



## طراحی کنترلر فازی بهینه به منظور کنترل نیمه فعال ارتعاشات ساختمان چند طبقه با استفاده از یک مدل پارامتر گسترده و میراگرهای مگنتوریولوژیکال

نجمه علی اکبری<sup>۱</sup>، حمید معین فرد<sup>۲</sup> و\*

دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۲ خرداد ۱۳۹۶  
بازنگری: ۳ مرداد ۱۳۹۶  
پذیرش: ۱۵ شهریور ۱۳۹۶  
ارائه آنلاین: ۱۰ مهر ۱۳۹۶

### کلمات کلیدی:

کنترل ارتعاشات نیمه فعال  
ساختمان چند طبقه  
میراگرهای مگنتوریولوژیکال  
سیستم پارامتر گسترده  
کنترلر فازی

**چکیده:** هدف اصلی مقاله، ارائه کنترلر فازی بهینه به منظور کنترل ارتعاشات یک ساختمان پنج طبقه به کمک میراگرهای مگنتوریولوژیکال در اثر تحریک ناشی از زلزله است. بدین منظور معادلات حرکت ساختمان با استفاده از مدل با پارامتر گسترده استخراج شده است. در ادامه، بعد از به دست آوردن شکل مودهای ساختمان با روش المان محدود، برای هر طبقه از ساختمان یک میراگر مگنتوریولوژیکال در نظر گرفته می شود. به منظور دستیابی به قوانین کنترلر فازی، یک سیستم ساده یک درجه آزادی مورد بررسی قرار گرفته است و قوانین به دست آمده از شبیه سازی حلقه باز، به منظور استفاده در کنترل ارتعاشات ساختمان تعمیم می یابد. همچنین از مدل پیشنهاد شده ی اسپنسر برای تحلیل رفتار میراگر مگنتوریولوژیکال بهره گرفته شده است. بر اساس درک به دست آمده از عملکرد میراگر و همچنین با استفاده از قوانین فازی به دست آمده از شبیه سازی سیستم یک درجه آزادی، کنترلر فازی در جهت کاهش دامنه ارتعاشات ساختمان در برابر زلزله طراحی گردیده است. در انتها نیز از الگوریتم ژنتیک به منظور بهبود شاخص های عملکرد کنترلر استفاده شده است. مقایسه نتایج به دست آمده از کنترل نیمه فعال با کنترل های غیرفعال بدون ولتاژ و غیرفعال با ولتاژ، نشان می دهد که کنترلر فازی بهینه به خوبی دامنه ارتعاشات طبقات ساختمان را کاهش می دهد.

### ۱- مقدمه

در چند دهه اخیر، در بحث مهندسی عمران، الگوریتم و دستگاه های کنترلی متنوعی با هدف حفاظت ساختمان ها در برابر بلاهای مخرب زبست محیطی از جمله زلزله و باد ارائه شده است. وابسته به روش کنترلی، کنترل ارتعاشات به سه دسته ی کنترل غیرفعال<sup>۱</sup>، کنترل فعال<sup>۲</sup> و کنترل نیمه فعال<sup>۳</sup> تقسیم بندی می شوند.

کنترلرهای غیرفعال انرژی ارتعاشاتی را در سیستم ساختمان ها خارج می کنند. عملکرد مطلوب این کنترلرها در شرایط متفاوت نیرویی تضمین شده نیست و در نتیجه کاربرد آن ها محدود است. سیستم های کنترلی فعال نیز پاسخ سیستم را وابسته به مقدار نیروی اعمالی کاهش می دهد. این نیروی اعمالی به کمک دستگاه های کنترل فعال متصل به ساختمان تولید می شود. در نتیجه کنترلرهای فعال انعطاف پذیری قابل قبولی برای کاهش پاسخ سیستم در شرایط بارگذاری متفاوت دارند. آرون سوات وانگ [۱] هدف کنترلی خود را عدم جابه جایی زیاد طبقات ساختمان قرار داد. او برای کنترل یک ساختمان شش طبقه، از یک کنترل بازگشتی استفاده کرد. لی و همکاران [۲]

بر پایه روش کنترلی شبکه عصبی<sup>۴</sup>، یک کنترلر مود لغزشی<sup>۵</sup> به منظور کاهش ارتعاشات ساختمان های مرتعش ارائه دادند. آن ها به منظور اثبات تأثیر گذاری روش کنترلی ارائه شده در برابر تحریک های متفاوت، از داده های ثبت شده دو زلزله ی کوبه<sup>۶</sup> و السنترو<sup>۷</sup> بهره گرفتند.

کنترلرهای نیمه فعال اخیراً توجه محققان زیادی را به خود جلب کرده اند. نیروی دستگاه های نیمه فعال مغناطیسی با تغییر اندازه میدان مغناطیسی تغییر می کند و همین امر کاربرد این گونه سیستم ها را افزایش داده است. میراگرهای مگنتوریولوژیکال<sup>۸</sup> یکی از انواع میراگرهای نیمه فعال می باشند. از کاربردهای سیال مگنتوریولوژیکال می توان به استفاده از آن در دسته موتورهای هیدرولیکی اشاره کرد. یکی از معایب دسته موتورهای هیدرولیکی، ایده آل نبودن سفتی دینامیکی آن ها می باشد. تیکنی و همکاران [۳] با تغییر در پارامترهای سیستم نظیر سفتی و استهلاک به کمک سیال مگنتوریولوژیکال، ارتعاشات انتقالی موتور به بدنه خودرو را کاهش دادند. حجت و همکاران [۴] مدل جدیدی برای پاسخ سیال مگنتوریولوژیکال به ورودی جریان در حال گذار ارائه دادند. آن ها برای صحت سنجی مدل ارائه شده

4 Neural network  
5 Sliding mode control  
6 Kobe  
7 El Centro  
8 Magneto-Rheological (MR) damper

1 Passive  
2 Active  
3 Semi-active

نویسنده عهده دار مکاتبات: h\_moeenfarid@um.ac.ir

میراگرهای مگنتوریولوژیکال، محققان بیشتر به مدل بوک-ون<sup>۳</sup> و اسپنسر<sup>۴</sup> توجه نموده‌اند. اما بین این دو مدل، مدل اسپنسر کمتر مورد بررسی محققان قرار گرفته است. یان و ژو [۱۴] یک کنترلر فازی برای کنترل نیمه‌فعال میراگر مگنتوریولوژیکال طراحی کردند. آن‌ها از الگوریتم ژنتیک به منظور دستیابی به قوانین فازی بهره بردند. کیم [۱۵] از الگوریتم ژنتیک چند هدفی به منظور به دست آوردن قوانین و توابع عضویت بهینه استفاده کرده و یک کنترلر فازی چند ورودی-چند خروجی ارائه داد. بیطرف و همکاران [۱۶] علاوه بر ارائه یک روش کنترلی تطبیقی ساده برای کنترل پاسخ ساختمان‌های بلند با رفتاری غیرخطی، از دو میراگر و دو روش کنترلی برای حفاظت ساختمان در برابر زلزله استفاده کردند. یک روش آن‌ها، روش کنترلی تطبیقی ساده و روش دوم، استفاده از کنترل فازی بهینه شده بود. در کنترلر دوم، قوانین فازی از طریق الگوریتم ژنتیک به دست می‌آمد. آن‌ها اثربخشی کنترلر را با مقایسه نتایج کارشان با خروجی چند کنترلر دیگر بررسی کردند. نتایج نشان می‌داد که به کمک این روش به راحتی می‌توان جابه‌جایی و شتاب طبقات ساختمان را کنترل کرد. به منظور بهینه‌سازی سیستم کنترل نیمه‌فعال، گو و اوایدیجی [۱۷] میراگرهای مگنتوریولوژیکال را با کنترل نیرو فازی ترکیب کردند. آن‌ها برای اثبات تأثیرگذاری کنترلر، عملکرد آن را با سیستم غیرفعال مقایسه نمودند. در مقاله‌ای دیگر، کرم‌الدین و کاظمی [۱۸] از الگوریتم کنترلی شبکه عصبی و LQG به منظور کاهش ارتعاشات ساختمان سه طبقه غیرخطی تحریک شده توسط زلزله‌های ثبت شده ال‌سترو، هاچینوهه<sup>۵</sup>، نورتریج<sup>۶</sup> و کوبه استفاده کردند. نیروی مورد نیاز میراگر (با استفاده از مدل ارائه شده توسط بوک-ون) را کنترلر LQG تخمین زده و ولتاژ متناسب با این نیرو توسط الگوریتم کنترلی شبکه عصبی محاسبه می‌شود. عملکرد سیستم کنترلی نیمه‌فعال نیز با سیستم کنترلی غیرفعال و فعال تحت شرایط یکسان مقایسه شد. یانسن و دایک [۱۹] نتایج عملکرد چند الگوریتم کنترلی نیمه‌فعال به منظور کنترل ارتعاشات ساختمان مدل شش طبقه که میراگرهای مگنتوریولوژیکال به همراه شبیه‌سازی مدل بوک-ون در دو طبقه اول و دوم قرار دارند، را ارائه دادند. الگوریتم‌های کنترلی استفاده شده در این مقاله کنترلر با پایداری لیاپانوف<sup>۷</sup>، کنترلر غیرمتمرکز<sup>۸</sup> و الگوریتم اصطکاک همگن مدولار<sup>۹</sup> می‌باشند.

همان‌طور که گفته شد در مقالات کمی از مدل اسپنسر برای شبیه‌سازی رفتار میراگرهای مگنتوریولوژیکال استفاده شده است. به عنوان نمونه، اوز و همکاران [۲۰] از کنترلر فازی (همراه با مدل اسپنسر) برای کنترل ساختمان استفاده و نتایج کار خود را با کنترلرهای LQR و H<sub>2</sub>/LQR و هم‌چنین نتایج سیستم کنترل نشده مقایسه کردند. چوی و همکاران [۲۱]

و نیز بررسی بیشتر خواص سیال، یک کوپلینگ آزمایشگاهی طراحی کردند. عسگری و همکارانش [۵] به بررسی ارتعاشات آزاد ورق ساندویچی مربعی ساخته شده از مواد مرکب با هسته مگنتوریولوژیکال و یک لایه مقیدکننده پرداختند. یوشیدا و دایک [۶] هدف کنترلی خود را کاهش ارتعاشات ساختمان بیست طبقه غیرخطی مرتعش با زلزله قرار دادند. آن‌ها ورودی کنترلر را از طریق یک الگوریتم بهینه تعیین کرده و عملکرد سیستم نیمه‌فعال را با عملکرد سیستم فعال مقایسه کردند. بیطرف و هرابوس [۷] از یک روش کنترلی تطبیقی ساده برای کنترل پاسخ ساختمان‌های بلند با رفتار غیرخطی و مجهز به میراگرهای مگنتوریولوژیکال استفاده نموده و عملکرد آن را با چند روش کنترلی دیگر مقایسه کردند. چا و آگراوال [۸] به منظور بهبود عملکرد سازه‌های تحت تحریک زلزله، از یک الگوریتم کنترلی نیمه‌فعال به کمک میراگرهای مگنتوریولوژیکال بهره بردند.

