

Performance based Design of tall buildings having elliptic plan shape against the wind

Houshyar Eimani Kalehsar^{1*}

1- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabil, Iran

ABSTRACT

Population growth, space limitation, economic and social factors are some of the reasons that led to the construction of tall buildings. However, the invention of light weight and durable materials has made tall buildings with low damping and high vibration period and sensitive to wind forces. Therefore, the study and analysis of tall buildings under wind forces seem necessary. The purpose of the present research work is to provide the necessary solutions for performance based design of tall buildings against the wind. In the present study, a tall elliptical building is exposed to wind interaction. Moreover, wind modeling and building specifications are performed in ANSYS.17 software. To simulate the atmospheric boundary layer in the software as a virtual wind tunnel, two parameters of the mean wind speed and turbulence includes length and intensity, are required. The results of software analysis were presented as a time history of longitudinal and transverse acceleration at three different heights of the building for four various mean wind speeds, then the standard deviation of acceleration was calculated and placed in standard curves of the regulation and interpreted. The effect of different factors on the performance of tall buildings against the wind is a type of response (alongwind or acrosswind), mean wind speed, orientation of the building, and the height of the desired point from the ground. Results show that the response of tall buildings to wind does not follow a specific law and is a function of the mean wind speed, height of the building, and the alongwind and acrosswind response of the building, i.e., displacement and accelerations.

ARTICLE INFO

Receive Date: 04 November 2021

Revise Date: 10 February 2022

Accept Date: 16 February 2022

Keywords:

Tall building

ANSYS

Mean wind speed Alongwind
acceleration

Acrosswind acceleration

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.313458.2628>

*Corresponding author: Houshyar Eimani Kalehsar
Email address: hek@uma.ac.ir

طراحی براساس عملکرد یک ساختمان بلند با پلان بیضی شکل در برابر باد

هوشیار ایمانی کله سر^{*}

۱- دانشیار گروه آموزشی مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، ایران

چکیده

افزایش جمعیت، محدودیت فضا، عوامل اقتصادی و اجتماعی و مقاصد گردشگری از دلایلی هستند که باعث احداث ساختمان‌های بلند شده‌اند. از طرفی، ابداع مصالح سبک و مقاوم باعث شده است که ساختمان‌های بلند دارای میرایی کم و پیوند ارتعاشی زیاد بوده و نسبت به نیروهای باد حساس باشند. از این رو، بررسی و تحلیل ساختمان‌های بلند تحت اثر نیروهای باد ضروری به نظر می‌رسد. هدف از اجرای این پژوهش ارائه راهکارهای لازم جهت طراحی بر اساس عملکرد ساختمان‌های بلند در برابر باد می‌باشد. در پژوهش حاضر، یک ساختمان بلند بیضی شکل در برابر اندرکنش باد قرار داده شده و مدل‌سازی مشخصات باد و ساختمان در نرم‌افزار ANSYS.17 انجام شده است. برای شبیه‌سازی لایه‌مرزی جوی در نرم‌افزار و بعنوان تونل باد مجازی، به دو پارامتر نیمرخ سرعت میانگین باد و پارامترهای تلاطم یعنی طول و شدت آن نیاز هست. نتایج حاصل از تحلیل نرم‌افزار به صورت تاریخچه زمانی شتاب طولی و عرضی در سه ارتفاع مختلف ساختمان و برای سرعت میانگین نهایی باد یعنی ۷۲ متر بر ثانیه در جهت طولی و چهار سرعت میانگین باد در جهت عرضی ارائه و سپس انحراف معیار شتاب استخراج و در منحنی‌های استاندارد آیین‌نامه جاگذاری و تفسیر شدند. تأثیر عوامل مختلف بر عملکرد ساختمان‌های بلند در برابر باد عبارت‌اند از: نوع پاسخ (یعنی طولی یا عرضی)، سرعت میانگین باد، نحوه قرارگیری ساختمان در برابر باد و ارتفاع نقطه موردنظر از سطح زمین. نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهند که پاسخ عرضی ساختمان‌های بلند در برابر باد از قاعده خاصی پیروی نمی‌کند و تابع سرعت میانگین باد، ارتفاع مورد نظر از ساختمان و پاسخ عرضی یعنی تغییر مکان و شتاب می‌باشد.

کلمات کلیدی: ساختمان بلند، ANSYS، سرعت میانگین باد، شتاب طولی، شتاب عرضی، مهندسی باد بر اساس عملکرد (PBWE)

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.313458.2628	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.313458.2628	۱۴۰۱/۰۹/۳۱	۱۴۰۰/۱۱/۲۷	۱۴۰۰/۱۱/۲۷	۱۴۰۰/۱۱/۲۱	۱۴۰۰/۰۸/۱۳
هوشیار ایمانی کله سر hek@uma.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

با توجه به عدم آشنایی مردم با مهندسی باد و آثار مخرب آن در سازه‌ها و ناشناخته ماندن آن‌ها، جهت آشنایی مهندسان، اساتید، دانشجویان، پیمانکاران، کارفرمایان و تمام دست اندرکاران صنعت ساختمان لازم است که در این مورد تلنگری زده شود تا ضمن معرفی آثار مخرب باد، راه‌های جلوگیری از آن‌ها را نیز بشناسند. امروزه آیین‌نامه‌ها، طراحی ساختمان‌ها را بر اساس عملکرد آن‌ها در برابر زلزله در نظر می‌گیرند ولی در مورد رفتار ساختمان‌های بلند و لاغر در برابر باد که خیلی هم تعیین‌کننده است چنین کاری صورت نمی‌گیرد و با توجه به اینکه در بیشتر شهرهای بزرگ به علت کمبود فضای شهر جهت گسترش افقی، به گسترش عمودی روی می‌آورند که همان افزایش طبقات و انعطاف‌پذیری بیشتری به دنبال داشته و زمان تناوب آن‌ها را بالا می‌برد در نتیجه آن‌ها را در برابر باد حساس می‌کند و ممکن است باعث ناپایداری آئرودینامیکی مانند پدیده تازش و قفل‌شدگی در آن‌ها گردیده و باعث انهدام شود. تجربیات حاصل از طراحی‌ها و بررسی دقیق ساختمان‌های بلند موجود در محیط‌های بادی مختلف اما شدید و نواحی لرزه‌ای در دهه‌های اخیر، به‌طور واضح نشان داده است که استفاده از روش طراحی لرزه‌ای بر اساس عملکرد بجای آیین‌نامه‌های کشورهای مختلف، نه تنها ایمنی بیشتری برای ساختمان‌ها به همراه دارد بلکه به طراحی اقتصادی سازه‌های سنگین منجر می‌شود. در واقع جهت حرکت دانش مهندسی سازه به سمتی است که با هزینه کمتر، سطح ایمنی مناسب‌تر برای سیستم سازه‌ای تأمین گردد. یکی از مهم‌ترین پیشرفت‌ها در این زمینه، تأکید بر طراحی در حالت‌های حدی است که عموماً تحت عنوان طراحی بر اساس عملکرد از آن یاد می‌شود. یک هدف عملکردی سازه، بیانگر رفتار لرزه‌ای مطلوب آن است. هدف عملکردی با تعیین حد خرابی بیشینه قابل قبول (حد عملکرد) برای یک خطر لرزه‌ای مشخص (زلزله) در مهندسی زلزله و راحتی ساکنان ساختمان‌های بلند در مهندسی باد شناخته می‌شود. یعنی در حین اینکه راحتی ساکنان مهم است تغییر مکان نسبی طبقات نیز در برابر باد در نظر گرفته می‌شود. لذا هدف عملکردی عبارت است از مشخص کردن یک سطح قابل قبول آسیب به یک سازه در صورت تجربه یک زمین‌لرزه یا یک ارتعاش شدید از هر عامل لرزه مانند باد و زلزله و انفجار. این کار یک بازه سرمایه‌ای (جدول قابل تطبیق با درآمد افراد) ایجاد می‌کند که به‌موجب آن می‌توان ساختمان را طوری طراحی کرد تا به شیوه‌ای مطابق با آن طراحی عمل کرده و اهداف ایمنی و اقتصادی مالک را برآورده سازد.

کوک و همکاران طی مطالعه‌ای بررسی کردند که لرزش و نوسان ساختمان‌های بلند باید محدود شود تا از ناراحتی و ساکنان و صدمات سازه‌ای جلوگیری شود. برای ساختمان‌های ویژه، از جمله پل‌های طولی، سقف‌های بزرگ ورزشگاه‌ها و دودکش‌های بلند و ساختمان‌های بلند حساس به باد، آزمایش مدل آن‌ها در تونل باد به منظور طراحی مقاوم در برابر باد توصیه می‌شوند تا به حالات حدی لازم در برابر خدمت‌پذیری و مقاومت نائل شوند و باید محدودیت‌های قابلیت خدمت‌پذیری در نوسان، تغییر مکان و شتاب بررسی شود تا شرایط کارآمد برای ساختمان‌ها در طی عمر آن‌ها فراهم شود. روش بررسی برای احساس ارتعاش هم برای میزان تغییر مکان ناشی از ارتعاش باد و هم برای آستانه احساس ارتعاش (یا به اصطلاح معیارهای راحتی ساکنان) انجام شود. به‌طور اعم پذیرفته شده است که احساس حرکت ناشی از باد با شتاب حرکت ساختمان‌ها ارتباط دارد [۱]. برتون و همکاران هر دو مورد اوج شتاب و انحراف استاندارد شتاب را بررسی و مشاهده کردند که در شرایط باد شدید و در دوره بازگشت ۱۰ ساله یا ۵ ساله معمولاً برای نشان دادن حرکت ساختمان‌ها استفاده می‌شوند [۲]. فشار باد طراحی‌شده در آیین‌نامه باد هنگ‌کنگ نیز، سرعت باد متوسط ساعتی و حداکثر سرعت وزش باد با دوره بازگشتی ۵۰ سال تعیین شده است [۳]. جین و همکاران یک روش مبتنی بر متدولوژی احتمالاتی استفاده و مشخصات سایتی را مبنی بر سرعت باد در طراحی بر اساس عملکرد در برابر باد به‌منظور استفاده در اندازه‌گیری‌های تونل باد و طراحی ساختمان‌ها تعیین کردند. در آن مقاله نشان داده شده است اگر از چنین بارهای باد بسیار شدید سایت استفاده شود، ممکن است به‌صرفه جویی هزینه ساختمان منجر شود [۴]. گریفیس در مطالعه‌ای دریافت که عملکرد ناشی از باد را می‌توان به پاسخ‌های دینامیکی ساختمان تحت اثر باد ربط داد. پاسخ‌های ناشی از باد، از نظر نیروی داخلی، تغییر مکان جانبی، تغییر مکان نسبی طبقات و شتاب، به‌طور جامع برای توصیف رفتار سیستم ساختمان و یا عملکرد ساختمان تحت تحریکات باد استفاده می‌شود [۵]. واضح است که سطوح عملکرد به‌طور مستقیم با مفهوم طراحی حالت حدی، ارتباط داشته و در بسیاری از کدها و آیین‌نامه‌ها و استانداردهای طراحی مدرن به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. در واقع، مفهوم سطوح عملکرد نشان‌دهنده تکامل قوانین تجویزی برای طراحی حالت حدی است که بافهم رفتار ساختمان‌ها در طی سالیان دراز

