

application of magnetorheological dampers in improving the seismic performance of irregular structures against the effects of wind load variation due to climate change

Marzieh Norouzi¹, Pedram Ghaderi^{2*} 

1. M.Sc., School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology.
2. Assistant Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology.

Abstract

Climate change has become one of humanity's greatest challenges. Rising temperatures, weather fluctuations, and especially changes in precipitation and wind patterns have profound impacts on infrastructure and urban structures. These changes not only increase the risk of natural disasters but also affect the design and construction of buildings. Therefore, the development of innovative solutions to enhance the seismic performance and resilience of these buildings, especially in regions susceptible to climate change, is crucial. This study examines the performance of an 8-story steel structure with geometric irregularity in its plan against the effects of climate change, focusing on wind loading under three different wind speed increase scenarios including: 1-low 2-moderate, and 3-severe. To mitigate the negative effects of these changes on the seismic performance of the structure, magnetorheological damper was employed. The entire floor slabs of the structure were considered rigid. The modified Bouc-Wen method was used to indicate damper behavior in dynamic equations of the structure and two control scenarios including passive control and active control were considered. NatHaz online wind simulator data base was used for modeling wind loading on structure and the Simulink environment of MATLAB was used to model the structure equipped with a magnetorheological damper under wind loading.

The results indicated that a slight increase in wind speed led to an average increase of 35%, while a moderate increase resulted in over 60%, and a severe increase in wind speed caused more than a 100% rise in maximum displacement, drift, and base shear responses of structure. By adding magnetorheological damper to improve the negative effects of increased wind speed on the seismic performance of the structure, the damper was able to reduce the maximum displacement, drift, and base shear of the floor where it was installed by 14%, 32%, and 38% respectively in scenario (1), by 16%, 40%, and 32% respectively in scenario (2), and by 8%, 28%, and 29% respectively in scenario (3). This indicates that the damper effectively controlled the response of the floor it is installed on and was able to mitigate the negative effects of climate change. Furthermore, this damper not only positively affected the floor it was installed on but also improved the seismic response of the roof level, maintaining its effectiveness across all three climate change scenarios. Additionally, the results indicated that the damper performs better in active control mode compared to passive mode. However, the parameters related to maximum acceleration of the floor indicates a significant increase in the active control scenario, while in the passive control scenario, no significant changes were observed. The best results were achieved in the low and moderate wind speed increase scenarios. Although in the severe wind speed increase scenario, the damper maintained its effective performance. In conclusion, it can be said that the force generated by the magnetorheological damper has intelligent adjustability, which can change based on environmental conditions and loading. This feature allows structures to respond more quickly to sudden environmental changes and provides greater safety against damage caused by climatic conditions as well as enhancing the resilience of structures against adverse weather conditions.

Review History

Received: Oct 31, 2024

Revised: Jan 25, 2025

Accepted: Mar 11, 2025

Keywords

climate change conditions
structural control
irregular structures
magnetorheological
dampers

* Corresponding Author Email: P_ghaderi@iust.ac.ir - ORCID: 0000-0002-2792-6618



بررسی کاربرد میراگرهای سیال مغناطیسی در بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌های نامنظم در برابر آثار تغییر بارگذاری باد ناشی از تغییر اقلیم

مرضیه نوروزی^۱ و پدرام قادری^{۲*} 

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

۲. استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

در این مطالعه، به بررسی عملکرد یک سازه‌ی فولادی دارای نامنظمی هندسی در پلان در برابر آثار تغییر اقلیم با تمرکز بر بارگذاری باد با سه شرایط مختلف افزایش سرعت باد شامل: ۱- کم، ۲- متوسط و ۳- شدید پرداخته شده است. به منظور بهبود آثار منفی این تغییرات بر عملکرد لرزه‌ای سازه، از میراگر سیال مغناطیسی استفاده شده است. به منظور مدل‌سازی سازه، تمامی دال‌های کف سازه صلب در نظر گرفته شدند. مدل اصلاح‌شده بوک-ون برای نشان دادن رفتار میراگر در معادلات دینامیکی سازه و دو سناریوی کنترلی شامل کنترل غیرفعال و کنترل فعال مدنظر قرار گرفت. از پایگاه داده شبیه‌ساز باد آنالین "NatHaz" برای مدل‌سازی بارگذاری باد استفاده شد و از نرم افزار سیمولینک برای مدل‌سازی سازه مجهز به میراگر سیال مغناطیسی تحت بارگذاری باد استفاده شد.

کلمات کلیدی

تغییر شرایط اقلیمی

کنترل سازه‌ها

میراگرهای سیال مغناطیسی

سازه‌های نامنظم

نتایج نشان می‌دهند که افزایش کم در سرعت باد به‌طور میانگین منجر به افزایش ۳۵ درصدی، افزایش متوسط منجر به افزایش بیش از ۶۰ درصدی و افزایش شدید در سرعت باد نیز منجر به افزایش بیش از ۱۰۰ درصدی در بیشترین پاسخ جابه‌جایی، جابه‌جایی نسبی و برش پایه می‌شود. با افزودن میراگر سیال مغناطیسی به‌منظور بهبود آثار منفی افزایش سرعت باد بر پاسخ سازه، میزان حداکثر پاسخ جابه‌جایی، جابه‌جایی نسبی و برش پایه طبقه سازه به‌ترتیب تا ۱۶، ۴۰ و ۳۸ درصد کاهش داشت. به‌علاوه، این میراگر علاوه بر طبقه‌ای که در آن قرار داشت، تأثیر مثبتی نیز روی پاسخ لرزه‌ای طبقه بام داشت و در هر سه سناریو تغییر اقلیم توانست عملکرد مؤثر خود را حفظ کند. در نهایت، می‌توان گفت استفاده از میراگر سیال مغناطیسی می‌تواند تأثیر زیادی بر تاب‌آوری سازه‌ها در برابر شرایط نامساعد آب‌وهوایی داشته باشد.

۱- مقدمه

افزایش خطر بروز بلایای طبیعی می‌شود، بلکه طراحی و ساخت سازه‌ها را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. به ویژه، سازه‌های نامنظم که به دلیل طراحی خاص خود در برابر بارهای دینامیکی آسیب‌پذیرتر هستند، نیازمند توجه ویژه‌ای در زمینه مهندسی زلزله و مهندسی سازه هستند.

در دنیای امروز، تغییرات اقلیمی به یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های بشر تبدیل شده است. افزایش دما، نوسانات جوی و به‌ویژه تغییر الگوهای بارش و وزش باد، تأثیر عمیقی روی زیرساخت‌ها و سازه‌های شهری دارند. این تغییرات نه تنها منجر به

* رایانامه نویسنده مسئول: P_ghadery@iust.ac.ir - ORCID: 0000-0002-2792-6618

کپی‌رایت © ۲۰۲۵، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به‌صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>). بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.



به منظور جذب ارتعاشات استفاده می کنند، برای اولین بار در اوایل دهه ۱۹۵۰ توسط شرکت لرد^۲ توسعه داده شدند [9]. اسپنسر و دایک جزو اولین کسانی بودند که از این دستگاه در زمینه کنترل سازه های عمرانی در اواخر قرن بیستم استفاده کردند [10]. پس از آن، استفاده از این میراگر در سازه های عمرانی، همچون در موزه ملی علوم و نوآوری های نوظهور توکیو^۳، به منظور کنترل ارتعاشات رونق گرفت [11].

از دیگر کاربردهای مهم این نوع میراگر می توان به کنترل پاسخ لرزه ای سازه های نامنظم پیچشی اشاره کرد. در سال ۲۰۰۵، یوشیداو دایک تأثیر افزودن میراگر MR را در دو مدل ساختمان در مقیاس کامل، که دارای حرکات جانبی و پیچشی هستند، مطالعه کردند. تایج این مطالعه نشان داد که این میراگر به خوبی می تواند مقدار اثر جابه جایی نسبی و پیچش طبقات را کاهش دهد [12]. در سال ۲۰۰۹، لی و لینگ کاهش پاسخ انتقالی-پیچشی یک سازه نامتقارن را با افزودن دمپرهای MR بررسی کردند و مشاهده کردند که استفاده از دمپرهای MR در سازه، آثار مطلوبی در کاهش پاسخ لرزه ای پیچشی سازه های نامنظم دارد [13]. بهرتهی و دیگر پژوهشگران نیز، نشان دادند که سیستم های MRD در کاهش پاسخ لرزه ای سازه نامتقارن پیچشی، موثرند اگرچه مقدار این اثر با توجه به ویژگی تحریکات لرزه ای متفاوت است. همچنین افزایش نانظمی باعث می شود که دمپر به نیروی کنترل بیشتری احتیاج داشته باشد [14].

در مطالعه دیگری، یانگ و گیو تأثیر افزودن میراگر MR را در یک مدل سیستم سازه ای دارای نامنظمی در پلان و نامنظمی جانبی بررسی کردند و پس از اجرای دمپرهای MR متعدد، پاسخ های تاریخیچه زمانی شتاب و جابه جایی به طور قابل توجهی کاهش یافت و زوایای پیچش بین طبقات به ۲ درصد محدود شدند [15]. مدلسازی میراگرهای MR به دلیل رفتار غیرخطی و هیستریک سیال این میراگر، به یکی از چالش های پژوهشگران تبدیل شده است.

