Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(11) (2022) 1357-1360
DOI: 10.22060/mej.2021.19433.7026

Passive Control of Vibrations of High-Rise Structure Using Tuned Liquid Damper under Wind and Earthquake Excitations

M. Fahimi Farzam[1] , B. Alinejad , R. Maroofiazar , H. Kazemi Sormoli

Department of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran

ABSTRACT: One of the essential issues in structural engineering is preparing resident comfort and a sense of security for the residents of high-rise structures against earthquakes and strong winds. Therefore, the use of control systems has been considered under dynamic loads. Tuned liquid damper is an affordable and helpful device for controlling the vibrations of the structure under dynamic lateral loads. In this study, a standard high-rise structure has been modeled in ANSYS software under earthquakes (far and near-field) and wind and the interaction between wind and structure has been investigated. Tuned Liquid Damper was used to reduce the responses of the structure under far-field records (El-Centro 1940 and Hachinohe 1968), near-field records (Northridge 1994 and Kobe 1995), and wind. The responses of the structure such as displacement, velocity, acceleration, pressure, and streamline around the structure have been analyzed and also, the aerodynamic behavior of the high-rise structure against the wind has been investigated. Averagely, the results show that the Tuned Liquid Damper could reduce the maximum displacement of the structure to 16% under far-field records, 0.5% under near-field records, and 13% under the wind.

Review History:

Received: Dec. 29, 2020
Revised: Mar. 18, 2021
Accepted: Jun. 19, 2021
Available Online: Jul, 07, 2021

Keywords:

Tuned liquid damper
Wind tunnel
Standard high-rise structure
Earthquake
ANSYS.

1- Introduction

Different control techniques are developed to decrease structural responses and to improve the structural dynamic behavior under dynamic lateral loads. One of the best methods for protecting structures against external excitations is using control systems. Control systems are categorized into passive, active, semi-active, and hybrid control [1]. Performance evaluation of control systems under external excitations such as far and near-field earthquakes and wind are one of the most critical problems. In 2020, Farzam et al. [2] investigated the performance of a Magnetorheological (MR) damper installed on a 10-story shear building. In the wind tunnel practice on building aerodynamics, the Commonwealth Advisory Aeronautical Council (CAARC) tall building model is usually adopted to calibrate experimental techniques. In 2009, Brun and Awruch [3] investigated the effect of wind on the standard CAARC building. In 2019, Shirzadeh and Eimani simulated standard CAARC structure under four various wind velocities, and they examined mesh independence of the wind tunnel with four different types of meshing [4].

In this research, the CAARC standard high-rise structure with a height of 180 m under wind and earthquakes is investigated, and a Tuned Liquid Damper (TLD) is used to reduce the vibrations of the structure. Some particular items of this study are such as (1) evaluating various responses of CAARC standard structure under wind force, (2) performance assessment of TLD on a standard structure against the wind, (3) modeling of TLD fluid nonlinear motion and sloshing, including fluid-solid interaction.

2- The Numerical Model to Simulate

The CAARC standard tall building model is presented in Fig. 1. The full-scale dimensions of the building model are as follows: height (H) = 180 m; length (L) = 30 m; width (W) =45 m. According to the dimensions given in Fig. 1, the wind tunnel was simulated in ANSYS software.

The wind profile characteristic is shown in Fig. 1 and the earthquake records used are benchmark International Association of Structural Control (IASC) earthquakes. These earthquake records are two far-field (El Centro 1940 and Hachinohe 1968) and two near-fields (Northridge 1994 and Kobe 1995).

In this study, one TLD is simulated on the roof of the structure. The dimensions of TLD are as follows: length, width, and height are 15.5, 12.5, and 4 m, respectively. The two parameters of mass ratio and water ratio are assumed to be 1.5%, and 0.2, respectively, and the depth of water is 3 m.

*Corresponding author's email: m.farzam@maragheh.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

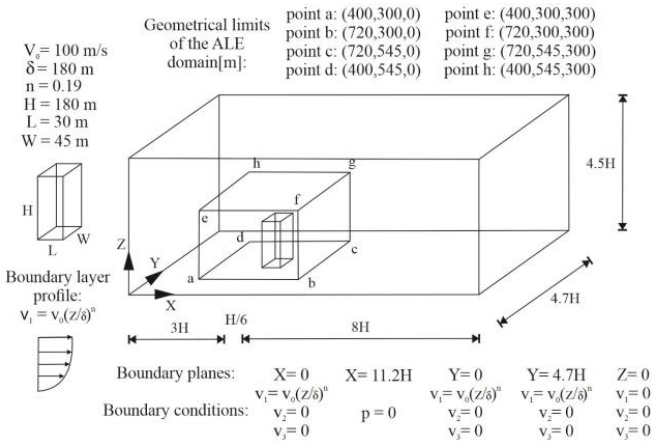


Fig. 1. Geometrical characteristics and boundary conditions used in the aeroelastic analysis of a high-rise building model

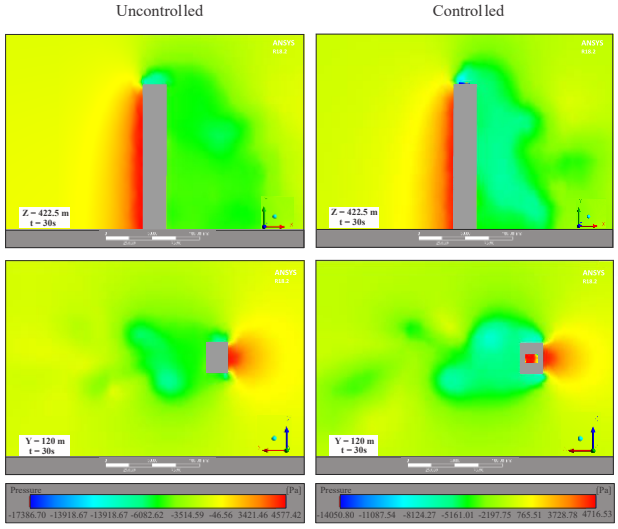
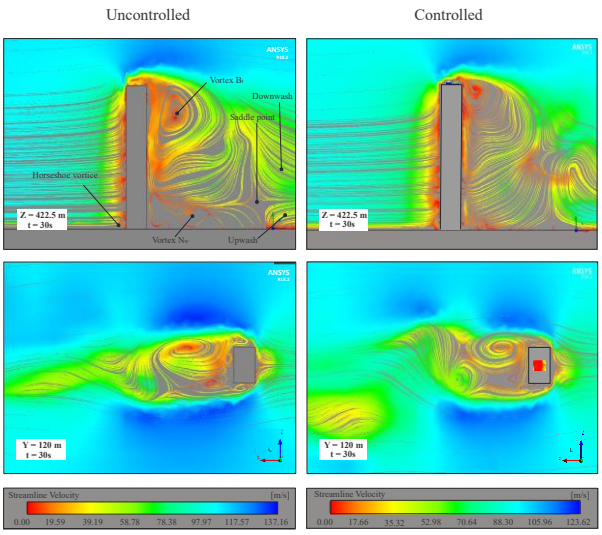


Fig. 2. Distribution of pressure in plans of XY and XZ for controlled and uncontrolled modes



.Fig. 3. streamlines in plans of XY and XZ for controlled and uncontrolled modes

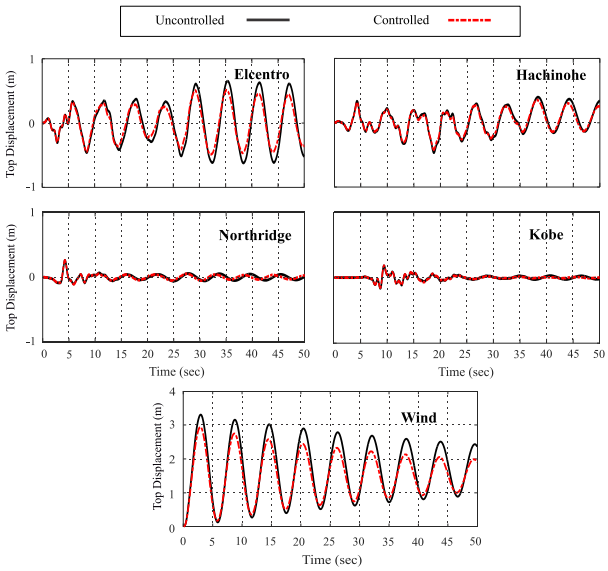


Fig. 4. The top of structure Longitudinal displacement's time history under wind and four near and far-field records for controlled and uncontrolled modes

3- Results and Discussion

To investigate the standard CAARC tall building aerodynamic effect, obtained pressure contours and streamlines around the structure, and the building maximum responses have been studied under four earthquake records by ANSYS simulations. The distribution of pressure contours around the uncontrolled and controlled high-rise structure are described against wind load with a maximum velocity of 100 m/s. In Fig. 2, the pressure contour can be well observed on a plane XY at Z = 422.5 m (center of the high-rise structure) and on a plane XZ at Y = 120 m (2/3 of the structure's height).

Streamlines around the high-rise structure are shown in Fig. 3, where they are presented on horizontal (XY) and vertical (XZ) planes. The level of the XY plane is 422.5m, and the level of the XZ plane is 120m. In Fig. 3, horseshoe vortices, Vortex Bt, Vortex Nw, Saddle point, Downwash, and Upwash have been marked [5].

The displacement time history of the CAARC structure under the wind, far and near-field earthquake records are shown in Fig. 4.

4- Conclusions

Some important remarks can be pointed out from the results obtained, which may be summarized as follows:

•The structural responses under wind far and near-field earthquakes have a sound reduction, respectively. The

reduction percentages of structural responses for maximum displacement, velocity, and acceleration are 22%, 11%, and 3% under El-Centro, and 10%, 12%, and 0% under Hachinohe, respectively. Also, the reduction of maximum displacement, velocity, and acceleration for the Kobe earthquake was equal to 0%, 5%, and 8%, and for the Northridge earthquake was 1%, 1%, and 3%, respectively. Finally, the maximum displacement, velocity, and acceleration under wind vibration are 13%, 6%, and 2%, respectively.

•According to the studies, the average response reduction for maximum displacement, velocity, and acceleration at different heights of the structure is 9%, 5%, and 3%, respectively. In other words, the TLD is better performing in reducing displacement than velocity and acceleration.

References

[1] K. Ghaedi, Z. Ibrahim, H. Adeli, A. Javanmardi, Invited Review: Recent developments in vibration control of building and bridge structures, Journal of Vibroengineering, 19(5) (2017) 3564-3580.

[2] M. Fahimi Farzam, B. Alinejad, S.A. Mousavi, statistical performance of semi-active controlled 10-storey linear building using mr damper under earthquake motions, Journal of Civil Engineering Amirkabir, (2020), (in persian).

[3] A.L. Braun, A.M. Awruch, Aerodynamic and aeroelastic analyses on the CAARC standard tall building model using numerical simulation, Comput Struct, 87(9-10) (2009) 564-581.

[4] M. Shirzadeh Germi, H. Eimani Kalehsar, Numerical Investigation of Aeroelastic Behavior of Tall Buildings Considering Wind-Structure Interaction, Modares Mechanical Engineering, 19(3) (2019) 719-730, (in persian).

[5] B.L. da Silva, R. Chakravarty, D. Sumner, D.J. Bergstrom, Aerodynamic forces and three-dimensional flow structures in the mean wake of a surface-mounted finite-height square prism, International Journal of Heat and Fluid Flow, 83 (2020) 108569.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Fahimi Farzam , B. Alinejad , R. Maroofiazar , H. Kazemi Sormoli , Passive Control of Vibrations of High-Rise Structure Using Tuned Liquid Damper under Wind and Earthquake Excitations , Amirkabir J. Mech. Eng., 53(11) (2022) 1357-1360.

DOI: 10.22060/mej.2021.19433.7026

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳، شماره ۱۱، سال ۱۴۰۰، صفحات ۵۳۶۷ تا ۵۳۸۸
DOI: 10.22060/mej.2021.19433.7026

کنترل غیرفعال ارتعاشات سازه بلندمرتبه با میراگر مایع تنظیم‌شده تحت تحریک باد و زلزله

مازیار فهیمی فرزام*، بابک علی نژاد، رسول معروفی آذر، هاجر کاظمی سرملی

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.

خلاصه: یکی از موضوعات با اهمیت در حوزه مهندسی ایجاد یک فضای آرام و حس امنیت برای ساکنین ساختمان‌ها به ویژه سازه‌های بلندمرتبه در برابر نیروی زلزله و باد می‌باشد، به‌همین منظور استفاده از سیستم‌های کنترلی جهت کاهش ارتعاش سازه در برابر بارهای دینامیکی مورد توجه قرار گرفته است. میراگر مایع تنظیم‌شده یک ابزار پرکاربرد و مقرون به‌صرفه برای کنترل ارتعاشات سازه تحت بارهای جانبی دینامیکی می‌باشد. در این پژوهش سازه بلندمرتبه استاندارد تحت تحریک‌های زلزله حوزه دور و نزدیک و باد در نرم‌افزار انسیس شبیه‌سازی شده است و اندرکنش باد و سازه مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور کاهش پاسخ‌های سازه بلندمرتبه تحت رکوردهای زلزله حوزه دور (السنترو ۱۹۴۰ و هاچینو ۱۹۶۸)، رکوردهای زلزله حوزه نزدیک (نورثریج ۱۹۹۴ و کوبه ۱۹۹۵) و نیروی باد از یک میراگر مایع تنظیم‌شده استفاده شد. پاسخ‌های سازه از قبیل جابجایی، سرعت، شتاب، فشار وارده و خطوط جریان باد بر روی دیواره‌های سازه مورد آنالیز قرار گرفته است و همچنین، رفتار آئرودینامیک سازه در برابر نیروی باد بررسی شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که میراگر مایع تنظیم‌شده می‌تواند جابجایی سازه را به‌طور میانگین تحت رکوردهای حوزه دور تا ۱۶ درصد، رکوردهای حوزه نزدیک ۰/۵ درصد و تحت باد تا ۱۳ درصد کاهش دهد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۰۹
بازنگری: ۱۳۹۹/۱۲/۲۸
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۹
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۴/۱۶

کلمات کلیدی:
میراگر مایع تنظیم‌شده
تونل باد
سازه بلندمرتبه استاندارد
زمین لرزه
انسیس

۱- مقدمه

امروزه کاهش ارتعاشات سازه‌ها یکی از اهداف اصلی مهندسی سازه در برابر بارهای جانبی دینامیکی اعم از زلزله، باد، امواج سواحل و... می‌باشد. به منظور محافظت از سازه در برابر بارهای دینامیکی و کاهش خسارت‌های جانی و مالی ناشی از اعمال اینگونه بارها زمینه تحقیقاتی با عنوان کنترل سازه مورد توجه قرار گرفته است. به‌طور کلی سیستم‌های کنترلی با توجه به نحوه عملکردی خود به چهار دسته غیرفعال، نیمه فعال، فعال و ترکیبی تقسیم می‌شوند [۱ و ۲]. سیستم‌های کنترلی به روش غیرفعال را می‌توان به سه دسته اتلاف‌کننده‌های انرژی، میراگرهای تنظیم‌شده (تی اِل دی)[1] و جداسازهای لرزه‌ای تقسیم نمود و یکی از ابزارهای میراگرهای تنظیم‌شده، میراگر مایع تنظیم‌شده سیال می‌باشد [۳]. سیستم میراگر مایع تنظیم‌شده از یک یا چند مخزن حاوی سیال تشکیل می‌شود و یکی از پرکاربردترین ابزارهای کنترل غیرفعال می‌باشد. برای اولین بار در سال ۱۹۶۶، بوتا[2] و کوال[3] میراگر مایع تنظیم‌شده را در فضاپیماها مورد مطالعه قرار دادند [۴] و همچنین واندیوار[4] از این نوع میراگرها به منظور کنترل ارتعاش سکوهای دریایی استفاده نمود [۵]. در راستای بررسی و تحلیل رفتار غیرخطی سیال به کار برده شده در مخازن میراگرهای مایع تنظیم‌شده و تأثیر و کاربرد میراگر مایع تنظیم‌شده بر روی پاسخ‌های سازه، مطالعات گسترده‌ای صورت گرفته است.