کنترلرهای فازی در بین کنترلرهای مختلف، جزو بهترین و مؤثرترین کنترلرها شناخته شده‌اند. این کنترلرها قوانین ساده اگر-آن‌گاه را جایگزین عبارت‌های پیچیده ریاضی می‌کنند تا بتوانند رابطه بین ورودی‌ها و خروجی‌های کنترلر را راحت‌تر و منطبق بر حس یک فرد متخصص توصیف کنند. مزیت عمده سیستم‌های کنترلی فازی، توانایی کنترل سیستم‌های پیچیده و حساسیت پایین نسبت به داده‌های ورودی نامشخص (از جمله تحریکات باد و زلزله) است. هم‌چنین توانایی آن‌ها در کنترل سیستم‌هایی با رفتاری غیرخطی، باعث شده است که محققین در سال‌های اخیر توجه خاصی به آن داشته باشند. نگوین و همکاران [۹] یک الگوریتم نروفازی<sup>۱</sup> جدید به منظور کنترل ارتعاشات ساختمان ارائه دادند. آن‌ها با بررسی نتایج آزمایشگاهی تأثیر الگوریتم ارائه‌شده را مورد مطالعه قرار داده و از سیال الکتروریولوژیکال<sup>۲</sup> به‌عنوان سیال مورد استفاده در میراگر استفاده کردند. عسگری و همکاران [۱۰] به بررسی رفتار ساختمان بیست طبقه در برابر تحریک زلزله پرداختند. آن‌ها با کنترلر LQG نیروی میراگر مگنتوریولوژیکال را تخمین زدند. ولتاژ ورودی مورد نیاز برای ایجاد چنین نیرویی توسط کنترلر فازی به دست می‌آمد. در نهایت نیز کنترلر ارائه‌شده با یک کنترلر فعال مقایسه شد. ژو و همکاران [۱۱] یک روش کنترلی فازی تطبیقی جدید به منظور حفاظت ساختمان در برابر سوانح طبیعی ارائه دادند. هدف آن‌ها کنترل بهینه‌ی پاسخ سیستم تطبیقی، تلفیق شده با میراگر مگنتوریولوژیکال بود. بطحایی و همکاران [۱۲] یک جرم-میراگر تنظیم‌کننده و یک میراگر مگنتوریولوژیکال به طبقه آخر ساختمان مدل خود متصل و به بررسی عملکرد کنترلرهای فازی نوع اول و دوم در ساختمان ۱۱ طبقه تحت تحریکات متفاوت زلزله پرداختند. لین و چن [۱۳] به شبیه‌سازی یک ساختمان سه طبقه تحت تحریک زلزله به همراه یک و دو میراگر مگنتوریولوژیکال پرداختند. آن‌ها به منظور کاهش پاسخ ارتعاشاتی ساختمان از یک کنترلر فازی بهینه استفاده کردند.

درمیان انواع مدل‌های ارائه‌شده برای شبیه‌سازی رفتار هیستریزس

3 Bouc-Wen

4 Spencer

5 Hachinohe

6 Northridge

7 Lyapunov

8 Decentralized bang-bang controller

9 Modulated homogeneous friction algorithm

1 Neuro fuzzy controller

2 Electro-Rheological (ER) damper

از دینامیک سیستم ارائه شده است. هم‌چنین شکل‌مود و فرکانس‌های طبیعی سیستم با استفاده از نرم‌افزار المان محدود به‌دست آمده‌است. در انتها با ارائه سیستم کنترل فازی برای سیستم یک درجه آزادی، یک کنترلر مناسب به منظور کاهش ارتعاشات ساختمان، ناشی از تحریک زلزله طراحی شده است.

## ۲- مدل‌سازی ریاضی

یک ساختمان پنج طبقه مطابق شکل ۱ در نظر گرفته می‌شود. در این مدل هر طبقه به صورت جرم خطی و دیوارهای هر طبقه از ساختمان به صورت دو تیر مدل شده‌اند. میرایی سازه نیز با چند میراگر متمرکز که در برابر جابه‌جایی نسبی طبقات نسبت به هم مقاومت می‌کند، شبیه‌سازی شده است. هم‌چنین به منظور اعمال دستگاه کنترلی نیمه‌فعال، در هر طبقه یک میراگر مگنتوریولوژیکال در نظر گرفته شده است که هم‌راستا با میرایی سازه عمل می‌کند. برای استخراج معادله حرکت ساختمان در حوزه زمان از معادله لاگرانژ به همراه یک تقریب تک مودی استفاده خواهد شد. بدین منظور باید انرژی‌های پتانسیل، جنبشی و نیروی ویسکوز و هم‌چنین کار مجازی نیروهای خارجی ناپایستار سیستم محاسبه شود.

تیرهای با ضخامت یکنواخت و هندسه‌ای بلند و باریک، با استفاده از تئوری تیر اوپلر-برنولی مدل می‌شوند. در این تئوری از چرخش سطح مقطع تیر در مقابل انتقال آن صرف‌نظر می‌شود. هم‌چنین اعوجاج برشی در مقایسه با تغییر شکل خمشی قابل صرف‌نظر کردن است [۲۹]. از این تئوری به خوبی در مطالعه رفتار استاتیکی، دینامیکی و ارتعاشاتی سازه‌های شامل تیر استفاده شده است [۳۰-۳۲]. انرژی پتانسیل سیستم از دو بخش انرژی کرنشی ذخیره شده در تیرها و انرژی نیروی محوری وارد بر آن‌ها [۲۹] تشکیل می‌شود.

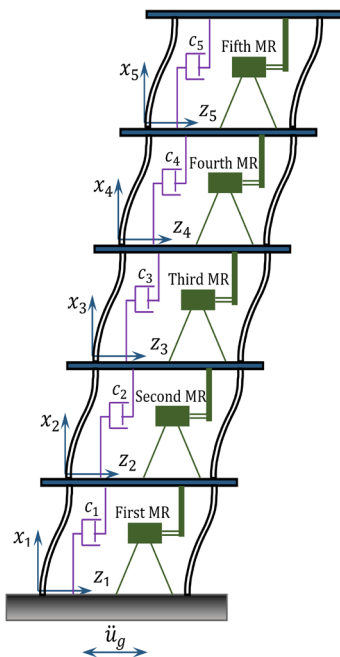


Fig. 1. Schematic view of a five floor building  
شکل ۱: شماتیک یک ساختمان پنج طبقه.

یک روش کنترلی فازی برای کاهش پاسخ ساختمان سه طبقه با میراگر مگنتوریولوژیکال که از مدل اسپنسر برای تحلیل آن استفاده می‌شود، ارائه دادند. آن‌ها برای مقایسه روش خود از یک کنترلر بهینه و هم‌چنین کنترلر غیرفعال-خاموش و روشن بهره گرفتند. چای و بای [۲۲] با استفاده از روش کنترلی بهینه به‌همراه میراگرهای مگنتوریولوژیکال به کاهش ارتعاشات ساختمان ۹ طبقه پرداختند. آن‌ها از مدل اسپنسر برای بررسی رفتار نیرویی میراگر مگنتوریولوژیکال بهره بردند. در میان انواع مدل‌های کنترلر فازی، کیم و همکاران [۲۳] از مدل تاکاگی-سوگنو فازی<sup>۱</sup> برای کنترل ارتعاشات ساختمان سه طبقه با استفاده از مدل اسپنسر در کنار میراگر مگنتوریولوژیکال استفاده کردند. چندیرمانی [۲۴] به کنترل ارتعاشات ساختمان نه طبقه و ساختمان‌های متصل به‌هم به همراه میراگرهای مگنتوریولوژیکال (همراه با مدل اسپنسر) پرداخت.

مقالاتی که تاکنون به بررسی آن پرداخته شد، ارتعاشات یک ساختمان مستقل را به کمک میراگرها کنترل می‌کردند. گاهی محققان با اتصال دو ساختمان به وسیله میراگرهای مگنتوریولوژیکال ارتعاشات دو ساختمان را هم‌زمان کاهش می‌دهند. آز و شرفی [۲۵] به بررسی کارایی میراگرهای مگنتوریولوژیکال در ساختمان‌های متصل تحت تحریک زلزله پرداختند. آن‌ها از کنترلرهای LQG و LQR برای به‌دست آوردن نیروی کنترلی مورد نیاز استفاده کردند. آن‌ها هدف کنترلی خود را کاهش حداکثر جابه‌جایی و شتاب پاسخ سیستم قرار دادند. دومنه و همکاران [۲۶] دو کنترلر هیبریدی به منظور کاهش ارتعاشات ساختمان‌های متصل به‌کمک میراگرهای مگنتوریولوژیکال طراحی و به بررسی عملکرد کنترلرهای هیبریدی در مقایسه با میراگرهای مگنتوریولوژیکال پرداختند. چندیرمانی و موترا [۲۷] یک کنترلر LQR به‌منظور کاهش ارتعاشات دو ساختمان یک طبقه که به وسیله میراگر مگنتوریولوژیکال به‌هم متصل شدند، ارائه نمودند. آن‌ها برای بیان رفتار هیستریزس نیرو-جابه‌جایی میراگر، از مدل اسپنسر استفاده کردند. میروویچ [۲۸]، مسائل مختلفی با استفاده از هر دو روش مدل پارامتر گسترده و پارامتر متمرکز حل شده‌اند. نتیجه‌ی حاصله این بوده است که نتایج حل گسترده بسیار دقیق‌تر و قابل قبول‌تر از نتایج حل سیستم با پارامترهای متمرکز است. از طرفی همان‌گونه که در این بخش به آن اشاره شد، تا جایی که نویسندگان این مقاله اطلاع دارند، همه محققان، ساختمان را به‌صورت یک سیستم ساده متشکل از جرم، فنر و میراگر شبیه‌سازی کرده‌اند. این درحالی است که ساختمان چند طبقه در عمل، یک سیستم چند جسمی است که جرم و سفتی آن به صورت گسترده در طول ساختمان توزیع شده است و نمی‌توان آن را صرفاً در چند نقطه خاص متمرکز کرد.

