



## Parametric study and comparison of overturning moment and base shear of tall buildings under earthquake and along-wind loads

N. Khodaie\*, A. Rahimi

Islamic Azad University, Khomuj Branch, Bushehr, Iran.

**ABSTRACT:** Increasing the population of large cities and the lack of construction area have increased tall buildings. In the present article, the overturning moment and base shear due to the along-wind and earthquake loads have been compared for tall buildings. The buildings are assumed to be located in Tehran city on type 2 soil and the structure is regarded as a vertical cantilever beam. The along-wind and earthquake loads are computed using the gust-loading-factor method and the linear spectral approach, respectively. First, an example of the 120-m high building is presented and evaluated, and then, the effect of the height and aspect ratio parameters are examined in the ranges 80 and 200-m, and 5 to 10, respectively, for the two square and circular cross-sections. For the primary example, the earthquake overturning moment and base shear were dominated respectively by the first and second vibration modes. For the square and circular sections, the ratio of wind-induced overturning moment to the earthquake effect were 1.1 and 0.81, respectively. For the parametric study, the wind and seismic overturning moments were equal to each other at the specific values of the studied parameters, and the wind effects were dominant for the higher values of these parameters. For instance, for the square cross-section, the equal point of the overturning moment and base shear were respectively 110m and 175m. Finally, by increasing the height and aspect ratio, the wind forces were dominant.

### Review History:

Received: Apr. 08, 2021

Revised: Jun. 13, 2021

Accepted: Jun. 22, 2021

Available Online: Jul. 08, 2021

### Keywords:

Tall building

Along-wind response

Seismic response

Overturning moment

Base shear

## 1- Introduction

Design of tall buildings is governed by lateral wind and seismic loads. Overturning moment due to the lateral loads is one of the main considerations in tall structures. The effect of wind and seismic loads on tall buildings is widely studied. However, previous studies generally investigated the effect of wind and seismic loads separately and limited studies compared their effect on tall buildings.

Moat codes and standards use the gust loading factor (GLF) method to estimate the along-wind dynamic response of tall buildings. This method was proposed by Davenport [1] and several modifications were proposed by other researchers [2-4]. Ali and Moon [5] divided the structural systems of tall buildings into two main categories: interior and exterior structures. Vibration control of tall buildings under wind dynamic loads is extensively studied in recent years [6-8]. The seismic response of high-rise buildings is evaluated in the previous investigations [9-11]. Some researchers compared the effect and demands of the wind and earthquake loads for tall buildings [12-14].

In the present article, the overturning moment and base shear due to the along-wind and earthquake loads are

parametrically obtained and compared for tall buildings by the assumption that the building is located in Tehran. The effect of building height, aspect ratio and type of the building cross-section type are investigated on the effect of the lateral loads.

## 2- Methodology

The structural behavior of tall buildings under the lateral loads is assumed as a multi-degree-of-freedom vertical cantilever beam with the masses lumped at the nodes. This assumption is widely used in similar studies. The equation of motion for a discrete MDOF system under dynamic loads has the following general form:

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

Where, M, C and K are mass, damping and stiffness matrices, respectively, X is the vector of structural displacements, and F is the vector of external forces. The along-wind load is computed using the GLF method provided

\*Corresponding author's email: Nahmat.Khodaie@iau.ac.ir



in the Iranian national building code (Part 6) [15]. The external pressure of along-wind load can be obtained as:

$$p = I_w q C_e C_g C_p \tag{2}$$

Where,  $I_w$  is the importance factor,  $q$  is the basic pressure,  $C_e$  is the exposure factor,  $C_g$  is the GLF factor, and  $C_p$  is the pressure coefficient.

The seismic load is computed using the linear spectral analysis presented in the Iranian code of practice for seismic resistance design of buildings [16]. The equation of motion of the structure, presented by Eq. (1), can be stated in the following form using the modal analysis method:

$$\ddot{y}_i + 2\xi_i \dot{y}_i + \omega_i^2 y_i = \frac{P_i}{M_i} \tag{3}$$

$$P_i = \phi_i^T \mathbf{F}, \quad M_i = \phi_i^T \mathbf{M} \phi_i, \quad \mathbf{X} = \phi \mathbf{y}$$

Where  $M_i$ ,  $\hat{\Gamma}_i$  and  $\hat{\omega}_i$  are mass, damping ratio and modal frequency, respectively.  $\phi$  is the mode shapes matrix, and  $y$  is the modal displacement and  $\phi_i$  is the  $i$ th mode shape vector. The effect of different modes is combined using the square root of the sum of the squares (SRSS) procedure.

In the first stage, the wind and seismic responses are obtained and compared for a primary example tall building. The example building height is assumed 120 m with two square and circular cross sections with the plan dimension 20 m. The structural stiffness is selected in such a way that the total wind-induced top-floor displacement is equal to the allowable limit provided for tall buildings [17]. Then, the effects of different parameters as the height of the building and aspect ratio, respectively, in the ranges 80-200m and 5-10 for the two square and circular cross-sections are investigated.

### 3- Results and Discussion

The results of the effect of the building height and aspect ratio related to the parametric study are presented here. In order to investigate the effect of the height of the building, the lateral forces are obtained for a building with a plan dimension of 20 m, and a height range 80-200m. Figure 1 shows the variation of base shear versus building height for the square cross-section. Base shears due to wind and seismic loads are equal at the height 145 m. For the higher values of the building height, wind base shear is more than the seismic one. For  $h=200$  m, wind shear is 17% more than the seismic shear force.

Figures 2 and 3, show the variation of the overturning moment versus building height for the square and circular

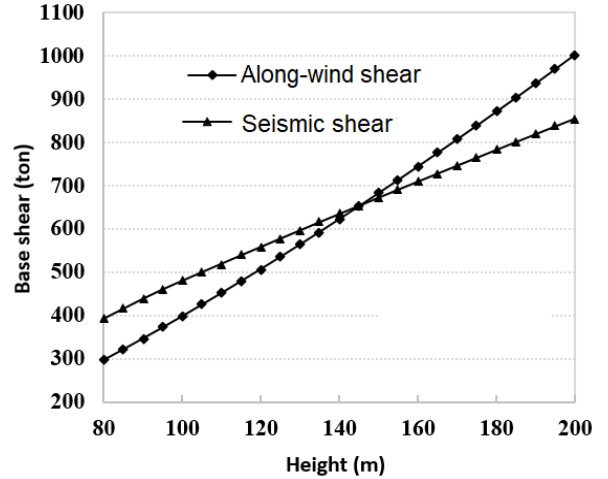


Fig. 1. Variation of base shear versus building height for square section

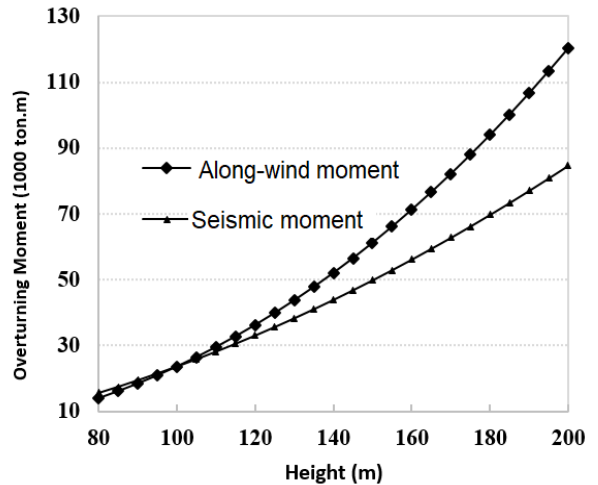


Fig. 2. Variation of overturning moment versus building height for square section

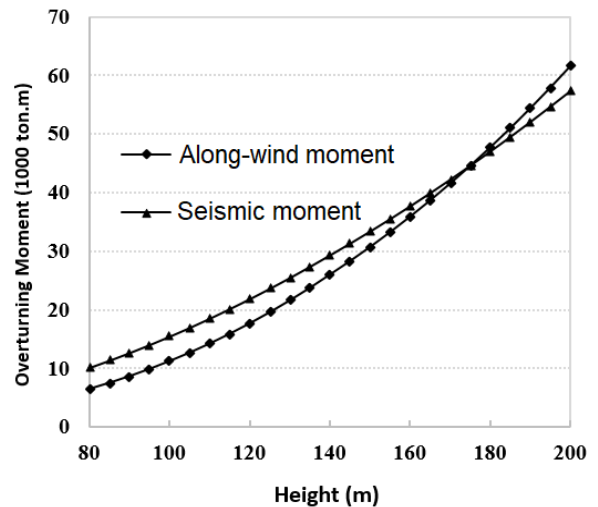
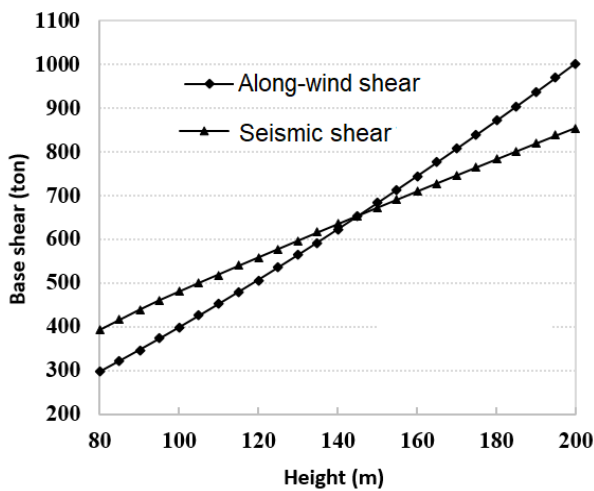
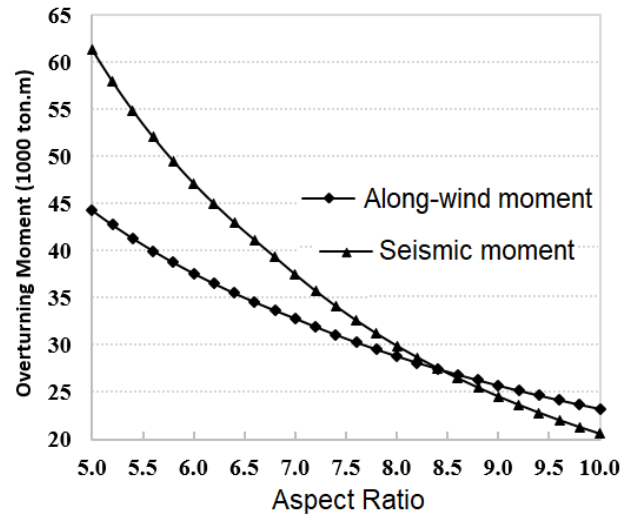


Fig. 3. Variation of overturning moment versus building height for circular section



**Fig. 4. Variation of overturning moment versus aspect ratio for square section**



**Fig. 5. Variation of overturning moment versus aspect ratio for circular section**

cross-sections, respectively. The seismic and wind-induced overturning moments are equal at  $h=100$  m and 175 m, respectively, for square and circular cross-sections. The ratio of wind to seismic overturning moment increases by increasing the building height. This result indicates that the wind forces govern the overturning moment by increasing building height.

In order to examine the effect of the aspect ratio, the lateral forces are obtained for a 150-m high building with the aspect ratio in the range of 5-10. Figures 4 and 5, show the variation of the overturning moment versus the aspect ratio for the square and circular cross-sections, respectively. The seismic and wind-induced overturning moments are equal at the aspect ratios of about 5.5 and 8.5, respectively, for the square and circular cross-sections. The ratio of the wind to the seismic overturning moment increases by increasing the building height. By increasing the aspect ratio, the overturning moment decreases for both square and circular cross-sections.

#### 4- Conclusion

In the present study, the overturning moment and base shear of tall buildings under wind and earthquake loads are parametrically obtained and compared by the assumption that the building is located in Tehran. The structural behavior of the building is regarded as a vertical cantilever building. The along-wind and seismic loads are estimated using the gust loading effect and linear spectral methods, respectively. Some of the main results can be summarized as follows:

By increasing the building height, wind lateral forces govern the overturning moment and base shear compared with the seismic effects. For instance, for  $h=200$  m, the wind-induced overturning moment is 42% more than that of the seismic loads for square cross-section.

The ratio of the wind-induced overturning moment and base shear to those of seismic loads increases by increasing the aspect ratio. For the aspect ratio of 10, the ratio of wind to seismic overturning moment are 1.13 and 1.49 for circular and square sections, respectively.

Using a circular cross-section for tall buildings compared with the circular section results in lower lateral forces. For instance, for a 200-m high building, the overturning moment for the circular section is 49% less than that for the square section.

#### References

- [1] A.G. Davenport, Gust loading factors, *Journal of the Structural Division, ASCE*, 93 (1967) 11-34.
- [2] B.J. Vickery, On the reliability of gust loading factors, *Proceedings of technical meeting concerning wind loads on buildings and structures*, 30 (1970) 296-312.
- [3] G. Solari, Gust buffeting. I: Peak wind velocity and equivalent pressure, *Journal of Structural Engineering*, 119(2) (1993a) 365-382.
- [4] G. Solari, Gust buffeting. II: Dynamic along-wind response, *Journal of Structural Engineering*, 119(2) (1993b) 383-397.
- [5] M.M. Ali, K.S. Moon, Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects, *Architectural Science Review*, 50(3) (2007) 205-223.
- [6] A. Sharma, H. Mittal, A. Gairola, Mitigation of wind load on tall buildings through aerodynamic modifications: Review, *Journal of Building Engineering*, 18 (2018) 180-194.
- [7] J.A. Amin, A.K. Ahuja, Aerodynamic modifications to the shape of the buildings: A review of the state-of-the-art, *Asian journal of civil engineering*, 11(4) (2010) 433-450.

- [8] A. Kareem, T. Kijewski, Y. Tamura, Mitigation of Motions of Tall Buildings with Specific Examples of Recent Applications, *Journal of wind and structures*, 3(4) (1999) 201-251.
- [9] E. H. Ghoniem, N. Ayyash, A. Essam, Seismic Response of High-rise Buildings with Different Structural Systems, *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, 8(9) (2018) 42-51.
- [10] I. Almufti, C.H. Molina, M. Willford, Seismic Assessment of Typical 1970s Tall Steel Moment Frame Buildings in Downtown San Francisco, in: 15 World Conference of Earthquake Engineering, Lisboa, 2012.
- [11] A. Esmailzad, A. khodabandelou, Investigating the Effect of Shear Walls Arrangement on Seismic Performance of High-rise Reinforced Concrete Buildings with Tube in Tube System, *Analysis of Structure and Earthquake*, 15(1) (2018) 51-60 (In Persian).
- [12] M. A. Aly, S. Abburu, On the Design of High-Rise Buildings for Multihazard: Fundamental Differences between Wind and Earthquake Demand, *Shock and Vibration*, (2015) Article ID 148681, DOI: 10.1155/2015/148681.
- [13] S. N. Thilakarathna, N. Anwar, P. Norachan, F. A. Naja, The Effect of Wind Loads on the Seismic Performance of Tall Buildings, *Athens Journal of Technology and Engineering*, 5(3) (2018) 251-276.
- [14] K. Heiza, M. Tayel, Comparative Study of the Effects of Wind and Earthquake Loads on High-rise Buildings, *Concrete Research Letters*, 3(1) (2012) 386-405.
- [15] Housing and Urban Development, Iranian national building code (Part 6): Applied loads on buildings, Ministry of Housing and Urban Development, Tehran, Iran, 2013 (In Persian).
- [16] Building and Housing Research Center, Iranian code of practice for seismic resistance design of buildings, Standard No. 2800, 4rd Edition, Publisher: BHRC, 2014 (In Persian).
- [17] Balendra T., 1993. "Vibration of Buildings to Wind and Earthquake Loads", Springer Verlag, Department of Civil Engineering National University of Singapore.