تغییر کرده‌اند. علاوه بر این، یک گزینه طراحی بر اساس عملکرد، طراحی ساختمان‌ها را به استانداردهای بالاتر، بدون توصیف صریح در کدها و استانداردها و آیین‌نامه‌های ساختمانی، تسهیل کرده و امکان استفاده از فناوری نوآورانه را فراهم ساخته است. هنگامی که سطوح عملکرد، با توجه به ضرر و زیان احتمالی در یک چارچوب طراحی بر اساس قابلیت اطمینان مرتبط می‌شوند، استراتژی‌های برنامه‌ریزی سرمایه‌ای بلندمدت مالک را می‌توانند در روند طراحی ساختمان مورد توجه قرار دهند. امروزه اگرچه معلوم شده است که قابلیت خدمت‌پذیری ناشی از باد به نگرانی‌های عمده در طراحی ساختمان‌های بلند تبدیل شده است، اما آن چنان که می‌بایست به تحقیق در طراحی سازه‌ای و بهینه‌سازی برای قابلیت خدمت‌پذیری پرداخته می‌شده تا حد زیادی مورد توجه قرار نگرفته و پرداخته نشده است. در حقیقت، طراحی ساختمان‌های بلند در اقلیم‌های بادی عموماً تحت تأثیر ملاحظات سرویس‌دهی از لحاظ تغییرشکل‌های ناشی از باد و ارتعاشات قرار می‌گیرد نه بر اساس نیازهای نیرویی اعضای آن‌ها. محققانی همچون اسمیت و کول طی پژوهشی بررسی و ثابت کردند که عامل اصلی طراحی برای بیشتر ساختمان‌های بلند در مناطق مستعد طوفان و بادهای قوی واقع در منطقه لرزه‌خیزی ضعیف، باد است. از آنجایی که ساختمان‌های بلند مدرن روز به روز به‌طور فزاینده‌ای بلند و بلندتر و بنابراین لاغرتر می‌شوند، لذا آثار و حرکات ناشی از باد در آن‌ها رو به فزونی می‌گذارد. این محققان دریافتند که مقدار مواد و مصالح مورد نیاز برای مقابله با نیروهای جانبی و پیچش بیشتر شده و راحتی و آسایش ساکنان به شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرد. تغییر مکان یا تغییر شکل از هر نوع بار، نه تنها نباید سازه را خراب کند یا مقاومت و کارکرد مؤثر آن را تحت تأثیر قرار دهد بلکه نباید به عناصر و اجزای تقسیم‌بندی (تیغه بندی و ...) آن آسیبی برساند [6]. جیامپولی و همکاران در مقاله‌ای یک فرآیند عمومی برای اعمال طراحی بر اساس عملکرد در مهندسی باد تعریف کردند. این چارچوب عمومی به صورت موردی برای ارزیابی خطرات فروپاشی و عدم قابلیت بهره‌برداری یک پل معلق به کار گرفته شد [7]. اویانگ و همکاران در تحقیقی جدیدتر چنین چارچوبی را برای اعمال مهندسی باد بر اساس عملکرد¹ به منظور ارزیابی سیستم ساختمانی در معرض خطرات باد و باران توسعه دادند [8]. در آیین‌نامه چین، معیارهای بارگذاری باد برای هر دو حالت، حالت حدی مقاومت و حالت حدی خدمت‌پذیری یکسان بوده و معمولاً برای ساختمان‌های معمولی، باد بر اساس یک دوره بازگشت ۵۰ ساله و برای ساختمان‌های مهم یک دوره بازگشت ۱۰۰ ساله در نظر گرفته شده است [9]. ایزیوموف در تحقیقی پیشنهاد کرد که شرایط محدودکننده شتاب در جلوگیری از ناراحتی اشخاص به‌عنوان یک سطح عملکرد طراحی جدید برای ساختمان‌های حساس در برابر باد در نظر گرفته شوند [۱۰]. معیارهای راحتی ساکنان برای حرکات پیچیده ساختمان‌های بلند توسط ملیورن و پالم به‌طور مشروح بیان شده است. در مطالعه آنها معیار شتاب برای رسیدن به راحتی ساکنان ساختمان‌های بلند، در عباراتی از شتاب پیک تابع فرکانس حرکت و دوره بازگشت باد داده شده است [۱۱]. چاک و همکاران مشاهده کردند که سطوح عملکرد (سطوح محدود) ساختمان‌ها در برابر باد در مقایسه با مهندسی لرزه به‌خوبی تعریف نشده است اما می‌توان در برخی از کارهای تحقیقاتی، نسبت به سطوح عملکرد ناشی از باد در ارتباط با اهداف طراحی عملکردی (معیارهای طراحی) مواردی یافت. آنها از لحاظ مهندسی باد بر اساس عملکرد یک مجموعه سازگار از طراحی باد ارائه دادند که با معیارها و چارچوب کنونی طراحی بر اساس عملکرد مهندسی زلزله مطابقت دارد. سطوح طراحی مهندسی باد بر اساس عملکرد توصیه‌شده توسط چاک و همکاران در جدول ۱ آورده شده است که عمر طراحی یک ساختمان، نشان‌دهنده زمان قرار گرفتن ساختمان در معرض باد طراحی است، ۵۰ سال در نظر گرفته است [۱۲]. از لحاظ شناخت باد، ضروری است که طراحی سایت با طراحی سرعت باد مورد بررسی قرار گرفته و در آن جهت باد و آثار توپوگرافی مورد توجه قرار گیرد [۱۳].

در کار تحقیقاتی حاضر، عملکرد یک ساختمان بلند بیضی شکل در پلان در سه ارتفاع مختلف از سطح زمین و با چهار سرعت میانگین متفاوت باد در جهت عرضی و سرعت میانگین نهایی باد در جهت طولی مورد بررسی قرار گرفته است. مراحل کامل شبیه‌سازی لایه‌مرزی جوی در تونل باد، که به دو پارامتر نیمرخ سرعت میانگین باد و پارامترهای تلاطم یعنی طول و شدت آن بستگی دارد انجام گرفته است. یافتن حالت بهینه المان بندی و نوع آن از جمله مسائلی است که در استخراج جواب‌های درست خیلی کارساز می‌باشد که در بخش‌های بعدی بحث خواهد شد.

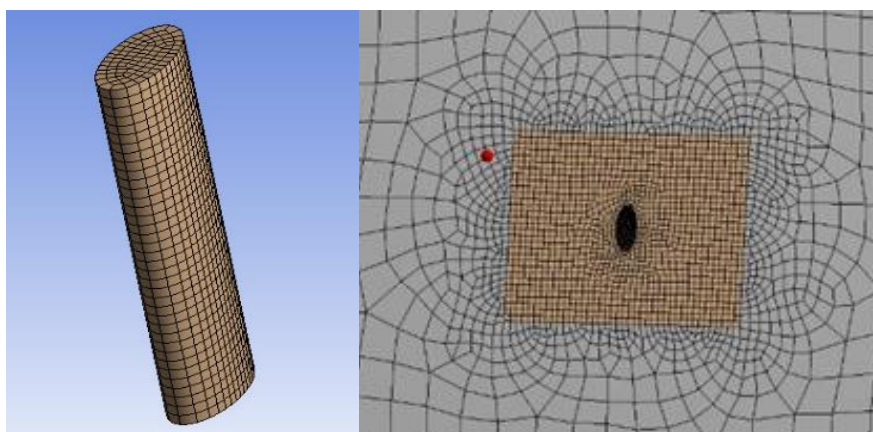
¹ Performance-Based Wind Engineering (PBWE)

جدول ۱: سطوح پیشنهادی طراحی بر اساس عملکرد در برابر باد (چاک و همکاران ۱۹۹۸)

سطوح عملکرد	احتمال حدوث	دوره بازگشت میانگین (سال)	سطح شدت باد طراحی
آستانه احساس	۱۰۰٪ در ۵۰ سال	۱	خیلی مکرر
راحتی ساکنان	۹۹٫۹٪ در ۵۰ سال	۵	مکرر
خطر جانی	۹۹٫۵٪ در ۵۰ سال	۱۰	مکرر
تغییر مکان جانبی/مقاومت	۶۴٪ در ۵۰ سال	۱۰۰	گاه‌گاهی
ایمنی	۱۰٪ در ۵۰ سال	۴۷۵	بندرت
جلوگیری از خطر	۵٪ در ۵۰ سال	۱۰۰۰	خیلی بندرت

۲- فرآیند مدل‌سازی عددی

برای مدل‌سازی مشخصات باد و ساختمان از نرم‌افزار المان محدود ANSYS.17 استفاده شده است [20]. فرآیند شبیه‌سازی عددی جریان باد با استفاده از مبنای دینامیک سیالات محاسباتی در مطالعات قبلی منتشر شده توسط نگارنده و همکاران به تفصیل ارائه شده است [۱۴ و ۱۵]. برای شبیه‌سازی مشخصات دینامیکی ساختمان‌ها به جرم حجمی، ابعاد ساختمان‌ها و درصد میرایی و مدول ارتجاعی مصالح مصرفی در آن‌ها احتیاج می‌باشد. ابتدا به شبیه‌سازی باد و سپس به شبیه‌سازی ساختمان و کلیه موارد درگیر در مسئله پرداخته می‌شود. در این پژوهش، جهت شبکه‌بندی از المان Hex Dominate با ابعاد متفاوت استفاده شده است. این المان مکعبی در کتابخانه نرم‌افزار وجود داشته و دارای ۸ رأس و ۱۲ لبه و ۶ وجه است. استفاده از این المان سبب کاهش تعداد المان‌ها، تسریع روند در همگرایی، باعث افزایش دقت محاسبات و کاهش خطای عددی می‌شود. نمونه‌ای از شبکه‌بندی در شکل ۱ دیده می‌شود.



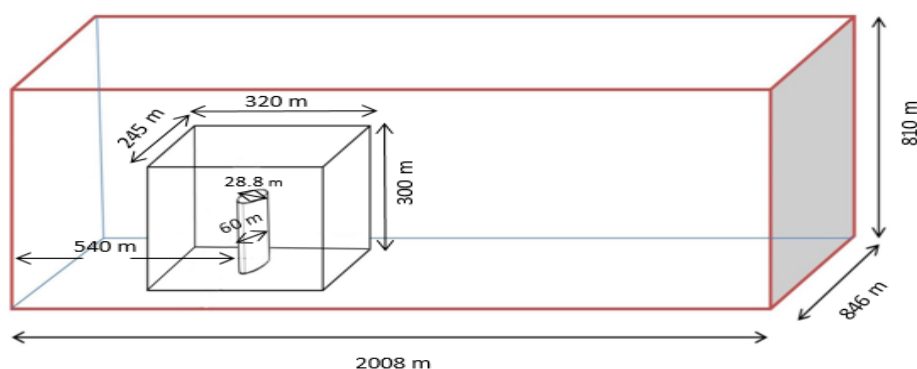
شکل ۱: شبکه‌بندی ساختمان بیضی در محیط سازه و شبکه‌بندی تونل باد در محیط fluent

برای شبیه‌سازی تونل باد و مشخصات آن در نرم‌افزار ANSYS از کمیات و اعداد مطابق جدول ۲ استفاده شده است. دلیل انتخاب آن‌ها، همانا استفاده از ادبیات فنی مربوطه می‌باشد. در شبیه‌سازی، ابعاد تونل باد مجازی را در نرم‌افزار ANSYS با نسبت ابعاد 21:4:4 برابر ارتفاع ساختمان مورد مطالعه در نظر می‌گیرند [۱۶]. لازم به یادآوری است که مدل‌سازی بر اساس ابعاد واقعی شبیه‌سازی شده و در

شکل ۲ ابعاد تونل باد مجازی مورد استفاده در نرم افزار آورده شده است. اتصال ساختمان به کف دامنه محاسباتی گیردار فرض شده است.

