

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

مازیار فهیمی فرزاد^{*}، بابک علی نژاد، رسول معروفی آذر، هاجر کاظمی سرملی

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

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

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، به همین 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 به صرفه 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 (السنتر و ۱۹۴۰ و هاچینو ۱۹۶۸)، رکوردهای زلزله حوزه نزدیک (نورتریج 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.

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 ال دی) 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 و

کوال^۲ میراگر مایع تنظیم‌شده را در فضایی‌ها مورد مطالعه قرار دادند [۴] و همچنین واندیوار^۴ از این نوع میراگرها به منظور کنترل ارتعاش سکوه‌های 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 روییز^۵ 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



جی پی اس^۶ یکی از روش‌های بهینه‌یابی می‌باشد که توسط آلکمیم^۷ 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)^۸ به عنوان یکی از شاخه‌های دینامیک سیالات محاسباتی (سی اف دی)^۹ 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 ای ای آر سی)^{۱۰} معرفی شده است.

مشخصات مدل استاندارد سی ای ای آر سی برای آزمایش‌های تونل باد و بررسی آئرو دینامیک بر روی سازه استاندارد برای اولین بار توسط واردلاو^{۱۱} 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^{۱۲} [۱۵] مقایسه‌ی کاملی از نتایج شش محقق دیگر در رابطه با سازه سی ای ای آر سی انجام داد و پارامترهایی از قبیل فشار و پاسخ‌های دینامیکی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین ژانگ^{۱۳} و هادیاد^{۱۴} [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

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. به همین منظور در سال ۲۰۱۶، روئیز^۱ 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^۲ و بیسوال^۳ [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 هیدرو دینامیکی 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^۴ و بانرجی^۵ [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

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

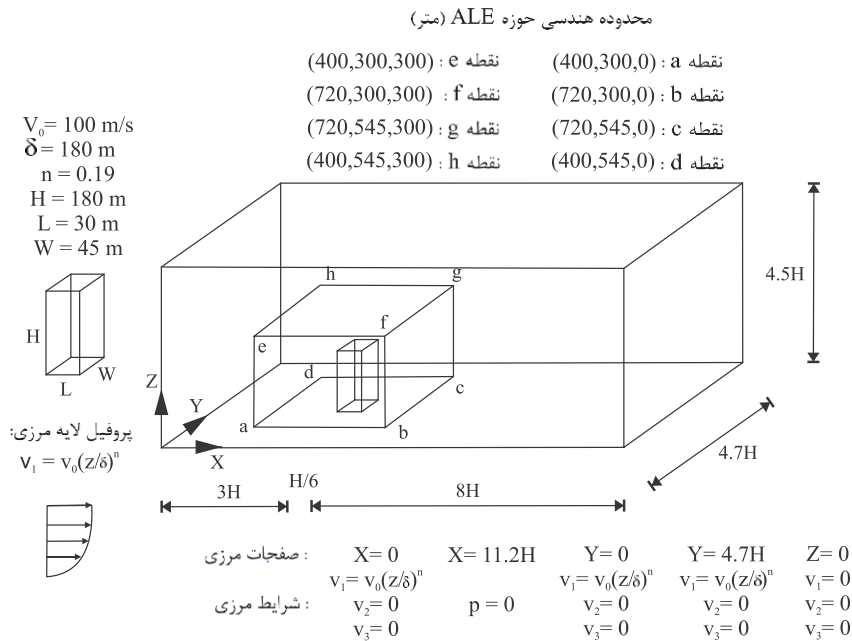
1 Ruiz
2 Pandit
3 Biswal
4 Samanta
5 Banerji

مطالعه قرار دادند و عملکرد آن را با دو میراگر ستونی مایع تنظیم‌شده (تی ال سی دی) مقایسه کرده‌اند. این نوع سیستم‌ها هم از مزایای میراگرهای ستونی مایع تنظیم‌شده بهره می‌برند و هم از اثر افزایش جرم اینترتر مورد استفاده در کاهش پاسخ‌های سازه بهره‌مند می‌شوند. سیستم تی ال 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 ای ای آر سی مورد بررسی قرار نگرفته است. همچنین در مطالعات گذشته سازه سی ای ای آر سی تنها تحت تحریک نیروی باد مورد بررسی قرار گرفته است و عملکرد لرزه‌ای سازه سی ای ای آر سی تحت رکوردهای زمین‌لرزه با ویژگی‌های متفاوت بررسی نشده است. در این پژوهش سازه بلندمرتبه استاندارد سی ای ای آر سی به ارتفاع ۱۸۰ متر تحت دو تحریک زلزله معیار حوزه دور السنتر 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 ای ای 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 ای ای آر سی معرفی شده‌اند، سپس سازه سی ای ای آر سی مدل شده در نرم افزار انسیس با مدل مطالعه براون صحت‌سنجی قرار گرفته است. در

اندرکنش ارتباط مستقیمی با اتصال دو حوزه سیال و سازه در مسائل اندرکنش دارد. براون^۱ و آروچ^۲ [۱۷] مدل مقطعی پل رودخانه گوما 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 لاگرانژی-اویلری مطلق توصیف نمودند. همچنین طرح نوینی به منظور تحلیل مسائل اندرکنش بین جریان‌های تراکم‌ناپذیر و سازه‌های خطی مانند سازه سی ای ای 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 ای ای 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 ای ای 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^۳ 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^۴ بر روی مدل مورد تحلیل و آنالیز قرار گرفته است. در سال ۲۰۲۰، بهرا^۵ 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^۶ و همکاران [۲۵] یک میراگر متلاطم تنظیم‌شده چندگانه (ام تی اس دی)^۷ را بر روی یک سازه بلند تحت باد مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که سیستم ام تی اس دی باعث بهبود عملکرد میراگر و افزایش مقاومت آن می‌شود و شتاب سازه را تا ۵۰ درصد کاهش می‌دهد. وانگ^۸ و همکاران [۲۶] دستگاه جدیدی را به عنوان میراگر ستونی مایع تنظیم‌شده اینترتر (تی ال سی دی آی)^۹ بر روی بام دو سازه بلندمرتبه مجاور تحت جریان باد مورد

- 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



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

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

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 (آی‌ای‌سی‌سی) مدنظر قرار گرفته است. این انجمن در اوایل دهه ۹۰ میلادی به منظور همکاری محققان بین‌المللی در دستیابی به مطالعات مبنا تشکیل شد. این رکوردهای زمین‌لرزه شامل دو رکورد زلزله حوزه دور (السترو 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 السترو و هاچینو بدون ضریب مقیاس و زلزله نورث‌ریج و کوبه به ترتیب به مقدارهای ۳۰ و ۴۰ درصد مقیاس شده‌اند.

بخش چهارم روند طراحی میراگر سیال موجود در ادبیات فنی شرح داده شده است و در بخش پنجم تحلیل‌های آنروالاستیک 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

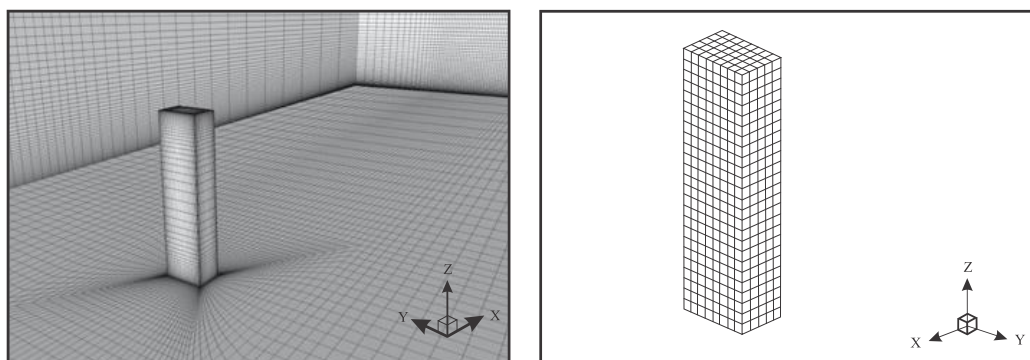
مدل مورد بررسی در این مطالعه سازه بلندمرتبه سی‌ای‌سی‌سی می‌باشد و مطابق شکل ۱ طولی برابر با ۳۰ متر در راستای محور X ، عرضی برابر با ۴۵ متر در راستای محور Y و ارتفاعی برابر با ۱۸۰ متر در راستای محور Z را دارد. همان‌طور که گفته شد به منظور بررسی اثر باد بر روی سازه، تونل بادی با ابعاد آورده شده در شکل 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