در سال ۱۹۹۷، اسپنسر و دیگر همکاران برای اولین بار مدلسازی میراگر MR را بر اساس مدلسازی سیستم های غیرخطی بوک-ون^۴ را پیشنهاد دادند که می تواند به خوبی دامنه گسترده ای از رفتارهای غیرخطی و هیستریک سیستم را مدلسازی کند. همچنین

یکی از مهم ترین آثار آب و هوایی، تغییر در بارگذاری باد است که عملاً بر همه انواع سازه ها در سراسر جهان بار وارد می کند. مقدار بار باد وابسته به آمار باد، سرعت میانگین باد، شکل و ابعاد سازه و ویژگی های سازه ای می باشد. از بین این پارامترها، فقط پارامتر سرعت باد تحت تأثیر تغییرات اقلیم دچار تغییر خواهد شد و سایر پارامترها تغییر چندانی نخواهند داشت [1].

در مطالعه ای که توسط آیکلبرگر و دیگر پژوهشگران در سال ۲۰۰۸ صورت گرفته است، نشان داده شد که بیشتر مدل های تغییر اقلیم، افزایش سرعت باد میانگین در بیشتر نواحی شمالی کره زمین را پیش بینی می کنند [2].

مطالعات گسترده ای، با مدل سازی سناریوهای مختلف از تغییرات اقلیم در سراسر شمال اروپا، افزایش شدت سرعت بادهای شدید را پیش بینی کردند [3-5]. همچنین، افزایش سرعت بادهای شدید ناشی از تغییرات اقلیم در مرکز اروپا نیز مشاهده خواهد شد [5].

مطالعه ای که توسط کولکاری و دیگر همکاران ارائه شده، حاکی از افزایش ۱۱ تا ۱۵ درصد در مقدار سرعت باد روزانه با دوره بازگشت ۱۰ و ۱۰۰ سال در سواحل غربی کشور هند می باشد [6].

در نهایت، هیتتر و لین مطالعه ای جامع در سال ۲۰۲۴ در زمینه افزایش سرعت باد میانگین طراحی برای کشور آمریکا انجام دادند. آن ها با در نظر گرفتن سه مدت زمان سرویس دهی متفاوت (۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ سال) برای سازه ها، نشان دادند که با توجه به گروه خطر سازه، طول عمر و سال ساخت سازه، سرعت باد طراحی به طور متوسط ۳ تا ۶ درصد برای شهرستان های مورد مطالعه و ۶ تا ۱۵ درصد برای شهرستان های ساحلی کشور آمریکا افزایش خواهد یافت. این درصدها بر اساس میانگین کلی برای همه حالت های سناریوها بوده و در برخی از سناریوها، به ویژه در امتداد ساحلی خلیج، تا ۴۰ درصد افزایش در سرعت طراحی باد مشاهده شد [7]. یکی از راهکارهای مؤثر برای مقابله با آثار منفی تغییر اقلیم بر بارگذاری باد در سازه ها، استفاده از سیستم های کنترل سازه مانند میراگرهای سیال مغناطیسی یا به اختصار MRD^۱ ها است. این میراگرها به دلیل قابلیت تنظیم و پاسخ سریع به تغییرات بار، توانایی کنترل و کاهش آثار ناشی از بارهای دینامیکی را دارند.

مایع مغناطیسی MR برای اولین بار توسط جیکوب رینبو در اوایل دهه ۱۹۵۰ توسعه یافت [8]. میراگرهای MR که از این سیال

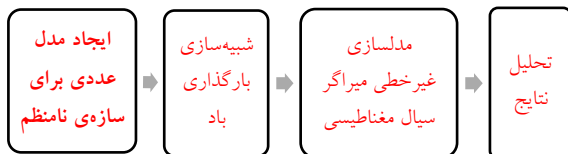
² Lord Corporation

³ Tokyo national museum of emerging science and innovation

⁴ Bouc-Wen

¹ Magnetorheological Dampers

به میراگر MR که در معرض وزش بار باد در جهت طولی قرار دارد، توضیح داده شده است. سپس ارزیابی عملکرد این سیستم برای کنترل سازه‌های دارای نامنظمی پیچشی در برابر افزایش سرعت باد تحت اثر تغییر شرایط اقلیمی در سه سناریو افزایش کم، افزایش متوسط و افزایش شدید در سرعت باد میانگین طراحی سازه‌ها، مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در شکل (۱) روند تحقیق این مطالعه قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۱. نمودار روند تحقیق

Fig. 1. Research process flowchart

۲- تئوری میراگرهای MR در کنترل ارتعاشات سازه‌ها

۲-۱- معادله دینامیکی حاکم بر سازه مجهز به میراگر MR

به طور کلی، روابط حرکت برای سازه چند درجه آزادی، با در نظر گرفتن دستگاه کنترلی، زمانی که تحت بارگذاری باد قرار دارد، به صورت رابطه (۱) نوشته می‌شود [21]:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = \Gamma F_w(z, t) + \Lambda f_{MR}(t) \quad (1)$$

که در آن $x=[X, Y, \Theta]^T$ پارامترهای X, Y, Θ به ترتیب بردارهای جابه‌جایی طبقات در راستای محور x ، جابه‌جایی طبقات در راستای محور y و دوران طبقات می‌باشند. Γ بردار توزیع بار باد در درجات آزادی طبقات است. F_w تاریخچه زمانی بار آیرودینامیکی باد در طول طبقات سازه است. f_{MR} بردار رکورد نیروی کنترلی در طبقات است که ماتریس ضریب آن، Λ ، ماتریس مشخصه چگونگی قرارگرفتن دستگاه کنترلی در طبقات سازه می‌باشد. M ماتریس جرم سازه، K ماتریس سختی سازه و C ماتریس میرایی سازه می‌باشند [21].

۲-۲- مدل‌سازی رفتار میراگر MR

یکی از مدل‌های پرکاربرد و دقیق، مدل بوک-ون اصلاح شده است. این روش بر اساس مفهوم عملگر هیستریزس بوک-ون است که نشان‌دهنده ویژگی‌های غیرخطی و وابسته به سرعت سیال MR است و پارامترهای آن تعیین‌کننده شکل و اندازه نمودار هیستریزس سیال MR می‌باشد (شکل ۲).

آن‌ها برای پیش‌بینی نیرو در مناطقی که سرعت و شتاب میراگر علامت مخالف دارند و مقدار سرعت کم است، مدل اصلاح شده بوک-ون^۱ را ارائه دادند [16]. به منظور نشان دادن برتری مدل ارائه شده، در سال ۲۰۰۳، جانگ و دیگر پژوهشگران موفق شدند یک میراگر MR بزرگ مقیاس ۱۰۰۰ کیلو نیوتنی برای یک پل را به سه روش بینگهام^۲، بوک-ون و بوک-ون اصلاح شده مدل‌سازی کنند. در نهایت، با مقایسه این سه روش، به این نتیجه رسیدند که مدل‌های بوک-ون و بوک-ون اصلاح شده نسبت به مدل بینگهام، محاسباتی‌تر و دقیق‌تر هستند [17].

دیگر چالش تحلیل و بررسی دینامیکی سازه‌ها، چگونگی مدل‌سازی بار باد وارد بر سازه است. روش‌های متعددی برای شبیه‌سازی تأثیر بار باد روی سازه‌های ساختمانی توسط پژوهشگران و آیین‌نامه‌ها ارائه شده است که از رایج‌ترین این روش‌ها می‌توان به روش‌های آزمایش تونل باد، تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)^۳ و اندازه‌گیری‌های میدانی اشاره کرد.

در سال ۲۰۰۰، والن و دیگر همکاران جزو اولین کسانی بودند که مفهوم طراحی به کمک پایگاه داده برای ساختمان‌های کم‌ارتفاع تحت رکورد بارگذاری باد را ارائه دادند [18]. سال‌ها بعد، کوآن و دیگر همکاران، روش جدیدی مبتنی بر یک چارچوب سایبری برای تجزیه و تحلیل و شبیه‌سازی آثار بار باد بر اساس یک سازمان مجازی برای کاهش خطرات بادهای شدید پیشنهاد دادند [19].

در سال ۲۰۲۳، ایوانکوویچی و نیکا تحقیقاتی راجع به یک رویکرد دامنه زمانی یکپارچه برای تحلیل و طراحی مبتنی بر عملکرد برای باد ارائه دادند. آن‌ها استفاده از پایگاه داده شبیه‌ساز برخط باد "NatHaz" یا به اختصار Nows^۴ را برای شبیه‌سازی رکورد باد بر یک ساختمان بلند پیشنهاد کردند [20].

هدف این مطالعه، بررسی تأثیر تغییرات اقلیم بر افزایش سرعت باد طراحی در سازه‌های نامنظم ساختمانی است. علاوه بر این، این تحقیق به بررسی قابلیت میراگرهای سیال مغناطیسی در حفظ عملکرد مؤثر در شرایط آب‌وهوایی متغیر و نامساعد و تأثیر آن بر تاب‌آوری سازه‌ها می‌پردازد.