جدول ۲: مشخصات فیزیکی باد (آرچ و براون، ۲۰۰۹)

مقدار خاصیت	نوع خاصیت
$\rho = 1.25(\text{kg/m}^3)$	چگالی هوا(باد)
$\mu = 7.03 \times 10^{-2}(\text{N.s/m}^2)$	غلظت لزوجت هوا(باد)
بسته به سرعت باد در ارتفاع مرجع متفاوت خواهد بود	سرعت متوسط باد (سرعت جریان باد در ارتفاع ۱۸۰ متر)



شکل ۲: ابعاد تونل باد و سازه جهت شبیه سازی در تحقیق حاضر

چون مسئله اندرکنش باد و سازه یک فرایند کوپل مانند است برای حل این مسئله از نرم افزارهای Fluent، Transient structure و System Coupling به صورت همزمان استفاده می گردد. در نرم افزار تحلیل سازه ای از گام زمانی یک دهم ثانیه به منظور پایش تغییرات در پاسخ و نیز تامین پایداری حل استفاده شده است.

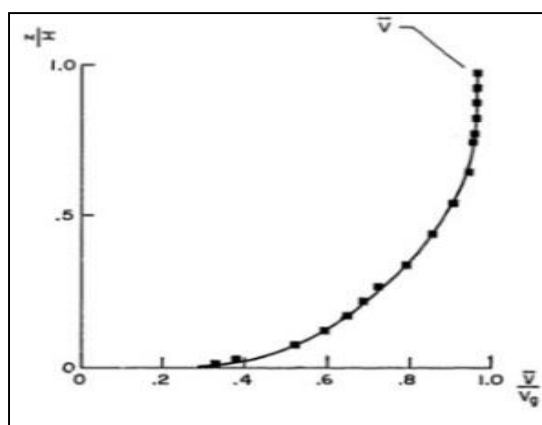
۲-۱- شبیه سازی لایه مرزی جوی

در حالت کلی، اگر در مسیر حرکت یک سیال جسم جامدی قرار گرفته باشد، وجود این جسم بر حرکت سیال اثر می گذارد. سیال از مجموعه ای از ذرات بسیار ریز تشکیل شده است که این ذرات ریز هنگامی که به جسم جامد برخورد می کنند، سرعت حرکتشان به صفر رسیده و به اصطلاح به سطح جسم می چسبند. بین ذرات سیال، نیروهای جاذبه ای وجود دارد که به آن لزوجت گفته می شود. لزوجت باعث می شود که هر لایه ای از سیال به لایه های نزدیک خود بچسبد و ذرات لایه های اطراف را با خود به حرکت درآورد. با چسبیدن ذرات سیال به سطح جسم جامد و وجود نیروهای لزج، هرچه فاصله از جسم جامد دورتر شود، لایه های بالاتر مقداری به لایه های نزدیک تر به سطح، نیرو وارد می کنند و آن ها را با خود به حرکت درمی آورند. این کار تا جایی ادامه دارد که سیال در لایه مرزی از سرعت صفر، در لایه چسبیده به سطح جامد، به سرعت جریان آزاد، در لایه های انتهایی لایه مرزی، نزدیک شود. بدین صورت، بین سطح جسم جامد و نقطه ای که سرعت سیال تقریباً برابر با سرعت جریان آزاد باشد، یک لایه ای از سیال با سرعت کمتر تشکیل می شود که به آن لایه مرزی سرعت گفته می شود. برای شبیه سازی در تونل باد، دو پارامتر آن را شبیه سازی می کنند.

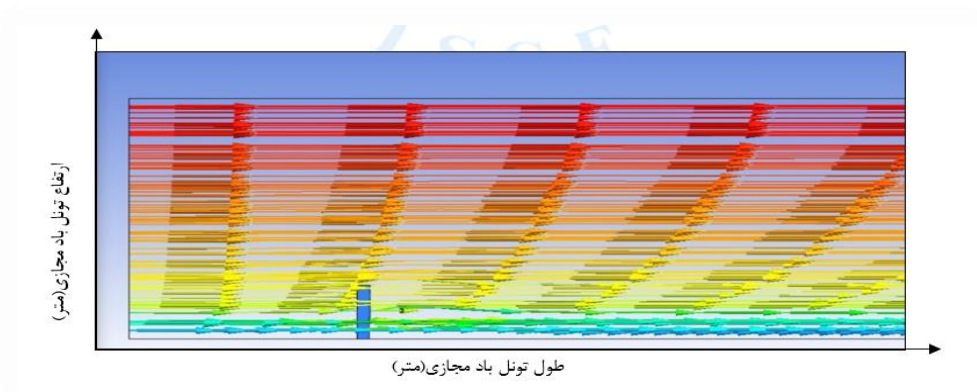
۱-۱-۲ - پروفیل سرعت میانگین باد

در کار پژوهشی حاضر، ابتدا جهت شبیه‌سازی باد در تونل باد در محیط FLUENT، برنامه‌ای کوتاه در زبان C تدوین و برای معرفی محیط بادی یعنی نیمرخ تغییرات سرعت میانگین باد طبق رابطه ۱ در داخل نرم‌افزار اقدام می‌شود. برنامه آن را در محیط FLUENT شبیه‌سازی کرده و تغییرات سرعت میانگین باد را در ارتفاع به دست آورده و به‌عنوان نیروی ورودی به سازه اعمال می‌کنند. تصاویر نیمرخ سرعت میانگین باد در شرایط طبیعی در شکل ۳ و شبیه‌سازی‌شده در نرم‌افزار ANSYS در شکل ۴ آورده شده‌اند [20]. در این پژوهش، جهت شبیه‌سازی $\alpha = 0.19$ (نمای رابطه توانی) در نظر گرفته شده که نشان‌دهنده بافت نوع دو است. بافت نوع دو محیط بادی همان ناحیه اطراف شهرهاست که هیچ‌گونه مانعی برای بادسنگ‌ها جهت اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای باد وجود نداشته باشد. در رابطه ۱، Z_0 ارتفاع مرجع است که توسط هواشناسی محل سرعت لحظه‌ای باد در آن ارتفاع اندازه گرفته می‌شود، V_0 سرعت میانگین مرجع باد و Z ارتفاعی است که قرار است سرعت میانگین باد در آن محاسبه شود و V سرعت میانگین باد در ارتفاع موردنظر Z است [19].

$$\frac{V}{V_0} = \left[\frac{Z}{Z_0} \right]^\alpha \quad (1)$$



شکل ۳: نیمرخ طبیعی سرعت متوسط باد [19]



شکل ۴: نیمرخ شبیه‌سازی‌شده سرعت میانگین باد در تونل باد مجازی در تحقیق حاضر [19]

دیگر مشخصات لازم جهت شبیه‌سازی لایه‌مرزی جوی در نرم‌افزار ANSYS در خصوص مشخصات فیزیکی ساختمان مطابق جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳: مشخصات فیزیکی ساختمان مورد مطالعه

چگالی ساختمان	$\rho = 160(\text{kg/m}^3)$
فرکانس طبیعی ساختمان	$n_0 = 0.2\text{Hz}$
ابعاد ساختمان بیضی شکل (ارتفاع ساختمان ۱۸۰ متر است)	۶۰ متر قطر بزرگ و ۲۸/۸ متر قطر کوچک
مدول الاستیسیته مصالح ساختمان	$E = 2.3 \times 10^8 (\text{N/m}^2)$
ضریب پواسون مصالح ساختمان	$\mu = 0.25$
درصد میرایی ساختمان	1%
نحوه قرار گیری ساختمان	قطر بزرگ ساختمان عمود بر باد

۲-۱-۲- پارامترهای تلاطم یعنی طول و شدت آن

در حالت کلی، تغییر در سرعت باد، تلاطم یا توربولان نامیده می‌شود. تعریف کلی از تلاطم به زبان ریاضی قدری مشکل است، چون که تلاطم در جریان وزش باد ناشی از ناچیز بودن لزجت هوا می‌باشد که چیزی در حدود یک شانزدهم لزجت آب می‌باشد. هر تکان با سرعتی بیش از ۲ تا ۳ مایل بر ساعت (۰/۹ تا ۱/۳ متر بر ثانیه) یک تلاطم محسوب می‌شود که باعث می‌شود که ذرات هوا در هر جهتی حرکت کنند و این برخلاف جریان آرام یا لایه‌ای در سیالات دارای لزجت بالا است؛ در جریان آرام حرکات ذرات، موازی با جهت جریان می‌باشد. نوسانی بودن تلاطم باد یک پدیده تصادفی است. سرعت در هر فاصله‌ی زمانی، از جمع سرعت میانگین باد به همراه سرعت لحظه‌ای حاصل از سرعت نوسانی آن به دست می‌آید و طبق رابطه ۲ نوشته می‌شود.

$$V_t = V_{MEAN} + V' \quad (2)$$

که در آن، V_t سرعت کل باد در زمان t ، V_{MEAN} سرعت میانگین، V' سرعت لحظه‌ای نوسانی حول سرعت میانگین باد بوده و تغییرات سرعت میانگین و سرعت تندباد را در ارتفاع یک ساختمان نشان می‌دهد.

شدت تلاطم باد و انحراف معیار سرعت باد بر اساس روابط ۳ و ۴ نوشته می‌شوند [19].

$$I_{ii} = V_{RMS} / V_{MEAN} \quad (3)$$

$$V_{RMS} = [\{1/(N-1)\} \times \sum (V_t - V_{MEAN})^2]^{1/2} \quad (4)$$

در روابط بالا، V_{RMS} انحراف معیار سرعت باد، I_{ii} شدت تلاطم باد، N تعداد نمونه و V_t سرعت کل باد است. طول تلاطم هم اندازه متوسط گردبادهای کوچک می‌باشد و از محاسبه مساحت زیر منحنی خود همبسته از صفر تا اولین نقطه برخورد آن با محور افقی به دست می‌آید [19].