در سال ۲۰۱۵، یک روش محاسباتی کارآمد به منظور ارزیابی رفتار دینامیکی مخازن ذخیره‌سازی مایع توسط رویز[5] و همکاران [۶] تهیه شد، آن‌ها پنج روش متفاوت محاسباتی را بر روی یک مدل عددی با ابعاد مختلف مورد بررسی قرار دادند. در سال ۲۰۱۶ رفتار دو میراگر مایع تنظیم‌شده و میراگر جرمی تنظیم‌شده نصب شده بر روی یک ساختمان ۲۴ طبقه به صورت قاب خمشی توسط شکرگذار و همکاران [۷] مورد بررسی قرار گرفته است. سازه مدل شده تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک در

1 Tuned Liquid Damper (TLD)
2 Bhuta
3 Koval
4 Vandiver
5 Ruiz

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m.farzam@maragheh.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

نرم‌افزار سپ ۲۰۰۰ مدلسازی شده است. ارزیابی عملکرد سیستم‌های کنترلی تحت ارتعاشات جانبی از قبیل زلزله‌های حوزه دور و نزدیک یکی از مسائل پراهمیت در مطالعه رفتار سازه‌های عمرانی می‌باشد، به همین منظور فرزام و همکاران [۸] در سال ۲۰۲۰ به بررسی عملکرد یک میراگر سیال مغناطیسی واقع بر روی یک سازه ۱۰ طبقه برشی پرداخته‌اند. انرژی ورودی ناشی از ارتعاشات سازه در این نوع از میراگرها از طریق تلاطم و حرکت سیال درون مخزن اتلاف می‌شود و در نهایت این تلاطم و اتلاف انرژی باعث کنترل سازه می‌گردد، به منظور عملکرد بهتر میراگر و بهبود اتلاف انرژی در میراگرهای مایع تنظیم‌شده می‌توان از ابزار متفاوتی استفاده نمود. سقف‌های شناور در میراگر می‌تواند باعث اتلاف انرژی بیشتر شود. به‌همین منظور در سال ۲۰۱۶، روئیز[1] و همکاران [۹] نوع جدیدی از میراگرهای مایع تنظیم‌شده با سقف شناور را ارائه داده‌اند، وجود یک سقف شناور بر روی سیال باعث بوجود آمدن محدودیت سینماتیکی در سطح مایع می‌شود و از شکست موج جلوگیری می‌کند، در نهایت معادلات حتی تحت ارتعاشاتی با دامنه زیاد خطی می‌شوند و سازه به صورت یک درجه آزادی رفتار می‌کند. یکی از پارامترهای مؤثر در عملکرد میراگر مایع تنظیم‌شده، هندسه و ابعاد مخازن مورد استفاده می‌باشد لذا تغییر در ابعاد و هندسه مخازن می‌تواند باعث بهبود رفتار میراگرها تحت ارتعاشات شود. در سال ۲۰۱۹، پاندیت[2] و بیسوال[3] [۱۰] میراگر مایع تنظیم‌شده را با دو هندسه متفاوت ذوزنقه‌ای و سطح شیبدار تحت شش رکورد زمین‌لرزه با محتوای فرکانسی متفاوت مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها اثر مستقیم تغییر هندسه مخزن بر پارامترهایی از قبیل لنگر پایه، توزیع فشار هیدرودینامیکی و مولفه‌های همرفتی و ضربه‌ای نیروی برشی پایه را به صورت عددی ارزیابی نمودند. با توجه به نتایج بدست آمده از مطالعه پاندیت و بیسوال، مخزن میراگری با سطوح شیبدار باعث کاهش پاسخ‌های سازه و افزایش میرایی می‌شود.

در سال ۲۰۱۰ مدل جدیدی از میراگرهای مایع توسط سامانتا[4] و بانرجی[5] [۱۱] پیشنهاد شد. آن‌ها میراگر مایع را با کمک فنری به صورت تجربی به بام سازه متصل نمودند و سازه را تحت تحریک هارمونیک مورد بررسی قرار دادند، بهینه‌یابی مقدار سختی فنر استفاده شده تأثیر بسزایی در عملکرد میراگر مایع اصلاح شده داشته است. الگوریتم جستجوی الگوی تعمیم یافته (جی پی اس)[6] یکی از روش‌های بهینه‌یابی می‌باشد که توسط آلکمیم[7] و همکاران [۱۲] مورد بررسی قرار گرفته است. آن‌ها یک میراگر ستونی مایع تنظیم‌شده واقع بر یک سازه یک درجه آزادی را به صورت عددی در نرم‌افزار متلب مدل نموده‌اند و با اعمال نیروی باد به صورت تصادفی و با چگالی‌های متفاوت عملکرد میراگر و الگوریتم جی پی اس را ارزیابی کرده‌اند. مریوانی و حامد [۱۳] در سال ۲۰۱۷ به بررسی صفحات مشبک میله‌ای به صورت تجربی و عددی تحت نیروی تحریک تصادفی پرداخته‌اند، نسبت استحکام ثابت و شکل متفاوت در صفحات مشبک باعث افت فشار متفاوت و همچنین میرایی ذاتی متغیر در میراگرها می‌شود به همین منظور آن‌ها با استفاده از الگوریتم توسعه یافته و معرفی دو مفهوم جدید، تغییر در الگوی صفحه مشبک و تأثیر این تغییر بر افت فشار میراگر را مورد بررسی قرار داده‌اند.

در دو دهه اخیر مهندسی باد محاسباتی (سی دَبلیو ایی)[8] به عنوان یکی از شاخه‌های دینامیک سیالات محاسباتی (سی اِف دی)[9] رشد قابل توجهی داشته است. با پیشرفت روزافزون در فناوری رایانه، شبیه‌سازی عددی برای تجزیه و تحلیل مسائل مهندسی باد به روشی بسیار جذاب تبدیل شده است و از تکنیک‌های آزمایشگاهی توسعه یافته‌ای برای تولید جریان‌های طبیعی باد در تونل‌های باد استفاده می‌شود. به منظور بررسی مسائل تونل باد و تأثیر آن بر روی سازه‌های عمرانی، سازه بلندمرتبه استاندارد انجمن هوانوردی کشورهای مشترک المنافع (سی اِی اِی آر سی)[10] معرفی شده است.

مشخصات مدل استاندارد سی اِی اِی آر سی برای آزمایش‌های تونل باد و بررسی آئرودینامیک بر روی سازه استاندارد برای اولین بار توسط واردلاو[11] ارائه شد [۱۴]، در سال‌های ۱۹۷۰–۱۹۷۵ واردلاو و موس اندازه‌گیری‌های تجربی متعددی بر روی سازه بلندمرتبه استاندارد انجام دادند. در سال ۱۹۸۰ میلادی ملبورن[12] [۱۵] مقایسه‌ی کاملی از نتایج شش محقق دیگر در رابطه با سازه سی اِی اِی آر سی انجام داد و پارامترهایی از قبیل فشار و پاسخ‌های دینامیکی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین ژانگ[13] و هادیاد[14] [۱۶] روشی را جهت اتصال دو حوزه سازه‌ای و سیالاتی مسائل اندرکنش معرفی کردند، با توجه به نتایج بدست آمده از تحقیقات آن‌ها نحوه برخورد با متغیرهای

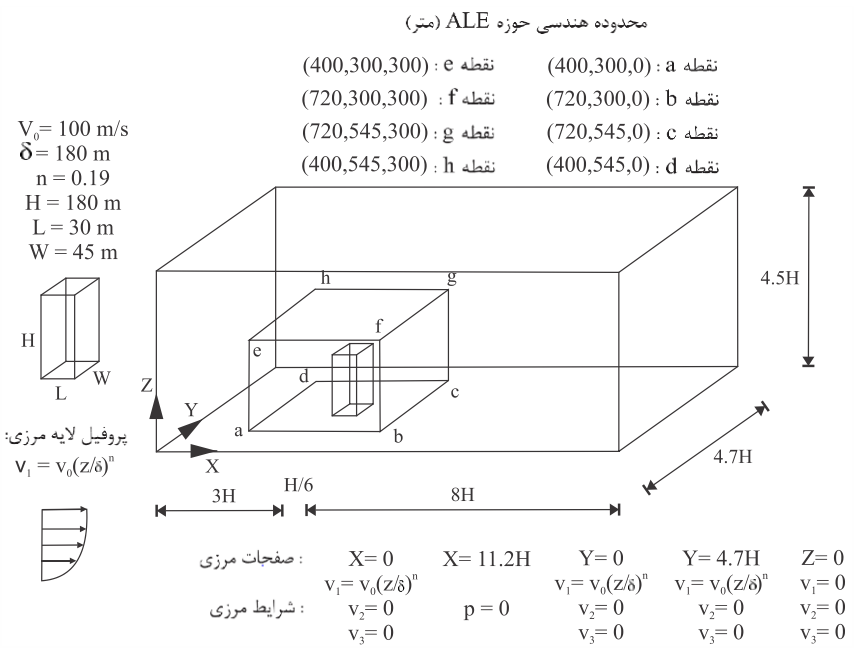
1 Ruiz
2 Pandit
3 Biswal
4 Samanta
5 Banerji

6 Generalized Pattern Search (GPS)
7 Alkmim
8 Computational wind engineering
9 Computational Fluid Dynamics (CFD)
10 Commonwealth Advisory Aeronautical Council (CAARC)
11 Wardlaw
12 Melbourne
13 Zhang
14 Hisada

اندرکنش ارتباط مستقیمی با اتصال دو حوزه سیال و سازه در مسائل اندرکنش دارد. براون[1] و آروچ[2] [۱۷] مدل مقطعی پل رودخانه گواما را به صورت المان محدود در برابر تحریک باد شبیه‌سازی نموده‌اند. آن‌ها معادلات حاکم جریان از طریق روش گالرکین حل نموده و به صورت سینماتیکی با استفاده از فرمولاسیون لاگرانژین–اویلری مطلق توصیف نمودند. همچنین طرح نوینی به منظور تحلیل مسائل اندرکنش بین جریان‌های تراکم ناپذیر و سازه‌های خطی مانند سازه سی اِی اِی آر سی معرفی کرده‌اند و به بررسی اندرکنش سازه و سیال از طرق مسائل سی اف دی پرداخته‌اند [۱۸ و ۱۹]. همان‌طور که گفته شد به منظور بررسی اثرات جریان باد بر روی سازه از مدل سازه‌ای معیار سی اِی اِی آر سی استفاده می‌شود و محققین متعددی با استفاده از این مدل به بررسی اندرکنش سازه و سیال پرداخته‌اند [۲۰ و ۲۱]. در سال ۲۰۱۹ شیرزاده و ایمانی [۲۲] سازه استاندارد سی اِی اِی آر سی را تحت ۴ سرعت مختلف باد به صورت عددی شبیه‌سازی نمودند، همچنین به منظور دسترسی به نتایج مستقل از شبکه از ۴ شبکه‌بندی مختلف برای حل مساله تونل باد استفاده نمودند. در مطالعه فنگ[3] و همکاران [۲۳] سه پروفیل باد با زاویه‌های متفاوت بر روی سازه بلندمرتبه استاندارد براساس مسائل سی اف دی بررسی شده است و اثرات لایه اکمن[4] بر روی مدل مورد تحلیل و آنالیز قرار گرفته است. در سال ۲۰۲۰، بهرا[5] و همکاران [۲۴] اثر نیروی باد بر روی سازه‌های مجاور با نسبت پلان‌های متفاوت را به صورت آزمایشگاهی در تونل باد لایه مرزی واقع در دانشگاه پلی‌تکنیک توکیو مورد مطالعه قرار دادند، مطالعات صورت گرفته بهرا و همکاران می‌تواند در طراحی اولیه پوشش سازه‌های بلند در تراکم زیاد مفید باشد. در سال ۲۰۲۰ لاو[6] و همکاران [۲۵] یک میراگر متلاطم تنظیم‌شده چندگانه (اِم تی اس دی)[7] را بر روی یک سازه بلند تحت باد مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که سیستم اِم تی اس دی باعث بهبود عملکرد میراگر و افزایش مقاومت آن می‌شود و شتاب سازه را تا ۵۰ درصد کاهش می‌دهد. وانگ[8] و همکاران [۲۶] دستگاه جدیدی را به عنوان میراگر ستون‌ی مایع تنظیم‌شده اینرتر (تی اِل سی دی آی)[9] بر روی بام دو سازه بلندمرتبه مجاور تحت جریان باد مورد مطالعه قرار دادند و عملکرد آن را با دو میراگر ستونی مایع تنظیم‌شده (تی اِل سی دی)[10] مقایسه کرده‌اند. این نوع سیستم‌ها هم از مزایای میراگرهای ستونی مایع تنظیم‌شده بهره می‌برند و هم از اثر افزایش جرم اینرتر مورد استفاده در کاهش پاسخ‌های سازه بهره‌مند می‌شوند. سیستم تی اِل سی دی آی شتاب سازه را به طور میانگین ۳۷ تا ۴۲ درصد کاهش می‌دهد.