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و هندسه به کار برده شده در آنالیز آنروالاستیک 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])

$۱,۲۵ \text{ kg/m}^۳$	جرم ویژه (ρ)	حوزه سیال
$۷,۰۳ \times ۱۰^۳ \text{ N.s/m}^۲$	ویسکوزیته دینامیکی (μ)	
$\cdot \text{ N.s/m}^۲$	ویسکوزیته حجمی (λ)	
۳۳۰ m/s	سرعت صوت (c)	
۱۰۰ m/s	مشخصات سرعت (سرعت جریان در ارتفاع ۱۸۰ متری)	
۴۵ m	مشخصات ابعاد (عرض ساختمان)	
$۱۶۰ \text{ kg/m}^۳$	جرم ویژه (ρ)	حوزه سازه
$۲,۳ \times ۱۰^۸ \text{ N/m}^۲$	مدول الاستیسیته (E)	
$۰,۲۵$	ضریب پواسون (ν)	
$\%۱$	نسبت میرایی (χ)	
$۰,۲ \text{ Hz}$	فرکانس طبیعی	
$۰,۶$	شعاع طیفی (r_α)	



شکل ۲. مش بندی حوزه سیال و سازه ای برای آنالیز آنروالاستیک سازه بلندمرتبه

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

و آروچ در نرم افزار انسیس و با شبیه سازی عددی گرداب بزرگ مدلسازی شد و نتایج در شکل ۴ آورده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود مقدار اختلاف این دو شبیه سازی ناچیز می باشد (مقدار تقریبی ۳ درصد) و نتایج بدست آمده از نرم افزار انسیس قابل قبول است.

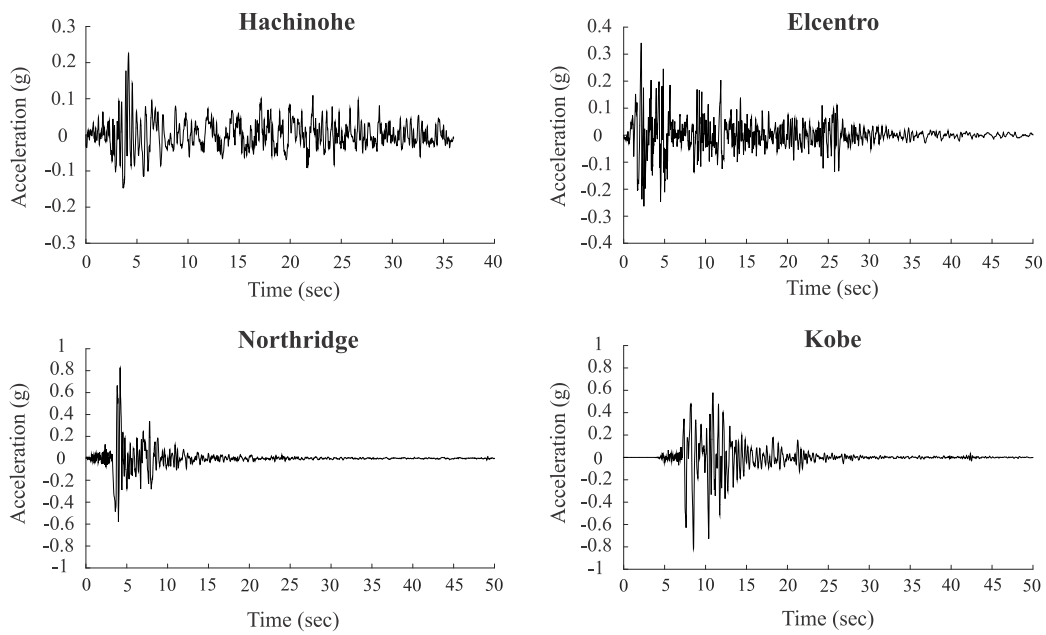
۴- مدلسازی میراگر مایع تنظیم شده

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

۳- صحت سنجی

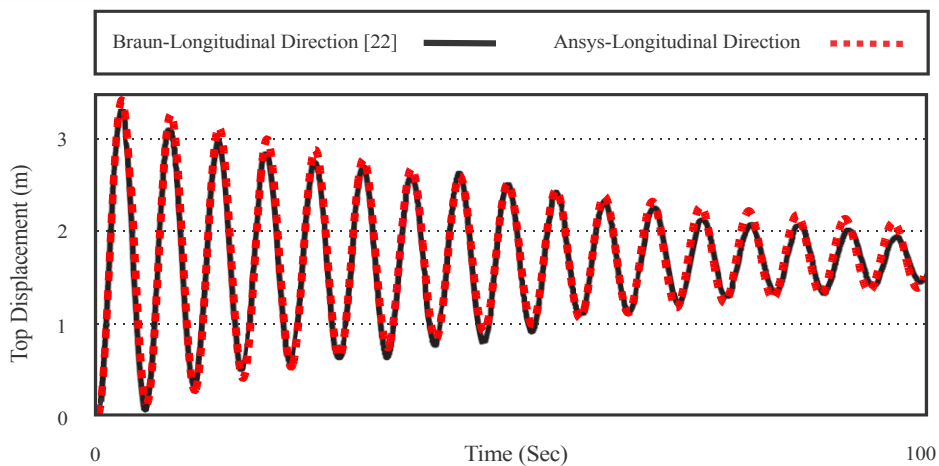
به منظور بررسی صحت مدلسازی در نرم افزار انسیس، از نتایج مقاله براون و آروچ استفاده شده است [۱۸ و ۱۹]. براون و آروچ با استفاده از نرم افزار المان محدود و شبیه سازی عددی گرداب بزرگ (ال ای ای اس) سازه استاندارد سی ای ای آر سی را تحت پروفیل باد با سرعت های متفاوت مورد بررسی قرار دادند، به همین منظور سازه و تونل بادی مشابه مطالعه براون

1 Large Eddy Simulation (LES)



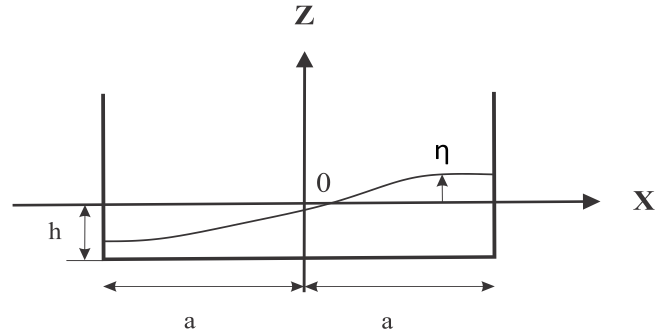
شکل ۳. تاریخچه زمانی رکوردهای هاجینو، السنترو، نورثریج و کوبه

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



شکل ۴. جابجایی بیشینه سازه بلندمرتبه سی ای ای 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

میزان کاهش پاسخ‌های سازه کنترل‌شده با میراگر سیال تنظیم‌شده تحت تحریک پایه به ویژگی‌های سازه‌ای سیستم تی ال دی بستگی دارد. سه پارامتر اصلی در طراحی تی ال 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 (۰٫۳ تا ۰٫۵) 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 پرپود 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.

$$\omega_l = \sqrt{\frac{\pi g}{2a} \tanh\left(\frac{\pi h}{2a}\right)} = \sqrt{\frac{\pi g}{2a} \tanh(\pi \Delta)} \quad (4)$$

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]:

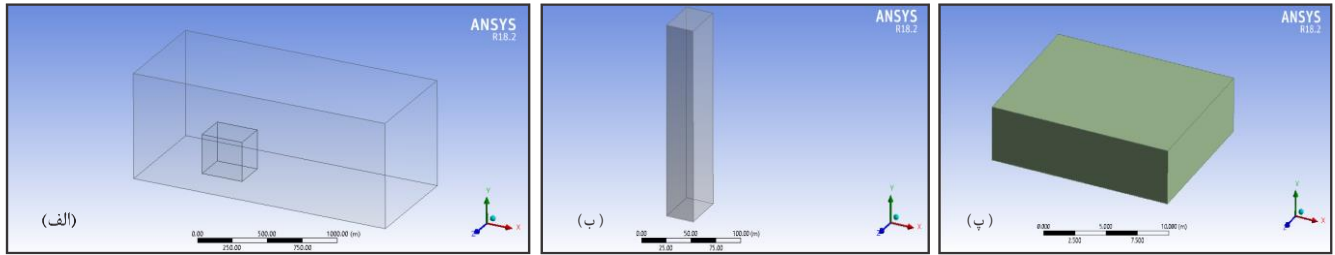
$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(uP)}{\partial x} + g(h + \eta) \frac{\partial \eta}{\partial x} - \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(v_l \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{gP|P|}{C^2(h + \eta)^2} = 0$$

