



## تأثیر انتخاب توابع عضویت مختلف بر کنترل نیمه‌فعال فازی دو سازه مجاور با میراگر سیال مغناطیسی

محسن بهمنی، سید مهدی زهرائی\*

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۱۴  
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۶/۲۲  
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۲۳  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۶/۲۷

### کلمات کلیدی:

تابع عضویت  
کنترل نیمه‌فعال  
میراگر سیال مغناطیسی  
سیستم کنترل فازی نوع ۱ و نوع ۲  
سازه‌های مجاور

**خلاصه:** انتخاب توابع عضویت مناسب برای سیستم‌های کنترل فازی، همواره موضوع مورد بحث بین محققان بوده است و عموماً سعی و خطا بر اساس تجربه طراح سیستم کنترلی، تعیین می‌شود. در این تحقیق، عملکرد سیستم‌های فازی نوع ۱ و نوع ۲ با توابع عضویت مختلف در کنترل نیمه‌فعال فازی سازه‌های سه و نه طبقه متصل شده با میراگر سیال مغناطیسی تحت زلزله‌های الاسترو، کرن کانتی، نورث‌ریچ و کوبه در بیشینه شتاب‌های مختلف بحث و بررسی می‌شوند. در این مطالعه دو سیستم فازی با در نظر گرفتن نوع تابع عضویت و همچنین تعداد توابع عضویت تعریف شده برای هر ورودی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. توابع عضویت بررسی شده با هدف مقایسه‌ای به صورت متقارن و در بازه‌های یکسان تعریف شده‌اند. نتایج مربوط به سیستم‌های کنترل مورد استفاده برای الگوریتم‌های فازی نوع ۱ و نوع ۲ با در نظر گرفتن توابع عضویت مثلثی، گوسی و دوزنقه‌ای در مقایسه با حالت کنترل نشده مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. نتایج به دست آمده از معیارهای ارزیابی تعریف شده نشان می‌دهد که به طور کلی سیستم‌های فازی نوع ۲ عملکرد بهتری در مقایسه با سیستم‌های فازی نوع ۱ دارند که علت آن در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها و استفاده از توابع عضویت به صورت بازه‌ای می‌باشد. سیستم‌های کنترل فازی با تابع عضویت مثلثی بهترین عملکرد را نسبت به توابع عضویت دیگر داشته‌اند و تابع عضویت گوسی نیز عملکرد کنترلی نزدیک به تابع مثلثی را از خود نشان داده است. همچنین وقتی از تعداد بیشتر توابع عضویت برای تعیین درجه عضویت مقادیر زمانی فازی استفاده می‌شود، حساسیت سیستم فازی به نوع تابع عضویت مورد استفاده کمتر می‌شود.

### ۱- مقدمه

استفاده وجود دارد. علاوه بر تعیین شکل تابع عضویت، تعیین فاصله و تعداد توابع عضویت نیز پارامتری مهم در طراحی سیستم فازی می‌باشد. به عنوان مثال جهت مدل کردن یک سیستم کنترل دما به وسیله منطق فازی، دانستن تعداد توابع عضویت مورد نیاز (برای مثال تابع عضویت دمای پایین، معتدل، بالا و غیره) و همچنین انتخاب فاصله بین توابع، اهمیت زیادی دارد. با مرور تحقیقات انجام شده می‌توان نتیجه گرفت که تابع عضویت مثلثی به دلیل سادگی استفاده از آن به صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. تابع عضویت مثلثی از خطوطی مستقیم تشکیل می‌شود که باعث سادگی استفاده از آن و همچنین سرعت بالای اجرای سیستم فازی می‌شود. علاوه بر تابع عضویت مثلثی، توابع دوزنقه‌ای و گوسین نیز عملکرد بهتری نسبت به توابع عضویت دیگر داشته‌اند [۱ و ۲].

برای به حداکثر رساندن عملکرد سیستم فازی، اغلب لازم است که یک فرایند بهینه‌سازی برای طراحی توابع عضویت انجام شود و در آن پارامترهای قابل تنظیم سیستم فازی مورد استفاده به گونه‌ای تعریف شوند که با ارائه

سیستم‌های منطق فازی به طور گسترده برای کنترل، شناسایی سیستم، مشکلات تشخیص الگو و بسیاری از برنامه‌های کاربردی دیگر از صنعت تا دانشگاه مورد استفاده قرار می‌گیرند. توابع عضویت، نقشی اساسی در عملکرد کلی سیستم فازی ایفا می‌کنند. این توابع عناصر سازنده تئوری‌های فازی می‌باشند و در واقع فرایند فازی‌سازی در یک مجموعه فازی توسط آن‌ها تعیین می‌شود. بر این اساس، شکل توابع فازی در هر مسئله مشخص، پارامتر مهمی محسوب می‌شود زیرا به صورت مستقیم روی سیستم استنتاجی فازی موثر می‌باشد. توابع عضویت ممکن است اشکال مختلفی از قبیل مثلث، دوزنقه، گوسی و غیره داشته باشند ولی در واقع تنها شرطی که یک تابع عضویت باید رعایت کند این است که بین مقادیر صفر و یک متغیر باشد. بر اساس نوع و اندازه مسئله مورد بحث و همچنین تجربه و مهارت طراح سیستم فازی، روش‌های متعددی برای تعیین شکل توابع عضویت مورد

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mzahrai@ut.ac.ir



سیمولینک نرم‌افزار متلب طراحی و مورد استفاده قرار گرفت. در این مطالعه، توابع عضویت مثلثی، گوسی، دوزنقه‌ای خطی و دوزنقه‌ای غیرخطی دارای هفت متغیر زبانی برای ارزیابی سیستم کنترلی و مقایسه آن‌ها انتخاب شدند. نتایج این مطالعه نشان داد که سیستم کنترل فازی با تابع عضویت مثلثی بهترین عملکرد کنترلی را در مقایسه با توابع دیگر از خود نشان می‌دهد. وو<sup>۷</sup> [۷] در سال ۲۰۱۲ ملاحظات مختلف از جمله بهینه‌سازی، ساختار تحلیلی، یکنواختی، استحکام و عملکرد کنترلی برای انتخاب بین تابع عضویت گوسی و دوزنقه‌ای در کنترل فازی نوع ۲ را مورد بررسی قرار داد. نتایج این مطالعه نشان داد که هر کدام از توابع مزایای خاص خود را دارند. به عنوان مثال، سیستم‌های کنترل فازی نوع ۲ با تابع گوسی، برای تعریف و بهینه‌سازی، طراحی ساده‌تری دارند و همچنین توابع گوسی همواره پیوسته بوده و عملکرد سریع‌تری برای قوانین فازی کوچک‌تر دارند. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که عملکرد توابع مختلف در کنترل فازی مشخص نبوده و به خصوصیات مطالعه موردی مورد نظر بستگی دارد. جوئی و پورزینلی [۸] در سال ۲۰۱۳ تاثیر پارامترهای مختلف کنترل کننده فازی شامل قوانین فازی و توابع عضویت را در کاهش ارتعاشات لرزه‌ای ساختمان‌ها بررسی نمودند. در این تحقیق، مطالعه عددی روی کنترل فازی ارتعاشات یک سازه سه بعدی ۱۲ طبقه با استفاده از توابع عضویت مثلثی، گوسی و دوزنقه‌ای انجام شد. نتایج این مطالعه نشان داد که انتخاب توابع عضویت مناسب برای داده‌های ورودی و خروجی، همانند انتخاب تعداد ورودی سیستم فازی و تعیین قوانین فازی، در بهبود عملکرد سازه بسیار موثر می‌باشد. مقایسه عملکرد سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال فازی با توابع مختلف در این مطالعه نشان داده که تابع عضویت مثلثی عملکرد کنترلی مناسب‌تری نسبت به سایر توابع برای کاهش جابه‌جایی و شتاب سازه از خود نشان می‌دهد.

عادل<sup>۸</sup> و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۵ تاثیر استفاده از توابع عضویت مختلف بر روی یک سیستم کنترل جهت آنتن، مورد ارزیابی و مقایسه قرار دادند. در این تحقیق، توابع مثلثی و دوزنقه‌ای (خطی) و گوسی برای تعیین مقادیر ورودی و خروجی سیستم فازی مورد استفاده قرار گرفتند. مقدار سرعت و خطای پایداری سیستم به عنوان معیارهای ارزیابی عملکرد سیستم فازی استفاده شد و نتایج تحقیق نشان داد که تابع عضویت مثلثی، بهترین عملکرد را در بین توابع مورد استفاده از خود نشان می‌دهد و همچنین تابع عضویت غیرخطی گوسی نیز عملکرد مناسبی در این مطالعه موردی از خود

معیارهای عملکردی مناسب، کارایی سیستم فازی مورد استفاده حداکثر بازدهی را داشته باشد. تورس<sup>۱</sup> و همکاران [۳] در سال ۲۰۰۰ کاربرد الگوریتم ژنتیک در بهینه کردن توابع عضویت را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق، یک شبیه‌ساز پارکینگ خودرو به کار رفت و به منظور پارک کردن خودرو از یک سیستم کنترل فازی به همراه الگوریتم بهینه‌سازی توابع عضویت استفاده شد. هدف اصلی این سیستم، ارائه یک مسیر بهینه برای پارک کردن خودرو از هر نقطه شروعی تعیین شد و پس از تعریف قوانین فازی و توابع عضویت اولیه، با استفاده از الگوریتم ژنتیک، توابع عضویت بهینه‌سازی شدند. نتایج این تحقیق نشان داد که با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک و بهینه کردن توابع عضویت، تعداد چرخش‌های خودرو جهت رسیدن به مقصد مورد نظر، ۲۱ درصد کاهش یافت. در ادامه این تحقیق، اسمین<sup>۲</sup> و همکاران [۴] در سال ۲۰۰۵ کارایی الگوریتم بهینه‌سازی PSO<sup>۳</sup> را در بهینه کردن توابع عضویت بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی PSO و بهینه کردن توابع عضویت، تعداد چرخش‌های خودرو جهت رسیدن به مقصد مورد نظر، ۱۸/۲۲ درصد کاهش می‌یابد. ژائو<sup>۴</sup> و بوز<sup>۵</sup> [۵] در سال ۲۰۰۲ انواع مختلف توابع عضویت را در کنترل فازی یک موتور القایی مورد ارزیابی قرار دادند. طی این تحقیق، انواع مختلف توابع عضویت همانند مثلثی، گوسین، دوزنقه‌ای با شانه باریک و عریض، و نیز شکل‌های مختلف توابع مورد استفاده به صورت متقارن و با فاصله برابر در کنترل فازی مورد استفاده قرار گرفت. همچنین نوع تابع فازی در سیستم ورودی و خروجی به صورت یکسان در نظر گرفته شد. تابع عضویت مثلثی به عنوان تابع عضویت مرجع برای تحلیل و مقایسه سایر توابع مورد استفاده قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که تابع عضویت مثلثی بهترین عملکرد را در بین توابع مورد بحث دارد و پس از آن، پاسخ‌های سیستم فازی با تابع عضویت دوزنقه‌ای، عملکردی نزدیک به سیستم فازی با تابع عضویت مثلثی را از خود نشان دادند.

