقدیر و تشکر را دارد.

مراجع

- [1] Li Q.S., Fang J.Q., Jeary A.P., Wong C.K., and Liu D.K. (2000), "Evaluation of wind effects on a super tall building based on full scale measurements", *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, 29(12), 1845-1862.
- [2] 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, 233-244.
- [3] Li Q.S., Yang K., Wong C.K., and Jeary A.P. (2003), "The effect of amplitude-dependent damping on wind-induced vibrations of a super tall building", *Journal of Wind Engineering and Industrial aerodynamics*, 91, 1175-1198.
- [4] Simiu, E., (2011), "Design of Buildings for Wind a Guide for ASCE 7-10 Standard Users and Designers of Special Structures", second ed. John Wiley & Sons, New Jersey, USA.
- [5] Solari G. (1985), "Mathematical model to predict 3-D wind loading on buildings", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 111(2), 254-275, 1985.
- [6] Vickery B.J. and Clarke A.W. (1972), "Lift or across-wind response of tapered stacks", *Journal of the Structural Division*, 98, 1-20.
- [7] Vickery B.J. and Basu R.J. (1983), "Across-wind vibrations of structures of circular cross-section. Part I. development of a mathematical model for two-dimensional conditions", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 12, 49-73.
- [8] Vickery B.J. and Basu R.I. (1984), "The response of reinforced concrete structures to vortex shedding", *Journal of Structural Engineering*, 6, 324-333.
- [9] Menon D. and Rao S. (1997), "Uncertainties in code recommendations for across-wind load analysis of R/C chimneys", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 72, 455-468.

- [10] Arunachalam S. (2014), "A method for prediction of across-wind response of tall circular concrete chimneys", *Journal of Wind and Engineering*, 11(1), 23–39.
- [11] Arunachalam S., Lakshmanan N. (2015), "Across-wind response of tall circular chimneys to vortex shedding", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 145, 187–195.
- [12] Eimani K. H., Khodaie N. (2017), "Parametric study of the along-wind and across-wind responses of tall RC chimneys using the frequency domain analysis", *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*, 4(2), 148-160.
- [13] Matsumoto T. (1986), "On the Across-wind Oscillation Of Tall Buildings", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 24, 69-85.
- [14] Young K., Ki Y., Jang Y. (2004), "Across and along-wind responses of tall building", *Journal of Central of South University of technology*, 21, 4404–4408.
- [15] Khodaie N. (2019), "Evaluation of modal contribution to the wind -induced responses of tall buildings", *Asian Journal of Civil Engineering*, 20(6), 837-846.
- [16] Young K, Ki Y., Nag K. (2008), "Across-wind responses of an aeroelastic tapered tall building", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96, 1307–1319.
- [17] Ming G. & Yong Q. (2011), "Across-wind loads and effects of super-tall buildings and structures", *Science China Press*, 54(10), 2531–2541.
- [18] Liang S., Li Q. S., Zou L., Wu J. R. (2005), "Simplified formulas for evaluation of across-wind dynamic responses of rectangular tall buildings", *Wind and Structures*, 8(3), 197-212.
- [19] Chen X. (2013), "Estimation of stochastic crosswind response of wind-excited tall buildings with nonlinear aerodynamic damping", *Engineering Structures*, 56, 766–778.
- [20] Kareem A. (1982), "Acrosswind response of buildings", *Journal of structural division, ASCE*, 108, 869–887.
- [21] Kareem A. (1984), "Model for predicting the acrosswind response of buildings", *Engineering Structures*, 6, 136-141.
- [22] Kwok K. C. S. (1982), "Crosswind response of tall buildings", *Engineering Structures*, 4, 258-262.
- [23] Cheng C.M., Lu P.C., Chen R.H. (1992), "Wind loads on square cylinder in homogeneous turbulent flows", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 41–4, 739–749.
- [24] Choi H., Kanda J. (1993), "Proposed formulae for the power spectral densities of fluctuating lift and torque on rectangular 3-D cylinders", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 46–47, 507–516.
- [25] Lianga S., Liu S., Li Q.S., Zhang L., Gu M. (2002), "Mathematical model of acrosswind dynamic loads on rectangular tall buildings", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90, 1757–1770.
- [26] Gu M., Quan Y. (2004), "Across-wind loads of typical tall buildings", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 92, 1147–1165.
- [27] Simiu E. and R. Scanlan H. (1996), *Wind effects on structures: fundamentals and applications to design citation*, 3rd edition, John Wiley & Sons, New York, USA, (1996).
- [28] National Building Code Of Canada (NBC 2015), National Research Council Of Canada (NRC), Ottawa, Canada.
- [29] Eimani, H., Khodaie, N., (2014), "Parametric Study on the Gust Loading factor (GLF) of Along-Wind Loads on Tall Buildings", 15th Civil engineering students conference, Urmia, Iran.
- [30] Kareem A. (1996), "Damping in structures: its evaluation and treatment of uncertainty", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 59, 131-157.
- [31] Eimani, H., Khodaie, N., (2018), "Wind-induced vibration control of super-tall buildings using a new combined structural system", *J. Wind Eng. Ind. Aerod.* 172, 256–266.