به همین دلیل برای رفع چنین مشکلی در این مقاله از یک مدل با پارامتر گسترده استفاده شده است. در این مدل‌سازی، طبقات به‌صورت جرم متمرکز و دیوارهای ساختمان به‌صورت تیرهایی با جرم و سفتی غیرمتمرکز مدل شده‌اند که به طبقات متصل است. با استفاده از این مدل، پیش‌بینی دقیق‌تری

**جدول ۱: ویژگی‌های هندسی و فیزیکی تیرهای ساختمان**  
**Table 1. Physical and geometrical properties of the constitutive beams**

واحد	مقدار	پارامتر	توصیف پارامتر
kg / m <sup>3</sup>	۷۸۶۰	$\rho$	چگالی حجمی تیر
m <sup>2</sup>	۸۱۳۰×۱۰ <sup>-۶</sup>	$A$	مساحت سطح مقطع تیر
m <sup>4</sup>	۱۸۶/۱×۱۰ <sup>-۶</sup>	$I$	ممان اینرسی دوم سطح تیر حول تار خنثی
GPa	۲۰۰	$E$	مدول الاستیسیته یانگ
m	۳	$l$	طول تیر

برای به‌دست آوردن شکل مود اول ساختمان پنج طبقه و فرکانس طبیعی آن، از شبیه‌سازی المان محدود (در نرم‌افزار تجاری المان محدود آباکس) استفاده شده است. ویژگی‌های هندسی و فیزیکی تیرهای این ساختمان در جدول ۱ و خصوصیات فیزیکی طبقات در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین پروفایل سطح مقطع تیر ۶۴×۳۸ S فرض شده است.

**جدول ۲: خصوصیات فیزیکی طبقات [۱]**  
**Table 2. Physical properties of the floors [1]**

$c_i$ (N.s/m)×10 <sup>-3</sup>	$m_i$ (kg)×10 <sup>-3</sup>	
۶۷	۶/۴۱۷	۱
۵۸	۵/۵۱۴	۲
۵۷	۵/۵۱۴	۳
۵۰	۵/۵۱۴	۴
۳۸	۵/۵۱۴	۵

برای تحلیل مدل‌سازی سیستم ساختمان با مدل گسترده، از مدل با پارامتر متمرکز به‌کار گرفته شده (لطفاً به فصل ششم مرجع [۳۳] مراجعه شود) و نتایج دو مدل المان محدود و متمرکز مقایسه شده‌اند. در جدول ۳ سه فرکانس طبیعی اول سیستم ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که نتایج شبیه‌سازی المان محدود با نتایج تحلیلی مدل متمرکز شباهت دارد.

شکل مود اول ساختمان پنج طبقه با در نظر گرفتن ویژگی‌های درج شده در جدول‌های ۱ و ۲ در شکل ۲ ترسیم شده است. برای این که شکل مودها قابل مقایسه باشند، همگی به‌گونه‌ای بی‌بعد شده‌اند که قدرمطلق جابه‌جایی بی‌بعد بالاترین طبقه، یک باشد. شکل مودهایی که از مدل متمرکز به‌دست

**جدول ۳: فرکانس‌های طبیعی ساختمان، مقایسه نتایج مدل متمرکز و المان محدود**

**Table 3. Natural frequencies of building, comparison of lumped parameter and finite element model**

خطا %	مدل گسسته	مدل المان محدود	
۲۱/۶۸۶۹	۲/۴۷۵۴	۳/۱۶۰۹	فرکانس اول
۲۲/۴۹۹۹	۷/۱۱۶۵	۹/۲۴۱۹	فرکانس دوم
۲۴/۰۵۶۷	۱۱/۰۹۳۸	۱۴/۶۰۸	فرکانس سوم

$$\hat{\pi} = \sum_{i=1}^5 \int_0^{l_i} \left( E_i I_i + \frac{1}{2} \sum_{j=i}^5 m_j g \right) \left( \frac{\partial^2 \hat{w}_i(\hat{x}_i, \hat{t})}{\partial \hat{x}_i^2} \right)^2 d\hat{x}_i \quad (1)$$

در معادله (۱)، انرژی کرنشی سیستم و  $m_j$ ،  $I_i$ ،  $E_i$ ،  $l_i$  و  $\hat{\pi}$  به ترتیب طول، مدول الاستیسیته یانگ، ممان اینرسی دوم سطح تیر حول تار خنثی، جرم طبقه  $j$ ام و جابه‌جایی نسبی تیر مطابق آن‌چه در شکل ۱ مشاهده می‌شود، می‌باشند.

با در نظر گرفتن حرکت زمین، انرژی جنبشی سیستم ترکیبی از حرکت جنبشی طبقات و تیرها بوده و به شکل زیر بیان می‌شود.

$$\hat{T} = \int_0^{l_i} \rho_i A_i \left( \frac{\partial \hat{w}_i(\hat{x}_i, \hat{t})}{\partial \hat{t}} + \frac{d\hat{u}_g(\hat{t})}{d\hat{t}} \right)^2 d\hat{x}_i + \sum_{i=1}^5 \frac{1}{2} m_i \left( \frac{d\hat{u}_g(\hat{t})}{d\hat{t}} + \sum_{j=1}^i \frac{d\hat{w}_j(l_j, \hat{t})}{d\hat{t}} \right)^2 \quad (2)$$

$$\sum_{i=2}^5 \int_0^{l_i} \rho_i A_i \left( \frac{\partial \hat{w}_i(\hat{x}_i, \hat{t})}{\partial \hat{t}} + \sum_{j=1}^{i-1} \frac{d\hat{w}_j(l_j, \hat{t})}{d\hat{t}} + \frac{d\hat{u}_g(\hat{t})}{d\hat{t}} \right)^2 d\hat{x}_i$$

در معادله (۲)،  $A_i$  و  $\rho_i$  به ترتیب چگالی حجمی و مساحت سطح مقطع  $i$ امین تیر هستند. همچنین  $\hat{u}_g(\hat{t})$  جابه‌جایی زمین است. انرژی که توسط نیروهای میراگرهای متمرکز تولید می‌شود، نیز از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$D = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^5 c_i \hat{w}_i^2(l_i, \hat{t}) \quad (3)$$

که  $c_i$ ها ضرایب میراگرهای نشان داده شده در شکل ۱ هستند. کار مجازی میراگرهای مگنتوریولوژیکال انجام شده در این سیستم به‌صورت ذیل قابل بیان است.

$$\delta \hat{W}_{Ext} = \sum_{i=1}^5 \left\{ F_{d_i} \times \delta \hat{w}_i(l_i, \hat{t}) \right\} \quad (4)$$

$F_{d_i}$ ها نیروی میراگرهای مگنتوریولوژیکال مطابق شکل ۱ می‌باشند. یک روش مرسوم در مدل‌سازی ارتعاشات سیستم‌های پیوسته خطی و غیرخطی این است که فرض شود پاسخ ارتعاشات به صورت ترکیب خطی از شکل مودهای سیستم با ضرایب وابسته به زمان نوشته شود. از طرفی در اکثر سیستم‌های دینامیکی شکل مود اول سیستم، شکل مود غالب است و می‌تواند پاسخ دینامیکی سیستم را با دقت خوبی تقریب بزند. با استفاده از تقریب تک مودی، خیز تیرها به‌شکل زیر بیان می‌شوند.

$$w_i(\hat{x}_i, \hat{t}) = \varphi_i(\hat{x}_i) \hat{q}_i(\hat{t}), i = 1, 2, \dots, 5 \quad (5)$$

در معادله (۵)،  $\varphi_i$  خیز  $i$ امین تیر است زمانی که سیستم در مود اول ارتعاش می‌کند. همچنین  $\hat{q}_i(\hat{t})$  تابع نامشخصی است که در حین تحلیل دینامیکی مشخص می‌شود.

$$M_2 = \sum_{i=1}^5 \left( m_i \sum_{j=1}^i \varphi_j(l_j) \right) + \int_0^{l_i} 2\rho_1 A_1 \varphi_1(\hat{x}_1) d\hat{x}_1$$

$$+ \sum_{i=2}^5 \int_0^{l_i} 2\rho_i A_i \left( \varphi_i(\hat{x}_i) + \sum_{j=1}^{i-1} \varphi_j(l_j) \right) d\hat{x}_i \quad (10)$$

$$M_3 = \sum_{i=1}^5 (2\rho_i A_i l_i + m_i) \quad (11)$$

معادله (۳) نیز با جایگذاری معادله (۵) به صورت ذیل به دست می‌آید.

$$D = \frac{1}{2} D_1 \hat{q}^2(\hat{t}) \quad (13)$$

که

$$D_1 = \sum_{i=1}^5 c_i \varphi_i(l_i)^2 \quad (14)$$

در نهایت، عبارت کار مجازی، معادله (۴)، برحسب شکل مود اول به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\delta \widehat{W}_{Ext} = Q \delta \hat{q}(\hat{t}) \quad (15)$$

در معادله (۱۵)  $Q$  به صورت زیر بیان می‌شوند.

$$Q = \sum_{i=1}^5 F_{d_i} \varphi_i(l_i) \quad (16)$$

برای راحتی استفاده از معادله‌ها، بی‌بعدسازی زیر بر روی سیستم اعمال می‌شود.

$$q = \frac{\hat{q}}{l_1}, u_g = \frac{\hat{u}_g}{d}, t = \frac{\omega_n}{\tau} \hat{t} \quad (17)$$

در معادله (۱۷)،  $d$  فاصله افقی بین تیرهای عمودی است و  $\omega_n$  و  $\tau$  به صورت ذیل تعریف می‌شود.

$$\tau = l_1^2 \sqrt{\frac{\rho_1 A_1}{E_1 I_1}} \quad (18)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M_1}} \quad (19)$$

اکنون با استفاده از معادله لاگرانژ، معادله حاکم بر سیستم به دست می‌آید. فرم کلی معادله لاگرانژ به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial(\hat{T} - \hat{\pi})}{\partial \dot{\hat{q}}} \right) - \frac{\partial(\hat{T} - \hat{\pi})}{\partial \hat{q}} + \frac{\partial D}{\partial \hat{q}} = Q \quad (20)$$

در این راستا ابتدا باید معادله (۲۰) بی‌بعد و سپس فرم بی‌بعد معادله حرکت ساختمان به شرح ذیل به دست می‌آید.

$$q'' + 2\zeta \omega_n q' + q = -\frac{M_2}{M_1} u_g'' + \frac{Q}{M_1 \omega_n^2} \quad (21)$$

در معادله (۲۱)، ( ) نشان‌دهنده مشتق نسبت به  $t$  بوده و  $\zeta$  به

— FEM    ♦ Discrete Model

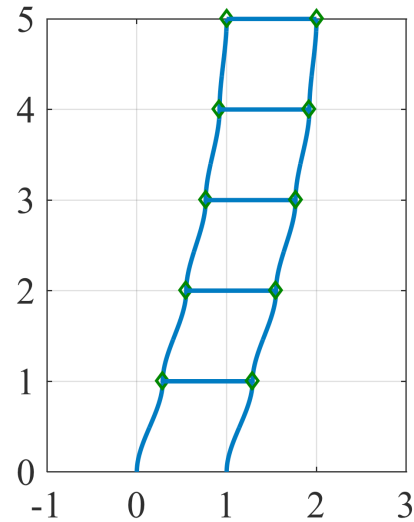


Fig. 2. First mode shape of building under study, comparing between lumped parameter and finite element model  
 شکل ۲: شکل مود اول ساختمان تحت مطالعه، مقایسه میان مدل متمرکز و المان محدود

آمده‌اند با شکل موده‌های شبیه‌سازی المان محدود شباهت دارند. اما باید به این نکته توجه کرد که مدل متمرکز هیچ ایده‌ای برای تغییرات جابه‌جایی شکل تیرها ندارد و فقط جابه‌جایی طبقات را پیش‌بینی می‌کند.