در این مطالعه، ابتدا چگونگی مدل‌سازی سیستم سازه‌ای مجهز

¹ Modified Bouc-Wen

² Bingham

³ Computational Fluid Dynamics

⁴ Natural Hazard online wind simulator

$$\alpha(i) = 16566i^3 - 87071i^2 + 16836i + 15114 \quad (5)$$

$$c_0(i) = 437097i^3 - 1545407i^2 + 1641376i + 457741 \quad (6)$$

$$c_1(i) = -9363108i^3 + 5334183i^2 + 48788640i + 2791630 \quad (7)$$

$$H(s) = \frac{31.4}{31.4 + s} \quad (8)$$

جدول ۱. پارامترهای مدل بوک-ون اصلاح شده برای میراگر MR با ظرفیت

200 کیلو نیوتن [۲۲]

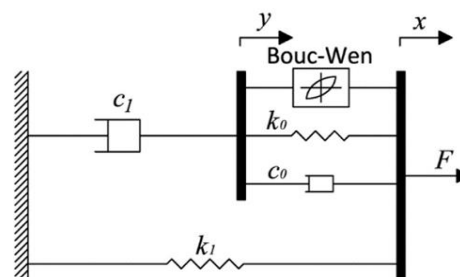
Table 1. Bouc-wen parameters for the 200 KN MRD

617.31 N/m	k_1
137810 N/m	k_0
2679 m ⁻¹	A
647.46 m ⁻¹	β
647.46 m ⁻¹	γ
10	n
2 A	i_{max}
0.18 m	x_0

۲-۳- محاسبه نیروی آیرودینامیکی باد در تحلیل سازه

شبیه‌سازی بر خط بار باد "NatHaz" از روش‌های پایگاه داده فعال شبیه‌سازی است [23, 24]. وظیفه این شبیه‌ساز، شبیه‌سازی آنالین میدان‌های باد چند متغیره گاوسی^۱ به صورت آنالین است. این شبیه‌ساز قابلیت ارائه داده هم بر حسب واحد متریک و هم واحدهای انگلیسی، دریافت داده‌های مکان با مختصات عمودی، افقی یا هر مختصات دو بعدی دلخواه، محاسبه میانگین باد بر اساس آیین نامه ASCE-7-10 [25] با در نظر گرفتن ناهمواری زمین برای به حداقل رساندن ورودی کاربر و در دسترس قراردادن نتایج تاریخچه زمانی سرعت باد به کاربر برای محاسبه بار باد وارد بر سازه در ارتفاع‌های مختلف را فراهم می‌کند. یکی دیگر از مزیت‌های این شبیه‌ساز، ارائه چهار طرح مختلف شبیه‌سازی، از جمله روش تابع فرکانس گسسته با استفاده از FFT^۲ [26]، روش تجزیه شوور با خود رگرسیون^۳ [27]، روش نمایش طیفی ارگودیک^۴ [28] و روش نمایش طیفی مرسوم^۵ [29]، است.

در شکل (۳) چگونگی مدل‌سازی تاریخچه زمانی سرعت باد با استفاده از این پایگاه داده توضیح داده شده‌است که ابتدا در کادر



شکل ۲. مدل بوک-ون اصلاح شده میراگر MR [۲۲]

Fig. 2. MR damper modified bouc-wen model [22]

در این روش معادله محاسبه نیروی تولید شده توسط این

میراگر توسط معادله (۲) انجام می‌شود [22].

$$f_{MR}(t) = \alpha z + c_0(\dot{x} - \dot{y}) + k_0(x - y) + k_1(x - x_0) \quad (2)$$

$$= c_1\dot{y} + k_1(x - x_0)$$

معادله فوق، از داده‌های تجربی مشتق شده است و رفتار حلقه

پسماند دمپر MR را نشان می‌دهد. در این راستا، روابط (۳ و ۴)

برقرارند [22]:

$$\dot{z} = -\gamma|\dot{x} - \dot{y}|z|z|^{n-1} - \beta(\dot{x} - \dot{y})|z|^n + A(\dot{x} - \dot{y}) \quad (3)$$

$$\dot{y} = \frac{1}{c_0 + c_1} \{ \alpha z + c_0\dot{x} + k_0(x - y) \} \quad (4)$$

در این معادلات z نشان‌دهنده متغیر تکاملی، k_1 سختی اضافه

شده به سیستم توسط آکومولاتور، c_0 میرایی ویسکوز در

سرعت‌های بالا، c_1 میرایی موردنیاز برای مدل‌سازی غیرخطی رول

آف، که در آزمایش‌های تجربی در سرعت‌های پایین مشاهده شده

است، α تنش تسلیم سیال، k_0 سختی در سرعت‌های بالا، x_0

جابه‌جایی ابتدایی فنر k_0 ، x جابه‌جایی دمپر و y جابه‌جایی دمپر

داخلی می‌باشند. پارامترهای c_0 ، c_1 و α به جریان ورودی میراگر

وابسته‌اند و برای محاسبه آن‌ها برای میراگر ۲۰۰ کیلونیوتنی، یانگ

و دیگر همکاران، استفاده از معادلات چندجمله‌ای درجه سه (۵) تا

(۷) را پیشنهاد داده‌اند [22]. i نشان‌دهنده جریان ورودی به میراگر

است. دیگر پارامترهای A ، β ، γ و n پارامترهای ثابت این معادله

می‌باشند که از نتایج آزمایشگاهی قابل برآوردند. در جدول (۱)

مقادیر پارامترهای مشخصه این معادلات برای میراگر MR با

ظرفیت ۲۰۰ کیلونیوتن آورده شده‌اند. علاوه بر این، از فیلتر مرتبه

اول معادله (۸) نیز برای سازگاری با دینامیک‌های مربوط به رسیدن

سیال MR، به تعادل رئولوژیکی استفاده می‌شود [22].

¹ Gaussian multivariate fields

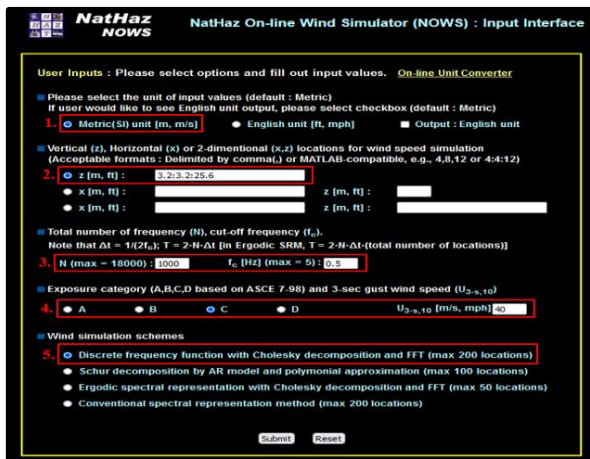
² Fast Fourier Transform

³ Schur decomposition approach with autoregressive

⁴ Ergodic spectral representation method

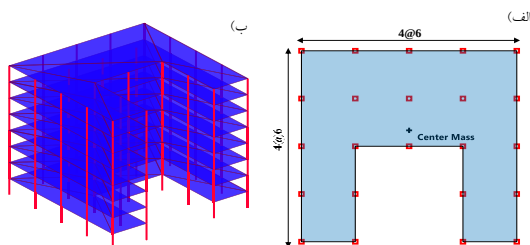
⁵ Conventional spectral representation method

ابعاد ستون‌های طبقات در جدول (۲) آورده شده است. مشخصات بارگذاری سازه‌ها نیز در جدول (۳) خلاصه شده است. مقادیر طراحی در نظر گرفته شده برای بارگذاری سازه بر اساس آیین‌نامه ASCE7-16 [25] می‌باشند. با توجه به مقاله مرجع [20] نوع میرایی سازه، میرایی مودال بوده و نرخ میرایی مودال همه مودهای سازه نیز برابر ۰,۰۲ است.



شکل ۳. پایگاه داده NOWS [۲۴]

Fig. 3. NOWS database [24]



شکل ۴. الف) پلان طبقات سازه ب) نمای سه بعدی سازه [۳۰]

Fig. 4. Building: a) Stories plan b) 3D view [30]

جدول ۲. مشخصات مقاطع ستون‌های سازه [۳۰]

Table 2. Sectional properties of columns of structure [30]

column	floor
Box 450×25	1-3
Box 340×20	4-6
Box 280×15	7,8

جدول ۳. مشخصات بارگذاری ثقلی سازه مدل شده [۳۰]

Table 3. gravity loads properties of the structure [30]

Dead load (kg/m ²)	live load (kg/m ²)	Load combination	Total load (kg/m ²)
۵۰۰	۲۰۰	Dead load+20% Live load	۵۴۰

اول باید واحد داده‌ها انتخاب می‌کنیم. در کادر دوم باید مختصات ارتفاع نقاطی که می‌خواهیم سرعت باد را در آن‌ها حساب کنیم وارد کنیم. در بخش سوم تعداد فرکانس‌هایی که می‌خواهیم سرعت باد در آن محاسبه شود و فاصله فرکانسی نقاط و در بخش چهارم باید گروه محیطی که سازه در آن قرار دارد و مقدار سرعت باد وزشی ۳ ثانیه بر حسب آیین‌نامه ASCE-7-10 [25] وارد کنیم. در نهایت با انتخاب چگونگی مدل‌سازی در کادر پنجم و زدن گزینه submit، رکورد سرعت باد و مقدار سرعت میانگین در ارتفاعات مورد نظر، در قالب فایل متلب قابل استفاده است.

پس از دریافت تاریخچه زمانی سرعت باد، می‌توان برای تبدیل آن به تاریخچه زمانی فشار باد متناوب در ارتفاع z از رابطه (۹) استفاده کرد [20]:

$$P(z, t) = \rho_{air} C_d \bar{V}(z) V(z, t) \quad (9)$$

در این معادله، ρ_{air} چگالی هوا، C_d ضریب درگ، $\bar{V}(z)$ سرعت میانگین باد در ارتفاع z و $V(z, t)$ رکورد سرعت باد در ارتفاع z می‌باشد. در نهایت، با استفاده از معادله (۱۰) تاریخچه نیروی باد در طول زمان را به دست می‌آید [20].

$$F(z, t) = P(z, t) \times A(z) \quad (10)$$

در معادله (۱۰)، پارامتر $A(z)$ مساحت سطح بارگیر طبقه سازه در معرض باد در ارتفاع z می‌باشد.

