

# بهینه‌سازی سیستم‌های کنترلی نیمه‌فعال در سازه فولادی جداسازی شده با در نظرگیری محدودیت فضای حرکتی تحت زلزله‌های حوزه نزدیک

آرش رایگانی<sup>۱</sup>، غلامرضا نوری<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران سازه، دانشگاه خوارزمی، تهران

۲- استادیار گروه مهندسی عمران دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه خوارزمی، تهران

\*تهران، صندوق پستی ۱۵۷۱۹۱۴۹۱۱، r.nouri@khu.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۱۹، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۰۸)

## چکیده

مقدار بیشینه جابجایی تراز جداسازی در سازه‌های جداسازی شده یکی از معیارهای مهم برای دستیابی به یک طرح اقتصادی و فنی برای طراحی سیستم‌های جداسازی ساختمان‌ها می‌باشد. فضای خالی در نظر گرفته شده در اطراف سازه‌های جداسازی شده موجود ممکن است به دلایل مختلف از جمله تغییرات ضوابط لرزه‌ای، تغییر مشخصات لرزه‌ای منطقه و همچنین عدم قطعیت‌های موجود، برای حرکت آزادانه سازه جداسازی شده در هنگام زلزله کافی نباشد. از این رو لازم است در صورت نیاز با بکارگیری روشی کارآمد جابجایی‌های تراز جداسازی جهت جلوگیری از احتمال برخورد سازه کاهش یابد. هدف از این مقاله بکارگیری سیستم‌های کنترلی هوشمند در تراز جداسازی با الگوریتم کنترلی بهینه‌سازی شده برای کاهش جابجایی‌های تراز جداسازی با در نظرگیری فواصل مختلف برای فضای اطراف سازه جداسازی می‌باشد. در این پژوهش از میراگر نیمه‌فعال از نوع میراگرهای Magnetorheological با استفاده از الگوریتم فازی بهینه شده برای کنترل ولتاژ ورودی در یک سازه جداسازی شده با جداسازهای با میرایی زیاد استفاده شده است. نتایج نشان داده است الگوریتم کنترلی توانسته علاوه بر جلوگیری از برخورد سازه با موانع اطراف خود در زلزله‌های مختلف، پاسخ‌های لرزه‌ای در روسازه را بهبود بخشد. همچنین پراکندگی و میانگین پاسخ‌های لرزه‌ای روسازه در تابع چگالی احتمال توزیع لگاریتم نرمال در مقایسه با سازه بدون سیستم کنترلی هوشمند کاهش یافته است.

## واژگان کلیدی

سازه‌های جداسازی، سیستم کنترل نیمه‌فعال، الگوریتم فازی، زلزله حوزه نزدیک

## Optimization of a semi-active controlled isolated steel structure under near-field earthquake by considering gap size limitation

A. Rayegani, Gh.R. Nouri

### Abstract

The maximum displacement at the buildings' isolated level is an important issue for designing an economical and practical isolation system. Due to various reasons such as uncertainties in the design, changes in estimated seismic characteristics, and changes in design codes, the considered gap size around the existing isolated structures may not be sufficient for having free movement during an earthquake. Therefore, it is necessary to reduce the isolated level displacements by using an efficient method to prevent the possibility of structural pounding. The purpose of this paper is to use a smart control system in the isolated level with the optimized fuzzy control algorithm to reduce based-level displacements by considering different gap sizes around the structure. In this research, the Magnetorheological damper with the optimized fuzzy logic algorithm is used at a based level of isolated structure with high damping isolators. The results show that the control system can improve the superstructure's seismic performance and prevent poundings. Also, the dispersion and average of seismic responses of the superstructure in the probability density function of responses are reduced compared to structures without smart control systems.

### Keywords

Isolated building, Semi-active control system, Fuzzy logic control, Near-field earthquakes

سیستم‌های جداسازی یکی از بهترین روش‌های کنترلی جهت کاهش خسارت‌های لرزه‌ای در سازه‌ها می‌باشند که در سال‌های اخیر استفاده از آنها در کشورهای مختلف از جمله ایران رو به افزایش بوده است. عملکرد مطلوب سازه‌های جداسازی تحت زلزله‌های حوزه دور در تحقیقات بسیار و همچنین زلزله‌های واقعی متعدد نشان داده شده است. در مقابل در زلزله‌های حوزه نزدیک به خصوص زلزله‌های دارای پالس‌های بلند به دلیل محتوای فرکانسی خاص خود و احتمال نزدیک شدن پریود غالب زلزله به پریود سیستم جداسازی، امکان ایجاد جابجایی‌های زیاد در تراز جداسازها وجود دارد [۱ و ۲]. همچنین این امکان وجود دارد که فضای خالی در اطراف سازه‌های جداسازی شده موجود به دلایل مختلف از جمله تغییرات ایجاد شده در آیین‌نامه، خطاهای ساخت و یا تغییرات در مشخصات لرزه خیزی منطقه برای حرکت آزاد سازه کافی نباشد. از این رو لازم است احتمال برخورد سازه جداسازی شده به موانع اطراف خود به روشی مناسب از میان برداشته شود. برخورد و ضربه در هنگام زلزله می‌تواند آسیب‌های جدی به سازه وارد نماید [۳-۵]. به عنوان یک نمونه در سال ۱۹۹۴ ساختمان جداسازی شده مدیریت و فرماندهی در شهر لس‌آنجلس در هنگام زلزله با مانع بتنی مجاور خود برخورد نمود و خسارت‌هایی به سازه آن وارد شد [۶]. برخورد دو سازه در هنگام زلزله در سازه‌های بدون جداساز در تحقیقات مختلف بررسی شده و نمونه‌های مختلف آن در زلزله‌های واقعی مشاهده شده است. این برخوردها می‌تواند به شدت بر روی رفتار سازه تاثیر گذاشته و عملکرد آن را با مشکل مواجه نماید [۷ و ۸]. از این رو یکی از چالش‌های اصلی در طراحی سیستم جداسازی، به خصوص در نواحی حوزه‌های نزدیک گسل زلزله، محدود کردن جابجایی جداسازها برای دستیابی به طرحی اجرایی و اقتصادی می‌باشد. افزایش سختی جداسازها جهت کاهش جابجایی تراز جداسازی با فلسفه کلی عملکرد جداسازها در تضاد بوده و عملکرد مورد انتظار جداسازها را تضعیف می‌نماید. بکارگیری سیستم‌های میراکننده انرژی در تراز جداسازی و در کنار جداسازها یکی از روش‌های متداول جهت کاهش جابجایی‌های کلی سازه می‌باشد. سیستم‌های کنترلی غیر فعال مانند میراگرهای ویسکوز در بسیاری از سازه‌های جداسازی شده در سراسر جهان از جمله ژاپن و آمریکا در تراز جداسازی جهت کاهش جابجایی کلی سازه بکار رفته‌اند [۹]. سیستم‌های میراگر غیر فعال که بطور معمول برای زلزله‌های شدید طراحی

می‌شوند تا بتوانند جابجایی‌های تراز جداسازی را کاهش دهند ممکن است در زلزله‌های ضعیف‌تر نیروهای بیش از نیاز سازه را ایجاد کنند که باعث افزایش پاسخ‌ها در روسازه شود. در مقابل سیستم‌های میراکننده انرژی هوشمند قادر هستند مشخصات رفتاری خود را متناسب با مشخصات زلزله و سازه و بر اساس الگوریتم کنترلی خود تنظیم نمایند. این نوع از سیستم‌ها بر مبنای نوع عملکرد خود به دو دسته کلی نیمه‌فعال و فعال تقسیم‌بندی می‌شوند. سیستم‌های کنترلی نیمه‌فعال به دلیل عدم نیاز به منبع خارجی بزرگ انرژی و عدم احتمال ناپایداری در سازه به دلیل خطای نیروهای وارد از مقبولیت بیشتری در میان طراحان سازه برخوردار بوده است [۱۰].