در مطالعات گذشته عملکرد لرزه‌ای میراگر سیال تنظیم‌شده با در نظر گرفتن فرضیات متعدد در مدلسازی رفتار میراگر، سازه و تحریک زلزله بررسی شده است. در این مطالعات به طور معمول مدلسازی سازه به صورت ساختمان برشی و یا تک درجه آزادی انجام شده است و همچنین اثرات میراگر مایع تنظیم‌شده بر روی سازه‌های بلندمرتبه مانند سازه استاندارد سی اِی اِی آر سی مورد بررسی قرار نگرفته است. همچنین در مطالعات گذشته سازه سی اِی اِی آر سی تنها تحت تحریک نیروی باد مورد بررسی قرار گرفته است و عملکرد لرزه‌ای سازه سی اِی اِی آر سی تحت رکوردهای زمین‌لرزه با ویژگی‌های متفاوت بررسی نشده است. در این پژوهش سازه بلندمرتبه استاندارد سی اِی اِی آر سی به ارتفاع ۱۸۰ متر تحت دو تحریک زلزله معیار حوزه دور السنترو و هاچینو، دو تحریک زلزله معیار حوزه نزدیک کوبه و نورثریج و نیروی بادی با سرعت ۱۰۰ متر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفته است. کاربرد اصلی این پژوهش بررسی و تحلیل عملکرد میراگر سیال تنظیم‌شده بر روی پاسخ‌های دینامیکی سازه تحت بار باد و زلزله می‌باشد که در ادامه به طور مختصر بیان می‌شود. مواردی که بررسی همزمان آن‌ها این پژوهش را نسبت به سایر مطالعات متمایز کرده است، عبارتند از: (۱) استفاده از چهار رکورد معیار حوزه دور و نزدیک (۲ رکورد حوزه دور و ۲ رکورد حوزه نزدیک) و بررسی پاسخ‌های مختلف سازه استاندارد سی اِی اِی آر سی تحت رکوردهای زمین‌لرزه. (۲) بررسی و تحلیل عملکرد میراگر مایع تنظیم‌شده بر روی سازه استاندارد تحت رکوردهای زلزله و نیروی باد. (۳) مدلسازی حرکت و تلاطم غیرخطی سیال درون مخزن میراگر مایع تنظیم‌شده و در نظر گرفتن صریح اندرکنش سیال و سازه تحت بارهای دینامیکی متفاوت. (۴) بررسی رابطه متداول موجود در ادبیات فنی در طراحی میراگرهای سیال و ارزیابی عملکرد میراگر کوک شده با این رابطه در یک سازه معیار و تحت انواع مختلف بارهای دینامیکی. در ادامه و در بخش دوم این مطالعه نیروهای اعمالی شامل رکوردهای زمین‌لرزه و نیروی باد و سازه استاندارد سی اِی اِی آر سی معرفی شده‌اند، سپس سازه سی اِی اِی آر سی مدل شده در نرم افزار انسیس با مدل مطالعه براون صحت‌سنجی قرار گرفته است. در

1 Braun
2 Awruch
3 Feng
4 Ekman layer
5 Behera
6 Love
7 Multiple-Tuned Sloshing Damper
8 Wang
9 Tuned Liquid-Column-Damper-Inerter
10 Tuned Liquid Column Damper



شکل ۱. مشخصات هندسه و شرایط مرزی مورد استفاده در آنالیز آئروالاستیک سازه بلندمرتبه

Fig. 1. Geometrical characteristics and boundary conditions used in the aeroelastic analysis of a high-rise building model

بخش چهارم روند طراحی میراگر سیال موجود در ادبیات فنی شرح داده شده است و در بخش پنجم تحلیل‌های آئروالاستیک و پاسخ‌های دینامیکی سازه تحت رکوردهای زلزله و نیروی باد مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت سعی شده است در بخش ششم نتایج بدست آمده از عملکرد میراگر مایع تنظیم‌شده تحت بارهای دینامیکی ارائه گردد و نتیجه‌گیری جامعی از تحلیل‌های صورت گرفته آورده شود.

۲- مدلسازی عددی

مدل مورد بررسی در این مطالعه سازه بلندمرتبه سی اِی اِی آر سی می‌باشد و مطابق شکل ۱ طولی برابر با ۳۰ متر در راستای محور X، عرضی برابر با ۴۵ متر در راستای محور Y و ارتفاعی برابر با ۱۸۰ متر در راستای محور Z را دارد. همان‌طور که گفته شد به منظور بررسی اثر باد بر روی سازه، تونل بادی با ابعاد آورده شده در شکل ۱ در نرم‌افزار انسیس مدلسازی شد و همچنین مشخصات فیزیکی و هندسه سازه و تونل باد در جدول ۱ ارائه شده است.

برای شبکه‌بندی دامنه محاسباتی مدل از مکعب شش وجهی بهره گرفته شده است. با توجه به مطالعه براون و آروچ [۱۹] المان شش وجهی به تعداد ۳۶۸۸۰۰ برای حوزه سیال (تونل باد) استفاده شده است و دیواره‌های تونل که در تماس با سازه هستند توسط المان‌هایی با ارتفاع ۰٫۱ متر مش‌بندی شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، بعد L، W و H حوزه‌ی سازه‌ای به ترتیب به ۵، ۸ و ۲۵ المان شش وجهی مش‌بندی شده‌اند.

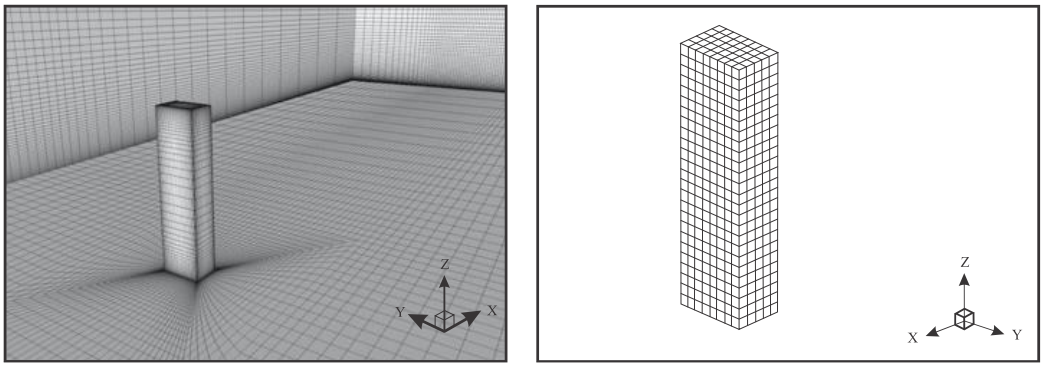
پروفیل باد اعمالی به سازه در شکل ۱ مشخص شده است و همچنین رکوردهای وارد شده به سازه با توجه به رکوردهای معیار انجمن بین‌المللی کنترل سازه (آی اِی اِس سی)[1] مدنظر قرار گرفته است. این انجمن در اوایل دهه ۹۰ میلادی به منظور همکاری محققان بین المللی در دستیابی به مطالعات مبنا تشکیل شد. این رکوردهای زمین‌لرزه شامل دو رکورد زلزله حوزه دور (السنترو ۱۹۴۰ و هاچینو ۱۹۶۸) و دو رکورد زلزله حوزه نزدیک (نورثریج ۱۹۹۴ و کوبه ۱۹۹۵) می‌باشند. مشخصات این شتاب نگاشت‌ها در شکل ۳ آورده شده است (رکوردهای نشان داده شده در شکل ۳ بدون اعمال ضریب مقیاس می‌باشند). در این مطالعه زلزله السنترو و هاچینو بدون ضریب مقیاس و زلزله نورثریج و کوبه به ترتیب به مقدارهای ۳۰ و ۴۰ درصد مقیاس شده‌اند.

1 International Association of Structural Control (IASC)

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و هندسه به کار برده شده در آنالیز آئروالاستیک سازه بلندمرتبه (برگرفته از مطالعه براون و آروچ [۱۹])

Table 1. Geometrical and physical constants employed in the aeroelastic analysis of a high-rise building model (Adapted from the study of Braun and Awruch [19])

حوزه سیال	جرم ویژه (ρ)	۱٫۲۵ kg/m^3
	ویسکوزیته دینامیکی (μ)	۷٫۰۳ ×۱۰$^{-3}$ $N.s/m^2$
	ویسکوزیته حجمی (λ)	۰ $N.s/m^2$
	سرعت صوت (c)	۳۳۰ m/s
	مشخصات سرعت (سرعت جریان در ارتفاع ۱۸۰ متری)	۱۰۰ m/s
	مشخصات ابعاد (عرض ساختمان)	۴۵ m
حوزه سازه	جرم ویژه (ρ)	۱۶۰ kg/m^3
	مدول الاستیسیته (E)	۲٫۳ ×۱۰^{8} N/m^2
	ضریب پواسون (v)	۰٫۲۵
	نسبت میرایی (χ)	٪۱
	فرکانس طبیعی	۰٫۲ Hz
	شعاع طیفی (r_α)	۰٫۶



شکل ۲. مش‌بندی حوزه سیال و سازه‌ایی برای آنالیز آئروالاستیک سازه بلندمرتبه

Fig. 2. Meshing the fluid and structural domains for the aeroelastic analysis of the high-rise building model

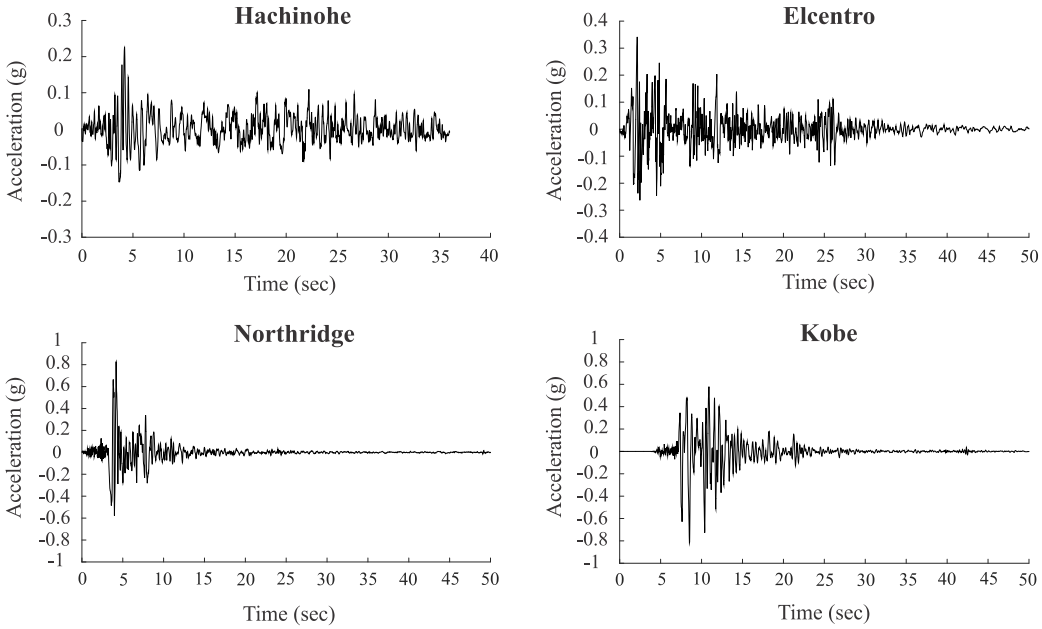
۳- صحت‌سنجی

به منظور بررسی صحت مدلسازی در نرم‌افزار انسیس، از نتایج مقاله براون و آروچ استفاده شده است [۱۸ و ۱۹]. براون و آروچ با استفاده از نرم‌افزار المان محدود و شبیه‌سازی عددی گرداب بزرگ (اِل ایی اِس)[1] سازه استاندارد سی اِی اِی آر سی را تحت پروفیل باد با سرعت‌های متفاوت مورد بررسی قرار دادند، به همین منظور سازه و تونل بادی مشابه مطالعه براون و آروچ در نرم‌افزار انسیس و با شبیه‌سازی عددی گرداب بزرگ مدلسازی شد و نتایج در شکل ۴ آورده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود مقدار اختلاف این دو شبیه‌سازی ناچیز می‌باشد (مقدار تقریبی ۳ درصد) و نتایج بدست آمده از نرم‌افزار انسیس قابل قبول است.