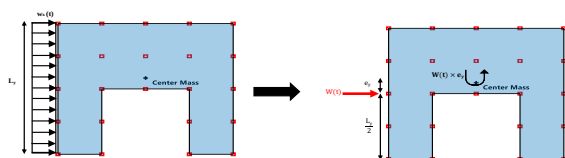
۳- مثال عددی

۳-۱- فرضیات مسئله

در این مطالعه، از سازه نامنظم مرجع مقاله [30] که یک سازه نامنظم پیچشی با پلان U شکل فولادی قاب خمشی ۸ طبقه می‌باشد، استفاده شده است. پلان طبقات و نمای سه بعدی سازه در شکل (۴) قابل مشاهده می‌باشند. عبارت "Center Mass" در شکل (۴) نشان‌دهنده مرکز جرم طبقات است که منطبق بر هم‌اند. دال طبقات این سازه صلب در نظر گرفته شده و سازه فاقد نامنظمی جانبی و جرمی می‌باشد. در نتیجه، ارتفاع و توزیع جرم تمام طبقات آن با هم برابر بوده و مقدار آن‌ها به ترتیب برابر با ۳,۲ متر و ۳۱۱۰۴۰ کیلوگرم می‌باشد. مقاطع ستون طبقات همگی مقاطع مربع توخالی از جنس فولاد ST37، با مدول الاستیسیته ۲۰۴ گیگاپاسکال و تنش تسلیم ۲۴۰ مگاپاسکال می‌باشند. مشخصات

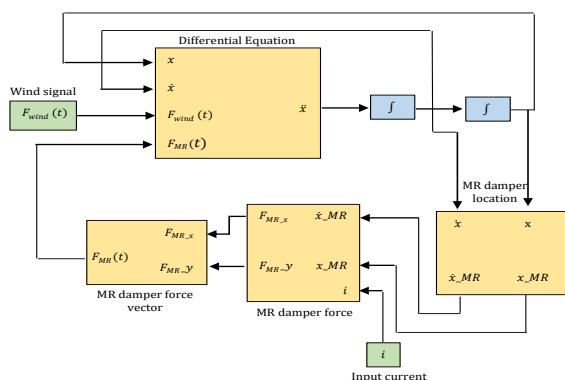
خواهند کرد. به منظور بررسی آثار این تغییرات بر سازه مورد مطالعه، سه سناریو افزایش سرعت باد میانگین طراحی شامل افزایش ملایم (سناریو ۱)، متوسط (سناریو ۲) و شدید (سناریو ۳) مورد بررسی قرار گرفته. در شکل (۸)، نمودار تاریخچه زمانی در هر چهار حالت برای طبقه هفتم و بام سازه آورده شده است که میزان تغییر در بیشینه نیروی باد طبقات پس از رخداد تغییر اقلیم، به وضوح دیده می شود. همچنین درصد افزایش در بیشینه پاسخ ساز در هر سه سناریو در جدول (۴) آورده شده است.

برای بررسی تاثیرات تغییر اقلیم بر پاسخ سازه، تعدادی شاخص شامل I_1 تا I_7 که نماینده تغییرات در حداکثر پاسخ سازه می باشند، تعریف شده اند. فرمول این شاخص ها در ادامه آورده شده اند:



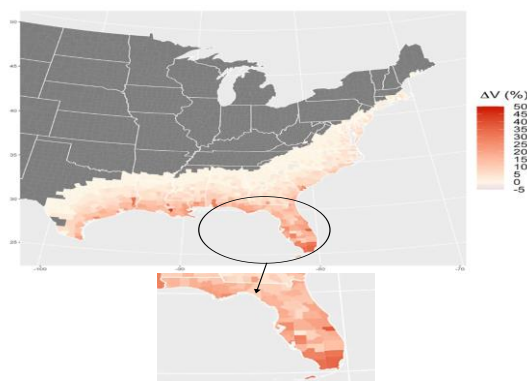
شکل ۵. چگونگی اثر بارگذاری باد بر پلان سازه

Fig. 5. Wind load effects on building plan



شکل ۶. مدل سیمولینک سازه مجهز به سیستم سیال مغناطیسی

Fig. 6. Simulink model of structure equipped by MR damper



شکل ۷. درصد افزایش در سرعت باد با دوره بازگشت ۵۰ سال تا سال ۲۰۵۰ [۷]

Fig. 7. 50-year wind speeds percent increase by 2050 [7]

تاریخچه زمانی آزمایش سرعت باد متناوب در طول ۲۰۰ ثانیه از سایت NOWS با فرض قرار گرفتن سازه در ایالت فلوریدای کشور آمریکا برای گروه خطر نوع C، با توجه به آیین نامه ASCE 7-10 [25] و سرعت باد طوفانی ۳ ثانیه ای ۶۵ متر بر ثانیه، با استفاده از روش شبیه سازی FFT، در طول طبقات سازه به دست آمد.

سپس، به منظور محاسبه تاریخچه زمانی فشار باد و نیروی باد، از معادلات (۹ و ۱۰) و مقدار چگالی هوا برابر با ۱٫۲۳ کیلوگرم بر متر مکعب و ضریب درگ برابر با ۱٫۵ بدست آمد.

چگونگی اثر بار باد بر سازه به صورت تک جهته و تنها در راستای محور X به صورت بارگسترده مستطیلی بر ضلع نمای پلان سازه و نقطه اثر آن در وسط ضلع در نظر گرفته شد و نیروی بار باد و لنگر به وجود آمده ناشی از عدم قرارگیری مرکز جرم بر وسط ضلع نمای سازه محاسبه شد (شکل ۵).

در ادامه با حل معادله دینامیکی سازه در نرم افزار سیمولینک متلب تحت رکورد های بار باد در راستای محور X و همچنین محاسبه لنگر ناشی از این نیرو که بر طبقات وارد می شوند، پاسخ سازه محاسبه شد (شکل ۶).

درستی آزمایشی مدل سازه بدون میراگر در نرم افزار "SAP2000" مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان دادند که محدوده خطای پاسخ سازه در مدل سیمولینک بین ۲ تا ۵ درصد است، که این میزان خطا حاکی از دقت و درستی مدل مورد استفاده می باشد.

۳-۲- اثر تغییر اقلیم بر سرعت باد

با توجه به مطالعات اخیر صورت گرفته برای کشور ایالت متحده آمریکا، تا سال ۲۰۵۰ سرعت باد طراحی با دوره بازگشت ۵۰ سال، که سرعت باد برای طراحی سازه ها طبق آیین نامه ASCE-7-10 [25] است، می تواند دست خوش تغییرات ناشی از تغییر اقلیم شود و افزایش یابد. شدیدترین این تغییرات متعلق به ایالت فلوریدا در این کشور است که پیش بینی شده است سرعت طراحی می تواند تا ۹۰ متر بر ثانیه در این ایالت افزایش یابد (شکل ۷) [7].

همانطور که در شکل (۷) مشاهده می شود بخش های ساحلی ایالت به طور متوسط افزایش ۴۰ درصدی (افزایش شدید)، بخش های میانی ایالت به طور متوسط افزایش ۲۰ درصدی (افزایش متوسط) و بخش های شمالی به طور متوسط افزایش ۱۰ درصدی (افزایش ملایم) در سرعت باد میانگین طراحی تجربه

$$I_1 = \max\left(\frac{|x_{i,CE}(t)|}{|x_i(t)|}\right) \quad (11)$$

$$I_3 = \max\left(\frac{|\ddot{x}_{i,CE}(t)|}{|\ddot{x}_i(t)|}\right) \quad (13)$$

$$I_5 = \max\left(\frac{|\Delta x_{i,CE}(t)|}{|\Delta x_i(t)|}\right) \quad (15)$$

$$I_7 = \max\left(\frac{|V_{i,CE}(t)|}{|V_i(t)|}\right) \quad (15)$$

$$I_2 = \max\left(\frac{|\theta_{i,CE}(t)|}{|\theta_i(t)|}\right) \quad (12)$$

$$I_4 = \max\left(\frac{|\ddot{\theta}_{i,CE}(t)|}{|\ddot{\theta}_i(t)|}\right) \quad (14)$$

$$I_6 = \max\left(\frac{|\Delta \theta_{i,CE}(t)|}{|\Delta \theta_i(t)|}\right) \quad (16)$$

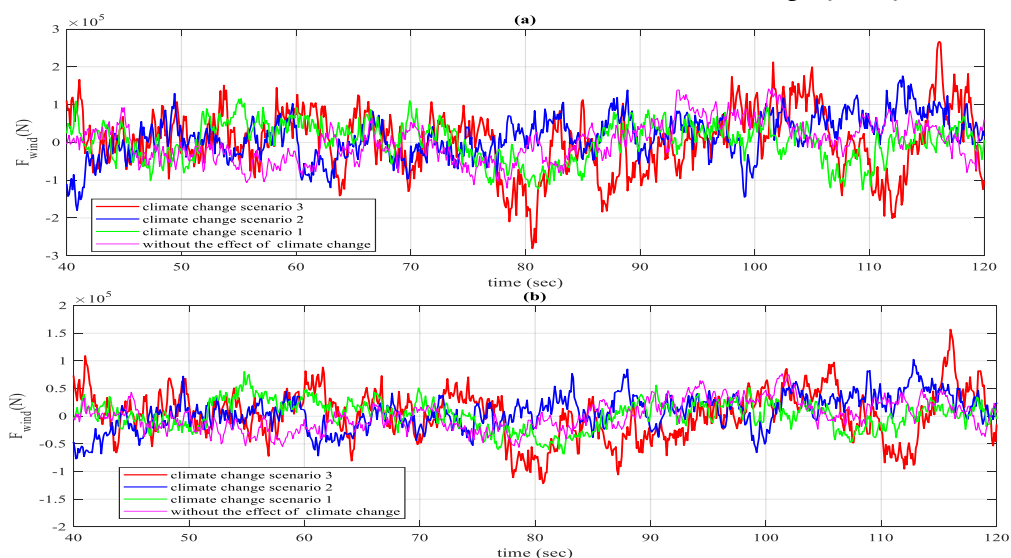
حداکثر جابه‌جایی، ۳۲٫۵ درصد در حداکثر دوران، تا ۳۲٫۷۵ درصد در حداکثر شتاب، ۳۴ درصد در حداکثر جابه‌جایی نسبی و ۴۲٫۵ درصد در حداکثر برش پایه سازه مشاهده خواهد شد. در سناریو (۲)، این مقادیر به ترتیب تا ۵۳٫۵، ۵۶٫۵، ۶۸ و ۶۴٫۵ درصد افزایش خواهند داشت. در سناریو (۳) نیز تمام این مقادیر بالای ۱۰۰ درصد افزایش را تجربه خواهند کرد. از تحلیل نمودارهای شکل (۹)، به این امر دست می‌یابیم که در سناریو (۱) شاخص‌های I_3 و I_7 مقادیر بحرانی‌تر در طبقه بام نسبت به طبقه هفتم سازه تجربه خواهند کرد اما در شاخص I_5 طبقه هفتم سازه حساسیت بیشتری نسبت به بام از خود نشان خواهد داد.