**HOW TO CITE THIS ARTICLE**

N. Khodaie, A. Rahimi, *Parametric study and comparison of overturning moment and base shear of tall buildings under earthquake and along-wind loads*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(5) (2022) 347-350.

DOI: [10.22060/ceej.2021.19831.7267](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.19831.7267)





## مطالعه پارامتری و مقایسه لنگر واژگونی و برش پایه ساختمان‌های بلند تحت اثر نیروهای زلزله و طولی باد

نهمت خدایی<sup>\*</sup>، عارف رحیمی

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خورموج، بوشهر، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۱۹  
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۳/۲۳  
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۰۱  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۴/۱۷

### کلمات کلیدی:

ساختمان بلند  
پاسخ طولی باد  
پاسخ لرزه‌ای  
لنگر واژگونی  
برش پایه

**خلاصه:** افزایش جمعیت و کمبود زمین در شهرهای بزرگ، موجب رونق ساختمان‌های بلند شده است. نیروهای جانبی باد و زلزله از عوامل اصلی در طراحی ساختمان‌های بلند می‌باشند. در این تحقیق، لنگر واژگونی و برش پایه ساختمان‌های بلند تحت اثر نیروهای طولی باد و زلزله مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. موقعیت سازه در شهر تهران روی زمین تپ‌دار و رفتار سازه بلند به صورت تیر طره‌ای قائم فرض شده است. نیروی طولی باد با روش ضریب تندباد و نیروی زلزله با تحلیل طیفی الاستیک تعیین شده است. برای تشریح مبانی محاسباتی، مثال اولیه‌ای از یک ساختمان بلند با ارتفاع ۱۲۰ متر ارائه و تحلیل شد و در ادامه، تاثیر پارامترهای ارتفاع سازه بین ۸۰ تا ۲۰۰ متر و نسبت لاغری بین ۵ تا ۱۰ برای دو نوع مقطع عرضی دایره و مربع بررسی گردید. برای مثال اولیه، در لنگر واژگونی و برش پایه زلزله، به ترتیب مود اول و دوم غالب‌تر بودند. برای مقطع مربع و دایره، نسبت لنگر واژگونی ناشی از باد به زلزله به ترتیب ۱/۱۰ و ۰/۸۱ بود. در بخش تحلیل پارامتری، لنگر واژگونی باد و زلزله در ارتفاع‌های مختلف یا نسبت لاغری‌های مشخصی با هم برابر بودند و با افزایش این پارامترها، اثر باد غالب‌تر بود. برای مقطع مربعی، لنگر واژگونی باد و زلزله در ارتفاع ۱۱۰ متر و برش پایه زلزله و باد در ارتفاع ۱۷۵ متر، یکسان بودند. برای ارتفاع ۲۰۰ متر، نیروی برش پایه و لنگر واژگونی ناشی از باد به ترتیب ۴۲ و ۱۷ درصد بیش از مقادیر ناشی از زلزله بودند.

### ۱- مقدمه

ارتفاع آن‌ها نسبت به تراز زیر شالوده ساختمان برابر است. طراحی سازه بایستی به نحوی صورت پذیرد تا از ضریب اطمینان مناسب در برابر واژگونی برخوردار باشد. هر دو نیروی زلزله و باد، خطر بالایی برای واژگونی سازه دارند و اگر چه در حالت کلی، عامل باد نقش موثرتری در طراحی سازه‌های بلند دارد، ولی سخت‌گیرانه‌تر شدن ضوابط نیروهای زلزله در سال‌های اخیر، موجب افزایش نیروهای طراحی زلزله شده است. اگر چه مطالعات متعددی در زمینه رفتار سازه‌های بلند در برابر باد و زلزله انجام شده است، ولی مطالعات محدودی به مقایسه عملکرد سازه‌های بلند در برابر باد و زلزله پرداخته‌اند. سرعت باد در امتداد وزش آن به دو مولفه سرعت میانگین و سرعت نوسانی قابل تجزیه می‌باشد. مولفه سرعت میانگین که مستقل از زمان است موجب پاسخ استاتیکی می‌شود و مولفه نوسانی سرعت باد، ارتعاش سازه در امتداد وزش باد را در پی دارد. اکثر آیین‌نامه‌ها و استانداردها برای تعیین نیروی استاتیکی معادل باد در امتداد طولی، از روش ضریب تندباد استفاده می‌کنند. مفهوم ضریب تندباد برای نخستین بار توسط داوینپورت<sup>۱</sup>

کمبود زمین در شهرهای بزرگ و افزایش روز افزون جمعیت از یک طرف و پیشرفت تکنولوژی در تولید مصالح با مقاومت بالا و توسعه برنامه‌های کامپیوتری از طرف دیگر، موجب افزایش طراحی و احداث ساختمان‌های مرتفع شده است. تعاریف متفاوتی برای ساختمان‌های بلند وجود دارد. ارتفاع سازه، نسبت لاغری و پیروید از معیارهایی هستند که در تعریف ساختمان‌های بلند مورد استفاده قرار می‌گیرند. از نظر مهندسی سازه، ساختمان بلند، سازه‌ای است که نیروهای جانبی باد و زلزله نقش اساسی در انتخاب سیستم سازه‌ای آن دارند. این سازه‌ها، به دلیل سطح زیربنای بالا و تعداد بالای ساکنین از سازه‌های حساس در برابر باد و زلزله محسوب می‌شوند و طراحی آن‌ها بایستی به نحوی صورت پذیرد تا ضمن تامین معیارهای آسایش ساکنین، از ایمنی جانی خوب و مطمئنی در شرایط زلزله و طوفان شدید برخوردار باشند. یکی از معیارهای تعیین کننده در طراحی ساختمان‌های بلند، لنگر واژگونی می‌باشد. لنگر واژگونی با مجموع حاصل ضرب نیروهای جانبی در



ساخت با مقاطع متفاوت در پلان را بررسی نمودند. سازه‌هایی که در پلان از خاصیت آیرودینامیک بیشتری برخوردارند رفتار بهتری در برابر نیروی باد از خود نشان دادند.

نیروهای زلزله نیز از عوامل مهم در طراحی ساختمان‌های بلند می‌باشند. تحقیقات گسترده‌ای در زمینه ارزیابی لرزه‌ای ساختمان‌های بلند موجود یا انتخاب فرم سازه‌ای و شکل هندسی مناسب برای آن‌ها انجام شده است. اردکانی و همکاران [۱۶] تاثیر فرم ساختمان‌های بلند بر پایداری آن‌ها را با هدف کاهش مخاطرات زلزله مورد بررسی قرار دادند. اشکال پلان با اضلاع بیشتر، رفتاری با سختی کمتر و انعطاف‌پذیری بیشتری را نشان دادند، اما با وزن سازه‌ای کمتر به عنوان فرم‌های بهینه شناخته شدند. گونیم<sup>۹</sup> و همکاران [۱۷] عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های بلند با فرم‌های مختلف شامل قاب صلب، دیوار برشی، قاب مرکب، سیستم خرپایی، قاب لوله‌ای، سیستم لوله‌ای مهار شده و دسته‌بندی شده را مطالعه نمودند و دریافتند سیستم لوله‌ای دسته‌بندی شده، عملکرد لرزه‌ای عالی برای سازه‌های بلند و فوق بلند از خود نشان می‌دهد. الموفتی<sup>۱۰</sup> و همکاران [۱۸] عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های بلند از نوع قاب خمشی فولادی در سانفرانسیسکو را که بر اساس آیین‌نامه ساختمانی یکنواخت<sup>۱۱</sup> ۱۹۷۳ طراحی شده بود، مطالعه نمودند و عملکرد آن‌ها را تحت سطح خطر زلزله بیشینه مشاهده شده<sup>۱۲</sup> بررسی نمودند و اعلام کردند در این حالت، حدود ۸۰ تا ۸۵ درصد این ساختمان‌ها با آسیب‌های جدی که می‌تواند خطرات جانی در پی داشته باشد و ارزش اقتصادی سازه را به طور کلی از بین ببرد، مواجه خواهند شد. اعتدادی و معمارپور [۱۹] رفتار ساختمان‌های لوله‌ای بلند را با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه مطالعه کردند. عبدی مقدم و مشکوه الدینی [۲۰] تاثیر تراز کمر بند سخت کننده را بر عملکرد ساختمان‌های بلند فولادی تحت زلزله‌های نزدیک گسل مطالعه نمودند. وجود کمر بند سخت کننده سبب افزایش سختی سازه و کاهش دررفت و لنگر پای سازه گردید. اسماعیل زاد و خدابنده لو [۲۱] تاثیر آرایش دیوارهای برشی در عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های بلند مرتبه بتن‌آرمه با سیستم لوله در لوله را مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند هر چه محل قرارگیری دیوارهای برشی از مرکز سازه به سمت محیط سازه سوق پیدا کند، عملکرد لرزه‌ای سازه بهتر می‌شود.

تاثیر نیروهای جانبی باد و زلزله روی ساختمان‌های بلند، عموماً به

[۱] معرفی شد و سپس طی مطالعات متعددی مورد بازنگری قرار گرفت که از آن جمله می‌توان به مطالعات ویکری<sup>۱</sup> [۲] و سولاری<sup>۲</sup> [۳ و ۴] اشاره نمود. ایمانی و خدایی [۵] مطالعه پارامتری بر روی ضریب تندباد ساختمان‌های بلند انجام دادند. پارامترهای متعددی از قبیل ارتفاع ساختمان، ابعاد پلان، سرعت مینای باد، نسبت لاغری و نسبت میرایی مورد بررسی قرار گرفت. مطالعات متعددی در زمینه مقایسه استانداردها و آیین‌نامه‌های معتبر در زمینه ضریب تندباد انجام گرفته که از آن جمله به مطالعات کیچوسکی و کریم<sup>۳</sup> [۶]، زو و همکاران<sup>۴</sup> [۷] و کوان و کریم<sup>۵</sup> [۸] می‌توان اشاره نمود.

نیروهای باد به دلیل ساختار فرکانسی خاصی که دارند، عامل اساسی در طراحی ساختمان‌های بلند محسوب می‌شوند. به همین دلیل، مطالعات گسترده‌ای در زمینه تاثیر باد بر ساختمان‌های بلند صورت گرفته است. بخش عمده‌ای از مطالعات در زمینه کنترل و کاهش تاثیر نیروهای باد بر سازه‌ها انجام شده است. علی و مون<sup>۶</sup> [۹] سیستم‌های سازه‌ای ساختمان‌های بلند را بر اساس توزیع اجزاء سیستم اصلی باربر جانبی در سازه، در دو مجموعه بزرگ سازه‌های داخلی و سازه‌های خارجی دسته‌بندی نمودند. شارما<sup>۷</sup> و همکاران [۱۰] طی مطالعه مروری، تاثیر اصلاحات آیرودینامیکی در کاهش اثر نیروهای باد انجام را مورد مطالعه قرار دادند. اصلاحات آیرودینامیکی بر مینای تاثیر آن‌ها در معماری خارجی ساختمان به دو گروه اصلاحات جزئی (بریدگی گوشه، گردی گوشه، گوشه دارای پخ) و اصلاحات اساسی (حالت مخروطی، عقب نشینی و پیچیدگی ساختمان در ارتفاع) تقسیم می‌شوند. مطالعات مشابه دیگری نیز انجام یافته است که از آن جمله به مطالعات امین و آهوچا<sup>۸</sup> [۱۱] و کریم و همکاران [۱۲] می‌توان اشاره نمود. عدل پرور و همکاران [۱۳] بار باد سازه‌های بلند مرتبه بتنی با مقطع ثابت و متغیر واقع در شهر تهران را با استانداردهای ایران، امریکا، اروپا، ژاپن و استرالیا تعیین نمودند و نتیجه گرفتند مقررات ملی ایران برای سازه‌های مفروض، محافظه‌کارانه‌تر است. سیاه پلو و همکاران [۱۴] مزایا و معایب انواع سیستم‌های رایج در سازه‌های بلند را در مقایسه با سیستم لوله پیرامونی تحت بارگذاری باد بر اساس ASCE7-10 مورد مطالعه قرار دادند. بخشی و همکاران [۱۵] تاثیرات آشفستگی ناشی از باد در ساختمان‌های بلند در هنگام

- 1 Vickery
- 2 Solari
- 3 Kijewski and Kareem
- 4 Zhou et al.
- 5 Kwon and Kareem
- 6 Ali and Moon
- 7 Sharma
- 8 Amin and Ahuja

9 Ghoniem

10 Almufti

11 Uniform building code (UBC 73)

12 Maximum Considered Earthquake

مطالعه شده با اشکال هندسی مختلف، در اثر نیروی باد، ضرایب تأخیر برشی بزرگ‌تری در مقایسه با نیروی زلزله نشان می‌دهند. تورکلی<sup>۵</sup> [۲۷] تأثیر نیروهای باد و زلزله را بر مناره‌های بتنی بلند با مطالعه موردی روی مناره با ارتفاع ۶۱ متری تعیین و مورد مقایسه قرار داد. نویسنده پیشنهاد داد طراحی این مناره‌ها بر اساس تحلیل تاریخچه زمانی نیروی زلزله انجام پذیرد و موقعیت‌هایی که دارای باز شو هست و با کاهش مقطع عرضی مواجه است مورد توجه خاص قرار گیرد.

نیروهای جانبی باد و زلزله عوامل تعیین کننده در انتخاب سیستم سازه‌ای و طراحی ساختمان‌های بلند محسوب می‌شوند. به همین دلیل، مطالعات گسترده‌ای در زمینه تأثیر نیروهای مذکور بر ساختمان‌های بلند و ارتعاشات ناشی از آن‌ها انجام پذیرفته است. با این حال، تحقیقات پیشین به صورت مستقل به بررسی تأثیر نیروی باد یا زلزله پرداخته‌اند و مطالعات محدودی در زمینه مقایسه نیروی باد و زلزله در ساختمان‌های بلند انجام گرفته است. همچنین، مقایسه‌های انجام گرفته در این زمینه، بر روی چند ساختمان خاص انجام شده است. در این تحقیق، تأثیر نیروهای جانبی باد و زلزله در لنگر واژگونی و برش پایه ساختمان‌های بلند به صورت پارامتری مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته‌اند و تأثیر عواملی از قبیل ارتفاع ساختمان، نسبت لاغری و نوع مقطع عرضی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به تحلیل‌های انجام شده، تغییرات برش پایه و لنگر واژگونی ناشی از باد و زلزله به ازای محدوده وسیعی از پارامترهای مذکور بررسی شده است. نیروی زلزله با استفاده از روش تحلیل دینامیکی طیفی تعیین شده و بر خلاف روش استاتیکی که بر مبنای مود اول استوار است، تأثیر موده‌های بالاتر در پاسخ لرزه‌ای در نظر گرفته شده است. این تحقیق با فرض واقع بودن ساختمان بلند در شهر تهران و بر اساس آیین‌نامه‌های تخصصی کشور انجام پذیرفته است و مبنای علمی، روش تحلیلی و نتایج ارائه شده در این مطالعه، اطلاعات کاربردی مناسبی را در زمینه طراحی اولیه ساختمان‌های بلند و بررسی و مقایسه رفتار آن‌ها در مقابل نیروهای جانبی باد و زلزله فراهم آورده است که می‌تواند مورد استفاده مهندسين طراح و پژوهشگران در این زمینه قرار گیرد.