با جایگذاری معادله (۵) در معادله (۱)، انرژی پتانسیل سیستم به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\hat{\pi} = \frac{1}{2} k \hat{q}(\hat{t})^2 \quad (6)$$

که

$$K = \sum_{i=1}^5 \int_0^{l_i} \left( 2E_i I_i + \sum_{h=i}^5 m_j g \right) \left( \frac{d^2 \varphi_i(\hat{x}_i)}{d\hat{x}_i^2} \right)^2 d\hat{x}_i \quad (7)$$

همچنین با به کارگیری معادله (۵) در معادله (۲) و انجام ساده‌سازی، انرژی جنبشی سیستم به صورت زیر بازنویسی می‌شود.

$$\hat{T} = \frac{1}{2} M_1 \dot{\hat{q}}^2 + M_2 \dot{\hat{q}} \dot{\hat{u}}_g + \frac{1}{2} M_3 \dot{\hat{u}}_g^2 \quad (8)$$

عملگر ( ) نشان‌دهنده مشتق نسبت به  $\hat{t}$  بوده و پارامترهای  $M_i$ ،  $i = 1, 2, 3$  به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$M_1 = \sum_{i=1}^5 \left( m_i \sum_{j=1}^i \varphi_j(l_j)^2 \right) + \int_0^{l_i} 2\rho_1 A_1 \varphi_1(\hat{x}_1)^2 d\hat{x}_1$$

$$+ \sum_{i=2}^5 \int_0^{l_i} 2\rho_i A_i \left( \varphi_i(\hat{x}_i) + \sum_{j=1}^{i-1} \varphi_j(l_j) \right)^2 d\hat{x}_i \quad (9)$$

$$\dot{y} = \frac{1}{(c_0 + c_1)} \{ \alpha z + c_0 \dot{x} + k_0 (x - y) \} \quad (25)$$

در این مدل، سختی انباره با  $k_1$  و میرایی لزج در سرعت‌های بالا با  $c_0$  در نظر گرفته شده است. وجود میراگر  $c_1$  به منظور برطرف کردن خطایی است که در مدل بوک-ون در سرعت‌های پایین رخ می‌دهد.  $k_0$  برای کنترل سفتی در سرعت‌های بالا و  $x_0$  جابه‌جایی اولیه فنر  $k_1$  در اثر نیروی تولیدی انباره است.

برای توسعه مدل برای میدان‌های متغیر می‌بایست رابطه پارامترها با ولتاژ (جریان) اعمالی مشخص شود. براساس داده‌های آزمایشگاهی اندازه تنش تسلیم حالت پایدار و اصطکاک لزج به صورت خطی با ولتاژ اعمالی تغییر می‌کند [۳۴]. بنابراین:

$$\alpha = \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u \quad (26)$$

$$c_1 = c_1(u) = c_{1a} + c_{1b} u \quad (27)$$

$$c_0 = c_0(u) = c_{0a} + c_{0b} u \quad (28)$$

که  $u$  یک متغیر داخلی است و یک فیلتر مرتبه یک به صورت ذیل در نظر گرفته می‌شود.

$$\dot{u} = -\eta(u - v) \quad (29)$$

در معادله (۲۹)،  $v$  ولتاژ اعمالی به میراگر است. برای انطباق مدل ارائه‌شده بر رفتار واقعی میراگر ۱۴ پارامتر  $(\eta, c_{0a}, c_{0b}, c_{1a}, c_{1b}, \alpha_a, \alpha_b, k_0, k_1, A, \beta, \gamma, x_0, n)$  باید مشخص شود که با توجه به هندسه و فیزیک مسئله قابل محاسبه هستند [۲۰].

### ۴- طراحی کنترلر فازی

#### ۴-۱- مدل‌سازی سیستم یک درجه آزادی

به منظور دستیابی به قوانین کنترلر فازی نیاز است ابتدا تغییرات پاسخ ساختمان در اثر اعمال ولتاژهای متفاوت به میراگرهای مگنتوریولوژیکال مورد بررسی قرار گیرد. از آنجایی که در معادلات حرکت ساختمان مورد مطالعه، پارامترهای گوناگونی روی پاسخ نهایی آن تأثیر می‌گذارند، شناخت میراگر در مدل ساختمان دشوار بوده و نمی‌توان نحوه عملکرد آن را به درستی متوجه شد. بدین جهت در ابتدا، یک سیستم ساده یک درجه آزادی مطابق شکل ۴ در نظر گرفته شده است. میراگر به کار برده در سیستم یک درجه آزادی و ساختمان مشابه هستند و می‌توان از قوانین کنترلر فازی حاکم بر میراگر سیستم یک درجه آزادی، برای کنترل ارتعاشات ساختمان نیز استفاده نمود.

به منظور راحتی کار با معادلات، پارامترهای بی‌بعد  $\xi, \gamma, x, y, z, t, u, v$  و  $r$  مطابق پیوست الف تعریف می‌شوند. با بی‌بعدسازی انجام شده، معادله حرکت سیستم به صورت زیر به دست می‌آید.

صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\zeta = \frac{D_1}{2M_1 \omega_n^2} \quad (22)$$

### ۳- مدل‌سازی میراگر مگنتوریولوژیکال

میراگر مگنتوریولوژیکال شامل سیلندر هیدرولیک، کوئل مغناطیسی و سیال مگنتوریولوژیکال است که حاوی ذرات قطبی‌شده مغناطیسی معلق در ابعاد میکرون می‌باشد. زمانی که میدان مغناطیسی به سیال اعمال می‌شود، سیال در عرض چند میلی‌ثانیه به حالت نیمه‌جامد تبدیل می‌شود و ذرات پراکنده در سیال به صورت پشت سرهم قرار می‌گیرند و یک زنجیره را تشکیل می‌دهند. در واقع سیالی که میدان مغناطیسی به آن وارد می‌شود، رفتاری ویسکوالاستیک از خود نشان می‌دهد و در این حالت به‌عنوان میراگر غیرفعال عمل می‌کند [۷].

معمولاً برای شناسایی رفتار میراگرهای مگنتوریولوژیکال، یک سری تست‌های مقدماتی جهت اندازه‌گیری پاسخ میراگر تحت شرایط مختلف بارگذاری انجام می‌گیرد. در هر تست عملگر هیدرولیک با یک سیگنال سینوسی و فرکانس ثابت به حرکت در می‌آید، درحالی که ولتاژ اعمالی به میراگر ثابت نگه داشته می‌شود. سپس محققان با توجه به نمودارهای نیرو-زمان، نیرو-جابه‌جایی و نیرو-سرعت مدل‌های موردنظر خود را ارائه می‌دهند. در این مقاله از میان انواع مدل‌های ارائه‌شده، از مدل اسپنسر (به دلیل توانایی خوب آن در پیش‌بینی نیروها)، برای بررسی نیروی میراگر (شکل ۳) استفاده شده است.

اسپنسر نیروی میراگر مگنتوریولوژیکال را به صورت زیر ارائه داد [۳۴].

$$F_d = \alpha z + c_0 (\dot{x} - \dot{y}) + k_0 (x - y) + k_1 (x - x_0) \quad (23)$$

که در معادله (۲۳)،  $x$  جابه‌جایی نشان داده شده در شکل ۳ است و پارامتر  $z$  از رابطه دیفرانسیلی زیر به دست می‌آید.

$$\dot{z} = -\gamma |x - y| z |z|^{m-1} - \beta (x - y) |z|^n + A (x - y) \quad (24)$$

هم‌چنین معادله دیفرانسیلی مربوط به پارامتر  $y$  که در معادلات (۲۳) و (۲۴) ظاهر شده است، به صورت ذیل است.

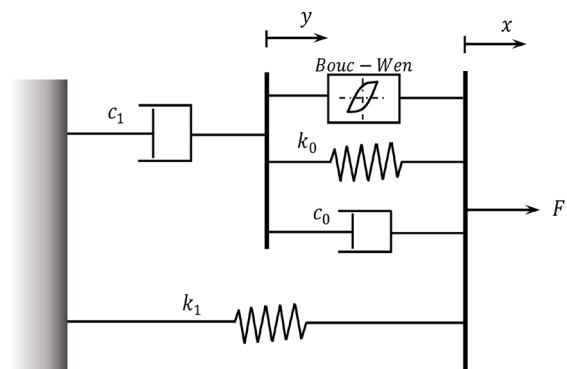


Fig. 3. The MR damper model presented by Spencer  
شکل ۳: مدل میراگر مگنتوریولوژیکال ارائه‌شده توسط اسپنسر

۴-۲- استخراج قوانین فازی

در چند دهه اخیر، محققان در زمینه سیستم‌های کنترلی فازی رشد سریعی داشته‌اند. یکی از بارزترین ویژگی‌های منطق فازی، توانایی آن‌ها در استفاده از دانش فرد خبره به صورت ریاضی است. در منطق کنترلی مسائل به یک سری از قوانین اگر-آن‌گاه تبدیل می‌شوند. این قوانین ساده و آشکار به کمک تعمیم شیوه‌های استنتاج منطق کلاسیک به منطق فازی، برای رسیدن به پاسخ مطلوب سیستم استفاده می‌شوند.