۴- مدلسازی میراگر مایع تنظیم‌شده

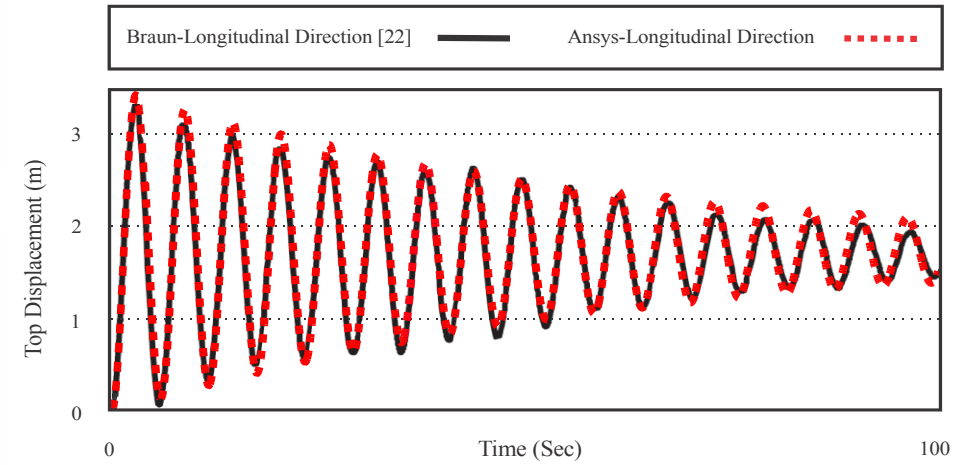
حرکت سیال درون تی ال دی را می‌توان با استفاده از معادله جریان

1 Large Eddy Simulation (LES)



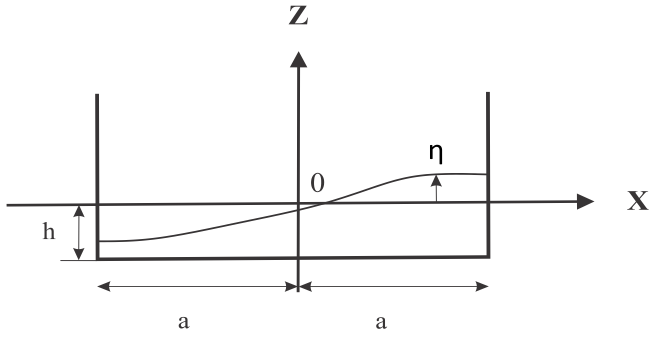
شکل ۳. تاریخچه زمانی رکوردهای هاچینو، السنترو، نورثریج و کوبه

Fig. 3. The time histories of Hachinohe, El-Centro, Northridge and Kobe records



شکل ۴. جابجایی بیشینه سازه بلندمرتبه سی اِی اِی آر سی تحت بادی با سرعت ۱۰۰ متر بر ثانیه در امتداد طولی سازه

Fig. 4. The maximum displacement of CAARC high-rise structure against of wind velocity 100 m in Longitudinal direction



شکل ۵. نمائی از سطح موج سیال درون میراگر مایع تنظیم‌شده

Fig. 5. View of the fluid wave surface inside tuned liquid damper

کم عمق و برمبنای دو رابطه (۱) و (۲) مدلسازی نمود، به منظور مدلسازی جریان کم عمق از روش المان محدود استفاده شده است. رابطه اول معادله پیوستگی و رابطه دوم معادله ممنتوم می‌باشد، این دو رابطه باید به طور همزمان حل شوند [۲۷]:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t}+\frac{\partial P}{\partial x}=0 \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t}+\frac{\partial (uP)}{\partial x}+g(h+\eta)\frac{\partial \eta}{\partial x}-\frac{\partial}{\partial x}\left(\nu_t\frac{\partial P}{\partial x}\right)+\frac{gP|P|}{C^2(h+\eta)^2}=0 \qquad (۲)$$

در رابطه اول (رابطه پیوستگی) η مقدار بالاآمدگی آب نسبت به تراز اولیه و P میزان دبی در واحد عرض می‌باشد و از رابطه (۳) بدست می‌آید، همچنین h، g، ν_t، C و u به ترتیب ارتفاع سطح اولیه آب، شتاب گرانش، ضریب پخش، ضریب شزی و سرعت در واحد عرض است. یک مخزن به طول و عمق آب به اندازه‌ی h در شکل ۵ نشان داده شده است، محورهای X و Z به ترتیب به عنوان محورهای افقی و عمودی انتخاب شده‌اند و آب موجود درون مخزن ایده‌آل فرض شده است [۲۷].

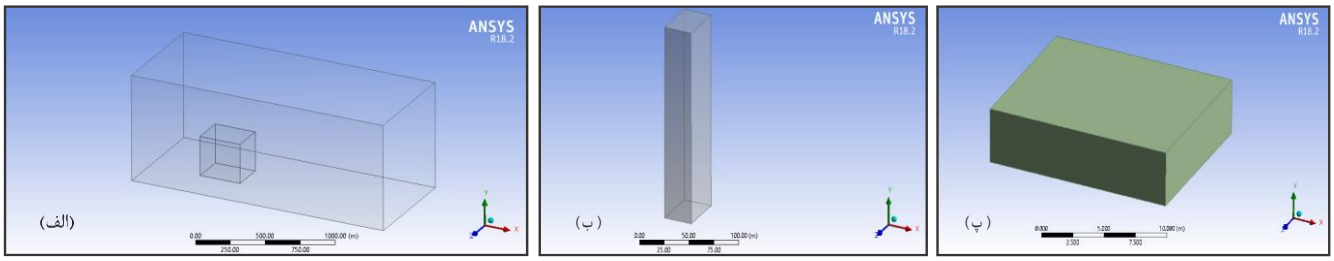
$$P=u(h+\eta) \qquad (۳)$$

میزان کاهش پاسخ‌های سازه کنترل‌شده با میراگر سیال تنظیم‌شده تحت تحریک پایه به ویژگی‌های سازه‌ای سیستم تی اِل دی بستگی دارد. سه پارامتر اصلی در طراحی تی اِل دی نسبت تنظیم، نسبت آب و نسبت جرم می‌باشند. در مطالعه بانرجی و همکاران [۲۸] در سال ۲۰۰۰ و رضایی و همکاران [۲۷] در سال ۲۰۱۴ ، به منظور طراحی یک میراگر مایع تنظیم‌شده چهار گام به شرح زیر پیشنهاد شده است:

۱. نسبت آب (نسبت ارتفاع سیال به طول مخزن) با Δ نشان داده می‌شود و مقدار مناسب آن در بازه (۰٫۰۵ تا ۰٫۳) می‌باشد [۲۸]. در صورتی که نسبت آب مقداری بیش از ۰٫۱۵ باشد میراگر عمیق و اگر مقداری کمتر از ۰٫۱۵ را داشته باشد میراگری کم عمق فرض می‌شود. با توجه به مطالعات بانرجی و همکاران [۲۸] برای سازه‌های با پریود کوتاه مقدار نسبت آب ۰٫۱۵ تا ۰٫۳ توصیه می‌شود و همچنین هر چه به مقدار ۰٫۱۵ که مرز بین میراگرهای کم عمق و عمیق است نزدیکتر باشد کاهش پاسخ‌ها بیشتر می‌باشد.

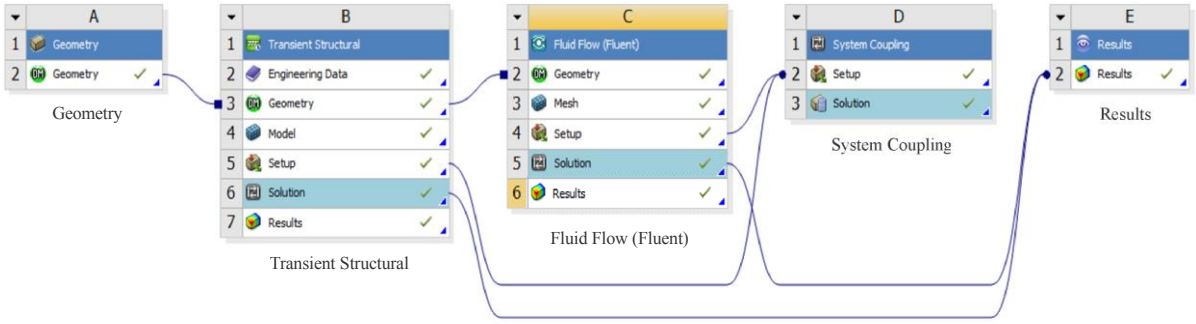
۲. تعیین فرکانس سازه (ω_s) و تعیین فرکانس پایه‌ای خطی تلاطم آب (ω_l)، که به طور معمول برابر هم در نظر گرفته می‌شود. با مشخص شدن فرکانس تلاطم آب (ω_l)، طول مخزن ($2a$) ر مخازن مکعبی از رابطه (۴) بدست می‌آید [۲۸]. با فرض مقدار نسبت آب و رابطه ۴ مقدار طول مخزن و در ادامه مقدار ارتفاع سیال درون مخزن محاسبه می‌شود.

$$\omega_l=\sqrt{\frac{\pi g}{2a}\tanh\left(\frac{\pi h}{2a}\right)}=\sqrt{\frac{\pi g}{2a}\tanh(\pi\Delta)} \qquad (۴)$$



شکل ۶. نمای سه‌بعدی از (الف) تونل باد، (ب) سازه بلندمرتبه و (پ) میراگر مایع تنظیم‌شده در نرم‌افزار انسیس

Fig. 6. Three-dimensional view of: (a) Wind Tunnel, (b) high-rise Structure, (c) Tuned liquid damper in Ansys software



شکل ۷. فضای ورک‌بنچ نرم‌افزار انسیس

Fig. 7. The Ansys Software Workbench Space

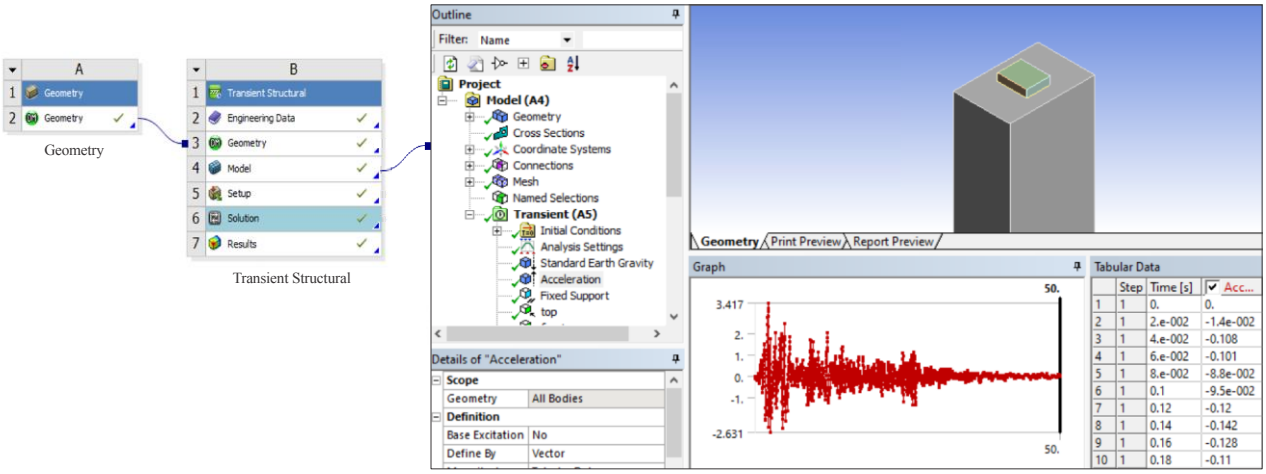
۳. یکی دیگر از پارامترهای تاثیرگذار در طراحی میراگر مقدار جرم سیال درون مخزن می‌باشد، جرم آب درون مخزن از فرمول $m_l = ۲\rho hab$ محاسبه می‌شود که ρ جرم حجمی سیال می‌باشد. نسبت جرمی (μ) به طور معمول بین ۱ الی ۴ درصد انتخاب می‌شود و با توجه به مقدار Δ بدست می‌آید.

۴. بعد از محاسبه مقدار طول مخزن، ارتفاع سیال و نسبت جرمی مورد نظر، با توجه به رابطه $\mu = \frac{m_l}{m_s}$ می‌توان مقدار عرض مخزن را محاسبه نمود. جرم سیال (m_l) و جرم سازه (m_s) می‌باشد، همان‌طور که در گام ۳ ذکر شد مقدار جرم سیال از رابطه $m_l = ۲\rho hab$ بدست می‌آید.

در این مطالعه یک میراگر مایع تنظیم‌شده با طول ۱۵٫۵ متر، عرض ۱۲٫۵ متر و ارتفاع ۴ متر بر روی بام سازه مدلسازی شده است. دو پارامتر نسبت جرمی و نسبت آب به ترتیب برابر با ۱٫۵ درصد و ۰٫۲ فرض شده است و عمق آب درون مخزن مقداری برابر با ۳ متر می‌باشد. شکل ۶ نمایی از تونل باد، سازه و میراگر مایع تنظیم‌شده در نرم‌افزار انسیس را نشان می‌دهد.

بعد از مدلسازی سازه و سیال به طور جداگانه در ماژول‌های مورد نظر انسیس، این دو قسمت یعنی بخش سازه‌ای و بخش سیال مدل در ماژول سیستم کوپلینگ[1] با هم ترکیب شده و اندرکنش بین سازه و سیال (اِف اِس آی)[2] بررسی می‌شود. نرم‌افزار انسیس این امکان را فراهم نموده تا اندرکنش سازه و سیال به طور همزمان بررسی شود. فاکتورهای مؤثر جهت بهبود عملکرد میراگرهای مایع تنظیم‌شده توسط ووریشکان[3] و همکاران مورد بررسی قرار گرفت و همچنین اندرکنش سازه و سیال در این نوع میراگرها با استفاده از محیط نرم‌افزاری انسیس فلوئنت[4] شبیه‌سازی شده است [۲۹]. به منظور تحلیل اندرکنش سازه و سیال از ماژول سیستم کوپلینگ استفاده شده است [۳۰]. نمایی از فضای ورک‌بنچ و ماژول‌های مورد استفاده در این مطالعه در شکل ۷ نشان داده شده است، همچنین نحوه چگونگی اعمال شتابنگاشت رکورد السنترو در شکل ۸ مشاهده می‌شود. با توجه به شکل

1 System Coupling
2 Fluid Solid Interaction (FSI)
3 Vuruşkan
4 Ansys Fluent



شکل ۸. نحوه اعمال شتابنگاشت رکورد السنترو به سازه سی اِی اِی آر سی در فضای ورک‌بنچ نرم‌افزار انسیس

Fig. 8. Process of importing El-Centro acceleration to CAARC structure in Ansys Software Workbench Space

۸ شتابنگاشت السنترو به صورت شتاب در قسمت مودال[1] ماژول ترنزییت اِستراکچرال[2] به سازه اعمال می‌شود.

۵- ارزیابی نتایج

به منظور بررسی رفتار آئرودینامیک سازه بلندمرتبه سی اِی اِی آر سی در برابر باد، توزیع فشار و الگوی خطوط جریان در پیرامون سازه به ازای بیشینه سرعت باد ۱۰۰ متر بر ثانیه و پاسخ‌های بیشینه سازه سی اِی اِی آر سی تحت ۴ رکورد زلزله، کانتورهای متفاوت و پاسخ‌های دینامیکی سازه از نرم‌افزار انسیس استخراج شده است. با توجه به مطالعه لاروسی[3] و همکاران در هنگام برخورد جریان سیال با موانع، گردباد نعل اسبی[4] در اطراف جسم پیچیده می‌شود و به نواحی پشت جسم هدایت می‌شود [۳۱]، همچنین یک گردباد قوسی[5] شکل در نواحی پشت جسم صلب بوجود می‌آیدکه هوابرد[6] نامیده می‌شود و از سطح زمین سرچشمه می‌گیرد.