## ۲- مبانی تئوری تحقیق

در این بخش، مبانی علمی لازم برای تحقیق ارائه شده است. نیروی باد با استفاده از روش ضریب تندباد که در مبحث ششم بارگذاری ساختمان [۲۸] ارائه شده است تعیین خواهد شد و نیروی زلزله با روش تحلیل طیفی

صورت مجزا مطالعه شده و تحقیقات محدودی تأثیر نیروهای مذکور را مورد مقایسه قرار داده‌اند. در این بخش، برخی از مقالات در زمینه مقایسه تأثیر نیروهای باد و زلزله در سازه‌های بلند تشریح می‌شود. علی و ابورو<sup>۱</sup> [۲۲] تفاوت‌های اساسی بین نیازهای سازه‌ای در مقابل نیروهای جانبی باد و زلزله را مورد مقایسه قرار دادند. تحلیل دینامیکی دو سازه ۵۴ و ۷۶ طبقه نشان داد نیروهای زلزله موده‌های بالاتر را تحریک می‌نمایند و در مقایسه با نیروی باد، دریافت کمتری ایجاد می‌کنند ولی باعث شتاب‌های بالاتری می‌شوند که برای زمان کوتاهی اتفاق می‌افتد. شتاب‌های ناشی از باد باعث نگرانی در خصوص آسایش ساکنین و شرایط بهره‌برداری می‌شود و دریافت اضافی بین طبقه‌ای می‌تواند مسائل ایمنی ایجاد نماید. تیلاکاراتنا<sup>۲</sup> و همکاران [۲۳] عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های بلند مرتبه که طراحی اولیه آن‌ها بر مبنای سه سطح متفاوت بار جانبی باد شامل حدود پایین، متوسط و شدید طراحی شده است را مورد بررسی قرار دادند. ساختمان ۴۰ طبقه با سیستم دوگانه هسته بتنی-قاب خمشی ویژه واقع در ناحیه خطر متوسط لرزه‌ای بررسی گردید. نتایج نشان داد سطح باد طراحی می‌تواند عملکرد لرزه‌ای سازه را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین، حتی در شرایطی که بار باد عامل تعیین کننده در طراحی سازه است، جهت اطمینان از ایمنی کلی، بایستی ارزیابی لرزه‌ای بر مبنای عملکرد سازه انجام پذیرد. ادنان و سورادی<sup>۳</sup> [۲۴] عملکرد ساختمان‌های بتن آرمه را تحت نیروهای زلزله و باد با مطالعه بر روی ۷ ساختمان در محدوده ارتفاعی ۴۸ تا ۱۶۹ متر واقع در کشور مالزی مورد مقایسه قرار دادند. نتایج نشان داد برای سازه‌های مطالعه شده، تحلیل استاتیکی زلزله در مقایسه با تحلیل استاتیکی باد، نیروهای جانبی بیشتری تولید می‌کند. همچنین، نیروهای جانبی زلزله موجب برش پایه و دریافت بیشتری می‌شود. هیزا و تایل<sup>۴</sup> [۲۵] نیروهای باد و زلزله را بر روی ساختمان‌های بلند مرتبه بر مبنای روش‌های ساده شده موجود در آیین‌نامه کشور مصر مورد مقایسه قرار دادند. تأثیر پارامترهایی از قبیل ارتفاع ساختمان، وزن طبقات، نوع خاک، شرایط مرزی و سایر عوامل موثر در نیروهای جانبی مورد ارزیابی قرار گرفت. مطابق این مطالعه، با افزایش ارتفاع ساختمان، نیروهای جانبی باد و زلزله با شیب قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابند. مقدسی و همکاران [۲۶] تأثیر نوع بار جانبی و شکل مقطع عرضی را بر روی تأخیر برشی ساختمان‌های بتن آرمه با سازه محیطی مورد مقایسه قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند همه سازه‌های

- 1 Ali and Abburu
- 2 Thilakarathna
- 3 Adnan and Suradi
- 4 Heiza and Tayel

## ۲-۲- محاسبه پاسخ سازه در امتداد طولی باد

مبحث ششم مقررات ملی، مشابه اکثر آیین‌نامه‌های بین‌المللی، از روش ضریب تندباد برای محاسبه پاسخ دینامیکی طولی استفاده نموده است. طبق این روش، فشار خارجی روی سطوح ساختمان از رابطه زیر قابل تخمین است:

$$p = I_w q C_e C_g C_p \quad (3)$$

که در آن،  $I_w$  ضریب اهمیت ساختمان،  $C_e$  ضریب بادگیری،  $C_g$  ضریب تندباد،  $q$  فشار مبنای باد و  $C_p$  ضریب فشار خارجی می‌باشد. روابط دینامیکی مبحث ششم برای ساختمان‌های بلندتر از ۶۰ متر و با نسبت ارتفاع به عرض بیش از ۴ و دیگر سازه‌هایی که کوچک‌ترین فرکانس طبیعی آن  $0.25 < f_n < 1$  باشد، الزامی است. ضریب شکل، تابعی از مقطع عرضی ساختمان است. مقدار ضریب شکل برای ساختمان‌های بلند با مقطع مستطیلی مطابق مبحث ششم ۱/۳ است. برای مقاطع دایره‌ای، بر اساس آیین‌نامه کانادا [۳۴]، ضریب شکل تابعی از نسبت ارتفاع به قطر مقطع سازه است. مقدار ضریب شکل برای نسبت‌های ارتفاع به قطر ۱، ۷ و ۲۵ به ترتیب ۰/۵، ۰/۶ و ۰/۷ است و برای سایر نسبت‌ها، از طریق میان‌یابی خطی قابل تعیین است. ضریب تندباد به صورت نسبت پاسخ طولی کل (شامل استاتیکی و دینامیکی) به پاسخ استاتیکی تعریف می‌شود و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$C_g = 1 + g_p \left( \frac{\sigma}{\mu} \right) \quad (4)$$

که در آن  $\mu$  اثر بارگذاری میانگین،  $g_p$  ضریب بیشینه آماری و  $\sigma$  جذر میانگین مربعات اثر بارگذاری می‌باشد. جدول ۱ رابطه ضریب تندباد و پارامترهای مربوطه را ارائه نموده است. در جدول مذکور،  $H$  ارتفاع و  $W$  عرض موثر وجه رو به ساختمان بر حسب متر،  $f_0$  فرکانس طبیعی ارتعاش سازه در جهت باد بر حسب هرتز،  $\beta$  ضریب میرایی در امتداد وزش باد،  $V_b$  سرعت مبنای باد بر حسب متر بر ثانیه و  $K$  ضریبی مربوط به ناهمواری‌های زمین است که برای نواحی شهری ۰/۱ می‌باشد.

الاستیک و ضوابط ارائه شده در آیین‌نامه ۲۸۰۰ [۲۹] محاسبه خواهد شد. مبنای روش تحقیق در قالب بخش‌های زیر ارائه شده است:

- مدل تحلیلی ساختمان بلند
- محاسبه پاسخ سازه ناشی از باد در امتداد وزش یا طولی باد
- مبنای آیین‌نامه‌ای محاسبه نیروی زلزله به روش طیفی ارتجاعی
- مبنای تئوری روش تحلیل طیفی
- تشریح مراحل انجام تحقیق

## ۲-۱- مدل تحلیلی ساختمان بلند

رفتار ساختمان‌های بلند تحت نیروهای جانبی، همانند تیرهای طره‌ای قائم است و مود تغییر شکل آن به صورت خمشی می‌باشد. لذا ساختمان بلند را می‌توان به صورت سیستم چند درجه آزادی با جرم‌های متمرکز در گره‌ها فرض نمود. در این صورت، در هر گره دو درجه آزادی انتقالی و خمشی موجود می‌باشد. برای کاهش تعداد درجات آزادی از روش تراکم درجات آزادی استفاده می‌شود و درجات آزادی دورانی در درجات آزادی انتقالی ادغام می‌شوند. در نتیجه، در هر گره، یک درجه آزادی انتقالی خواهیم داشت. در این روش که در مطالعات متعددی در زمینه ساختمان‌های بلند استفاده شده است [۳۰-۳۳]، مدل سازه به چندین المان تیر تقسیم می‌شود و ماتریس سختی هر المان تیر محاسبه می‌شود. سپس، ماتریس سختی کل سازه با ترکیب سختی المان‌ها تعیین می‌شود و پس از اعمال شرایط مرزی مربوط به پای گیردار سازه، تراکم ماتریس سختی انجام می‌شود. جزئیات مراحل در مقالات فوق‌الاشاره قابل مشاهده است. معادله ارتعاش سیستم چند درجه آزادی به صورت زیر قابل بیان است:

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

که در آن  $\mathbf{M}$  و  $\mathbf{C}$  و  $\mathbf{K}$  به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی کاهش یافته سازه،  $\mathbf{X}$  بردار جابجایی‌های گرهی و  $\mathbf{F}$  بردار نیروهای خارجی می‌باشد. ماتریس جرم متناظر با سیستم تراکم یافته، ماتریس قطری است که اعضای قطر اصلی آن، همان جرم‌های متمرکز گرهی می‌باشند:

$$\mathbf{M} = \text{diag} [m_i] \quad (2)$$



جدول ۱. رابطه ضریب تندباد و پارامترهای لازم برای محاسبه آن [۲۸]

Table 1. Gust loading factor formula and related parameters [28]

پارامتر	رابطه مربوطه
ضریب تندباد	$C_g = 1 + g_p \left( \frac{\sigma}{\mu} \right)$
ضریب تغییرات	$\frac{\sigma}{\mu} = \sqrt{\frac{K}{C_{eH}} \left( B + \frac{sF}{\beta} \right)}$
ضریب اوج یا بیشینه	$g_p = \sqrt{2Ln(vT)} + \frac{0.577}{\sqrt{2Ln(vT)}} \quad (T = 3600)$
نرخ متوسط نوسان	$v = f_n \sqrt{\frac{sF}{sF + \beta B}}$
ضریب کاهش اندازه	$s = \frac{1}{\left( 1 + \frac{8f_o H}{V_H} \right) \left( 1 + \frac{10f_o w}{V_H} \right)}$
ضریب انرژی جهشی در فرکانس طبیعی سازه	$F = \frac{x\omega^2}{(1+x\omega^2)^{4/3}} \quad x\omega = 1220 / (f_o V_H)$
سرعت میانگین باد در بالای سازه (متر بر ثانیه)	$V_H = \sqrt{C_{eH}} V_b$
ضریب بادگیری در بالای ساختمان برای مناطق شهری	$C_{eH} = 0.5 \left( \frac{H}{12.7} \right)^{0.5} \quad 0.5 \leq C_e \leq 2.5$
ضریب تلاطم زمینه ساختمان	$B = 4/3 \int_0^{914/H} \frac{1}{\left( 1 + \frac{xH}{457} \right) \left( 1 + \frac{xH}{457} \right)} \left[ \frac{x}{(1+x^2)^{4/3}} \right] dx$

این طیف، از حاصل ضرب مقادیر ضریب بازتاب ساختمان B در پارامترهای نسبت شتاب مبنای طرح A، ضریب اهمیت I و عکس ضریب رفتار به دست می‌آید. موقعیت ساختمان‌ها در این مطالعه، شهر تهران فرض شده که پهنه با خطر نسبی خیلی زیاد با نسبت شتاب مبنا به شتاب ثقل ۰/۳۵ است. ضریب اهمیت، شرایط ساختمان را بر حسب نوع کاربری و میزان آسیب‌رسانی ناشی از خرابی نشان می‌دهد. با توجه به احتمال نسبتاً بالای خطرات جانی در ساختمان‌های بلند، گروه ۲ یا خطر زیاد با ضریب اهمیت ۱/۲ در نظر گرفته شده است. ضریب رفتار در برگیرنده خصوصیاتمانند شکل‌پذیری، نامعینی و اضافه مقاومت موجود در سازه است. مطابق آیین‌نامه ۲۸۰۰، سیستم‌هایی که برای سازه‌های بلند قابل استفاده هستند ضریب رفتاری در بازه ۷ تا ۷/۵ دارند. لذا مقدار ضریب رفتار سازه بلند در این تحقیق ۷/۵ فرض شده است.

۲-۳- مبانی آیین‌نامه‌ای محاسبه نیروی زلزله به روش طیفی ارتجاعی  
 برای محاسبه نیروی زلزله از روش تحلیل طیفی ارتجاعی، پس از استخراج مشخصات دینامیکی سازه از قبیل ماتریس جرم و سختی، فرکانس‌ها و اشکال مودی سازه به روش تحلیل مودال تعیین شد. سپس، حداکثر پاسخ‌های سازه در مدهای مختلف بر مبنای زمان تناوب مربوطه، با استفاده از طیف طرح مبنا تعیین شد. پاسخ کل سازه، با ترکیب اثر مدهای مختلف با استفاده از روش آماری جذر مربعات محاسبه شد.

### ۲-۳-۱- طیف طرح استاندارد

آیین‌نامه ۲۸۰۰ طیف طرح استاندارد را برای شرایط مختلف از قبیل نوع زمین و پهنه‌بندی خطر زلزله به ازای میرایی ۵ درصد ارائه نموده است.

جدول ۲. ضرایب اصلاح میرایی برای طیف شتاب (Ba) برای زمین نوع دو و میرایی ۲٪ [۳۵]

Table 2. Damping modification factor for the acceleration spectra in type 2 soil and 2% damping ratio [35]

دوره تناوب	۰/۱	۰/۵	۱/۰	۲/۰	۳/۰	۶/۰
ضریب اصلاح میرایی	۱/۲۲	۱/۱۴	۱/۰۵	۱/۰۱	۱/۰	۱/۰

۲-۳-۲- اصلاح طیف طرح استاندارد برای نسبت میرایی فرض شده طیف طرح استاندارد در آیین نامه ۲۸۰۰ با فرض میرایی ۰.۵٪ سازه ارائه شده است. با توجه به اینکه مقدار میرایی در ساختمان‌های بلند عموماً بین ۱ تا ۲ درصد در نظر گرفته می‌شود، طیف مربوطه بایستی اصلاح شود. برای این منظور، از ضرایب اصلاح میرایی ارائه شده توسط حسین‌خانی و همکاران [۲۷] که بر مبنای زلزله‌های ایران تهیه شده، استفاده گردید. ضرایب اصلاح میرایی برای نسبت میرایی مفروض ۲٪ و زمین نوع ۲ به ازای مقادیر مختلف دوره تناوب در جدول ۲ ارائه شده است. ضریب میرایی برای هر مقدار دوره تناوب از طریق میان‌یابی قابل تعیین است.