در این تحقیق عملکرد میراگرهای نیمه‌فعال از نوع MR) Magnetorheological با سیستم کنترلی الگوریتم فازی مورد ارزیابی قرار گرفته است. مشخصات الگوریتم فازی در نظرگیری فواصل مختلف برای موانع حرکتی در اطراف ساختمان و بهینه‌سازی چند هدفه تعیین شده است. الگوریتم فازی متناسب با جابجایی و سرعت ایجاد شده در تراز جداسازی مقدار ولتاژ ورودی به میراگر را تنظیم نموده و بدین طریق میزان نیروی ایجاد شده در میراگر تنظیم خواهد شد. مشخصات رفتاری میراگر MR با استفاده از مدل Bouc-Wen در تحلیل‌ها مدل سازی شده است. پارامترهای مدل Bouc-Wen با استفاده از بهینه‌یابی ژنتیک الگوریتم با هدف تطبیق پاسخ‌های برآورد شده با نتایج آزمایشگاهی بدست آمده است. سازه مورد مطالعه یک ساختمان چهار طبقه بوده که با استفاده از جداسازهای الاستومری با میرایی زیاد جداسازی شده و بدون در نظرگیری میراگر اضافه شده، مطابق استانداردهای بین‌المللی شرح داده شده در بخش ۲، طراحی شده است.

## ۲- مدل سازه‌ای

سازه مورد مطالعه یک ساختمان سه بعدی چهار طبقه با ارتفاع طبقات ۳/۵ متر می‌باشد که سیستم باربر جانبی آن قاب خمشی ویژه فلزی است. این ساختمان در پلان دارای دو دهانه شش متری در راستای طولی و یک دهانه هشت متری در راستای متعامد آن می‌باشد. مطابق شکل (۱) جداسازها در زیر طبقه همکف قرار دارد و میراگر MR در وسط دیافراگم طبقه اول قرار گرفته است. بار مرده و زنده این ساختمان به ترتیب برابر ۵ و ۲/۵ کیلونیوتن بر متر مربع در نظر گرفته شده است. ساختمان بدون در نظر گیری اثر میراگرها و مطابق با استانداردهای AISC360-16 [۱۱] و ASCE07-16 [۱۲] طراحی



الاستومری با میرایی زیاد با استفاده از مدل **Kikuchi** و همکارانش [۱۴] مدل‌سازی شده‌اند. رفتار میراگر **MR** با استفاده از مدل **Bouc-Wen**، که جزئیات آن در بخش بعد اشاره شده است، در نرم افزار **MATLAB** [۱۵] مدل‌سازی شده و مقدار نیروی میراگر در هر گام زمانی از تحلیل با ایجاد یک شبکه ارتباطی با نرم افزار **OpenSees** بر مدل‌سازی اعمال شده است.

زلزله‌های حوزه نزدیک دارای پالس‌های بلند سرعت به دلیل نزدیکی پریود غالب پالس با پریود سیستم جداسازی تاثیر زیادی بر عملکرد سازه‌های جداسازی می‌تواند داشته باشند. با توجه به محاسبات سنگین مورد نیاز برای بهینه‌سازی، در اینجا از بین زلزله‌های پیشنهادی **FEMA P695** [۱۶] برای حوزه نزدیک سه زلزله که بیشترین پاسخ‌ها را در سازه مورد بررسی ایجاد میکنند استفاده شده است. مشخصات این رکوردهای حوزه نزدیک دارای پالس بلند در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات رکوردهای لرزه‌ای

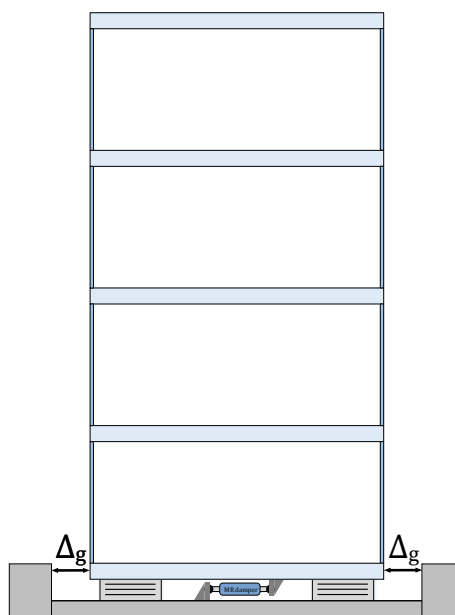
شماره NGA	کانون زلزله	سال	نام مرکز ثبت	بزرگی
۱۸۲	Imperial_Valley -06	۱۹۷۹	El_Centro_ Array_#7	۶/۵۳
۷۲۳	Superstition_ Hills-02	۱۹۸۷	Parachute_ Test_Site	۶/۵۴
۱۰۶۳	Northridge-01	۱۹۹۴	Rinaldi_ Receiving_Sta	۶/۶۹

با هدف اینکه میزان اثر فاصله مانع حرکتی در زلزله‌های مختلف برای سازه یکسان باشد، فاصله مانع حرکتی به نسبتی از بیشینه جابجایی ایجاد شده در هر زلزله در نظر گرفته شده است. در جدول (۲) مقدار جابجایی بیشینه سازه جداسازی شده در تراز جداسازی (DE) و فواصل در نظر گرفته شده برای مانع حرکتی ( $\Delta g$ ) در هر زلزله ارائه شده است. در این پژوهش فرض شده است مانع حرکتی در فاصله  $0/6$  و  $0/8$  برابر جابجایی حداکثر سازه جداسازی باشند.

### ۳- مدل‌سازی میراگر MR

برای مدل‌سازی رفتار میراگر **MR** مدل‌های مختلفی ارائه شده است که در اینجا از مدل **Simple Bouc-Wen** به جهت توانایی خوبی که در مدل‌سازی رفتار میراگر در ولتاژهای مختلف دارد استفاده شده است. این مدل توانایی خوبی در مدل‌سازی رفتاری غیر خطی دارد و از آن در تحقیقات متعدد استفاده شده است [۱۷]. در شکل (۲) مکانیزم کلی این مدل نشان داده شده

شده است. در طراحی، فرض شده است که نوع خاک سازه از نوع **C** با سطح خطر نوع ۳ باشد. طیف **MCER** مورد استفاده برای طراحی روسازه دارای  $SMS=1/0.7g$  و  $SM1=1/3.6g$  بوده و ضریب رفتار روسازه برابر ۲ در نظر گرفته شده است. شش جداساز الاستومری با میرایی زیاد در زیر ستون‌ها از یک نوع با قطر  $700$  میلی‌متر و ارتفاع لاستیک  $200$  میلی‌متر با مدول برشی  $0/62$  مگاپاسکال قرار گرفته است. سختی قائم جداسازها و سختی جانبی معادل آنها در کرنش  $100\%$  به ترتیب برابر  $2660 \times 10^3$  کیلونیوتن بر متر و  $1180$  کیلونیوتن بر متر می‌باشد. مقاطع تیرها در دهانه‌های بلند  $W21 \times 93$  و در دهانه‌های کوتاه‌تر  $W21 \times 122$  و مقطع ستون‌ها در دو طبقه پایین  $W14 \times 176$  و دو طبقه بالا  $W14 \times 145$  در نظر گرفته شده است. همانطور که در شکل (۱) دیده می‌شود دو مانع حرکتی در هر دو سمت سازه قرار داده شده است. فواصل این مانع به نسبت بیشینه جابجایی سازه در هر زلزله در نظر گرفته شده است. همچنان، راستایی از رکوردهای لرزه‌ای که در آن پالس‌های سرعت وجود دارد در جهت برخورد سازه در نظر گرفته شده است.