دیگر شاخص‌ها تقریباً به یک اندازه برای طبقه بام و طبقه هفتم بحرانی خواهند بود. از میان تمام شاخص‌ها، شاخص I_7 در طبقه بام بیشترین مقدار را خواهد داشت.

که در این معادلات x جابه‌جایی سازه در راستای محور x ، θ دوران سازه، $\ddot{x}$ شتاب سازه در راستای محور x ، $\ddot{\theta}$ شتاب دورانی، Δx جابه‌جایی نسبی سازه در راستای محور x ، $\Delta \theta$ دوران نسبی و V برش پایه در راستای محور x می‌باشند. اندیس i شماره طبقه سازه و اندیس CE نشان دهنده‌ی مقادیر پاسخ سازه پس از تغییر اقلیم می‌باشد.

سپس به منظور بررسی اثر تغییر اقلیم بر هر یک از شاخص‌های طبقات هفتم و بام سازه از نمودارهای شکل (۹) برای هر سه سناریو تغییر اقلیم استفاده شد. این سازه به دلیل نامنظم بودن دچار پیچش در طبقات می‌شود که همین امر سبب می‌شود که علاوه بر پیچش، مقادیر برش پایه موجود در ستون‌های سازه نسبت به سازه‌ی منظم، مقدار قابل توجهی داشته باشند.

باتوجه به نتایج بدست آمده از جدول (۴)، در سناریو (۱) تغییر اقلیم به طور متوسط میزان افزایش ۳۶٫۵ درصد در مقدار



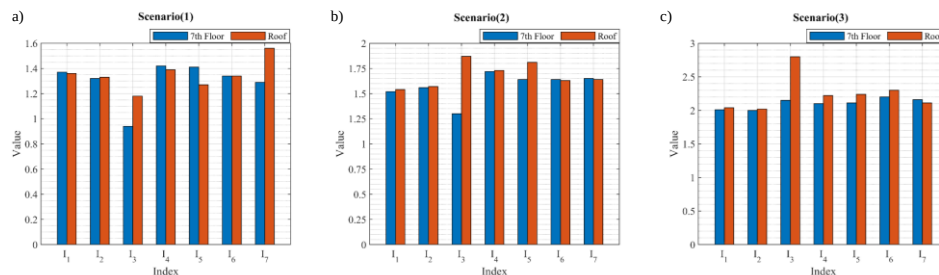
شکل ۸. تاریخچه زمانی نیروی باد در ۴ سناریو تغییر اقلیم در (a) طبقه هفتم سازه (b) طبقه بام سازه (نمودار صورتی نماینده سناریو بدون اثر تغییر اقلیم، نمودار سبز نماینده تغییر اقلیم سناریو ۱، نمودار آبی نماینده تغییر اقلیم سناریو ۲ و نمودار قرمز نماینده تغییر اقلیم سناریو ۳ می‌باشند).

Fig. 8. Wind load time history in four climate change scenarios: a) on the 7th floor of the structure model b) on the roof of the structure model (pink plot presents without the effect of climate change scenario, green plot presents climate change scenario 1, blue plot presents climate change scenario 2 and red plot presents climate change scenario 3)

جدول ۴. حداکثر پاسخ سازه در حالت بدون اثر تغییر اقلیم و پس از اثر سه سناریوی تغییر اقلیم و درصد افزایش در حداکثر پاسخ سازه

Table 4. Peak response of structure before the effect of climate change and after the effects of climate change in 3 scenarios and percent of increase in peak response of structure

پاسخ	طبقه	سناریو (۱)		سناریو (۲)		سناریو (۳)	
		بدون اثر تغییر اقلیم	تحت اثر تغییر اقلیم	درصد افزایش	تحت اثر تغییر اقلیم	درصد افزایش	تحت اثر تغییر اقلیم
x	7	0.0045	0.0062	37%	0.0068	52%	0.0090
(m)	8	0.0049	0.0066	36%	0.0075	54%	0.0099
θ	7	9.81E-05	1.30E-04	32%	0.0002	56%	0.0002
(rad)	8	1.11E-04	1.48E-04	33%	1.74E-04	57%	2.23E-04
$\ddot{x}$	7	0.5006	0.6609	32%	0.6525	30%	1.0787
(m/s ²)	8	0.4962	0.5848	18%	0.9263	87%	1.3888
$\ddot{\theta}$	7	0.0191	0.0271	42%	0.0329	72%	0.0402
(rad/s ²)	8	0.0232	0.0321	39%	0.0401	73%	0.0515
Δx	7	0.0010	0.0014	41%	0.0016	64%	0.0020
(m)	8	4.60E-04	5.82E-04	27%	8.34E-04	81%	1.03E-03
$\Delta \theta$	7	2.51E-05	3.37E-05	34%	4.11E-05	64%	5.54E-05
(rad)	8	1.37E-05	1.85E-05	34%	2.24E-05	63%	3.16E-05
V	7	1.35E+05	1.73E+05	29%	2.23E+05	65%	2.90E+05
(N)	8	1.70E+05	2.65E+05	56%	2.80E+05	64%	3.62E+05



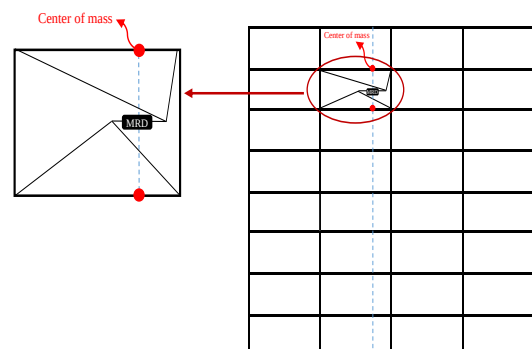
شکل ۹. نمودارهای شاخص های ارزیابی سازه در سه سناریو تغییر اقلیم: (a) سناریو ۱، (b) سناریو ۲ و (c) سناریو ۳

Fig. 9. Structure criteria indicators charts in 3 scenario of climate change: a) scenario 1, b) scenario 2 and c) scenario 3

در سناریو (۳) نیز تمام شاخص ها به غیر از شاخص I₇ در بام بحرانی تر خواهند بود. که این بدان معنی است که با افزایش شدید باد، بام سازه در معرض خطر بیشتری خواهد بود.

۳-۳- کنترل سازه در برابر آثار تغییر اقلیم با میراگر سیال مغناطیسی

برای کنترل سازه مرجع و بهبود آثار منفی تغییر اقلیم بر پاسخ جابه جایی و جابه جایی نسبی سازه، با توجه به بارهای طراحی وارد بر سازه و جرم لرزه ای سازه از یک میراگر MR با قابلیت تولید نیروی کنترل حداکثر ۲۰۰ کیلو نیوتن استفاده شده است. این میراگر در راستای محور x مرکز جرم طبقات هفتم و هشتم سازه، یعنی طبقات دارای بیشترین جابه جایی نسبی، نصب شد تا بتواند دو پارامتر جابه جایی و جابه جایی نسبی در طبقه را کاهش دهد (شکل ۱۰). با توجه به تحقیقات صورت گرفته توسط یانگ و دیگر پژوهشگران در مرجع [22] حالت کنترل غیرفعال به حالتی



شکل ۱۰. محل نصب میراگر سیال در سازه

Fig. 10. MR damper location in structure

در سناریو (۲) که شاخص های I₃ و I₅ مقادیر بحرانی تری در طبقه بام نسبت به طبقه هفتم سازه تجربه خواهند کرد. دیگر شاخص ها تقریباً به یک اندازه برای طبقه بام و طبقه هفتم بحرانی خواهند بود. از میان تمام شاخص ها، شاخص I₃ و I₅ در طبقه بام بیشترین مقدار را خواهند داشت.