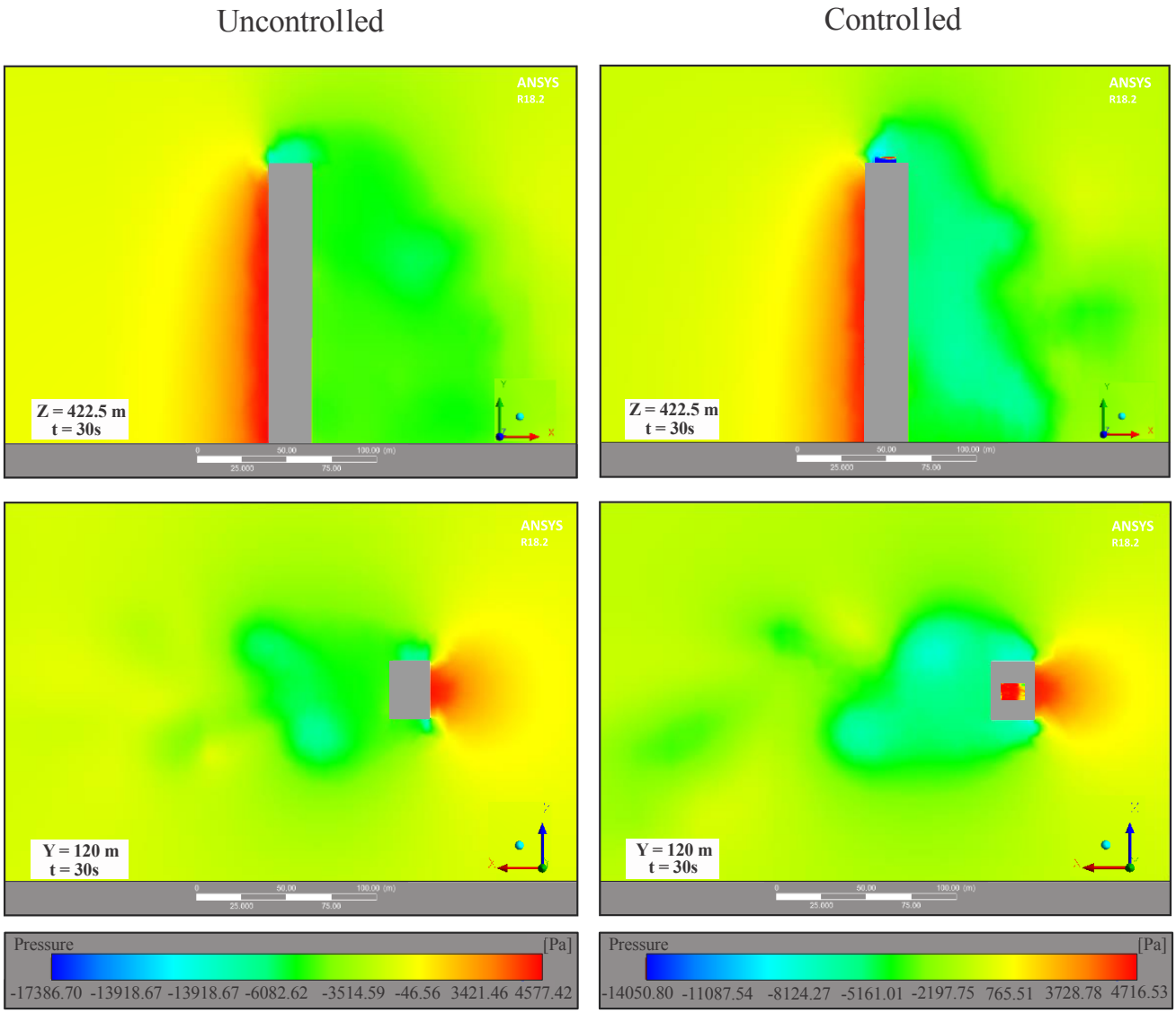
توزیع کانتورهای فشار در پیرامون سازه بلندمرتبه تحت وزش باد با بیشینه سرعت ۱۰۰ متر بر ثانیه را در تراز ۴۲۲٫۵ صفحه XY (مرکز سازه بلندمرتبه) و در تراز ۱۲۰ متری صفحه XZ (۲٫۳ ارتفاع سازه بلندمرتبه) را می‌توان در شکل ۹ در دو حالت کنترل‌شده و کنترل‌نشده مشاهده نمود. با توجه به شکل ۹، جریان در گوشه‌های بالادست سازه جدا می‌شود و در نواحی کناری و پشت سازه گردبادها را تشکیل می‌دهد. سطوحی از سازه که در برخورد مستقیم جریان باد قرار می‌گیرند دارای فشار مثبت (دمش) می‌باشند و سطوح کناری و پشت سازه فشار منفی (مکش) دارند. شکل ۱۰ نیز نمای سه‌بعدی از کانتورهای توزیع فشار در دو حالت کنترل‌شده و کنترل‌نشده می‌باشد.

در شکل‌های ۹ و ۱۰ مقایسه‌ای بین توزیع فشار در پیرامون ساختمان در دو حالت کنترل‌نشده و کنترل‌شده در یک زمان مشخص ($t = ۳۰\text{s}$) تحت بار باد انجام گرفته است. همانگونه که مشاهده می‌شود استفاده از میراگر مایع هماهنگ شده باعث تغییر در توزیع فشار اطراف ساختمان و درنتیجه تغییر در پاسخ سازه شده است.

ریزش‌های گردبادی پیرامون سازه بلندمرتبه در شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ نشان داده شده است. در ابتدا جریان‌های باد را در یک صفحه قائم به فاصله ۴۲۲٫۵ متر از دیواره‌ی تونل مشاهده می‌شود و سپس صفحه‌ای در تراز ۱۲۰ متری مدل به منظور بررسی تراکم خطوط جریان و ریزش‌های گردابه‌ها در این ارتفاع، در نظر گرفته شده است. گردباد نعل اسبی، گرداب B_t[7]، گرداب

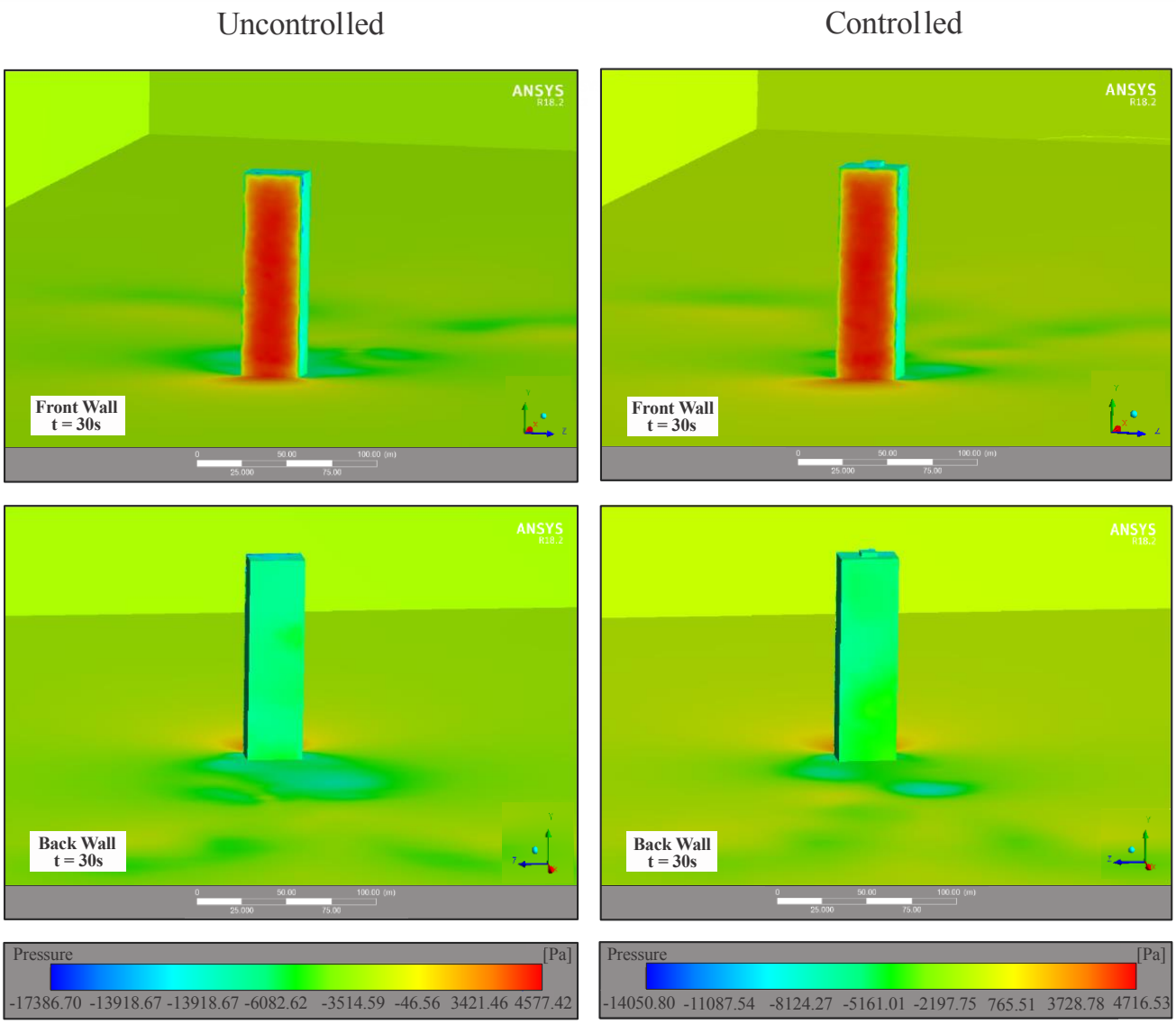
1 Modal
2 Transient Structural
3 Larousse
4 Horseshoe vortices
5 Arched Vortex
6 Airborne

7 Vortex B_t



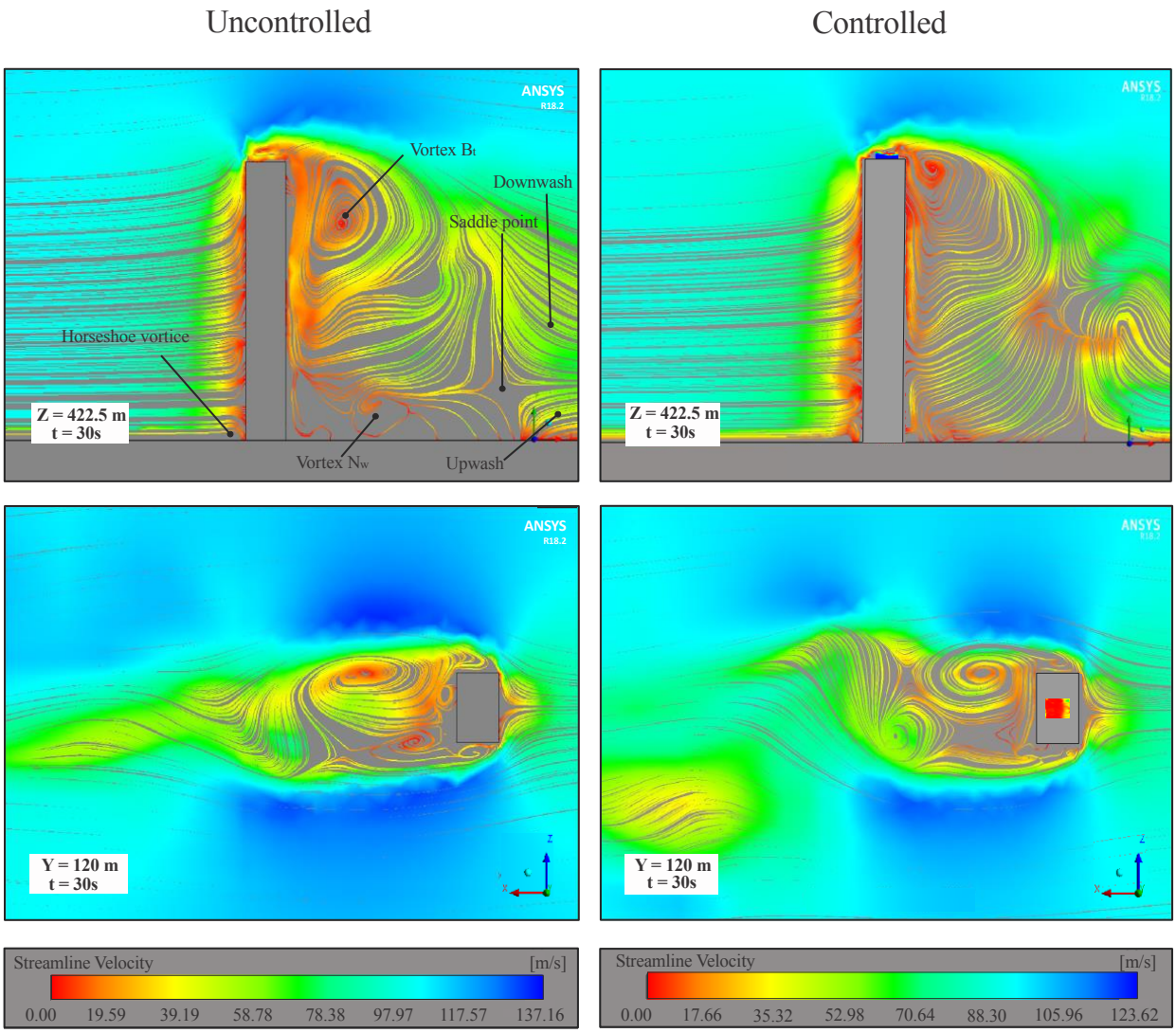
شکل ۹. توزیع فشار در صفحه *XY* و *XZ* در دو حالت کنترل‌شده و کنترل‌نشده

Fig. 9. Pressure distribution in plans of XY and XZ for controlled and uncontrolled modes



شکل ۱۰. توزیع فشار در پیرامون دیواره‌های سازه در دو حالت کنترل‌شده و کنترل‌نشده

Fig. 10. Pressure distribution over the building walls for controlled and uncontrolled modes