شکل ۱- سازه چهار طبقه جداسازی شده مجهز به میراگر MR

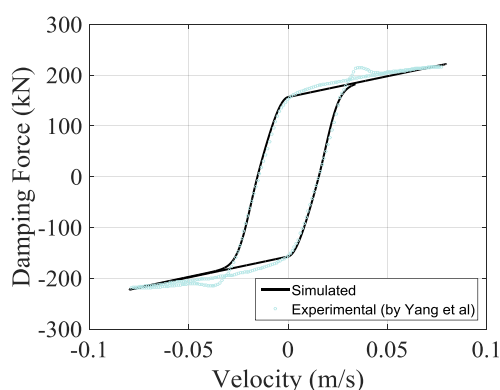
برای انجام تحلیل‌های غیرخطی تاریخچه زمانی از نرم افزار **OpenSees** [۱۳] استفاده شده است. رفتار المان‌های تیر و ستون‌ها به صورت غیرخطی در تمام طول المان با استفاده از المان غیرخطی **Nonlinearbeamcolumn** و جداسازهای

است. مقادیر بدست آمده از بهینه سازی در جدول (۳) آورده شده است. در این بهینه‌سازی اختلاف نتایج حاصل از مقادیر شبیه‌سازی و آزمایشگاهی به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است. در اینجا از نتایج آزمایش انجام شده بر روی میراگر MR که توسط Yang و همکارانش [۱۸] که تحت ولتاژهای مختلف انجام شده استفاده شده است.

جدول ۳- مقادیر بدست آمده از بهینه‌سازی برای متغیرهای رابطه

Bouc-Wen			
متغیرها	مقدار	متغیرها	مقدار
$\alpha_a$	۱۲۱۶۶۶ N/m	$k_{0a}$	۶۶۲۷ N/m
$\alpha_b$	۱۴۸۱۹۸۲ N/m/v	$k_{0b}$	۹۴۹۸ N/m/v
$c_{0a}$	۵۰۷۶۴ N.s/m	$A_m$	۷۴
$c_{0b}$	۳۸۶۷۹۱ N.s/m/v	$n$	۱/۹۶
$\beta$	۸۳ m <sup>2</sup>	$\gamma$	۲۵۴۹۳ m <sup>2</sup>
$F_0$	-۱۶۱ N	-	-

آزمایش‌های انجام شده بر روی میراگر تحت ولتاژهای  $A = 0$ ,  $A = 0.5$ ,  $A = 1$  و  $A = 2$  بوده است و شاخص هدف بهینه سازی به طور همزمان مطابق نتایج مدلسازی در هر چهار ولتاژ را در بر گرفته است.



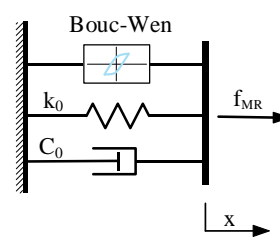
شکل ۳- مقایسه منحنی نیرو- سرعت محاسبه شده با استفاده از مدل Bouc-Wen و نتایج بدست آمده از آزمایش میراگر

به عنوان نمونه همانطور که در شکل (۳) نشان داده شده است مدل Bouc-Wen با پارامترهای بدست آمده از بهینه‌یابی، رفتار میراگر را در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی تحت ولتاژ  $A = 2$  نشان داده است. همانطور که در این شکل مشخص است نتایج بدست آمده مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشته و

جدول ۲- بیشینه جابجایی تراز جداسازی و فاصله در نظر گرفته شده برای موانع حرکتی

زلزله	جابجایی بیشینه در تراز جداسازی (mm)	حالت ۱: $\Delta g/DME = 0.8$ (mm)	حالت ۲: $\Delta g/DME = 0.6$ (mm)
Imperial_Valley	۲۱۶	۱۷۳	۱۳۰
Northridge	۳۳۲	۲۶۵	۱۹۹
Superstition_Hills	۳۰۳	۲۴۲	۱۸۲

است که از ترکیب میراگر ویسکوز، یک فنر خطی و المان Bouc-Wen تشکیل شده است. برای دستیابی به دقت قابل در شبیه سازی رفتار میراگر لازم است ضرایب معادلات رفتاری این مدل با استفاده از بهینه‌سازی جهت تطبیق نتایج آزمایشگاهی با نتایج محاسباتی بدست آید.



شکل ۲- مدل Bouc-Wen ساده برای شبیه سازی رفتار میراگر MR

معادله حاکم بر این مدل به صورت زیر خواهد بود:

$$f_{MR}(\dot{x}, z_{MR}) = c_0 \dot{x} + k_0 x + \alpha z_{MR} + f_0 \quad (1)$$

$$\dot{z}_{MR} = -\gamma z_{MR} |\dot{x}| |z_{MR}|^{n-1} - \beta \dot{x} |z_{MR}|^n + A_m \dot{x} \quad (2)$$

در این رابطه  $n$ ,  $\gamma$ ,  $\beta$  و  $A$  پارامترهای ثابت می‌باشند که با استفاده از نتایج آزمایشگاهی بدست می‌آیند.  $\dot{x}$  سرعت در محل میراگر و  $k_0$ ,  $c_0$  و  $\alpha_0$  پارامترهای وابسته به ولتاژ ورودی که به صورت رابطه (۳) و (۴) بیان شده‌اند.

$$\alpha_0 = \alpha_a - \alpha_b u \quad (3)$$

$$c_0 = c_a + c_b u \quad (4)$$

$$k_0 = k_a + k_b u \quad (5)$$

از بهینه‌سازی ژنتیک الگوریتم با هدف شبیه سازی رفتار میراگر استفاده شده است که در آن یازده ضریب ثابت رابطه Bouc-Wen به عنوان متغیرهای بهینه سازی در نظر گرفته شده

از اختلاف کم در ناحیه سرعت پایین آن چشم پوشی شده است.