مونیکا<sup>۶</sup> و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۱ تاثیر توابع عضویت در کنترل فازی یک کنترل کننده ولتاژ جهت کنترل سرعت موتور القایی را مورد بررسی قرار دادند. جهت پیشبرد این هدف یک کنترل کننده فازی برای کنترل حلقه بسته چرخش موتوری که از جریان برق تغذیه می‌کند، در محیط

- 
- 1 Torres
  - 2 Esmin
  - 3 Particle Swarm Optimization
  - 4 Zhao
  - 5 Bose
  - 6 Monicka

---

7 Wu  
8 Adil

شبیه‌سازی شد و نتایج محاسبه شده در روش یادگیری ماشین برای بررسی درجه تابع عضویت و پیچیدگی پارامترها در راکتور استفاده شدند. نتایج عضویت مختلف برای هر ورودی آموزش در نظر گرفته شد. محققان در این مطالعه هر مدل را با فرآیندهای آموزش دادن و تست کردن ارزیابی کردند و تأثیر الگوی تابع عضویت برای هر پارامتر ورودی بررسی شد. نتایج این تحقیق نشان داد که بین ارزشیابی فرآیندهای آموزش دادن و تست کردن برای همه توابع عضویت تفاوت معناداری وجود ندارد. نتایج همچنین نشان داد که افزایش تعداد توابع عضویت در هر ورودی می‌تواند دقت و قابلیت پیش‌بینی مدل را بهبود بخشد.

در سیستم‌های کنترل فازی، عدم قطعیت‌ها همواره از موارد بحث برانگیز بین طراحان سیستم کنترلی بوده است. استفاده از ورودی‌ها بدون اعمال عدم قطعیت‌ها از ویژگی‌های سیستم‌های فازی نوع ۱ است که در سیستم‌های فازی نوع ۲ با تعریف توابع عضویت به صورت بازه‌ای، این مشکل تا حدودی برطرف شده و سیستم فازی در برابر عدم قطعیت‌ها انعطاف‌پذیر و مقاوم می‌شود و لذا عملکرد سیستم استنتاج فازی بهبود می‌یابد. در سال‌های اخیر از کنترل کننده‌های فازی به علت سادگی و در عین حال قدرت بالای آن در تصمیم‌گیری به صورت گسترده در زمینه کنترل نیمه‌فعال و فعال مورد استفاده قرار گرفته است. از آنجایی که درجه عضویت هر متغیر بر اساس توابع عضویت تعیین می‌شود بنابراین نوع و شکل این توابع از اهمیت زیادی در عملکرد سیستم کنترلی برخوردار است. در طراحی سیستم‌های فازی عموماً از سعی و خطا و تجربه طراح سیستم در انتخاب تابع عضویت استفاده می‌شود. در این تحقیق با در نظر گرفتن یک مطالعه موردی و اعمال تحریک‌های لرزه‌ای مختلف، عملکرد سیستم‌های کنترلی در نظر گرفته شده با توابع عضویت متفاوت بررسی شده و تأثیر استفاده از توابع عضویت مختلف از نظر نوع (برای لحاظ کردن عدم قطعیت‌های موجود در مسئله)، تعداد و شکل (برای لحاظ کردن نحوه توزیع درجه عضویت متغیرها) در کنترل فازی سازه‌ها مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

## ۲- مدل‌سازی عددی

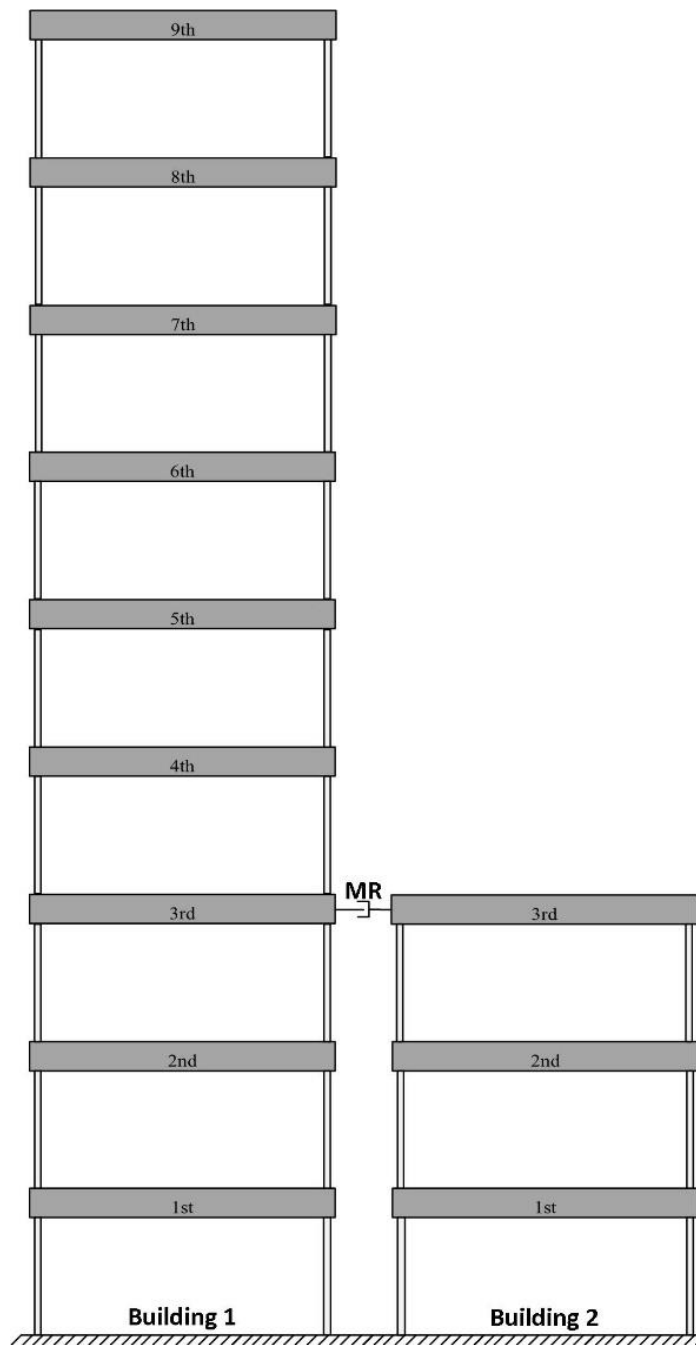
در این مطالعه جهت بررسی عملکرد کنترلی الگوریتم فازی با توابع عضویت مختلف، دو سازه سه و نه طبقه به صورت متصل شده به یکدیگر در نظر گرفته شده است. سازه‌های مورد استفاده، سازه‌های فلزی مربوط به پروژه SAC در منطقه کالیفرنیا و لس‌آنجلس می‌باشند [۱۴]. مدل اجزای محدود سازه‌های مذکور با فرض رفتار خطی سازه‌ها حین انجام تحلیل‌های

نشان نداده است. کیم<sup>۱</sup> و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۷ تأثیر استفاده از توابع عضویت مختلف بر سیستم‌های امنیتی چند رباتی را مورد بررسی و مقایسه قرار دادند. در این تحقیق از ریسک تخلیه انرژی که یکی از فاکتورهای چندگانه در فرآیند تصمیم‌گیری ربات می‌باشد، به عنوان معیار ارزیابی برای مقایسه استفاده از توابع عضویت مختلف استفاده شد و نتایج تحقیق نشان داد که تابع دوزنقه‌ای بهترین عملکرد را در بین توابع مورد بحث دارد و پس از آن تابع مثلثی نتایجی نزدیک به تابع دوزنقه‌ای به همراه داشت.

بابانژاد و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۲۰ تأثیر تعداد توابع عضویت در مطالعه خود را بررسی کردند. در این مطالعه، یک حفره دو بعدی حاوی نانوسیال با روش CFD<sup>۲</sup> شبیه‌سازی شد. سپس خصوصیات سیال از قبیل دما و توزیع سرعت به عنوان مجموعه داده آموزشی در چارچوب یادگیری ماشین مورد استفاده قرار گرفت. دو فرآیند متفاوت برای ارزیابی روش یادگیری ماشین، در قالب آموزش و تست در نظر گرفته شد که دارای سطح بالایی از دقت و قابلیت پیش‌بینی صحیح خروجی مدل بودند. نتایج تحقیق نشان داد که رویکرد یادگیری ماشین می‌تواند به طور دقیق فرآیند را با توانایی پیش‌بینی بالا تشخیص دهد. به علاوه، با استفاده از سه تابع عضویت در هر ورودی، دقت مدل بالاتر از چهار تابع است. سوتیکنو<sup>۳</sup> و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۲۱ اثرات تابع عضویت مختلف از قبیل مثلثی، دوزنقه‌ای خطی، گوسین و دوزنقه‌ای غیرخطی که برای ساخت کنترل کننده فازی جهت ردیابی نقطه حداکثر توان انرژی فتوولتائیک خورشیدی استفاده می‌شود، مورد بحث و بررسی قرار دادند. آن‌ها با پیشنهاد استفاده از مبدل ولتاژ با بهره بالا برای سیستم ساختمان، چندین پارامتر با تغییر فرکانس و متغیرهای تابش بررسی نمودند. نتایج به دست آمده از این مطالعه نشان داد که توابع عضویت دوزنقه‌ای خطی و دوزنقه‌ای غیرخطی عملکرد بهتری نسبت به توابع عضویت مثلثی و گوسین داشته‌اند. علاوه بر این مشاهده شد که این دو تابع عملکرد قابل مقایسه‌ای در فرکانس ۵ و ۱۰ کیلوهرتز از خود نشان داده‌اند ولی وقتی فرکانس تا ۲۰ کیلوهرتز افزایش داده می‌شود تابع عضویت دوزنقه‌ای غیرخطی عملکرد بهتری نسبت به تابع عضویت دوزنقه‌ای خطی از خود نشان داده است.

پلارک و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۲۱ تأثیر پارامتر ورودی را بر پارامتر خروجی یک فرآیند به نام جریان حبای را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، راکتور ستونی حباب دو فازی به صورت سه بعدی با رویکرد CFD

1 Kim  
2 Computational Fluid Dynamics  
3 Sutikno



شکل ۱. مدل دو سازه [۱۴] مجاور متصل شده با میراگر MR

Fig. 1. Model of two adjacent buildings [14] connected with MR damper

طور موازی با نرم افزار OpenSees و به صورت لینک شده استفاده شده است. شکل ۱ به طور شماتیک دو سازه مزبور مجاور را که به وسیله میراگر سیال مغناطیسی در تراز طبقه سوم به یکدیگر متصل شده اند نشان می دهد.

