

## Comparison of Exploitation Criteria and Acceleration of Long Diagrid Steel Structures with Environmental Frame System Based on Dynamic Wind Analysis

Mehdi Hooshmand

PhD student in Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Khorasgan Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

Hassan Haji Kazemi\*

Professor, Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Seyed Alireza Zareei

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Khorasgan Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

hkazemi@um.ac.ir

DOI : 10.30495/CIVIL.2023.707070

### Keywords:

Diagrid system,  
Environmental  
frame system,  
near-field  
earthquake,  
tall building,  
Comfort and  
acceleration  
standards

### Abstract

Considering the widespread use of diagrid systems in tall buildings, it is necessary to investigate the behavior of this structural system against the wind and control comfort criteria based on acceleration. According to different regulations, it is evident that there is not much guidance for the design of this structural system and its requirements have not yet been included in the design regulations. Therefore, one of the most important goals of the current research is to investigate and use the Diagrid structural system as one of the modern structural systems in high-rise buildings. Another goal of this research is to compare the performance of the diagrid system with the environmental pipe system. Accordingly, the effect of various parameters including the acceleration of floors and shear of the base under dynamic wind load has been evaluated. It is expected that the performance of the diagonal network will be evaluated with a more detailed understanding of the diagonal network in tall structures and the evaluation of the operation and comfort criteria based on the acceleration against the wind load using dynamic time history analysis applying Cholesky, ergodic and AP methods. The results have been compared with the formulas of the ASCE7 regulation and the AII-GBV-2004 and ISO 10137:2007 comfort criteria and the National Building Code of Canada (NBCC). These investigations indicate that the acceleration of the diagrid system floors based on ASCE7 wind dynamic response prediction equations, has exceeded the permissible limit of ASCE 7 regulation by 20 milli-g (20Gal). This is due to the high estimation of ASCE 7 equations compared to the results of wind time history analysis. In such a way that in the 50-, 70-, and 100-story buildings, the maximum accelerations of the roof obtained from the ASCE 7 equation are 1.83, 2.07, and 1.87 times the results of the dynamic analysis of wind time history, respectively.

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

(این نشریه تحت قانون بین المللی کپی رایت Creative Commons: BY-NC می باشد).

# مقایسه معیارهای بهره‌برداری و شتاب سازه‌های بلند فولادی دیاگرید با سیستم قاب محیطی بر اساس تحلیل دینامیکی باد

مهدی هوشمند

دانشجوی دکتری مهندسی سازه، گروه مهندسی عمران، واحد خوراسگان، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

حسن حاجی کاظمی\*

استاد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

سیدعلیرضا زارعی

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد خوراسگان، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

hkazemi@um.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۲ مرداد ۱۴۰۲

تاریخ دریافت: ۱۵ فروردین ۱۴۰۲

## چکیده

با توجه به استفاده گسترده از سیستم‌های دیاگرید در ساختمان‌های بلند تحقیق درباره‌ی رفتار این سیستم سازه‌ای در برابر باد و کنترل معیار آسایش بر پایه شتاب امری ضروری به نظر می‌رسد. هدف این پژوهش مقایسه معیار آسایش بر پایه شتاب در سیستم دیاگرید با سیستم لوله‌ای محیطی می‌باشد. بدین منظور تأثیر پارامترهای گوناگون از جمله شتاب طبقات و برش پایه تحت بار دینامیکی باد ارزیابی شده است. انتظار می‌رود با شناخت دقیق‌تر شبکه قطری در سازه‌های بلند و بررسی معیارهای بهره‌برداری و آسایش بر مبنای شتاب در برابر بار باد با استفاده از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی به سه روش چولسکی، ارگودیک و AP، عملکرد شبکه قطری ارزیابی گردد. بررسی‌ها نشان می‌دهد شتاب طبقات سیستم دیاگرید بر اساس معادلات پیش‌بینی پاسخ دینامیکی باد ASCE7، از حد مجاز آیین‌نامه ASCE 7 مقدار ۲۰milli-g فراتر رفته است. این مطلب به علت تخمین دست بالای معادلات ASCE 7 نسبت به نتایج تحلیل‌های تاریخچه زمانی باد می‌باشد. به طوری که در سازه ۵۰ طبقه حداکثر شتاب بام به دست آمده از معادله ASCE 7 ۱٫۸۳ برابر نتایج تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی باد می‌باشد و در سازه ۷۰ طبقه ۲٫۰۷ برابر و در سازه ۱۰۰ طبقه ۱٫۸۷ برابر نتایج تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی باد می‌باشد.

کلید واژگان: سیستم دیاگرید، سیستم قاب محیطی، زلزله حوزه نزدیک، سازه بلند، معیارهای آسایش و شتاب

## مقدمه

ساخت سازه‌های بلند به‌عنوان نمادی از پیشرفت و توسعه فناوری و اقتصادی کشورها گسترش یافته است و احداث ساختمان‌های بلند به دلیل افزایش جمعیت و استفاده بهینه از فضاهای شهری امری ضروری می‌باشد. مهندسين نیز همواره به دنبال مصالح، فرم‌ها و نیز فن‌های جدید جهت افزایش ارتفاع ساختمان بوده‌اند. در همین راستا سیستم سازه‌ای دیاگرید راهی نو و مبتکرانه در ایجاد ساختمان‌های با شکل‌های پیچیده گشوده است. این سیستم سازه‌ای که به‌نوعی یک خرپای فضایی است، در طول سال‌های گذشته ثابت کرده است که برای ایجاد گستره‌ی وسیعی از انواع سازه، قاب‌ها و دهانه‌ها مناسب است. از جمله نقاط برجسته‌ی این سیستم در مقایسه با سایر سیستم‌های سازه‌ای، عدم نیاز به هسته‌ی مرکزی قوی هست. دیاگریدها به‌طور کلی توانایی تحمل بارهای وزنی و جانبی وارد به سازه را دارند و می‌توانند بدون نیاز به هسته‌ی مرکزی این بارها را تحمل کنند [۱].

سیستم‌های سازه‌ای دیاگرید به دلیل کارایی سازه‌ای و پتانسیل‌های معماری، در دهه‌های گذشته به‌طور گسترده برای ساختمان‌های بلندمرتبه استفاده شده است. سیستم دیاگرید از لحاظ ظاهری شبیه سیستم مهاربندی است اما عملکردی متفاوت دارند. در سیستم مهاربندی، بار قائم را ستون‌ها تحمل کرده و بار جانبی ناشی از زلزله و باد را مهاربندها تحمل می‌کنند اما سیستم دیاگرید یک شبکه سازه‌ای مایل است که در برابر بارهای عمودی و افقی که ساختمان تحت آن قرار دارد، مقاومت می‌کند. در واقع اعضای قطری هم نقش ستون و هم نقش مهاربند را دارند. چنین سیستمی به فولاد سازه‌ای کمتری نسبت به یک قاب فولادی معمولی نیاز دارد، یک سازه پایدارتر را فراهم می‌کند و با ایجاد سازه‌هایی با معماری قوی، بدون ستون‌های عمودی، در ساختمان‌های بلند جدید به کار گرفته شده است.

سیستم دیاگرید می‌تواند تا ۲۰ درصد باعث کاهش مصرف مصالح نسبت به سیستم‌های قاب خمشی شوند [۲]. این در حالی است که ساخت گره‌های اتصال دیاگرید، خود نیازمند فناوری پیشرفته و صرف هزینه‌ی اضافی است. بنابراین برای کاهش هزینه‌ی ساخت و ساز باید تا حد امکان تعداد گره‌ها کم باشد [۱]. مناسب‌ترین محدوده زاویه اعضای دیاگرید بین ۵۰ تا ۷۰ درجه هست و با افزایش ارتفاع سازه زاویه بهینه نیز افزایش می‌یابد [۳]. برای کاهش جابجایی‌های سازه نیز زوایای بین ۵۰ تا ۷۵ درجه می‌تواند مناسب باشد [۲]. نسبت ارتفاع به عرض سازه در انتخاب زاویه بهینه اعضای دیاگرید نیز مؤثر است. بهتر است با کاهش لاغری

سازه زاویه اعضای دیاگرید کاهش یابد [۳]. افزایش زاویه‌ی اعضای دیاگرید باعث افزایش سختی خمشی و کاهش آن باعث افزایش سختی برشی سازه میگردد [۵].

تاکنون از سیستم دیاگرید بیشتر در طراحی ساختمان‌های بلند در محدوده ۱۰۰-۲۰ طبقه استفاده شده است. در صورتی که تحقیقات اخیر نشان می‌دهد سیستم دیاگرید می‌تواند یک سیستم سازه‌ای کارآمد و اقتصادی برای ساختمان‌های میان مرتبه در محدوده ۱۵-۸ طبقه باشد [۶]. اما یک مانع برای کاربرد گسترده آن‌ها، ۷ مقررات خاص طراحی برای طراحی آن‌ها تحت بارهای شدید است [۷]. با وجود اینکه تحقیقات زیادی پیرامون سیستم دیاگرید شامل زاویه بهینه، عملکرد لرزه‌ای، پارامترهای لرزه‌ای طراحی و ... انجام شده است [۸، ۹، ۱۰].

در سال ۲۰۰۹، مون<sup>۱</sup> در مقاله‌ای با عنوان ساخت و طراحی سازه‌های فولادی قطری، ابتدا به معرفی سازه‌های قطری پرداخته و سپس یک روش طراحی اولیه بر اساس سختی برای تعیین سازه‌های قطری را پیشنهاد داده‌اند [۲].

به‌طور کلی، رویکردهای طراحی سختی و مقاومت هم ضروری و هم اجتناب‌ناپذیر هستند. آن‌ها به‌طور جداگانه برای یک فرآیند طراحی جامع اعضای قطری، کافی نیستند. با در نظر گرفتن متغیرهای طراحی، یعنی زاویه مورب و نسبت شکل‌پذیری خمش به برش، حتی برای یک مطالعه موردی خاص، پیش‌بینی رویکرد غالب از قبل امکان‌پذیر نیست که یعنی آیا تقاضای سختی کلی یا تقاضای مقاومت عضو بر طراحی حاکم است [۱۱، ۱۲].

نیروی محوری عمده‌ترین نیروی داخلی در اعضای قطری است و طرح مقدماتی دیاگریدها بر اساس نیروی محوری یک فرض منطقی است. آیین‌نامه‌های طراحی فعلی نیز هیچ مقدار خاصی برای شکل‌پذیری دیاگرید، اضافه مقاومت و فاکتورهای اصلاح پاسخ ارائه نمی‌دهند و استفاده از کوچک‌ترین مقادیر برای این عوامل تا حد زیادی برای دیاگریدها محافظه‌کارانه است [۱۳].

سامات<sup>۲</sup> در پژوهشی با هدف تأثیر سیستم دیاگرید در کاهش جابجایی جانبی یک ساختمان بلند، مقایسه‌ای بین جابجایی جانبی ناشی از باد سیستم دیاگرید با سیستم مهاربندی X انجام داده است. این تحقیق همچنین تأثیر سیستم دیاگرید، مهاربند X و قاب خمشی بر فرکانس طبیعی ساختمان بلند را مورد بررسی قرار داده است. نتایج پژوهش نشان

<sup>2</sup> Samat

<sup>1</sup> Moon



## معیارهای آسایش

در کنار مسائل سازه‌ای یکی از موارد مهمی که بررسی آن با توجه به تجارب موجود از سازه‌های بلند جهان بسیار اهمیت پیدا می‌کند، تأمین شرایط خدمت‌پذیری سازه در برابر ارتعاشات ناشی از نیروی باد یا معیار راحتی و آسایش می‌باشد. با توجه به شکل غیر آیرودینامیک برج هواپند و ارتفاع زیاد آن، قطعاً در هنگام وزش باد ارتعاشاتی در جهت باد و عمود بر آن مشاهده خواهد شد که لازم است این ارتعاشات در حد قابل‌قبولی باشد. از این رو لازم است برای نیروهای جانبی وارد بر سازه چه در جهت وزش و چه در جهت عمود بر آن، تحلیل‌هایی انجام شود و در صورت پیش‌بینی ارتعاشات غیرمجاز تمهیداتی نیز در این زمینه صورت گیرد. شکستن پنجره‌ها و ترک خوردن دیوارها در ساختمان‌های بلندمرتبه شیکاگو و بوستون، ارتعاشات نامطلوب در سکوی دیدبانی تلویزیونی ناتجینگ و مختل شدن سیستم آسانسور برج تلویزیونی بیجینگ در چین از جمله موارد مهم در جهان می‌باشد که با وزش باد کارایی این سازه‌ها به خطر افتاده است؛ بنابراین لزوم بررسی‌های تحلیلی و آزمایشگاهی برای اثرات باد بر هیچ‌کس پوشیده نیست و کنترل کلیه معیارهای مقاومت سازه‌ای و نیز معیارهای خدمت‌پذیری سازه تحت تأثیر نیروی باد لازم و ضروری می‌باشد [۲۳].