#### ۴- منطق فازی

در میراگرهای MR مشخصات ماده ویسکوز بکار رفته در داخل آن به واسطه ولتاژ ورودی تغییر می‌نماید. این ولتاژ ورودی باید بر اساس نیاز سازه و بوسیله یک الگوریتم کنترلی در هر لحظه تعیین و به سیستم ارسال شود. الگوریتم‌های کنترلی متداول برای تصمیم‌گیری و کاهش پاسخ‌های سازه نیاز به مدل‌های ریاضی پیچیده و دقیق منطبق بر مشخصات سازه دارند. با توجه به اینکه در سازه‌های ساختمانی بدست آوردن مدل‌های ریاضی منطبق بر مشخصات ساختمان دارای پیچیدگی‌های بسیار بوده و همچنین این مشخصات ممکن است در هنگام زلزله دچار تغییر شوند. روش‌های فازی توسط Zadeh [۱۹] در سال ۱۹۶۵ ارائه شده است. این روش این امکان را فراهم می‌کند تا با یک ساختار محاسباتی بتواند در فضای عدم قطعیت تصمیم‌گیری صورت گیرد. بر خلاف منطق کلاسیک که رویدادهای محیطی را به صورت مطلق بیان می‌کنند، در صورت تعلق به مجموعه برابر یک و در غیر این صورت صفر، در منطق فازی مجموعه‌ها به صورت مطلق بیان نمی‌شوند و در واقع مرز مشخص برای مجموعه لحاظ نمی‌شود و به صورت نسبی می‌باشد [۲۰]. در این تحقیق از منطق فازی در سیستم نیمه‌فعال استفاده خواهد شد. بکارگیری منطق فازی به عنوان سیستم کنترلی در مطالعات بسیاری مورد توجه محققین قرار گرفته است [۲۱-۲۳]. در اینجا نیز برای تنظیم ولتاژ ورودی میراگرهای MR از الگوریتم فازی استفاده شده است. بهینه‌سازی مشخصات مربوط به این الگوریتم با استفاده از بهینه‌سازی ژنتیک الگوریتم دو هدفه با در نظرگیری شتاب و جابجایی نسبی بیشینه طبقات بدست آمده است. پس از چند بررسی اولیه، سرعت و جابجایی تراز جداسازی به عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری در الگوریتم فازی و تعیین ولتاژ ورودی سیستم استفاده شده است. در شکل (۴) حوزه‌ی عملکرد سیستم کنترلی نیمه‌فعال با الگوریتم کنترلی فازی نشان داده شده است. برای ورودی و خروجی الگوریتم فازی از ۵ تابع عضویت مثلثی با اسامی zero, positive medium, positive large and negative large و negative small که مخفف آنها به ترتیب در جدول (۴) مشخص شده، استفاده شده است.

در پروسه بهینه‌سازی مشخصات هندسی توابع عضویت، با حفظ تقارن، به عنوان متغیر در پروسه بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. قوانین حاکم در منطق فازی بر اساس دید تجربی و

با تحلیل‌های سعی و خطا تعیین شده و در پروسه بهینه‌سازی ثابت در نظر گرفته شده‌اند.

جدول ۴- قوانین منطق فازی

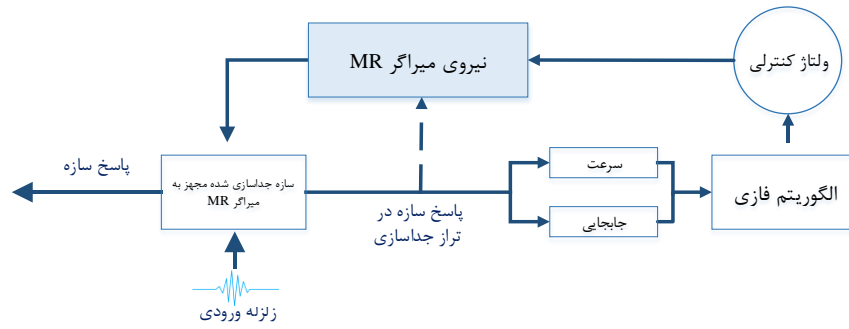
جابجایی					سرعت
PL	PM	Z	NM	NL	
S	S	M	L	VL	NL
M	M	S	L	VL	NM
L	Z	Z	Z	L	Z
VL	L	S	M	M	PM
VL	L	M	S	S	PL

#### ۵- نتایج تحلیل

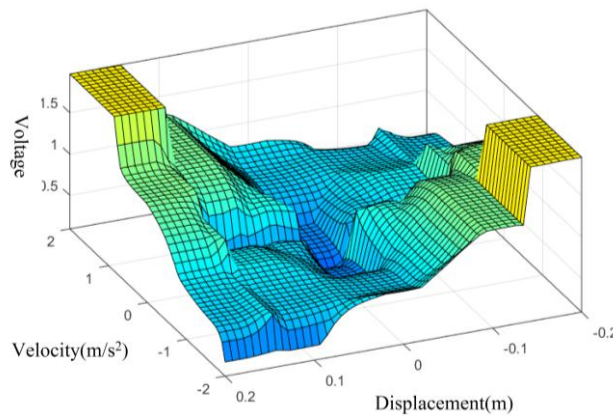
با توجه به توضیحات ارائه شده در رابطه با نحوه مدل سازی و فرضیات در نظر گرفته شده در تحقیق، در این بخش نتایج حاصل از بررسی‌های صورت گرفته پیرامون عملکرد سیستم جداساز نیمه‌فعال مجهز به میراگر MR با الگوریتم فازی بهینه شده در مقایسه با سیستم‌های غیر فعال ارائه شده است. در ابتدا سازه جداسازی شده مجهز بدون سیستم کنترلی تحلیل شده و جابجایی‌های حداکثر ایجاد شده در تراز جداسازی برای هر رکورد محاسبه شده و فواصل موانع حرکتی بر اساس آنها تعیین شده است. سپس سازه جداسازی شده به سیستم میراگر MR مجهز شده و الگوریتم فازی با در نظرگیری دو شاخص جابجایی نسبی طبقات و شتاب طبقات بهینه شده است.

در پروسه بهینه‌سازی مشخصات توابع عضویت به عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری، بنحوی تغییر کرده‌اند که در جابجایی‌های حداکثر که سازه در حال دور شدن از نقطه اولیه خود می‌باشد مقدار نیروی میراگر بیشینه و در مسیر برگشت سازه به حالت اولیه خود نیروی میراگر کاهش یابد. در شکل (۵) زیر نمونه‌ای از رویه منطق فازی بهینه شده نشان داده شده است. نیروی میراگر MR بر اساس مقدار ولتاژ ورودی و تغییراتی که در مشخصات ماده ویسکوز درون آن ایجاد می‌شود متناسب با نیاز سازه تغییر می‌نماید. در شکل (۶) نمودار تاریخیچه زمانی سرعت و جابجایی در تراز جداسازی و همچنین مقدار ولتاژ ورودی به میراگر که از fuzzy surface در هر گام زمانی بدست آمده است و نیروی میراگر MR برای زلزله Northridge نشان داده شده است. همانطور که مشخص است مقدار ولتاژ ورودی که بر اساس دو مقدار سرعت و جابجایی تراز جداسازی تغییر می‌کنند در زمان حدود ۳ ثانیه که مقدار جابجایی در جداسازها به حداکثر مقدار خود نزدیک می‌شود، به بیشترین مقدار خود رسیده است که در نتیجه مقدار نیروی

