

## Semi-active control of three-story benchmark structure using LQG algorithm with a fuzzy-genetic system

Hossein Fazaeli Hosseini Nejad<sup>1</sup>, Abbas Karamodin<sup>2\*</sup>

1- Ph.D. Candidate in Structural Engineering, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- Associate Professor, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

### ABSTRACT

Damages of natural disasters such as earthquakes has led engineering sciences to research and expand the use of earthquake-resistant systems. Semi-active control systems have been considered due to their ability to change the mechanical properties of their system and the use of limited energy sources. On the other hand, taking advantage of soft computing and fuzzy inference systems due to the compensation for existing uncertainties, considerably helps to reduce structure's responses during earthquakes. In this paper, a method for controlling a three-story nonlinear benchmark structure equipped with an MR magnetic damper is presented. The required voltage of the damper is obtained from the design of a LQG linear control system with a fuzzy inference system. In this system, the linear control force of LQG and the force of the previous step of the damper enter the Takagi-Sugeno fuzzy system and the desired voltage of the damper is obtained. In order to optimize the controller performance, the rules of the fuzzy inference system are taught by a genetic algorithm. Modeling of the damper is based on the Bouc-wen model. The results of the evaluation criteria and time history charts show the high efficiency of the proposed controller in reducing seismic responses against other proposed systems.

### ARTICLE INFO

Receive Date: 08 June 2020

Revise Date: 25 October 2020

Accept Date: 14 November 2021

**Keywords:** Structural control  
semi-active control  
fuzzy logic  
LQG controller  
Genetic algorithm

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2021.234410.2164

\*Corresponding author: Abbas Karamodin  
Email address: a-karam@um.ac.ir

## کنترل نیمه فعال سازه سه طبقه محک به کمک الگوریتم LQG همراه با یک سیستم فازی-ژنتیک

سید حسین فضائلی حسینی نژاد<sup>۱</sup>، عباس کرم الدین<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی سازه، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

### چکیده

خسارات حوادث طبیعی مانند زلزله، علوم مهندسی را به تحقیق و گسترش استفاده از سیستم های مقاوم در برابر زلزله سوق داده است. سیستم های کنترل نیمه فعال به دلیل توانایی تغییر خصوصیات مکانیکی سیستم خود و استفاده از منابع انرژی محدود مورد توجه قرار گرفته اند. از طرفی بهره جویی از محاسبات نرم و سیستم های استنتاج فازی به دلیل جبران عدم قطعیت های موجود، کمک شایانی به کاهش پاسخ های سازه در حین زلزله دارد. در این مقاله روشی برای کنترل سازه سه طبقه غیرخطی محک که مجهز به میراگر مغناطیسی MR می باشد، ارائه شده است. ولتاژ مورد نیاز میراگر به کمک یک سیستم کنترل کننده خطی LQG به همراه یک سیستم استنتاج فازی بدست می آید. در این سیستم نیروی کنترل کننده خطی LQG و نیروی گام قبل میراگر وارد سیستم فازی تاکاگی سوگنو شده و ولتاژ مطلوب میراگر حاصل می شود. به منظور بهینه سازی عملکرد کنترل کننده، قوانین سیستم استنتاج فازی توسط الگوریتم ژنتیک آموزش داده می شود. مدل سازی میراگر نیز بر مبنای مدل بوک-ون صورت گرفته است. نتایج حاصل از معیارهای ارزیابی و نمودارهای تاریخچه زمانی نشان از کارایی بالای کنترل کننده پیشنهادی در کاهش پاسخهای لرزه ای در مقایسه با دیگر سیستم های پیشنهاد شده دارد.

**کلمات کلیدی:** کنترل سازه ها، کنترل نیمه فعال، منطق فازی، میراگر MR، کنترل کننده LQG، الگوریتم ژنتیک.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	<a href="https://doi.org/10.22065/JSCE.2021.234410.2164">https://doi.org/10.22065/JSCE.2021.234410.2164</a>	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/JSCE.2021.234410.2164	۱۴۰۱/۵/۰۱	۱۴۰۰/۸/۲۳	۱۴۰۰/۸/۲۳	۱۳۹۹/۸/۰۴	۱۳۹۹/۳/۱۹
عباس کرم الدین					*نویسنده مسئول:	
<a href="mailto:a-karam@um.ac.ir">a-karam@um.ac.ir</a>					پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