۲-۴- مبانی تئوری روش تحلیل طیفی

معادله ارتعاش سیستم چند درجه آزادی که طبق رابطه (۱) ارائه شد با استفاده از تحلیل مودال، به صورت معادلات یک درجه آزادی زیر قابل بیان می‌باشد:

$$\ddot{y}_i + 2\xi_i \dot{y}_i + \omega_i^2 y_i = \frac{P_i}{M_i} \quad (۸)$$

$$P_i = \phi_i^T F, \quad M_i = \phi_i^T M \phi_i, \quad X = \phi y$$

که در آن  $M_i$ ،  $\xi_i$  و  $\omega_i$  به ترتیب جرم، نسبت میرایی و فرکانس زاویه‌ای مودی،  $\phi$  ماتریس شکل‌های مودی،  $y$  بردار متغیرهای یک درجه آزادی جدید و  $\phi_i$  بردار شکل مود  $i$ ام می‌باشند. هنگامی که سازه‌ای تحت شتاب پی  $a_g(t)$  قرار گیرد، حرکت سازه نسبت به زمین با استفاده از اصل دالامبر و با فرض و نیروهای مودی به صورت زیر قابل محاسبه است:

ضریب بازتاب ساختمان بیانگر نحوه پاسخ ساختمان به حرکت زمین با توجه به نوع آن است. این ضریب با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$B = B_1 N \quad (۵)$$

در این رابطه،  $B_1$  ضریب شکل طیف و  $N$  ضریب اصلاح طیف است که برای پهنه با خطر خیلی زیاد از روابط (۶) و (۷) قابل تعیین هستند:

$$B_1 = S_0 + (S - S_0 + 1) \left( \frac{T}{T_0} \right) \quad 0 < T < T_0$$

$$B_1 = S + 1 \quad T_0 < T < T_s \quad (۶)$$

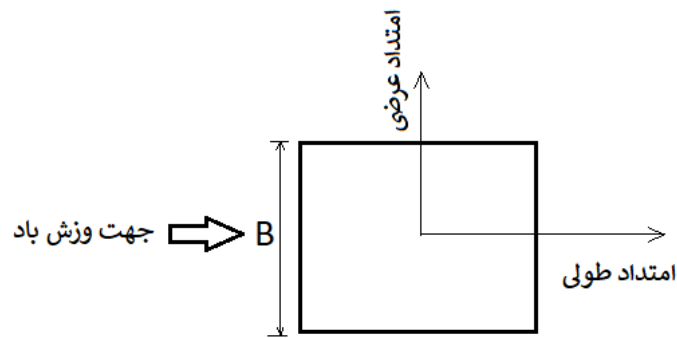
$$B_1 = (S + 1) \left( \frac{T_s}{T} \right) \quad T > T_s$$

$$N = 1 \quad T < T_s$$

$$N = \frac{0.7}{4 - T_s} (T - T_s) + 1 \quad T_s < T < 4 \text{ sec} \quad (۷)$$

$$N = 1.7 \quad T > 4 \text{ sec}$$

در این روابط،  $T$  زمان تناوب اصلی نوسان ساختمان به ثانیه است.  $T_0$ ،  $S$  و  $S_0$  پارامترهایی هستند که به نوع زمین و میزان خطر لرزه‌خیزی منطقه وابسته‌اند. نوع زمین در این تحقیق، تیپ ۲ فرض گردیده است.



شکل ۱. پلان ساختمان، جهت باد و امتدادهای طولی و عرضی

Fig. 1. Building plan and along-wind and cross-wind directions

### ۲-۵- محدودیت‌های پژوهش

با توجه به ماهیت و فرضیات در نظر گرفته شده، محدودیت‌هایی در انجام این تحقیق وجود دارد که البته با توجه به اهداف تحقیق قابل توجه می‌باشند. محدودیت‌های مورد نظر به شرح ذیل هستند:

لنگر واژگونی برابر با مجموع حاصل ضرب نیروهای جانبی موثر بر ساختمان در ارتفاع آن‌ها نسبت به تراز زیر شالوده ساختمان است. با توجه به اینکه هدف از تحقیق حاضر مطالعه پارامتری و مقایسه لنگر واژگونی ناشی از باد و زلزله می‌باشد، لنگر واژگونی، معادل با لنگر پای سازه در نظر گرفته شده است و از اثر ارتفاع فونداسیون در لنگر واژگونی صرف نظر شده است که با توجه به هدف تحقیق قابل توجه می‌باشد.

تاثیر دینامیکی باد بر ساختمان‌ها، مطابق شکل ۱ در دو امتداد طولی یا جهت وزش باد و عرضی یا عمود بر جهت وزش باد مورد بررسی قرار می‌گیرد. پاسخ دینامیکی سازه در امتداد طولی، ناشی از نوسانات سرعت باد در امتداد وزش آن است. ارتعاشات عرضی سازه در اثر جریان‌های گردابی که در پشت سازه ایجاد می‌شوند رخ می‌دهد. روابط ارائه شده در آیین‌نامه‌ها از جمله مبحث ششم، عموماً برای تعیین پاسخ طولی سازه است و روابطی برای محاسبه پاسخ عرضی ارائه نشده است. محاسبه پاسخ عرضی مستلزم تحلیل دینامیکی از جمله تحلیل حوزه فرکانس می‌باشد. پاسخ عرضی، عموماً در ساختمان‌های فوق بلند حائز اهمیت می‌باشد و با توجه به اینکه هدف از این تحقیق، مقایسه نیروهای داخلی در اثر زلزله و باد می‌باشد و ارتفاع سازه‌ها در محدوده متوسط تا بلند مد نظر است، بار طولی باد در نظر گرفته شده است. فرضیات آیین‌نامه‌ای در نظر گرفته شده در این تحقیق، از جمله سرعت مبنای باد و پهنه بندی خطر زلزله برای شهر تهران مورد نظر بوده است. لذا

$$P_i = -\phi_i^T [m_1 \ m_2 \ \dots \ m_n]^T a_g(t) = -L_i a_g(t), \quad (9)$$

$$L_i = \sum_{j=1}^n m_j \phi_{ji}$$

که در آن  $L_i$  ضریب مشارکت مود  $i$  ام می‌باشد. در این حالت، معادله حرکت برای محاسبه مقادیر پاسخ ماکزیمم با استفاده از طیف پاسخ زلزله قابل حل است. با این فرض، نیروی برش پایه وارد به سازه در مود  $i$  ام از رابطه زیر قابل تعیین است:

$$(V_i)_{max} = \frac{(L_i)^2}{M_i} (S_a)_i \quad (10)$$

که  $S_a$  پاسخ شتاب طیفی است. نیروی اینرسی وارده به جرم‌ها در هر مود از رابطه زیر قابل تعیین است:

$$(q_{ji})_{max} = \frac{m_i \phi_{ji}}{\sum_{j=1}^n m_j \phi_{ji}} (V_i)_{max} \quad (11)$$

برای به دست آوردن مقادیر کمیت‌های مختلف از قبیل نیروهای اینرسی، نیروی برش پایه و لنگر واژگونی بیشینه کل می‌توان از روش جذر مربعات کمیت‌های مربوطه در مودهای مختلف استفاده کرد.

مطالعه پارامتری انجام شده و نتایج حاصله با فرض اینکه سازه در شهر تهران واقع است قابل استناد است و با توجه به اینکه مبانی مذکور در شهرهای مختلف متفاوت است، نتایج نیز برای مناطق مختلف تا حدی متفاوت خواهد بود. به طور مثال، سرعت مبنای باد در شهر اصفهان، ۱۰ درصد بیش از تهران است و در نتیجه نیروهای ناشی از باد برای سازه‌های بلند واقع در شهر اصفهان، بیشتر از تهران خواهد بود.

## ۲-۶- تشریح مراحل انجام تحقیق و ساختار برنامه تهیه شده

در این بخش، مراحل انجام تحقیق و ساختار برنامه تهیه شده تشریح می‌شود. برای انجام مراحل تحقیق، در مرحله نخست، مثالی از ساختمان بلند با ارتفاع ۱۲۰ متر واقع در شهر تهران، با جزئیاتی که در بخش ۴ ذکر خواهد شد در نظر گرفته شد. نیروی برش پایه و لنگر خمشی واژگونی ناشی از باد و زلزله برای دو نوع مقطع عرضی محاسبه شد. پس از کامل شدن برنامه برای مثال اولیه، برنامه مذکور به صورت یک تابع در محیط نرم‌افزار متلب تعریف شد که ورودی آن، پارامترهای تحقیق از جمله ارتفاع سازه، نسبت لاغری و نوع مقطع عرضی و خروجی تابع نیز اهداف مورد نظر از جمله برش پایه و لنگر واژگونی بود. با توجه به تابع تهیه شده، حلقه‌هایی نوشته شد که در آن، به ازای مقادیر مختلف پارامترها مثل ارتفاع سازه، خروجی‌های مورد نظر استخراج گردید و تغییرات برش پایه و لنگر واژگونی به ازای تغییرات پارامترهای ورودی استخراج شد و به صورت گراف‌هایی ترسیم و مورد بحث و بررسی قرار گرفت. مراحل برنامه تهیه شده در قالب گام‌های زیر انجام پذیرفت:

۱- تعریف خصوصیات ساختمان شامل ارتفاع، نسبت لاغری، وزن حجمی ساختمان و سایر ورودی‌های لازم

۲- تعریف مشخصات باد طراحی مربوط به شهر تهران، شامل سرعت مبنای باد و توزیع سرعت باد در ارتفاع مطابق ضوابط مبحث ششم مقررات ملی ساختمان

۳- در نظر گرفتن ساختمان بلند به صورت تیر طره‌ای قائم و انتخاب تعداد گره و تعیین ارتفاع گره‌ها

۴- تعیین ماتریس سختی سازه با در نظر گرفتن مقدار واحد برای ممان اینرسی تراز پایه و بر اساس الگوی تغییرات سختی در نظر گرفته شده مطابق توضیحات بخش ۳-۱

۵- محاسبه نیروی استاتیکی باد بر حسب سرعت باد و سطح رو به باد در نقاط ارتفاعی گره‌ها

۶- تعیین مقدار سختی سازه به نحوی که جابجایی تراز فوقانی سازه در اثر باد، به مقدار مجاز محدود گردد. مبنای در نظر گرفته شده برای جابجایی مجاز در بخش ۳-۱ تشریح شده است.

۷- نهایی‌سازی ماتریس سختی بر اساس مقدار سختی تعیین شده و تعیین ماتریس جرم سازه مطابق توضیحات ارائه شده در بخش ۲-۱ مدل تحلیلی ساختمان

۸- محاسبه ضریب تندباد مطابق جزئیات و مراحل تعیین شده در جدول ۱

۹- محاسبه نیروی دینامیکی و کل باد در امتداد وزش آن با استفاده از روش ضریب تندباد طبق توضیحات بخش ۲-۲

۱۰- تعیین دیاگرام نیروی برشی و خمشی سازه ناشی از نیروی باد و محاسبه مقادیر نیروی برشی و لنگر خمشی پایه

۱۱- محاسبه فرکانس‌های طبیعی و اشکال مودی سازه با داشتن ماتریس جرم و سختی

۱۲- اصلاح طیف استاندارد زلزله برای میرایی ۲٪ مطابق جدول ۲ و توضیحات ۲-۳-۲

۱۳- تعیین پاسخ لرزه‌ای ماکزیمم سازه در مودهای مختلف با روش تحلیل طیفی مطابق مبانی علمی ارائه شده در بخش ۲-۴

۱۴- ترکیب پاسخ‌های لرزه‌ای مودهای مختلف و تعیین نیروهای اینرسی برای گره‌های مختلف مطابق توضیحات بخش ۲-۴

۱۵- محاسبه نیروهای برش پایه و لنگر واژگونی سازه تحت اثر نیروهای زلزله

۱۶- تبدیل برنامه تهیه شده به یک تابع که ورودی آن پارامترهای مورد بررسی مثل ارتفاع، نسبت لاغری و نوع مقطع و خروجی آن نیروهای داخلی ناشی از باد و زلزله است.

۱۷- استخراج خروجی‌های تابع به ازای تغییرات پارامترهای مورد مطالعه با نوشتن حلقه و فراخوانی تابع تهیه شده

۱۸- ترسیم گراف‌های تغییرات پارامترهای هدف در مقابل متغیرهای ورودی تابع

## ۳- مشخصات ساختمان مطالعه شده

در این بخش، خصوصیات ساختمان مورد مطالعه ذکر می‌شود. در مرحله اول، مثالی از یک ساختمان بلند ارائه می‌شود و نیروهای باد و زلزله بر اساس مبانی آیین‌نامه‌ای تعیین می‌شود و نیروی برشی و لنگر واژگونی تحت باد و زلزله مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در ادامه، مقایسه لنگر واژگونی و برش پایه به صورت پارامتری برای شرایط مختلف از قبیل تغییرات ارتفاع سازه و نسبت لاغری ارائه می‌شود. ضمناً مقطع عرضی سازه در دو حالت مربعی و دایره‌ای مورد بحث قرار می‌گیرد. فرضیات در مورد خواص فیزیکی ساختمان و خواص مهندسی باد و زلزله در ادامه ارائه می‌شود.

سازه مطابق توضیحات بخش ۳، ۷/۵ فرض شد.

### ۳-۱- خواص فیزیکی ساختمان مورد مطالعه

ارتفاع ساختمان ۱۲۰ متر و مقطع عرضی سازه دو حالت مربع با بعد ۲۰ متر و دایره با قطر ۲۰ متر، نسبت میرایی ۰.۲٪ و وزن واحد حجم ساختمان ۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب فرض شده است. سختی سازه در تراز فوقانی ۲۰ درصد سختی آن در تراز تحتانی و توزیع سختی در راستای قائم به صورت سهمی درجه ۲ منظور گردیده است. سختی ساختمان بر مبنای محدود نمودن جابجایی تراز فوقانی سازه در برابر نیروی باد به دست آمده است. برای این منظور، جابجایی استاتیکی تراز فوقانی ساختمان  $H/2000$  در نظر گرفته شده است. اگر مقدار مذکور را در ضریب تندباد (که معمولاً بین دو و سه قرار دارد) ضرب نموده و مقدار حاصل را به دلیل اثر پاسخ عرضی سازه حدود ۵۰ درصد افزایش دهیم، مقدار حاصل در محدوده جابجایی مجاز  $H/400$  تا  $H/600$  [۳۶] قرار می‌گیرد. با این فرض، با داشتن نیروی باد و توزیع سختی سازه، مقدار سختی سازه در تراز تحتانی به دست می‌آید.

### ۳-۲- خواص و مفروضات مهندسی باد

پاسخ طولی باد شامل مولفه استاتیکی و دینامیکی می‌باشد. برای محاسبه آن، پاسخ استاتیکی سازه تعیین می‌شود و با اعمال ضریب تندباد، پاسخ کل به دست می‌آید. محل قرارگیری ساختمان، شهر تهران با سرعت مبنای باد ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت و شدت مبنای باد  $0.613$  کیلونیوتن بر متر مربع و ضریب ناحیه  $k=0.1$  است. ضریب اهمیت سازه مطابق مبحث ششم، ۱/۱۵، دانسیته هوا  $\rho_a=1.25 \text{ kg/m}^3$  و ضریب شکل برای مقطع مربعی  $1/3$  و برای مقطع دایره تابعی از نسبت لاغری مطابق توضیحات بخش ۲-۲ و سایر فرضیات نیز مطابق مبحث ششم بخش بارگذاری باد در نظر گرفته شده است.

«با عنایت به الزام آیین‌نامه ۲۸۰۰ و مبحث ششم، ساختمان باید در دو جهت متعامد تحت نیروهای زلزله و باد مورد بررسی و طراحی قرار گیرد. با توجه به اینکه مقاطع عرضی ساختمان در این تحقیق به صورت متقارن انتخاب شده‌اند و هدف از تحقیق، مقایسه اثر باد و زلزله می‌باشد، نیروهای جانبی در جهات اصلی اعمال گردیده‌اند. برای مقطع عرضی مربع، جهت اعمال نیروی باد مطابق شکل ۱ می‌باشد.»