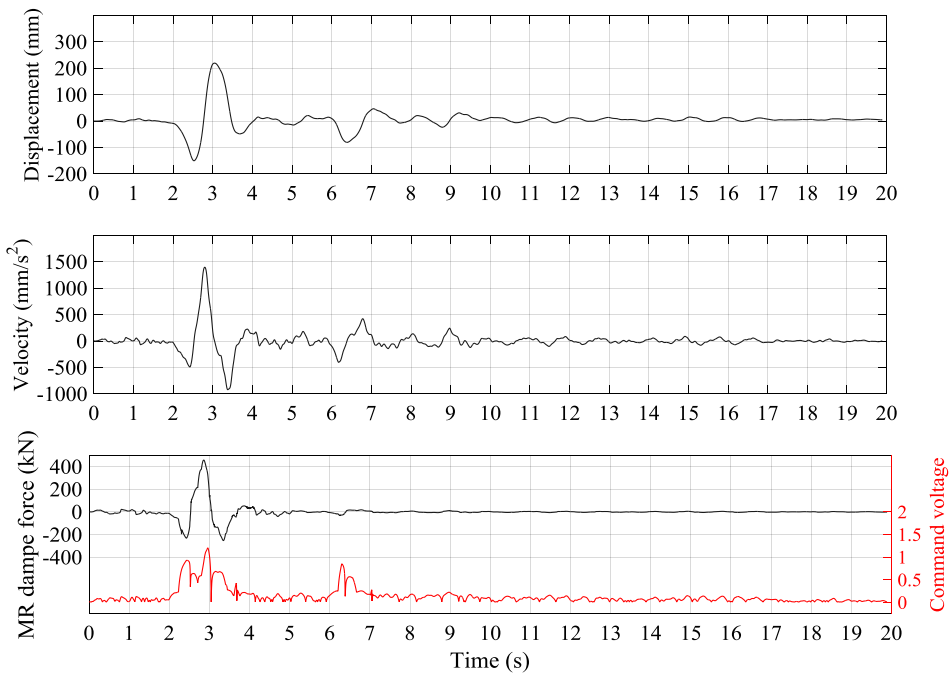
میراگر نیز به تبع آن افزایش یافته است.