گرفت. این مقایسه نشان‌دهنده هماهنگی خوب رفتار مدل با نتایج منتشرشده بود و به تأیید درستی مدل میراگر کمک کرد. مقدار حداکثر پاسخ سازه بعد از افزودن میراگر و در دو حالت کنترل در نمودارهای شکل (۱۲) قابل مشاهده می‌باشد. همچنین با استفاده از شاخص‌های ارزیابی J_1 تا J_7 تعریف شده در فرمول‌های (16 تا 21)، چگونگی عملکرد این میراگر، در دو حالت فعال و غیرفعال، در کنترل پاسخ سازه‌ها مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۱۱).

$$J_1 = \max\left(\frac{|x_{i,c}(t)|}{|x_{i,unc}(t)|}\right) \quad (16)$$

$$J_3 = \max\left(\frac{|\dot{x}_{i,c}(t)|}{|\dot{x}_{i,unc}(t)|}\right) \quad (18)$$

$$J_5 = \max\left(\frac{|\Delta x_{i,c}(t)|}{|\Delta x_{i,unc}(t)|}\right) \quad (19)$$

$$J_7 = \max\left(\frac{|V_{i,c}(t)|}{|V_{i,unc}(t)|}\right) \quad (21)$$

دارند. این بدین معنی است که میراگر پاسخ طبقه بام را هم به خوبی کنترل کرده‌است. نکته قابل توجه، تأثیر مثبت بیشتر میراگر در حالت کنترل فعال نسبت به غیر فعال است.

در مقابل، شاخص‌های J_3 و J_4 طبقه هفتم سازه، مقدار بیش از یک را در حالت کنترل فعال میراگر دارند که این بدان معنی است پارامترهای این شاخص‌ها که شتاب و شتاب دوران می باشد، افزایش پیدا کرده‌اند. در حالت کنترل غیر فعال این پارامترها تغییر چشمگیر نداشته‌اند. در بام نیز J_4 رفتار مشابه داشت اما J_3 به غیر از

گفته می‌شود که جریان ورودی به میراگر برابر با صفر و اصطلاحاً خاموش باشد و حالت کنترل فعال به حالتی گفته می‌شود که به میراگر جریان وارد شود. بدین منظور، عملکرد این میراگر در دو حالت کنترل غیرفعال (جریان ثابت ورودی برابر با صفر) و کنترل فعال (جریان ثابت حداکثر)، بررسی شد.

به منظور درستی آزمایی، رفتار مدل میراگر سیال مغناطیسی تنها که تحت بارگذاری سینوسی قرار داشت با نتایج آزمایشگاهی ارائه شده در مقاله یانگ و دیگر همکاران [22] مورد مقایسه قرار

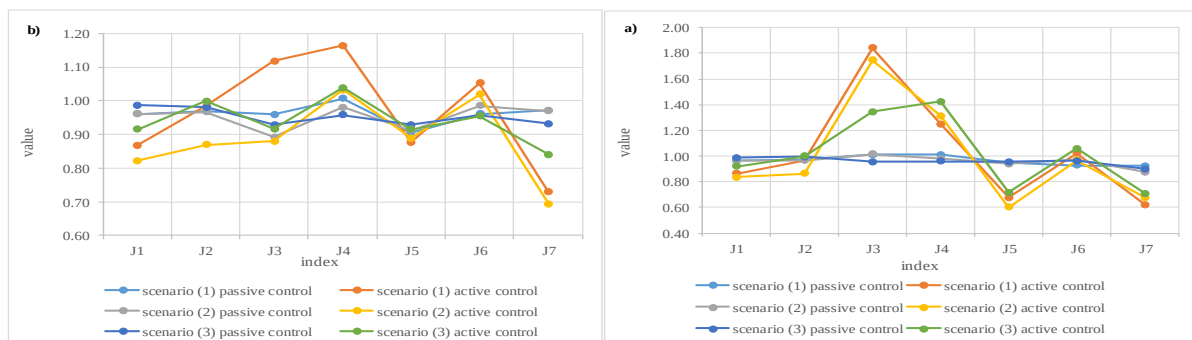
$$J_2 = \max\left(\frac{|\theta_{i,c}(t)|}{|\theta_{i,unc}(t)|}\right) \quad (17)$$

$$J_4 = \max\left(\frac{|\ddot{\theta}_{i,c}(t)|}{|\ddot{\theta}_{i,unc}(t)|}\right) \quad (19)$$

$$J_6 = \max\left(\frac{|\Delta \theta_{i,c}(t)|}{|\Delta \theta_{i,unc}(t)|}\right) \quad (20)$$

که در معادلات بالا اندیس unc نشان دهنده مقادیر پاسخ سازه قبل از کنترل توسط میراگر و اندیس c نشان دهنده مقادیر پاسخ سازه بعد از کنترل توسط میراگر می‌باشد.

با تحلیل نمودارهای شکل (۱۱)، به این امر دست می‌یابیم که، میراگر در کنترل پارامترهای مربوط به شاخص J_1 ، J_2 ، J_5 و J_7 عملکرد خوبی داشته است چراکه مقادیر این شاخص‌ها کمتر از یک می‌باشد. این شاخص‌ها به غیر از شاخص J_5 مقدار تقریباً برابر با مقادیر شاخص‌ها در طبقه‌ای که میراگر در آن قرار گرفته

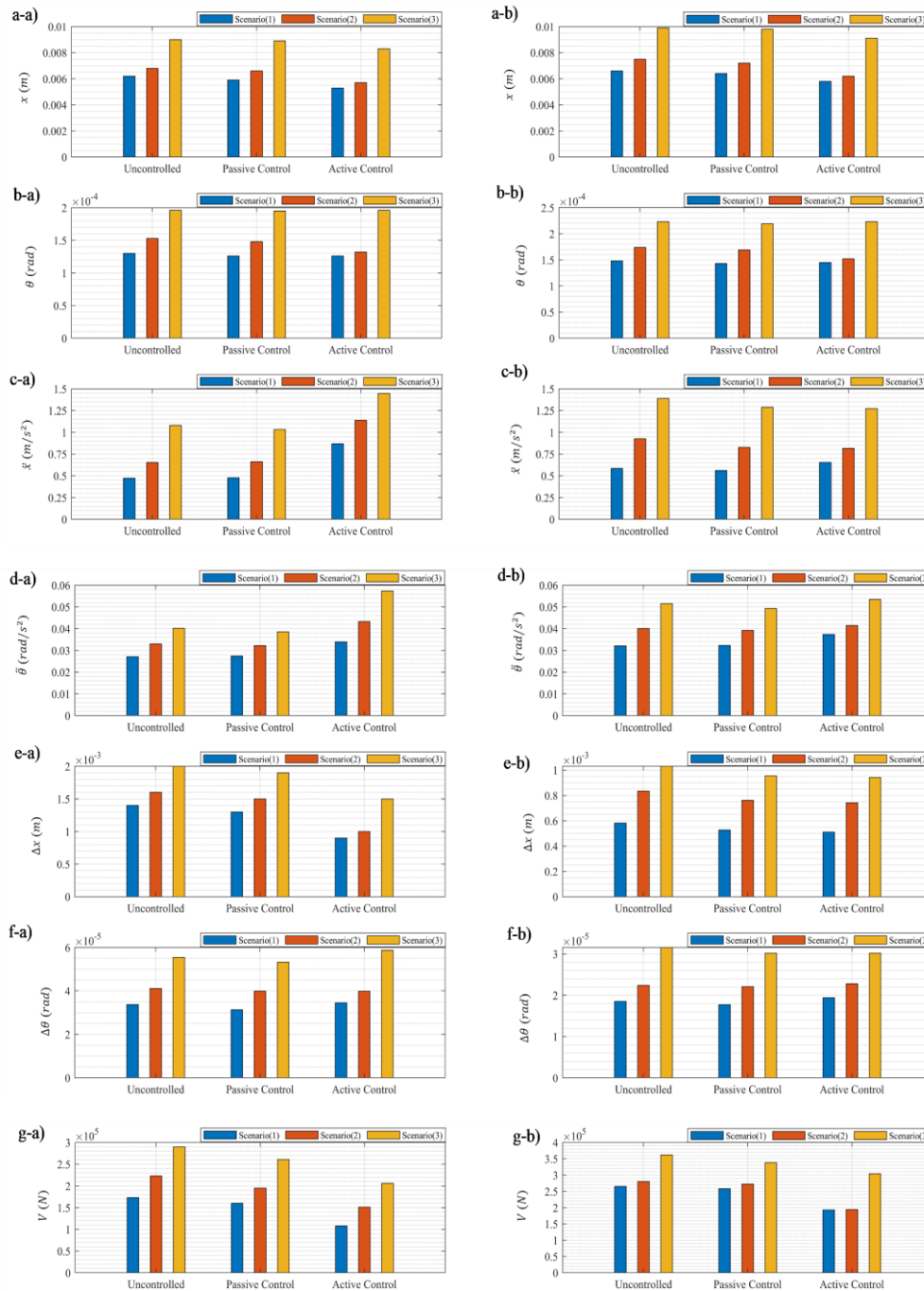


شکل ۱۱. نمودار شاخص‌های ارزیابی برای سناریوهای تغییر اقلیم در: (a) طبقه هفتم (b) بام. (نمودار آبی روشن نشان دهنده مقادیر شاخص‌ها در سناریو ۱ تغییر اقلیم حالت کنترل غیر فعال، نمودار نارنجی سناریو ۱ تغییر اقلیم حالت کنترل فعال، نمودار طوسی سناریو ۲ تغییر اقلیم حالت کنترل غیر فعال، نمودار زرد سناریو ۲ تغییر اقلیم حالت کنترل فعال، نمودار آبی تیره سناریو ۳ تغییر اقلیم حالت کنترل غیر فعال و نمودار سبز سناریو ۳ تغییر اقلیم حالت کنترل فعال می باشد).

Fig. 11. Criteria indicators diagram for climate change scenarios on the: a) 7th floor b) roof of the building. (light blue plot indicates value of the indicators in climate change scenario 1 passive control state, orange plot presents climate change scenario 1 active control state, gray plot presents climate change scenario 2 passive control state, yellow plot presents climate change scenario 2 active control state, dark blue plot presents climate change scenario 3 passive control state and green plot presents climate change scenario 3 active control state.)