### ۳-۳- خواص و مفروضات مربوط به نیروی زلزله

محل قرارگیری ساختمان شهر تهران با خطر لرزه‌ای خیلی زیاد است. ضریب اهمیت سازه  $1/2$ ، زمین تیپ ۲، نسبت میرایی ۰.۲٪ و ضریب رفتار

### ۳-۴- جدول مشخصات ساختمان و پارامترهای بررسی شده

با توجه به فرضیات ذکر شده در قسمت‌های قبلی، مشخصات مدل ساختمان بلند با ۳۰ جرم متمرکز شده، در جدول ۳ ارائه شده است. اطلاعات شامل ارتفاع، ممان اینرسی، مقدار جرم متمرکز در هر گره برای دو حالت مقطع مربعی و دایره‌ای است. عرض مقابل باد برای هر دو مقطع ۲۰ متر است.

### ۴- نتایج و بحث

در این بخش، نتایج حاصل از تحقیق ارائه می‌شود. در مرحله نخست، نتایج برای مثال عددی اولیه که در بخش قبل معرفی گردید، تشریح می‌شود و در ادامه، تاثیر پارامترهای ارتفاع و نسبت لاغری تبیین می‌شود.

#### ۴-۱- نتایج مثال عددی ساختمان بلند

نتایج تحلیل نیروهای باد و زلزله برای ساختمان بلند ۱۲۰ متری با مقطع عرضی مربع و دایره، در قالب بخش‌های ضریب تندباد، نیروی برشی و لنگر خمشی ناشی از نیروی باد و نیروی زلزله و مقایسه آن‌ها در ادامه تشریح می‌شود.

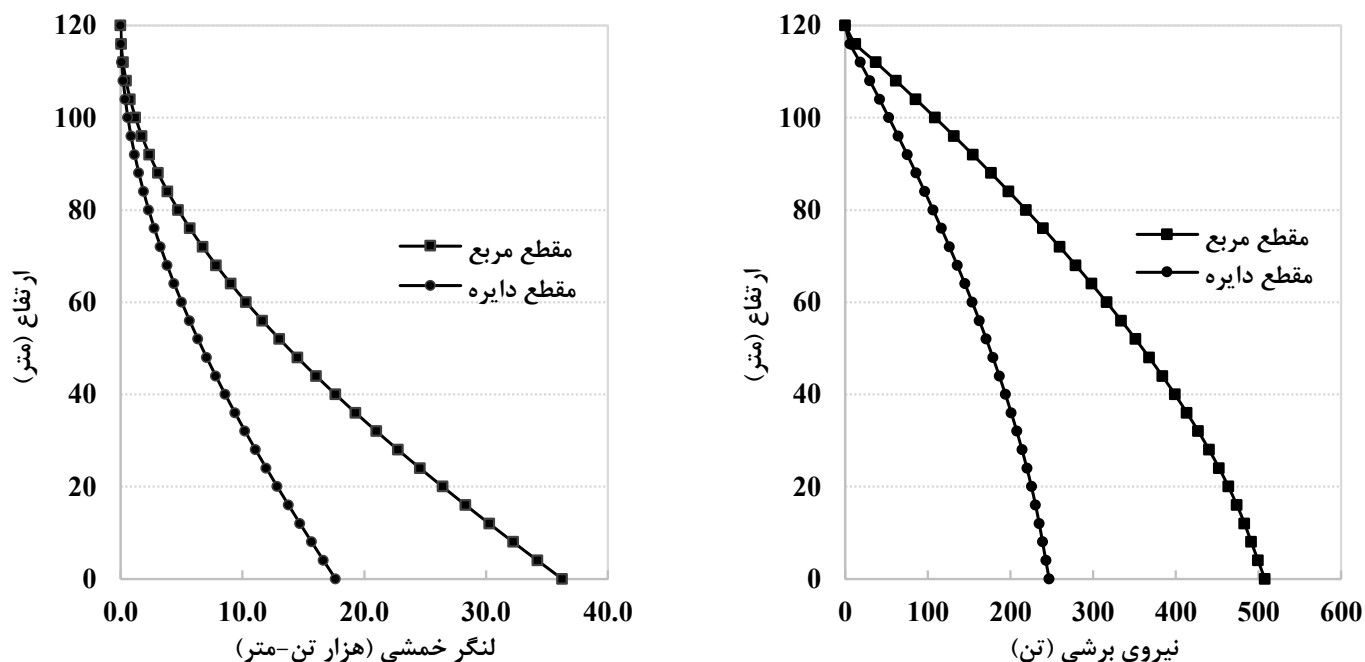
#### - ضریب تندباد

با توجه به اینکه محاسبه ضریب تندباد از گام‌های اولیه برای تعیین نیروی طولی باد است. مقادیر ضریب تندباد برای مقطع مربعی و دایره‌ای به ترتیب  $2/190$  و  $2/374$  تعیین شد که نشان می‌دهد ضریب تندباد مقطع دایره‌ای حدود  $8/5$  درصد بیشتر از مقطع مربعی است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، سازه با مقطع دایره‌ای به دلیل اینکه با نیروی باد کمتری مواجه است، به سختی کمتری برای تامین جابجایی مجاز نیاز دارد. اگر چه جرم سازه با مقطع دایره‌ای نیز نسبت به مقطع مربعی کمتر است، ولی میزان سختی این مقطع با کاهش بیشتری همراه است و در نتیجه، دوره تناوب ساختمان با مقطع دایره‌ای از مقطع مربعی بیشتر است. مقادیر دوره تناوب مقاطع مربعی و دایره‌ای به ترتیب  $2/74$  و  $3/62$  است. با توجه به محتوای فرکانسی نیروی باد، سازه‌های با دوره تناوب بالا از حساسیت بالاتری نسبت به نیروی باد برخوردار هستند و به همین دلیل، ضریب تندباد مقطع دایره‌ای بیشتر از مقطع مربعی می‌باشد.

جدول ۳. اطلاعات مدل تحلیلی ساختمان بلند مورد مطالعه

Table 3. Properties of the analytical model of the studied tall building

ردیف	ارتفاع (m)	ممان اینرسی (m <sup>4</sup> )		جرم (تن)	
		دایره	مربع	دایره	مربع
1	4.0	70.54	31.65	480.0	377.0
2	8.0	66.77	29.96	480.0	377.0
3	12.0	63.13	28.33	480.0	377.0
4	16.0	59.62	26.75	480.0	377.0
5	20.0	56.25	25.24	480.0	377.0
6	24.0	53.00	23.78	480.0	377.0
7	28.0	49.89	22.39	480.0	377.0
8	32.0	46.92	21.05	480.0	377.0
9	36.0	44.07	19.78	480.0	377.0
10	40.0	41.36	18.56	480.0	377.0
11	44.0	38.78	17.40	480.0	377.0
12	48.0	36.33	16.30	480.0	377.0
13	52.0	34.01	15.26	480.0	377.0
14	56.0	31.83	14.28	480.0	377.0
15	60.0	29.78	13.36	480.0	377.0
16	64.0	27.86	12.50	480.0	377.0
17	68.0	26.07	11.70	480.0	377.0
18	72.0	24.42	10.96	480.0	377.0
19	76.0	22.90	10.27	480.0	377.0
20	80.0	21.51	9.65	480.0	377.0
21	84.0	20.25	9.09	480.0	377.0
22	88.0	19.12	8.58	480.0	377.0
23	92.0	18.13	8.14	480.0	377.0
24	96.0	17.27	7.75	480.0	377.0
25	100.0	16.54	7.42	480.0	377.0
26	104.0	15.95	7.16	480.0	377.0
27	108.0	15.48	6.95	480.0	377.0
28	112.0	15.15	6.80	480.0	377.0
29	116.0	14.95	6.71	480.0	377.0
30	120.0	14.89	6.68	240.0	187.5



شکل ۲. نیروی برشی و لنگر خمشی ناشی از نیروی کل باد برای مقاطع عرضی مربع و دایره

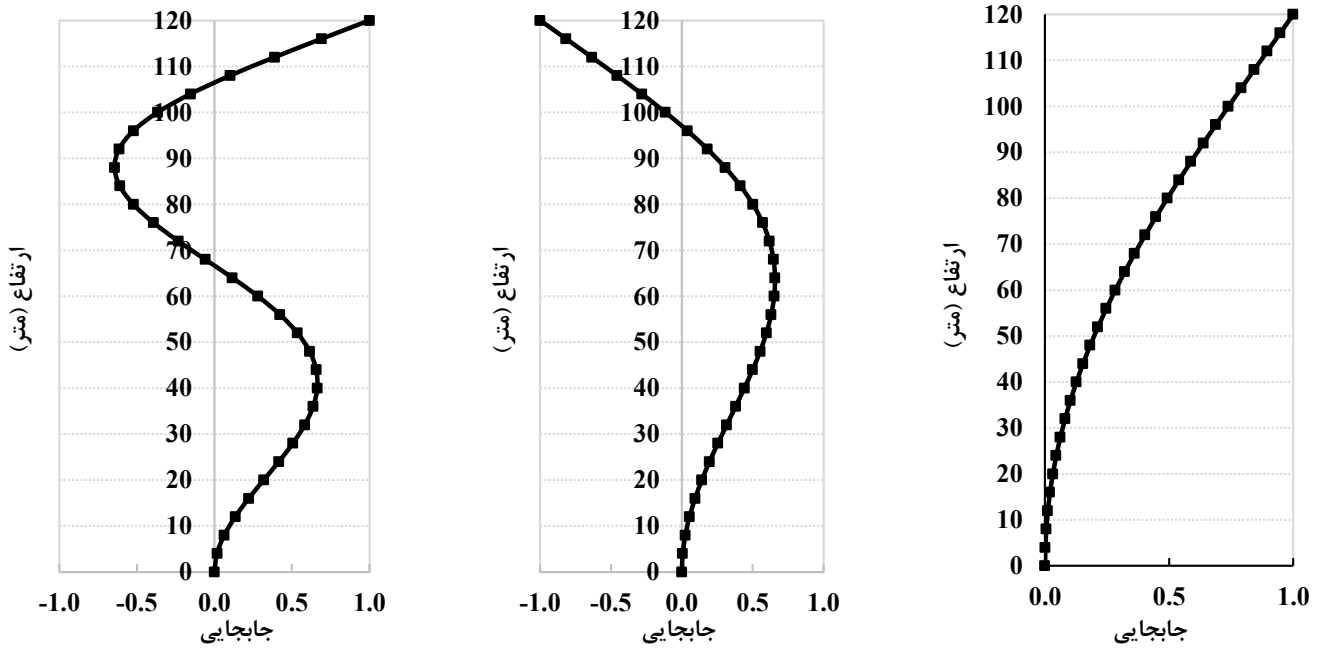
Fig. 2. Base shear and bending moment due to wind loads for the square and circular cross-sections

#### تحلیل طیفی و تعیین نیروهای داخلی ناشی از زلزله

تعیین نیروهای داخلی با استفاده از تحلیل طیفی، مطابق توضیحات بخش قبل، مستلزم تحلیل مودی سیستم و محاسبه دوره تناوب مودهای مختلف می‌باشد. تعداد اشکال مودی با تعداد درجات آزادی مدل برابر است. لذا برای سازه دارای ۳۰ درجه آزادی انتقالی، تعداد ۳۰ شکل مودی و فرکانس طبیعی قابل تعیین است. شکل ۳ اشکال مودی و دوره تناوب مربوطه را برای ۳ مود اول ساختمان با مقطع مربعی نشان می‌دهد. اشکال مودی ساختمان با مقطع دایره‌ای نیز دقیقاً مشابه مقطع مربعی است. دوره تناوب برای سه مود نخست مقطع مربعی به ترتیب  $۲/۷۳$ ،  $۰/۵۳$ ،  $۰/۲۰$  می‌باشد. شکل ۴ دوره‌های تناوب مودهای مختلف را برای ساختمان با مقطع عرضی مربع و دایره نشان می‌دهد. مطابق این شکل، دوره تناوب مود اول برای مقطع مربعی و دایره‌ای به ترتیب  $۲/۷۳$  و  $۳/۶۲$  ثانیه است. با افزایش شماره مودها، دوره تناوب کاهش می‌یابد و اختلاف دوره تناوب مقاطع مربع و دایره کمتر می‌شود. با توجه به اینکه مقدار بیشینه طیف استاندارد نیروی زلزله برای

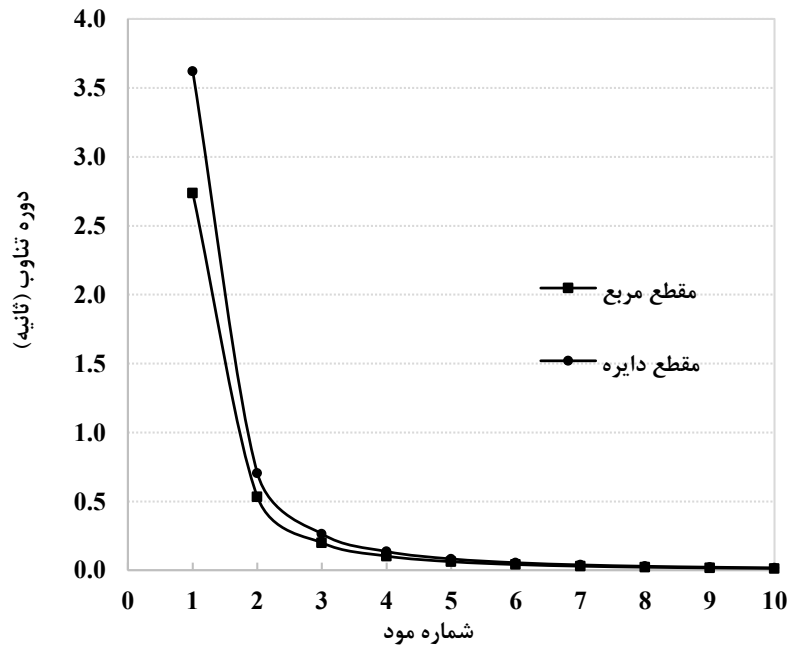
#### نیروی برشی و لنگر خمشی ناشی از نیروی باد

توزیع ارتفاعی نیروهای برشی و لنگر خمشی ناشی از نیروی باد برای مقاطع مربع و دایره در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در بخش قبلی مشاهده شد، ضریب تندباد برای مقطع دایره‌ای حدود ۸ درصد بیشتر از مقطع مربعی بود. با این حال، ضریب شکل مقطع دایره‌ای تا حد زیادی کم‌تر از مقطع مربعی است. برای مثال بالا، ضریب شکل ساختمان مورد مطالعه برای مقطع دایره‌ای و مربعی به ترتیب  $۰/۵۸$  و  $۱/۳$  است. لذا انتظار می‌رود نیروی برشی و لنگر خمشی برای مقطع دایره‌ای خیلی کمتر از مقطع مربعی باشد. شکل ۲ مویید نتیجه مذکور است. مقادیر نیروی برش پایه مقاطع دایره‌ای و مربعی به ترتیب حدود ۲۴۸ و ۵۰۸ تن و مقادیر لنگر خمشی پایه به ترتیب  $۱۷/۶$  و  $۳۶/۳$  هزار تن-متر است. در نتیجه، نیروهای داخلی برای مقطع دایره‌ای  $۴۸/۸$  درصد مقطع مربعی است و نشان می‌دهد، در حالتی که وجه مقابل باد یکسان باشد، استفاده از مقطع دایره‌ای، باعث کاهش حدود ۵۱ درصدی نیروی باد می‌شود.