دینامیکی در نرم افزار OpenSees تهیه شده است. به دلیل سادگی ایجاد ارتباط بین دو نرم افزار MATLAB و OpenSees، جهت پیاده سازی الگوریتم منطق فازی و محاسبه نیروی کنترلی از نرم افزار MATLAB به

$$\dot{z} = -\gamma \left| \dot{x} \right| \left| z \right|^{n-1} - \beta x \left| z \right|^n + A \dot{x} \quad (2)$$

در روابط بالا،  $x$  و به ترتیب جابه‌جایی و سرعت میراگر سیال مغناطیسی و  $z$  متغیر تکاملی<sup>۱</sup> می‌باشد که وابستگی تاریخیچه پاسخ‌ها را در نظر می‌گیرد. با افزودن پارامترهای  $n$ ،  $\beta$ ،  $\gamma$  و  $A$  به مدل، می‌توان رفتار خطی باربرداری و انتقال از ناحیه تسلیم نشده به تسلیم شده را در نظر گرفت. وابستگی عملکردی پارامترهای میراگر به ولتاژ موثر  $u$  در روابط ۳ و ۴ مدل شده است.

$$\alpha = \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u \quad (3)$$

$$c_0 = c_0(u) = c_{0a} + c_{0b} u \quad (4)$$

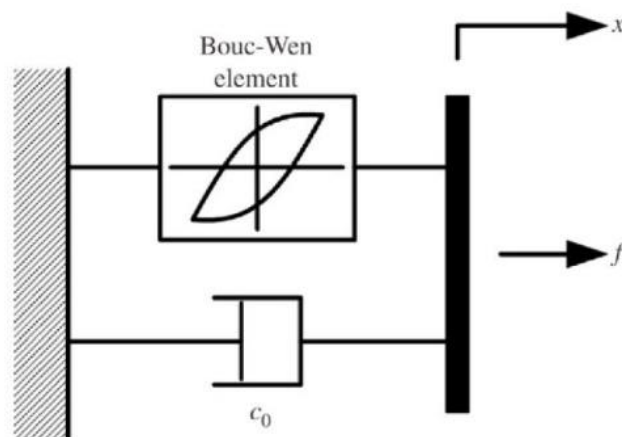
علاوه بر این، به علت عدم توانایی میراگر در مطابقت لحظه‌ای با ولتاژ اعمال شده به آن، برای محاسبه تاخیر زمانی به وجود آمده در پاسخ میراگر، رابطه ۵ در نظر گرفته می‌شود.

$$\dot{u} = -\eta(u - v) \quad (5)$$

در رابطه بالا،  $v$  و  $\eta$  به ترتیب ولتاژ اعمال شده به سیستم کنترل سازه‌ای و ثابت زمانی می‌باشند.

در این مطالعه پارامترهای میراگر به نحوی انتخاب شده‌اند که میراگر ظرفیتی معادل نیروی ۱۰۰۰ کیلونیوتن را دارد و ولتاژ اعمالی به میراگر می‌تواند مقادیری بین ۰ و ۱۰ ولت را داشته باشد. مقادیر پارامترهای مورد استفاده برای میراگر در جدول ۱ اشاره شده است.

جهت صحت‌سنجی مدل بوک-ون استفاده شده جهت شبیه‌سازی رفتار دینامیکی میراگر سیال مغناطیسی از نتایج رفتار میراگر مدل‌سازی شده در مطالعه اک<sup>۲</sup> و همکاران [۱۶] استفاده شده است. نمودار رفتار چرخه‌ای میراگر برای ولتاژهای اعمالی صفر، ۵ و ۱۰ ولت در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۲. مدل بوک-ون برای میراگر سیال مغناطیسی [۱۲]

Fig. 2. Bouc-Wen model for Magnetorheological damper [12]

مدل‌سازی مناسب وسایل کنترلی برای شبیه‌سازی صحیح رفتار سیستم کنترل شده، امری ضروری می‌باشد. برای استفاده حداکثر از ویژگی‌های منحصر به فرد میراگرهای سیال مغناطیسی، نکته حائز اهمیت است که وجود دارد، استفاده از مدل قابل اطمینانی است که بتواند خاصیت غیرخطی میراگر را توصیف کند. مدل بوک-ون به علت سادگی و قدرت بالای آن در شبیه‌سازی مناسب رفتار میراگر به صورت گسترده مورد استفاده محققان قرار گرفته است. یک مدل ساده مکانیکی متشکل از یک المان بوک-ون به موازات یک میراگر ویسکوز که در شکل ۲ نمایش داده شده است، بر اساس مطالعات و آزمایشات بسیاری نشان داده شده است که قابلیت پیش‌بینی دقیق رفتار یک میراگر MR اولیه را در طیف وسیعی از ورودی‌ها دارد. همچنین نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی مختلف نشان داده است که این مدل برای شبیه‌سازی میراگر MR در مقیاس واقعی نیز عملکرد مناسبی از خود نشان می‌دهد [۱۵].

مقدار نیروی  $f$  که توسط میراگر سیال مغناطیسی تولید می‌شود، بر پایه مدل بوک-ون از رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$f = c_0 * \dot{x} + \alpha * z \quad (1)$$

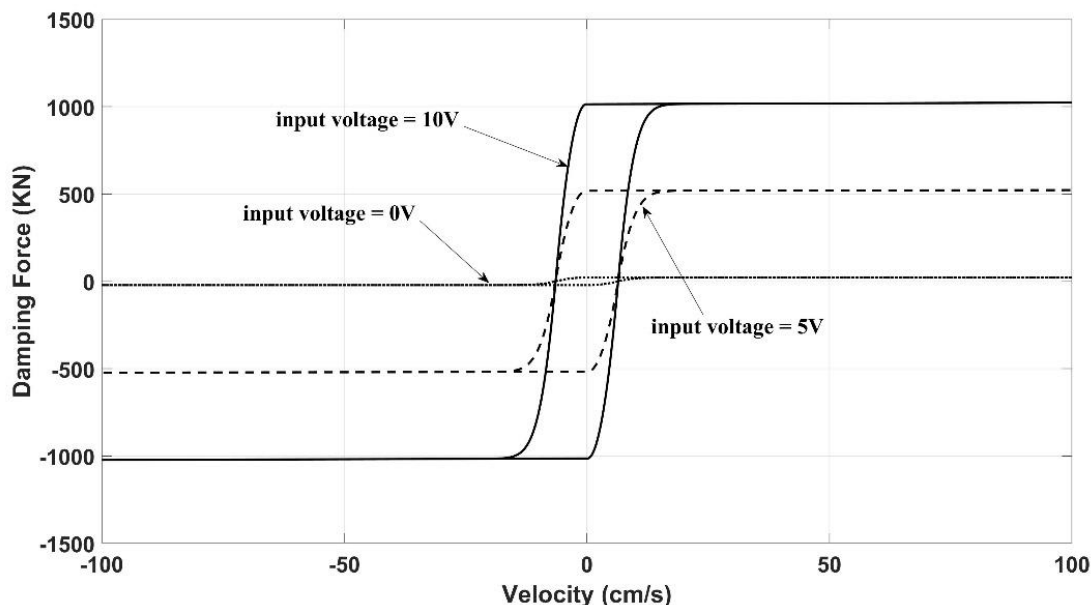
1 Evolutionary Variable

2 Ok

جدول ۱. پارامترهای مورد استفاده در مدل دینامیکی میراگر سیال مغناطیسی

Table 1. Parameters used in the dynamic model of MR damper

$\alpha_a = 1.0872e5 \text{ N/cm}$	$c_{0b} = 44.0 \text{ N s/(cm V)}$	$\gamma = 3 \text{ cm}^{-1}$
$\alpha_b = 4.9616e5 \text{ N/(cm V)}$	$n = 1$	$\beta = 3 \text{ cm}^{-1}$
$c_{0a} = 4.40 \text{ N s/cm}$	$A = 1.2$	$\eta = 50 \text{ s}^{-1}$



شکل ۳. نمودار رفتاری میراگر سیال مغناطیسی

Fig. 3. Hysteresis behaviour of MR damper

توابع عضویت در سیستم‌های فازی نوع ۱ ممکن است بر اساس دیدگاه و تجربه طراح سیستم و یا با استفاده از فرایند بهینه کردن توابع توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی طراحی شوند. در این سیستم‌ها توابع مورد استفاده به هر مقدار ورودی یک عدد مشخص را اختصاص می‌دهند در حالی که در فازی نوع ۲، مقدار عضویت هر ورودی در تابع عضویت به عنوان یک بازه تعیین می‌شود. سیستم فازی نوع ۲ برای حالت‌هایی که تعیین تابع عضویت دقیق مشکل بوده و یا دیدگاه‌های مختلف توسط افراد مختلف در مدل کردن توابع وجود دارد، بسیار مفید و کارآمد واقع می‌شوند. سیستم کنترل فازی از سه بخش کلی تشکیل می‌شود: فازی‌سازی<sup>۱</sup>، موتور استنتاج فازی<sup>۲</sup> و تفکیک

### ۳- سیستم‌های کنترل فازی

عدم قطعیت‌ها از مشخصه‌های مهم و تاثیرگذار در عملکرد انواع مختلف سیستم‌های کنترل می‌باشند. سیستم‌های کنترل ارتعاشات بر پایه تئوری فازی دارای قدرت ذاتی مواجهه با عدم قطعیت‌های موجود می‌باشند. در سیستم‌های کنترل فازی، در نظر گرفتن تاثیر مستقیم عدم قطعیت‌ها به عنوان تفاوت اصلی بین سیستم‌های فازی نوع ۱ و نوع ۲ شناخته می‌شود. در فرایند کنترل ارتعاشات سازه‌ها به کمک منطق فازی، عدم قطعیت‌های مختلفی در فرایند کنترل وجود دارند که می‌توانند بر عملکرد سیستم کنترلی تاثیرگذار باشند. از جمله این عدم قطعیت‌ها می‌توان به اطلاعات دریافتی از حسگرها، طراحی سیستم فازی بر پایه تجربه و اطلاعات افراد خبره و با انجام سعی و خطاهای زیاد و پدیده زلزله و همچنین اطلاعات مورد استفاده در مدل کردن سازه اشاره کرد.

1 Fuzzyfication  
2 Fuzzy Inference Engine

## جدول ۲. جزئیات مربوط به سیستم‌های فازی FIS1

Table 2. Details of FIS1 fuzzy systems

سیستم فازی	توضیحات
FIS1 trimf <sup>۱</sup>	نوع-۱ با تابع عضویت مثلثی FIS1 سیستم استنتاج فازی
FIS1 trapmf <sup>۲</sup>	نوع-۱ با تابع عضویت دوزنقه‌ای FIS1 سیستم استنتاج فازی
FIS1 gaussmf <sup>۳</sup>	نوع-۱ با تابع عضویت گوسی FIS1 سیستم استنتاج فازی
FIS1 gbellmf <sup>۴</sup>	نوع-۱ با تابع عضویت دوزنقه‌ای غیرخطی FIS1 سیستم استنتاج فازی
FIS1 trimf T2 <sup>۵</sup>	نوع-۲ با تابع عضویت مثلثی FIS1 سیستم استنتاج فازی
FIS1 trapmf T2 <sup>۶</sup>	نوع-۲ با تابع عضویت دوزنقه‌ای FIS1 سیستم استنتاج فازی

<sup>1</sup> Triangular Membership Function

<sup>2</sup> Trapezoid Membership Function

<sup>3</sup> Gaussian Membership Function

<sup>4</sup> Bell Membership Function

<sup>5</sup> Triangular Membership Function Type-2

<sup>6</sup> Trapezoid Membership Function Type-2

## جدول ۳. جزئیات مربوط به سیستم‌های فازی FIS2

Table 3. Details of FIS2 fuzzy systems

سیستم فازی	توضیحات
FIS2 trimf	سیستم استنتاج فازی FIS2 نوع-۱ با تابع عضویت مثلثی
FIS2 trapmf	سیستم استنتاج فازی FIS2 نوع-۱ با تابع عضویت دوزنقه‌ای
FIS2 gaussmf	سیستم استنتاج فازی FIS2 نوع-۱ با تابع عضویت گوسی
FIS2 gbellmf	سیستم استنتاج فازی FIS2 نوع-۱ با تابع عضویت دوزنقه‌ای غیرخطی
FIS2 trimf T2	سیستم استنتاج فازی FIS2 نوع-۲ با تابع عضویت مثلثی
FIS2 trapmf T2	سیستم استنتاج فازی FIS2 نوع-۲ با تابع عضویت دوزنقه‌ای

عضویت مختلف، دو سازه مجاور که از طریق میراگر سیال مغناطیسی به یکدیگر متصل شده‌اند به عنوان مطالعه موردی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با توجه به ارتعاشات ناهماهنگ سازه‌ها بر پایه مشخصات دینامیکی متفاوت آن‌ها، جهت جلوگیری از وقوع پدیده برخورد سازه‌های مجاور، قوانین فازی به کار برده شده در این تحقیق بر پایه همسان‌سازی جهت حرکت دو ساختمان حین وقوع زلزله تعیین شده‌اند.