شتاب بام نمی‌شود. با توجه به نمودارهای شکل (۱۲)، میراگر در حالت کنترل فعال می‌تواند در بهترین حالت تا ۱۶ درصد حداکثر

کنترل فعال سناریو (۱)، در دیگر حالت‌ها مقدار کمتر از یک را دارد که این نشان دهنده آن است که نیروی میراگر باعث افزایش



شکل ۱۲. نمودار مقادیر پاسخ‌های طبقه هفتم و بام سازه در سه حالت کنترل نشده، کنترل غیرفعال و کنترل فعال در سه سناریو تغییر اقلیم: (a-a) جابه‌جایی در راستای x طبقه هفتم، (a-b) جابه‌جایی در راستای x طبقه بام، (b-a) دوران طبقه هفتم، (b-b) دوران طبقه بام، (c-a) شتاب در راستای x طبقه هفتم، (c-b) شتاب در راستای x طبقه بام، (d-a) شتاب دورانی طبقه هفتم، (d-b) شتاب دورانی طبقه بام، (e-a) جابه‌جایی نسبی در راستای x طبقه هفتم، (e-b) جابه‌جایی نسبی در راستای x طبقه بام، (f-a) دوران نسبی طبقه هفتم، (f-b) دوران نسبی طبقه بام، (g-a) برش پایه طبقه هفتم و (g-b) برش پایه طبقه بام

Fig. 12. Response value charts for the seventh floor and the roof of the structure in three states: 1- uncontrolled, 2- passive control, and 3- active control under three climate change scenarios: a-a) Seventh floor displacement in the x direction, a-b) Roof displacement in the x direction, b-a) Seventh floor rotation, b-b) Roof rotation, c-a) Seventh floor acceleration in the x direction, c-b) Roof acceleration in the x direction, d-a) Seventh floor rotational acceleration, d-b) Roof rotational acceleration, e-a) Seventh floor drift in the x direction, e-b) Roof drift in the x direction, f-a) Seventh floor rotational drift, f-b) Roof rotational drift, g-a) Seventh floor base shear, and g-b) Roof base shear

جدول ۵. مقادیر مجذور مجموع مربعات پاسخ‌های سازه در سه سناریو تغییر اقلیم و در سه حالت: کنترل نشده، کنترل غیرفعال، و کنترل فعال

Table 5. RMS of the structure's responses in three climate change scenarios and three states of: uncontrolled, passive control, and active control.

RMS	طبقه	سناریو (1)			سناریو (2)			سناریو (3)		
		کنترل نشده	کنترل غیرفعال	کنترل فعال	کنترل نشده	کنترل غیرفعال	کنترل فعال	کنترل نشده	کنترل غیرفعال	کنترل فعال
x (m)	7	1.68E-03	1.64E-03	1.54E-03	1.85E-03	1.79E-03	1.62E-03	2.70E-03	2.61E-03	2.39E-03
	8	1.82E-03	1.78E-03	1.66E-03	2.02E-03	1.95E-03	1.76E-03	2.96E-03	2.86E-03	2.60E-03
θ (rad)	7	3.37E-05	3.27E-05	3.17E-05	4.42E-05	4.27E-05	4.02E-05	6.38E-05	6.17E-05	5.80E-05
	8	3.82E-05	3.70E-05	3.59E-05	5.02E-05	4.84E-05	4.57E-05	7.24E-05	7.00E-05	6.59E-05
$\ddot{x}$ (m/s ²)	7	0.152	0.142	0.134	0.190	0.176	0.158	0.291	0.273	0.257
	8	0.179	0.166	0.146	0.225	0.206	0.170	0.343	0.318	0.276
$\ddot{\theta}$ (rad/s ²)	7	6.87E-03	6.78E-03	7.24E-03	9.19E-03	9.03E-03	9.35E-03	1.28E-02	1.26E-02	1.32E-02
	8	8.07E-03	7.92E-03	8.36E-03	1.07E-02	1.05E-02	1.08E-02	1.50E-02	1.47E-02	1.51E-02
Δx (m)	7	3.59E-04	3.42E-04	2.85E-04	4.13E-04	3.89E-04	3.10E-04	6.06E-04	5.73E-04	4.60E-04
	8	1.61E-04	1.53E-04	1.40E-04	1.95E-04	1.83E-04	1.61E-04	2.90E-04	2.74E-04	2.47E-04
$\Delta \theta$ (rad)	7	8.69E-06	8.39E-06	8.19E-06	1.14E-05	1.10E-05	1.05E-05	1.65E-05	1.59E-05	1.50E-05
	8	4.70E-06	4.54E-06	4.60E-06	6.19E-06	5.95E-06	5.86E-06	8.90E-06	8.58E-06	8.49E-06
V (N)	7	6.75E+04	6.52E+04	5.82E+04	7.46E+04	7.12E+04	6.16E+04	1.08E+05	1.03E+05	8.92E+04
	8	5.09E+04	4.84E+04	4.45E+04	6.14E+04	5.77E+04	5.09E+04	9.11E+04	1.03E+05	7.78E+04

در کنترل و مدیریت ارتعاشات و بهبود عملکرد سازه است.

۴- خلاصه و جمع بندی

این مطالعه به بررسی عملکرد لرزه‌ای یک سازه نامنظم پیش‌پیشی با ۸ طبقه در شرایط متغیر تغییر اقلیم و بارگذاری باد می‌پردازد. هدف اصلی این تحقیق، تحلیل تأثیر میراگرهای سیال مغناطیسی بر بهبود پاسخ لرزه‌ای سازه در برابر نیروهای باد است که با توجه به اهمیت روزافزون تغییرات اقلیمی، بررسی این موضوع از منظر مهندسی سازه بسیار ضروری است.

تحلیل‌های انجام‌شده روی سازه تحت سه سناریو مختلف سرعت باد (کم، متوسط و شدید) نشان می‌دهد که افزایش سرعت باد تأثیر قابل توجهی بر رفتار دینامیکی سازه دارد. در سناریوی اول، که سرعت باد کم است، بیشترین پاسخ‌های جابه‌جایی و شتاب تنها ۳۵ درصد افزایش می‌یابد. این میزان افزایش نسبتاً قابل قبول است و نشان‌دهنده این است که در شرایط باد ملایم، سازه هنوز هم می‌تواند به طور مؤثری عمل کند.

اما در سناریوی دوم، با افزایش سرعت باد به سطح متوسط، این افزایش به ۶۰ درصد می‌رسد. این تغییر حاکی از آن است که سازه در برابر نیروهای باد متوسط به مراتب آسیب‌پذیرتر می‌شود و

جابه‌جایی، تا ۱۴ درصد دوران، تا ۴۰ درصد جابه‌جایی نسبی و تا ۳۸ درصد برش پایه طبقه‌ای که در آن قرار می‌گیرد را کاهش دهد. در حالت کنترل غیرفعال هم میراگر موفق به کاهش ۶ درصدی جابه‌جایی نسبی و ۱۲ درصدی برش پایه شد. در بام نیز میراگر توانست در حالت فعال، تا ۱۸ درصد حداکثر جابه‌جایی، تا ۱۲ درصد جابه‌جایی نسبی و تا ۳۱ درصد برش پایه را کاهش دهد. در حالت کنترل غیرفعال هم میراگر موفق به کاهش ۹ درصدی جابه‌جایی نسبی و ۷ درصدی برش پایه شد.

در جدول (۵)، مقادیر مجذور مجموع مربعات پاسخ‌های سازه یا به اختصار "RMS" آورده شده‌اند. مشاهده می‌شود که مقادیر RMS برای تمامی پارامترهای پاسخ سازه در سناریو (۳) تغییر اقلیم بیشترین مقدار و در سناریو (۱) کمترین مقدار را دارد که این نشان‌دهنده رخداد بارهای دینامیکی و تنش‌های بیشتر بر ساز در سناریو (۳) می‌باشد.

اما مقادیر RMS پس از کنترل چه در حالت غیرفعال و چه در حالت فعال در تمامی سناریوها و در تمامی پارامترهای پاسخ سازه کاهش پیدا کرده است که مقدار این کاهش در حالت کنترل فعال قابل ملاحظه‌تر می‌باشد. این امر نشان‌دهنده کارایی بالای میراگر

¹ Root Mean Square

اهمیت خاصی دارد و می‌تواند به افزایش ایمنی و پایداری کلی سازه کمک کند.

علاوه بر این، نتایج نشان دادند که میراگر در حالت کنترل فعال نسبت به حالت غیرفعال عملکرد بهتری دارد. اگرچه در مقابل، پارامترهای مربوط به حداکثر شتاب در حالت کنترل فعال میراگر افزایش قابل ملاحظه‌ای داشتند که این نشان دهنده این است که میراگر زمانی که جریان ورودی به آن ثابت باشد، تنها در کاهش شاخص‌های از جنس جابه‌جایی و برش موفق خواهد بود و در شاخص‌هایی از جنس شتاب موفق نخواهد بود. بهترین نتایج در کاهش شاخص‌های جابه‌جایی و برش در سناریوهای افزایش کم و متوسط سرعت باد به دست آمده است. در سناریو افزایش شدید سرعت باد نیز میراگر عملکرد قابل قبولی داشت.

در نهایت می‌توان گفت نیروی تولیدشده توسط میراگر سیال مغناطیسی قابلیت تنظیم هوشمند دارد که می‌تواند بر اساس شرایط محیطی و بارگذاری تغییر کند. این ویژگی به سازه‌ها اجازه می‌دهد تا در برابر تغییرات ناگهانی محیطی واکنش سریع‌تری نشان دهند و ایمنی بیشتری را در مواجهه با آسیب‌های ناشی از شرایط اقلیمی فراهم کنند.