شکل ۳. اشکال مودی و فرکانس‌های زاویه‌ای مربوطه برای سه مود اول ارتعاشی سازه (مود اول تا سوم از راست به چپ)

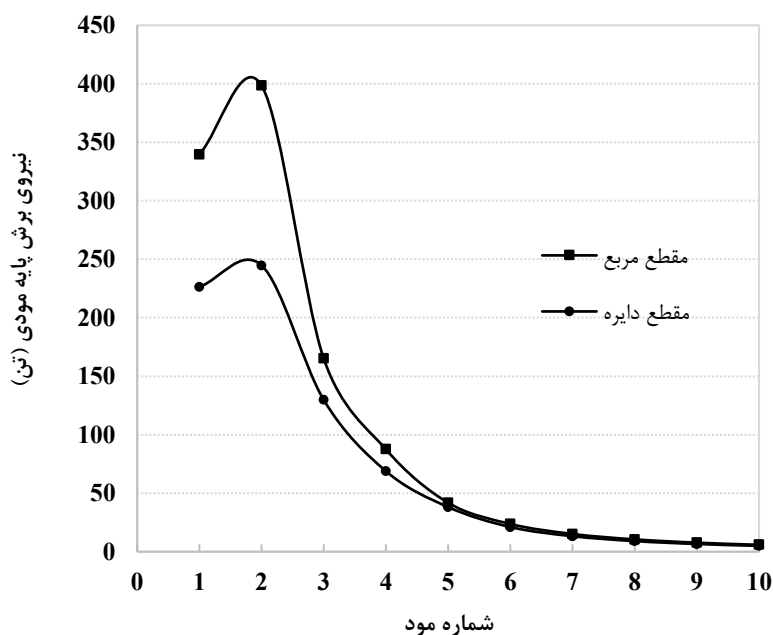
Fig. 3. Mode shapes and frequencies for the first three vibration modes



شکل ۴. دوره تناوب مودهای مختلف ارتعاشی سازه

Fig. 4. Time periods for different vibration modes





شکل ۵. برش پایه ناشی از نیروی زلزله در مودهای مختلف بر حسب تحلیل طیفی

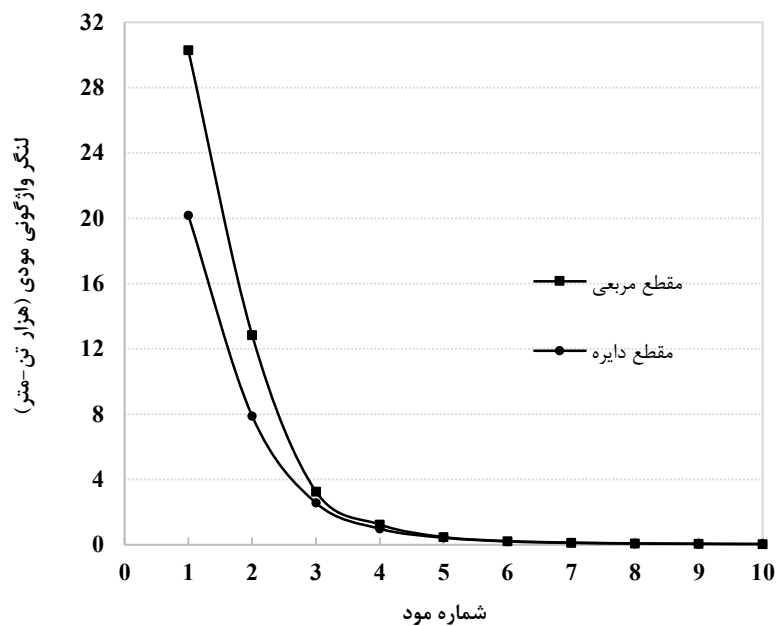
Fig. 5. Seismic base shear of different modes based on the spectral analysis

شکل ۶ لنگر واژگونی را در مقابل شماره مود نشان می‌دهد. طبق این شکل، لنگر واژگونی مقطع دایره‌ای کمتر از مقطع مربعی است. لنگر واژگونی مود اول مقطع مربعی و دایره‌ای به ترتیب  $30/29$  و  $20/18$  هزار تن-متر است. برخلاف حالت برش پایه که مود دوم غالب بود، در مورد لنگر واژگونی، سهم مود اول بیشتر از بقیه مودها است. دلیل این موضوع را می‌توان با توجه به شکل مودها توجیح نمود. در شکل مود اول، همه نیروهای اینرسی و جابجایی جرم‌ها مثبت هستند، در صورتی که در مود دوم جابجایی‌ها و نیروهای اینرسی در راستای ارتفاع دارای دو ناحیه خلاف جهت هم می‌باشند. مطابق این شکل، می‌توان ملاحظه نمود بیشترین مشارکت در لنگر واژگونی به پنج مود اول مربوط است و اثر سایر مودها را می‌توان نادیده گرفت. مقادیر لنگر واژگونی کل با تجمیع اثر مودهای مختلف به روش جذر مربعات برای مقاطع مربع و دایره به ترتیب  $33/08$  و  $21/84$  هزار تن-متر می‌باشد.

با توجه به اینکه هدف اصلی این تحقیق، مقایسه نیروهای داخلی پایه تحت اثر باد و زلزله می‌باشد، در این قسمت، نتایج برای مثال اولیه مورد مقایسه قرار می‌گیرد. جدول ۴ نیروی برش پایه و لنگر واژگونی را برای مقاطع مربع و دایره تحت اثر نیروی باد و زلزله ارائه نموده است. مطابق این جدول، نیروی برش پایه زلزله برای هر دو نوع مقطع عرضی، بیشتر از نیروی

زمین نوع ۲ در بازه  $0/1$  تا  $0/5$  ثانیه قرار دارد، انتظار می‌رود علاوه بر مود اول، مودهای دوم و سوم، نقش موثری در پاسخ لرزه‌ای آن داشته باشند.

شکل ۵ برش پایه ناشی از مودهای مختلف را برای ساختمان‌های با مقاطع مربع و دایره نشان می‌دهد. مطابق این شکل، برای هر دو مقطع، مود دوم مشارکت بیشتری در جذب نیروی برشی زلزله دارد. به طور مثال، برای مقطع مربعی، نیروی برش پایه ناشی از مودهای نخست و دوم به ترتیب  $339/63$  و  $398/47$  تن می‌باشد که نشان می‌دهد نیروی برش پایه مود دوم حدود ۱۷ درصد بیش از نیروی مود نخست است. برای این مقطع، نیروی برش پایه مود سوم  $165/2$  تن است. نتیجه دیگری که در این شکل مشاهده می‌شود، این است که شکل کلی منحنی برای مقطع دایره مشابه مقطع مربع است ولی برش پایه مقطع دایره به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از مقطع مربعی است. این موضوع می‌تواند ناشی از جرم پایین‌تر مقطع دایره‌ای نسبت به مقطع مربعی باشد. همچنین، دوره تناوب ساختمان با مقطع دایره بیشتر از مقطع مربعی است که با توجه به شکل طیف استاندارد، بالا بودن دوره تناوب می‌تواند موجب کاهش نیروی زلزله شود. نیروی برش پایه موثر کل بر اساس روش جذر مربعات برای مقاطع مربعی و دایره‌ای به ترتیب برابر  $558/52$  و  $367/27$  تن به دست آمده است.



شکل ۶. لنگر واژگونی ناشی از نیروی زلزله در مودهای مختلف بر حسب تحلیل طیفی

Fig. 6. Seismic overturning moment of different modes based on the spectral analysis

جدول ۴. نیروی برش پایه و لنگر واژگونی برای مقاطع مربع و دایره تحت اثر نیروی باد و زلزله

Table 4. Base shear and overturning moment for the square and circular cross-sections under wind and seismic loads

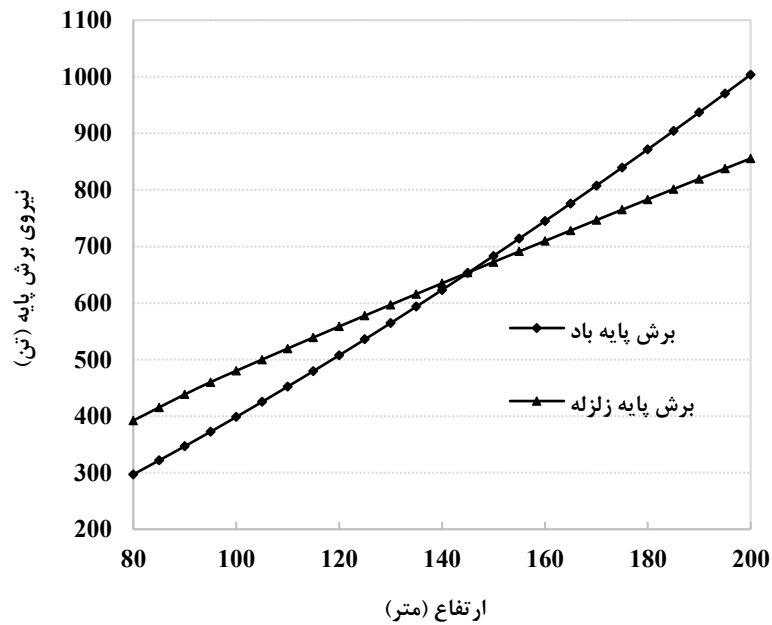
لنگر واژگونی (هزار تن-متر)		نیروی برش پایه (تن متر)		نوع مقطع عرضی
در اثر زلزله	در اثر باد	در اثر زلزله	در اثر باد	
۳۳/۰۸	۳۶/۲۷	۵۵۸/۵۲	۵۰۷/۷۱	مربع
۲۱/۸۴	۱۷/۶۴	۳۶۷/۲۷	۲۴۶/۹۰	دایره

۱۹ درصد کمتر از لنگر ناشی از زلزله است.

باد است. نسبت برش پایه زلزله به باد برای مقاطع مربع و دایره به ترتیب ۱/۱۰ و ۱/۴۹ می‌باشد. دلیل بالاتر بودن این نسبت برای مقطع دایره‌ای این است که این مقطع عملکرد مناسب‌تری در مقابل باد داشته و به دلیل خاصیت آیرودینامیکی مناسب، ممانعت کمتری در مقابل جریان هوا ایجاد می‌نماید. نتایج ارائه شده در این جدول نشان می‌دهد لنگر واژگونی ناشی از باد برای مقطع مربعی حدود ۱۰ درصد بیش از اثر زلزله است، در صورتی که موضوع برای مقطع دایره‌ای برعکس است و لنگر واژگونی ناشی از باد حدود

۴-۲- بررسی تاثیر پارامترهای ارتفاع و نسبت لاغری در برش پایه و لنگر واژگونی

در بخش قبل، نتایج برای مثال اولیه تشریح شد. در این قسمت، تاثیر پارامترهای ارتفاع و نسبت لاغری ساختمان در لنگر واژگونی و برش پایه مورد بررسی قرار می‌گیرد و نتایج برای دو نوع مقطع عرضی مربع و دایره ارائه می‌شود.



شکل ۷. تغییرات نیروی برش پایه در مقابل ارتفاع ساختمان برای مقطع عرضی مربع

Fig. 7. Variation of base shear versus building height for the square cross-section

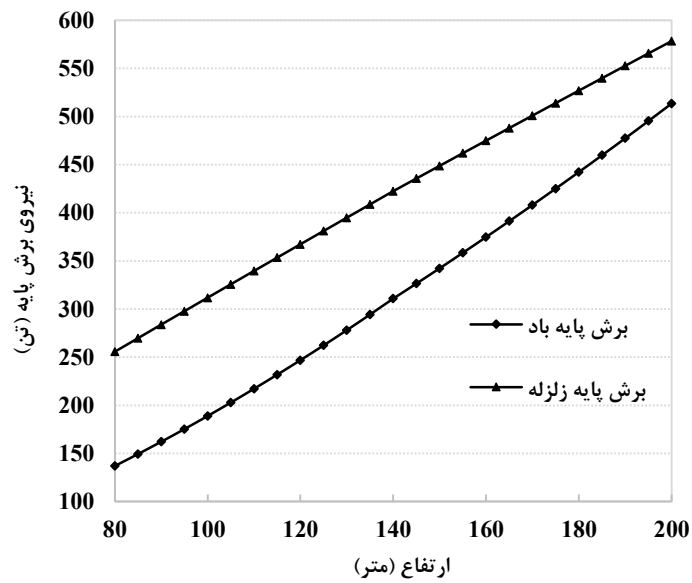
شکل‌های ۹ و ۱۰ تغییرات لنگر واژگونی را در مقابل ارتفاع ساختمان، به ترتیب برای مقاطع عرضی مربع و دایره نشان می‌دهند. مطابق شکل ۹، به ازای مشخصات فرض شده و مقطع عرضی مربع، مقدار لنگر واژگونی ناشی از باد و زلزله در ارتفاع ۱۰۰ متر با هم برابر هستند و با افزایش ارتفاع، لنگر واژگونی ناشی از باد غالب می‌شود. به نحوی که به ازای ارتفاع ۲۰۰ متر، نسبت لنگر واژگونی ناشی از باد به زلزله  $۱/۴۲$  می‌باشد. به عبارت دیگر، به ازای این ارتفاع، لنگر واژگونی باد ۴۲ درصد بیش از لنگر زلزله است. مطابق شکل ۱۰، برای مقطع عرضی دایره، مقدار لنگر واژگونی ناشی از باد و زلزله به ازای ارتفاع ۱۷۵ متر با هم برابر هستند و با افزایش ارتفاع، لنگر واژگونی ناشی از باد غالب می‌شود. نسبت لنگر واژگونی ناشی از باد به زلزله برای ارتفاع‌های ۸۰ و ۲۰۰ متر، به ترتیب  $۰/۶۴$  و  $۱/۰۷$  است.

مطابق نتایج حاصل از بررسی تاثیر متغیر ارتفاع، هر دو پارامتر لنگر خمشی و نیروی برشی پایه، با افزایش ارتفاع سازه افزایش می‌یابند. با این وجود، افزایش ارتفاع سازه، تاثیر افزایشی بیشتری در لنگر واژگونی دارد. با بیشتر شدن ارتفاع سازه، علاوه بر افزایش برآیند نیروی جانبی یا همان برش پایه، بازوی لنگر نیروی برآیند نیز افزایش می‌یابد و این عامل، تاثیر مضاعفی در افزایش لنگر واژگونی ایجاد می‌نماید. صحت این مطلب با بررسی اشکال

#### ۴-۲-۱- بررسی تاثیر پارامتر ارتفاع ساختمان

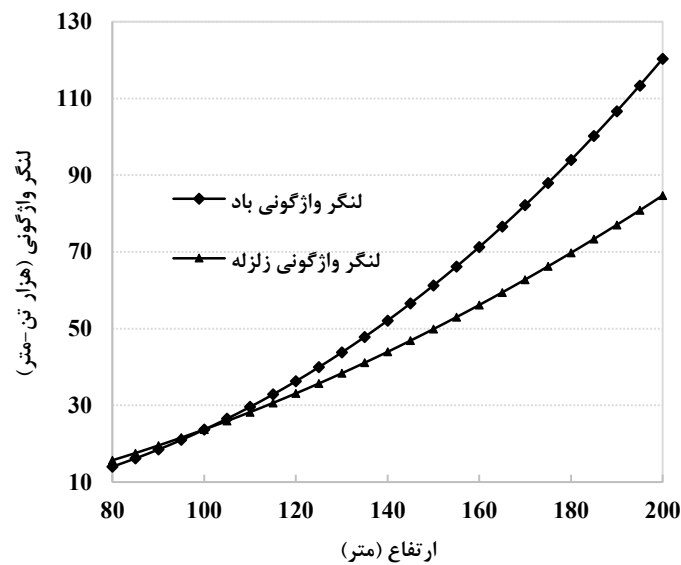
برای بررسی تاثیر ارتفاع ساختمان، محدوده ارتفاعی ۸۰ تا ۲۰۰ متر مورد نظر قرار گرفت. ابعاد مقطع عرضی مربع و قطر مقطع دایره مشابه قبل، ۲۰ متر در نظر گرفته شد و این ابعاد برای ارتفاع‌های مختلف، ثابت نگه داشته شد. به ازای هر مقدار از ارتفاع ساختمان، برش پایه و لنگر واژگونی برای دو نوع مقطع محاسبه شد. شکل ۷ تغییرات نیروی برش پایه را در مقابل ارتفاع ساختمان، برای مقطع عرضی مربع نشان می‌دهد. مطابق این شکل، مقادیر برش پایه ناشی از باد و زلزله، به ازای ارتفاع ۱۴۵ متر با هم مساوی هستند و برای ارتفاع بیش از آن، برش باد بیشتر است. برای ارتفاع ۲۰۰ متر، مقادیر برش پایه ناشی از باد و زلزله به ترتیب  $۱۰۰۳$  و  $۸۵۶$  تن است که نشان می‌دهد نیروی برش پایه باد ۱۷ درصد بیش از برش زلزله است.