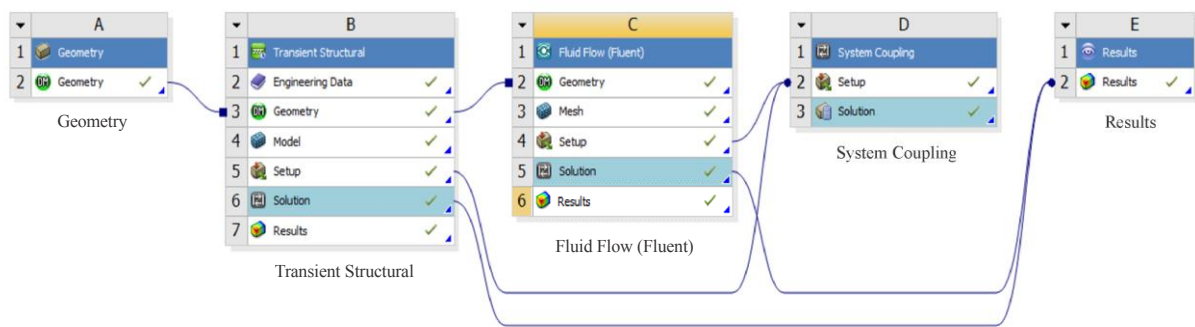
در رابطه اول (رابطه پیوستگی) η مقدار بالآمدگی آب نسبت به تراز اولیه و P میزان دبی در واحد عرض می‌باشد و از رابطه (۳) بدست می‌آید، همچنین h ، v_l ، g ، C و u به ترتیب ارتفاع سطح اولیه آب، شتاب گرانش، ضریب پخش، ضریب سزی و سرعت در واحد عرض است. یک مخزن به طول و عمق آب به اندازه‌ی h در شکل ۵ نشان داده شده 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].

$$P = u(h + \eta) \quad (3)$$



شکل ۶. نمای سه بعدی از (الف) تونل باد، (ب) سازه بلندمرتبه و (پ) میراگر مایع تنظیم شده در نرم افزار 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 نرم افزار انسیس

Fig. 7. The Ansys Software Workbench Space

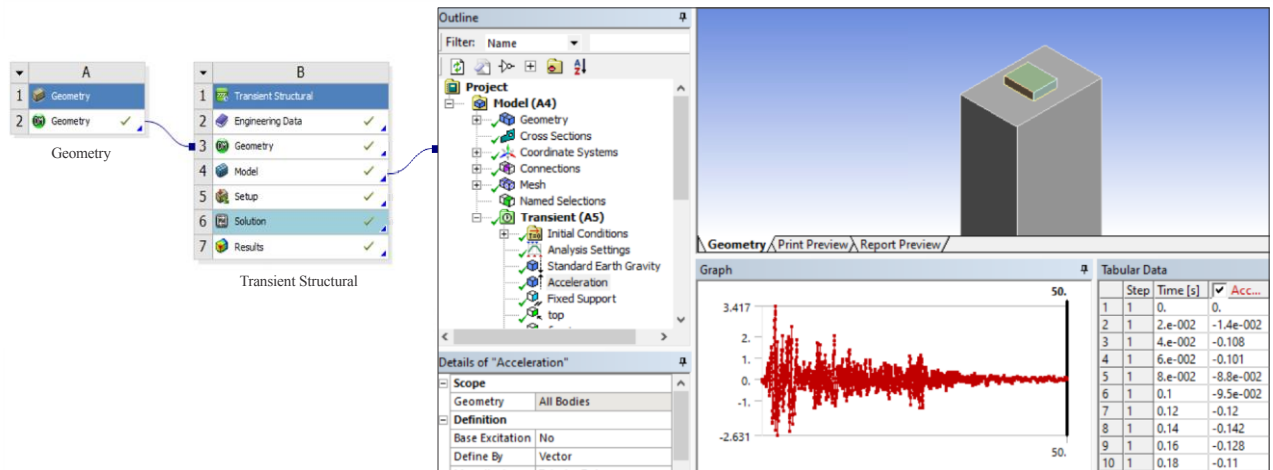
بعد از مدلسازی سازه و سیال به طور جداگانه در ماژول های مورد نظر انسیس، این دو قسمت یعنی بخش سازه ای و بخش سیال مدل در ماژول سیستم کوپلینگ^۱ با هم ترکیب شده و اندرکنش بین سازه و سیال (اف اس آی)^۲ بررسی می شود. نرم افزار انسیس این امکان را فراهم نموده تا اندرکنش سازه و سیال به طور همزمان بررسی شود. فاکتورهای مؤثر جهت بهبود عملکرد میراگرهای مایع تنظیم شده توسط ووریشکان^۳ و همکاران مورد بررسی قرار گرفت و همچنین اندرکنش سازه و سیال در این نوع میراگرها با استفاده از محیط نرم افزاری انسیس فلونت^۴ شبیه سازی شده است [۲۹]. به منظور تحلیل اندرکنش سازه و سیال از ماژول سیستم کوپلینگ استفاده شده است [۳۰]. نمایی از فضای ورکبنچ و ماژول های مورد استفاده در این مطالعه در شکل ۷ نشان داده شده است، همچنین نحوه چگونگی اعمال شتابنگاشت رکورد الاسترو در شکل ۸ مشاهده می شود. با توجه به شکل

۳. یکی دیگر از پارامترهای تاثیرگذار در طراحی میراگر مقدار جرم سیال درون مخزن می باشد، جرم آب درون مخزن از فرمول $m_l = \rho h a b$ محاسبه می شود که ρ جرم حجمی سیال می باشد. نسبت جرمی (μ) به طور معمول بین ۱ الی ۴ درصد انتخاب می شود و با توجه به مقدار Δ بدست می آید.

۴. بعد از محاسبه مقدار طول مخزن، ارتفاع سیال و نسبت جرمی مورد نظر، با توجه به رابطه $\mu = \frac{m_l}{m_s}$ می توان مقدار عرض مخزن را محاسبه نمود. جرم سیال (m_l) و جرم سازه (m_s) می باشد، همان طور که در گام ۳ ذکر شد مقدار جرم سیال از رابطه $m_l = \rho h a b$ بدست می آید.

در این مطالعه یک میراگر مایع تنظیم شده 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 می باشد. شکل ۶ نمایی از تونل باد، سازه و میراگر مایع تنظیم شده در نرم افزار انسیس را نشان می دهد.

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



شکل ۸. نحوه اعمال شتابنگاشت رکورد السنترو به سازه سی ای ای آر سی در فضای ورکبنچ نرم افزار انسیس

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

بلندمرتبه) و در تراز ۱۲۰ متری صفحه XZ (۲٫۳ ارتفاع سازه بلندمرتبه) را می توان در شکل ۹ در دو حالت کنترل شده و کنترل نشده مشاهده نمود. با توجه به شکل ۹، جریان در گوشه های بالادست سازه جدا می شود و در نواحی کناری و پشت سازه گردبادها را تشکیل می دهد. سطوحی از سازه که در برخورد مستقیم جریان باد قرار می گیرند دارای فشار مثبت (دمش) می باشند و سطوح کناری و پشت سازه فشار منفی (مکش) دارند. شکل ۱۰ نیز نمای سه بعدی از کانتورهای توزیع فشار در دو حالت کنترل شده و کنترل نشده می باشد.

در شکل های ۹ و ۱۰ مقایسه ای بین توزیع فشار در پیرامون ساختمان در دو حالت کنترل نشده و کنترل شده در یک زمان مشخص ($t = 30s$) تحت بار باد انجام گرفته است. همانگونه که مشاهده می شود استفاده از میراگر مایع هماهنگ شده باعث تغییر در توزیع فشار اطراف ساختمان و در نتیجه تغییر در پاسخ سازه شده است.