با این حال، لازم به ذکر است که تعمیم این نتایج به سایر حالات و انواع سازه‌ها با محدودیت‌هایی مواجه است. عوامل متعددی از جمله ویژگی‌های هندسی، نوع مصالح، شرایط محیطی و بارهای وارد بر سازه می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر عملکرد میراگرها داشته باشند. بنابراین، برای هر نوع سازه و شرایط خاص، نیاز به بررسی و تحلیل مجدد وجود دارد تا بتوان از نتایج این مطالعه به‌طور مؤثر استفاده کرد.

قدردانی نویسندگان

نویسندگان این مقاله از حمایت‌های معنوی دانشگاه علم و صنعت ایران قدردانی می‌نمایند.

تعارض منافع

نویسندگان مقاله تأیید می‌نمایند که تعارض منافعی جهت گزارش وجود ندارد.

نیاز به تدابیر کنترلی بیشتری احساس می‌شود. این مسئله به ویژه در طبقات بالایی سازه مشهود است، جایی که آثار باد بیشتر محسوس است.

در نهایت، در سناریوی شدید، حداکثر پاسخ‌ها بیش از ۱۰۰ درصد افزایش نشان می‌دهند. این نتیجه زنگ خطری برای مهندسان و طراحان سازه‌هاست، زیرا نشان‌دهنده این واقعیت است که با افزایش شدت تغییرات اقلیمی، سازه‌ها باید قادر به تحمل بارهای بیشتری باشند. در این شرایط، استفاده از میراگرهای سیال مغناطیسی می‌تواند به عنوان یک راهکار مؤثر برای کاهش آثار منفی باد روی سازه‌ها مورد توجه قرار گیرد.

با توجه به تغییر شرایط اقلیمی و آثار منفی آن بر پاسخ‌های جابه‌جایی و جابه‌جایی نسبی طبقات، افزودن میراگر سیال مغناطیسی به سازه به عنوان یک راهکار مؤثر مطرح می‌شود.

در این مطالعه، دو حالت کنترل میراگر بررسی شد: کنترل غیرفعال و کنترل فعال. در حالت غیرفعال، جریان ورودی میراگر ثابت و برابر با صفر بود، در حالی که در حالت فعال، جریان ورودی به حداکثر میزان خود رسید. این دو حالت به ما این امکان را می‌دهد که تأثیر مختلف کنترل را بر عملکرد سازه تحلیل کنیم.

نتایج تحلیل‌ها نشان‌دهنده عملکرد بسیار خوب میراگر در کنترل پارامترهای حداکثر پاسخ جابه‌جایی، جابه‌جایی نسبی و برش پایه در سه سناریو مختلف تغییر اقلیم است. به طور خاص، در حالت فعال، میراگر توانست حداکثر پاسخ جابه‌جایی، جابه‌جایی نسبی و برش پایه طبقه‌ای که در آن نصب شده است را به ترتیب تا ۱۴، ۳۲ و ۳۸ درصد در سناریو اول کاهش دهد. این کاهش قابل توجه نشان‌دهنده تأثیر مثبت میراگر بر کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای سازه است.

علاوه بر این، در سناریوهای دوم و سوم نیز، میراگر نتایج مشابهی را نشان داد و توانست حداکثر پاسخ جابه‌جایی و جابه‌جایی نسبی و برش پایه را در سناریوی دوم به ترتیب تا ۱۶، ۴۰ و ۳۲ درصد و در سناریو سوم تا ۸، ۲۸ و ۲۹ درصد کاهش دهد. همچنین نتایج حاکی از آن بود که میراگر نه تنها روی طبقات پایین‌تر بلکه به ویژه روی طبقه بام نیز تأثیر مثبت دارد. در واقع، کاهش پاسخ لرزه‌ای بام به عنوان یکی از نقاط حساس سازه،

سهم نویسندگان

منابع مالی

این پژوهش بدون استفاده از منبع و حمایت مالی صورت پذیرفته است.

در انجام این پژوهش سهم نویسندگان یکسان است.

References

1. Kuba, M. 2017. *Impact of climate changes on civil engineering structures*. University of Zagreb.
2. Eichelberger, S. et al. 2008. Climate change effects on wind speed. *North American Windpower*, 7, pp. 68-72.
3. Leckebusch, G.C. et al. 2008. Extreme wind storms over Europe in present and future climate: a cluster analysis approach. *Meteorologische Zeitschrift*, 17(1), pp. 67-82.
4. Haugen, J.E. & Iversen, T. 2008. Response in extremes of daily precipitation and wind from a downscaled multi-model ensemble of anthropogenic global climate change scenarios. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 60(3), pp. 411-426.
5. Makkonen, L. et al. 2007. Regional climate model estimates for changes in Nordic extreme events. *Geophysica*, 43(1-2), pp. 19-42.
6. Kulkarni, S., Deo, M. & Ghosh, S. 2013. Impact of climate change on local wind conditions. In: *International Conference on Hydraulics and Water Resources (HYDRO)*. Chennai, India.
7. Hintermaier, A. & Lin, N. 2024. An Investigation of Climate Change Effects on Design Wind Speeds along the US East and Gulf Coasts. *Journal of Structural Engineering*, 150(9), p. 04024123.
8. Rabinow, J. 1948. The magnetic fluid clutch. *Electrical Engineering*, 67(12), p. 1167-.
9. Schurter, K.C. & Roschke, P.N. 2000. Fuzzy modeling of a magnetorheological damper using ANFIS. In: *Ninth IEEE International Conference on Fuzzy Systems FUZZ-IEEE 2000 (Cat No 00CH37063)*. IEEE.
10. Spencer, B., Dyke, S. & Sain, M.K. 1996. Magnetorheological dampers: a new approach to seismic protection of structures. In: *Proceedings of 35th IEEE Conference on Decision and Control*. IEEE.
11. Jung, H.-J., Lee, I.W. & Spencer, J.B. 2002. State of the Art of MR Damper Based Control Systems in Civil Engineering Applications. *Smart Infra Structural System*.
12. Yoshida, O. & Dyke, S.J. 2005. Response control of full-scale irregular buildings using magnetorheological dampers. *Journal of Structural Engineering*, 131(5), pp. 734-742.
13. Li, H.-N. & Li, X.-L. 2009. Experiment and analysis of torsional seismic responses for asymmetric structures with semi-active control by MR dampers. *Smart Materials and Structures*, 18(7), p. 075007.
14. Bharti, S., Dumne, S. & Shrimali, M. 2014. Earthquake response of asymmetric building with MR damper. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 13, pp. 305-316.
15. Yang, Y. & Guo, Y.-Q. 2022. Numerical simulation and torsional vibration mitigation of spatial eccentric structures with multiple magnetorheological dampers. *Actuators*. MDPI.
16. Spencer Jr, B. et al. 1997. Phenomenological model for magnetorheological dampers. *Journal of Engineering Mechanics*, 123(3), pp. 230-238.
17. Jung, H.-J., Spencer Jr, B.F. & Lee, I.-W. 2003. Control of seismically excited cable-stayed bridge employing magnetorheological fluid dampers. *Journal of Structural Engineering*, 129(7), pp. 873-883.
18. Whalen, T.M. et al. 2000. *A Pilot Project for Computer-based Design of Low-rise Buildings for Wind Loads: The WILDE-LRS User's Manual*. Citeseer.
19. Kwon, D.-K., Kijewski-Correa, T. & Kareem, A. 2008. E-analysis of high-rise buildings subjected to wind loads. *Journal of Structural Engineering*, 134(7), pp. 1139-1153.
20. Iancovici, M. & Nica, G.B. 2023. Time-Domain Structural Damage and Loss Estimates for Wind Loads: Road to Resilience-Targeted and Smart Buildings Design. *Buildings*, 13(3), p. 734.
21. Chopra. 1981. *Dynamics of Structures*.
22. Yang, G. et al. 2002. Phenomenological model of large-scale MR damper systems. In: *Advances in Building Technology*. Elsevier, pp. 545-552.
23. Kareem, A. & Kwon, D.K. 2017. A cyber-based data-enabled virtual organization for wind load effects on civil infrastructures: VORTEX-Winds. *Frontiers in Built Environment*, 3, p. 48.
24. Nathaz wind simulator. [Available from: http://windsim.ce.nd.edu/gew_init2.html].
25. Simiu, E. 2011. *Design of buildings for wind: A guide for ASCE 7-10 standard users and designers of special structures*. John Wiley & Sons.
26. Wittig, L.E. & Sinha, A.K. 1975. Simulation of multicorrelated random processes using the FFT algorithm. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 58(3), pp. 630-634.
27. Chen, X. & Kareem, A. 2005. Proper orthogonal decomposition-based modeling, analysis, and simulation of dynamic wind load effects on structures.

- Journal of Engineering Mechanics*, 131(4), pp. 325-339.
28. Hu, L., Li, L. & Gu, M. 2010. Error assessment for spectral representation method in wind velocity field simulation. *Journal of Engineering Mechanics*, 136(9), pp. 1090-1104.
29. Deodatis, G. et al. 1991. Analysis of two-dimensional stochastic systems by the weighted integral method. In: *Computational stochastic mechanics*, pp. 395-406.
30. Aliakbari, F., Garivani, S. & Shahmari, A. 2020. Determination of torsional irregularity in response spectrum analysis of building structures. *Structural Engineering and Mechanics*, 74(5), pp. 699-709.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Norouzi, M., Ghaderi, P. 2026. 'application of magnetorheological dampers in improving the seismic performance of irregular structures against the effects of wind load variation due to climate change', *Modares Civil Engineering journal*, 25(6), pp 53-67.

DOI: 10.48311/mcej.2026.12722