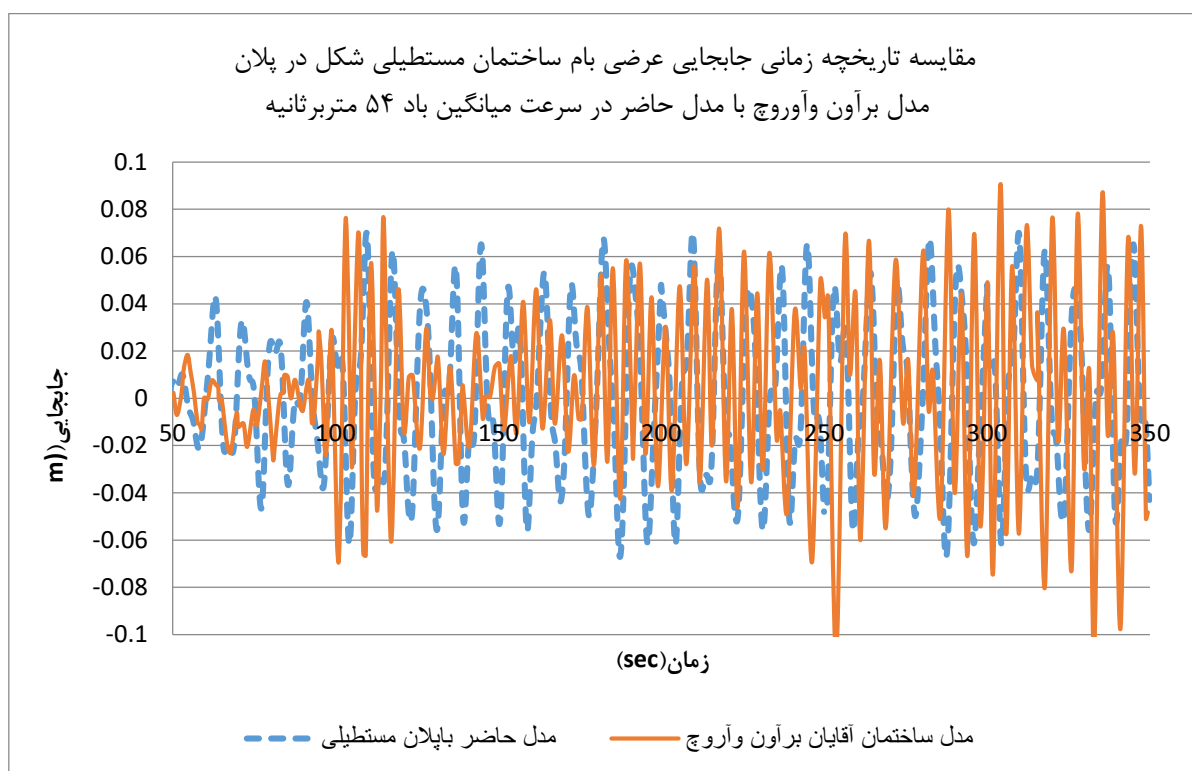
۲-۲- شبیه‌سازی پارامترهای تلاطم

شبیه‌سازی شدت تلاطم مطابق مدل آوروچ و براون مدل گردبادهای بزرگ [Large Eddy Simulation (LES)] در نظر گرفته شده و در دینامیک سیالات محاسباتی کاربرد زیادی دارد [۱۶]. هزینه این روش نسبت به دیگر روش‌های شبیه‌سازی عددی مستقیم و

شبه‌سازی به روش میانگین‌گیری عدد رینولدز معادلات ناویر-استوکس خیلی کم بوده و دقت آن نیز از روش شبه‌سازی به روش میانگین‌گیری رینولدز بیشتر است.

۳- صحت سنجی

در این پژوهش، صحت سنجی طبق مطالعه عددی آوروچ و برون انجام شده است. آوروچ و برون این مطالعه را بر روی ساختمان استاندارد CAARC انجام داده‌اند که ساختمانی است مستطیلی شکل به ابعاد ۴۵ متر در ۳۰ متر در ۱۸۰ متر [۱۶]. تاریخچه زمانی پاسخ عرضی ساختمان CAARC از پژوهش عددی یاد شده استخراج و تاریخچه زمانی پاسخ عرضی همان ساختمان در این پژوهش نیز ایجاد و با هم مقایسه شده است. شکل ۵ مقایسه تاریخچه زمانی مطالعه عددی آوروچ و برون با نتایج حاصل از پژوهش حاضر را نشان می‌دهد. وجود اختلاف در این دو تاریخچه زمانی، ناشی از فرضیاتی است که نرم افزارهای مورد استفاده در نظر گرفته‌اند.

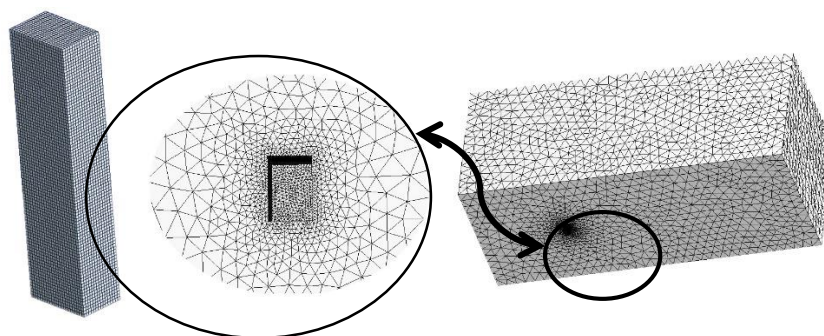


شکل ۵: مقایسه تاریخچه زمانی پاسخ عرضی ساختمان CAARC با مدل آوروچ و براون و پژوهش حاضر

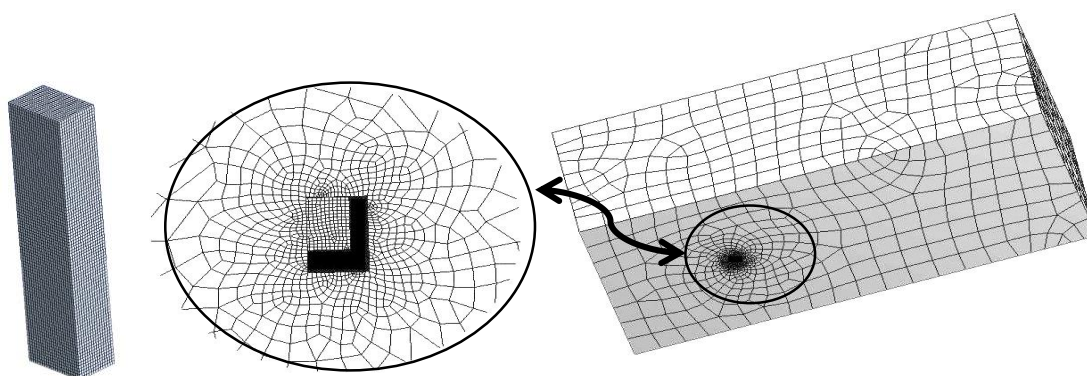
۳-۱- بررسی استقلال نتایج از شبکه‌بندی

۳-۱-۱- شبکه‌بندی با المان‌های Hex Dominate و Tetrahedrons

در این مطالعه به منظور مقایسه نتایج یک مدل با شبکه‌بندی المان Tetrahedron و یک مدل با شبکه‌بندی المان Hex Dominate جهت شبکه‌بندی سازه و سیال با ابعاد متفاوت استفاده شده است. نمونه‌ای از شبکه‌بندی با المان Tetrahedrons در شکل (۶) و نمونه‌ای از شبکه‌بندی با المان Hex Dominate در شکل (۷) آورده شده‌اند. شبکه‌بندی با المان Hex Dominate یک شبکه‌بندی غیر ساختاری ایجاد نموده و برای کاربردهای CFD که نیاز به تورم (INFLATION) ندارند مفید می‌باشد [19].

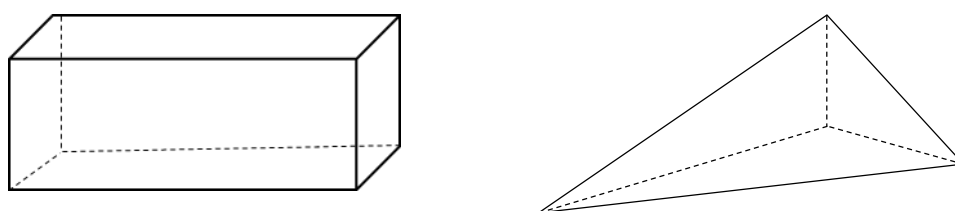


شکل (۶): شبکه‌بندی تونل باد در محیط Fluent و شبکه‌بندی ساختمان در محیط سازه با المان Tetrahedrons [19]



شکل (۷): شبکه‌بندی تونل باد در محیط Fluent و شبکه‌بندی ساختمان در محیط سازه با المان Hex

المان Hex Dominate دارای ۸ راس و ۱۲ لبه است که با ۶ وجه مربعی ایجاد می‌شود. شبکه با المان‌های Tetrahedron شبکه‌بندی با ۴ راس و ۶ لبه می‌باشد که با ۴ وجه هرمی ایجاد می‌شود و علیرغم اینکه عمل اصلاح شبکه‌بندی را بعد از جابجایی به خوبی انجام می‌دهد ولی برای تحلیل به مدت زمان بیشتری نیاز داشته و خطای زیادی ایجاد می‌کند [19]. شبکه‌بندی با المان‌های Hex Dominate به صورت مکعبی بوده ضمن اینکه تعداد المان‌ها در این مورد کاهش می‌یابد زمان تحلیل کامپیوتر نیز کم می‌گردد (شکل ۸).



شکل (۸): شکل المان‌های Hex Dominat و Tetrahedrons [19]

در مقاله حاضر از شبکه‌بندی Hex Dominat و طبق مدل Braun و Awruch جهت تحلیل مسئله استفاده شده است [16]. حال بعد از انتخاب نوع شبکه‌بندی مهم است که اندازه مناسب شبکه‌بندی هم در محیط سازه و هم در محیط سیال به دست آورده شوند. برای این کار از اندازه‌های متفاوت المان‌های فوق استفاده و خطاهای آن‌ها در جداول (۴) و (۵) آورده شده‌اند.

جدول ۴-مقایسه نتایج با شبکه‌بندی‌های مختلف آزمایش شده در این تحقیق [19]

نام مدل	نوع شبکه	اندازه شبکه‌بندی (FSI متر)	اندازه شبکه‌بندی سازه (متر)	تعداد گره	نوع اندازه شبکه‌بندی توئل باد	واریانس پاسخ در جهت X	واریانس پاسخ در جهت Y
BRAUN&AWRUCH	HEX DOMINAT	-	-	383613	-	0/71	0/065
F10S10-4311C	HEX DOMINAT	10	10	4311	COARSE	0/32	0/05
F5S5-20547	HEX DOMINAT	5	5	20547	COARSE	1/0065	0/35
F4S5-27265M	HEX DOMINAT	4	5	27265	MEDIUM	1/0723	0/01193
F3S5-31763C	HEX DOMINAT	3	5	31763	COARSE	0/7821	0/17
F4S5-67139fine	HEX DOMINAT	4	5	67139	FINE	2/015	0/02038
F2S5-103934C	HEX DOMINAT	2	5	103934	COARSE	0/73	0/09
F2S2-107290C	HEX DOMINAT	2	2	107290	COARSE	0/74	0/06
F1.5S3-232133	HEX DOMINAT	1/5	3	232133	COARSE	0/392	0/039
TETRAHEDRONS	TETRAHEDRONS	2	2	50610	COARSE	0/577	0/4

جدول (۵)-درصد خطای پاسخ سازه نسبت به مدل BRAUN&AWRUCH در جهت طولی و عرضی

نام مدل	نوع شبکه‌بندی	درصد خطا در جهت طولی	نام مدل	نوع شبکه‌بندی	درصد خطا در جهت عرضی
BRAUN&AWRUCH	HEX DOMINAT	0	CAARC	BRAUN&AWRUCH	0
F2S5-103934C	HEX DOMINAT	2/8	F2S2-107290C	HEX DOMINAT	7/6
F2S2-107290C	HEX DOMINAT	4/2	F10S10-4311C	HEX DOMINAT	23/07
F3S5-31763C	HEX DOMINAT	10/15	F2S5-103934C	HEX DOMINAT	38/46
TETRAHEDRONS	TETRAHEDRONS	18/73	F1.5S3-232133	HEX DOMINAT	40
F5S5-20547	HEX DOMINAT	41/76	F4S5-67139fine	HEX DOMINAT	68/64
F1.5S3-232133	HEX DOMINAT	44/78	F4S5-27265M	HEX DOMINAT	81/64
F4S5-27265M	HEX DOMINAT	51/02	F3S5-31763C	HEX DOMINAT	161/53
F10S10-4311C	HEX DOMINAT	54/93	F5S5-20547	HEX DOMINAT	438/46
F4S5-67139fine	HEX DOMINAT	183/8	TETRAHEDRONS	TETRAHEDRONS	515/38