شکل ۸ تغییرات نیروی برش پایه در مقابل ارتفاع ساختمان را برای مقطع عرضی دایره نشان می‌دهد. مطابق این شکل، به ازای همه مقادیر ارتفاع بررسی شده، برش پایه زلزله بیشتر از برش باد است ولی اختلاف کمیت‌های مذکور با افزایش ارتفاع کمتر می‌شود. به عبارت دیگر، با افزایش ارتفاع، نسبت برش پایه زلزله به باد کاهش می‌یابد. به طور مثال، مقدار این نسبت برای ارتفاع‌های ۸۰ و ۲۰۰ متر به ترتیب  $۱/۸۷$  و  $۱/۱۳$  می‌باشد.



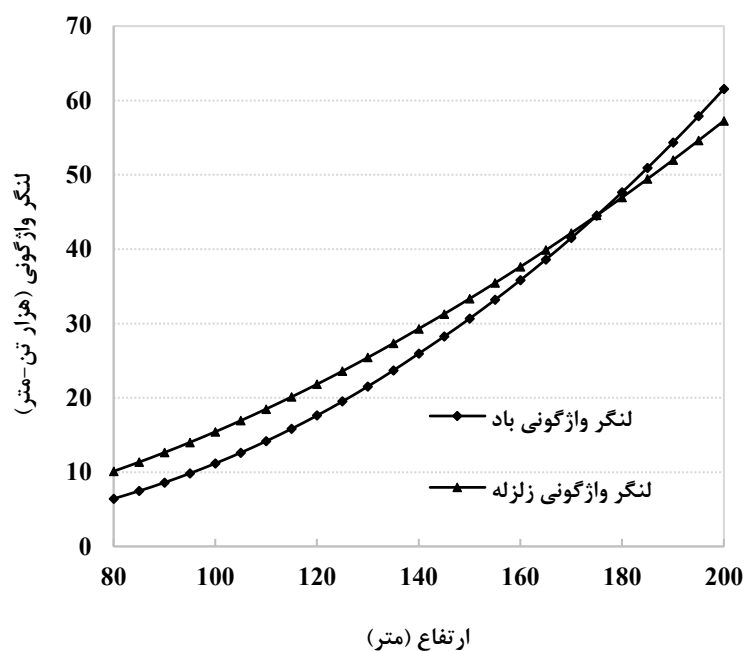
شکل ۸. تغییرات نیروی برش پایه در مقابل ارتفاع ساختمان برای مقطع عرضی دایره

Fig. 8. Variation of base shear versus building height for the circular cross-section



شکل ۹. تغییرات لنگر واژگونی در مقابل ارتفاع ساختمان برای مقطع عرضی مربع

Fig. 9. Variation of the overturning moment versus building height for the square cross-section



شکل ۱۰. تغییرات لنگر واژگونی در مقابل ارتفاع ساختمان برای مقطع عرضی دایره

Fig. 10. Variation of the overturning moment versus building height for the circular cross-section

۱۵۰ متر نگه داشته شد و نسبت لاغری در محدوده ۵ تا ۱۰ بررسی شد. به ازای هر مقدار لاغری ساختمان، مقادیر برش پایه و لنگر واژگونی برای مقاطع دایره و مربع محاسبه شدند. شکل ۱۱ تغییرات نیروی برش پایه را در مقابل نسبت لاغری برای مقطع عرضی مربع نشان می‌دهد. مطابق این شکل، مقادیر برش پایه ناشی از باد و زلزله به ازای نسبت لاغری  $۷/۴$  با هم مساوی هستند و با افزایش نسبت لاغری، نیروی برش پایه باد نسبت به برش زلزله افزایش می‌یابد. این موضوع می‌تواند به دلیل کمتر شدن جرم سازه با افزایش نسبت لاغری و کاهش نسبی نیروی زلزله باشد.

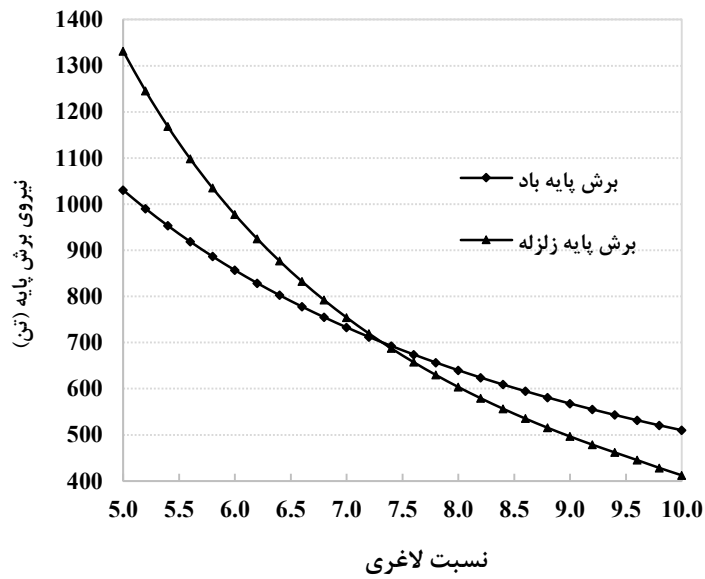
شکل ۱۲ تغییرات نیروی برش پایه را در مقابل نسبت لاغری برای مقطع عرضی دایره نشان می‌دهد. مطابق این شکل، به ازای کلیه مقادیر لاغری بررسی شده، برش پایه زلزله بیشتر از برش باد است ولی با افزایش نسبت لاغری، نسبت برش پایه زلزله به باد کاهش می‌یابد. به طور مثال، مقدار این نسبت برای لاغری‌های ۵ و ۱۰ به ترتیب  $۱/۷۵$  و  $۱/۰۷$  می‌باشد. در مجموع، با لاغرتر شدن سازه، نیروی باد و زلزله کاهش یافته و نیروی برشی ناشی از آن‌ها نیز کمتر می‌شود.

شکل‌های ۱۳ و ۱۴ تغییرات لنگر واژگونی را در مقابل نسبت لاغری

۷ تا ۱۰ قابل مشاهده است. به طور مثال، با افزایش ارتفاع سازه از ۱۰۰ متر به ۲۰۰ متر برای مقطع عرضی مربع، برش پایه ناشی از باد و زلزله به ترتیب  $۲/۵۲$  و  $۱/۷۸$  برابر شده است در صورتی که لنگر واژگونی زلزله و باد به ترتیب با افزایش  $۳/۵۸$  و  $۵/۰۸$  برابری همراه بوده‌اند. در نتیجه، می‌توان گفت با افزایش ارتفاع سازه، لنگر خمشی پایه در مقایسه با نیروی برش پایه مهم‌تر خواهد بود. همچنین، اعداد مذکور نشان می‌دهد با افزایش ارتفاع ساختمان، افزایش نیروهای داخلی ناشی از باد، بیشتر از زلزله می‌باشد.

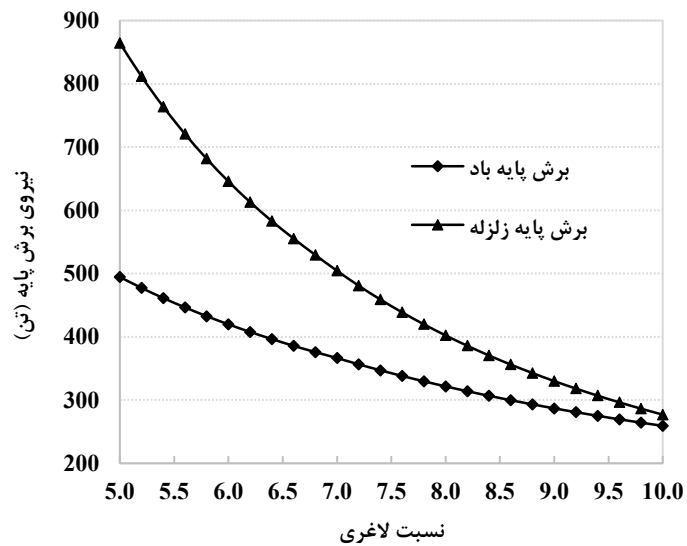
۴-۲-۲ تاثیر نسبت لاغری ساختمان در برش پایه و لنگر واژگونی ناشی از باد و زلزله

نسبت لاغری معیاری است که متناسب با نسبت ارتفاع ساختمان به بعد آن در پلان می‌باشد. رابطه عمومی نسبت لاغری در برخی از آیین‌نامه‌ها، به صورت نسبت ارتفاع ساختمان به جذر مساحت آن در پلان تعریف می‌شود. در این تحقیق که مقاطع عرضی ساختمان به صورت مربع و دایره فرض شده است، پارامتر لاغری به صورت نسبت ارتفاع به بعد مقابل باد تعریف شده است. برای بررسی تاثیر نسبت لاغری، ارتفاع ساختمان در مقدار ثابت



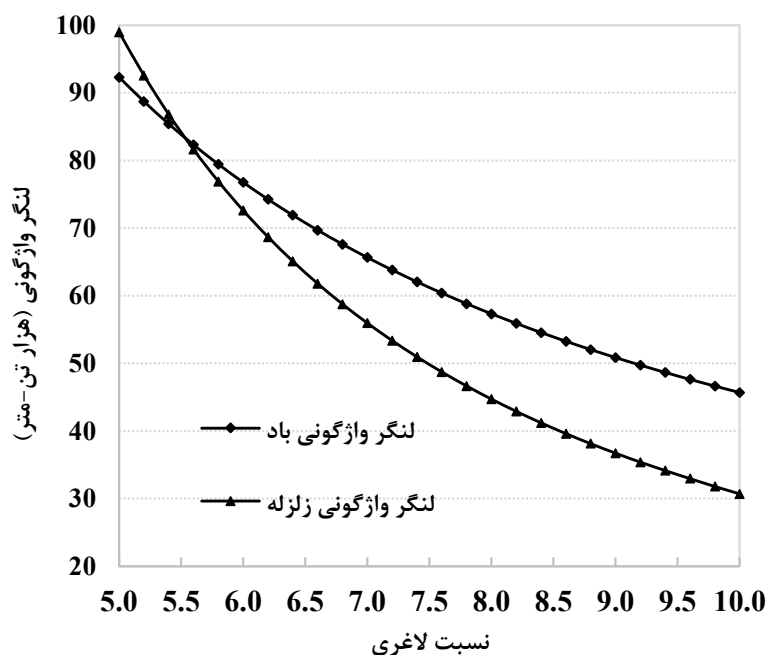
شکل ۱۱. تغییرات نیروی برش پایه در مقابل نسبت لاغری ساختمان برای مقطع عرضی مربع

Fig. 11. Variation of the base shear versus aspect ratio for the square cross-section



شکل ۱۲. تغییرات نیروی برش پایه در مقابل نسبت لاغری ساختمان برای مقطع عرضی دایره

Fig. 12. Variation of the base shear versus aspect ratio for the circular cross-section



شکل ۱۳. تغییرات لنگر واژگونی در مقابل نسبت لاغری ساختمان برای مقطع عرضی مربع

Fig. 13. Variation of the overturning moment versus aspect ratio for the square cross-section

با روش ضریب تندباد تعیین شد. رفتار سازه به صورت تیر طره‌ای قائم با جرم‌های متمرکز در گره‌ها در نظر گرفته شد. برای تعیین سختی ساختمان از مبنای جابجایی مجاز تراز فوقانی سازه تحت اثر بار باد استفاده شد و مراحل تحلیل با برنامه نویسی در محیط نرم‌افزار متلب انجام گرفت. در مرحله نخست، مثالی از ساختمان بلند با ارتفاع ۱۲۰ متر با دو نوع مقطع عرضی مربع و دایره به بعد ۲۰ متر مورد بحث و بررسی قرار گرفت و در ادامه، تاثیر پارامترهای ارتفاع ساختمان و نسبت لاغری برای دو حالت مقطع عرضی مربع و دایره بررسی گردید. محدوده تغییر ارتفاع بین ۸۰ تا ۲۰۰ متر تعریف شد که در این حالت بعد ساختمان در پلان ۲۰ متر فرض شد. در حالت بررسی تاثیر نسبت لاغری، ارتفاع ساختمان ۱۵۰ متر فرض گردید و نسبت لاغری بین ۵ تا ۱۰ فرض گردید. برخی از نتایج مهم برای سه حالت مثال اولیه، تحلیل پارامتری اثر ارتفاع و نسبت لاغری به شرح ذیل ارائه می‌شود:

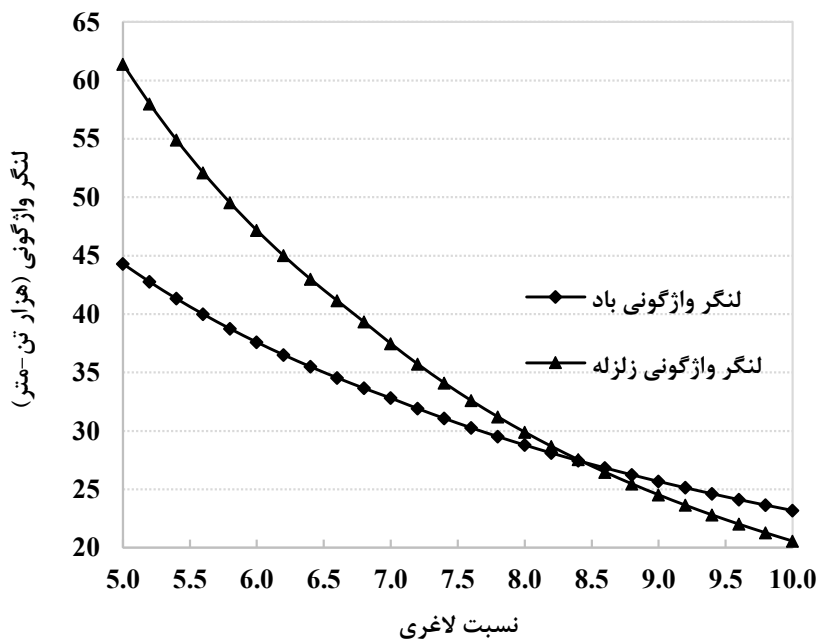
۱- برای مثال اولیه (ساختمان با ارتفاع ۱۲۰ متر)، نسبت نیروهای داخلی تحت اثر باد در حالت مقطع دایره‌ای به مقطع مربعی ۴۸/۸ درصد بود و استفاده از مقطع دایره‌ای در مقایسه با مقطع مربعی، باعث کاهش حدود ۵۱ درصدی نیروی باد گردید. در خصوص نیروی زلزله، برای هر دو حالت مقطع مربع و دایره، مود دوم مشارکت بیشتری در جذب نیروی برشی زلزله داشت.