قوانین استنتاج فازی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته‌اند، از مطالعه عبددایم و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۱۶ اقتباس شده‌اند. همان‌گونه که در ۲ و ۳ نشان داده شده است، دو سیستم فازی با ۲۵ و ۴۹ قانون فازی و با در نظر گرفتن توابع عضویت مختلف برای کنترل نیمه‌فعال فازی سازه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است که به اختصار تعریف شده‌اند و در ادامه مقاله از این اسامی اختصاری استفاده شده است.

فازی<sup>۱</sup>. در مرحله اول، مقادیر عددی فازی بر پایه توابع عضویتی<sup>۲</sup> که برای هر ورودی در نظر گرفته شده است، به مقادیر زبانی فازی تبدیل می‌شوند. سپس از طریق قوانین فازی<sup>۳</sup> که توسط طراح سیستم کنترلی تعیین شده‌اند، ارتباط بین متغیرهای ورودی و خروجی سیستم فازی برقرار می‌گردد به این صورت که مقدار خروجی سیستم فازی در این مرحله تصمیم‌گیری می‌شود. در مرحله آخر، متغیر خروجی سیستم کنترلی از زبان فازی خارج شده و به مقدار عددی تبدیل می‌شود. تعریف توابع عضویت مناسب و قوانین استنتاج فازی از عوامل تاثیرگذار در عملکرد سیستم کنترلی فازی می‌باشند.

در این مطالعه جهت بررسی عملکرد کنترلی سیستم‌های فازی با توابع

1 Defuzzyfication

2 Membership Functions

3 Fuzzy Rulebase

جدول ۴. قوانین استنتاجی فازی برای سیستم فازی FIS1

Table 4. Fuzzy inference rules for FIS1 fuzzy system

		DISP2				
		NL	NS	ZE	PS	PL
DISP1	NL	ZE	S	M	L	L
	NS	S	S	M	M	L
	ZE	M	M	ZE	M	M
	PS	L	M	M	S	S
	PL	L	L	M	S	ZE

جدول ۵. قوانین استنتاجی فازی برای سیستم فازی FIS2

Table 5. Fuzzy inference rules for FIS2 fuzzy system

		DISP2						
		NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
DISP1	NL	ZE	VS	S	M	L	VL	VL
	NM	VS	S	S	M	L	L	VL
	NS	S	S	S	M	M	M	L
	ZE	M	M	M	ZE	M	M	M
	PS	L	M	M	M	S	S	S
	PM	VL	L	L	M	S	S	VS
	PL	VL	VL	L	M	S	VS	ZE

مورد نیاز برای میراگر MR جهت تولید نیروی کنترل می‌باشد. نیروی میراگر MR با اعمال ولتاژ بر روی آن کنترل می‌شود. نیروی به دست آمده در هر لحظه از تحلیل لرزه‌ای به سازه‌ها اعمال شده و این حلقه تا اتمام تحلیل لرزه‌ای ادامه می‌یابد.

دو نوع کنترل کننده فازی نوع ۱ و نوع ۲ با توابع عضویت و قوانین فازی مختلف طراحی و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. هنگامی که کنترل کننده‌های فازی دارای قوانین فازی یکسان و توابع عضویت متفاوت باشند، تأثیر انتخاب انواع توابع عضویت در پاسخ‌های دینامیکی تحلیل می‌شود و هنگامی که کنترل کننده‌های فازی دارای توابع عضویت یکسان و قوانین فازی متفاوت باشند، تأثیر قوانین فازی مختلف و تعداد توابع عضویت بر پاسخ‌های دینامیکی سازه‌ها نیز تحلیل می‌شود.

توابع عضویت و همچنین قوانین فازی از عوامل تاثیرگذار در عملکرد سیستم فازی می‌باشند. در این مطالعه دو سیستم فازی با نام‌های FIS1 و FIS2 مورد بررسی قرار گرفته‌اند که قوانین فازی تعریف شده برای سیستم‌های کنترل به ترتیب در جدول ۴ و ۵ نمایش داده شده است.

توابع عضویت نقشی اساسی در عملکرد کلی سیستم فازی ایفا می‌کنند و عناصر سازنده تئوری مجموعه‌های فازی می‌باشند. خاصیت فازی در یک مجموعه فازی توسط توابع عضویت آن تعیین می‌شود. بنابراین شکل توابع عضویت، یک فاکتور پراهمیت در یک سیستم فازی می‌باشد. توابع عضویت ممکن است اشکال مختلفی از قبیل مثلث، دوزنقه، گوسی و غیره داشته باشند ولی تنها شرطی که یک تابع عضویت باید داشته باشد، داشتن مقادیری متغیر بین صفر و یک می‌باشد. علاوه بر انتخاب شکل توابع عضویت، تعداد توابع عضویت نیز بسیار مهم است. به عنوان مثال، برای مدل‌سازی سیستم کنترل دما با منطق فازی، دانستن تعداد توابع عضویت مورد نیاز (کم، متوسط، زیاد و غیره) اهمیت بالایی دارد.

در این مطالعه میراگر سیال مغناطیسی در تراز طبقه بام سازه کوچکتر، دو سازه را به یکدیگر متصل می‌کند و عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. جابه‌جایی طبقه سوم دو سازه به عنوان متغیرهای ورودی در نظر گرفته شده و خروجی بر اساس قوانین تعریف شده در سیستم استنتاج فازی تعیین می‌شود. در واقع خروجی سیستم فازی، ولتاژ ورودی



جدول ۶. متغیرهای زبانی برای متغیر ورودی سیستم FIS1

Table 6. Linguistic variables for input value of FIS1 system

متغیر زبانی فازی	جابه‌جایی
N/P L	مقادیر منفی یا مثبت بزرگ
N/P S	مقادیر منفی یا مثبت کوچک
ZE	صفر

جدول ۷. متغیرهای زبانی برای متغیر خروجی سیستم FIS1

Table 7. Linguistic variables for output value of FIS1 system

متغیر زبانی فازی	ولتاژ
L	مقادیر بزرگ
M	مقادیر متوسط
S	مقادیر کوچک
ZE	صفر

فازی برای پارامترهای خروجی با نام‌های VL، L، M، S، VS، ZE در نظر گرفته شده است که متغیرهای زبانی مربوط به مجموعه‌های ورودی و خروجی به ترتیب در ۸ و ۹ ارائه شده است. برای تغییر مکان به عنوان یک متغیر ورودی، P و N از مقادیر مثبت و منفی استفاده می‌کنند. مقادیر ورودی برای سیستم‌های FIS1 و FIS2، جابه‌جایی طبقه سوم سازه سه طبقه و نه طبقه می‌باشند که با DISP1 و DISP2 در جداول مربوط به قوانین فازی سیستم‌ها نشان داده شده‌اند.

شکل ۴ جزئیات مربوط به متغیرهای سیستم‌های فازی FIS1 و FIS2 با استفاده از توابع عضویت مختلف نشان می‌دهد. توابعی که دارای ۵ مجموعه فازی هستند (توابع نشان داده شده در سمت چپ شکل) مرتبط با سیستم فازی FIS1 و توابعی که دارای ۷ مجموعه فازی هستند (توابع نشان داده شده در سمت راست شکل) مرتبط با سیستم فازی FIS2 هستند. لازم به ذکر است که در هر یک از سیستم‌های فازی، توابع عضویت خروجی از نظر شکل همانند توابع عضویت ورودی در نظر گرفته شده‌اند.

علت اصلی برخورد ساختمان‌های مجاور، ارتعاشات ناهماهنگ سازه‌ها در زمان وقوع زلزله می‌باشد. جهت جلوگیری از ارتعاشات غیرهم‌سو سازه‌ها حین وقوع زلزله، قوانین فازی مورد استفاده در این تحقیق به گونه‌ای تعریف شده‌اند که سازه‌ها در هر لحظه در یک جهت یکسان حرکت کنند. به عنوان مثال، اگر مقدار تغییر مکان ساختمان (۱)، مثبت بزرگ باشد و تغییر مکان ساختمان (۲) منفی بزرگ باشد که شامل یک لرزش غیرهم‌هنگ و خطر بالای برخورد ساختمان‌ها می‌باشد، در این حالت جهت تولید نیروی بیشتر در میراگر، مقدار ولتاژ اعمالی بزرگ خواهد بود. در الگوریتم فازی با نام FIS1 پنج مجموعه فازی برای پارامترهای ورودی با نام‌های PL، PS، ZE، NS، NL و چهار مجموعه فازی برای پارامترهای خروجی با نام‌های L، M، S، ZE در نظر گرفته شده است که متغیرهای زبانی مربوط به مجموعه‌های ورودی و خروجی به ترتیب در جدول ۶ و ۷ ارائه شده است. برای تغییر مکان به عنوان یک متغیر ورودی، P و N از مقادیر مثبت و منفی استفاده می‌کنند. در الگوریتم فازی با نام FIS2 هفت مجموعه فازی برای پارامترهای ورودی با نام‌های NL، NM، NS، ZE، PS، PM، PL و شش مجموعه

#### جدول ۸. متغیرهای زبانی برای متغیر ورودی سیستم FIS2

Table 8. Linguistic variables for input value of FIS2 system

متغیر زبانی فازی	جابه‌جایی
N/P L	مقادیر منفی یا مثبت بزرگ
N/P M	مقادیر منفی یا مثبت متوسط
N/P S	مقادیر منفی یا مثبت کوچک
ZE	صفر