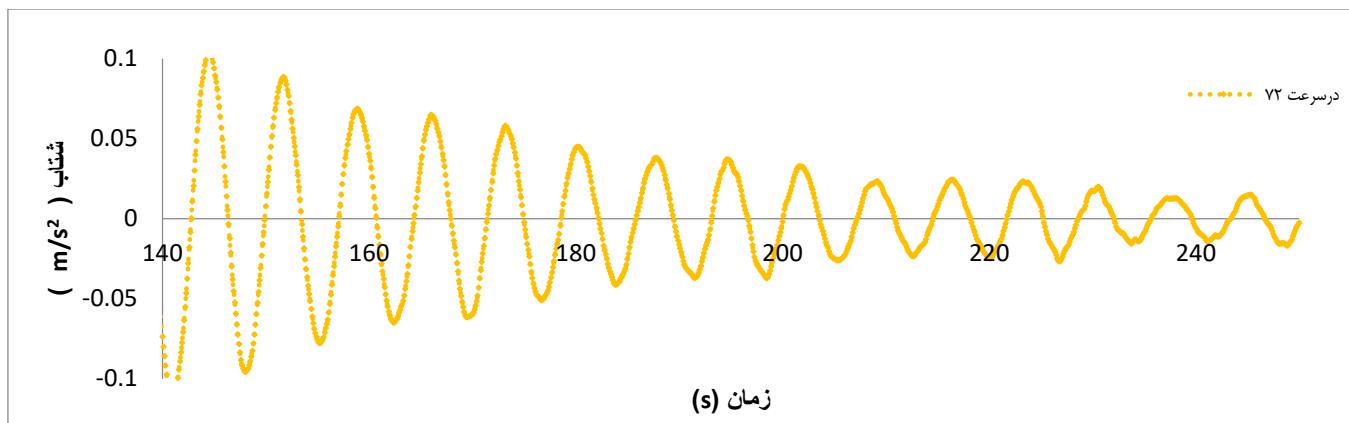
ابعاد المان‌های سازه را در محیط Transient Structure و شبکه‌بندی محیط سیال را در فضای Fluent با در نظر گرفتن شبکه‌بندی اطراف سازه با ابعاد مختلف در کنار ساختمان با المان‌های با ابعاد ریزتر و در کنارها با ابعاد بزرگ‌تر و مطابق اشکال (۶) و (۷) انتخاب شده‌اند. در جداول (۴) و (۵) در عبارت $FpSq-n$ ، F نشانگر محیط Fluent و p نمایانگر اندازه ابعاد المان شبکه اطراف سازه در محیط سیال، S نمایانگر محیط Structure و q نمایانگر ابعاد شبکه‌بندی سازه در محیط سازه‌ای و n بعد از خط تیره نیز نمایانگر تعداد گره‌های مدل تحلیل شده هستند. کلمه C بعد از عبارت بالا به معنی این است که شبکه‌بندی محیط اطراف سازه در تونل باد به صورت اندازه بزرگ پیش‌فرض نرم‌افزار در نظر گرفته شده و به همین ترتیب M به معنای متوسط پیش‌فرض نرم‌افزار که نسبت به حالت قبلی ریزتر است و در نهایت FINE نیز به معنی شبکه‌بندی ریز پیش‌فرض نرم‌افزار در فضای اطراف سازه در تونل باد می‌باشد همان طوری که از جدول (۴) استنباط می‌شود مدل‌های با شبکه‌بندی 2×2 متر در اطراف سازه در تونل باد خطای کمتری دارند. بزرگ کردن ابعاد شبکه‌بندی در محیط سازه بر روی زمان تحلیل تأثیر دارد. برای مثال، مدل F2S5-103934C علاوه بر آنکه پاسخ نزدیک‌تری نسبت به مدل Braun و Awruch در جهت طولی می‌دهد و زمان تحلیل کمتری نسبت به مدل F2S2-107290C لازم دارد ولی مدل F2S2-107290 با کوچک‌تر کردن شبکه‌بندی در محیط سازه پاسخ نزدیک‌تری در جهت عرضی به دست می‌دهد (جدول (۴)). لذا مدل F2S5-103934C در جهت عرضی ترجیح داده می‌شود از آنجاکه اکثر خرابی‌های سازه‌ای ساختمان‌های بلند در برابر باد بر اثر پاسخ‌های عرضی سازه رخ می‌دهد. لذا بهتر است که در تحلیل ساختمان‌های بلند برای برآورد پاسخ عرضی آن‌ها در برابر باد از این مدل استفاده شود. میزان خطاها در جهت طولی و عرضی در جدول (۵) آورده شده‌اند.

۴- بررسی و تفسیر نتایج

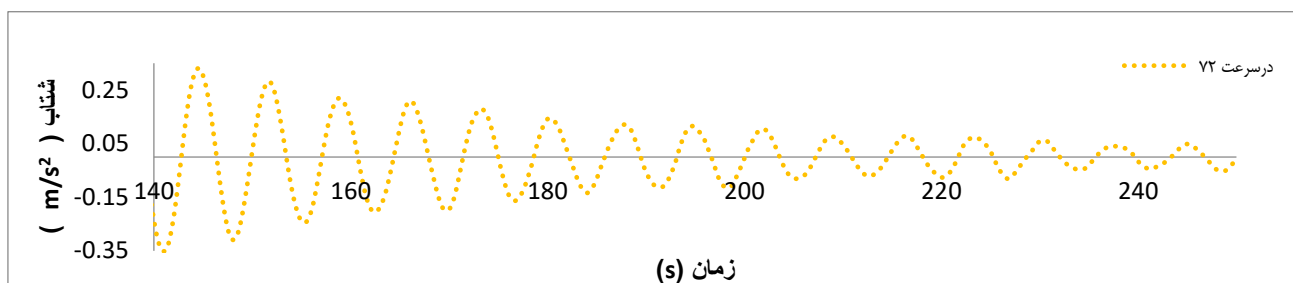
در پژوهش حاضر، ساختمان بلند بیضی شکل در حالت قطر بزرگ عمود بر باد قرار داده شده است. نتایج حاصل از تحلیل نرم‌افزار ANSYS به صورت تاریخچه زمانی شتاب طولی و عرضی در سه ارتفاع مختلف ساختمان بلند بیضی شکل و برای سرعت میانگین نهایی باد یعنی ۷۲ متر بر ثانیه در جهت طولی و چهار سرعت میانگین متفاوت در جهت عرضی ارائه و سپس انحراف معیار شتاب‌ها استخراج و در منحنی‌های استاندارد آیین‌نامه جاگذاری و تفسیر شده‌اند.

۴-۱- تاریخچه زمانی شتاب طولی ساختمان با پلان بیضی

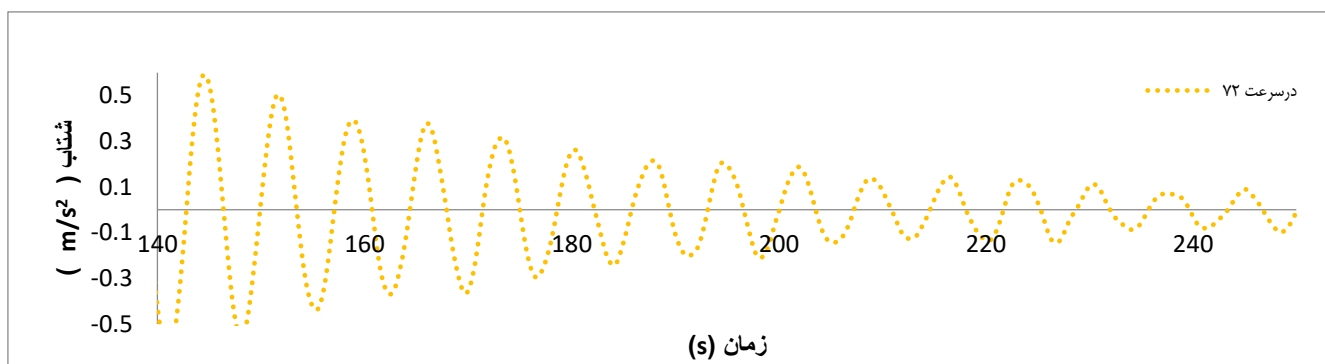
تاریخچه زمانی شتاب طولی ساختمان بلند با پلان بیضی شکل برای سرعت ۷۲ متر بر ثانیه و در ارتفاعات مختلف از ساختمان در اشکال ۹ الی ۱۱ ارائه شده است. تاریخچه زمانی شتاب طولی فوق نشان می‌دهد که ابتدا شتاب ساختمان بیشتر و بعد از مدتی به حالت پایدار خود نزدیک می‌شود. این روند در مدل‌های Shenghong Huang و همکاران [18] و Braun & Awruch [16] هم دیده می‌شود. لازم به ذکر است که از آنجا که ارتعاش ساختمان‌های بلند یک فرایند تصادفی ارگودیک است لذا ممکن است که فرآیند شکل حاضر چندین بار تکرار شود. به لحاظ صرف وقت در تحلیل عددی توسط کامپیوتر، بیشتر محققان به همین قدر تحلیل از لحاظ زمانی بسنده می‌کنند.



شکل ۹: تاریخچه زمانی پاسخ شتاب طولی ساختمان با پلان بیضی در سرعت ۷۲ متر بر ثانیه در ارتفاع ۶۰ متر از پای ساختمان

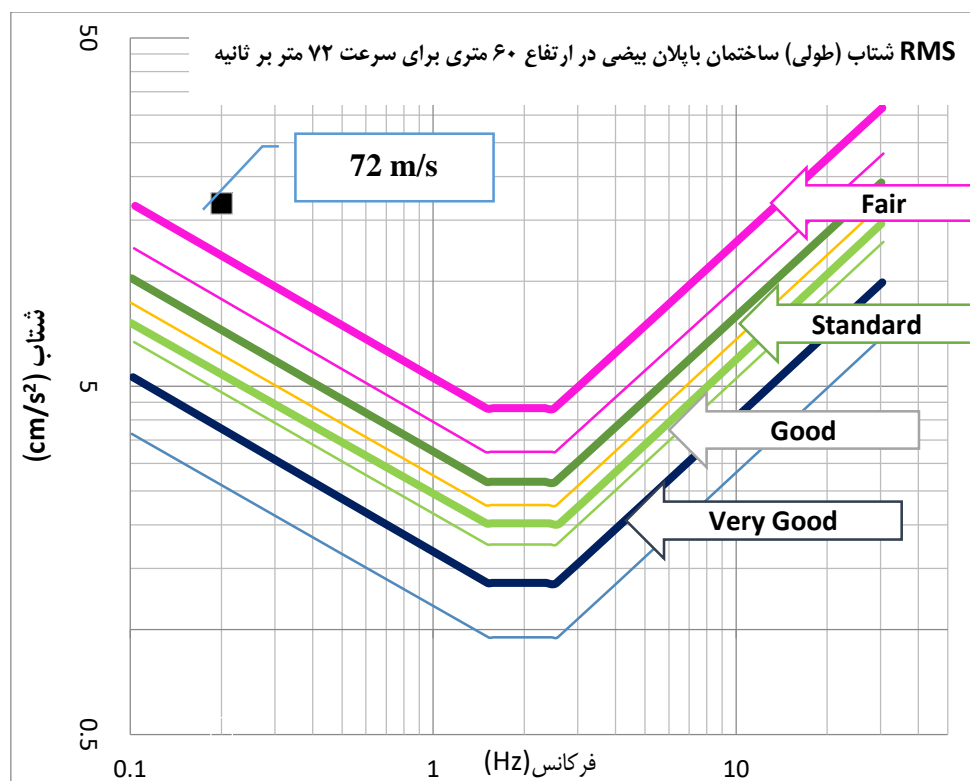


شکل ۱۰: تاریخچه زمانی پاسخ شتاب طولی ساختمان با پلان بیضی در سرعت ۷۲ متر بر ثانیه در ارتفاع ۱۲۰ متر از پای ساختمان