شکل ۴- شکل شماتیک از نحوه عملکرد سیستم جداساز نیمه‌فعال با سیستم کنترلی



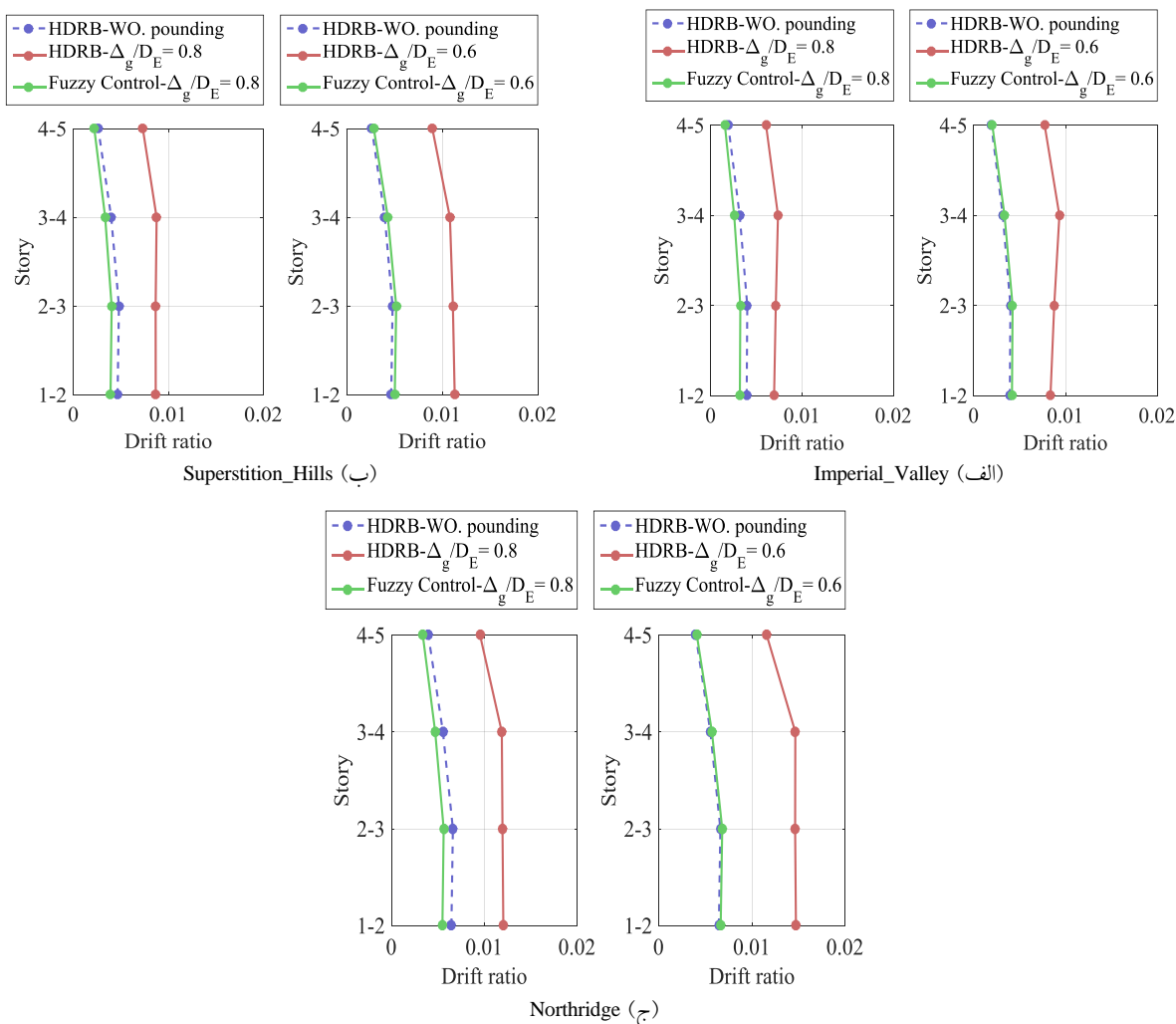
شکل ۵- رویه منطق فازی بهینه شده



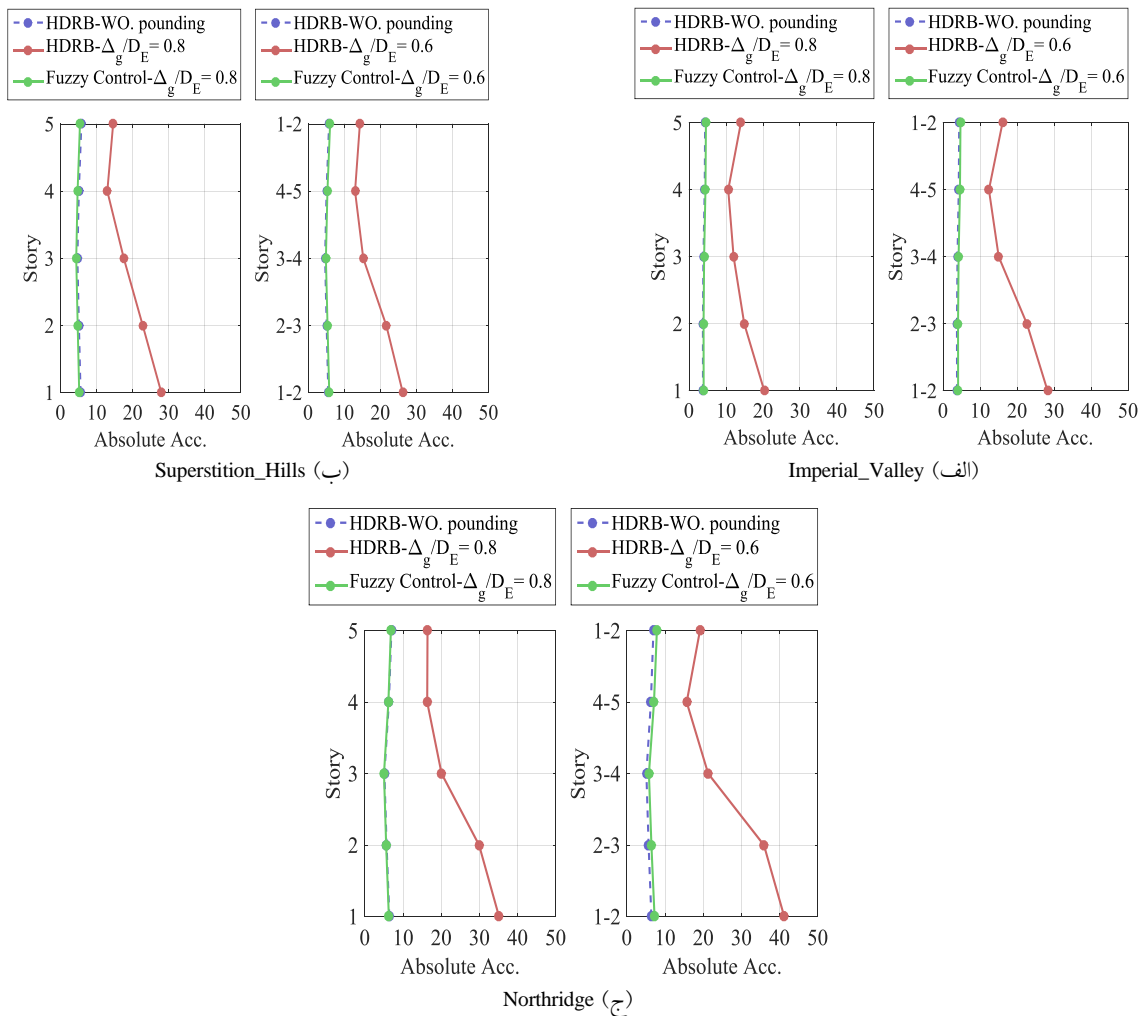
شکل ۶- نمودار تاریخچه زمانی سرعت و جابجایی در تراز جداسازی شده، ولتاژ ورودی و نیروی میراگر MR

نیمه‌فعال کاهش یافته است. به طور میانگین بیشینه شتاب و جابجایی نسبی طبقات برای فضای نسبی ۰/۸ در همه زلزله‌های به ترتیب برابر ۴/۷ و ۱/۸ نسبت به سازه بدون در نظرگیری مانع حرکتی افزایش داشته است. این مقادیر در حالت دوم با فضای نسبی ۰/۶ به ترتیب برابر ۵/۶ و ۲/۳ می‌باشد. در شکل (۹) تاریخچه زمانی مقادیر شتاب در تراز جداسازی سازه جداسازی شده در حالت با در نظرگیری مانع حرکتی در فاصله نسبی ۰/۸ و بدون آن نشان داده شده است. همانطور که مشخص است سازه جداسازی شده که با مانع حرکتی برخورد نموده است شتاب بسیار زیادی را تجربه کرده است که این امر می‌تواند باعث خسارت‌های زیادی به خصوص به تجهیزات غیر سازه‌ای شود. همچنین سیستم کنترلی نیمه‌فعال توانسته مانع از برخورد سازه جداسازی به مانع شود در عین حال شتاب بیشینه سازه را افزایش ندهد.

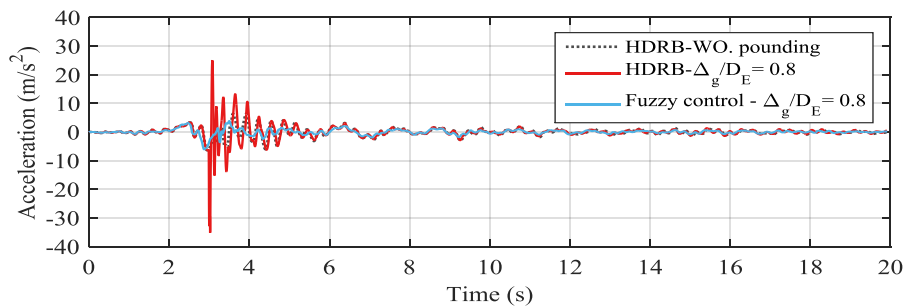
در شکل‌های (۷) و (۸) مقدار بیشینه جابجایی نسبی و شتاب طبقات در مدل‌های مختلف نشان داده شده است. در این شکل‌ها سازه جداسازی که برای آن محدودیت حرکتی در نظر گرفته نشده است با (HDRB-WO. pounding)، سازه بدون سیستم کنترلی نیمه‌فعال با محدودیت حرکتی با (HDRB- $\Delta g/DE$ ) و سازه جداسازی با سیستم کنترلی نیمه‌فعال بهینه شده با (Fuzzy control- $\Delta g/DE$ ) نمایش داده شده است. همانطور که بیان شد مقادیر بدست آمده برای دو فاصله نسبی ۰/۸ ( $\Delta g/DE = 0.8$ ) و ۰/۶ ( $\Delta g/DE = 0.6$ ) نشان داده شده است. همانطور که مشخص است پاسخ‌های لرزه‌ای در سازه‌ای که در آن برخورد رخ داده است به شدت افزایش یافته است. مقادیر پاسخ سازه در سازه بدون مانع حرکتی و در سازه‌ای که در آن سیستم کنترل نیمه‌فعال قرار گرفته شده تا از برخورد سازه جلوگیری نماید، تا حدودی به هم نزدیک می‌باشد و همچنین در برخی مواقع مقادیر آن در سازه با سیستم کنترل



شکل ۷- بیشینه جابجایی نسبی طبقات در سازه جداسازی شده با و بدون سیستم کنترلی نیمه‌فعال تحت سه زلزله



شکل ۸- بیشینه شتاب در طبقات در سازه جداسازی شده با و بدون سیستم کنترلی نیمه‌فعال تحت سه زلزله



شکل ۹- نمودار تاریخچه زمانی شتاب در تراز جداسازی شده با و بدون سیستم میراگر نیمه‌فعال در زلزله Northridge با در نظر گیری فضای نسبی ۰/۸ در اطراف سازه

تراز جداسازی از فضای باز در نظر گرفته شده در اطراف سازه شود که باعث ایجاد برخورد در سازه خواهد شد. کاهش پراکندگی پاسخ‌های لرزه‌ای، دارای اهمیت بالایی در کاهش احتمال خرابی در جداسازها و یا برخورد سازه با ساختمان‌های اطراف دارد. از این رو نمودارهای تابع چگالی احتمال توزیع

در طراحی سیستم‌های جداسازی که بطور معمول ظرفیت جابجایی جداسازها و همچنین فضای باز اطراف ساختمان جداسازی بر اساس استانداردهای طراحی بر مبنای میانگین پاسخ‌های مربوط به زلزله‌های انتخاب شده تعیین می‌شود. حال آنکه پراکندگی در پاسخ می‌تواند باعث پیشی گرفتن جابجایی

مقادیر  $u_1$  و  $u_2$  برابر مقادیر پاسخ‌ها دو راستای اصلی سازه برای بیشینه جابجایی نسبی طبقات به و همچنین جابجایی تراز جداسازی در نظر گرفته شده است.