#### جدول ۹. متغیرهای زبانی برای متغیر خروجی سیستم FIS2

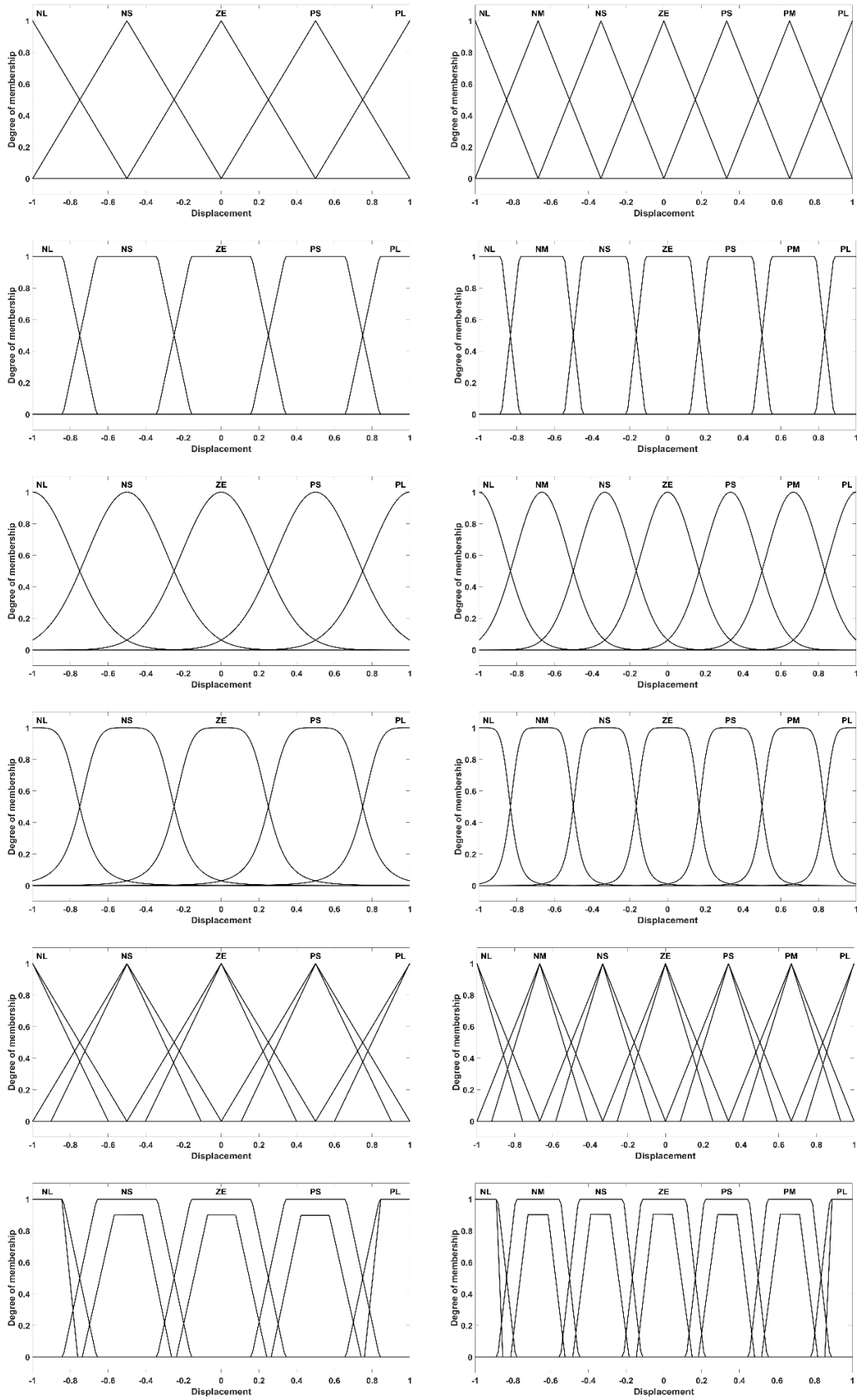
Table 9. Linguistic variables for output value of FIS2 system

متغیر زبانی فازی	ولتاژ
VL	مقادیر بسیار بزرگ
L	مقادیر بزرگ
M	مقادیر متوسط
S	مقادیر کوچک
ZE	صفر

#### ۴- بررسی نتایج

کردن سازه‌ها توسط سیستم‌های فازی متنوع مرتب شده‌اند. نتایج ارائه شده در این بخش برای مطالعه موردی بررسی شده در این مقاله است و برای سازه‌های با شرایط متفاوت نیاز به مطالعه تکمیلی است. جدول ۱۲ و جدول ۱۳ مقادیر مربوط به میانگین معیارهای ارزیابی جابه‌جایی، شتاب، برش پایه و جابه‌جایی نسبی تحت چهار زلزله مورد نظر در بیشینه شتاب‌های مختلف را به ترتیب برای سازه سه طبقه و نه طبقه نشان می‌دهند. علاوه بر این، معیار ارزیابی J5 که در واقع معیاری برای در نظر گرفتن احتمال برخورد دو سازه می‌باشد نیز در جدول ۱۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، سیستم‌های کنترلی با توابع عضویت مختلف توانسته‌اند در تمامی معیارهای ارزیابی و بیشینه شتاب‌های مختلف، با درصدی تفاوت پاسخ‌های لرزه‌ای سازه را کاهش دهند. این وضعیت برای سازه نه طبقه متفاوت می‌باشد. در سازه نه طبقه سیستم‌های کنترلی با توابع عضویت در کاهش جابه‌جایی، شتاب و جابه‌جایی نسبی عملکرد مناسبی داشته‌اند ولی مقادیر برش پایه را کمی افزایش داده‌اند.

جهت ارزیابی تاثیر استفاده از سیستم‌های کنترل مختلف با توابع عضویت متفاوت در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌ها حین زلزله، همان‌گونه که در جدول ۱۰ نشان داده شده است، چهار رکورد زلزله با محتوای فرکانسی متفاوت در نظر گرفته شده است. در جدول ۱۱ معیارهای ارزیابی مربوط به بیشینه پاسخ‌ها که در واقع نسبت پاسخ‌ها در حالت کنترل شده به حالت کنترل نشده می‌باشند، نشان داده شده‌اند. هدف این مطالعه بررسی عملکرد کنترلی سیستم‌های فازی مختلف بوده و توابع عضویت متغیرهای مورد بحث بوده‌اند. از آنجایی که سازه‌های مورد استفاده سازه‌های مجاور متصل شده به وسیله میراگر سیال مغناطیسی بوده و در مورد سازه‌های مجاور پدیده برخورد سازه‌ها حین رخداد زلزله شایع و مورد بحث بوده است لذا سعی شده پاسخ‌های لرزه‌ای دو سازه در حالت کنترل نشده و کنترل شده با یکدیگر بررسی و مقایسه شوند. نتایج ارائه شده با توجه به گستره تحلیل‌های دینامیکی انجام شده تحت چهار زلزله در بیشینه شتاب‌های مختلف و کنترل



شکل ۴. جزئیات مربوط به متغیر ورودی سیستم‌های فازی

Fig. 4. Input variable details of fuzzy systems

جدول ۱۲. معیارهای ارزیابی در سازه سه طبقه برای سیستم های کنترل مختلف

Table 12. the performance criteria in the three-story structure for different control systems

		PGAs (g)									
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
<b>FIS1 Trimf</b>	J1	0.839	0.680	0.707	0.732	0.763	0.783	0.797	0.809	0.818	0.826
	J2	0.984	0.899	0.858	0.888	0.906	0.916	0.923	0.936	0.940	0.942
	J3	0.878	0.799	0.817	0.827	0.850	0.866	0.876	0.881	0.886	0.890
	J4	0.876	0.760	0.802	0.818	0.845	0.862	0.873	0.884	0.892	0.896
<b>FIS1 Trapmf</b>	J1	0.863	0.706	0.747	0.761	0.784	0.803	0.816	0.828	0.836	0.843
	J2	1.034	0.923	0.894	0.918	0.934	0.939	0.945	0.947	0.948	0.950
	J3	0.865	0.798	0.827	0.847	0.866	0.877	0.883	0.888	0.890	0.894
	J4	0.910	0.790	0.847	0.858	0.875	0.890	0.899	0.907	0.912	0.915
<b>FIS1 Gaussmf</b>	J1	0.821	0.684	0.709	0.732	0.762	0.782	0.797	0.809	0.819	0.828
	J2	1.019	0.907	0.860	0.887	0.903	0.912	0.922	0.933	0.939	0.942
	J3	0.864	0.802	0.821	0.833	0.852	0.867	0.875	0.881	0.886	0.890
	J4	0.860	0.770	0.809	0.821	0.845	0.861	0.873	0.885	0.893	0.899
<b>FIS1 Gbellmf</b>	J1	0.848	0.694	0.729	0.750	0.777	0.795	0.810	0.823	0.832	0.839
	J2	0.994	0.903	0.871	0.901	0.917	0.923	0.930	0.942	0.946	0.948
	J3	0.872	0.799	0.818	0.837	0.861	0.873	0.880	0.886	0.890	0.893
	J4	0.880	0.778	0.827	0.840	0.863	0.878	0.889	0.899	0.907	0.911
<b>FIS1 Trimf T2</b>	J1	0.783	0.682	0.709	0.733	0.753	0.769	0.782	0.791	0.798	0.805
	J2	1.024	0.938	0.904	0.918	0.926	0.932	0.945	0.947	0.950	0.953
	J3	0.865	0.812	0.827	0.856	0.871	0.880	0.886	0.891	0.894	0.901
	J4	0.825	0.767	0.803	0.819	0.835	0.846	0.856	0.862	0.866	0.871
<b>FIS1 Trapmf T2</b>	J1	0.791	0.685	0.712	0.732	0.753	0.768	0.781	0.789	0.797	0.802
	J2	1.030	0.932	0.900	0.917	0.926	0.932	0.940	0.942	0.947	0.951
	J3	0.882	0.826	0.826	0.845	0.862	0.875	0.882	0.886	0.890	0.898
	J4	0.842	0.769	0.804	0.821	0.836	0.847	0.856	0.862	0.867	0.870
<b>FIS2 Trimf</b>	J1	0.810	0.678	0.709	0.735	0.765	0.784	0.799	0.810	0.820	0.827
	J2	0.971	0.893	0.861	0.893	0.916	0.918	0.925	0.936	0.940	0.944
	J3	0.881	0.805	0.820	0.841	0.865	0.877	0.882	0.887	0.891	0.894
	J4	0.855	0.762	0.799	0.819	0.848	0.861	0.873	0.883	0.889	0.896
<b>FIS2 Trapmf</b>	J1	0.807	0.685	0.717	0.742	0.768	0.788	0.803	0.815	0.825	0.832
	J2	0.988	0.905	0.875	0.902	0.915	0.922	0.929	0.941	0.944	0.948
	J3	0.840	0.802	0.823	0.846	0.869	0.878	0.883	0.888	0.892	0.895
	J4	0.869	0.765	0.813	0.831	0.853	0.868	0.880	0.889	0.896	0.902
<b>FIS2 Gaussmf</b>	J1	0.802	0.669	0.705	0.733	0.763	0.783	0.798	0.810	0.819	0.827
	J2	0.985	0.896	0.860	0.889	0.905	0.915	0.923	0.935	0.938	0.943
	J3	0.888	0.810	0.827	0.840	0.862	0.873	0.880	0.886	0.890	0.894
	J4	0.832	0.757	0.798	0.816	0.842	0.859	0.871	0.883	0.889	0.896
<b>FIS2 Gbellmf</b>	J1	0.810	0.684	0.716	0.742	0.769	0.788	0.803	0.815	0.824	0.832
	J2	0.973	0.904	0.879	0.904	0.917	0.924	0.929	0.941	0.944	0.947
	J3	0.854	0.797	0.818	0.845	0.867	0.877	0.883	0.888	0.891	0.896
	J4	0.849	0.763	0.814	0.834	0.855	0.870	0.881	0.890	0.896	0.902
<b>FIS2 Trimf T2</b>	J1	0.784	0.657	0.688	0.715	0.742	0.760	0.773	0.785	0.794	0.801
	J2	0.972	0.894	0.873	0.902	0.916	0.923	0.935	0.941	0.943	0.947
	J3	0.868	0.796	0.813	0.840	0.864	0.876	0.882	0.888	0.891	0.895
	J4	0.823	0.734	0.781	0.801	0.823	0.837	0.848	0.856	0.862	0.868
<b>FIS2 Trapmf T2</b>	J1	0.782	0.659	0.691	0.716	0.742	0.760	0.774	0.785	0.794	0.802
	J2	0.981	0.905	0.876	0.903	0.916	0.923	0.936	0.941	0.944	0.947
	J3	0.862	0.797	0.816	0.841	0.865	0.877	0.882	0.888	0.891	0.894
	J4	0.824	0.735	0.785	0.803	0.824	0.838	0.848	0.857	0.863	0.869