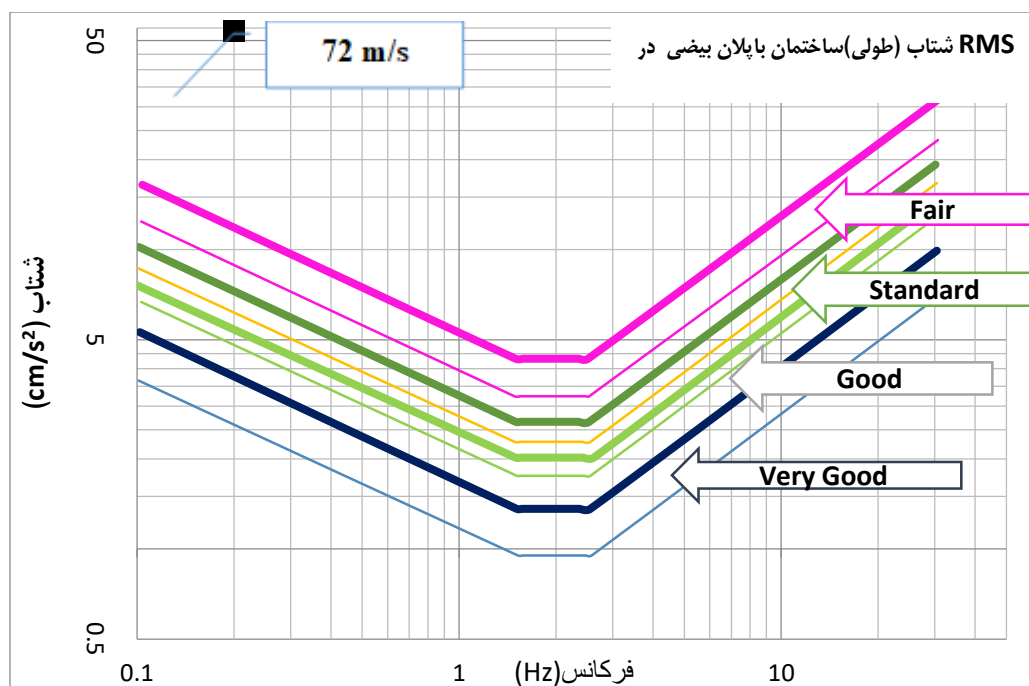
شکل ۱۱: تاریخچه زمانی پاسخ شتاب طولی ساختمان با پلان بیضی در سرعت ۷۲ متر بر ثانیه در ارتفاع ۱۸۰ متر از پای ساختمان

بعد از آن که تاریخچه زمانی شتاب حرکت ساختمان‌ها به دست آمد، مقدار انحراف معیار شتاب‌ها در ارتفاعات مختلف و سرعت‌های میانگین مختلف باد استخراج شده و در منحنی‌های معیار راحتی ساکنان (که توسط آیین‌نامه‌های مربوطه مشخص می‌گردند) آورده می‌شوند. مقایسه نتایج تحلیل حاضر و مقادیر آیین‌نامه AIJ- (GEHBV, 2004) (رهنمودهایی برای ارزیابی قابلیت سکونت ساختمان‌ها در اثر ارتعاش [۱۷]) برای سه ارتفاع مختلف ساختمان و برای سرعت ۷۲ متر بر ثانیه در اشکال ۱۲ الی ۱۴ آورده شده اند



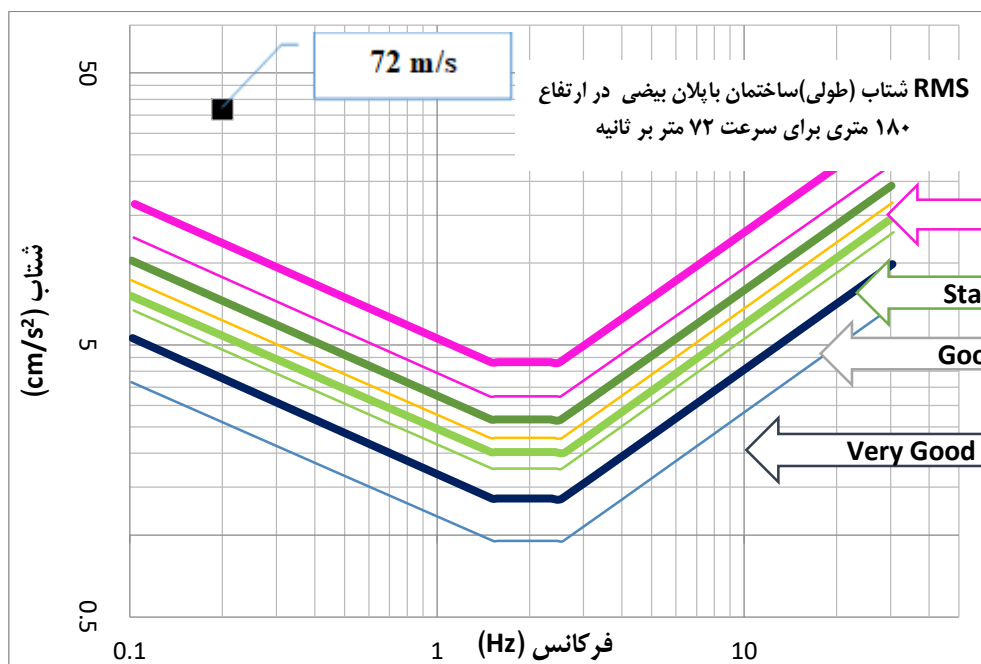
شکل ۱۲: مقایسه نتایج تحلیل حاضر و مقادیر آیین نامه AIJ-GEHBV,2004 برای انحراف معیار شتاب طولی و برای ارتفاع ۶۰ متری ساختمان بلند با پلان بیضی شکل برای سرعت ۷۲ متر بر ثانیه

شکل ۱۲ نشان می‌دهد که در ارتفاع ۶۰ متری از زمین عملکرد ساختمان بلند با پلان بیضی شکل در سرعت میانگین باد ۷۲ متر بر ثانیه در بالای ساختمان راحتی ساکنان را به خطر می‌اندازد و این بدان سبب است که انحراف معیار شتاب در محدوده بالاتر از سطح استاندارد آیین نامه قرار می‌گیرند.



شکل ۱۳: مقایسه نتایج تحلیل حاضر و مقادیر آیین نامه AIJ-GEHBV,2004 برای انحراف معیار شتاب طولی و برای ارتفاع ۱۲۰ متری ساختمان بلند با پلان بیضی شکل و برای سرعت ۷۲ متر بر ثانیه

شکل ۱۳ نشان می‌دهد که در ارتفاع ۱۲۰ متری از زمین عملکرد ساختمان بلند با پلان بیضی شکل جهت راحتی ساکنان در ۷۲ متر بر ثانیه به خاطر سرعت میانگین باد بالا ارضا نشده و در محدوده بالاتر از سطح استاندارد آیین نامه قرار گرفته و راحتی ساکنان را به خطر می‌اندازد.

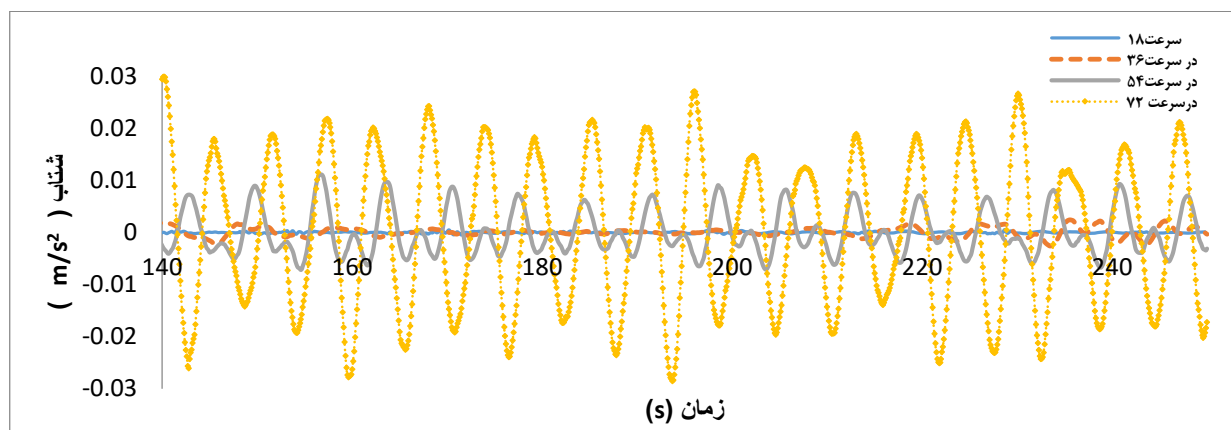


شکل ۱۴: مقایسه نتایج تحلیل حاضر و مقادیر آیین نامه AIJ-GEHBV,2004 برای انحراف معیار شتاب طولی و برای ارتفاع ۱۸۰ متری ساختمان بلند با پلان بیضی شکل و برای سرعت ۷۲ متر بر ثانیه

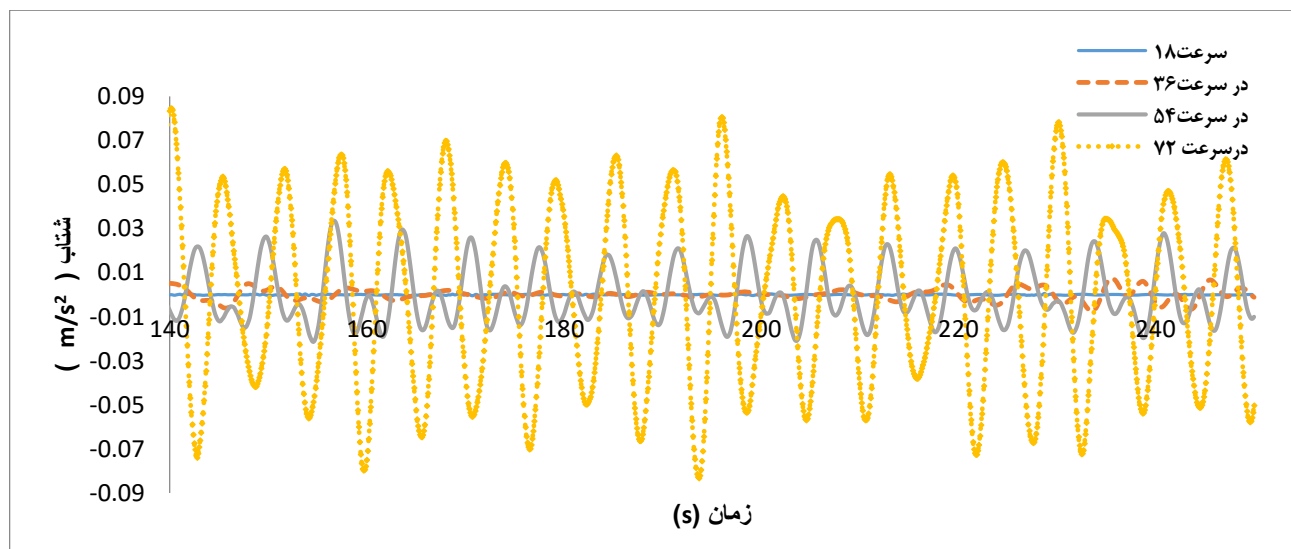
به تجربه ثابت شده است که از ارتفاع دوسوم به بالا، اکثر ساختمان‌های بلند و آن هم به خاطر شتاب زیاد حرکت جانبی ساختمان‌ها خالی از سکنه می‌باشند. شکل ۱۴ نشان می‌دهد که برای سرعت فوق عملکرد ساختمان برای راحتی ساکنان مضر است و باید چاره‌ای اندیشه شود. مثلاً باید با ادواتی مانند میراگرها جلو ارتعاش گرفته شود یا فرم آئروپنمیک ساختمان اصلاح شود.