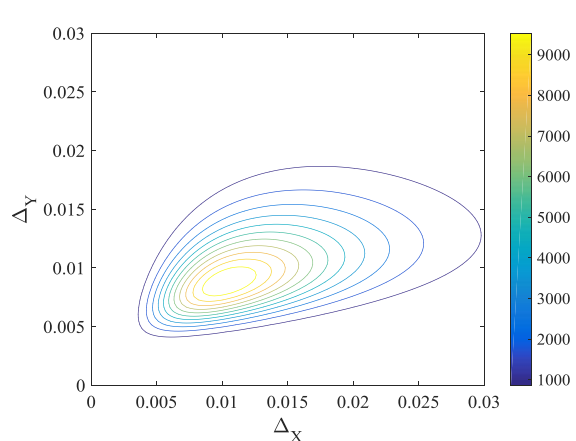
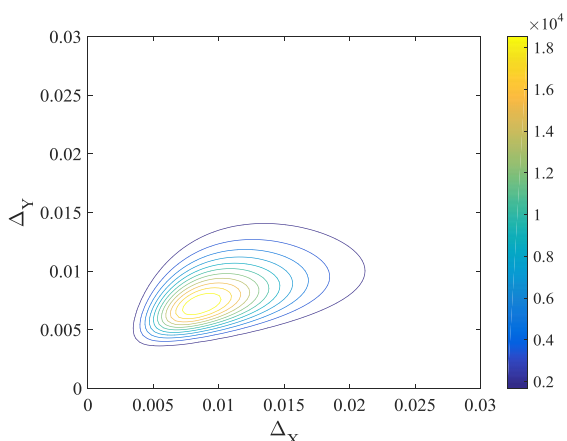
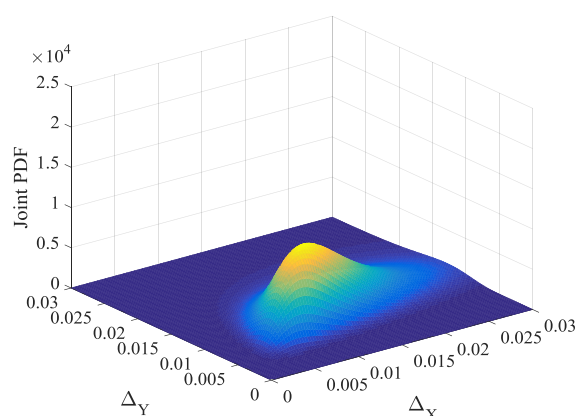
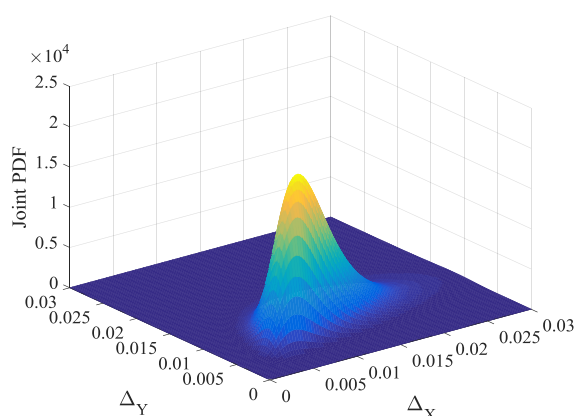
در شکل (۱۰) نمودارهای تابع چگالی احتمال توزیع لگاریتم نرمال برای بیشینه جابجایی نسبی طبقات و جابجایی تراز جداسازی برای سازه جداسازی شده بدون سیستم کنترلی که دارای محدودیت حرکتی است و سازه جداساز شده با میراگر MR و الگوریتم کنترلی فازی بهینه شده نشان داده شده است. این نمودارها با استفاده از تحلیل‌های صورت گرفته بر روی سازه و همچنین در نظرگیری یک توزیع لگنرمال برای بیشینه شتاب رکورد زلزله بدست آمده است. همانطور که از نمودارهای تابع چگالی مشخص است سیستم کنترلی نیمه‌فعال به مقدار زیادی از پراکندگی و میانگین پاسخ‌های لرزه‌ای کاسته است که این امر به طور مستقیم باعث کاهش احتمال خرابی‌ها در سازه خواهد شد.

لگاریتم نرمال پاسخ‌های لرزه‌ای می‌تواند دید خوبی در این رابطه فراهم نماید. با توجه به اینکه تحلیل‌های انجام شده در دو راستا انجام شده است، برای دو متغیر که دارای توزیع لگاریتم می‌باشند، تابع چگالی احتمال توزیع لگاریتم نرمال از رابطه‌های (۶) و (۷) بدست خواهد آمد [۲۴].

$$f(u_1, u_2) = \frac{1}{2\pi u_1 u_2 \sigma_{U_1} \sigma_{U_2} \sqrt{1 - \rho^2}} \exp\left(-\frac{P}{2}\right) \quad (6)$$

$$P = \frac{1}{1 - \rho^2} \left[ \left( \frac{\ln u_1 - \mu_{U_1}}{\sigma_{U_1}} \right)^2 - 2\rho \left( \frac{\ln u_1 - \mu_{U_1}}{\sigma_{U_1}} \right) \left( \frac{\ln u_2 - \mu_{U_2}}{\sigma_{U_2}} \right) + \left( \frac{\ln u_2 - \mu_{U_2}}{\sigma_{U_2}} \right)^2 \right] \quad (7)$$

در این معادله  $\mu_U$  و  $\sigma_U$  به ترتیب میانگین و انحراف معیار و مقدار  $U = \ln u$  و  $\rho$  برابر ضریب همبستگی می‌باشند. در اینجا



(ب) با سیستم کنترلی نیمه‌فعال بهینه شده

(الف) بدون میراگر و با در نظرگیری مانع حرکتی

شکل ۱۰- نمودار تابع چگالی احتمال توزیع لگاریتم نرمال بیشینه جابجایی نسبی طبقات سازه جداسازی شده

## ۶- نتیجه‌گیری

در سازه‌های جداسازی شده به دلایل مختلف از جمله عدم قطعیت‌ها در سازه، تغییرات آیین‌نامه‌های طراحی و یا تغییرات مشخصات لرزه‌ای منطقه این احتمال وجود دارد که فضای خالی در نظر گرفته شده در اطراف سازه برای حرکت ساختمان در هنگام زلزله کافی نباشد. از این رو لازم است در موارد مورد نیاز با استفاده از راهکاری مناسب احتمال برخورد سازه با موانع اطراف خود کاهش داده شود. به کارگیری سیستم‌های میراکننده انرژی غیرفعال برای کاهش جابجایی تراز جداسازی به جهت عدم انطباق‌پذیری با ویژگی‌های لرزه‌ای در هر زلزله می‌تواند باعث افزایش پاسخ‌های لرزه‌ای در سازه شود. به طور معمول این میراگرها برای شدیدترین زلزله‌های محتمل طراحی می‌گردند که این امر می‌تواند باعث اعمال نیروی بیش از حد نیاز سازه در زلزله‌های خفیف‌تر شود و عملکرد مورد انتظار از سازه جداسازی شده را تقلیل دهد. محدود کردن جابجایی تراز جداسازی در سازه‌های جداسازی شده برای دستیابی به طرحی بهینه و اجرایی یکی از چالش‌های طراحی سازه‌های جداسازی شده می‌باشد. این موضوع در نواحی نزدیک به گسل به دلیل تاثیر قابل توجه زلزله‌های حوزه نزدیک، به‌خصوص رکوردهایی که در آنها پالس‌های سرعت وجود دارد، حائز اهمیت خواهد بود.