در سیستم مقاوم جانبی ساختمان‌های بلند در مناطق لرزه‌خیزی کم و متوسط و وزش باد شدید، بار باد نیروی جانبی حاکم است. به‌طوری‌که مهندس سازه تمایل به کنار گذاشتن ارزیابی در برابر بار لرزه‌ای را دارد. تحقیقات نشان می‌دهد که برآورده کردن معیارهای سرویس‌دهی بار باد در سازه‌های دیاگرید با نسبت لاغری‌های مختلف عملکرد لرزه‌ای خوبی را در پی خواهد داشت [۲۵].

حساسیت فرد به حرکت که در گستره وسیعی متفاوت است، نشانه‌هایی غیر از شتاب (به‌عنوان مثال، سروصدا)، حساسیت فرد به‌فرد، ماهیت فعالیت انسان در ساختمان (دراز کشیدن، نشستن، ایستادن، خواندن، کار بر روی صفحه کامپیوتر، راه رفتن و غیره)، فراوانی وقایع قابل‌توجه، انتظارات ساکنان (از جمله ملاحظات زیست‌محیطی)، مناسب بودن جذر میانگین مربعات شتاب در مقابل مقادیر پیک شتاب (دیگر مقادیر) و اینکه آیا چنین مقادیری باید با نگرانی‌های مختلف انسان (ادراک، ناراحتی فیزیولوژیکی، ترس) مرتبط باشند یا خیر.

با وجود ماهیت پیچیده واکنش ساکنان و پذیرش حرکات ساختمان ناشی از باد، آستانه شتاب پیک بعد از آن به‌عنوان دستورالعمل‌های کلی توصیه

می‌دهد سیستم دیاگرید برای ساختمان‌های ۴۰ و ۶۰ طبقه دارای کمترین جابجایی جانبی است [۱۴].

دیاگریدها از ظرفیت سقوط و سختی جانبی قابل‌توجهی برخوردارند [۱۵]. با این‌وجود، از دست رفتن اعضای غیر سازه‌ای به دلیل شتاب مطلق حداکثر کف زیاد که توسط قاب‌های سخت دیاگرید ایجاد می‌شود، می‌تواند بر ضرر کل پیش‌بینی‌شده تأثیر منفی بگذارد [۱۶].

سازه‌های دیاگرید قبل از رسیدن به نقطه فروپاشی، ظرفیت ذخیره قابل‌توجهی را در برابر فروپاشی نشان می‌دهند و حداکثر شتاب طیفی مطلق، مقدار متوسط 3.6g را تجربه می‌کنند. این شتاب طیفی بزرگ منجر به آسیب قابل‌توجهی به اجزای غیر سازه‌ای آسیب‌پذیر در برابر شتاب بیش‌ازحد می‌شود که باعث افزایش تعداد آسیب‌دیدگی می‌شود [۱۷].

سیستم دیاگرید در مقایسه رفتار لرزه‌ای با سیستم‌های متداول مانند قاب خمشی و قاب مهاربندی‌شده عملکرد بهتری داشته و سخت‌تر از بقیه سیستم‌ها می‌باشد و از طرف دیگر حجم فولاد کمتری در سازه‌های دیاگرید استفاده می‌شود [۱۸]. ونکاتش و همکاران<sup>۳</sup> در پژوهشی پیرامون سیستم دیاگرید تحت تحلیل پوش‌آور بررسی جنبه‌های مختلف سیستم دیاگرید شامل نسبت ابعادی و زوایای مختلف اعضای قطری پرداخت. نتایج تحلیل‌ها نشان داد نسبت ابعادی کمتر مقاومت برشی پایه‌ها و جابجایی سقف را کمتر می‌کند [۱۹].

لیو<sup>۴</sup> در مقاله‌ای تحقیقات موجود در زمینه سیستم سازه‌ای دیاگرید را برای ساختمان‌های بلند بررسی کرده و تأیید می‌کند که این سازه دارای سختی جانبی زیاد و عملکرد لرزه‌ای خوبی است. با توجه به عملکرد مطلوب لوله‌های فولادی پر از بتن، در این مقاله استفاده از ستون‌های لوله‌ای از جنس فولاد ضدزنگ پر شده با بتن به‌عنوان اعضای قطری در سیستم‌های سازه‌ای دیاگرید برای ساختمان‌های بلند توصیه شده است [۲۰].

کیم<sup>۵</sup> در پژوهشی ساختمان دیاگرید ۶۰ طبقه را به‌عنوان یک سازه نمونه تحت تاریخچه زمانی بارهای مصنوعی باد و رکوردهای ثبت‌شده زلزله برای ارزیابی واکنش‌های ناشی از باد و لرزه‌ای ایجاد کرد. شبیه‌سازی عددی نشان داد که میراگر جرمی هوشمند برای کاهش پاسخ‌های ناشی از باد و لرزه‌ای ساختمان بلند دیاگرید، عملکرد خوبی را ارائه می‌دهد [۲۱].

عملکرد سازه‌های دیاگرید نه تنها از نظر کاهش فولاد سازه‌ای، بلکه از نظر ایمنی، قابلیت سرویس‌دهی و استحکام سازه‌ای نیز مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج خوبی از خود نشان داده است [۲۰، ۲۲].

<sup>5</sup> Kim

<sup>3</sup> Venkatesh et al.

<sup>4</sup> Liu



مناسب برای ساختمان‌های اداری و حد پایینی برای ساختمان‌های مسکونی مناسب است [۲۸].

استاندارد استرالیا و نیوزیلند معیار پذیرش ساده‌ای 10 mlili-g را برای حرکت ناشی از باد بدون اشاره خاص به سرعت باد یا دوره بازگشت ارائه می‌دهد [۲۹].

موسسه معماری ژاپن (AIJ) به جای معیار پذیرش، برای ارزیابی حرکت ساختمان نمودارهایی را منتشر کرده است (AIJ-GBV-2004). نمودارهایی که در شکل ۱۱ نشان داده شده‌اند، به عنوان حداکثر آستانه ادراک شتاب در فرمت احتمالاتی ارائه می‌شوند، بنابراین تصمیم‌گیری نهایی بر اساس معیارهای پذیرش در اختیار مالک قرار می‌گیرد. این نمودارها همچنین به فرکانس حرکت به عنوان عاملی در ادراک ارتعاشات سازه توجه دارند. این نمودارها شامل پنج منحنی: H-30، H-10، H-50، H-70 و H-90 می‌باشد که شماره هر کدام از آن‌ها تعداد درصد جمعیتی را نشان می‌دهد که حرکت در سطح نشان داده شده را درک می‌کنند. هر مؤلفه شتاب به طور جداگانه با فرکانس غالب حرکت در جهت مربوطه برای تعیین آستانه ادراک، در نظر گرفته می‌شود [۳۰].

در این پژوهش به ارزیابی تحلیل دینامیکی باد با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی در سازه‌های دیاگرید و قاب محیطی با نسبت منظر بالا با رویکرد تولید تاریخچه زمانی‌های باد از طریق علم فرآیندهای تصادفی و تحلیل‌های آماری با سه روش چولسکی، ارگودیک و AP پرداخته شده است و منحنی شتاب طبقات استخراج گردید. همچنین در ادامه با بازنویسی رابطه پیشنهادی تجربی آیین‌نامه ASCE7 (رابطه ۳۱) علاوه بر محاسبه شتاب حداکثر بام، منحنی شتاب در تمام ارتفاع سازه و سایر طبقات به دست آمده است. نتایج به دست آمده از تحلیل‌های تاریخچه زمانی و رابطه پیشنهادی (رابطه ۳۱) ASCE7 با معیار آسایش آیین‌نامه‌های مختلف و معیارهای آزمایشگاهی و روان‌شناختی [۲۳] توصیه شده مقایسه شده است. در واقع چندین رویکرد جدید در این مقاله وجود دارد که شامل تولید رکوردهای تاریخچه زمانی باد و همچنین ارزیابی معیارهای آسایش و شتاب در سازه‌های دیاگرید و قاب محیطی با نسبت منظر بالا با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی و بررسی ارائه ضریب تندباد پیشنهادی است.

### روش کار

هدف از این پژوهش بررسی و مطالعه رفتار ساختمان‌های دیاگرید و قاب محیطی‌ای محیطی با پلان منظم تحت اثر بار دینامیکی باد بر اساس رکوردهای مصنوعی تولید شده می‌باشد. برای این منظور ۳ مدل سازه دیاگرید با تعداد طبقات ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ با ابعاد پلان و ارتفاع طبقه یکسان

می‌شوند که با آن می‌توان مساعدت و نیاز به کاهش ریسک را ارزیابی کرد:

• 5 milli-g آستانه‌ای است که، اگرچه برای بسیاری از سرنشینان قابل درک است، بعید به نظر می‌رسد که باعث واکنش نامطلوب ساکنان یا زنگ خطر شود، به شرطی که چنین حرکت ساختمانی به طور مکرر یا مداوم برای مدت‌زمان طولانی رخ ندهد.

• 10 mlili-g، یک آستانه آسایش و آرامش است که برای اکثریت قریب به اتفاق ساکنان قابل تشخیص است. در عمل، چنین حرکات ساختمانی که اغلب ناشی از باد و یا برای مدت‌زمان طولانی هستند ممکن است برای بعضی از ساکنان، به ویژه کسانی که مستعد ابتلا به بیماری حرکتی هستند، قابل قبول نباشند.

• ۳۵-۴۰ mlili-g، یک آستانه ترس و ناامنی است که به شدت باعث می‌شود برخی از ساکنان تعادل خود را از دست بدهند. مقدار بالاتر برای ساختمان‌هایی با فرکانس‌های طبیعی کمتر ( $\sim 0.1$  هرتز) بیشتر قابل قبول خواهد بود، در حالی که مقدار پایین‌تر برای ساختمان‌هایی با فرکانس‌های طبیعی بالاتر ( $\sim 0.4$  هرتز) مناسب‌تر است [۲۳].

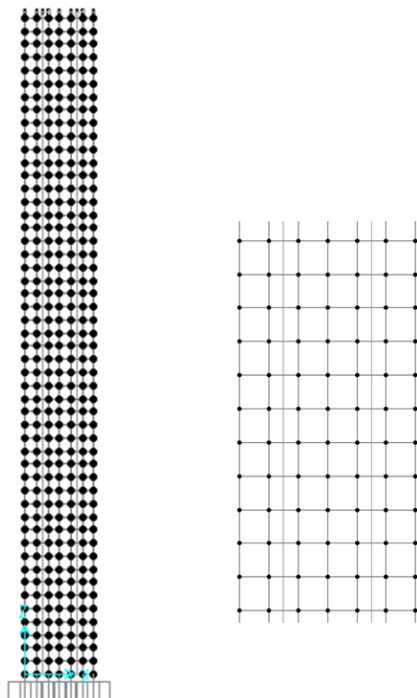
در حال حاضر یک استاندارد بین‌المللی مورد قبول عامه برای معیار آسایش وجود ندارد. در زمان کنونی شتاب به عنوان مهم‌ترین پارامتر نحوه پاسخ افراد به ارتعاش پذیرفته شده است. این پارامتر در کنار فرکانس نوسان می‌تواند معرف سایر پارامترهای تعیین‌کننده معیار آسایش باشد. تعدادی از سازمان‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی معیارهای پذیرشی برای حرکات ساختمان‌ها و سازه‌های بلند ناشی از باد منتشر کرده‌اند. در ادامه بررسی مختصری از استانداردهای مختلف می‌باشد.

آیین‌نامه ASCE7-10 الزام کرده است تا بیشینه شتاب جهت آسایش ساکنان، به 20 mlili-g محدود شود [۲۶].