جدول ۱۳. معیارهای ارزیابی در سازه نه طبقه برای سیستم های کنترل مختلف

Table 13. the performance criteria in the nine-story structure for different control systems

		PGAs (g)									
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
<b>FIS1 Trimf</b>	J1	0.944	0.865	0.860	0.868	0.876	0.883	0.891	0.901	0.907	0.914
	J2	1.168	1.009	0.958	0.966	0.969	0.974	0.976	0.975	0.976	0.977
	J3	1.151	1.061	1.027	1.021	1.017	1.014	1.012	1.010	1.008	1.007
	J4	0.961	0.898	0.901	0.904	0.908	0.912	0.916	0.917	0.919	0.920
<b>FIS1 Trapmf</b>	J1	0.934	0.866	0.867	0.875	0.886	0.894	0.905	0.913	0.921	0.926
	J2	1.176	0.998	0.981	0.987	0.981	0.975	0.977	0.979	0.980	0.980
	J3	1.140	1.055	1.024	1.020	1.018	1.015	1.013	1.011	1.010	1.010
	J4	0.955	0.907	0.908	0.910	0.918	0.921	0.924	0.926	0.929	0.931
<b>FIS1 Gaussmf</b>	J1	0.949	0.866	0.863	0.871	0.879	0.886	0.896	0.905	0.911	0.918
	J2	1.183	1.010	0.961	0.967	0.968	0.973	0.977	0.976	0.977	0.978
	J3	1.149	1.062	1.030	1.024	1.019	1.015	1.012	1.010	1.009	1.007
	J4	0.966	0.902	0.907	0.907	0.911	0.914	0.918	0.920	0.923	0.923
<b>FIS1 Gbellmf</b>	J1	0.944	0.872	0.867	0.877	0.886	0.893	0.903	0.912	0.919	0.924
	J2	1.179	1.005	0.967	0.976	0.976	0.977	0.979	0.978	0.979	0.980
	J3	1.156	1.060	1.027	1.023	1.019	1.016	1.013	1.011	1.010	1.009
	J4	0.973	0.907	0.910	0.913	0.919	0.922	0.926	0.927	0.929	0.931
<b>FIS1 Trimf T2</b>	J1	0.877	0.822	0.824	0.833	0.841	0.850	0.861	0.868	0.875	0.881
	J2	1.135	0.971	0.975	0.978	0.974	0.976	0.976	0.977	0.977	0.978
	J3	1.126	1.043	1.021	1.016	1.014	1.012	1.009	1.008	1.007	1.006
	J4	0.903	0.857	0.864	0.865	0.870	0.873	0.875	0.877	0.880	0.882
<b>FIS1 Trapmf T2</b>	J1	0.877	0.821	0.822	0.831	0.840	0.849	0.860	0.867	0.873	0.880
	J2	1.137	0.967	0.981	0.984	0.980	0.978	0.975	0.975	0.976	0.977
	J3	1.138	1.039	1.017	1.019	1.013	1.011	1.009	1.008	1.008	1.007
	J4	0.897	0.854	0.863	0.864	0.867	0.870	0.872	0.875	0.879	0.881
<b>FIS2 Trimf</b>	J1	0.938	0.868	0.860	0.866	0.874	0.880	0.890	0.900	0.906	0.913
	J2	1.164	1.012	0.964	0.971	0.971	0.977	0.979	0.977	0.978	0.979
	J3	1.150	1.054	1.025	1.022	1.018	1.014	1.012	1.010	1.009	1.008
	J4	0.957	0.898	0.903	0.902	0.906	0.911	0.915	0.916	0.918	0.919
<b>FIS2 Trapmf</b>	J1	0.939	0.870	0.859	0.866	0.874	0.880	0.892	0.901	0.908	0.915
	J2	1.171	1.013	0.969	0.974	0.975	0.977	0.978	0.976	0.977	0.978
	J3	1.144	1.051	1.025	1.020	1.017	1.014	1.012	1.011	1.010	1.009
	J4	0.962	0.903	0.901	0.903	0.909	0.913	0.915	0.917	0.919	0.920
<b>FIS2 Gaussmf</b>	J1	0.949	0.874	0.861	0.868	0.875	0.881	0.891	0.902	0.907	0.914
	J2	1.168	1.011	0.962	0.968	0.972	0.976	0.979	0.978	0.979	0.979
	J3	1.149	1.058	1.029	1.022	1.018	1.015	1.012	1.010	1.009	1.008
	J4	0.965	0.904	0.905	0.904	0.907	0.912	0.916	0.917	0.919	0.920
<b>FIS2 Gbellmf</b>	J1	0.933	0.869	0.856	0.865	0.872	0.880	0.891	0.901	0.907	0.913
	J2	1.190	1.016	0.971	0.976	0.974	0.977	0.979	0.978	0.979	0.979
	J3	1.134	1.051	1.026	1.020	1.017	1.014	1.012	1.010	1.009	1.008
	J4	0.963	0.900	0.901	0.903	0.907	0.912	0.915	0.917	0.919	0.921
<b>FIS2 Trimf T2</b>	J1	0.908	0.842	0.829	0.836	0.842	0.848	0.860	0.869	0.874	0.880
	J2	1.179	1.015	0.969	0.975	0.974	0.977	0.976	0.978	0.979	0.979
	J3	1.133	1.050	1.024	1.020	1.017	1.014	1.012	1.010	1.009	1.008
	J4	0.931	0.870	0.873	0.872	0.875	0.879	0.882	0.885	0.886	0.888
<b>FIS2 Trapmf T2</b>	J1	0.905	0.840	0.828	0.835	0.842	0.848	0.860	0.868	0.874	0.880
	J2	1.180	1.016	0.970	0.975	0.975	0.978	0.977	0.978	0.979	0.979
	J3	1.132	1.050	1.025	1.020	1.017	1.014	1.012	1.010	1.009	1.008
	J4	0.927	0.869	0.872	0.871	0.875	0.880	0.882	0.885	0.887	0.888

جدول ۱۴. معیارهای ارزیابی J5 برای سیستم های کنترل مختلف

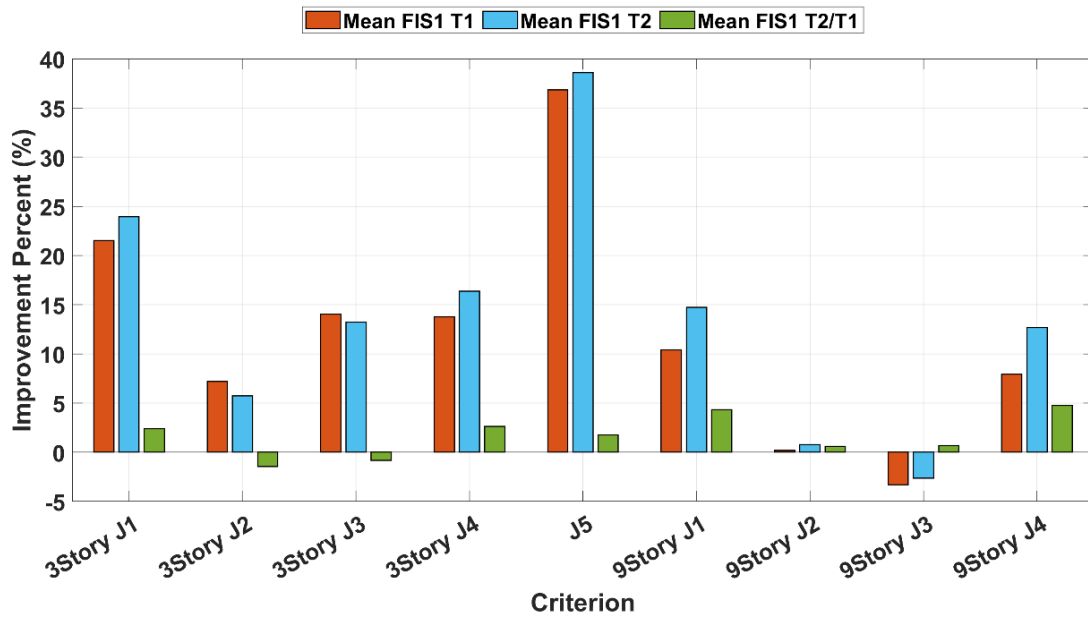
Table 14. J5 performance criteria for different control systems

	PGAs (g)									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
<b>FIS1 Trimf</b>	0.461	0.498	0.553	0.604	0.640	0.665	0.683	0.704	0.718	0.731
<b>FIS1 Trapmf</b>	0.479	0.509	0.565	0.612	0.656	0.680	0.699	0.713	0.726	0.738
<b>FIS1 Gausmf</b>	0.458	0.501	0.557	0.608	0.644	0.668	0.687	0.707	0.723	0.734
<b>FIS1 Gbellmf</b>	0.463	0.505	0.564	0.614	0.650	0.674	0.692	0.713	0.727	0.740
<b>FIS1 Trimf T2</b>	0.488	0.501	0.550	0.593	0.624	0.647	0.666	0.681	0.696	0.708
<b>FIS1 Trapmf T2</b>	0.481	0.496	0.550	0.593	0.623	0.644	0.665	0.679	0.693	0.705
<b>FIS2 Trimf</b>	0.453	0.498	0.556	0.608	0.648	0.667	0.687	0.707	0.722	0.734
<b>FIS2 Trapmf</b>	0.453	0.496	0.554	0.609	0.642	0.667	0.685	0.707	0.722	0.734
<b>FIS2 Gausmf</b>	0.460	0.497	0.558	0.608	0.643	0.668	0.688	0.707	0.722	0.734
<b>FIS2 Gbellmf</b>	0.455	0.500	0.554	0.607	0.642	0.666	0.686	0.705	0.720	0.733
<b>FIS2 Trimf T2</b>	0.447	0.483	0.534	0.585	0.619	0.644	0.664	0.680	0.694	0.706
<b>FIS2 Trapmf T2</b>	0.445	0.484	0.535	0.586	0.619	0.642	0.664	0.680	0.695	0.706

برای سازه سه طبقه و ۴/۳۳ و ۳/۱۷ درصد برای سازه نه طبقه عملکرد مناسب تری داشته باشند که این عملکرد مناسب در کاهش مقادیر جابه جایی باعث شده است که معیار ارزیابی J5 در سیستم FIS1 ۱/۷۴ درصد و در سیستم FIS2 ۲/۲ درصد برای سیستم های فازی نوع ۲ بهتر از سیستم های فازی نوع ۱ بوده باشد.