۲-۴- تاریخچه زمانی شتاب عرضی ساختمان با پلان بیضی شکل

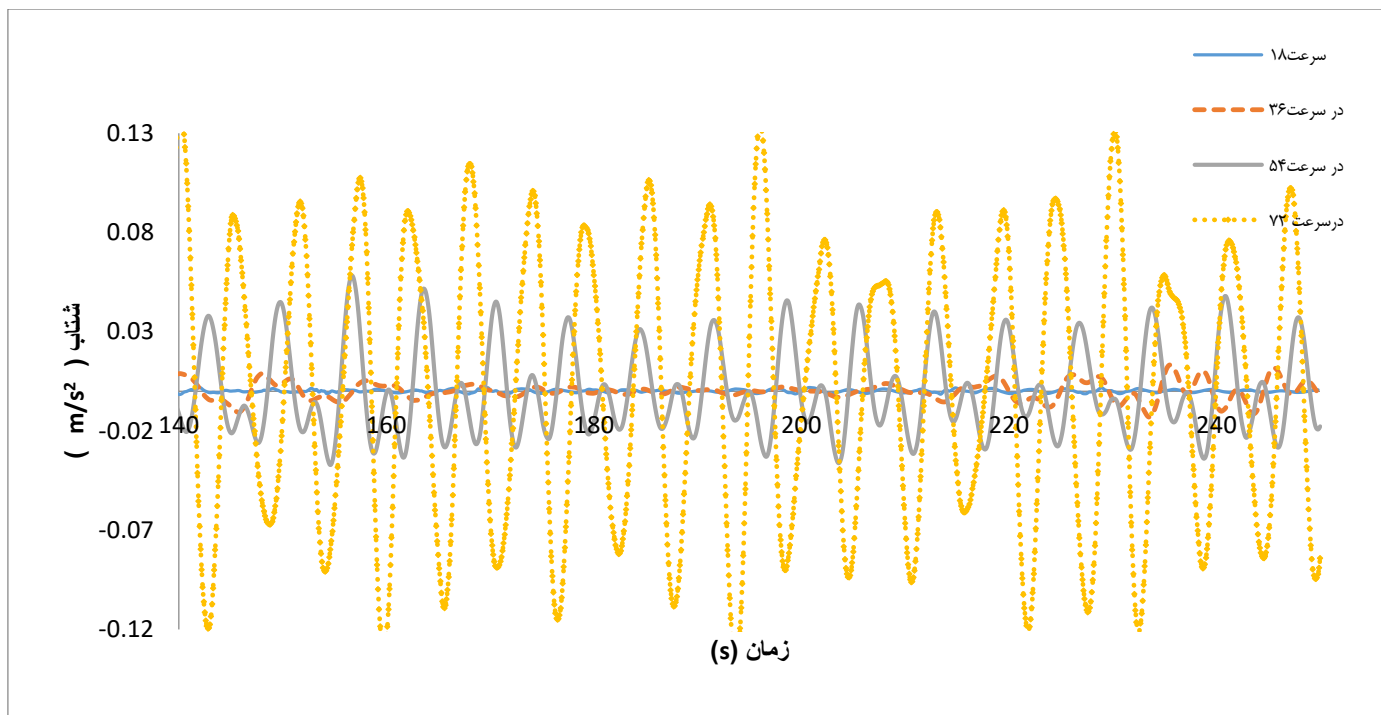
تاریخچه زمانی شتاب عرضی ساختمان بلند با پلان بیضی برای سرعت‌های میانگین باد مختلف و ارتفاعات مختلف ساختمان به صورت اشکال ۱۵ الی ۱۷ می‌باشد.



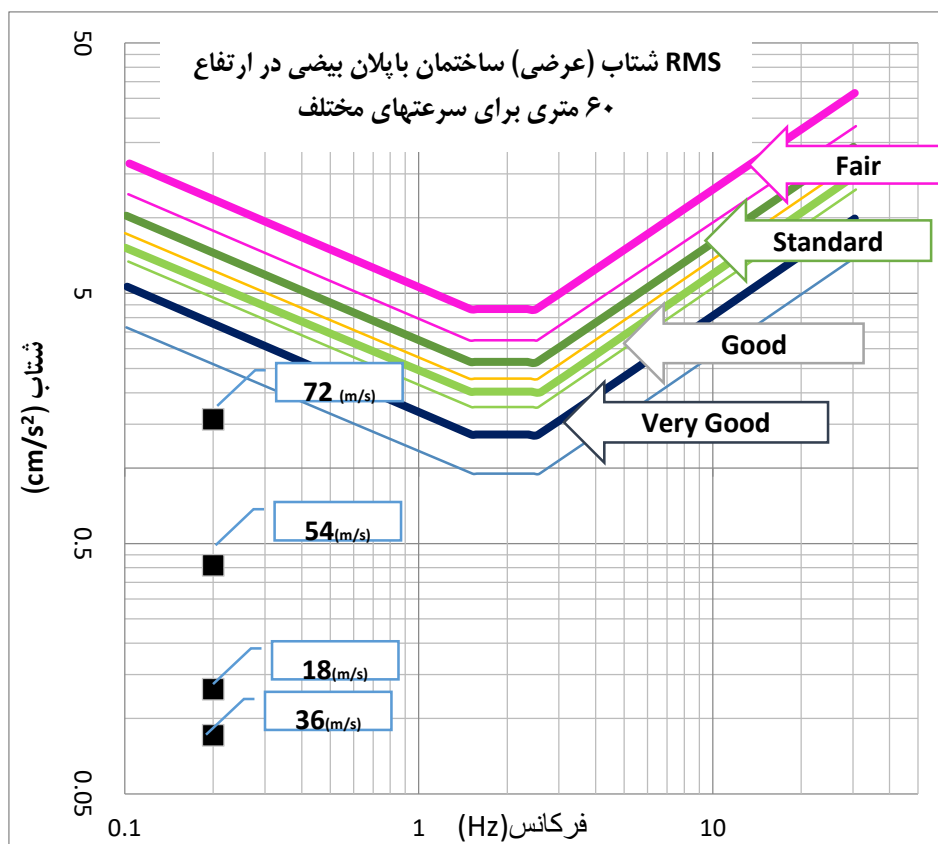
شکل ۱۵: تاریخچه زمانی شتاب عرضی ساختمان با پلان بیضی شکل در سرعت‌های ۱۸،۳۶،۵۴،۷۲ متر بر ثانیه در ارتفاع ۶۰ متر از پای ساختمان



شکل ۱۶: تاریخچه زمانی شتاب عرضی ساختمان با پلان بیضی شکل در سرعت‌های ۱۸،۳۶،۵۴،۷۲ متر بر ثانیه در ارتفاع ۱۲۰ متر از پای ساختمان

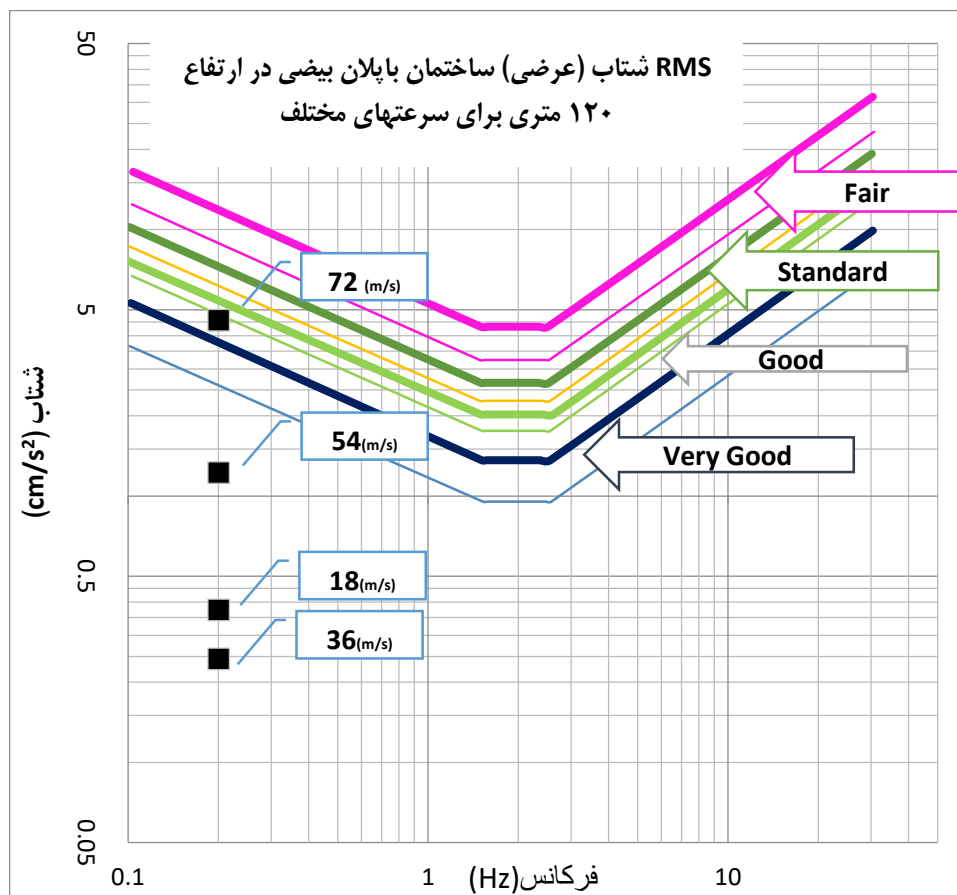


شکل ۱۷: تاریخچه زمانی شتاب عرضی ساختمان با پلان بیضی شکل در سرعت‌های ۱۸، ۲۶، ۵۴، ۷۲ متر بر ثانیه در ارتفاع ۱۸۰ متر از پای ساختمان