در استاندارد اصلاح شده ISO در مورد قابلیت خدمات‌دهی (ISO 10137: 2007 (E) - ضمیمه D)، معیارهای شتاب به عنوان حداکثر مقادیر در دوره بازگشت ۱ سال بیان می‌شوند. دو منحنی برای معیارهای مسکونی و تجاری وجود دارند که مقدار اولی  $\frac{3}{2}$  برابر منحنی دومی است [۲۷].

آیین‌نامه ملی ساختمان کانادا (NBCC) (شورای پژوهش ملی کانادا ۱۹۹۵) پیشنهاد کرد شتاب دوره بازگشت ۱۰ ساله در دامنه ۱٪ تا ۳٪ گرانس 10-10-30 mlili-g قابل قبول است که حد بالایی محدوده





شکل ۲ نمای قاب‌های سیستم قاب محیطی

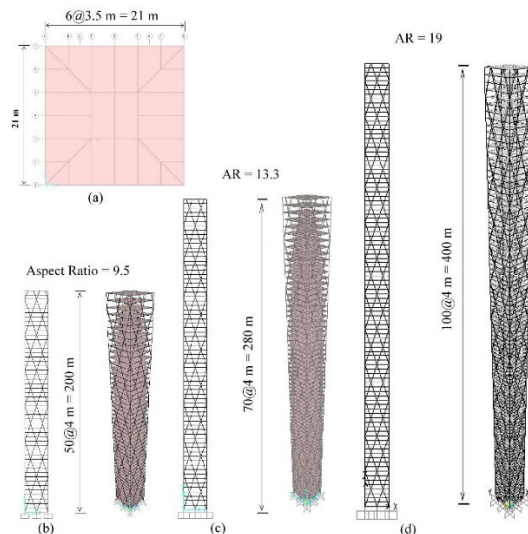
جدول ۱ مشخصات مصالح مصرفی.

مشخصات فولاد A992FY50	
وزن واحد حجم، $W$	$785 \text{ kg/m}^3$
مدول الاستیسته، $E$	$2 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$
ضریب پواسون	۰/۳
تنش تسلیم، $F_y$	$3515 \text{ kg/cm}^2$
تنش گسیختگی نهایی، $F_M$	$4570 \text{ kg/cm}^2$

در طراحی سازه‌های فولادی پارامتر مهمی که در تعیین سایز مقطع مؤثر است، نوع فولاد مصرفی در پروژه می‌باشد. در این پژوهش برای مدل‌سازی ساختمان‌ها از فولاد ASTM A992 استفاده شده است. مشخصات مکانیکی فولاد مصرفی در این پژوهش به شرح جدول ۱ هست.

اعضای سازه‌ای سیستم دیاگراید شامل ستون‌های خارجی، ستون‌های داخلی و اعضای قطری و تیرها می‌شود. برای ستون‌ها از مقاطع باکس استفاده شده است. برای اعضای قطری از مقاطع لوله با قطرهای ضخامت‌های مختلف استفاده شده است. برای تیرها نیز از مقاطع  $W$  آمریکایی استفاده شده است.

بر اساس ASCE7-10 طراحی شد. سپس تحت بار باد به صورت دینامیکی غیرخطی تحلیل گردید. جهت بررسی رفتار سازه‌های بیان شده از قابلیت نرم‌افزار SAP2000 در انجام تحلیل‌های غیرخطی استفاده شده است. پلان کلیه ساختمان‌ها، مربعی به ابعاد ۲۱ در ۲۱ متر مطابق شکل ۱ فرض شده است. ارتفاع طبقات در کلیه مدل‌ها نیز برابر با ۴ متر در نظر گرفته شده است. نسبت وجوه مدل‌ها که به معنی نسبت ارتفاع به عرض ساختمان هست نیز در شکل ۱ نشان داده شده است.

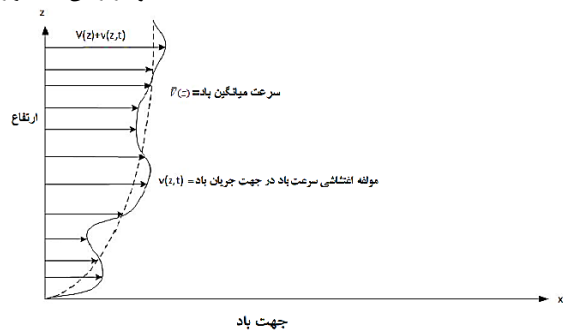


شکل ۱ a) (پلان دوبعدی ساختمان‌های مدل شده (b) نمای جلو و ۳ بعدی ساختمان ۵۰ طبقه (c) نمای جلو و ۳ بعدی ساختمان ۷۰ طبقه (d) نمای جلو و ۳ بعدی ساختمان ۱۰۰ طبقه

مقدار بار مرده طبقات برابر  $400 \text{ kg/m}^2$  فرض شده است. بار زنده طبقات نیز در تمام طبقات مشابه و برابر  $200 \text{ kg/m}^2$  مطابق آیین‌نامه طراحی بر اساس طیف طرح آیین‌نامه بارگذاری آمریکا ASCE7-10 محاسبه می‌گردد. با توجه به آنکه ضریب رفتار این سیستم سازه‌ای در آیین‌نامه بیان نشده است، ضریب رفتار سازه برای طراحی مدل‌ها با توجه به پژوهش‌های انجام شده برابر ۳ فرض می‌گردد [۳۱]. محل احداث پروژه، منطقه‌ای در کالیفرنیا با نوع خاک تیپ  $D$  و مقادیر شتاب طیفی برابر با  $S_1=0.2$  و  $S_5=0$ . وضعیت اعمال بار باد به سازه نوع  $B$  و سرعت باد در تراز نهایی برابر با ۰ مایل بر ساعت (۳۱،۲۹ متر بر ثانیه) فرض شده است.

$$V(z,t) = \bar{V}(z) + v(z,t) \quad (1)$$

$\bar{V}(z)$  و در زمان  $Z$  سرعت باد در تراز  $V(z,t)$  در معادله فوق؛ مؤلفه اغتشاشی سرعت باد در  $v(z,t)$  و  $Z$  سرعت متوسط باد در تراز است.  $t$  و در زمان  $Z$  تراز



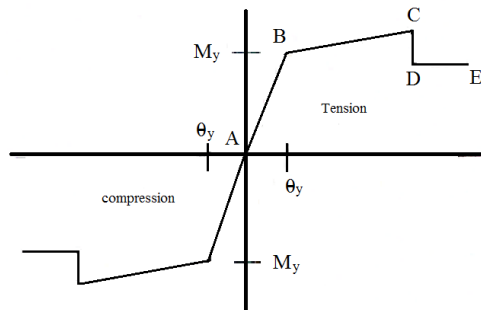
شکل ۴ نحوه تغییرات کلی سرعت باد در ارتفاع.

به دلیل عدم وجود بانک اطلاعاتی برای رکورد سرعت باد و نحوه انتخاب رکورد برای آن در طبقات، در این پژوهش از علم فرآیندهای تصادفی و تحلیل‌های آماری بهره گرفته شده و مؤلفه اغتشاشی سرعت باد به طور تصادفی برای انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی تولید شده است. برای تولید رکوردهای مصنوعی برای مؤلفه اغتشاشی سرعت باد می‌توان از روش‌های حوزه زمانی و نیز حوزه فرکانسی بهره گرفت، در روش‌های حوزه فرکانسی معمولاً از لنگر دوم مؤلفه‌های اغتشاشی سرعت باد مانند تابع خودهمبستگی و یا همبستگی عرضی استفاده می‌شود. به دلیل سادگی و کاهش هزینه محاسباتی معمولاً تحلیل در فضای فرکانسی از تحلیل در فضای زمانی مرسوم‌تر می‌باشد [۲۶].

### روش‌های تولید تابع تاریخچه زمانی مصنوعی برای سرعت باد

مهم‌ترین مؤلفه که باعث ایجاد تغییرات زمانی در تابع تغییرات سرعت در تراز مینا (مطابق آیین‌نامه تراز ۱۰ متری از سطح زمین) می‌شود، مؤلفه اغتشاشی آن است که طبق تعریف در ادبیات فنی، میانگین آن صفر لحاظ شده و به صورت یک تابع تصادفی نقاط آن با روش‌های آماری مختلف قابل تولید است [۳۲، ۳۳، ۳۴]. در این پژوهش سه روش آماری معمول برای تولید توابع تصادفی با میانگین صفر مانند روش چولسکی، روش ارگودیک و روش  $R$  برای تولید سه رکورد مصنوعی متفاوت استفاده شده است. توابع حاصله با میانگین سرعت در تراز مینا جمع شده و بدین ترتیب تاریخچه زمانی باد در تراز مینا با سه رکورد مختلف تولید شده است. لازم به توضیح است که هدف از تولید سه رکورد سرعت، ایجاد شرایطی قابل اعتماد و میانگین‌گیری از نتایج سه رکورد و قضاوت قابل اعتماد بر روی میانگین نتایج بوده است.

برای انجام تحلیل‌های غیرخطی بر روی سازه‌های مذکور و مدل‌سازی رفتار غیرخطی آن‌ها از روش پلاستیسیته متمرکز بهره گرفته شده است. مطابق این روش، مفاصل پلاستیک با توجه به مشخصات هندسی و نوع رفتار هر عضو و بر اساس FEMA P356 به آن‌ها اختصاص داده شده است. اساس روش پلاستیسیته متمرکز بر اختصاص مفصل پلاستیک در طول المان‌های الاستیک استوار است. یعنی در مقاطعی از المان که در حین بارگذاری جانبی وارده به سازه احتمال می‌رود به مقاومت پلاستیک خود برسند، یک مفصل پلاستیک بالقوه اختصاص داده می‌شود. یک مفصل پلاستیک، رابطه غیرخطی نیرو-تغییر شکل (در اعضای تغییر شکل کنترل) یا حد تسلیم اعضا (در اعضای نیرو کنترل) را برای یک مقطع مشخص تعریف می‌کند. به عنوان نمونه نمودار لنگر-دوران مفصل پلاستیک برای یک المان خمشی در شکل ۳ نمایش داده شده است. در این نمودار نقطه  $B$  متناظر با حد دوران تسلیم بوده و بیانگر آغاز دوران پلاستیک در مقطع است. نقطه  $C$  متناظر با حداکثر مقاومت خمشی مقطع است که پس از این نقطه، با افت مقاومت، تغییر شکل‌های پلاستیک ادامه یافته و در نقطه  $E$  به شکست منجر می‌گردد.



شکل ۳ نمودار لنگر-دوران برای مفصل خمشی در اعضا فولادی

### تحلیل تاریخچه زمانی تحت بار باد

از آنجاکه تغییرات لحظه‌ای سرعت باد، علاوه بر آنکه بار ناشی از باد بر سازه را تغییر می‌دهد، موجب تحریک دینامیکی سازه‌ها نیز می‌گردد که قابلیت بالقوه سازه را برای انواع ناپایداری‌های دینامیکی افزایش می‌دهد لذا تحلیل تاریخچه زمانی سازه‌های بلند دیاگرید در برابر بار باد اهمیت زیادی داشته و هدف اصلی این پژوهش قرار گرفته است.

از آنجایی که در آیین‌نامه ASCE7-10 روش مشخصی برای این تحلیل ارائه نشده است و تمرکز بر روی روش‌های استاتیکی و طیفی است، لذا با بهره‌گیری از مفاهیم ارائه شده در آیین‌نامه و مدل‌سازی تاریخچه سرعت باد به صورت مجموع مؤلفه میانگین سرعت غالب با مؤلفه اغتشاشی، تحلیل تاریخچه زمانی باد در نرم‌افزار SAP2000 پیاده‌سازی شده است. تفکیک سرعت باد در هر تراز دلخواه به دو مؤلفه میانگین و اغتشاشی به صورت زیر خواهد بود.