ساختمان، به ترتیب برای مقاطع عرضی مربع و دایره نشان می‌دهند. مطابق شکل ۱۳، برای مقطع عرضی مربع، مقدار لنگر واژگونی ناشی از باد و زلزله به ازای نسبت لاغری ۵/۵ با هم برابر هستند و با افزایش نسبت لاغری، لنگر واژگونی باد در مقایسه با زلزله بیشتر می‌شود. به نحوی که به ازای نسبت لاغری ۱۰، لنگر واژگونی ناشی از باد، ۴۹ درصد بیش از لنگر زلزله است.

طبق شکل ۱۴، برای مقطع عرضی دایره، مقدار لنگر واژگونی ناشی از باد و زلزله به ازای نسبت لاغری ۸/۴ با هم برابر هستند و با افزایش نسبت لاغری، لنگر واژگونی ناشی از باد غالب می‌شود. نسبت لنگر واژگونی باد به زلزله برای نسبت‌های لاغری ۵ و ۱۰ به ترتیب ۰/۷۲ و ۱/۱۳ است.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، لنگر واژگونی و نیروی برشی پایه در ساختمان‌های بلند تحت اثر نیروهای زلزله و طولی باد مورد مقایسه قرار گرفت. موقعیت ساختمان در شهر تهران و نوع زمین تیپ دو فرض گردید. برای محاسبه نیروی زلزله از تحلیلی دینامیکی طیفی ارتجاعی با طیف طرح استاندارد اصلاح شده بر اساس نسبت میرایی ۲٪ استفاده شد و نیروی طولی باد



شکل ۱۴. تغییرات لنگر واژگونی در مقابل نسبت لاغری ساختمان برای مقطع عرضی دایره

Fig. 14. Variation of the overturning moment versus aspect ratio for the circular cross-section

میشود. به طور مثال، نسبت برش پایه زلزله به باد برای ارتفاع‌های ۸۰ و ۲۰۰ متر به ترتیب  $1/87$  و  $1/13$  بود. در این حالت، مقدار لنگر واژگونی ناشی از باد و زلزله به ازای ارتفاع ۱۷۵ متر با هم برابر بودند و با افزایش ارتفاع، لنگر واژگونی ناشی از باد غالب می‌شد.

۴- مطابق نتایج حاصل از بررسی متغیر ارتفاع، هر دو پارامتر لنگر خمشی و نیروی برش پایه، با افزایش ارتفاع سازه افزایش می‌یابند. با این وجود، افزایش ارتفاع سازه، تاثیر افزایشی بیشتری در لنگر واژگونی دارد. با افزایش ارتفاع سازه، علاوه بر افزایش برآیند نیروی جانبی یا همان برش پایه، بازوی لنگر نیروی برآیند نیز افزایش می‌یابد و این عامل، تاثیر مضاعفی در افزایش لنگر واژگونی ایجاد می‌نماید. به طور مثال، با افزایش ارتفاع سازه از ۱۰۰ متر به ۲۰۰ متر برای مقطع عرضی مربع، برش پایه ناشی از باد و زلزله به ترتیب  $2/52$  و  $1/78$  برابر شد، در صورتی که لنگر واژگونی زلزله و باد به ترتیب با افزایش  $3/58$  و  $5/08$  برابری همراه بودند. لذا، با افزایش ارتفاع سازه، لنگر واژگونی در مقایسه با نیروی برش پایه مهم‌تر خواهد بود.

۵- در حالت بررسی تاثیر نسبت لاغری، برای مقطع عرضی مربع، مقادیر برش پایه ناشی از باد و زلزله به ازای نسبت لاغری  $7/4$  با هم مساوی

به طور مثال، برای مقطع مربعی، نیروی برش پایه مود دوم حدود ۱۷ درصد بیش از نیروی مود اول بود. برای این مثال، نیروی برش پایه ناشی از زلزله برای مقاطع مربع و دایره به ترتیب ۱۰ و ۴۸ درصد بیش از برش پایه ناشی از باد بود. لنگر واژگونی ناشی از باد برای مقطع مربعی حدود ۱۰ درصد بیش از لنگر زلزله بود. در صورتی که برای مقطع دایره‌ای، نتیجه برعکس بود و لنگر واژگونی ناشی از باد حدود ۱۹ درصد کمتر از لنگر ناشی از زلزله است.

۲- در حالت بررسی تاثیر پارامتر ارتفاع، برای مقطع عرضی مربع، مقادیر برش پایه ناشی از باد و زلزله به ازای ارتفاع ۱۴۵ متر با هم مساوی بودند و با افزایش ارتفاع، برش پایه باد بیشتر از برش زلزله بود. برای ارتفاع ۲۰۰ متر نیروی برش پایه باد ۱۷ درصد بیش از برش ناشی از زلزله بود. برای این مقطع، مقدار لنگر واژگونی ناشی از باد و زلزله به ازای ارتفاع ۱۰۰ متر با هم برابر بودند و با افزایش ارتفاع، لنگر واژگونی ناشی از باد غالب‌تر بود. به نحوی که به ازای ارتفاع ۲۰۰ متر لنگر واژگونی ناشی از باد، ۴۲ درصد بیش از لنگر ناشی از زلزله بود.

۳- برای مقطع دایره، برش پایه ناشی از زلزله برای همه مقادیر ارتفاع، بیشتر از برش باد بود، ولی اختلاف کمیت‌های مذکور با افزایش ارتفاع کمتر



- (1993b) 383–397.
- [5] H. Eimani, N. Khodaie, Parametric study on the Gust Loading Factor (GLF) of the along-wind loads on tall buildings, in: 15th Civil Engineering Students Conference, Urmia University, Urmia, Iran, 2014.
- [6] T. Kijewski, and A. Kareem, Dynamic wind effects: A comparative study of provisions in codes and standards with wind tunnel data, *Wind and Structures an International Journal*, 1(1) (1998) 77–109.
- [7] Y. Zhou, T. Kijewski, A. Kareem, Along-wind load effects on tall buildings: Comparative study of major international codes and standards, *Journal of Structural Engineering*, ASCE., 128 (2002) 788–96.
- [8] D.K. Kwon and A. Kareem, Comparative study of major international wind codes and standards for wind effects on tall buildings, *Engineering Structures*, 51 (2013) 23–35.
- [9] M.M. Ali, K.S. Moon, Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects, *Architectural Science Review*, 50(3) (2007) 205-223.
- [10] A. Sharma, H. Mittal, A. Gairola, Mitigation of wind load on tall buildings through aerodynamic modifications: Review, *Journal of Building Engineering*, 18 (2018) 180-194.
- [11] J.A. Amin, A.K. Ahuja, Aerodynamic modifications to the shape of the buildings: A review of the state-of-the-art, *Asian journal of civil engineering*, 11(4) (2010) 433-450.
- [12] A. Kareem, T. Kijewski, Y. Tamura, Mitigation of Motions of Tall Buildings with Specific Examples of Recent Applications, *Journal of wind and structures*, 3(4) (1999) 201-251.
- [13] M. Adlparvar, M. Mahmoudabadi, M. Taghavi Parsa, Code Evaluation of Wind Loading for High-Rise Buildings

بودند. با افزایش نسبت لاغری، نیروی برش پایه باد نسبت به زلزله افزایش می‌یافت. در این حالت، مقدار لنگر واژگونی ناشی از باد و زلزله به ازای نسبت لاغری ۵/۵ با هم برابر بودند و با افزایش نسبت لاغری، لنگر واژگونی ناشی از باد در مقایسه با زلزله بیشتر بود به نحوی که به ازای ارتفاع ۲۰۰ متر، لنگر واژگونی ناشی از باد ۴۹ درصد بیش از لنگر زلزله بود.

۶- برای مقطع عرضی دایره، به ازای کلیه مقادیر لاغری بررسی شده، برش پایه ناشی از زلزله بیشتر از باد بود ولی اختلاف کمیت‌های مذکور با افزایش نسبت لاغری کمتر می‌شد. مقدار نسبت برش ناشی از زلزله به باد برای لاغری‌های ۵ و ۱۰ به ترتیب ۱/۷۵ و ۱/۰۷ بود. برای این مقطع، مقدار لنگر واژگونی ناشی از باد و زلزله به ازای نسبت لاغری ۸/۴ با هم برابر بودند و با افزایش نسبت لاغری، لنگر واژگونی ناشی از باد غالب می‌شد. نسبت لنگر واژگونی ناشی از باد به زلزله برای نسبت‌های لاغری ۵ و ۱۰ به ترتیب ۰/۷۲ و ۱/۱۳ بود.

۷- مطابق نتایج، با افزایش ارتفاع ساختمان، نیروهای داخلی باد نسبت به نیروهای زلزله تعیین کننده‌تر هستند. برای کاهش نیروها و ارتعاشات ناشی از باد می‌توان از مقاطع با خواص آیرودینامیکی مناسب از قبیل مقاطع دایره‌ای استفاده نمود. به طور مثال، برای ساختمان به ارتفاع ۲۰۰ متر، لنگر واژگونی باد مقطع دایره‌ای، ۴۹ درصد کمتر از مقطع مربع است که نشان دهنده نقش موثر مقطع دایره‌ای در کاهش نیروهای داخلی باد است. در مواردی که استفاده از مقاطع دایره‌ای با محدودیت‌های معماری مواجه است، به کارگیری مقاطع با گوشه‌های گرد می‌تواند با کاهش ضریب فشار باد، نیروهای داخلی باد را کاهش دهد.

## منابع

- [1] A.G. Davenport, Gust loading factors, *Journal of the Structural Division*, ASCE, 93 (1967) 11-34.
- [2] B.J. Vickery, On the reliability of gust loading factors, *Proceedings of technical meeting concerning wind loads on buildings and structures*, 30 (1970) 296–312.
- [3] G. Solari, Gust buffeting. I: Peak wind velocity and equivalent pressure, *Journal of Structural Engineering*, 119(2) (1993a) 365–382.
- [4] G. Solari, Gust buffeting. II: Dynamic along-wind response, *Journal of Structural Engineering*, 119(2)

- Persian).
- [21] A. Esmailzad, A. khodabandelou, Investigating the Effect of Shear Walls Arrangement on Seismic Performance of High-rise Reinforced Concrete Buildings with Tube in Tube System, *Analysis of Structure and Earthquake*, 15(1) (2018) 51-60 (In Persian).
- [22] M. A. Aly, S. Abburu, On the Design of High-Rise Buildings for Multihazard: Fundamental Differences between Wind and Earthquake Demand, *Shock and Vibration*, (2015) Article ID 148681, DOI: 10.1155/2015/148681.
- [23] S. N. Thilakarathna, N. Anwar, P. Norachan, F. A. Naja, The Effect of Wind Loads on the Seismic Performance of Tall Buildings, *Athens Journal of Technology and Engineering*, 5(3) (2018) 251-276.
- [24] A. Adnan, S. Suradi, Comparison on the effect of earthquake and wind loads on the performance of reinforced concrete buildings, in: *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, 2008.
- [25] K. Heiza, M. Tayel, Comparative Study of the Effects of Wind and Earthquake Loads on High-rise Buildings, *Concrete Research Letters*, 3(1) (2012) 386-405.
- [26] M. Moghadasi, S. Taeepoor, S.S. Rahimian Koloor, M. Petrù, The Effect of Lateral Load Type on Shear Lag of Concrete Tubular Structures with Different Plan Geometries, *Crystals*, 10(10) (2020) 897.
- [27] E. Türkeli, Determination and Comparison of Wind and Earthquake Responses of Reinforced Concrete Minarets, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39 (2014) 3665–3680.
- [28] Housing and Urban Development, Iranian national building code (Part 6): Applied loads on buildings, Ministry of Housing and Urban Development, Tehran, Iran, 2013 (In Persian).
- [29] Building and Housing Research Center, Iranian code of with Constant and Variable Cross Section in Tehran, *Journal of Concrete Structures and Materials*, 4(2) (2019) 51-72 (In Persian).
- [14] N. Siahpolo, A. Kheyroddin, M. Gerami, Analytical Assessment of Pros and Cons for Prevalent Tall Building System in Comparison with Tube System Using ASCE7-05 Wind Load Specifications, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 48(1) (2016) 87-100. (In Persian).
- [15] H. Bakhshi, M. Rakhshanifar, M. Ramshini, Turbulence analysis around high buildings during the construction period with different forms in plan, *Modares Civil Engineering journal*, 17(2) (2018) 33-43(In Persian).
- [16] A. Ardekani, M. Golabchi, S.M. Hosseini, M. Alaghmandan, Investigation of the Impact of High-rise Buildings Shapes on their Structural Stability in order to Reduce Seismic Hazards (Case Study: The Effect of Shape of Plan), *Environmental Management Hazards*, 4(1) (2017) 27-42 (In Persian).
- [17] E. H. Ghoniem, N. Ayyash, A. Essam, Seismic Response of High-rise Buildings with Different Structural Systems, *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, 8(9) (2018) 42-51.
- [18] I. Almufti, C.H. Molina, M. Willford, Seismic Assessment of Typical 1970s Tall Steel Moment Frame Buildingsin Downtown San Francisco, in: *15 World Conference of Earthquake Engineering*, Lisboa, 2012.
- [19] F. Etedadi Aliabadi, M.M. Memarpour, Investigation of the Seismic Behavior of Framed Tube Buildings Considering Soil Structure Interaction, *Journal of Structural and Construction Engineering*, 6(2) (2019) 119-140 (In Persian).
- [20] M. Abdi Moghadam, A. Meshkat-Dini, The Effect of Belt Truss Level on the Performance of Steel High-Rise Buildings Subject to Near Field earthquake, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 49(4) (2018) 665-678 (In

- by  
Viscoelastic Dampers under Earthquake Excitation, *Advances in Structural Engineering*, 14(5) (2011) 801-813.
- [34] National Research Council (NRC), User's guide-NBC 2005: structural commentaries (Part 4 of Division B), Canadian Commission on Building and Fire Codes, Ottawa, Canada, 2005.
- [35] E. Hosseinkhani, H. Rahnama, A. Johari, Damping modification factor for earthquake elastic spectral of Iran, 9th international congress of civil structure, Industrial university of Esfahan, Esfahan, Iran, 2011 (In Persian).
- [36] T. Balendra, *Vibration of Buildings to Wind and Earthquake Loads*, Springer Verlag, Department of Civil Engineering National University of Singapore, 1993.
- practice for seismic resistance design of buildings, Standard No. 2800, 4rd Edition, Publisher: BHRC, 2014 (In Persian).
- [30] J.C. Wu, J.N. Yang, Active control of transmission tower under stochastic wind, *Journal of Structural Engineering*, 124(2) (1998) 1302-1312.
- [31] N. Khodaie, Vibration control of super-tall buildings using combination of tapering method and TMD system, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 196 (2020) 104031.
- [32] H.E. Kalehsar, N. Khodaie, Wind-induced vibration control of super-tall buildings using a new combined structural system, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 172 (2018) 256-266.
- [33] C. Wang, Z. Lü, Y. Tu, Dynamic Responses of Core-Tubes with Semi-Flexible Suspension Systems Linked

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

N. Khodaie, A. Rahimi, *Parametric study and comparison of overturning moment and base shear of tall buildings under earthquake and along-wind loads*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(5) (2022) 1731-1754.

DOI: 10.22060/ceej.2021.19831.7267