در سیستم‌هایی که افراد خبره قادر به توصیف کلامی از رفتار سیستم نیستند، این شناخت باید با شبیه‌سازی‌های حلقه باز صورت پذیرد. بدین منظور باید در ابتدا ورودی و خروجی سیستم فازی مشخص شود. در سیستم یک درجه آزادی، ورودی کنترلر جابه‌جایی مطلق، سرعت مطلق و سرعت نسبی جرم  $M$  می‌باشد. برای هر ورودی نیز سه تابع عضویت به نام‌های  $A_1^k$  (نماینده‌ی مجموعه فازی منفی  $(N)$ )،  $A_2^k$  (نماینده‌ی مجموعه فازی صفر  $(Z)$ ) و  $A_3^k$  (نماینده‌ی مجموعه فازی مثبت  $(P)$ ) مطابق شکل ۵ در نظر گرفته شده است که  $K$  عضو مجموعه  $\{x, x', x' - \zeta'\}$  است. همچنین خروجی کنترلر فازی ولتاژ اعمالی به میراگر مگنتوریولوژیکیال با فرض چهار تابع عضویت به نام‌های  $B_1$  (نماینده‌ی مجموعه فازی صفر  $(Z)$ )،  $B_2$  (نماینده‌ی مجموعه فازی کوچک مثبت  $(S)$ )،  $B_3$  (نماینده‌ی مجموعه

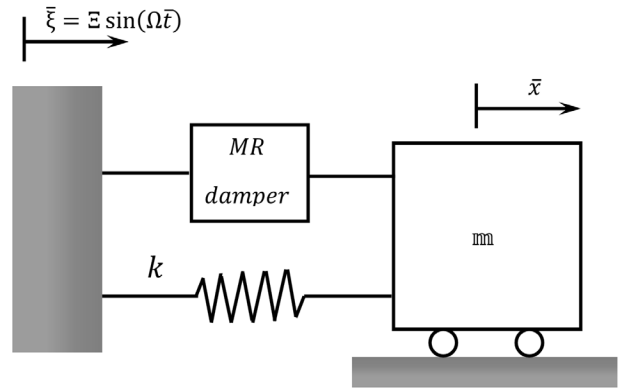


Fig. 4. A spring mass system with an MR damper  
شکل ۴: سیستم جرم فنر و میراگر مگنتوریولوژیکیال

$$x'' + x - \zeta + \frac{F_d}{M \Xi \Omega_n^2} = 0 \quad (30)$$

در معادله (۳۰)، عملگر  $( )'$  نشان‌دهنده مشتق نسبت به  $t$  می‌باشد. با بهره‌گیری از روابط ارائه‌شده توسط اسپنسر (معادله (۲۵))، نیروی میراگر مگنتوریولوژیکیال،  $F_d$ ، از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$F_d = \alpha z_{\max} z + c_0 \Xi \Omega_n (x' - y') + k_0 \Xi (x - y) + k_1 \Xi \left( x - \zeta - \frac{x_0}{\Xi} \right) \quad (31)$$

همچنین معادلات (۲۴) تا (۲۹) با اعمال بی‌بعدسازی در دستگاه معادلات سیستم یک درجه آزادی به صورت زیر باز تعریف می‌شوند.

$$z' = -|x' - y'| z |z|^{n-1} - \frac{\beta}{\gamma} (x' - y') |z|^n + \frac{A \Xi}{z_{\max}} (x' - y') \quad (32)$$

$$y' = \zeta' + \frac{\left\{ \frac{\alpha z_{\max}}{\Omega_n \Xi} z + c_0 (x' - y') + \frac{k_0}{\Omega_n} (x - y) \right\}}{1 + u} / (c_{0a} + c_{1a}) \quad (33)$$

$$u' = -\frac{\eta}{\Omega_n} (u - v) \quad (34)$$

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_b U u \quad (35)$$

$$c_0 = c_{0a} + c_{0b} U u \quad (36)$$

$$c_1 = c_{1a} + c_{1b} U u \quad (37)$$

با استفاده از معادلات دیفرانسیلی به دست آمده می‌توان به ماهیت میراگر مگنتوریولوژیکیال و چگونگی رفتار آن در ولتاژهای متفاوت پی برد. بنابراین با اعمال تحریک سینوسی اولیه و شبیه‌سازی سیستم حلقه باز، مشاهده می‌شود با افزایش ولتاژ اعمالی به میراگر، دامنه پاسخ خروجی سیستم نیز افزایش می‌یابد. از این نتیجه‌گیری می‌توان در استخراج قوانین کنترلر فازی استفاده کرد.

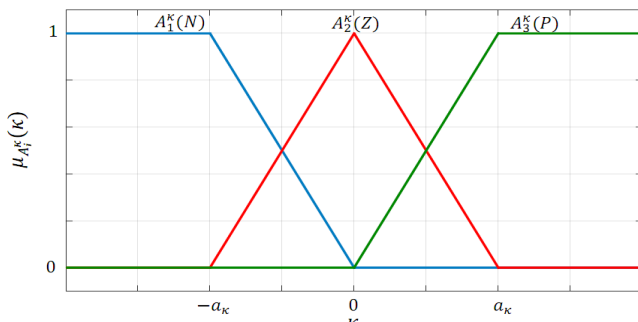


Fig. 5. Fuzzy sets define for inputs of controller with membership functions  $\mu_{A_i^k}(\kappa)$ ,  $\kappa \in \{x, x', x' - \zeta'\}$ ,  $i = 1, 2, 3$

شکل ۵: مجموعه‌های فازی تعریف شده برای ورودی‌های کنترلر با توابع عضویت  $\mu_{A_i^k}(\kappa)$ ،  $\kappa \in \{x, x', x' - \zeta'\}$ ،  $i = 1, 2, 3$

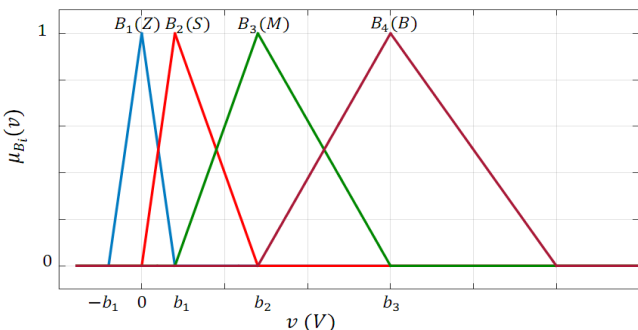


Fig. 6. Fuzzy sets for output of controller with membership functions  $\mu_{B_i}(v)$ ,  $i = 1, \dots, 4$

شکل ۶: مجموعه‌های فازی تعریف شده برای خروجی کنترلر با توابع عضویت  $\mu_{B_i}(v)$ ،  $i = 1, \dots, 4$

**جدول ۶ مقادیر پارامترهای طراحی میراگر مگنتوریولوژیکیال [۲۰]**  
**Table 6. Values of design parameters of Magneto-Rheological damper [20]**

پارامتر	مقدار	واحد	پارامتر	مقدار	واحد
$k_0$	۵,۴	N / m	$\alpha_a$	۷۰۰	N / m
$k_1$	۸,۷	N / m	$\alpha_b$	۴۰۰	N / (m.V)
$c_{0a}$	۵۰۳۰۰	N.s / m	$\gamma$	۴۹۶	1 / m <sup>2</sup>
$c_{0b}$	۱۰۶۲۰۰	N.s / m	$\beta$	۴۹۶	1 / m <sup>2</sup>
$c_{1a}$	۴۸۷۰۰	N.s / (m.V)	$\eta$	۱۹۵	1 / s
$c_{1b}$	۱۰۶۲۰۰	N.s / (m.V)	$A$	۸۱۰,۵	...
$x_0$	۰,۱۸	m	$n$	۲	...

**جدول ۷: مقادیر پارامترهای توابع عضویت ورودی و خروجی سیستم فازی برای کنترل ارتعاش سیستم یک درجه آزادی**

**Table 7. Values of the parameters of the membership functions of the fuzzy system employed for vibration suppression of single DOF system**

پارامتر	$a_x$	$a_{x_i}$	$a_{x_i-\xi}$	$b_1$	$b_2$	$b_3$
مقدار	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۳	۰,۶	۱,۲

ولتاژ و یا با ولتاژ، کنترلی است که از همان مدل اسپنسر برای تعیین نیرو استفاده می‌کند، ولی مقدار ولتاژ در آن ثابت (صفر برای کنترلر غیرفعال بدون ولتاژ و عددی مثبت برای کنترلر غیرفعال با ولتاژ) است. مشاهده می‌شود کنترلر نیمه‌فعال فازی توانسته ماکزیمم فراجش پاسخ را کاهش دهد و با خطای حالت ماندگار کم‌تری پاسخ را به سمت صفر میل دهد. باتوجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان به صحت قوانین فازی استخراج شده اطمینان کافی پیدا کرد.

#### ۴-۳- طراحی کنترلر فازی برای کاهش ارتعاشات ساختمان

با توجه به عملکرد قابل قبول سیستم کنترل نیمه‌فعال فازی در کاهش ارتعاش سیستم تک درجه آزادی، از آن برای کاهش ارتعاشات ساختمان استفاده خواهیم کرد. همانند مرحله قبل، به‌منظور راحتی کار، یک بی‌بعدسازی متناظر با بی‌بعدسازی سیستم یک درجه آزادی انجام شده است. پارامترهای بی‌بعد مربوطه  $w_i, y_i, z_i, u_i$  و  $v_i$  هستند که در پیوست ب ارائه شده‌اند. با بی‌بعدسازی معادلات حاکم بر میراگرهای مگنتوریولوژیکیال، معادله‌های (۲۴) تا (۲۹) به صورت زیر حاصل می‌شوند.

$$y'_i = \frac{\left\{ \frac{\alpha_i \tau z_{\max i}}{\omega_n l_1} z_i + c_{0i} \varphi_i(l_i) q' + \frac{k_0 \tau}{\omega_n} (\varphi_i(l_i) q - y_i) \right\}}{1 + u_i} \quad (38)$$

,  $i = 1, 2, \dots, 5$

$$z'_i = -|\varphi_i(l_i) q' - y'_i| z_i |z_i|^{n_i-1} - \frac{\beta_i}{\gamma_i} (\varphi_i(l_i) q' - y'_i) |z_i|^{n_i} + \frac{A_i l_i}{z_{\max i}} (\varphi_i(l_i) q' - y'_i), i = 1, 2, \dots, 5 \quad (39)$$

فازی متوسط مثبت  $(M)$  و  $B_p$  (نماینده‌ی مجموعه فازی بزرگ مثبت  $(B)$ ) می‌باشد و در شکل ۶ به تصویر کشیده شده است.

با توجه به دانش و درک به‌دست آمده از شبیه‌سازی حلقه باز، حس فیزیکی بشر از رفتار میراگر بررسی شده و مورد تأیید قرار می‌گیرد. این قوانین به صورت چند قانون اگر-آن‌گاه در جدول ۴ ارائه‌شده‌اند. بیان کلی این قوانین به صورت خلاصه این است که افزایش ولتاژ، باعث سفت شدن میراگر می‌گردد و بالعکس.