## مبانی آماری مدل سازی مشخصات مؤلفه اغتشاشی سرعت باد

در این قسمت چند تعریف اساسی با استفاده از مبانی آماری و مقالات مربوطه ارائه خواهد شد. یکی از مهم ترین مؤلفه آماری در تولید رکودهای مصنوعی، تابع چگالی طیف توان مؤلفه طولی اغتشاشی باد است که در ادبیات فنی به صورت زیر بیان شده است [۳۲، ۳۳، ۳۴]:

$$S_{rr}(z, \omega) = \frac{1}{2} \cdot \frac{200}{2\pi} \cdot u^2 \cdot \frac{z}{U(z)} \cdot \frac{1}{[1 + 50 \cdot \frac{\omega z}{2\pi U(z)}]^{5/3}} \quad (2)$$

که در آن؛  $Z$  ارتفاعی که تابع مؤلفه اغتشاشی در آن تراز قرار است تولید شود،  $\omega$  فرکانس زاویه ای است که متغیر تابع چگالی طیف توان دارد،  $u_*$  رعت اصطلاحی بوده و به زبری سطحی محدوده بستگی دارد و  $U(z)$  نیز سرعت متوسط ساعتی در تراز  $Z$  باشد.

از آنجایی که در این پژوهش هدف تولید تابع سرعت در تراز مبنای ۱۰ متری می باشد؛ بنابراین در رابطه فوق  $z = 10m$  و

فرض خواهد داشت. تابع آماری دیگری که برای تولید رکورد مصنوعی باد به آن نیاز داریم تابع وابستگی (دوبعدی) است که در ادبیات فنی به صورت زیر ارائه شده است [۳۲، ۳۵]:

$$f_{rs}(\omega) = \exp \left[ -\frac{\omega}{2\pi} \frac{C_s \Delta z}{0.5[U(z_r) + U(z_s)]} \right] \cdot \exp \left[ -\frac{\omega}{2\pi} \frac{C_x \Delta z}{0.5[U(x_r) + U(s)]} \right] \quad (3)$$

که در آن؛  $x$  و  $z$  به ترتیب بیانگر جهت افقی و قائم هستند،  $\Delta z = |z_r - z_s|$ ،  $\Delta x = |x_r - x_s|$ ،  $C_x = a$  و  $C_z =$  ضرایب ثابتی هستند که معمولاً برای مقاصد طراحی سازه ای به ترتیب برابر با ۱۰ و ۱۶ اتخاذ می شوند.

بنابراین تابع چگالی همبستگی عرضی نیز با صرف نظر از جملات مرتبه چهارم سرعت باد با رابطه زیر قابل تعیین خواهد بود:

$$S_{rs}(\omega) = \sqrt{S_{rr}(\omega) \cdot S_{ss}(\omega)} \exp(-f_{rs}(\omega)) \quad (4)$$

لازم به ذکر است که ماتریس چگالی طیف توان دوبعدی با  $n$  متغیر به صورت زیر قابل تعیین است:

$$S(\omega) = \begin{bmatrix} S_{11}(\omega) & S_{12}(\omega) & \dots & \dots & \dots \\ S_{21}(\omega) & S_{22}(\omega) & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ S_{n1}(\omega) & S_{n2}(\omega) & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (5)$$

بعد از تعریف مشخصه های آماری مؤلفه ی اغتشاشی سرعت باد، روش های تولید رکورد مصنوعی برای مؤلفه های اغتشاشی قابل ارائه خواهد بود؛ که در ادامه در هر بخش، روش های رایجی که در این پژوهش از آنها استفاده شده است، معرفی خواهند شد.

### روش تابع فرکانسی گسسته با استفاده از FFT و تجزیه پایین مثلثی چولسکی<sup>۶</sup>

مبانی این روش اولین بار توسط وایتینگ و شینا [۳۶] مطرح شد. در این روش از مفهوم تبدیل فوریه گسسته سریع (FFT) استفاده شده است و با تولید ضرایب فوریه تصادفی با استفاده از ماتریس پایین مثلثی به دست آمده از روش تجزیه چولسکی بر روی ماتریس چگالی طیف توان و اعداد تصادفی گوسی با میانگین صفر، یک تابع زمانی تصادفی با میانگین صفر تولید خواهد شد.

$$y_p(n\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^N Y_p(k\Delta f) \exp(j \frac{2\pi kn}{N}) \quad (6)$$

$$Y_p(k\Delta f) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^p H_{pi}(k\Delta f) \varepsilon_{ik} \sqrt{2f_c N} \quad (7)$$

در روابط فوق؛  $H_{pi}(k\Delta f)$  یک ماتریس بالا مثلثی است که از طریق اعمال روش تجزیه چولسکی بر روی ماتریس  $S(\omega)$  (یا  $S(f)$ )

به دست آمده است،  $\varepsilon_{ik} = \xi_{ik} + j\eta_{ik}$  اعداد مختلط ت دفی گوسی با میانگین صفر و واریانس ۰.۵ هستند.  $N$  تعداد کل نقاط مورد نیاز برای

تابع زمانی گسسته  $y_p$  می باشد که هر چقدر تعداد نقاط بیشتر شود به تابع منطقی تری خواهیم رسید این عدد در ابتدای شبیه سازی باید انتخاب

شود.  $f_c$  نیز فرکانس نایکوئیست است که بسته به رزولوشن مورد نیاز در ابتدای شبیه سازی برای تابع فرکانسی فرض می شود و از روی آن گام

$$\Delta t = \frac{1}{2f_c} \quad \text{برابر با } y_p \text{ خواهد شد.}$$

<sup>6</sup> Cholesky





## روش تجزیه Schur با autoregressive (AR)

مبانی این روش بر اساس کار پائولا [۳۷، ۳۸] در این قسمت ارائه شده است، مطابق این روش، بردار فرآیند تصادفی  $\mathbf{n}$  متغیره مانند  $V(t)$  را می‌توان به صورت مجموع  $\mathbf{n}$  متغیر تماماً منسجم نرمال شده مانند  $Y_j(t)$  که هر کدام مستقل از هم هستند به صورت زیر در نظر گرفت:

$$V(t) = \sum_{j=1}^n Y_j(t) \quad (۸)$$

حال اگر ماتریسی مانند  $\Psi(\omega)$  را طوری تعریف کنیم که هر ستون آن بردارهای ویژه ماتریس  $S(\omega)$  هستند که درایه‌های حقیقی هستند و ستون‌های آن بر هم عمودند؛ بنابراین روابط زیر برقرار خواهد بود:

$$\psi^T(\omega) S(\omega) \psi(\omega) = A(\omega) \quad (۹)$$

$$\psi^T(\omega) \psi(\omega) = 1 \quad (۱۰)$$

با توجه به تعاریف فوق، بردارهای  $Y_j(t)$  را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

$$\begin{aligned} Y_j(t) &= \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) e^{i\omega x} dB_j(\omega) \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_j(\omega) \sqrt{A(\omega)} e^{i\omega x} dB_j(\omega) \end{aligned} \quad (۱۱)$$

حال اگر یک محدوده فرکانسی مانند  $[\omega_0, \omega_c]$  تعریف کنیم که در آن  $\omega_c$  و  $\omega_0$  به ترتیب حد پایین و حد بالای فرکانس‌های قطع هستند که فضای فرکانسی را به  $M$  بخش  $\omega_0 = \Omega_0, \Omega_1, \dots, \Omega_m = \omega_c$  تقسیم می‌کنند.

با در نظر گرفتن تقریب چندجمله‌ای مرتبه سوم برای بردارهای ویژه  $\psi_j^{(s)}(\omega)$ :

$$\begin{aligned} \psi_j^{(s)}(\omega) &= N^{(s)} j l(\omega), \Omega_{s-1} \leq \omega \\ &\leq \Omega_s \end{aligned} \quad (۱۲)$$

که در آن،  $L(\omega) = [1 \ \omega^2 \ \omega^3]$  می‌باشد. به طریق مشابه از جایگذاری ۱۱ رابطه در ۱۰:

(۱۳)

$$\begin{aligned} Y_j(t) &= \sum_{s=1}^M N^{(s)} j \int_{\Omega_{s-1}}^{\Omega_s} \psi_j(\omega) \sqrt{A(\omega)} e^{i\omega x} dB^{(s)} j(\omega) \\ &= \sum_{s=1}^M N^{(s)} j U^{(s)} j(t) \end{aligned}$$

در نهایت با استفاده از روش تولید استاندارد از طریق مدل AR (autoregressive) می‌توان تابع تصادفی با استفاده از رابطه زیر تولید نمود:

$$\begin{aligned} U_{j,r}^{(s)}(t_k) &= \sum_{u=1}^p a_{j,u}^{(s)} U_{j,r}^{(s)}(t_{k-u}) \\ &+ \sigma_{j,1}^{(s)} W^{(s)} j(t_k) \end{aligned} \quad (۱۴)$$

که در آن؛  $a_{j,u}^{(s)}, r=1, \dots, 4$  پارامترهای مدل AR هستند،  $\sigma_{j,1}^{(s)}$  واریانس‌های ورودی،  $W_j^{(s)}$  متغیرهای تصادفی نرمال با میانگین صفر و واریانس صفر هستند و  $p$  مرتبه مدل AR است. شایان ذکر است که در این مطالعه برای تولید تابع مؤلفه اغتشاشی سرعت باد، از مقادیر  $M=1$  و  $p=4$  استفاده گردیده است.

## روش بیان طیفی Ergodic

در ادبیات فنی از روش مبتنی بر طیف در کار دینگ و دئوداتیس [۳۹، ۴۰] بهره گرفته شده است که مبانی تئوریک آن در ادامه تشریح شده است.

ماتریس چگالی طیف توان  $S(\omega)$  را می‌توان به صورت حاصل ضرب یک ماتریس پایین مثلثی به صورت زیر تجزیه نمود:

$$S(\omega) = H(\omega) H^T(\omega) \quad (۱۵)$$

که در آن؛  $H(\omega)$  یک ماتریس پایین مثلثی است که از طریق اعمال

روش تجزیه چولسکی بر روی ماتریس  $S(\omega)$  به دست آمده است.

$$\omega_{ml} = (l-1)\Delta\omega + \frac{m}{n}\Delta\omega \quad n; \quad l = 1, 2, \dots, N \quad ۲۱$$

$$\theta_{jm}(\omega_{ml}) \tan^{-1} \left\{ \frac{\text{Im}(H(\omega_{ml}))}{\text{Re}(H(\omega_{ml}))} \right\} \quad ۲۲$$

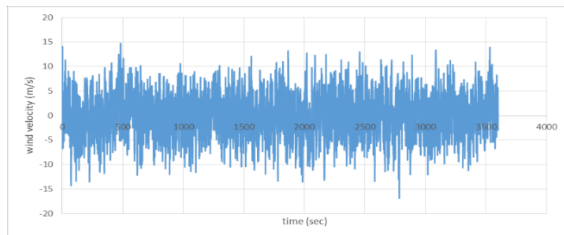
نیز زوایای فاز تصادفی مستقل با توزیع یکنواخت بر روی بازه  $\phi_{ml} \in [0, 2\pi]$  هستند.

باید توجه داشت که  $g_{jm}(p\Delta t)$  را می‌توان از تبدیل فوریه معکوس  $B_{jml}$  به دست آورد.

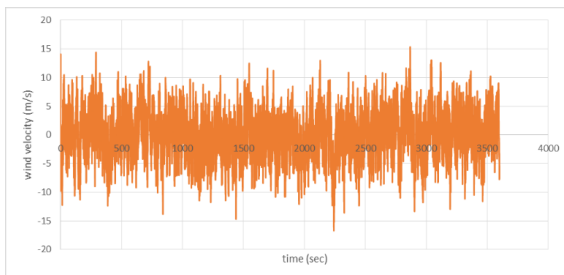
با توجه به مراحل فوق تابع تصادفی مؤلفه اغتشاشی سرعت باد به راحتی با یک کد نویسی ساده قابل تولید خواهد بود.

### رکوردهای مصنوعی مؤلفه اغتشاشی سرعت باد

در این پژوهش با بهره‌گیری از مبانی گفته‌شده، برای تولید رکوردهای مصنوعی سرعت اغتشاشی باد از نرم‌افزار windsim<sup>۷</sup> استفاده شد و با سه روش مختلف معرفی‌شده در بخش‌های قبل سه رکورد تولید گردید. تاریخچه زمانی مؤلفه اغتشاشی رکوردهای تولیدشده در شکل ۵، شکل ۶ و شکل ۷ ارائه گردیده‌اند. برای هر رکورد، مقدار متوسط سرعت در تراز ۱۰ متری از سطح زمین برای یک بازه زمانی یک‌ساعته برابر با صفر می‌باشد.