شکل ۱۱. خطوط جریان در صفحه XY و XZ در دو حالت کنترل‌شده و کنترل‌نشده

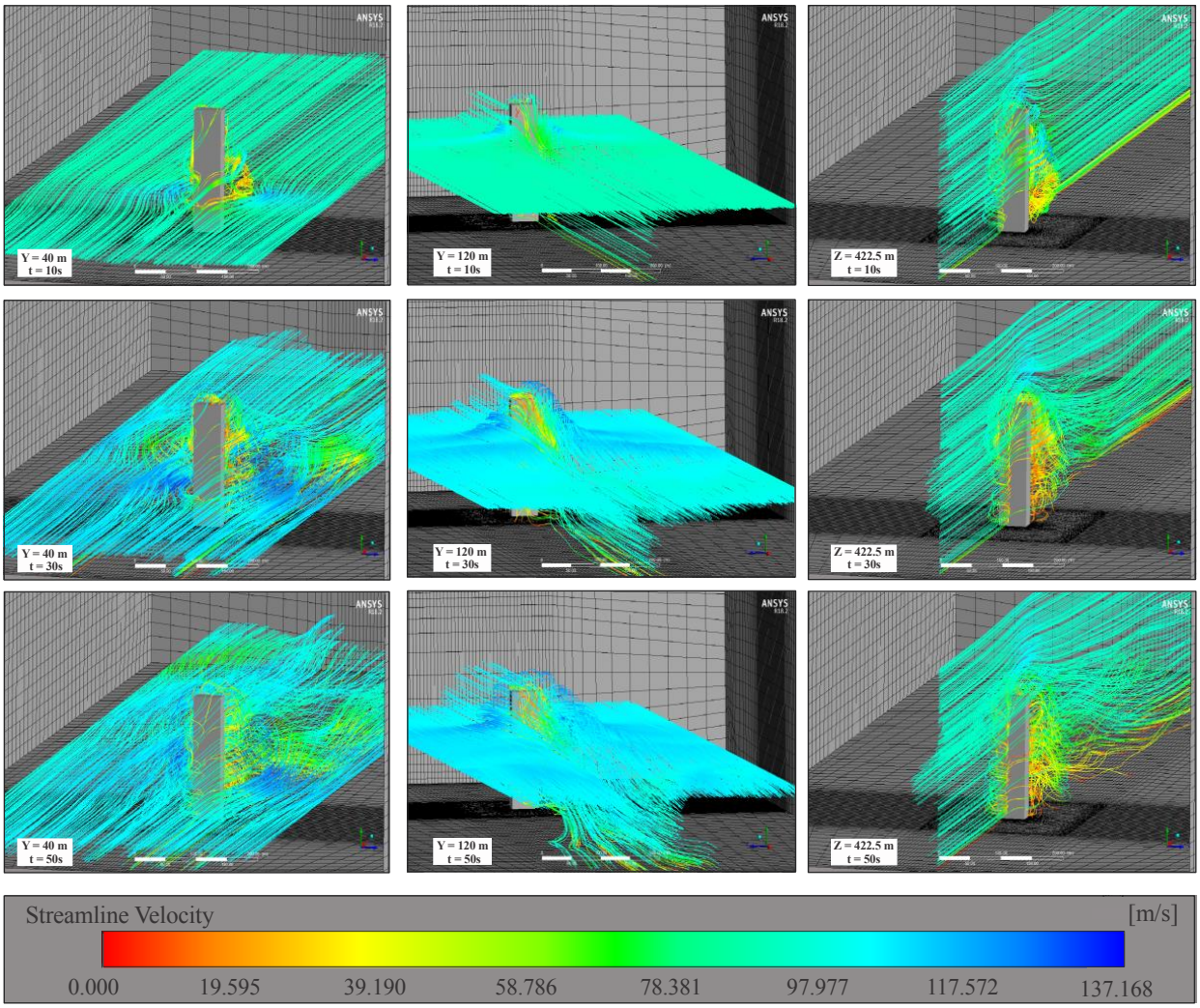
Fig. 11. Streamlines in plans of XY and XZ for controlled and uncontrolled modes

N_w[1]، نقطه زینی[2]، نواحی فرافکنش[3] و فراشار[4] در شکل ۱۱ مشخص شده‌اند [۳۲].

مشابه شکل ۹ در شکل ۱۱ توزیع خطوط جریان در حالت دو بعدی پیرامون سازه در دو حالت کنترل‌نشده و کنترل‌شده در یک زمان مشخص ($t = ۳۰s$) تحت بار باد رسم شده است. مطابق الگوی بدست آمده در این شکل تغییر خطوط جریان جلو ساختمان در دو حالت کنترل‌شده و کنترل‌نشده تفاوت چندانی نداشته اما خطوط جریان، ساختار و اندازه گردابه‌های ساختمان پشت ساختمان دچار تغییر گردیده است.

برای بررسی دقیق‌تر و با جزئیات بیشتر توزیع جریان، الگو خطوط جریان سه‌بعدی در اطراف سازه بلندمرتبه سی اِی اِی آر سی تحت وزش بادی با بیشینه سرعت ۱۰۰ متر بر ثانیه در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ به ترتیب برای دو حالت کنترل‌نشده و کنترل‌شده نمایش داده شده است. یک صفحه

1 Vortex N_w
2 Saddle point
3 Downwash
4 Upwash

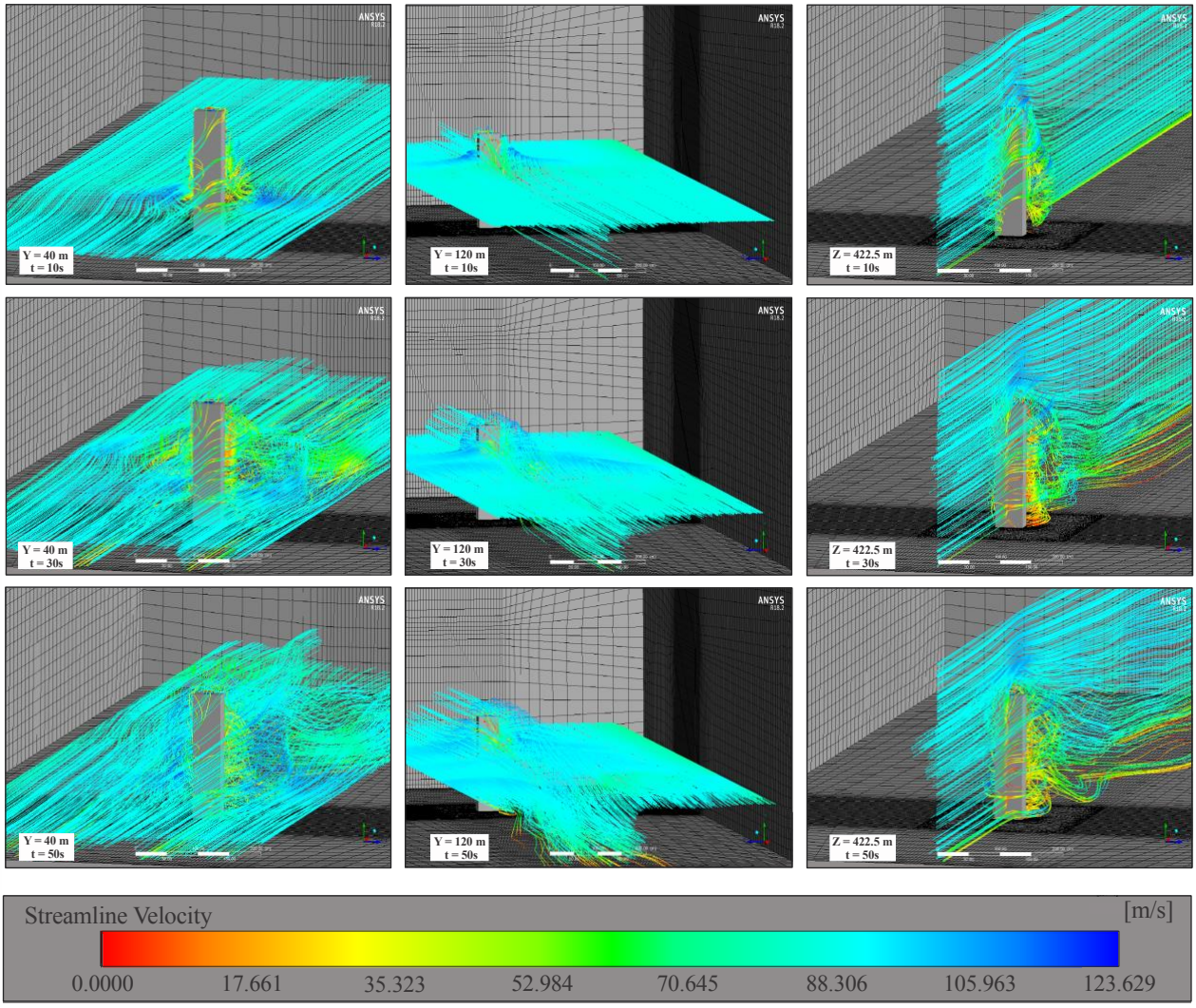


شکل ۱۲. خطوط جریان سه‌بعدی پیرامون سازه بلندمرتبه در حالت کنترل‌نشده و در صفحات مختلف

Fig. 12. Three-dimensional streamlines over the high-rise structure in different planes for uncontrolled modes

قائم در قسمت میانی عرض سازه و دو صفحه افقی در ارتفاع‌های ۴۰ و ۱۲۰ متری سازه در بازه زمانی ۱۰ تا ۵۰ ثانیه وزش باد ترسیم شده‌اند. در تمامی شکل‌های ۱۲ و ۱۳ جدایش جریان در دیواره‌های جانبی و بام سازه و همچنین تشکیل گردابه‌هایی در پشت سازه به خوبی قابل مشاهده می‌باشد.

در دو شکل ۱۲ و ۱۳ ستون چپ و وسط تغییرات خطوط جریان در راستای وزش باد و در یک صفحه افقی و به ترتیب در دو تراز مشخص ۴۰ و ۱۲۰ متر نشان می‌دهد. در ستون سمت راست نیز تغییرات خطوط جریان در یک صفحه قائم در راستای وزش باد نشان داده شده است. ردیف اول تا سوم هر ستون به ترتیب توزیع خطوط جریان را در سه زمان متفاوت ۱۰، ۳۰ و ۵۰ ثانیه نشان می‌دهد. در هر دو شکل مشاهده می‌شود که با افزایش زمان آشفتگی خطوط جریان افزایش یافته است. از مقایسه هر بخش شکل ۱۲ (توزیع خطوط جریان در حالت کنترل‌نشده) با شکل ۱۳ (توزیع خطوط جریان در حالت کنترل‌شده) مشاهده می‌شود که الگوی خطوط جریان به دلیل اثرات میراگر سیال هماهنگ شده بر نحوه ارتعاش سازه کاملاً تغییر کرده است.

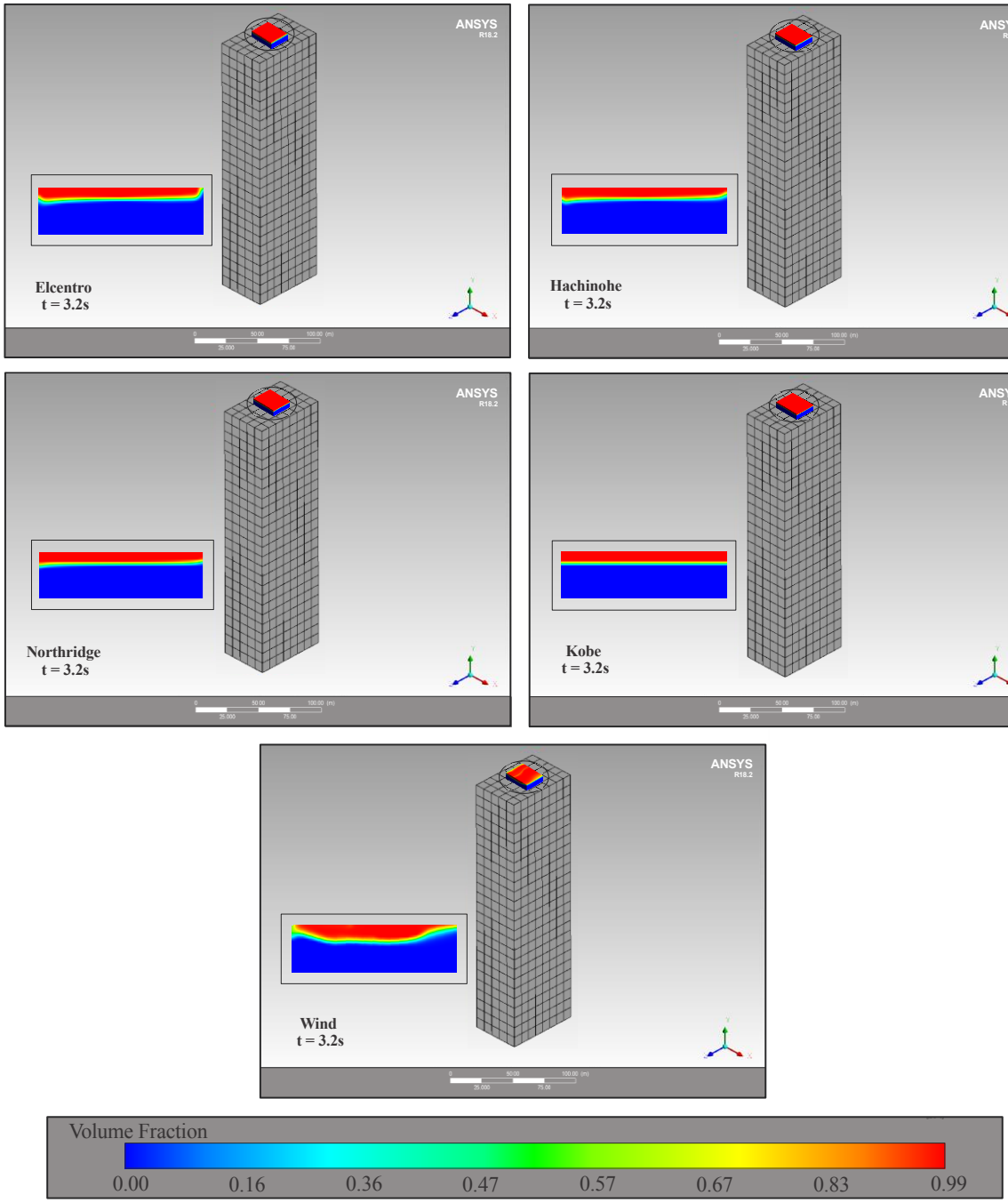


شکل ۱۳. خطوط جریان سه‌بعدی پیرامون سازه بلندمرتبه در حالت کنترل‌شده و در صفحات مختلف