به منظور بررسی صحت قوانین فازی به‌دست آمده، سیستم جرم و فنر با ویژگی‌های فیزیکی مندرج در جدول ۵ در نظر گرفته شده است. مقادیر پارامترهای طراحی میراگر مگنتوریولوژیکیال مورد استفاده در شبیه‌سازی نیز در جدول ۶ ارائه‌شده است.

علاوه براین هنگام استفاده از کنترلر فازی باید توابع عضویت ورودی و خروجی سیستم فازی مشخص باشند. پارامترهای توابع عضویت طبق مقادیر جدول ۷ انتخاب شده‌اند.

بنابراین با انتقال معادلات استخراج‌شده به فضای حالت و بستن حلقه کنترلی به کمک نرم‌افزار متلب، می‌توان نتیجه عملکرد کنترلر را با توجه به قوانین فازی به‌دست آمده، مشاهده کرد. شکل ۷ نتایج کنترلر غیرفعال-بدون ولتاژ ( $v = 0$ )، غیرفعال-با ولتاژ ( $v = 2/5$ ) و کنترلر نیمه‌فعال ارائه‌شده را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که منظور از یک کنترلر غیر فعال بدون

**جدول ۴: قوانین کنترلر فازی برای کنترل ارتعاشات سیستم یک درجه آزادی**  
**Table 4. Fuzzy rule base for vibration suppression of single DOF system**

		$x' - \xi'$		
		$A_1^{x'-\xi'}$	$A_2^{x'-\xi'}$	$A_3^{x'-\xi'}$
$x'$	$A_1^{x'}$	$B_4$	$B_3$	$B_2$
	$A_2^{x'}$	$B_4$	$B_3$	$B_2$
	$A_3^{x'}$	$B_4$	$B_3$	$B_2$
$x$	$A_1^x$	$B_4$	$B_3$	$B_2$
	$A_2^x$	$B_2$	$B_1$	$B_2$
	$A_3^x$	$B_2$	$B_3$	$B_4$
$x'$	$A_1^{x'}$	$B_2$	$B_3$	$B_4$
	$A_2^{x'}$	$B_2$	$B_3$	$B_4$
	$A_3^{x'}$	$B_2$	$B_3$	$B_4$

**جدول ۵: ویژگی‌های فیزیکی سیستم نشان داده شده در شکل ۴**  
**Table 5. Physical characteristics of the system shown in Fig. 4.**

پارامتر	$\Xi$	$\Omega$	$k$	$\mathfrak{M}$
مقدار	۰/۰۱	۳۲/۱۶۱۴	۱/۶۵×۱۰ <sup>۷</sup>	۵۵۱۳/۶
واحد	m	Hz	N / m	kg



$$F_{d_i} = -\left\{ \alpha_i z_{\max_i} z_i + c_{0_i} \frac{\omega_n l_i}{\tau} (\varphi_i(l_i) q' - y_i') + k_{1_i} (l_i \varphi_i(l_i) q - x_{0_i}) \right\} \quad (44)$$

در نتیجه با حل هم‌زمان ۱۶ معادله دیفرانسیل کوپل که شامل معادلات حاکم بر میراگر (معادلات (۳۸)–(۴۰) برای هر میراگر) و معادله زمانی حرکت ساختمان (معادله (۲۱)) است، می‌توان پاسخ ساختمان تحت ارتعاشات ناشی از زلزله را به کمک میراگرهای مگنتوریولوژیکال کنترل کرد. برای حل این معادلات، ابتدا آن‌ها به فضای حالت منتقل و سپس با استفاده از دستور ode45 در نرم‌افزار متلب حل می‌شوند. البته برای دستیابی به عملکرد مناسب و بهینه‌ای از سیستم کنترل فازی، نیاز است که پارامترهای طراحی آن از جمله پارامترهای مجموعه فازی توابع عضویت ورودی و خروجی کنترلر، به‌طور مناسب انتخاب شوند. در این صورت کنترلر فازی طراحی شده یک کنترلر بهینه خواهد بود. بدین منظور از الگوریتم ژنتیک که متغیرهای آن، پارامترهای توابع عضویت می‌باشند، استفاده شده است. تابع هزینه الگوریتم ژنتیک به صورت زیر تعریف شده است.

$$p(w_{i,abs}, w'_{i,abs}, w'_{i,rel}) = s_1 \max |q| + s_2 \text{RMS}(q) \quad (45)$$

در مدل ساختمان مورد مطالعه،  $s_1$  و  $s_2$  طی یک فرایند سعی و خطا به ترتیب برابر با ۳ و ۵ انتخاب شده‌اند.

همزمان پنج کنترلر فازی به منظور کنترل ارتعاشات ساختمان پنج طبقه در برابر تحریک زلزله عمل می‌کنند. ورودی‌های هر یک از کنترلرهای فازی، خیز مطلق، سرعت مطلق و سرعت نسبی همان طبقه نسبت به طبقه زیرین آن (با توابع عضویتی مشابه شکل ۵) می‌باشند. با توجه به ورودی‌های برگزیده شده، مجموعه  $K$  (در عنوان شکل ۵ معرفی شد) ساختمان به صورت  $\{w_{i,abs}, w'_{i,abs}, w'_{i,rel}\}$ ،  $i = 1, 2, \dots, 5$ ، تعریف می‌شود. هم‌چنین خروجی کنترلرهای فازی ولتاژ اعمالی به میراگر مگنتوریولوژیکال (با توابع عضویت ارائه شده در شکل ۶) است. مقادیر پارامترهای مجموعه فازی توابع عضویت ورودی و خروجی کنترلر برای ساختمان پنج طبقه در صورت اعمال الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی کنترلر در جدول ۸ ارائه شده است. هم‌چنین سیگنال کنترلر (مقدار ولتاژ اعمالی به هر یک از میراگرها) برای هر میراگر، با استفاده از فازی‌ساز منفرد، موتور استنتاج حاصل ضرب (به همراه پایگاه قوانین ارائه شده در جدول ۴) و نافازی‌ساز میانگین مراکز قابل محاسبه خواهد بود.

در واقعیت برای تحریک زلزله نمی‌توان تابع مشخصی در نظر گرفت. به همین دلیل در بسیاری از مطالعه‌ها، رفتار ارتعاشاتی ساختمان‌ها بر پایه تحریک اتفاقی آنالیز شده است. در این مقاله، تحریک  $u_g''$  در معادله (۲۱) به صورت یک نویز سفید مدل شده است. شکل ۸ بخش زمانی پاسخ ساختمان نسبت به تحریک مذکور با اعمال کنترلرهای غیرفعال-بدون ولتاژ، غیر-فعال-با ولتاژ و نیمه‌فعال را نشان می‌دهد. تحریک زلزله تا زمان ۱۰ s ادامه

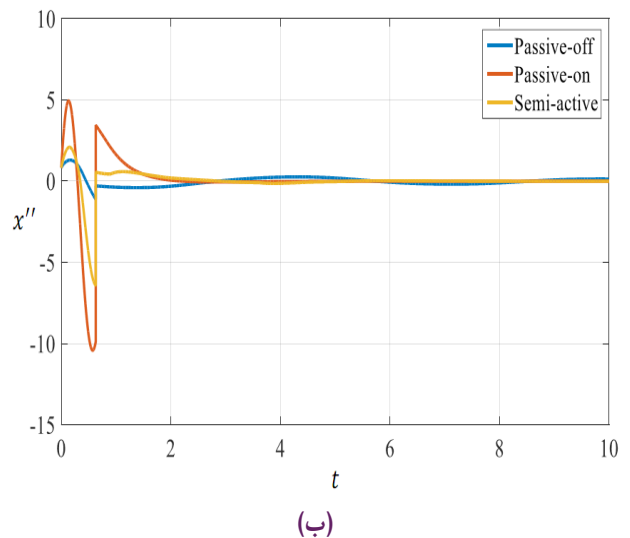
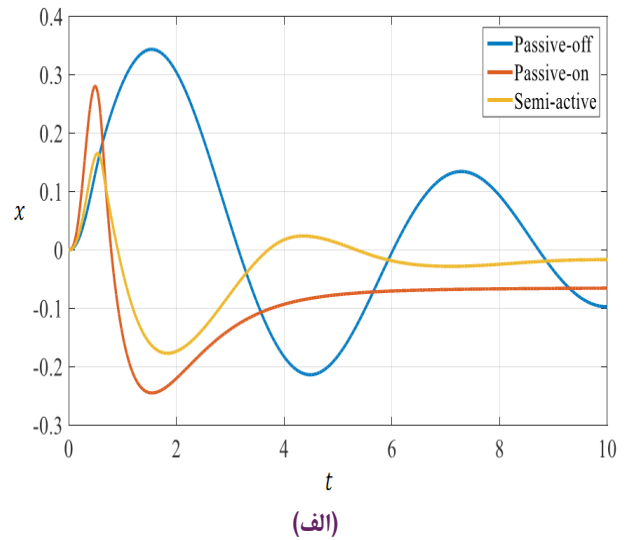


Fig. 7. Time response of the closed-loop system, (a) displacement (b) acceleration

شکل ۷: پاسخ زمانی سیستم حلقه بسته (الف) جابه‌جایی (ب) شتاب

$$u'_i = -\frac{\eta_i \tau}{\omega_n} (u_i - v_i), i = 1, 2, \dots, 5 \quad (40)$$

$$\alpha_i = \alpha_{a_i} + \alpha_{b_i} U_i u_i, i = 1, 2, \dots, 5 \quad (41)$$

$$c_{0_i} = c_{0a_i} + c_{0b_i} U_i u_i, i = 1, 2, \dots, 5 \quad (42)$$

$$c_{1_i} = c_{1a_i} + c_{1b_i} U_i u_i, i = 1, 2, \dots, 5 \quad (43)$$

در معادلات (۳۸) تا (۴۳)،  $i$  نشان‌دهنده شماره میراگر مگنتوریولوژیکال می‌باشد.

نیروی میراگر مگنتوریولوژیکال،  $F_{d_i}$ ،  $i = 1, 2, \dots, 5$  با انجام بی‌بعدسازی طبق رابطه ذیل محاسبه می‌شود. با جایگذاری معادله (۴۴) در معادله (۲۱)، تأثیر میراگر مگنتوریولوژیکال بر روی پاسخ سیستم قابل مطالعه خواهد بود.