شکل ۵ رکورد مصنوعی مؤلفه اغتشاشی سرعت باد در تراز ۱۰ متری از سطح زمین به روش AR و تقریب چندجمله‌ای



شکل ۶ رکورد مصنوعی مؤلفه اغتشاشی سرعت باد در تراز ۱۰ متری از سطح زمین به روش چولسکی و FFT

طبق این روش، فرآیند تصادفی مانند  $V_j(t)$  را می‌توان با استفاده از سری‌های مثلثاتی (فوریه) به فرم زیر بیان نمود:

$$V_j(t) = 2 \sum_{m=1}^j \sum_{i=1}^N |H_{jm}(\omega)| \sqrt{\Delta\omega} \cos[\omega_{ml}t - \theta_{jm}(\omega_{ml}) + \phi_{ml}] \quad (۱۶)$$

با بهره‌گرفتن از خواص روش FFT (که قبلاً شرح داده شد)، معادله فوق را می‌توان به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$V_j(p\Delta t) = \text{Re} \left\{ \sum_{m=1}^j h_{jm}(p\Delta t) \exp \left[ i \left( \frac{m\Delta\omega}{n} \right) (p\Delta t) \right] \right\}$$

که در آن؛  $N$  تعداد شبیه‌سازی‌های  $n$  متغیره؛  $j = 1, 2, \dots$ ؛  $p = 0, 1, \dots, (1 - \frac{1}{M})$  و  $M = 2N$  هستند. باید توجه داشت که متغیر  $h_{jm}(p\Delta t)$  به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$h_{jm}(p\Delta t) = \begin{cases} g_{jm}(p\Delta t) & \text{for } p = M, M + 1, \dots \\ g_{jm}[(p - M)\Delta t] & \text{for } p = M, \\ \vdots & \\ g_{jm}[p - nM)\Delta t] & \text{for } p = nM, n \end{cases}$$

که در آن؛

$$g_{jm}(p\Delta t) = \sum_{i=0}^{M-1} B_{jml} \exp \left[ i l p \frac{2\pi}{M} \right] \quad p = 0, 1, \dots, M - 1$$

$$B_{jml} = 2 |H_{jm}(\omega_{ml})| \sqrt{\Delta\omega} \exp[-i\theta_{jm}(\omega_{ml})] \quad ۲$$

<sup>۷</sup> <http://windsim.ce.nd.edu>



$$K_z = 2.01 \left( \frac{z}{z_g} \right)^\alpha \quad (25)$$

که روابط فوق با فرض دسته‌بندی معرض باد نوع B به صورت زیر خلاصه خواهند شد:

$$p_z = 0.193968 \times z^{0.2857} \times C_p \times V^2 \quad (26)$$

باید دقت نمود که  $V$  سرعت طراحی در تراز مبنای ۱۰ متر از سطح زمین می‌باشد که در تحلیل تاریخچه زمانی می‌توان آن را به صورت یک تابع زمانی با طول یک ساعت، به صورت حاصل جمع سرعت میانگین ساعتی در تراز مینا به علاوه سرعت اغتشاشی تصادفی تولید شده (به طول یک ساعت) به صورت زیر در نظر گرفت.

$$V(t, z = 10m) = \bar{V}(z = 10) + v(t) \quad (27)$$

لازم به ذکر است که برای تعیین سرعت میانگین در تراز مبنای ۱۰ متری با استفاده از سرعت متوسط سه ثانیه طراحی، می‌توان از رابطه زیر که در آیین‌نامه ASCE7 ارائه شده است، استفاده نمود:

$$\bar{V}(z = 10) = \bar{b} \times V \xrightarrow{\bar{b}=0.45} = 0.45V \quad (28)$$

از آنجایی که سرعت متوسط باد در تولید تاریخچه زمانی سرعت باد در تراز مبنای ۱۰ متری مورد نیاز است، به همین دلیل از رابطه فوق استفاده خواهد شد. بدیهی است که متوسط سه ثانیه رکورد تولیدی  $V(t, z = 10m)$  به متوسط سه ثانیه طراحی  $V$  در تراز مینا بسیار نزدیک خواهد بود.

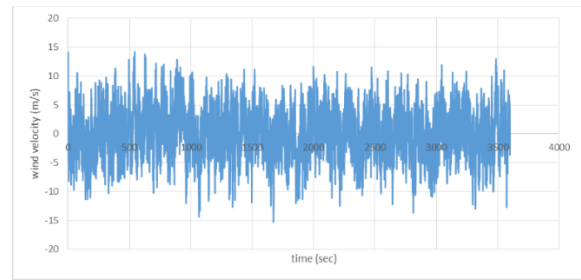
در نهایت تابع تاریخچه زمانی فشار باد که در تحلیل دینامیکی و محاسبه بار دینامیکی هر طبقه باید در نظر گرفته شود به صورت زیر خواهد شد. تحلیل در نرم‌افزار اجزا محدود نیز با تابع بار نشان داده شده در رابطه ۷ در هر تراز انجام خواهد شد.

(29)

$$p_z = 0.193968 \times z^{0.2857} \times C_p \times [\bar{V}(z = 10) + v(t)]^2$$

### پیش‌بینی پاسخ دینامیکی باد بر اساس معادلات ASCE

ضریب اثر تندباد برای لحاظ اثرات دینامیکی بارگذاری باد ناشی از تلاطم باد در جهت طولی و تعامل سازه اعمال می‌شود. با استفاده از معادلات ارائه شده توسط ASCE حداکثر جابجایی و شتاب ناشی از تندباد در ارتفاع سازه محاسبه می‌شود. این حدود مجاز اثرات بارگذاری عرضی باد،



شکل ۷ رکورد مصنوعی مؤلفه اغتشاشی سرعت باد در تراز ۱۰ متری از سطح زمین به روش بیان طیفی ergodic

مقدار این توابع برای فرکانس‌های مختلف در حقیقت متناسب است با میزان انرژی ذخیره شده در آن محتوای فرکانسی خاص. مقدار این انرژی در فرکانس‌های پایین خیلی زیادتر از فرکانس‌های بالا می‌باشد و به همین دلیل با بالا رفتن دوره تناوب سازه و پایین آمدن فرکانس آن اهمیت این نیروها بسیار زیاد می‌شود. [۳].

با توجه به روش تولید رکورد، توابع حاصله شامل پیوسته یا ناپیوسته می‌گردد. روش چولسکی باعث ایجاد یک تابع ناپیوسته می‌شود که هر چه تعداد نقاط آن بیشتر باشد نتایج به دست آمده قابل اعتمادتر خواهند بود [۴۰]. روش ارگودیک و یا در روش AR طبق نظریات پائولا نیز باعث تولید توابع پیوسته می‌شود. [۳۵، ۳۹، ۴۱]

### محاسبه سرعت میانگین باد

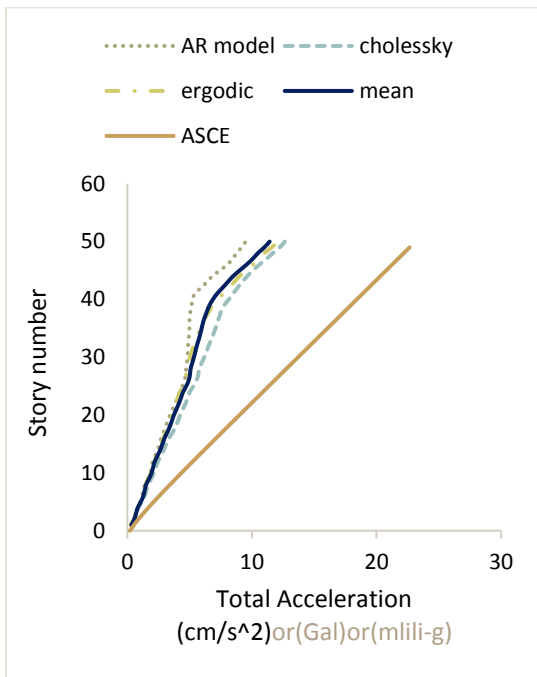
از آنجایی که در روش استاتیکی معادل مطابق ASCE7 فشار باد در هر تراز از رابطه (۲۳) به دست می‌آید، برای به دست آوردن تاریخچه نیروی اعمالی به هر طبقه، سرعت میانگین هر طبقه با تابع تصادفی با میانگین صفر (مؤلفه اغتشاشی) که در مرحله قبل تولید شد، ترکیب گردیده و با استفاده از رابطه فشار و سرعت، بدون لحاظ ضریب تندباد  $G$  تابع فشار در هر تراز محاسبه شده و به طبقات اعمال می‌شود:

$$p_z = q_z G_f C_p \quad (23)$$

$$q_z = 0.613 K_z K_{zt} K_d V^2 \quad (24)$$

در رابطه (۲۴)،  $K_d$  ضریب جهتی باد بوده و برای طراحی سیستم باربر جانبی برابر با ۰.۸۵ فرض می‌شود.  $K_{zt}$  ضریب اثر شرایط توپوگرافی اطراف سازه بر روی سرعت باد است که در مدل‌های تحلیلی این مطالعه برابر با یک فرض شده است.  $K_z$  نیز ضریبی است که اثرات تغییر سرعت باد در ارتفاع را می‌دهد و از رابطه ۳ تعیین می‌شود:

گذشته از این، بالا رفتن ارتفاع سازه، سختی خمشی سازه را با توان سوم ارتفاع  $(k \propto \frac{EI}{h^3})$  کاهش می‌دهد. از این رو پربود سازه که با  $\sqrt{mk}$  نسبت دارد، با توان دوم ارتفاع زیاد می‌گردد و این امر وقوع ارتعاشات با دامنه‌های بلند را در سازه امکان‌پذیر می‌سازد. به ۲ دلیل این موضوع اهمیت ویژه به خود می‌گیرد. دلیل اول آن است که با انعطاف‌پذیرتر شدن سازه و پایین آمدن فرکانس طبیعی آن، فرکانس طبیعی سازه به فرکانس تذبذادهای قوی نزدیک‌تر می‌شود و امکان وقوع پدیده تشدید، تقویت می‌گردد و دلیل دوم که بیشتر یک دلیل فیزیولوژیک است، به احساس نامطلوب انسان از درک ارتعاشات محیطی باز می‌گردد که به‌عنوان معیار آسایش در آیین‌نامه‌های مخت بیان شده است [۲۴].



شکل ۸ شتاب مطلق حداکثر طبقات سازه ۵۰ طبقه دیاگراید.

با توجه به شکل ۸ نتایج سه روش چولسکی، ارگودیک و AR تا طبقه ۳۰ برهم منطبق بوده تا ۵۰ طبقه هر دو روش چولسکی، ارگودیک بسیار به هم نزدیک می‌باشد و اختلافشان کمتر از ۵ درصد می‌باشد. میانگین سه روش به روش ارگودیک نزدیک تر است. در هیچ کدام از روش‌ها مقدار شتاب به معیار مجاز آیین‌نامه ASCE7 (20Gal) نمی‌رسند. در صورتی که طبق فرمول پیشنهادی ASCE7 تا طبقه ۴۴ زیر مقدار مجاز آیین‌نامه 20Gal می‌باشد و حداکثر شتاب در طبقه ۵۰ برابر ۲۲ است که حدود ۱۰ درصد با مقدار مجاز آیین‌نامه اختلاف دارد. اختلاف بین فرمول آیین‌نامه ASCE7 با میانگین سه روش تاریخچه زمانی حدود ۱۰٪ است که تقریباً ۴۸ درصد می‌باشد که این مقدار اختلاف نشان از دست بالا بودن فرمول آیین‌نامه ASCE7 دارد. در بین سه روش، روش چولسکی بیشترین مقدار شتاب ۱۲ گال و روش AR کمترین مقدار شتاب

وزش گردبادی و اثرات پیچش دینامیکی را در بر نمی‌گیرد. ساختمان‌های حساس به این اثرات باید با استفاده از نتایج تونل بادی طراحی شوند. معادله ... حداکثر جایجایی سازه را بر اساس برخی مشخصات سازه برآورد می‌کند.

$$X_{max}(z) = \frac{\Phi(Z)\rho B h C_{fx} \bar{V}_z^2}{2m_1(2\pi n_1)^2} K G_f \quad (30)$$