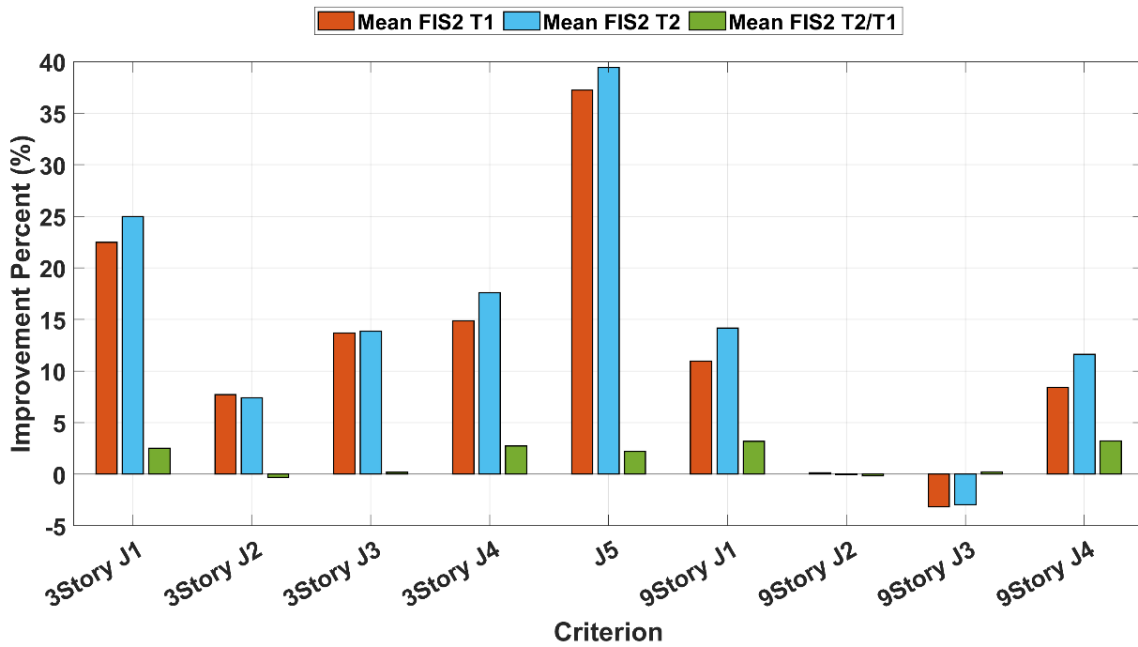
جهت مقایسه سیستم های فازی با توابع عضویت مختلف از نظر شکل و تعداد د شکل ۷ و شکل ۸ نشان داده شده اند. همان گونه که مشاهده می شود، در سیستم FIS1، سیستم های فازی نوع ۱ با توابع عضویت مثلثی و گوسی عملکرد مناسب تری نسبت به سیستم های فازی نوع ۱ با تابع عضویت ذوزنقه ای متناسب با خود داشته اند که این وضعیت در معیارهای ارزیابی مربوط به سازه سه-طبقه مشهودتر است. در سیستم های فازی نوع ۲ وضعیت متفاوت بوده است به گونه ای که تفاوت بین استفاده از توابع عضویت مثلثی و ذوزنقه ای وقتی از توابع عضویت به صورت بازه ای استفاده می کنیم، محدودتر می شود. این نتایج نشان می دهد که وقتی در انتخاب تابع عضویت عدم قطعیت وجود داشته باشد و دانش طراح سیستم فازی برای تعیین نوع تابع عضویت محدود باشد، استفاده از سیستم های فازی نوع ۲ به خوبی عدم قطعیت ها را در خود جای می دهد.

معیار J5 در تمامی سیستم های کنترلی کاهش یافته است که این مسئله نشان می دهد که استفاده از سیستم های کنترلی علاوه بر بهبود پاسخ های لرزه ای، احتمال برخورد دو سازه را نیز تا حد زیادی کاهش داده اند. نکته قابل توجه در بررسی نتایج مربوط به سیستم های کنترل، عملکرد مناسب آن ها در بیشینه شتاب های مختلف است و اینکه در گستره مختلف از شتاب های وارده به سازه ها توانسته اند وظیفه خود برای تصمیم گیری مقدار ولتاژ و در نتیجه اعمال نیروی کنترلی متناسب با تحریک وارده را به خوبی انجام دهند. با بررسی دقیق تر نتایج سیستم های کنترلی مشخص می شود که سیستم های کنترل نوع ۲ با تابع عضویت بازه ای، عملکرد بهتری در مقایسه با سیستم های کنترل نوع ۱ داشته اند. جهت بررسی بیشتر این موضوع، نمودارهای مربوط به میانگین درصد بهبود سیستم های کنترل نوع ۱ و نوع ۲ در سیستم های FIS1 و FIS2 به ترتیب شکل ۵ و شکل ۶ نشان داده شده اند. همانطور که با نمودار میله ای سبز رنگ نشان داده شده است، به طور کلی سیستم های فازی نوع ۲ نسبت به نوع ۱ عملکرد بهتری در بهبود پاسخ ها دو سازه داشته اند. به عنوان مثال، در سیستم های FIS1 و FIS2، به صورت میانگین، سیستم های نوع ۲ نسبت به نوع ۱ در بهبود مقادیر حداکثر جابه جایی طبقه بام سازه سه طبقه به ترتیب به میزان ۲/۳۹ و ۲/۵ درصد



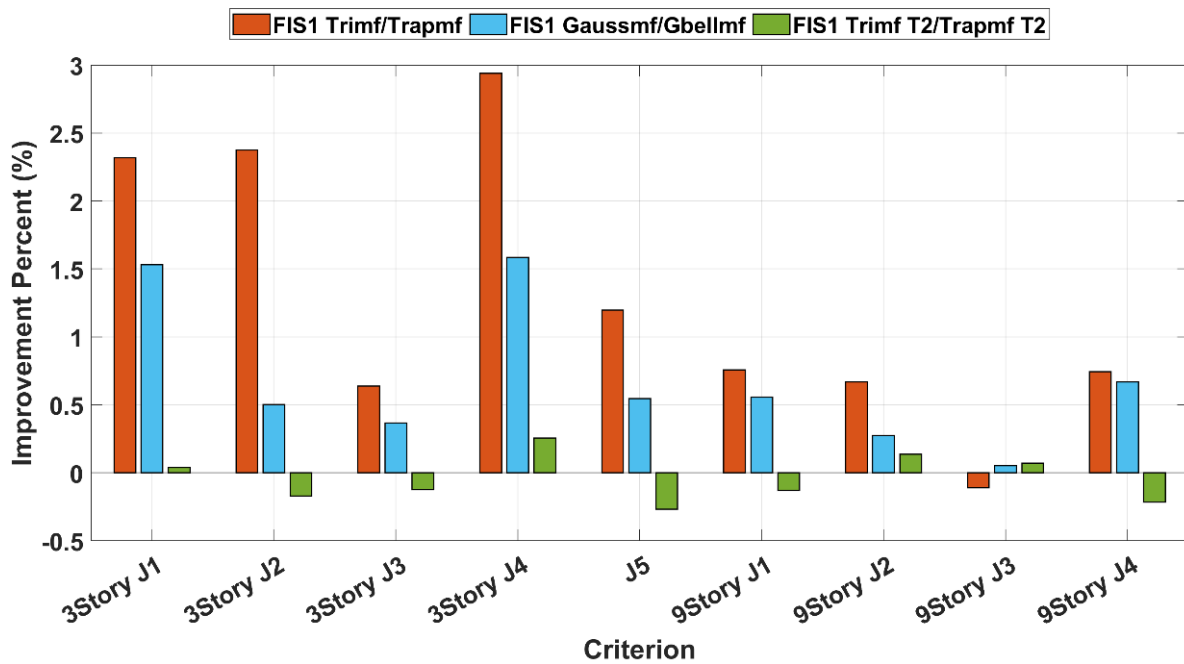
شکل ۵. میانگین درصد بهبود سیستم‌های فازی FIS1 نوع ۱ و نوع ۲

Fig. 5. Average improvement percentage of FIS1 type 1 and type 2 fuzzy systems



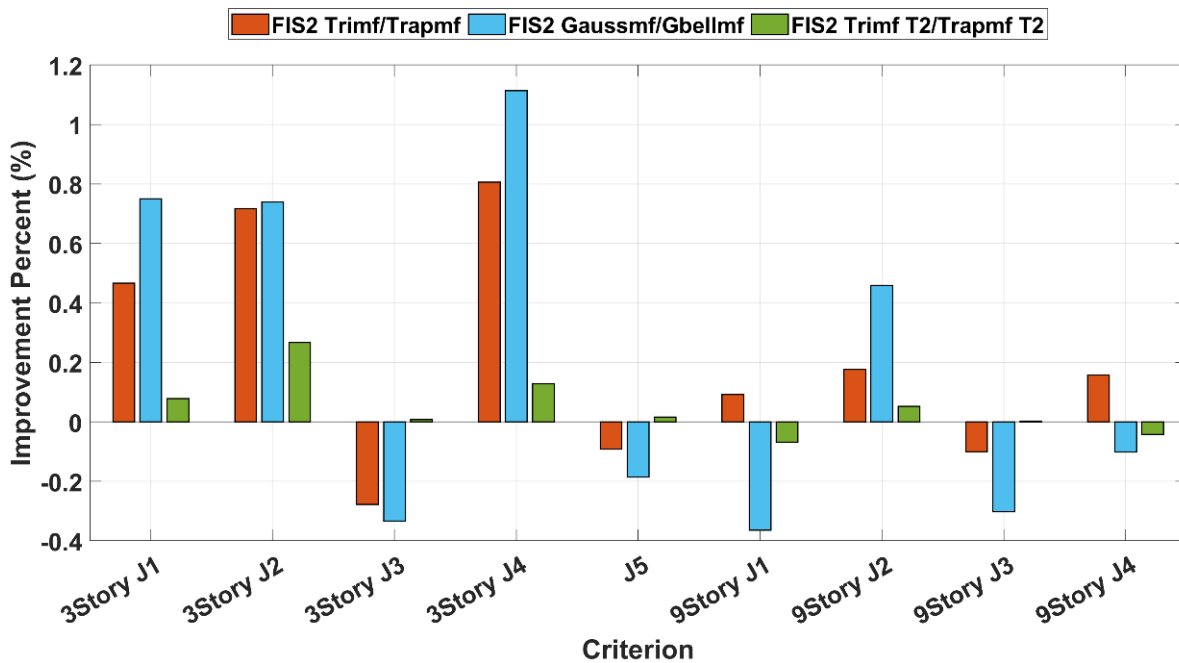
شکل ۶. میانگین درصد بهبود سیستم‌های فازی FIS2 نوع ۱ و نوع ۲

Fig. 6. Average improvement percentage of FIS2 type 1 and type 2 fuzzy systems



شکل ۷. مقایسه سیستم فازی نوع ۱ و نوع ۲ FIS1 با توابع عضویت مختلف

Fig. 7. Comparison of type 1 and type 2 FIS1 fuzzy system with different membership functions



شکل ۸. مقایسه سیستم فازی نوع ۱ و نوع ۲ FIS2 با توابع عضویت مختلف

Fig. 8. Comparison of type 1 and type 2 FIS2 fuzzy system with different membership functions



جدول ۱۵. میانگین درصد بهبود معیارهای ارزیابی برای سیستم‌های کنترلی در سازه سه و نه طبقه

Table 15. Average percentage improvement of evaluation criteria for control systems in three and nine-story structures