دغدغه اصلی مهندسی زلزله، جست‌وجوی راهی برای کاهش مخاطرات لرزه‌ای و بهبود عملکرد سیستم‌های مقاوم در برابر زلزله می‌باشد. به‌کارگیری سیستم‌های کنترل غیرفعال، نیمه فعال، فعال و ترکیب این‌ها کمک شایانی در جهت کاهش ارتعاشات و اثرات ثانویه زلزله دارد. سیستم‌های کنترل نیمه فعال به دلیل بهره‌گیری از توان خارجی کم و قابلیت اطمینان بالا مورد توجه قرار گرفته است. مزیت اصلی سیستم‌های نیمه فعال، عملکرد آن به عنوان یک سیستم غیرفعال در صورت از دست رفتن سیستم کنترل و فرمان دهی است. میراگر مغناطیسی MR با بهره‌جویی از یک سیال قابل تنظیم، نیروی کنترلی مناسبی را برای سازه به وجود می‌آورد. چالش اصلی این سیستم بدست آوردن ولتاژ مناسب میراگر است.

منطق فازی<sup>۱</sup> با صورت بندی ریاضی مفاهیم، متغیرها و سیستم‌های نادقیق، تحولی در علوم مهندسی ایجاد کرد. در شرایط عدم اطمینان این منطق بدون استفاده از پیچیدگی‌های ریاضی قادر به تصمیم‌گیری در بسیاری از مسائل خواهد بود. در این بین مجموعه‌های کلاسیک صفر و یک جای خود را به مجموعه‌های فازی با درجه‌ای از درستی بین صفر و یک می‌دهد. کنترل کننده فازی به دلیل توانایی ذاتی خود در کنترل رفتار سازه در پژوهش‌های زیادی مورد استفاده قرار گرفته است. ریسی و همکاران یک جایگزین برای مدل سازی معکوس رفتارهای دینامیکی یک میراگر مغناطیسی MR با استفاده از یک مدل فازی تاکاگی-سوگنو ارائه دادند [۱]. پژوهشگران دیگری استفاده از منطق فازی را برای کنترل فعال سازه‌ی ۱۵ طبقه پیشنهاد دادند [۲]. نتایج آنها نشان داد که کنترل کننده فازی پیشنهادی دارای پتانسیل بالایی در کنترل پاسخ‌های سازه است. در پژوهش دیگری، استفاده از یک سیستم کنترل نیمه فعال همراه با یک کنترل کننده فازی برای یک سازه مجهز به جداساز مورد بررسی قرار گرفت [۳]. سیستم پیشنهادی آن‌ها راه حلی برای کاهش اثر تشدید در فرکانسهای کم بود. عزیزی و همکاران مدل بهینه کنترل کننده فازی با الگوریتم ترکیبی جای-مورچه گیر آرا بر روی سازه ۳ و ۲۰ طبقه غیرخطی محک پیاده سازی کردند [۴]. آنها دریافتند که الگوریتم ترکیبی ذکر شده، نسبت به سایر روشهای بهینه سازی موثرتر است. پژوهش‌های ذکر شده، عملکرد کنترل کننده فازی را در سازه‌های مختلف نشان می‌دهد.

الگوریتم ژنتیک<sup>۲</sup> عضوی از خانواده‌ی الگوریتم‌های جست‌وجوی الهام‌گرفته از اصول تکامل در طبیعت هستند. با تقلید از فرآیند انتخاب طبیعی و تولید مثل، الگوریتم ژنتیک می‌تواند راه‌حلی با کیفیتی بالا برای مشکلات مختلف شامل جست‌وجو، بهینه‌سازی و یادگیری را تولید کند. در عین حال، قیاس آن‌ها با تکامل طبیعی به الگوریتم ژنتیک اجازه می‌دهد تا بر برخی از موانعی که با الگوریتم‌های جست‌وجو و بهینه‌سازی سنتی مواجه هستند، غلبه کند [۵]. کرم الدین و همکاران یک مدل شبکه عصبی بهینه شده با الگوریتم ژنتیک را برای کاهش شاخص خسارت پارک و انگ سازه در برابر زلزله پیشنهاد دادند [۶]. پژوهشی دیگر با هدف بهینه‌سازی طراحی کنترل کننده فازی توسط الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی توام هزینه و کاهش پاسخ دو سازه مجاور هم که مجهز به میراگر MR بودند، پیشنهاد شد [۷]. حجازی و همکاران با بهینه‌کردن پارامترهای کنترل سازه غیرفعال به کمک الگوریتم چند هدفه ژنتیک، توانستند پاسخ سازه را کاهش دهند [۸]. کرم الدین و همکاران یک روش کنترل نیمه فعال برای یک سازه محک مجهز به یک میراگر مغناطیسی MR ارائه دادند. در پژوهش آنها از کنترل کننده LQG<sup>۴</sup> برای تخمین نیروی کنترل بهینه استفاده شده است. ولتاژ مورد نیاز برای میراگر MR برای تولید نیروی کنترل برآورد شده توسط کنترل کننده LQG، توسط یک الگوریتم کنترل پیش‌بینی شبکه عصبی (NNPC) محاسبه شده است. سپس سیستم‌های LQG و NNPC برای آموزش یک کنترل کننده عصبی نیمه فعال استفاده شد (SANC)، که ولتاژ کنترل لازم را برای فعال کردن میراگر MR تولید می‌کند [۹]. هاشمی و همکاران یک مدل کنترل نیمه فعال شبکه عصبی موجک را برای تعیین دقیق ولتاژ ورودی محاسبه شده به میراگرهای MR پیشنهاد کردند تا بتواند نیروی کنترل بهینه در سازه‌ها را تولید کند [۱۰].