مهم‌ترین معیار برای اطمینان از آسایش ساکنان ساختمان بالاترین شتابی است که آن‌ها تجربه می‌کنند؛ بنابراین مهم است که حداکثر شتاب احتمالی هم در جهت عرضی باد و هم در جهت طولی باد برآورد شود. ASCE 7-02 روشی برای پیش‌بینی پاسخ سازه در جهت طولی باد، از جمله بالاترین شتاب فراهم می‌کند، اما روشی برای ارزیابی واکنش باد در جهت عرضی ارائه نمی‌دهد. معادله ... حداکثر شتاب سازه در ارتفاع را بر اساس برخی مشخصات سازه پیش‌بینی می‌کند.

$$\ddot{x}_{max}(z) = g_{\ddot{x}} \sigma_{\ddot{x}}(z) = \left[ \sqrt{2 \ln(n_1 T)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln(n_1 T)}} \right] * \left[ \frac{0.85 \Phi(z) \rho B h C_{fx} \bar{V}_z^2}{m_1} I_z K R \right] \quad (31)$$

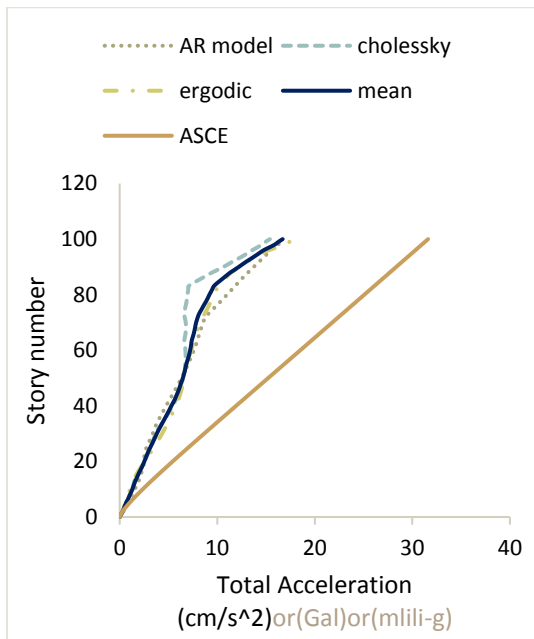
این معادلات بر اساس پارامترهای مربوط به سازه‌های این پژوهش بازنویسی شده و مقادیر  $\ddot{X}_{max}$  و  $X_{max}$  علاوه بر بام در تمام ارتفاع سازه به دست آمده است. در ادامه منحنی حداکثر شتاب دینامیکی بادی طبق معادلات ASCE برای سازه‌های ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ طبقه همراه با نتایج تحلیل تاریخچه زمانی باد مقایسه شده است. برای کنترل محدودیت‌های بهره‌برداری، آیین‌نامه ASCE7-10 الزام کرده است تا بیشینه شتاب، به ۲۰ میلی‌گال (20Gal) محدود شود. همچنین تحت بارهای جانبی در تراز سرویس مقرر شده تا بیشینه تغییر مکان طبقه بام به ۰/۰۰۲ ارتفاع کل سازه محدود شود.

### نتایج تحلیل‌های تاریخچه زمانی باد

هر سه ساختمان تحت بار باد تراز سرویس با سه روش مذکور و با استفاده از رکوردهای مصنوعی برای سرعت باد تحلیل گردید. نتایج تحلیل تاریخچه زمانی باد به‌صورت شتاب طبقات در این بخش ارائه گردیده است. از آنجا که نیروی حاصل از جریان باد بر سازه (برخلاف نیروی زلزله) با وزن ارتباط عکس دارد، با افزایش ارتفاع سازه‌ها، جرم آن‌ها به‌صورت خطی افزایش می‌یابد، در صورتی که ممان حاصل از نیروهای جانبی به دلیل افزایش مقدار نیرو و نیز بازوی مؤثر آن به‌صورت توان‌مان، با توان دوم ارتفاع زیاد می‌شود.



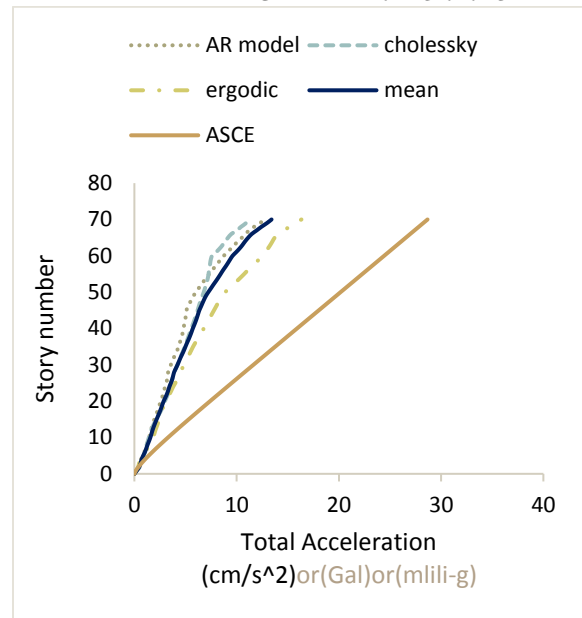
ساختمان کانادا (NBCC) و ASCE7 مقادیر شتاب به دست آمده از هر سه روش چولسکی، ارگودیک و AR به لحاظ معیار آسایش و بهره‌برداری برای ساختمان‌های با کاربری اداری خوب و کاربری مسکونی تقریباً مناسب می‌باشد.



شکل ۱۰ شتاب مطلق حداکثر طبقات سازه ۱۰۰ طبقه دیاگراید.

با توجه به شکل ۱۰ نتایج سه روش چولسکی، ارگودیک و AR تا طبقه ۶۰ برهم منطبق بوده تا ۱۰۰ طبقه هر دو روش ارگودیک، AR بسیار به هم نزدیک است. اما بعد از یک پراکندگی از طبقه ۶۰ تا ۸۰ در روش چولسکی دوباره از ۸۰ طبقه هر سه منحنی بر یکدیگر منطبق می‌گردند. به طوری که اختلافشان در اکثر طبقات کمتر از ۱ گال است و کمتر از ۱۰ درصد است. میانگین سه روش تقریباً یکسان است و منطبق بر روش ارگودیک است. از لحاظ شکل منحنی دو منحنی ارگودیک و AR دارای دو شیب نزدیک به هم است ولی منحنی روش چولسکی از ۶۰ طبقه تا ۸۲ تبدیل به یک خط قائم و شیب بی‌نهایت می‌گردد و سپس از طبقه ۸۲ نقطه دچار عطف و تغییر شیب ثابت وب صورت خط در می‌آید که به نحوی نشان‌دهنده تغییر رفتار سازه در برابر بار باد است. در هیچ کدام از روش‌ها مقدار شتاب به معیار مجاز آیین‌نامه ASCE7 (20Gal) نمی‌رسند. در صورتی که طبق فرمول پیشنهادی ASCE7 تا طبقه ۶۵ زیر مقدار مجاز آیین‌نامه 20Gal است. اختلاف بین فرمول پیشنهادی با میانگین سه روش حدود ۱۴ گال است که تقریباً ۴۷ درصد است که این مقدار اختلاف نشان از دست بالا بودن فرمول پیشنهادی آیین‌نامه ASCE7 دارد. در بین سه روش، روش ارگودیک بیشترین مقدار شتاب ۱۷ گال و روش چولسکی کمترین مقدار شتاب ۱۵ گال را دارد.

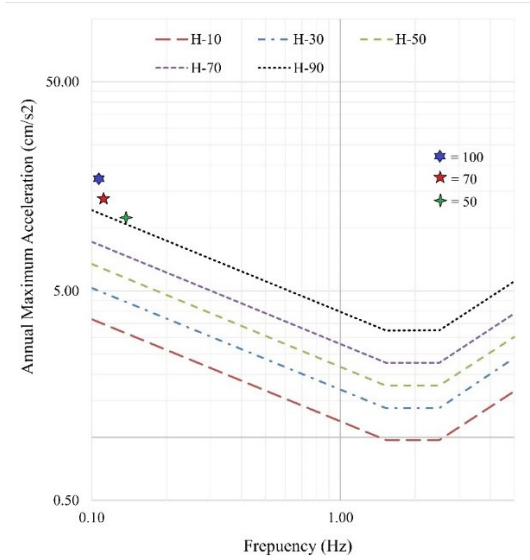
۹ گال را دارد. به طوری که اختلاف این دو روش حدود ۳ گال است. اختلاف این دو روش حدود ۱۳ درصد می‌باشد.



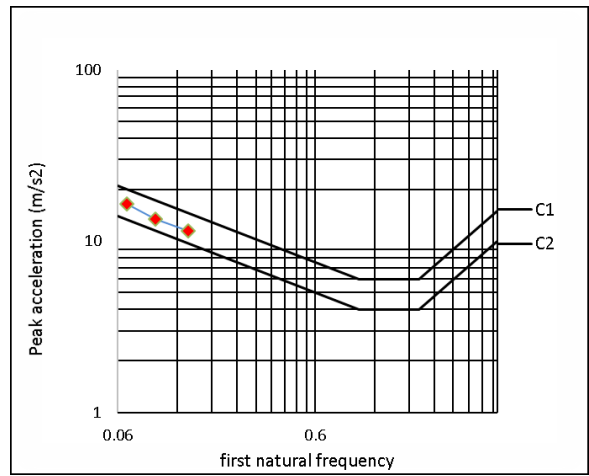
شکل ۹ شتاب مطلق حداکثر طبقات سازه ۷۰ طبقه دیاگراید.

با توجه به شکل ۹ نتایج سه روش چولسکی، ارگودیک و AR تا طبقه ۴۰ برهم منطبق بوده تا ۵۶ طبقه هر دو روش چولسکی، AR بسیار به هم نزدیک است به طوری که دو منحنی یکدیگر را در طبقه ۵۶ قطع می‌نمایند و اختلافشان در اکثر طبقات کمتر از ۱ گال است و کمتر از ۵ درصد است. میانگین سه روش تا ۵۰ طبقه تقریباً یکسان می‌باشد و منطبق بر روش چولسکی است و از ۵۰ تا ۷۰ طبقه به روش AR منطبق می‌باشد. از لحاظ شکل منحنی دو منحنی ارگودیک و AR دارای دو شیب نزدیک به هم است ولی منحنی روش چولسکی در ۶۰ طبقه دارای نقطه عطف و تغییر شیب می‌باشد که به نحوی نشان‌دهنده تغییر رفتار سازه در برابر بار باد است. در هیچ کدام از روش‌ها مقدار شتاب به معیار مجاز آیین‌نامه ASCE7 (20Gal) نمی‌رسند. در صورتی که طبق فرمول پیشنهادی ASCE7 تا طبقه ۵۰ زیر مقدار مجاز آیین‌نامه 20Gal می‌باشد و حداکثر شتاب در طبقه ۵۰ برابر ۲۰ گال است که منطبق بر مقدار مجاز آیین‌نامه است. اختلاف بین فرمول پیشنهادی با میانگین سه روش حدود ۱۵ گال است که تقریباً ۵۳ درصد است که این مقدار اختلاف نشان از دست بالا بودن فرمول پیشنهادی آیین‌نامه ASCE7 دارد. در بین سه روش، روش ارگودیک بیشترین مقدار شتاب ۱۶ گال و روش چولسکی کمترین مقدار شتاب ۱۱ گال را دارد. ب طوری که اختلاف این دو روش حدود ۵ گال است. و اختلاف این دو روش با مقدار میانگین تقریباً ۲ گال می‌باشد حدود ۱۸ درصد است. از اینرو توصیه می‌گردد با توجه به نزدیک بودن مقدار میانگین به روش AR برای سازه‌های 70 طبقه به پایین می‌توان از روش AR استفاده نمود. با توجه به آیین‌نامه ملی





شکل ۱۱ آستانه‌های درک احتمالی برگرفته از AIJ-GBV-2004 مطابق شکل ۱۱ همان‌طور که ملاحظه می‌شود در سازه‌های دیاگرید طراحی شده بر اساس روش استاتیکی آیین‌نامه، شتاب به‌دست‌آمده تحت تحلیل تاریخچه زمانی باد تراز سرویس از شتاب مجاز آیین‌نامه AIJ-GBV-2004 بیشتر است و بیش از ۹۰ درصد ساکنان شتاب ناشی از جریان باد را احساس می‌نمایند و این موضوع عملکرد نامطلوب این سیستم سازه‌ای مخصوصاً برای ساختمان‌های بلند با نسبت ارتفاع به عرض زیاد را می‌رساند؛ اما بر اساس آیین‌نامه ASCE سازه‌های دیاگرید شتاب کمتر از 20 mlili-g را تجربه می‌کنند بنابراین عملکرد مطلوبی دارند.