Fig. 13. Three-dimensional streamlines over the high-rise structure in different planes for controlled modes

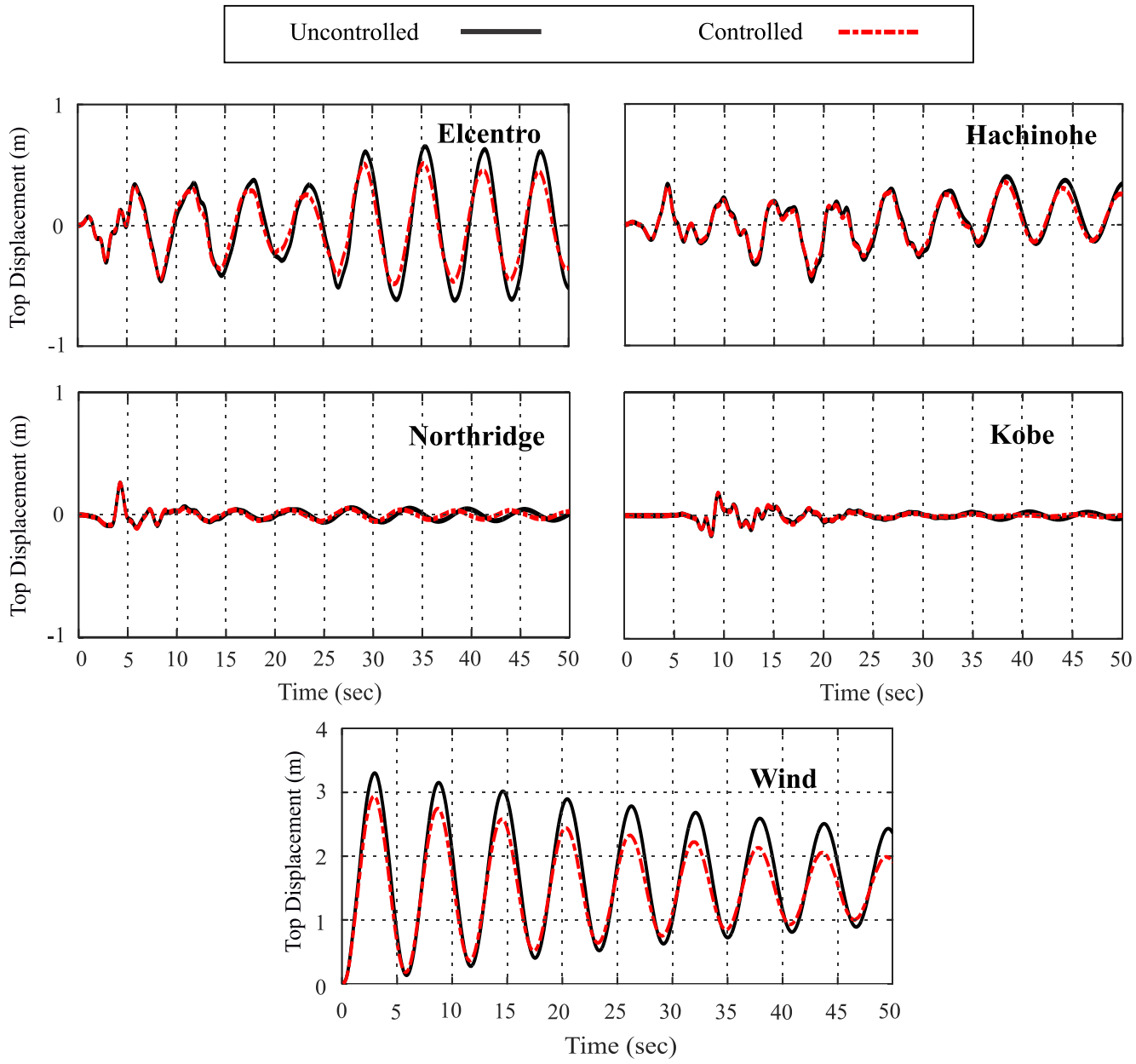
جریان متلاطم سیال مخزن نصب شده بر روی سازه سی اِی اِی آر سی تحت باد و ۴ رکورد زلزله السنترو، هاچینو، کوبه و نورثریج در مقطعی از راستای محور Z در لحظه ۳٫۲ ثانیه ارتعاشات، در شکل ۱۴ نشان داده شده است. کانتورهای کسر حجمی سیال درون مخزن دو فازی (آب– هوا) و توزیع قطرات آب در مجاورت هوا در این شکل نشان داده شده است. رنگ قرمز نشان دهنده هوای درون مخزن می‌باشد، این مقدار هرچه به ۱ نزدیک شود حاکی از حضور هوا درون مخزن است. رنگ آبی، سیال به کار برده شده در شبیه‌سازی را توصیف می‌کند، مقدار کسر حجمی نشان دهنده حجم سیال نسبت به حجم کل است و هرچه به صفر نزدیکتر شود بیان کننده حضور سیال درون مخزن است. مرز بین آب و هوا توسط رنگ سبز روشن مشخص می‌شود و این رنگ نشان دهنده سطح تماس بین این دو فاز می‌باشد.

به منظور بررسی عملکرد میراگر در طول مدت زمان زلزله، تاریخچه زمانی جابجایی، سرعت و شتاب بام سازه سی اِی اِی آر سی همراه با میراگر و بدون میراگر تحت باد، دو رکورد حوزه دور و دو رکورد حوزه نزدیک به ترتیب در شکل‌های ۱۵، ۱۶ و ۱۷ نشان داده شده است. همان‌طور که قبلاً گفته شده بود سرعت باد ۱۰۰ متر بر ثانیه می‌باشد و پاسخ‌های بدست آمده از سازه تحت باد به صورت طولی استخراج شده است (جابجایی طولی، سرعت طولی، شتاب طولی).



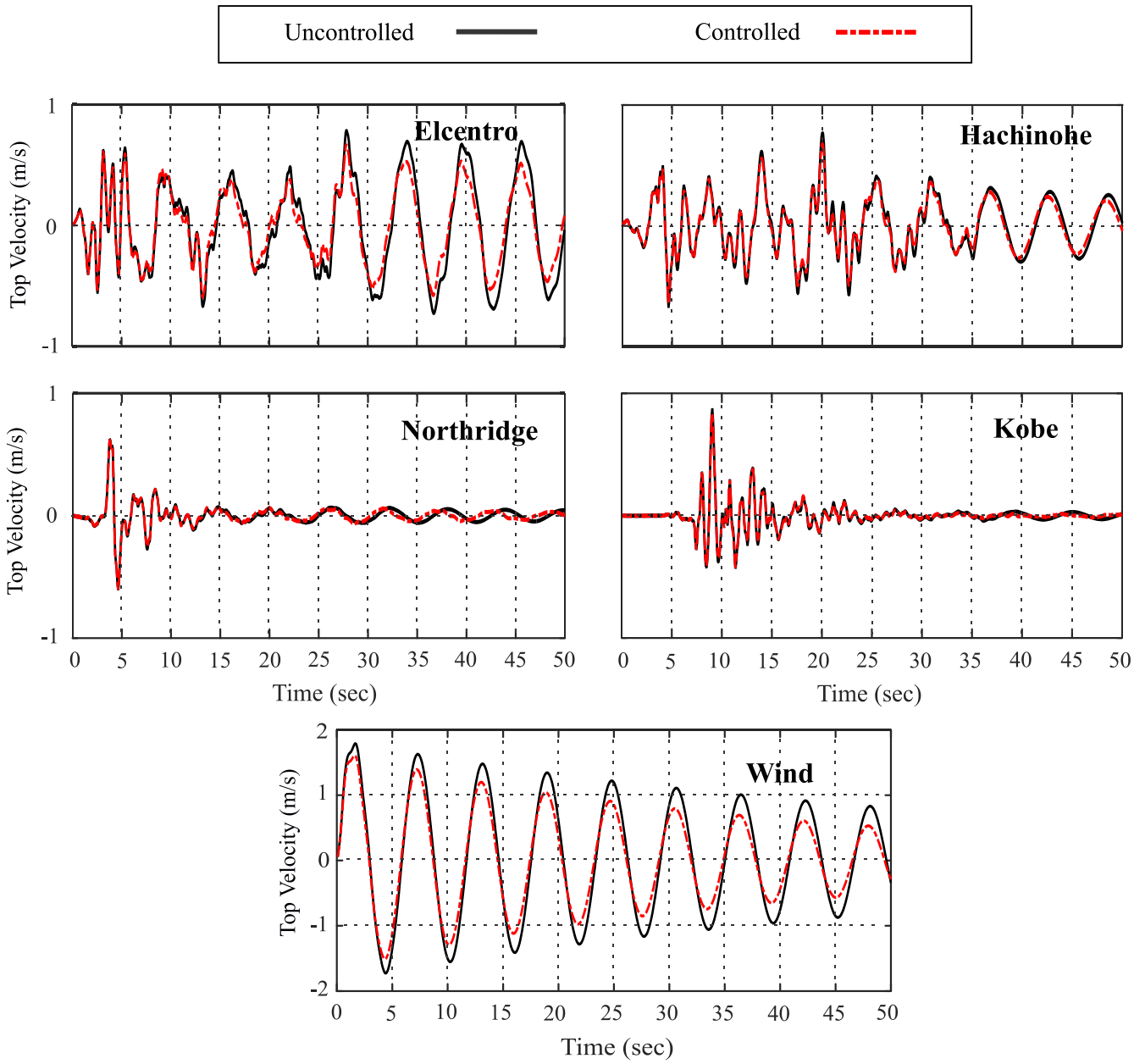
شکل ۱۴. تلاطم سیال درون مخزن تحت باد و ۴ رکورد حوزه دور و نزدیک (در لحظه ۳/۲ ثانیه)

Fig. 14. Sloshing the fluid of tank under wind and four near and far-field record (in 3.2 second)



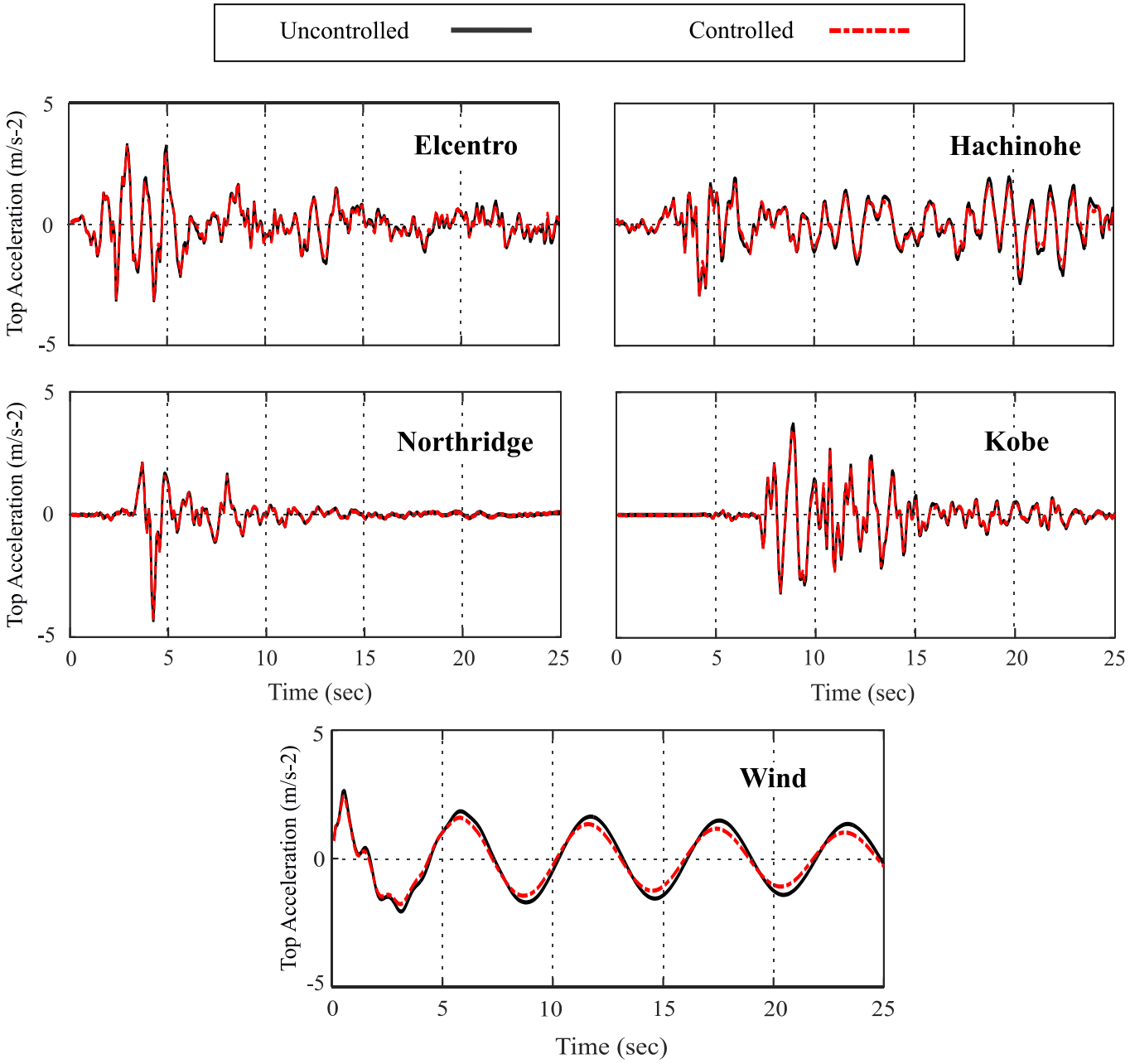
شکل ۱۵. تاریخچه زمانی طولی جابجایی بام سازه تحت باد و ۴ رکورد زلزله حوزه دور و نزدیک در دو حالت کنترل‌شده و کنترل‌نشده