ریزش های گردبادی پیرامون سازه بلندمرتبه در شکل های ۱۱ تا ۱۳ نشان داده شده است. در ابتدا جریان های باد را در یک صفحه قائم به فاصله ۴۲۲٫۵ متر از دیواره ی تونل مشاهده می شود و سپس صفحه ای در تراز ۱۲۰ متری مدل به منظور بررسی تراکم خطوط جریان و ریزش های گردبادها در این ارتفاع، در نظر گرفته شده است. گردباد نعل اسبی، گردباد B_1 ، گردباد

۸ شتابنگاشت السنترو به صورت شتاب در قسمت مودال^۱ ماژول ترنزیست استراکچرال^۲ به سازه اعمال می شود.

۵- ارزیابی نتایج

به منظور بررسی رفتار آئرو دینامیک سازه بلندمرتبه سی ای ای آر سی در برابر باد، توزیع فشار و الگوی خطوط جریان در پیرامون سازه به ازای بیشینه سرعت باد ۱۰۰ متر بر ثانیه و پاسخ های بیشینه سازه سی ای ای آر سی تحت ۴ رکورد زلزله، کانتورهای متفاوت و پاسخ های دینامیکی سازه از نرم افزار انسیس استخراج شده است. با توجه به مطالعه لاروسی^۳ و همکاران در هنگام برخورد جریان سیال با موانع، گردباد نعل اسبی^۴ در اطراف جسم پیچیده می شود و به نواحی پشت جسم هدایت می شود [۳۱]، همچنین یک گردباد قوسی^۵ شکل در نواحی پشت جسم صلب بوجود می آید که هوا برد^۶ نامیده می شود و از سطح زمین سرچشمه می گیرد.

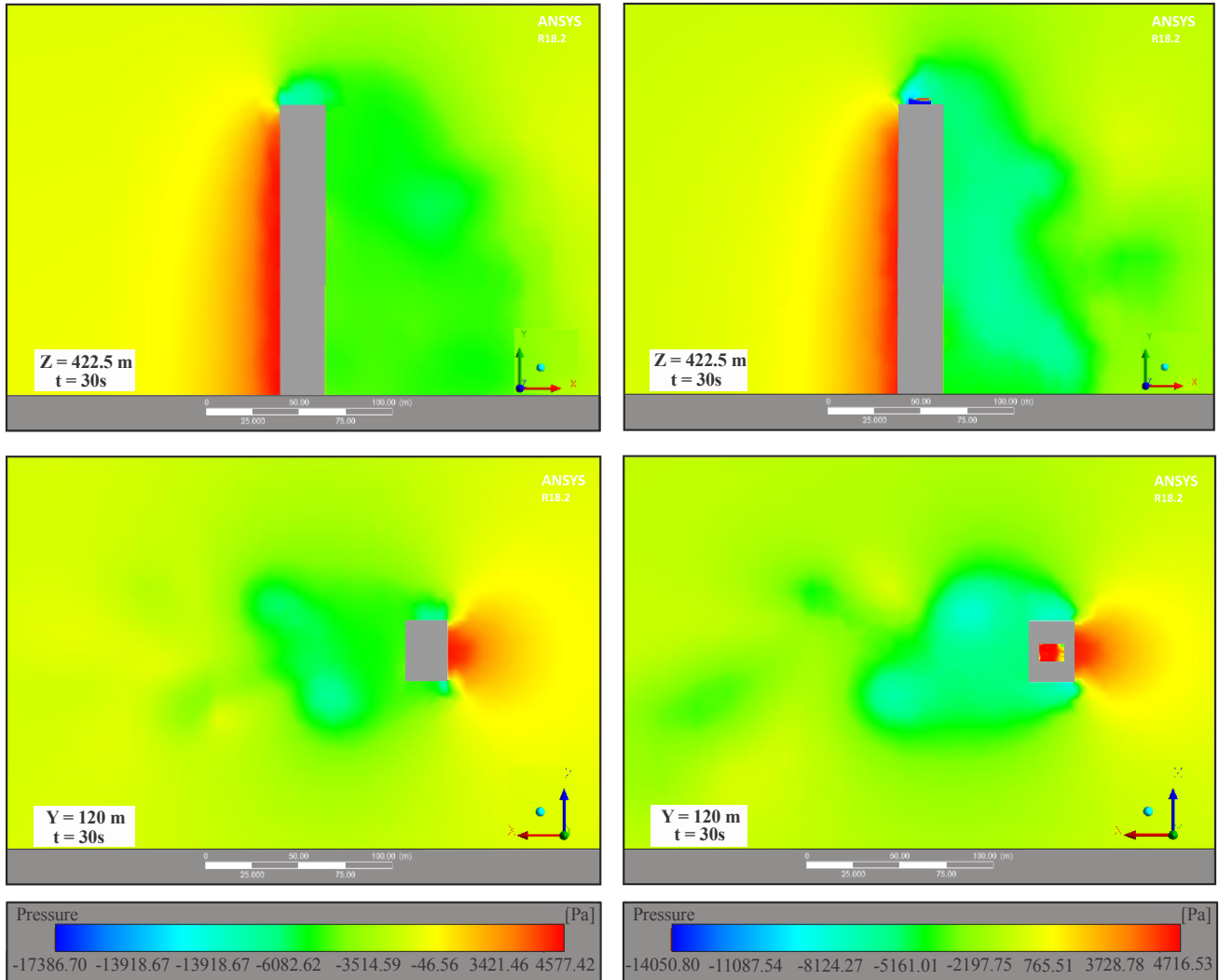
توزیع کانتورهای فشار در پیرامون سازه بلندمرتبه تحت وزش باد با بیشینه سرعت ۱۰۰ متر بر ثانیه را در تراز ۴۲۲٫۵ صفحه XY (مرکز سازه