جدول ۸ مقادیر پارامترهای توابع عضویت ورودی و خروجی سیستم فازی برای کنترل ارتعاشات ساختمان

Table 8. Values of the parameters of the membership functions of the fuzzy system employed for vibration suppression of building

$b_3$	$b_2$	$b_1$	$a_{w'_{i,rel}}$	$a_{w'_{i,abs}}$	$a_{w_{i,abs}}$	پارامتر
۱۱/۴۶	۳/۰۲	۱/۴۱	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۲	۰/۰۲۲۱	مقدار

جدول ۹ مقایسه مقدار تابع بهینه هنگام استفاده از کنترلرهای مختلف

Table 9. Comparison of the values of cost function using different controllers

$p$	RMS( $q$ )	max $ q $	
۱/۲۵۹۵	۰/۱۲۵۵	۰/۲۱۰۶	کنترلر نیمه فعال
۲/۸۳۲	۰/۲۷۷	۰/۴۸۲۳	کنترلر غیرفعال-بدون ولتاژ ( $v=0$ )
۵۵/۵۳	۵۴/۶۹	۵۶/۳۳	درصد بهبود
۱/۴۳۳۷	۰/۱۵۸۴	۰/۲۲۷۲	کنترلر غیرفعال-با ولتاژ ( $v=\delta$ )
۱۴/۵۳	۲۰/۷۷	۷/۳۱	درصد بهبود

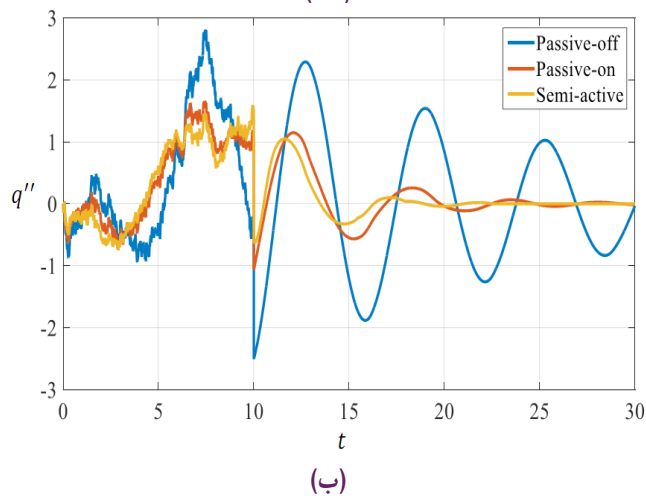
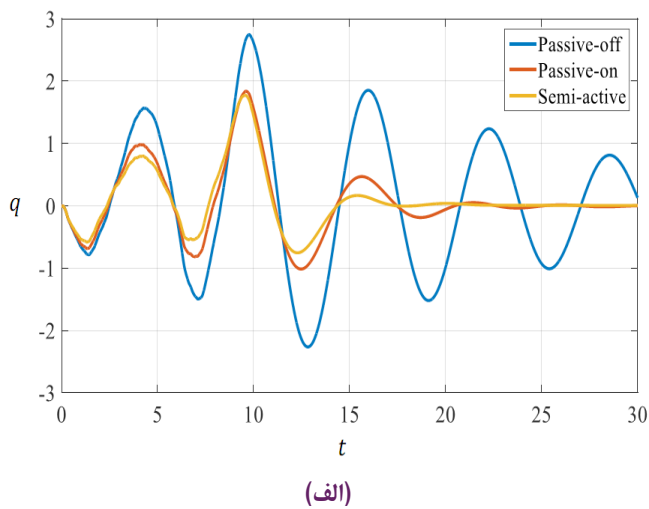


Fig. 9. Comparison of time response of the building system with different controllers under a random acceleration input, (a) deflection and (b) acceleration of the floors

شکل ۹: مقایسه پاسخ بخش زمانی سیستم‌هایی با کنترلرهای متفاوت تحت یک ورودی شتاب اتفاقی (الف) خیز طبقات (ب) شتاب طبقات

دارد و بعد از آن تحریک برداشته می‌شود.

همان‌طور که کنترلر فازی توانسته بود سیستم ساده یک درجه آزادی را کنترل کند، ساختمان پنج طبقه با معادلات پیچیده را نیز کنترل کرده است. مشاهده می‌شود که مقادیر قدرمطلق ماکزیمم فراجش و زیرجش کنترلر نیمه فعال فازی در مقایسه با دو کنترلر دیگر بسیار کاهش یافته است. همچنین زمان نشست سیستم با کنترلر غیرفعال-بدون ولتاژ بسیار بزرگ‌تر از زمان نشست سیستم با دو کنترلر دیگر است. زمان نشست سیستم با کنترلر نیمه فعال در مقایسه با سیستم با کنترلر غیرفعال-با ولتاژ با در نظر گرفتن معیار ۲ درصد، حدود ۷ ثانیه کاهش یافته است.

در جدول ۹ مقایسه‌ای میان مقادیر تابع هزینه که در معادله (۶۶) ارائه شده بود، در کنترلرهای متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. در این بین کنترلر فازی توانسته است نسبت به کنترلرهای غیرفعال-بدون ولتاژ و غیرفعال-با ولتاژ، کمترین مقدار را برای تابع هزینه پیدا کند. اگرچه الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک با تحریک شتاب اتفاقی خاصی اجرا شده است، کنترلر فازی نیمه فعال ارائه شده می‌تواند با هر ورودی اتفاقی

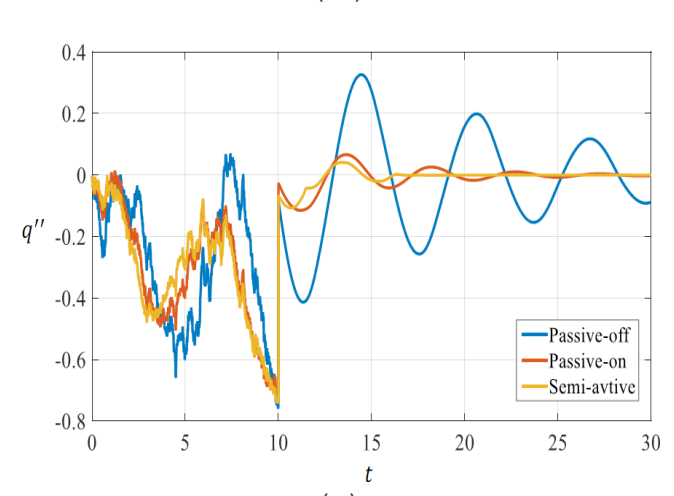
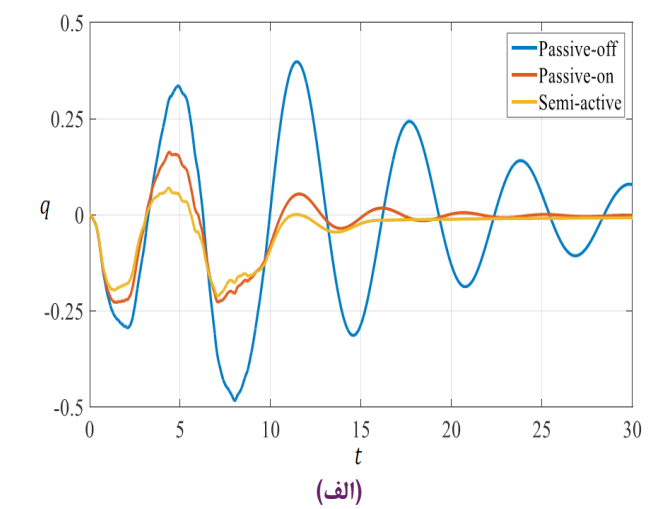


Fig. 8. Comparison of time response of the building with different controllers, (a) deflection of the floors (b) acceleration

شکل ۸: مقایسه پاسخ بخش زمانی سیستم‌های حلقه بسته مختلف با کنترلرهای متفاوت (الف) خیز طبقات (ب) شتاب طبقات

$$r = \frac{\Omega}{\Omega_n} \quad (\text{الف-۸})$$

$$\Omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (\text{الف-۹})$$

$$z_{\max} = n-1 \sqrt{\frac{1}{\gamma \Xi}} \quad (\text{الف-۱۰})$$

$$U = \frac{c_{0a} + c_{1a}}{c_{0b} + c_{1b}} \quad (\text{الف-۱۱})$$

**پیوست ب:** تعریف پارامترهای بی‌بعد در سیستم ساختمان

$$w_i = \frac{\hat{w}_i}{l_i}, i = 1, 2, \dots, 5 \quad (\text{ب-۱})$$

$$y_i = \frac{\hat{y}_i}{l_1}, i = 1, 2, \dots, 5 \quad (\text{ب-۲})$$

$$z_i = \frac{\hat{z}_i}{z_{\max_i}}, i = 1, 2, \dots, 5 \quad (\text{ب-۳})$$

$$u_i = \frac{\hat{u}_i}{U_i}, i = 1, 2, \dots, 5 \quad (\text{ب-۴})$$

$$v_i = \frac{\hat{v}_i}{U_i}, i = 1, 2, \dots, 5 \quad (\text{ب-۵})$$

$$z_{\max_i} = n_i-1 \sqrt{\frac{1}{\gamma_i l_1}}, i = 1, 2, \dots, 5 \quad (\text{ب-۶})$$

$$U_i = \frac{c_{0a_i} + c_{1a_i}}{c_{0b_i} + c_{1b_i}}, i = 1, 2, \dots, 5 \quad (\text{ب-۷})$$

دیگری، ارتعاشات ساختمان را کنترل کند. شکل ۹ ارتعاشات ساختمان در برابر تحریک اتفاقی متفاوتی از تحریک شکل ۸ را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کنترلر نیمه‌فعال در مقایسه با دو کنترلر دیگر کم‌ترین ماکزیمم فراجش و زمان نشست را دارد و به خوبی دامنه ارتعاشات ساختمان را کاهش داده است.