شکل ۱۲ منحنی‌های ارزیابی ISO 10137: 2007 برای ارتعاشات ناشی از باد در ساختمان‌های در مسیر عمودی (X, Y) برای دوره‌ی یک‌ساله. منحنی برجسب‌گذاری شده ۱ برای ادارات و ۲ برای مناطق مسکونی است

به‌طوری‌که اختلاف این دو روش حدود ۲/۵ گال است. و اختلاف این دو روش با مقدار میانگین تقریباً ۱ گال است حدود ۹ درصد است. از این رو توصیه می‌گردد با توجه به نزدیک بودن مقدار میانگین به روش ارگودیک برای سازه‌های ۱۰۰ طبقه به پایین می‌توان از روش ارگودیک استفاده نمود. با توجه به آیین‌نامه ملی ساختمان کانادا (NBCC) مقادیر شتاب به‌دست‌آمده از هر سه روش چولسکی، ارگودیک و AR به لحاظ معیار آسایش و بهره‌برداری برای ساختمان‌های با کاربری اداری مناسب و کاربری مسکونی کمی نامناسب است. و بر اساس آیین‌نامه ASCE7 بدون اشاره به کاربری سازه از لحاظ معیار آسایش و بهره‌برداری مناسب است.

مقایسه نتایج تحلیل‌های تاریخچه زمانی باد با مقادیر به‌دست‌آمده از معادلات ASCE نشان می‌دهد که معادلات ASCE برای سازه‌های دیاگرید دست بالا است. با تقسیم شتاب طبقات تحلیل تاریخچه زمانی بر مقادیر شتاب به‌دست‌آمده از معادله (۲) ضرایبی به دست می‌آید که تقریباً در طبقات مختلف به هم نزدیک است. با میانگین‌گیری ضرایب، برای هر یک از سازه‌ها یک ضریب تعدیل به دست می‌آید که در جدول ۳ نشان داده شده است. در نهایت با میانگین گرفتن از ضرایب تعدیل سه سازه ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ طبقه یک ضریب تعدیل کلی حدوداً ۱/۲ به دست می‌آید.

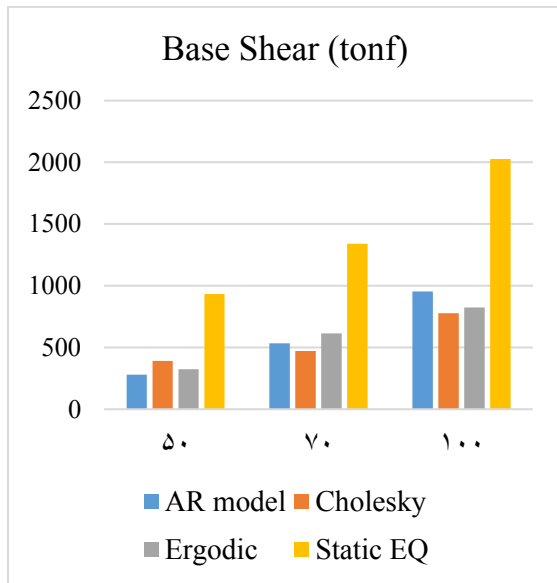
اصلاح ضریب حداکثر زمانی تاریخچه تحلیل در طبقات شتاب =  $\left( \frac{\text{میانگین } ASCE \text{ معادله از به‌دست‌آمده طبقات شتاب}}{\text{میانگین}} \right)$

جدول ۱ ضریب تعدیل فرمول‌های ASCE برای منطبق شدن با نتایج تحلیل تاریخچه زمانی

سازه	۵۰	۷۰	۱۰۰	Avg
ضریب تعدیل	۰,۴۳۳	۰,۳۹	۰,۴۲۵	۰,۴۱۶

بنابراین در سازه‌های دیاگرید، شتاب طبقات به‌دست‌آمده از رابطه پیشنهادی ASCE (رابطه ۲) برای محاسبه حداکثر شتاب تقریباً ۲ برابر حداکثر شتاب طبقات در تحلیل‌های تاریخچه زمانی باد است.





شکل ۱۶ برش پایه سازه‌ها در تحلیل تاریخیچه زمانی باد

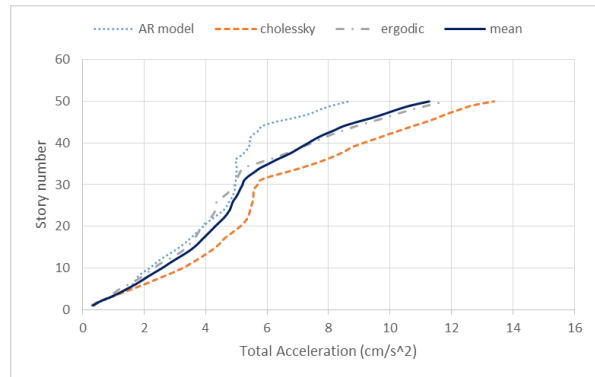
همچنین در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود در سازه ۵۰ طبقه برش پایه روش چولسکی حداکثر شده است. در سازه ۷۰ طبقه برش پایه روش ارگودیک و در سازه ۱۰۰ طبقه برش پایه روش AR حداکثر شده است. لذا نتیجه‌گیری می‌شود که تأثیر نیروی باد با توجه به محتوای فرکانسی آن بر هر سازه با دوره تناوب و نسبت منظر مختلف فرق خواهد داشت.

### نتیجه‌گیری

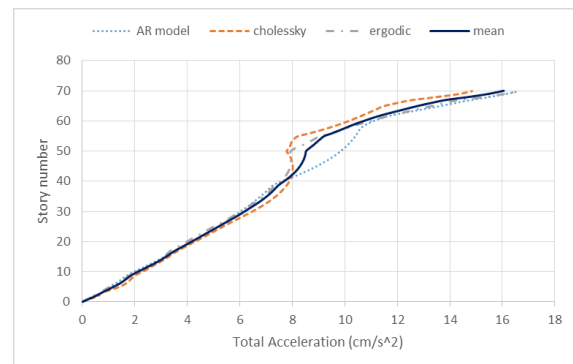
مهم‌ترین معیار برای اطمینان از آسایش ساکنان ساختمان بالاترین شتابی است که آن‌ها تجربه می‌کند در این پژوهش عملکرد سیستم سازه‌ای دیاگرید تحت تحلیل تاریخیچه زمانی باد مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور سازه‌های دیاگرید ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ طبقه مدل‌سازی شده است. نتایج به صورت نمودارهای شتاب طبقات ارائه شده است که نتایج زیر از آن‌ها برداشت شده است.

۱- با توجه به نتایج تحلیل‌های تاریخیچه زمانی باد مشاهده می‌شود که حداکثر شتاب مطلق در طبقات بالایی روند افزایشی بیشتری با افزایش نسبت منظر دارند. نکته دیگر آنکه در تعداد طبقات خیلی زیاد مانند سازه ۱۰۰ طبقه، الگوی افزایش شتاب در طبقات کمی متفاوت است به طوری که در طبقات بین ۶۰ الی ۸۰ شتاب کل طبقات با سرعت کمتری نسبت به طبقات خارج از این محدوده رشد می‌کند. این در حالی است که در مدل‌های سازه‌های ۵۰ و ۷۰ طبقه شتاب مطلق در ارتفاع سازه با نرخ بیشتری افزایش می‌یابد؛ که با توجه به اینکه سازه دیاگرید ذاتاً یک سازه میان مرتبه است لذا در سازه‌های میان مرتبه بخصوص از ۶۰

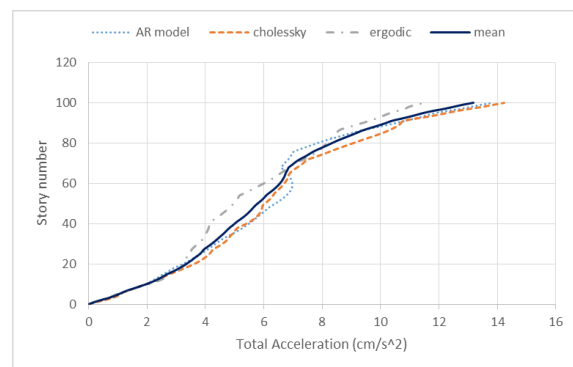
همان‌طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، قابلیت خدمات‌دهی سازه‌های مورد بررسی در این پژوهش با توجه به معیارهای شتاب استاندارد اصلاح‌شده ISO برای ساختمان‌های اداری در محدوده مجاز قرار گرفته است اما برای ساختمان‌های مسکونی در محدوده مجاز نیست. که بایستی تمهیداتی در این صورت اتخاذ گردد.



شکل ۱۳ شتاب مطلق حداکثر طبقات سازه ۵۰ طبقه قاب محیطی.



شکل ۱۴ شتاب مطلق حداکثر طبقات سازه ۷۰ طبقه قاب محیطی.



شکل ۱۵ شتاب مطلق حداکثر طبقات سازه ۱۰۰ طبقه قاب محیطی.

تا ۸۰ طبقه شاهد کاهش مقادیر شتاب‌ها در نمودارهای تاریخچه زمانی در سه روش هستیم.

۲- از نتایج منحنی‌های شتاب تاریخچه زمانی کاملاً مشهود است که روش ارگودیک با توجه به پشتوانه فرضیات قوی‌تر پاسخ‌های منطقی‌تری بخصوص در سازه‌های ۵۰ و ۱۰۰ طبقه دارد و به میانگین سه روش منطبق است. پس می‌توان نتیجه گرفت بدون انجام دو روش دیگر می‌توان از روش ارگودیک به‌جای سه روش دیگر استفاده نمود.

۳- شتاب طبقات بر اساس تحلیل‌های تاریخچه زمانی باد با افزایش تعداد طبقات سازه افزایش می‌یابد اما همچنان این شتاب کمتر از مقادیر مجاز  $20\text{mlili-g}$  است؛ اما از منظر معیار آسایش  $\text{AIJ-GBV-2004}$  ارتعاشات در طبقات بالا توسط بیش از ۹۰ درصد ساکنان احساس می‌شود. این امر ممکن است برای کارفرما و ساکنان غیرقابل قبول بوده و توصیه می‌شود این مقدار در سازه‌های با نسبت منظر بالا تعدیل شود.

۴- شتاب طبقات سیستم دیاگرید بر اساس معادلات پیش‌بینی پاسخ دینامیکی باد  $\text{ASCE7}$ ، از حد مجاز آیین نامه  $\text{ASCE}$  فراتر رفته است. این مطلب به علت تخمین دست بالای معادلات  $\text{ASCE 7}$  نسبت به نتایج تحلیل‌های تاریخچه زمانی باد است. به طوری که نسبت حداکثر شتاب بام به دست آمده از معادلات  $\text{ASCE 7}$  به حداکثر شتاب بام نتایج تحلیلی در سازه ۵۰ طبقه  $۱,۸۳$  و در سازه ۷۰ طبقه  $۲,۰۷$  و در سازه ۱۰۰ طبقه  $۱,۸۷$  است.

۵- نتایج حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی باد در این تحقیق نشان داد که روش ضریب تندباد  $Gf$  که به منظور راحتی و صرف‌نظر نمودن از انجام عملیات وقت‌گیر و پرهزینه تحلیل تاریخچه زمانی انجام می‌گردد و به نوعی ضریبی جهت تبدیل پاسخ استاتیکی به دینامیکی است دست بالا بوده و بایستی در آیین‌نامه مورد تجدیدنظر آرا گیرد و پارامترهای بیشتری بایستی در محاسبه آن دخیل گردد. به طوری که در روش تاریخچه زمانی این ضریب در نظر گرفته نمی‌شود ولی مقدار آن در فرمول پیشنهادی محاسبه شده برای حداکثر شتاب (رابطه ۲۱) مقدار... نسبت...ست.