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

7 Vortex B_1

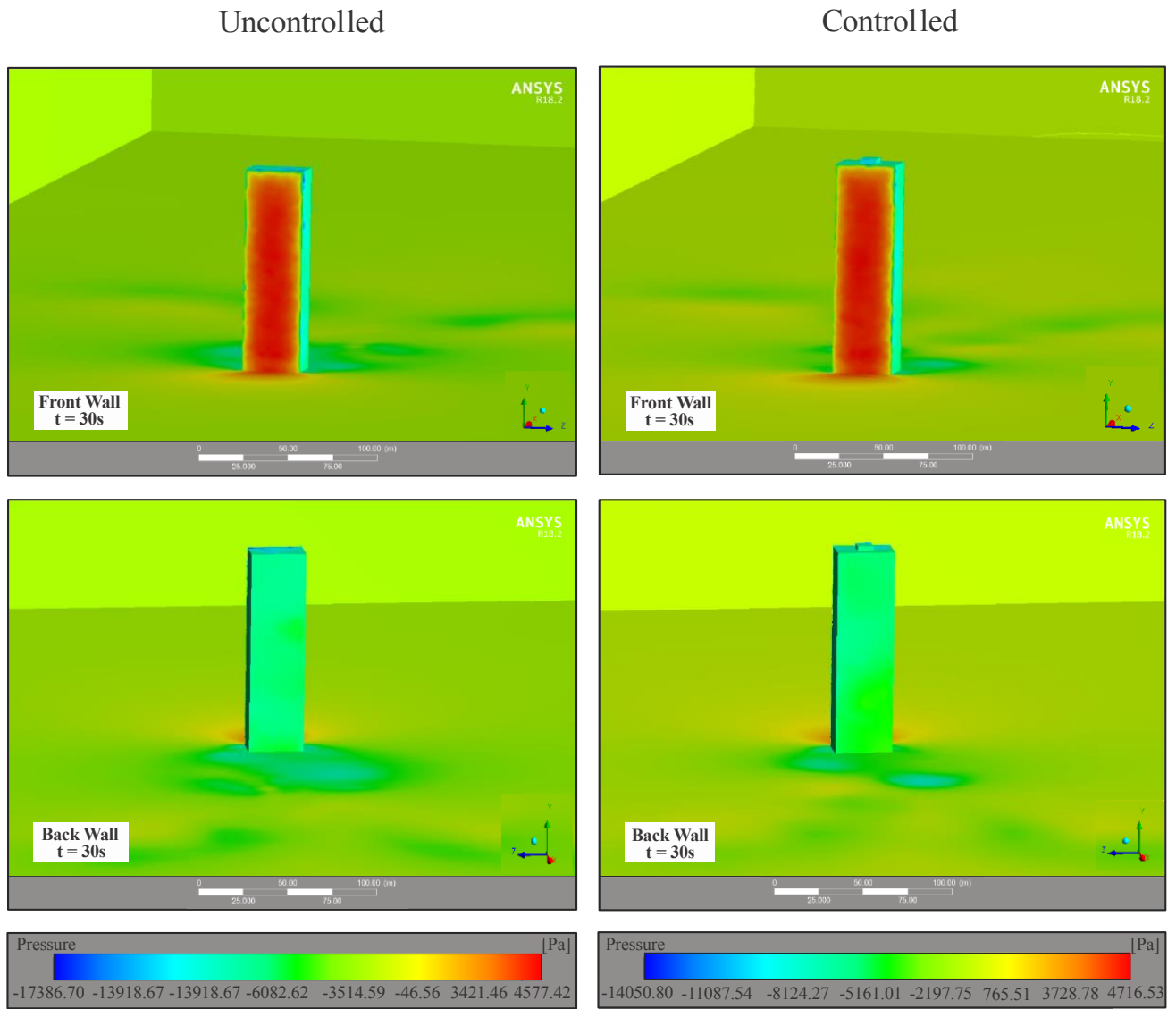
Uncontrolled

Controlled



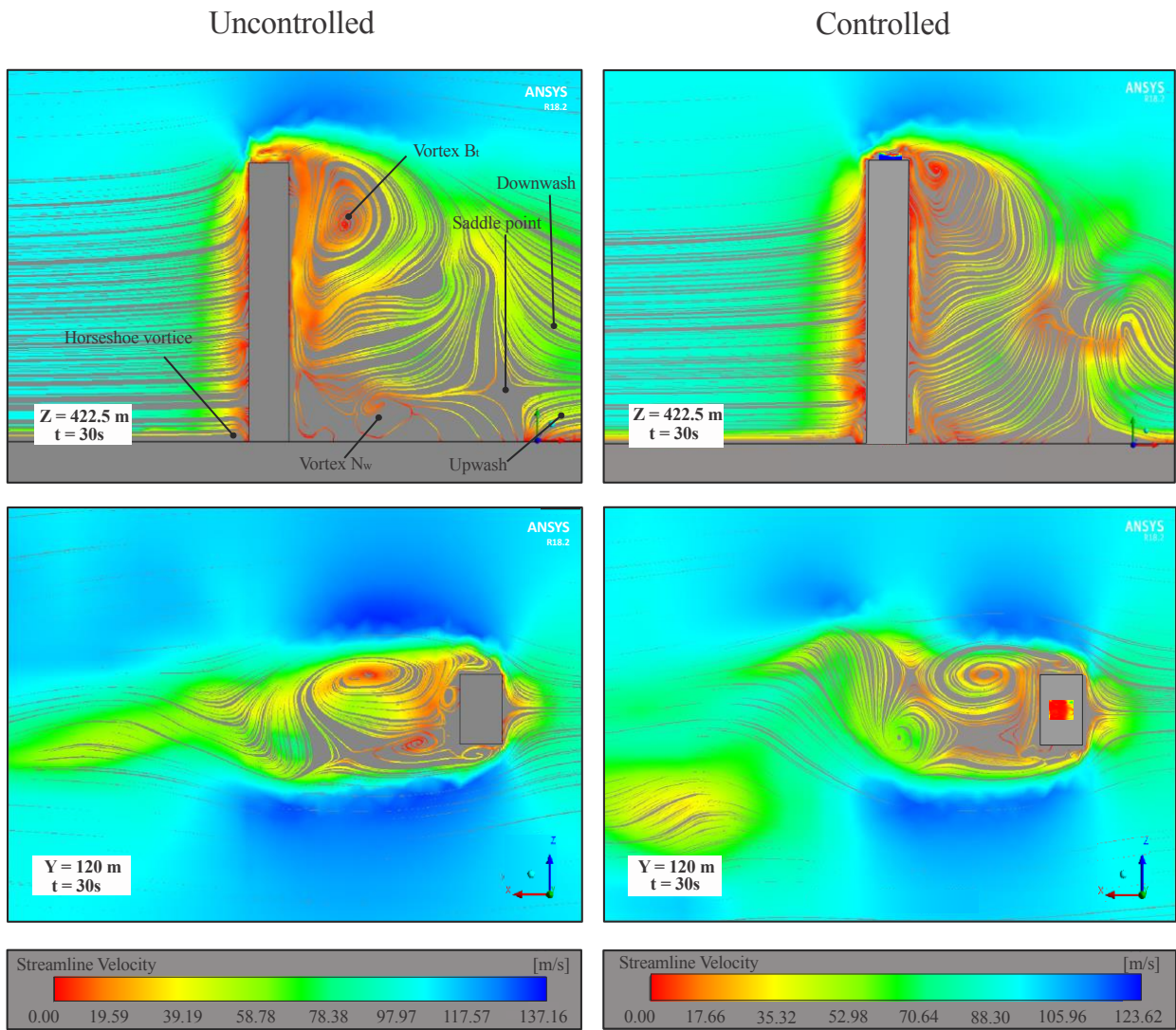
شکل ۹. توزیع فشار در صفحه XY و XZ در دو حالت کنترل شده و کنترل نشده

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 کنترل شده و کنترل نشده

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

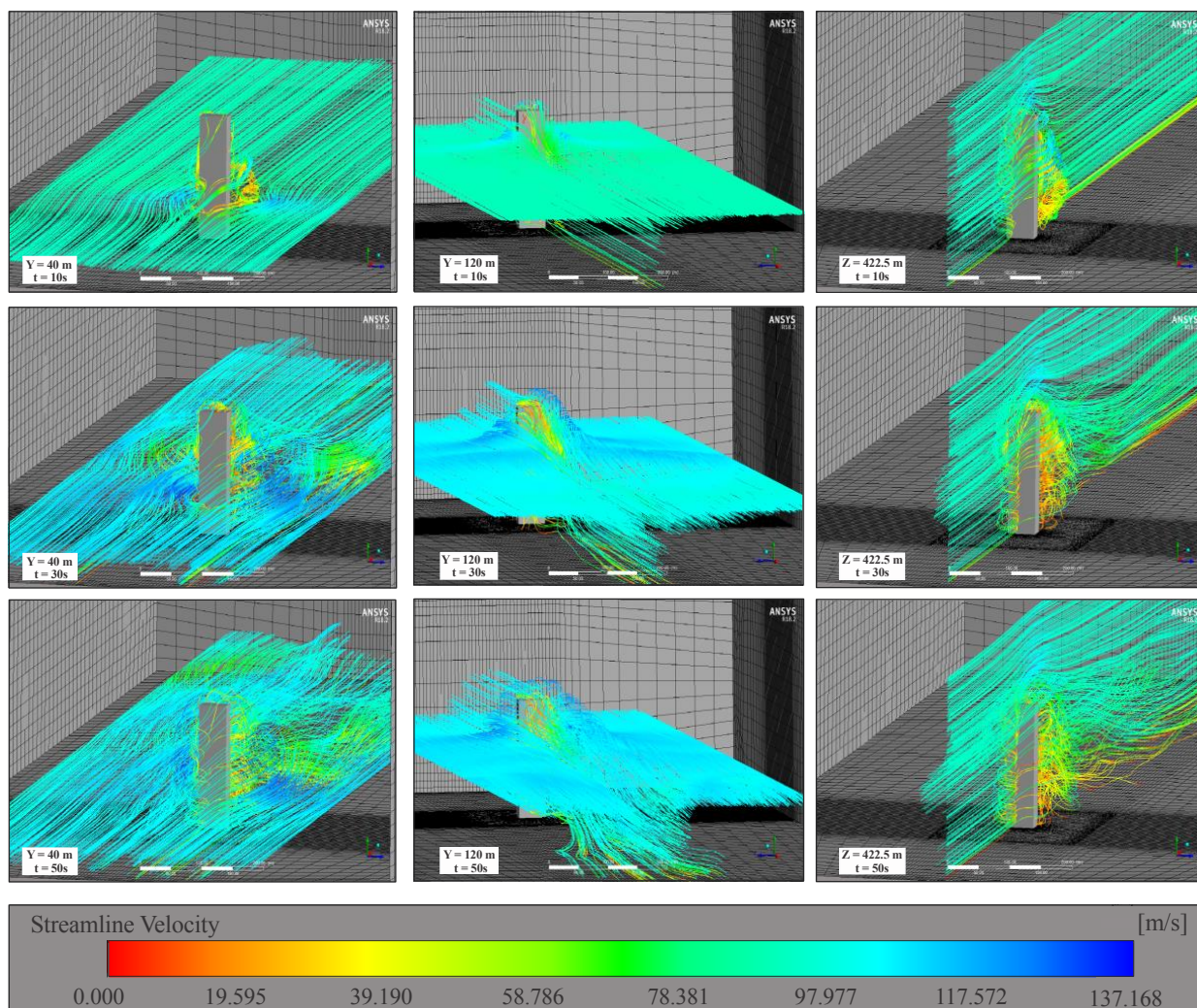
در این زمان ($t = 30s$) تحت بار باد رسم شده است. مطابق الگوی بدست آمده در این شکل تغییر خطوط جریان جلو ساختمان در دو حالت کنترل شده و کنترل نشده تفاوت چندانی نداشته اما خطوط جریان، ساختار و اندازه گردابه‌های ساختمان پشت ساختمان دچار تغییر گردیده است.