## ۵- نتیجه‌گیری

امروزه یکی از بزرگ‌ترین مشکلات مهندسان، طراحی دستگاه‌های حفاظتی به منظور محافظت ساختمان‌ها و سازه‌های شهری در برابر خسارات ناشی از ارتعاشات اتفاقی از قبیل زلزله و بادهای شدید است. میراگر مگنتوریولوژیکال از جمله دستگاه‌های نیمه‌فعال هستند که می‌توانند در این زمینه مورد استفاده قرار گیرند. از طرفی ساختمان‌ها را می‌توان به صورت مجموعه‌ای از جرم‌ها و تیرهای انعطاف‌پذیر با جرم و فنریت گسترده مدل کرد. هدف اصلی این مقاله، کنترل هرچه بهتر ارتعاشات ساختمان در برابر تحریک زلزله به کمک میراگرهای مگنتوریولوژیکال و به کارگیری یک مدل گسترده بوده است. بدین منظور در هر طبقه از یک ساختمان نمونه پنج طبقه، یک میراگر مگنتوریولوژیکال فرض شد. بعد از استخراج شکل مدل سیستم با شبیه‌سازی المان محدود، معادله حرکت ساختمان در حوزه زمان با به کارگیری معادله لاگرانژ استخراج شد. با نتایج مدل‌سازی یک سیستم ساده یک درجه آزادی، قوانین فازی حاکم بر میراگر مگنتوریولوژیکال به منظور طراحی کنترلر فازی استخراج گردید. پنج کنترلر فازی با توابع عضویت بهینه شده توسط الگوریتم ژنتیک طراحی شد. تحریک نویز سفید جهت اعمال شتاب زلزله مورد استفاده قرار گرفت. در انتها نیز کنترلر فازی نیمه‌فعال ارائه‌شده با دو کنترلر غیرفعال-بدون ولتاژ و غیرفعال-با ولتاژ مقایسه و مشاهده شد که کنترلر طراحی شده به خوبی توانسته است نقش مؤثری در کاهش ارتعاشات ناشی از زلزله ایفا نماید.

**پیوست الف:** تعریف پارامترهای بی‌بعد در سیستم یک درجه آزادی

$$\xi = \frac{\bar{\xi}}{\Xi} \quad (\text{الف-۱})$$

$$x = \frac{\bar{x}}{\Xi} \quad (\text{الف-۲})$$

$$y = \frac{\bar{y}}{\Xi} \quad (\text{الف-۳})$$

$$z = \frac{\bar{z}}{z_{\max}} \quad (\text{الف-۴})$$

$$t = \Omega_n \bar{t} \quad (\text{الف-۵})$$

$$u = \frac{\bar{u}}{U} \quad (\text{الف-۶})$$

$$v = \frac{\bar{v}}{U} \quad (\text{الف-۷})$$

## علائم

مساحت سطح ( $m^2$ )	$A$
ضریب میرایی (N.s/m)	$c$
فاصله افقی بین تیرهای عمودی (m)	$d$
انرژی نیروی محوری (J)	$D$
مدول الاستیسیته یانگ (Pa)	$E$
نیرو (N)	$F$
ممان اینرسی دوم سطح ( $m^4$ )	$I$
طول (m)	$l$
جرم طبقه (kg)	$m$
جرم سیستم یک درجه آزادی (kg)	$m_j$

- , 15(2015) 396-404 (In Persian فارسی).
- [6] O. Yoshida, S.J. Dyke, Seismic control of a nonlinear benchmark building using smart dampers, *Journal of engineering mechanics*, 130(4) (2004) 386-392.
- [7] M. Bitaraf, S. Hurlebaus, Semi-active adaptive control of seismically excited 20-story nonlinear building, *Engineering Structures*, 56 (2013) 2107-2118.
- [8] Y.J. Cha, A.K. Agrawal, Seismic retrofit of MRF buildings using decentralized semi-active control for multi-target performances, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 46(3) (2017) 409-424.
- [9] S.D. Nguyen, Q.H. Nguyen, S.-B. Choi, Hybrid clustering based fuzzy structure for vibration control—Part 1: A novel algorithm for building neuro-fuzzy system, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 50 (2015) 510-525.
- [10] M. Askari, J. Li, B. Samali, Semi-active LQG control of seismically excited nonlinear buildings using optimal Takagi-Sugeno inverse model of MR dampers, *Procedia Engineering*, 14 (2011) 2765-2772.
- [11] L. Zhou, C.-C. Chang, L.-X. Wang, Adaptive fuzzy control for nonlinear building-magnetorheological damper system, *Journal of Structural Engineering*, 129(7) (2003) 905-913.
- [12] A. Bathaei, S.M. Zahrai, M. Ramezani, Semi-active seismic control of an 11-DOF building model with TMD+MR damper using type-1 and-2 fuzzy algorithms, *Journal of Vibration and Control*, (2017) 1077546317696369.
- [13] X. Lin, S. Chen, A modified shuffled frog-leaping algorithm-based fuzzy controller for magnetorheological damper-building system, *International Journal of Computer Applications in Technology*, 53(3) (2016) 279-289.
- [14] G. Yan, L.L. Zhou, Integrated fuzzy logic and genetic algorithms for multi-objective control of structures using MR dampers, *Journal of sound and vibration*, 296(1) (2006) 368-382.
- [15] H.-S. Kim, Multi-input multi-output semiactive fuzzy control os seismic-excited building with evolutionary optimization algorithms, *International Journal of Control and Automation*, 7(6) (2014) 143-152.
- [16] M. Bitaraf, O.E. Ozbulut, S. Hurlebaus, L. Barroso, Application of semi-active control strategies for seismic protection of buildings with MR dampers, *Engineering Structures*, 32(10) (2010) 3040-3047.
- [17] Z.Q. Gu, S.O. Oyadiji, Application of MR damper in structural control using ANFIS method, *Computers & structures*, 86(3) (2008) 427-436.
- [18] A. K-Karamodin, H. H-Kazemi, Semi-active control of structures using neuro-predictive algorithm for MR

تابع زمانی پاسخ	$q$
تابع هزینه	$s$
انرژی جنبشی (J)	$T$
جابه‌جایی زمین (m)	$u$
ولتاژ (V)	$v$
جابه‌جایی نسبی تیر (m)	$w$
کار (J)	$W$
پارامتر اختیاری (m)	$z$
علایم یونانی	
ضریب میرایی	$\zeta$
مجموعه ورودی کنترلر فازی	$\kappa$
تابع عضویت کنترلر فازی	$\mu$
تابع تحریک سیستم یک درجه آزادی	$\xi$
دامنه تحریک سیستم یک درجه آزادی	$\Xi$
انرژی کرنشی (J)	$\pi$
چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	$\rho$
فرکانس طبیعی	$\omega$
فرکانس تحریک پایه در سیستم یک درجه آزادی	$\Omega$
زیرنویس‌ها	
میراگر مگنتورئولوژیکال	$d$
خارجی	$Ext$
زمین	$g$
شمارنده تیر و یا طبقه	$i$

## مراجع

- [1] S. Arunsawatwong, Critical control of building under seismic disturbance, in: *Control Systems Design*, Springer, (2005) 339-354.
- [2] Z. Li, Z. Deng, Z. Gu, New sliding mode control of building structure using RBF neural networks, in: *2010 Chinese Control and Decision Conference*, IEEE, (2010) 2820-2825.
- [3] R. Tikani, S. Ziaei-Rad, M. Sfahanian, Simulation and experimental evaluation of a magneto-rheological hydraulic engine mount, *Modares Mechanical Engineering*, 14 (2014) 43-49 (In Persian فارسی).
- [4] Y. Hojjat, K. Kakavand, M. Ghodsi, A.A. Maddah, Study on the Transient State behavior of Magneto Rheological Fluid in Magnetic Coupling, *Modares Mechanical Engineering*, 14 (2014) 156-162 (In Persian فارسی).
- [5] M. Asgari, Gh. Payganeh, K. Malekzade Fard, F. Rashed Saghavaz, A parametric study of the free vibration analysis of composite sandwich plate with magneto-rheological smart core, *Modares Mechanical Engineering*

- with MR dampers and sliding base isolation, *Asian J. Civ. Eng.*, 18 (2017) 63-97.
- [27] N.K. Chandiramani, G.B. Motra, Lateral-torsional response control of MR damper connected buildings, in: ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, *American Society of Mechanical Engineers*, (2013) V04BT04A056-V004BT004A056.
- [28] L. Meirovitch, *Fundamentals of vibrations*, Waveland Press, 2010.
- [29] S.S. Rao, *Vibration of continuous systems*, John Wiley & Sons, 2007.
- [30] S. Awtar, S. Sen, A generalized constraint model for two-dimensional beam flexures: Nonlinear strain energy formulation, *Journal of Mechanical Design*, 132(8) (2010) 081009.
- [31] H. Malaeké, H. Moeenfard, Analytical modeling of large amplitude free vibration of non-uniform beams carrying a both transversely and axially eccentric tip mass, *Journal of Sound and Vibration*, 366 (2016) 211-229.
- [32] H. Moeenfard, S. Awtar, Modeling Geometric Nonlinearities in the Free Vibration of a Planar Beam Flexure With a Tip Mass, *Journal of Mechanical Design*, 136(4) (2014) 044502.
- [33] T.T. William, D.D. Marie, *Theory of vibration with applications*, New Jersey, (1998).
- [34] B. Spencer, S. Dyke, M. Sain, J. Carlson, Phenomenological model for magnetorheological dampers, *Journal of engineering mechanics*, 123(3) (1997) 230-238.
- dampers, *Structural control & health monitoring*, 17(3) (2010) 237.
- [19] L.M. Jansen, S.J. Dyke, Semiactive control strategies for MR dampers: comparative study, *Journal of Engineering Mechanics*, 126(8) (2000) 795-803.
- [20] M.E. Uz, M.N. Hadi, Optimal design of semi active control for adjacent buildings connected by MR damper based on integrated fuzzy logic and multi-objective genetic algorithm, *Engineering Structures*, 69 (2014) 135-148.
- [21] K.M. Choi, S.W. Cho, H.J. Jung, I.W. Lee, Semi-active fuzzy control for seismic response reduction using magnetorheological dampers, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 33(6) (2004) 723-736.
- [22] Y.-J. Cha, J.-W. Bai, Seismic fragility estimates of a moment-resisting frame building controlled by MR dampers using performance-based design, *Engineering Structures*, 116 (2016) 192-202.
- [23] Y. Kim, R. Langari, S. Hurlbauss, MIMO fuzzy identification of building-MR damper systems, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 22(4) (2011) 185-205.
- [24] N.K. Chandiramani, Semiactive Control of Earthquake/Wind Excited Buildings Using Output Feedback, *Procedia Engineering*, 144 (2016) 1294-1306.
- [25] M. E Uz, P. Sharafi, Investigation of the optimal semi-active control strategies of adjacent buildings connected with magnetorheological dampers, *Iran University of Science & Technology*, 6(4) (2016) 523-546.
- [26] S. Dumne, M. Shrimali, S. Bharti, Earthquake performance of hybrid controls for coupled buildings

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



Please cite this article using:

N. Aliakbari, H. Moeenfard, Design of Optimal Fuzzy Controllers for Semi Active Vibration Suppression of Multi-Floor Buildings Based on a Distributed Parameter Model and Magneto Rheological Dampers, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 51(1) (2018) 133-146.

DOI: 10.22060/mej.2017.12919.5470