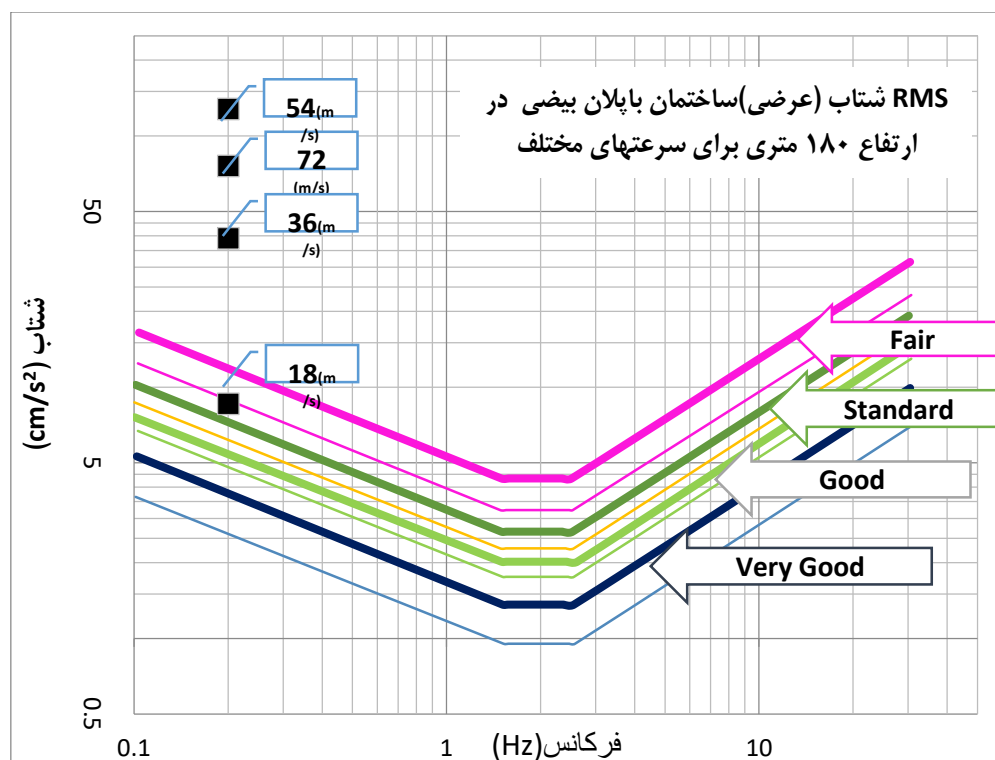
شکل ۱۸: مقایسه نتایج تحلیل حاضر و مقادیر آیین‌نامه AIJ-GEHBV, 2004 برای انحراف معیار شتاب عرضی و برای ارتفاع ۶۰ متری ساختمان بلند با پلان بیضی شکل و برای سرعت‌های مختلف

شکل ۱۸ نشان می‌دهند که در ارتفاع ۶۰ متری و در جهت عرضی برای کلیه سرعت‌های میانگین باد، عملکرد ساختمان راحتی ساکنان را به خطر نمی‌اندازد و این به خاطر آن است که انحراف معیار شتاب در محدوده پایین سطح استاندارد آیین‌نامه قرار می‌گیرد.



شکل ۱۹: مقایسه نتایج تحلیل حاضر و مقادیر آیین‌نامه AIJ-GEHBV,2004 برای انحراف معیار شتاب عرضی و برای ارتفاع ۱۲۰ متری ساختمان بلند با پلان بیضی شکل و برای سرعت‌های مختلف

شکل ۱۹ نشان می‌دهند که در ارتفاع ۱۲۰ متری و در جهت عرضی برای کلیه سرعت‌های میانگین باد، عملکرد ساختمان مسئله‌ای برای ساکنان ایجاد نمی‌کند زیرا انحراف معیار شتاب در محدوده پایین سطح استاندارد آیین‌نامه قرار می‌گیرد.



شکل ۲۰: مقایسه مقادیر آیین‌نامه AII-GEHBV, 2004 و تحلیل حاضر برای انحراف معیار شتاب عرضی و برای ارتفاع ۱۸۰ متری ساختمان بلند با پلان بیضی شکل و برای سرعت‌های مختلف

شکل ۲۰ نشان می‌دهند که در جهت عرضی برای همه سرعت‌های میانگین باد عملکرد راحتی ساختمان را مختل می‌شود و باید به روش‌های مختلف پاسخ ساختمان بهبود یابد.

بطور خلاصه تأثیر عوامل مختلف بر عملکرد ساختمان بلند بیضی شکل در پلان در برابر باد به صورت جداول ۶ و ۷ آورده شده است.

جدول ۶ عملکرد ساختمان مورد مطالعه در جهت طولی (در امتداد باد)

پلان ساختمان	ارتفاع نقطه مورد نظر از ساختمان (متر)	سرعت میانگین باد در تراز بام ساختمان ۷۲ (متر بر ثانیه)
بیضی شکل	۶۰	نامناسب
	۱۲۰	نامناسب
	۱۸۰	نامناسب

جدول ۷ عملکرد ساختمان مورد مطالعه در جهت عرضی (امتداد عمود بر باد)

سرعت میانگین باد در تراز بام ساختمان (متر بر ثانیه)				ارتفاع مورد نظر ساختمان (متر)	پلان ساختمان
۷۲	۵۴	۳۶	۱۸		
خیلی خوب	خیلی خوب	خیلی خوب	خیلی خوب	۶۰	بیضی شکل
خوب	خیلی خوب	خیلی خوب	خیلی خوب	۱۲۰	
نامناسب	نامناسب	نامناسب	استاندارد	۱۸۰	

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش ساختمانی بلند با ارتفاع ۱۸۰ متر و با پلان بیضی بروش دینامیک سیالات محاسباتی سه بعدی تحلیل و خلاصه نتایج حاصل از تحلیل‌های ساختمان آورده شده اند.

از تحلیل ساختمان فوق‌الذکر می‌توان یافت که پاسخ ساختمان بلند با پلان بیضی شکل با ابعاد مورد مطالعه در این پژوهش در برابر باد تابع سرعت میانگین باد ارتفاع مورد نظر از ساختمان و نوع پاسخ می‌باشد. بنابراین بهتر است در محاسبه ساختمان‌های بلند با پلان بیضی شکل در برابر باد به موارد فوق توجه نمود. مهمترین نتایج این پژوهش به شرح زیر است:

۱- در کل ارتفاع ساختمان از نظر عملکرد طولی ساختمان بلند با پلان بیضی شکل در سرعت میانگین باد ۷۲ متر بر ثانیه در بالای ساختمان ارضا نشده و راحتی ساکنان را به خطر می‌اندازد.

۲- نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهند باد در جهت عرضی (امتداد عمود بر باد) و تا ارتفاع ۱۲۰ متر مسئله‌ای ایجاد نکرده و راحتی ساکنان را به مخاطره نمی‌اندازد.

۳- در جهت عرضی ساختمان بلند با پلان بیضی شکل در ارتفاع ۱۸۰ متری در سه سرعت ۳۶، ۵۴ و ۷۲ متر بر ثانیه به لحاظ عملکرد راحتی ساکنان را به خطر می‌اندازد.

۴- نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که برای سرعت ۷۲ متر بر ثانیه، چه در جهت طولی و چه در جهت عرضی در تراز بام ساختمان بلند بیضی شکل راحتی ساکنان به خطر می‌افتد. لذا باید برای این مشکل یا بوسیله میراگرها و یا اصلاح شکل آئرو دینامیکی ساختمان چاره‌ای اندیشیده شود.

مراجع

- [1] Kwok, K. C. S., Burton, M. D., & Hitchcock, P. A. (2007). Occupant comfort and perception of motion in wind-excited tall buildings. In Proceedings of the 12th International Conference on Wind Engineering (pp. 101–115). Cairns, Australia, 2–6 July, 2007.
- [2] Burton, M. D., Kwok, K. C. S., & Hitchcock, P. A. (2007). Occupant comfort criteria for wind-excited buildings: based on motion duration. In Proceedings of the 12th International Conference on Wind Engineering (pp. 1207–1214). Cairns, Australia, 2–6 July, 2007.
- [3] Hong Kong Code of Practice. (2004a). Code of practice on wind effects in Hong Kong. Hong Kong: Buildings Department.

- [4] Jain, A., Spinivasan, M., & Hart, G. C. (2001). Performance based design extreme wind loads on a tall building. The structural design of tall buildings, 10, 9–26.
- [5] Griffis, L. G. (1993). Serviceability limit states under wind load. AISC Engineering Journal, 30(1), 1–16
- [6] Smith, B. S., & Coull, A. (1991). Tall building structures: Analysis and design. John Wiley & Sons, INC.
- [7] Ciampoli, M., Petrini, F. and Augusti, G., (2011). Performance-based wind engineering: towards a general procedure. Structural Safety, 33(6), pp.367-378. <https://doi.org/10.1016/J.STRUSAFE.2011.07.001>
- [8] Ouyang, Z. and Spence, S.M., (2020). A performance-based wind engineering framework for envelope systems of engineered buildings subject to directional wind and rain hazards. Journal of Structural Engineering, 146(5). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002568](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002568)
- [9] National Standard of the People's Republic of China (2002). Technical Specification for Concrete Structures of Tall Building (JGJ 3-2002). Beijing, China: New World Press.
- [10] Isyumov, N. (1994). Criteria for acceptable wind-induced motions. In Proceedings of the Structural Congress (pp. 642–647). ASCE, Atlanta, USA, pp24–28.
- [11] Melbourne, W. H., & Palmer, T. R. (1992). Accelerations and comfort criteria for buildings undergoing complex motions. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 41–44, pp105–116. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(92\)90398-T](https://doi.org/10.1016/0167-6105(92)90398-T)
- [12] Chock, G., Boggs, D., & Peterka, J. (1998). A wind and hurricane design framework for multi-hazard performance-based engineering of high-rise buildings. Structural Engineering, World Wide, T139-3.
- [13] Mingfeng Huan (2017), High-Rise Buildings Under Multi-Hazard Environment, springer, china.
- [14] Shirzadeh Germi, M., Eimani kalehsar, H. (2021). Numerical Investigation of Interference Effects of Two Rectangular Tall Buildings on Aerodynamic Response, *Journal of Structural and Construction Engineering*-. doi: 10.22065/jsce.2021.261009.2305
- [15] Germi, M.S. and Kalehsar, H.E., (2021), April. Numerical investigation of interference effects on the critical wind velocity of tall buildings. In Structures (Vol. 30, pp. 239-252). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.01.013>
- [16] AL Braun & AM Awruch (2009), Aerodynamic and aeroelastic analyses on the CAARC standard tall building model using numerical simulation, vol.87.issue, 9-10, pp 564-581. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2009.02.002>
- [17] Architectural Institute of Japan Recommendations. (2004). Guidelines for the evaluation of abitability to building vibration, AIJ-GEH-2004. Japan: Tokyo.
- [18] Shenghong Huang, Rong Li & Q.S.Li.(2012). Numerical Simulation on Fluid-structure Interaction of Wind around Supper-tall Building at High Reynolds Number Conditions, (*ACEM' 12*), pp 3875-3891.
- [19] ایمانی کله سر، هوشیار (۱۳۹۹). تخمین پاسخ ساختمانهای بلند براساس عملکرد در برابر باد، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
- [20] ANSYS fluent 13.0 Theory Guide, ANSYS Inc., Canonsburg, PA, 2010.