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

N_w ، نقطه زینی^۲، نواحی فرافکنش^۳ و فراشار^۴ در شکل ۱۱ مشخص شده‌اند [۳۲].

مشابه شکل ۹ در شکل ۱۱ توزیع خطوط جریان در حالت دو بعدی پیرامون سازه در دو حالت کنترل نشده و کنترل شده در یک زمان مشخص (

- 1 Vortex N_w
- 2 Saddle point
- 3 Downwash
- 4 Upwash

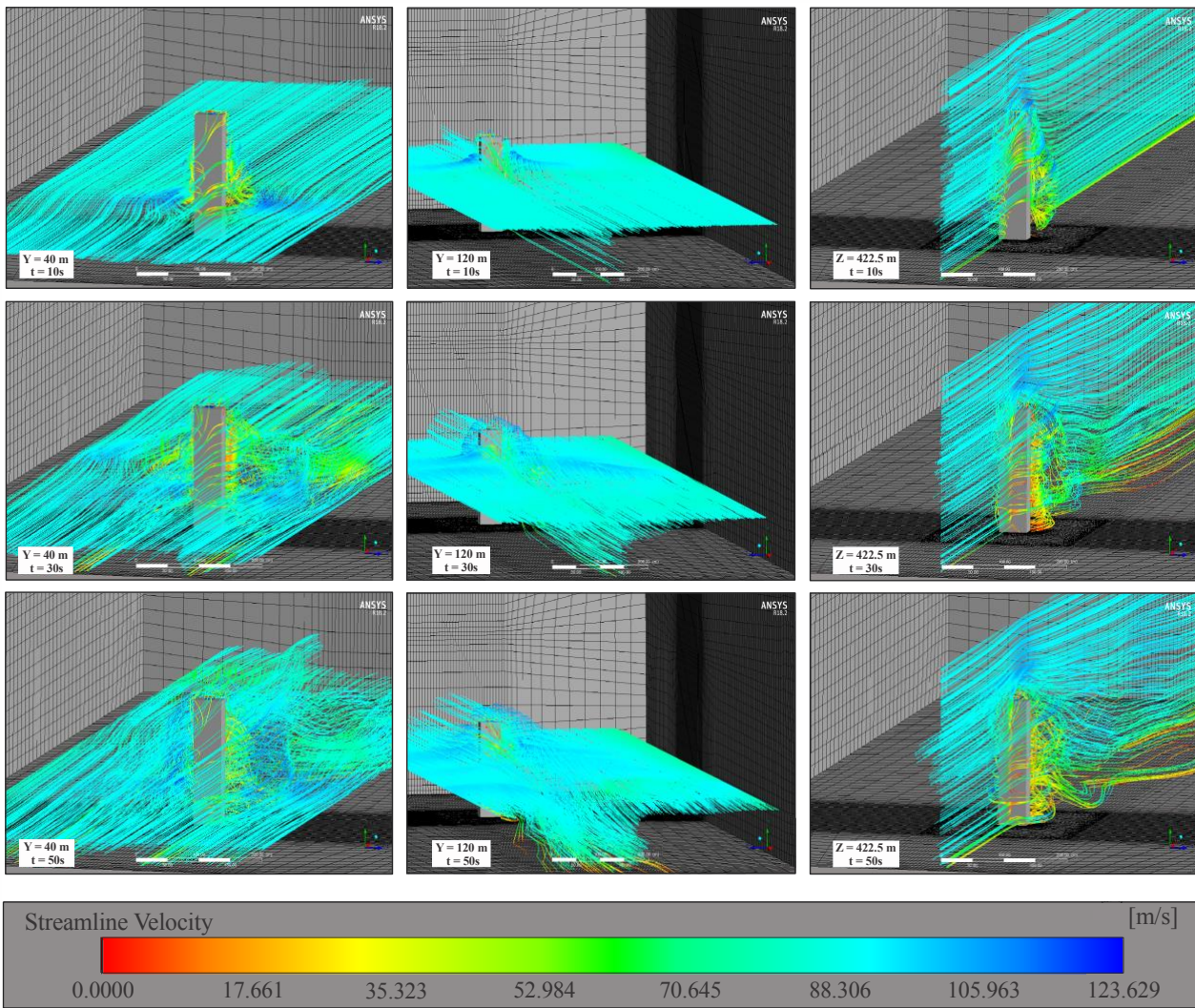


شکل ۱۲. خطوط جریان سه بعدی پیرامون سازه بلندمرتبه در حالت کنترل نشده و در صفحات مختلف

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

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 کنترل نشده) با شکل ۱۳ (توزیع خطوط جریان در حالت کنترل شده) مشاهده می‌شود که الگوی خطوط جریان به دلیل اثرات میراگر سیال هماهنگ شده بر نحوه ارتعاش سازه کاملاً تغییر کرده است.

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

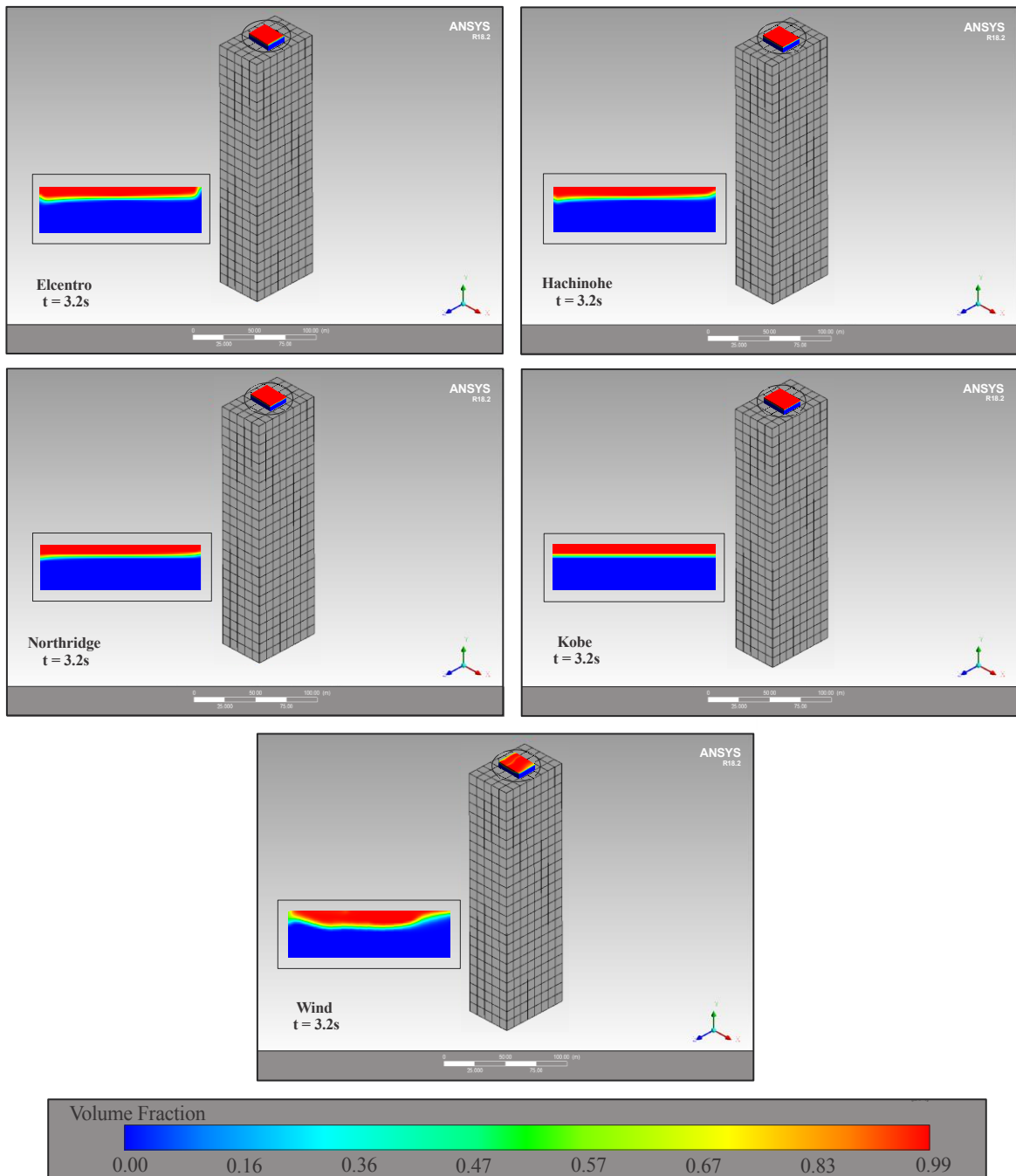


شکل ۱۳. خطوط جریان سه‌بعدی پیرامون سازه بلندمرتبه در حالت کنترل‌شده و در صفحات مختلف