۶- با انجام تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه زمانی باد سازه‌های دیاگرید را به سه روش ارگودیک و چولسکی و  $\text{AR}$  و مقایسه آن با نتایج به‌دست‌آمده از رابطه پیشنهادی  $\text{ASCE 7}$  (رابطه ۲۱) که برای همه سازه‌های بلند قابل استفاده است می‌توان دریافت رابطه پیشنهادی  $\text{ASCE 7}$  نسبت به نتایج تحلیل‌های تاریخچه زمانی باد دست بالا است. از این رو می‌توان ضرایب پیشنهادی سیستم‌های سازه‌های مختلف را استخراج و در فرمول مربوطه اعمال نمود به‌طور نمونه در سازه دیاگرید این ضریب مقدار  $۱/۲$  پیشنهاد می‌گردد که می‌توان نتایج رابطه پیشنهادی را در ضریب تعدیل  $۱/۲$  ضرب نمود تا بدون انجام تحلیل‌های زمان‌بر به نتایج واقع‌بینانه‌تری و واقعی‌تری دست یابیم و منجر به ارائه ضرایب تندباد جدید در آیین‌نامه  $\text{ASCE 7}$  گردد.

۷- نتایج تحلیل‌های انجام‌شده تحت بار باد با رکودهای مصنوعی تولیدشده در هر سه روش چولسکی، ارگودیک و  $\text{AR}$  در طبقات پایین‌تر از ارتفاع میانی سازه به هم نزدیک هستند و واریانس کمی دارند اما با افزایش ارتفاع از میانه سازه‌ها به بالا اختلاف نتایج روش‌ها بیشتر می‌شود.

۸- بر اساس استاندارد اصلاح شده  $\text{ISO}$  برای ساختمان‌های اداری در محدوده مجاز قرار گرفته است اما برای ساختمان‌های مسکونی در محدوده مجاز نیست. که بایستی تمهیداتی در این صورت اتخاذ گردد.

۹- با توجه به شکل ۱۲ برش پایه هر سه روش تاریخچه زمانی چولسکی، ارگودیک و  $\text{AR}$  از روش استاتیکی کمتر است. در سازه ۵۰ طبقه در روش چولسکی که بیشترین مقدار را دارد  $600\text{ tonf}$  کمتر از روش استاتیکی (حدود  $۴۲$  درصد) و در سازه ۷۰ طبقه در روش ارگودیک که بیشترین مقدار را دارد  $727\text{ tonf}$  کمتر از روش استاتیکی (حدود  $۴۵$  درصد) و در سازه ۱۰۰ طبقه در روش  $\text{AR}$  که بیشترین مقدار را دارد  $1072\text{ tonf}$  کمتر از روش استاتیکی (حدود  $۴۷$  درصد) که این مقدار اختلاف ناشی دست بالا بودن روش استاتیکی آیین‌نامه  $\text{ASCE 7}$  دارد و می‌تواند باعث کاهش هزینه‌ها در طراحی فونداسیون گردد.

۱۰- این توابع که در واقع بیانگر خصوصیات انرژی ورودی به سیستم است و نیز تابع انتقال هارمونیکی که در واقع بیانگر میزان انتقال‌پذیری انرژی ورودی به سازه به ازای هر محتوای فرکانسی است، با توجه به تاریخچه تولیدشده متفاوت در سه روش تاریخچه زمانی چولسکی، ارگودیک و فرضیات متفاوت در هنگام تولید این تاریخچه‌ها باعث می‌گردد که مقدار این توابع برای فرکانس‌های مختلف در حقیقت متناسب با میزان انرژی ذخیره‌شده در آن محتوای فرکانسی خاص گردد، لذا مقدار این انرژی در فرکانس‌های پایین خیلی زیادتر از فرکانس‌های بالا است و به همین دلیل با بالا رفتن دوره تناوب سازه و پایین آمدن فرکانس آن اهمیت این نیروها بسیار زیاد می‌شود. از این رو با توجه به این مطلب شاهد تغییرات در مقدار پاسخ‌ها از جمله شتاب و برش پایه‌های متفاوت هستیم به طوری که مقدار برش پایه برای سازه ۵۰ طبقه در چولسکی بیشتر و در ۷۰ طبقه روش ارگودیک و در ۱۰۰ طبقه روش  $\text{AR}$  بیشترین مقدار را دارند و مقادیر در سه روش مختلف است. از این رو جهت اطمینان بیشتر از میانگین این روش‌ها استفاده می‌نمایم.

۱۱- در سازه دیاگرید ۵۰ طبقه با توجه به نزدیک بودن مقدار میانگین به روش ارگودیک برای سازه‌های ۵۰ طبقه به پایین می‌توان از روش ارگودیک استفاده نمود. با توجه به آیین‌نامه ملی ساختمان کانادا ( $\text{NBCC}$ ) مقادیر شتاب به‌دست‌آمده از هر سه روش چولسکی، ارگودیک و  $\text{AR}$  به لحاظ معیار آسایش و بهره‌برداری بسیار خوب برای ساختمان‌های با کاربری اداری و مناسب برای ساختمان‌های با کاربری مسکونی است.

۱۲- کلی بودن فرمول تأثیر تندباد  $\text{ASCE 7}$  برای همه سازه‌های بلند با سیستم‌های سازه‌ای متفاوت است که توصیه می‌شود جهت استفاده از این فرمول با انجام تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه زمانی باد





- [9] Heshmati M, Khatami A, Shaki H. Seismic performance assessment of tubular diagrid structures with varying angles in tall steel buildings. *Structures*. 2020; 25(3): 113-126.
- [10] Heshmati M, Aghakouchak A. A. Quantification of seismic performance factors of steel diagrid system. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 2019; 28 (3): e1572.
- [11] Ardekani A, Dabbaghchian I, Alaghmandan M, Golabchi M, Hosseini S. M, Mirghaderi S. R. Parametric design of diagrid tall buildings regarding structural efficiency. *Architectural Science Review*. 2020; 63 (1): 87-102.
- [12] Montuori G. M, Mele E, Brandonisio G, Luca A. D. Design criteria for diagrid tall buildings: Stiffness versus strength. *The structural design of tall and special buildings*. 2014; 23 (17): 1294-1314.
- [13] Liu C, Li Q, Lu Z, Wu H. A review of the diagrid structural system for tall buildings. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 2018; 27 (4): e1445.
- [14] Samat R. A, Khairudin M. F, Din M. H, Ali G. G, Fadzil A. B, Bakar S. A. 2019; Comparative Structural Performance of Diagrid and Bracing System in Mitigation of Lateral Displacement, in *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 220.
- [15] Milana G, Olmati P, Gkoumas K, Bontempi F. Ultimate Capacity of Diagrid Systems for Tall Buildings in Nominal Configuration and Damaged State. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2015; 59 (3): 381-391.
- [16] Asadi E, Li Y, Heo A. Y. Seismic Performance Assessment and Loss
- ضرایب پیشنهادی سیستم‌های سازه‌ای مختلف را استخراج و در فرمول مربوطه اعمال گردد به‌طور نمونه در سازه دیاگرید این ضریب مقدار ۱/۲ پیشنهادی می‌گردد که می‌تواند منجر به ارائه ضرایب تندباد جدید در آیین‌نامه 7 ASCE گردد.
- مراجع**
- [1] Boake T. Diagrid structures: systems, connections, details. the University of Waterloo, Canada, Birkhäuser, 2014; 3: 184.
- [2] Moon, K. Sustainable structural engineering strategies for tall Buildings. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 2008; 17 (5): 895-914.
- [3] Moon, K.S, Connor J.J, Fernandez J.E. Diagrid structural systems for tall buildings: characteristics and methodology for preliminary design. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 2007; 16 (2): 205-230.
- [4] O'Driscoll, M. Design for manufacture. *Journal of materials processing technology*. 2002; 122 (2): 318-321.
- [5] Moon, K.S. Optimal grid geometry of diagrid structures for tall buildings. *Architectural Science Review*. 2008; 51 (3): 239-251.
- [6] Asadi E, Adeli H. Nonlinear Behavior and Design of Mid- to High-Rise Diagrid Structures in Seismic Regions. *Engineering Journal*. 2018; 55(7): 161-180.
- [7] Asadi E, Adeli H. Diagrid: An innovative, sustainable, and efficient structural system. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 2017; 26 (8): e1358.
- [8] Kim J, Lee J. Seismic Performance Evaluation of Steel Diagrid Buildings. *International Journal of Steel Structures*. 2018; 18(4): 1035-1047.



- [25] Viana M, Oliveira K. Foundations of Ergodic Theory, Cambridge Studies in Advanced: Cambridge University Press, 2016.
- [26] ASCE 7-16, *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*, American Society of Civil Engineers, 2016; California.
- [27] International Organization for Standardization (ISO), *Bases for design of structures: Serviceability of buildings and walkways against vibrations*, ISO10137, 2007.
- [28] National Research Council of Canada, *National Building Code of Canada, Part 4: Structural Design, Chapter 4: Commentaries on Part 4 of the National Building Code*. 1995.
- [29] *Australia and New Zealand Wind Standard: AS/NZS 170.2:2002 and AS/NZS 1170.2:2011*.
- [30] Architectural Institute of Japan, *Guidelines for the evaluation of habitability to building vibration*, AIJ-GEH-2004.
- [31] Kim J, Lee Y. Seismic Performance Evaluation of Diagrid System Buildings. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 2012; 21 (10): 736-749.
- [32] Simiu H. Wind effects on structures, John Wiley & Sons, Inc, 1996; Third edition.
- [33] Simiu E. Wind spectra and dynamic alongwind response. *J. Struct. Div., ASCE*, 1974; 100 (9): 1897-1910.
- [34] Kaimal J. C, Wyngaard J. C, Izumi Y, Cote, O. R. Spectral characteristics of surface-layer turbulence. *Journal of Royal Meteorological Society*. 1972; 98(2): 563-589.
- Estimation of Steel Diagrid Structures. *Journal of Structural Engineering*. 2018; 144 (10) p. 04018179.
- [17] Asadi E, Salman M, Li Y. Multi-criteria decision-making for seismic resilience and sustainability assessment of diagrid buildings. *Engineering Structures*. 2019; 191(3): 229-246.
- [18] Sukrawa M. 2019; Comparative analysis and design of tower using diagrid, conventional moment frame and braced frame system of steel structures, in *MATEC Web of Conferences*.
- [19] Venkatesh C, Durga C. S. S, Reddy K. H. K, Sathish P, Naresh M. Analysis of Diagrid Structural System using Push over Analysis. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*. 2019; 8 (8): 845-847.
- [20] Kim H, Kang J. MOGA Based Structural Design Method for Diagrid Structural Control System Subjected to Wind and Earthquake Loads. *International Journal of Steel Structures*. 2018; 18 (5): 1598-1606.
- [21] Moon K. S, Diagrid Structures for Complex-Shaped Tall Buildings. *Procedia Engineering*. 2011; 14: 1343-1350.
- [22] Kwok K. C. S, Burton M. D, Abdelrazaq A. K. Wind-Induced Motion of Tall Buildings Designing for Habitability. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, 2015.
- [23] Fu-Kuei Chang F, Human response to Motion in Tall Buildings. *Journal of The Structural*. 1973; 99 (6):1-14.
- [24] Kim S. Seismic performance evaluation of high-rise steel buildings dependent on wind exposures. *Advances in Mechanical Engineering*. 2019; 11 (3): 1-12.



- [35] Davenport A. G. The dependence of wind load upon meteorological parameters, in *Proc. International Research Seminar on Wind Effects on Building and Structures*, University of Toronto Press, Toronto, 1967; 16(6): 19-82.
- [36] Wittig L. E, Sinha A. K. Simulation of multicorrelated random processes using the FFT algorithm. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1975; 58 (3): 630-633.
- [37] Di Paola M. Digital simulation of wind field velocity. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1998; 74(5): 91-109.
- [38] Di Paola M, Gullo I. Digital generation of multivariate wind field processes. *Probabilistic Engineering Mechanics*. 2001; 16(4): 1-10.
- [39] Ding Q, Zhu L, Xiang H. Simulation of stationary Gaussian stochastic wind velocity field. *Wind and Structure*. 2006; 9 (3): 231-243.
- [40] Deodatis G. Simulation of ergodic multivariate stochastic processes. *Journal of Engineering Mechanics*. 1996; 122 (8): 778-787.
- [41] Walkden C. Ergodic Theory Lecture 1- Examples of Dynamical Systems, The University of Manchester: School of Mathematics, 2013; 4: 50.