Fig. 15. The top of structure Longitudinal displacement's time history under wind and four near and far-field record for controlled and uncontrolled modes



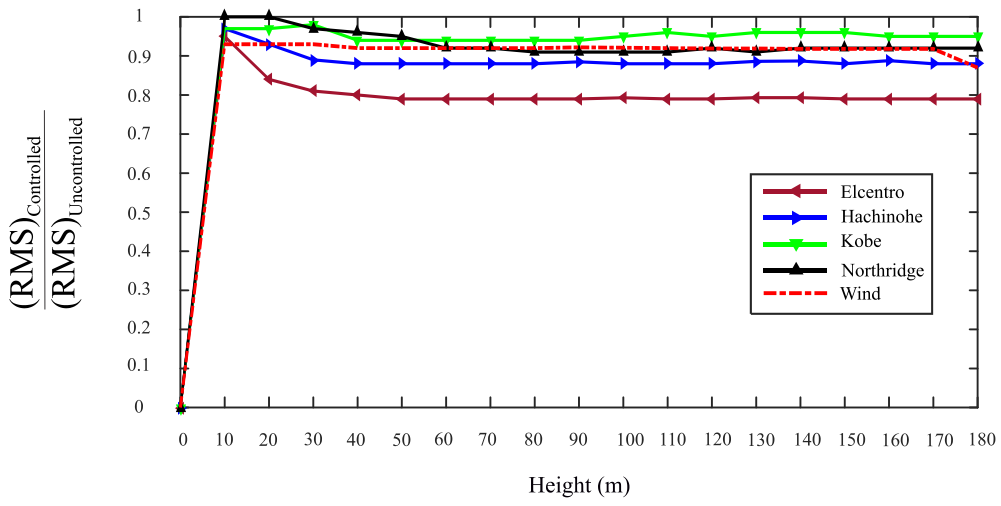
شکل ۱۶. تاریخچه زمانی طولی سرعت بام سازه تحت باد و ۴ رکورد زلزله حوزه دور و نزدیک در دو حالت کنترل‌شده و کنترل‌نشده

Fig. 16. The top of structure Longitudinal velocity's time history under wind and four near and far-field record for controlled and uncontrolled modes



شکل ۱۷. تاریخچه زمانی طولی شتاب بام سازه تحت باد و ٤ رکورد زلزله حوزه دور و نزدیک در دو حالت کنترل‌شده و کنترل‌نشده

Fig. 17. The top of structure Longitudinal acceleration's time history under wind and four near and far-field record for controlled and uncontrolled modes



شکل ۱۸. نسبت ریشه میانگین مربعات جابجایی کنترل‌شده به کنترل‌نشده سازه در ارتفاع‌های متفاوت تحت زلزله و باد

Fig. 18. The root of the mean displacement squares ratio of controlled to uncontrolled in structure different heights under wind and earthquake

جدول ۲. نسبت پاسخ‌های کنترل‌شده به کنترل‌نشده حداکثر بام سازه CAARC تحت باد و رکوردهای حوزه دور و نزدیک

Table 2. The CAARC structure maximum responses ratio of controlled to uncontrolled under wind and near and far-field record

تحریکات	جابجایی بیشینه	سرعت بیشینه	شتاب بیشینه	ریشه میانگین مربعات جابجایی	ریشه میانگین مربعات سرعت	ریشه میانگین مربعات شتاب
السنترو	۰٫۷۸	۰٫۸۴	۰٫۹۷	۰٫۷۹	۰٫۸۰	۰٫۹۰
هاچینو	۰٫۹۰	۰٫۸۸	۱	۰٫۸۸	۰٫۹۰	۰٫۸۸
کوبه	۱	۰٫۹۵	۰٫۹۲	۰٫۹۵	۰٫۹۵	۰٫۹۴
نورثریج	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۹۷	۰٫۹۲	۰٫۹۷	۰٫۹۷
باد	۰٫۸۷	۰٫۹۴	۰٫۹۸	۰٫۸۷	۰٫۷۹	۰٫۷۹

نسبت ریشه میانگین مربعات جابجایی (آر اِم اِس)[1] جابجایی کنترل‌شده به کنترل‌نشده سازه در ارتفاع‌های متفاوت تحت چهار رکورد زلزله حوزه دور و نزدیک و باد در شکل ۱۸ آورده شده است.

نسبت حداکثر پاسخ‌های سازه بلندمرتبه (جابجایی، سرعت و شتاب) کنترل‌شده به کنترل‌نشده و نسبت ریشه میانگین مربعات پاسخ‌های سازه بلندمرتبه (جابجایی، سرعت و شتاب) کنترل‌شده به کنترل‌نشده تحت رکوردهای حوزه دور، حوزه نزدیک و باد در جدول ۲ نشان داده شده است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک سازه بلندمرتبه معیار به ارتفاع ۱۸۰ متر تحت بارهای دینامیکی مختلف بررسی شده است. به منظور بررسی اثر باد بر روی سازه بلندمرتبه سی اِی اِی آر سی، یک تونل باد در نرم‌افزار انسیس مدلسازی شد و همچنین ۴ رکورد زلزله حوزه دور و نزدیک به سازه اعمال گردید. بعد از مدلسازی سازه، به تحلیل اثر آئروالاستیک باد و همچنین بررسی ارتعاشات

1 Root Mean Square (RMS)

ناشی از رکوردهای زلزله پرداخته شد و به منظور کاهش پاسخ‌های سازه در برابر تحریکات خارجی، از یک میراگر مایع تنظیم‌شده استفاده شده است. با توجه به بررسی‌های انجام شده می‌توان به نتیجه‌گیری‌های زیر اشاره نمود:

- میراگر مورد استفاده در این مطالعه، تحت رکوردهای حوزه دور عملکرد بهتری نسبت به باد و رکوردهای حوزه نزدیک داشته است و همچنین عملکرد میراگر تحت پروفیل باد بهتر از رکوردهای حوزه نزدیک بوده است. درصد کاهش پاسخ‌های سازه برای حداکثر جابجایی، سرعت و شتاب برای زلزله السنترو به ترتیب برابر با ٪۲۲، ٪۱۱ و ٪۳ درصد و برای زلزله هاچینو برابر با ٪۱۰، ٪۱۲ و ٪۰ درصد است، همچنین مقدار کاهش حداکثر جابجایی، سرعت و شتاب برای زلزله کوبه به ترتیب برابر با ٪۰، ٪۵ و ٪۸ درصد و برای زلزله نورثریج برابر با ٪۱، ٪۱ و ٪۳ درصد بدست آمده است و در نهایت درصد کاهش جابجایی، سرعت و شتاب حداکثر برای سازه تحت ارتعاش باد به ترتیب برابر با ٪۱۳، ٪۶ و ٪۲ درصد می‌باشد.
- به منظور ارزیابی عملکرد میراگر در کاهش جابجایی، سرعت و شتاب سازه تحت بارهای دینامیکی، این پاسخ‌ها در ارتفاع‌های متفاوت سازه مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به بررسی‌های انجام شده میانگین مقدار کاهش پاسخ برای حداکثر جابجایی، سرعت و شتاب بام در ارتفاع‌های متفاوت سازه به ترتیب برابر ٪۹، ٪۵ و ٪۳ درصد بدست آمده است، به عبارت تی اِل دی مورد نظر عملکرد بهتری در کاهش جابجایی نسبت به سایر پاسخ‌ها داشته است.

منابع

[1] O. El-Khoury, H. Adeli, Recent advances on vibration control of structures under dynamic loading, Archives of Computational Methods in Engineering, 20(4) (2013) 353-360.

[2] K. Ghaedi, Z. Ibrahim, H. Adeli, A. Javanmardi, Invited Review: Recent developments in vibration control of building and bridge structures, Journal of Vibroengineering, 19(5) (2017) 3564-3580.

[3] Y. Parulekar, G. Reddy, Passive response control systems for seismic response reduction: A state-of-the-art review, International Journal of Structural Stability and Dynamics, 9(01) (2009) 151-177.

[4] P.G. Bhuta, L.R. Koval, A viscous ring damper for a freely precessing satellite, International Journal of Mechanical Sciences, 8(5) (1966) 383-395.

[5] J.K. Vandiver, S. Mitome, Effect of liquid storage tanks on the dynamic response of offshore platforms, Applied Ocean Research, 1(2) (1979) 67-74.

[6] R.O. Ruiz, D. Lopez-Garcia, A.A. Taflanidis, An efficient computational procedure for the dynamic analysis of liquid storage tanks, Eng. Struct., 85 (2015) 206-218.

[7] H.R. Shokrgozar, K. Naeim, H. Imani Kalasar, Comparison of the Efficiency of Tuned Mass and Tuned Liquid Dampers at High-Rise Structures under Near and Far Fault Earthquakes, Journal of Structural Engineering and Construction, 3(4) (2016) 105-119. (In persian).

[8] M. Fahimi Farzam, B. Alinejad, S.A. Mousavi, statistical performance of semi-active controlled 10-storey linear building using mr damper under earthquake motions, Journal of Civil Engineering Amirkabir, (2020). In persian.

[9] R.O. Ruiz, D. Lopez-Garcia, A.A. Taflanidis, Modeling and experimental validation of a new type of tuned liquid damper, Acta Mechanica, 227(11) (2016) 3275-3294.

[10] A.R. Pandit, K.C. Biswal, Evaluation of dynamic characteristics of liquid sloshing in sloped bottom tanks, Intl. J. Dyn. Cont., (2019).

[11] A. Samanta, P. Banerji, Structural vibration control using modified tuned liquid dampers, The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering, 3(1) (2010) 14-27.

[12] M.H. Alkmim, M.V.G. de Morais, A.T. Fabro, Optimum Parameters of a Tuned Liquid Column Damper in a Wind Turbine Subject to Stochastic Load, in: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, 2017, pp. 012007.

[13] M. Marivani, M.S. Hamed, Evaluate pressure drop of slat screen in an oscillating fluid in a tuned liquid damper, Comput. Fluids, 156 (2017) 384-401.

[14] R. Wardlaw, G. Moss, A standard tall building model for the comparison of simulated natural winds in wind tunnels, CAARC, CC 662m Tech, 25 (1970).

[15] W. Melbourne, Comparison of measurements on the CAARC standard tall building model in simulated model

wind flows, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 6(1-2) (1980) 73-88.

[16] Zhang, T. Hisada, Studies of the strong coupling and weak coupling methods in FSI analysis, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 60(12) (2004) 2013-2029.

[17] A. Braun, A. Awruch, Finite element simulation of the wind action over bridge sectional models: Application to the Guamá River Bridge (Pará State, Brazil), Finite Elements in Analysis and Design, 44(3) (2008) 105-122.

[18] A.L. Braun, A.M. Awruch, Aerodynamic and aeroelastic analyses on the CAARC standard tall building model using numerical simulation, Comput Struct, 87(9-10) (2009) 564-581.

[19] A.L. Braun, A.M. Awruch, A partitioned model for fluid-structure interaction problems using hexahedral finite elements with one-point quadrature, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 79(5) (2009) 505-549.

[20] D.Q. Zheng, M. Gu, A.S. Zhang, Partitioned coupling scheme-based numerical simulation platform for wind-induced vibration of tall buildings, J Vib Shock, 34(13) (2015) 95-100.

[21] G.N. Lygidakis, S.S. Sarakinos, I.K. Nikolos, Simulation of the flow over the caarc standard tall building using different LES turbulence models, in: ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE 2016, American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2016.

[22] M. Shirzadeh Germi, H. Eimani Kalehsar, Numerical Investigation of Aeroelastic Behavior of Tall Buildings Considering Wind-Structure Interaction, Modares Mechanical Engineering, 19(3) (2019) 719-730. (In persian).

[23] C. Feng, M. Gu, D. Zheng, Numerical simulation of wind effects on super high-rise buildings considering wind veering with height based on CFD, J. Fluids Struct., 91 (2019).

[24] S. Behera, D. Ghosh, A.K. Mittal, Y. Tamura, W. Kim, The effect of plan ratios on wind interference of two tall buildings, Struct. Des. Tall Spec. Build., 29(1) (2020).

[25] J. Love, B. Morava, A. Smith, Monitoring of a Tall Building Equipped with an Efficient Multiple-Tuned Sloshing Damper System, Practice Periodical on Structural Design and Construction, 25(3) (2020) 05020003.

[26] Q. Wang, H. Tian, H. Qiao, N.D. Tiwari, Q. Wang, Wind-induced vibration control and parametric optimization of connected high-rise buildings with tuned liquid-column-damper–inerter, Eng. Struct., 226 (2021) 111352.

[27] S. Rezaei, M. Elmi, M. Montazerinamin, S.M. Zahraei, Design of Tuned Liquid Damper to reduce the vibrations of semi-high structures

in: 8th National Congress of Civil Engineering, undefined, 2014. (In persian).

[28] P. Banerji, M. Murudi, A.H. Shah, N. Popplewell, Tuned liquid dampers for controlling earthquake response of structures, Earthqua. Eng. Struct. Dyn., 29(5) (2000) 587-602.

[29] I. Vuruşkan, C. Sert, M. Özer, Simulation of Fluid Sloshing for Decreasing the Response of Structural Systems, in: Engineering Systems Design and Analysis, American Society of Mechanical Engineers, American, 2014, pp. V002T011A011.

[30] S.K. Chimakurthi, S. Reuss, M. Tooley, S. Scampoli, ANSYS Workbench System Coupling: a state-of-the-art computational framework for analyzing multiphysics problems, Eng Comput, 34(2) (2018) 385-411.

[31] A. Larousse, R. Martinuzzi, C. Tropea, Flow around surface-mounted, three-dimensional obstacles, in, 1991, pp. 14_14_11.

[32] B.L. da Silva, R. Chakravarty, D. Sumner, D.J. Bergstrom, Aerodynamic forces and three-dimensional flow structures in the mean wake of a surface-mounted finite-height square prism, International Journal of Heat and Fluid Flow, 83 (2020) 108569.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Fahimi Farzam, B. Alinejad, R. Maroofiazar, H. Kazemi Sormoli, Passive Control of Vibrations of High-Rise Structure Using Tuned Liquid Damper under Wind and Earthquake Excitations, Amirkabir J. Mech Eng., 53(11) (2022) 5367-5388.

DOI: 10.22060/mej.2021.19433.7026