سیستم کنترل	3-story					9-story			
	J1	J2	J3	J4	J5	J1	J2	J3	J4
trimf-FIS1	22.45	8.07	14.3	14.91	37.42	10.89	0.52	-3.28	8.46
trapmf-FIS1	20.13	5.69	13.66	11.97	36.23	10.13	-0.15	-3.17	7.71
gaussmf-FIS1	22.56	7.76	14.29	14.85	37.13	10.58	0.3	-3.38	8.1
gbellmf-FIS1	21.03	7.26	13.92	13.27	36.58	10.02	0.02	-3.43	7.44
trimf-T2-FIS1	23.96	5.64	13.16	16.5	38.45	14.67	0.83	-2.62	12.55
trapmf-T2-FIS1	23.92	5.81	13.28	16.25	38.72	14.8	0.69	-2.69	12.77
trimf-FIS2	22.63	8.03	13.56	15.14	37.21	11.05	0.3	-3.22	8.54
trapmf-FIS2	22.16	7.31	13.84	14.34	37.3	10.96	0.12	-3.12	8.38
gaussmf-FIS2	22.93	8.11	13.51	15.57	37.13	10.76	0.28	-3.31	8.32
gbellmf-FIS2	22.17	7.38	13.85	14.46	37.32	11.13	-0.18	-3	8.43
trimf-T2-FIS2	25.02	7.54	13.87	17.66	39.45	14.12	-0.02	-2.96	11.59
trapmf-T2-FIS2	24.94	7.27	13.86	17.53	39.43	14.19	-0.07	-2.96	11.63

و با بازه یکسان تعریف شده‌اند. در مسائلی که مقادیر ورودی به گونه‌ای می‌باشند که در محدوده‌های مشخصی از بازه کلی ورودی سیستم فازی، برحسب مطالعه موردی مورد نظر، تراکم بیشتری وجود دارد در محدوده‌های مورد نظر می‌توان با استفاده از توابع دوزنقه‌ای مقدار عضویت بیشتری به آن‌ها اختصاص داده شود. در این مطالعه، مقادیر جابه‌جایی طبقه سوم دو سازه به عنوان ورودی سیستم فازی مورد استفاده قرار می‌گیرد که این مقادیر به صورت پیوسته بر اساس جهت حرکت سازه‌ها در بازه‌های مختلف بین مقادیر مثبت و منفی تغییر می‌کنند. در این مطالعه موردی، با بازه‌های خاص که وجود مقادیر ورودی در آن بازه‌ها اهمیت بیشتری داشته و مقدار درجه عضویت بیشتری به آن‌ها اختصاص داده شود، مواجه نیستیم و مقادیر پیوسته و با درجه اهمیت یکسان برای ما اهمیت دارند. بنابراین استفاده از توابع عضویت مثلثی و گوسی عملکرد مناسب‌تری برای سیستم کنترل فازی در نظر گرفته شده جهت محاسبه ولتاژ اعمالی به میراگر سیال مغناطیسی به همراه داشته است.

جهت ارائه دید کلی‌تر نسبت به عملکرد کنترلی توابع عضویت در تعیین درجه عضویت، میانگین درصد بهبود پاسخ‌های لرزه‌ای سازه تحت چهار زلزله اعمالی در بیشینه شتاب‌های مختلف در شکل ۸ نشان داده شده‌اند. همان‌گونه که در بخش‌های قبلی اشاره شد، به صورت کلی سیستم‌های فازی نوع ۲ عملکرد کنترلی مناسب‌تری را در کاهش ارتعاشات سازه‌ها نسبت به سیستم‌های فازی نوع ۱ از خود نشان داده‌اند.

موارد ذکر شده برای سیستم فازی FIS1، تقریباً در سیستم فازی FIS2 نیز مشاهده می‌شود با این تفاوت که در این حالت به علت استفاده از مجموعه فازی بیشتر، حساسیت سیستم فازی به شکل تابع عضویت کاهش می‌یابد به گونه‌ای که در برخی از معیارهای ارزیابی سیستم‌های فازی با تابع عضویت مثلثی عملکرد بهتری نسبت به دوزنقه‌ای داشته‌اند و در مواردی برعکس. علاوه بر این وقتی از سیستم فازی با تعداد بیشتر توابع عضویت (FIS2)، استفاده می‌کنیم مقدار تفاوت بین تابع عضویت‌های انتخاب شده نیز محدودتر می‌شود به طوری که در سیستم FIS1، بیشترین تفاوت بین توابع مثلثی و دوزنقه‌ای در معیار J4 سازه سه طبقه با مقدار تفاوت ۲/۹۴ درصد بوده است در حالی که در سیستم فازی FIS2، بیشترین تفاوت بین توابع گوسین و دوزنقه‌ای غیرخطی در معیار J4 سازه سه طبقه با مقدار تفاوت ۱/۱۱ درصد بوده است.

در حالی که در توابع عضویت مثلثی و گوسی، فقط در قله تابع، درجه عضویت یک اختصاص داده می‌شود، در توابع عضویت دوزنقه‌ای خطی و دوزنقه‌ای غیرخطی این فرایند متفاوت می‌باشد. در توابع دوزنقه‌ای در بازه‌ای که در محدوده قاعده بالای دوزنقه قرار می‌گیرد، مقدار عضویت، عدد یک در نظر گرفته می‌شود و هر چه از قاعده بالای دوزنقه فاصله می‌گیریم مقدار درجه عضویت متغیر زبانی مربوطه از عدد یک فاصله گرفته و به صفر میل می‌کند. همانند توابع مثلثی و گوسی، این فرایند برای تمامی متغیرهای زبانی صدق می‌کند زیرا توابع عضویت برای هر مقدار ورودی به صورت متقارن

## ۵- نتیجه گیری

با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل‌های دینامیکی انجام شده بر روی سازه‌های معیار متصل شده با میراگر سیال مغناطیسی، نتیجه می‌شود که سیستم‌های فازی استفاده شده برای محاسبه ولتاژ میراگر، عملکرد مناسبی داشته و باعث بهبود پاسخ سازه‌ها در برابر بارگذاری لرزه‌ای شده‌اند. همچنین بر اساس مقایسه سیستم‌های فازی نوع ۱ و نوع ۲، به طور کلی سیستم‌های فازی نوع ۲ که از توابع عضویت به صورت بازه‌ای استفاده می‌کنند، عملکرد مناسب‌تری در کاهش پاسخ‌های سازه‌ها در مقایسه با سیستم‌های فازی نوع ۱ داشته‌اند. همچنین سیستم‌های فازی طراحی شده در زلزله‌های حوزه دور نسبت به زلزله‌های حوزه نزدیک، عملکرد کنترلی بهتری را از خود نشان داده‌اند.

با بررسی معیارهای ارزیابی مورد استفاده برای مقایسه توابع عضویت مختلف، مشخص می‌شود که سیستم‌های فازی با توابع عضویت مثلثی بهترین عملکرد را در مقایسه با سایر توابع عضویت در بهبود عملکرد سازه‌ها در مقابل زلزله داشته‌اند. توابع عضویت گوسی نیز عملکردی نزدیک به توابع عضویت مثلثی از خود نشان داده‌اند. همچنین با بررسی نتایج به دست آمده برای دو سیستم فازی با تعداد مجموعه‌های فازی متفاوت، مشاهده شده است که در سیستم فازی با تعداد بیشتر مجموعه‌های فازی، حساسیت سیستم فازی به انتخاب تابع عضویت کاهش می‌یابد.

## منابع

- IEEE, 2000, pp. 387-392.
- [4] A. Esminejad, A. Aoki, G. Lambert-Torres, Particle swarm optimization for fuzzy membership functions optimization, in: IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, IEEE, 2002, pp. 6 pp. vol. 3.
- [5] J. Zhao, B.K. Bose, Evaluation of membership functions for fuzzy logic controlled induction motor drive, in: IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society. IECON 02, IEEE, 2002, pp. 229-234.
- [6] J.G. Monicka, N.G. Sekhar, K.R. Kumar, Performance evaluation of membership functions on fuzzy logic controlled ac voltage controller for speed control of induction motor drive, International Journal of Computer Applications, 13(5) (2011) 8-12.
- [7] D. Wu, Twelve considerations in choosing between Gaussian and trapezoidal membership functions in interval type-2 fuzzy logic controllers, in: 2012 IEEE International Conference on Fuzzy Systems, IEEE, 2012, pp. 1-8.
- [8] P. Jouei, S. Pourzeynali, Optimization of fuzzy rules and shape of fuzzy logic membership functions in semi-active control of buildings using variable stiffness, (2013). (in persian)
- [9] O.A.M. Ali, A.Y. Ali, B.S. Sumait, Comparison between the effects of different types of membership functions on fuzzy logic controller performance, International Journal, 76 (2015) 76-83.
- [10] S. Kim, M. Lee, J. Lee, A study of fuzzy membership functions for dependence decision-making in security robot system, Neural Computing and Applications, 28(1) (2017) 155-164.
- [11] M. Babanezhad, A.T. Nakhjiri, A. Marjani, M. Reza kazemi, S. Shirazian, Evaluation of product of two sigmoidal membership functions (psigmf) as an ANFIS membership function for prediction of nanofluid temperature, Scientific Reports, 10(1) (2020) 1-13.
- [12] T. Sutikno, A.C. Subrata, A. Elkhateb, Evaluation of fuzzy membership function effects for maximum power
- [1] S.N. Mandal, J.P. Choudhury, D. De, S.B. Chaudhuri, Role of membership functions in fuzzy logic for prediction of shoot length of mustard plant based on residual analysis, World academy of science, engineering and technology, 38 (2008) 378-384.
- [2] A. Sadollah, Introductory Chapter: Which membership function is appropriate in fuzzy system?, in: Fuzzy Logic Based in Optimization Methods and Control Systems and its Applications, 2018.
- [3] G. Lambert-Torres, M.A. Carvalho, L.E.B. Da Silva, J.O. Pinto, Fitting fuzzy membership functions using genetic algorithms, in: Smc 2000 conference proceedings. 2000 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. 'Cybernetics evolving to systems, humans, organizations, and their complex interactions' (cat. no. 0,

- [15] O. Yoshida, S.J. Dyke, Seismic control of a nonlinear benchmark building using smart dampers, *Journal of engineering mechanics*, 130(4) (2004) 386-392.
- [16] S.-Y. Ok, D.-S. Kim, K.-S. Park, H.-M. Koh, Semi-active fuzzy control of cable-stayed bridges using magneto-rheological dampers, *Engineering structures*, 29(5) (2007) 776-788.
- [17] M. Abdeddaim, A. Ounis, N. Djedoui, M. Shrimali, Reduction of pounding between buildings using fuzzy controller, (2016).
- point tracking technique of photovoltaic system, *IEEE Access*, 9 (2021) 109157-109165.
- [13] R. Pelalak, A.T. Nakhjiri, A. Marjani, M. Rezakazemi, S. Shirazian, Influence of machine learning membership functions and degree of membership function on each input parameter for simulation of reactors, *Scientific Reports*, 11(1) (2021) 1-11.
- [14] Y. Ohtori, R. Christenson, B. Spencer, S. Dyke, Benchmark control problems for seismically excited nonlinear buildings, *Journal of engineering mechanics*, 130(4) (2004) 366-385.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Bahmaei, S. M. Zahrai, *Effect of selecting different membership functions on semi-active fuzzy control of adjacent buildings with MR damper*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(12) (2023) 4709-4728.

DOI: 10.22060/ceej.2022.21185.7644