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

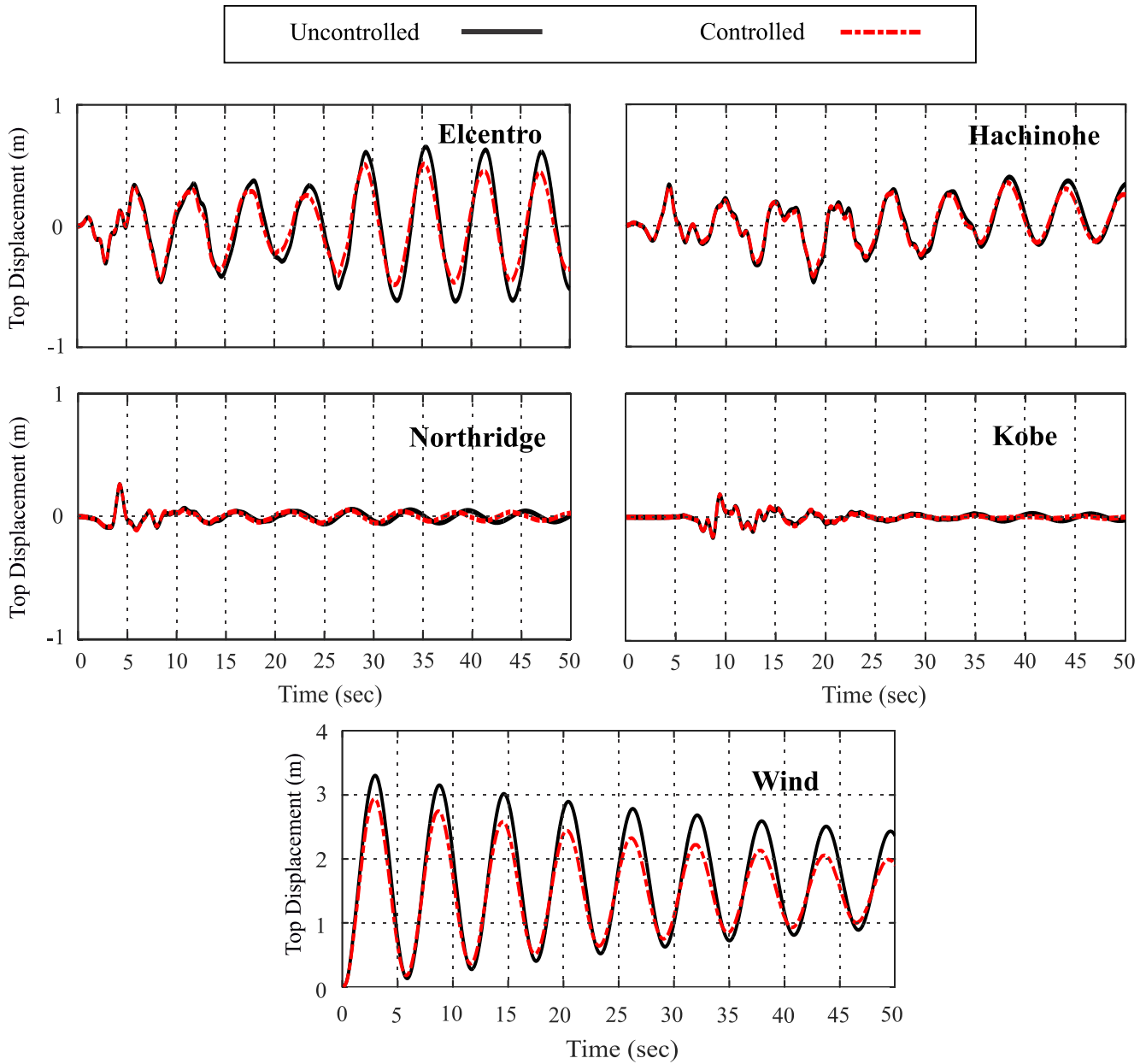
سیال درون مخزن است. مرز بین آب و هوا توسط رنگ سبز روشن مشخص می‌شود و این رنگ نشان دهنده سطح تماس بین این دو فاز می‌باشد. به منظور بررسی عملکرد میراگر در طول مدت زمان زلزله، تاریخچه زمانی جابجایی، سرعت و شتاب بام سازه سی ای ای آر سی همراه با میراگر و بدون میراگر تحت باد، دو رکورد حوزه دور و دو رکورد حوزه 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).

جریان متلاطم سیال مخزن نصب شده بر روی سازه سی ای ای آر سی تحت باد و ۴ رکورد زلزله السترو، 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 فاز (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 بیان‌کننده حضور



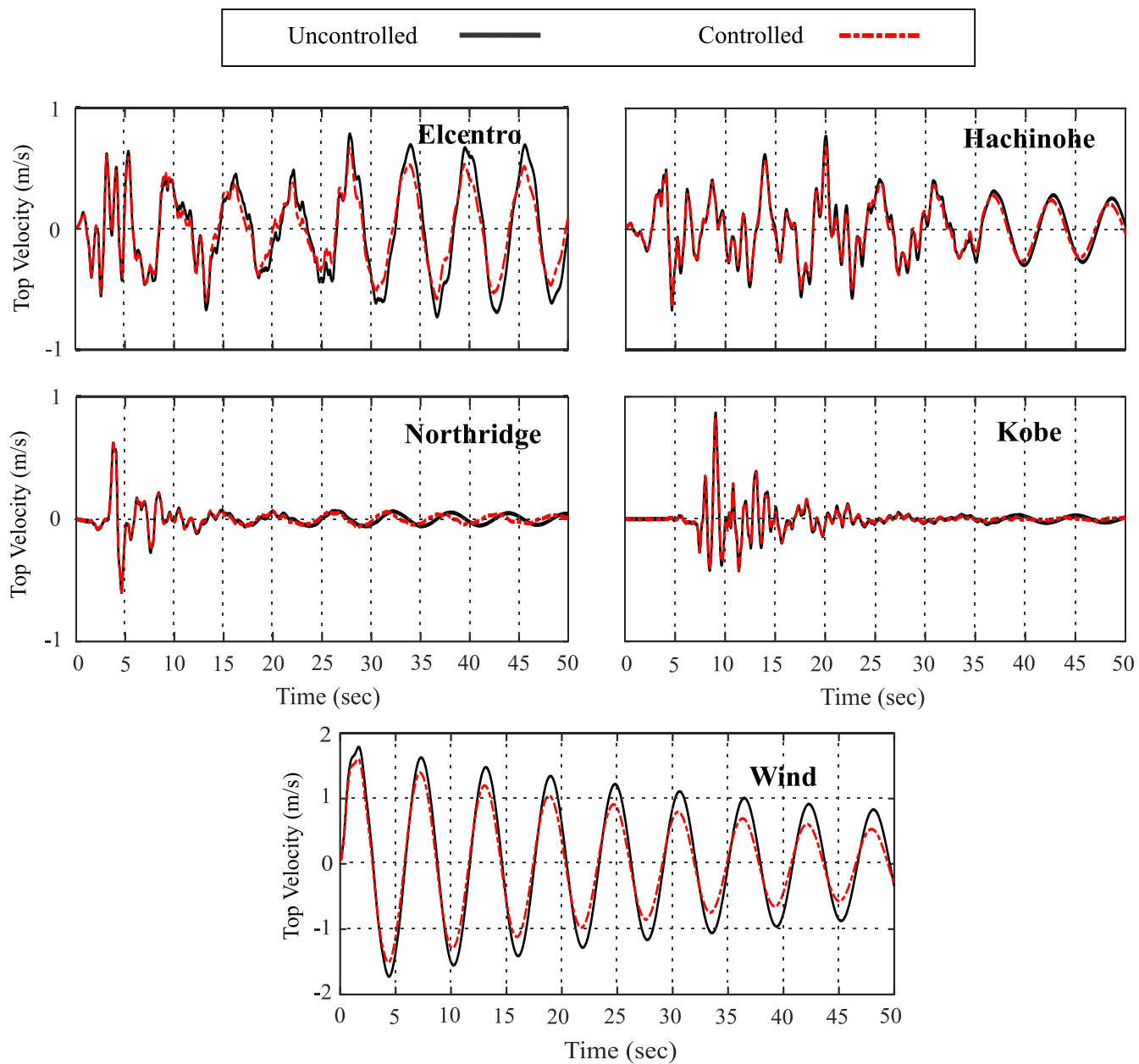
شکل ۱۴. تلاطم سیال درون مخزن تحت باد و ۴ رکورد حوزه دور و نزدیک (در لحظه ۳/۲ ثانیه)