از این رو هدف از این مقاله بررسی عملکرد سیستم‌های میراکننده نیمه‌فعال با الگوریتم فازی و بهینه‌سازی آن با در نظرگیری قید محدودیت حرکتی در سازه می‌باشد. برای شبیه‌سازی رفتار میراگر MR از مدل Bouc-Wen استفاده شده و پارامترهای این مدل با استفاده از بهینه‌سازی ژنتیک الگوریتم بدست آمده است. در سیستم کنترلی مشخصات منطق فازی، با استفاده از بهینه‌سازی دو هدفه، با در نظرگیری شتاب بیشینه طبقات و دررفت بیشینه طبقات، بدست آمده است. در این پژوهش نتایج نشان داده است که سیستم کنترلی نیمه‌فعال توانسته از برخورد سازه با موانع در نظر گرفته شده در هر دو فاصله نسبی  $0/8$  و  $0/6$  نسبت به بیشینه جابجایی تراز جداسازی، جلوگیری نماید. همچنین سیستم کنترلی بهینه شده توانسته پاسخ‌های لرزه‌ای سازه را نسبت به حالت بدون قید حرکتی در فاصله نسبی  $0/8$  کاهش دهد. مقادیر شتاب و دررفت در سازه جداسازی بدون میراگر MR که در هنگام زلزله دچار برخورد شده است، به ترتیب تا  $0/6$  و  $2/3$  برابر حالت بدون برخورد افزایش یافته است که این امر می‌تواند خسارت‌های زیادی را به سازه تحمیل نماید. مطابق تابع چگالی احتمال با

توزیع لگاریتم نرمال پاسخ‌های سازه، مقادیر میانگین و پراکندگی پاسخ‌ها در سازه مجهز به میراگر نیمه‌فعال در مقایسه با سازه جداسازی شده بدون میراگر کاهش یافته است که این امر بصورت مستقیم در کاهش خرابی‌های محتمل آینده سازه تاثیر خواهد گذاشت.

## ۷- مراجع

- [1] Bhagat, S., Wijeyewickrema, A.C. and Subedi, N. (2018), "Influence of near-fault ground motions with fling-step and forward-directivity characteristics on seismic response of base-isolated buildings", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 25, pp. 455-474.
- [2] Alhan, C. and Öncü-Davas, S. (2016), "Performance limits of seismically isolated buildings under near-field earthquakes", *Engineering Structures*, Vol. 116, pp. 83-94.
- [3] Kitayama, S. and Constantinou, M.C. (2018), "Collapse performance of seismically isolated buildings designed by the procedures of ASCE/SEI 7", *Engineering Structures*, Vol. 164, pp. 243-258.
- [4] Polycarpou, P.C. and Komodromos, P. (2010), "Earthquake-induced poundings of a seismically isolated building with adjacent structures", *Engineering Structures*, Vol. 32, pp. 1937-1951.
- [5] Bao, Y., Becker, T.C., Sone, T. and Hamaguchi, H. (2018), "To limit forces or displacements: Collapse study of steel frames isolated by sliding bearings with and without restraining rims", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 112, pp. 203-214.
- [6] Nagarajaiah, S. and Sun, X. (2001), "Base-isolated FCC building: impact response in Northridge earthquake", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 127, pp. 1063-1075.
- [7] Mavronicola, E.A., Polycarpou, P.C., and Komodromos, P. (2017), "Spatial seismic modeling of base-isolated buildings pounding against moat walls: effects of ground motion directionality and mass eccentricity", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 46, pp. 1161-1179.
- [8] Pant, D.R. and Wijeyewickrema, A.C. (2012), "Structural performance of a base-isolated reinforced concrete building subjected to seismic pounding", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 41, pp. 1709-1716.
- [9] Wolff, E., Ipek, C., Constantinou, M. and Tapan, M. (2015), "Effect of viscous damping devices on the response of seismically isolated structures", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 44, pp. 185-198.
- [10] Wen, Y.K. and Shinozuka, M. (1998), "Cost-Effectiveness in Active Structural Control", *Engineering Structures*, Vol. 20, pp. 216-221.
- [11] ANSI, A., 360-16, (2016), Specification for structural steel buildings.
- [12] American Society of Civil, E., (2017), Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures: ASCE/SEI 7-16.
- [13] McKenna, F. Fenves, G. and Scott, M. (2006), Computer program OpenSees: open system for earthquake engineering simulation.



- [14] Kikuchi, M., Aiken, I.D. and Kasalanati, A. (2012), "Simulation analysis for the ultimate behavior of full-scale lead-rubber seismic isolation bearings", In 15<sup>th</sup> world conference on earthquake engineering, Vol. 24, pp. 1-10.
- [15] MATLAB and statistics toolbox release, (2015b), The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States.
- [16] FEMA, P., (2012), 58. Next-generation methodology for seismic performance assessment of buildings, Applied Technology Council for the Federal Emergency Management Agency, Vol. 2.
- [17] Ismail, M., Ikhouane, F. and Rodellar, J. (2009), "The hysteresis bouc-wen model, a survey", Archives of Computational Methods in Engineering, Vol. 16, pp. 161-188.
- [18] Yang, M.-G., Chen, Z.-Q. and Hua, X.-G. (2011), "An experimental study on using MR damper to mitigate longitudinal seismic response of a suspension bridge", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 31, pp. 1171-1181.
- [19] Zadeh, L.A., (1965), "Fuzzy sets", Information and control, Vol. 8, pp. 338-353.
- [20] Garzón-Roca, J., Marco, C.O. and Adam, J.M. (2013), "Compressive strength of masonry made of clay bricks and cement mortar: Estimation based on Neural Networks and Fuzzy Logic", Engineering Structures, Vol. 48, pp. 21-27.
- [21] Choi, K.M., Cho, S.W., Jung, H.J. and Lee, I.W. (2004), "Semi-active fuzzy control for seismic response reduction using magnetorheological dampers", Earthquake engineering & structural dynamics, Vol. 33, pp. 723-736.
- [22] Wang, A.P. and Lee, C.D. (2002), "Fuzzy sliding mode control for a building structure based on genetic algorithms", Earthquake engineering & structural dynamics, Vol. 31, pp. 881-895.
- [23] Yan, X., Xu, Z.-D. and Shi, Q.-X. (2020), "Fuzzy neural network control algorithm for asymmetric building structure with active tuned mass damper", Journal of Vibration and Control, Vol. 26, pp. 2037-2049.
- [24] Klein, L. (1957), "The Lognormal Distribution", JSTOR.