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



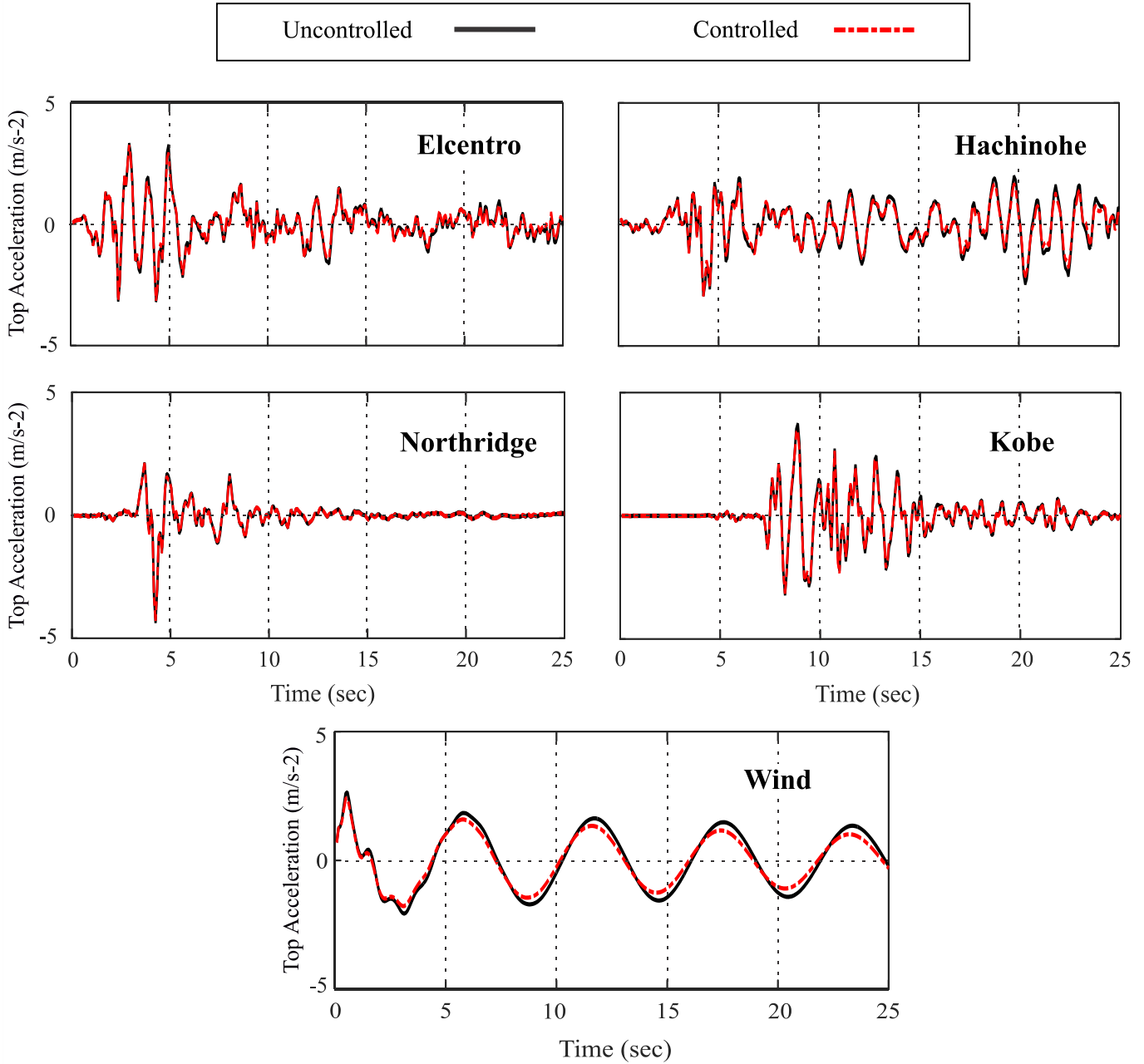
شکل ۱۵. تاریخچه زمانی طولی جابجایی بام سازه تحت باد و ۴ رکورد زلزله حوزه دور و نزدیک در دو حالت کنترل شده و کنترل نشده

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



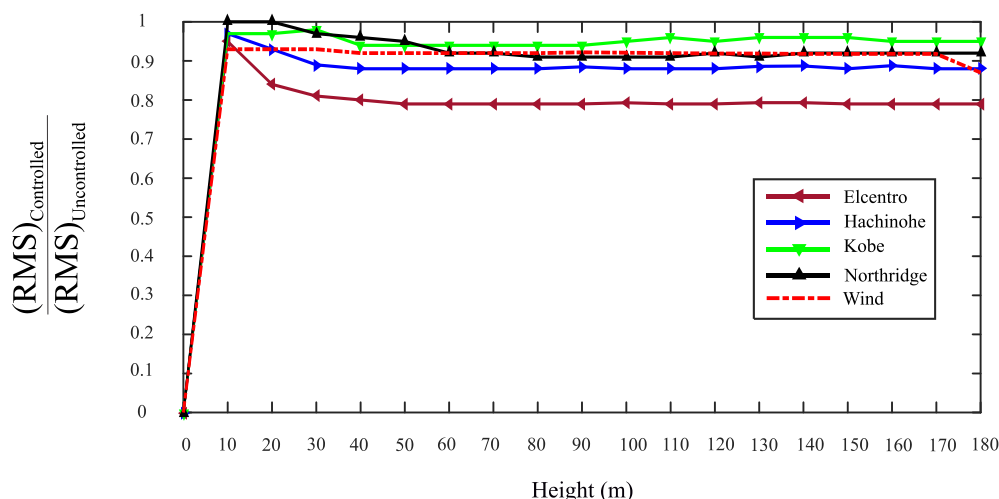
شکل ۱۶. تاریخچه زمانی طولی سرعت بام سازه تحت باد و ۴ رکورد زلزله حوزه دور و نزدیک در دو حالت کنترل شده و کنترل نشده

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 ۴ رکورد زلزله حوزه دور و نزدیک در دو حالت کنترل شده و کنترل نشده

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 کنترل شده به کنترل نشده 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 کنترل شده به کنترل نشده 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
السنتر	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

رکوردهای حوزه دور، حوزه نزدیک و باد در جدول ۲ نشان داده شده است.

۶- نتیجه گیری

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 ای ای آر سی، یک تونل باد در نرم افزار انسیس مدل سازی شد و همچنین ۴ رکورد زلزله حوزه دور و نزدیک به سازه اعمال گردید. بعد از مدل سازی سازه، به تحلیل اثر آئرواستاتیک باد و همچنین بررسی ارتعاشات

نسبت ریشه میانگین مربعات جابجایی (آر ام اس) جابجایی کنترل شده به کنترل نشده 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) کنترل شده به کنترل نشده و نسبت ریشه میانگین مربعات پاسخ‌های سازه بلندمرتبه (جابجایی، سرعت و شتاب) کنترل شده به کنترل نشده تحت

1 Root Mean Square (RMS)

- [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 Moraes, 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

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 هاجینو 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 نورث‌ریچ 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 ال 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.

- 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.
- 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,

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