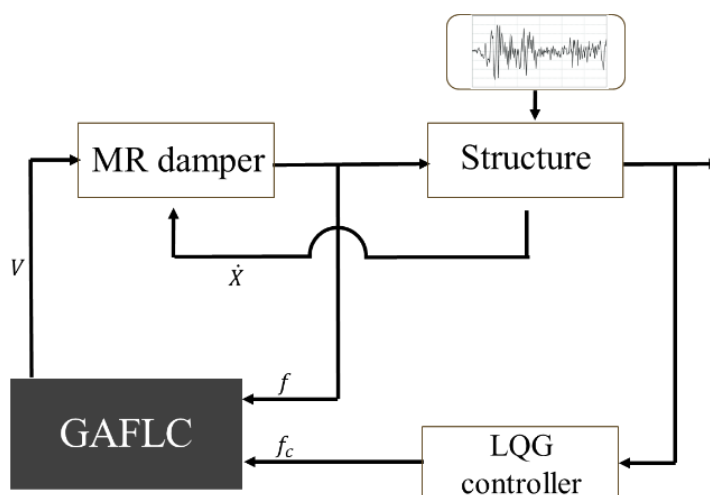
<sup>1</sup> Fuzzy logic

<sup>2</sup> Jaya-Antlion

<sup>3</sup> Genetic algorithm

<sup>4</sup> Linear quadratic gaussian

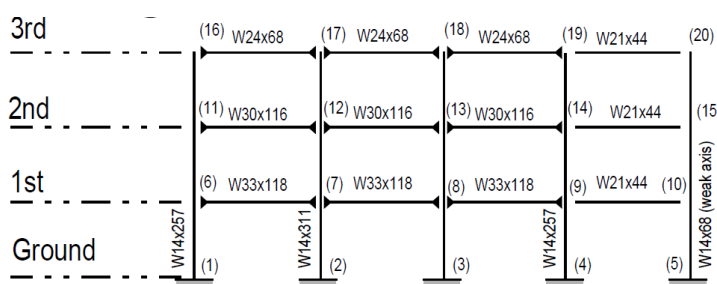
در این پژوهش یک کنترل کننده ترکیبی که شامل یک کنترل کننده خطی LQG و یک کنترل کننده فازی بهینه شده می‌باشد، طراحی شده است. هدف استفاده از کنترل کننده فازی، تعیین ولتاژ مورد نیاز میراگر MR و جبران خطای موجود بین نیروی کنترل کننده خطی و سازه غیرخطی است. مطابق شکل ۱ در این سیستم پیشنهادی شتاب طبقات وارد کنترل کننده خطی LQG شده و سپس نیروی مورد نیاز برای کنترل سازه بدست می‌آید. نیروی کنترل کننده خطی LQG و نیروی تولید شده توسط میراگر MR در گام قبل وارد کنترل کننده فازی تاکاگی سوگنو می‌شود. هر طبقه کنترل کننده فازی مربوط به خود را دارد ولی قوانین برای هر سه ساختار فازی یکسان است. پارامترهای خروجی مدل فازی توسط الگوریتم ژنتیک بگونه ای تعیین می‌شوند که تابع هدف موردنظر کمینه شود. معیار بهینه سازی، کمینه کردن بیشینه نسبت تغییر مکان سازه کنترل شده به کنترل نشده است. پس از آموزش سیستم، کارایی کنترل کننده در زلزله های مختلف مورد ارزیابی و تحلیل قرار می‌گیرد.



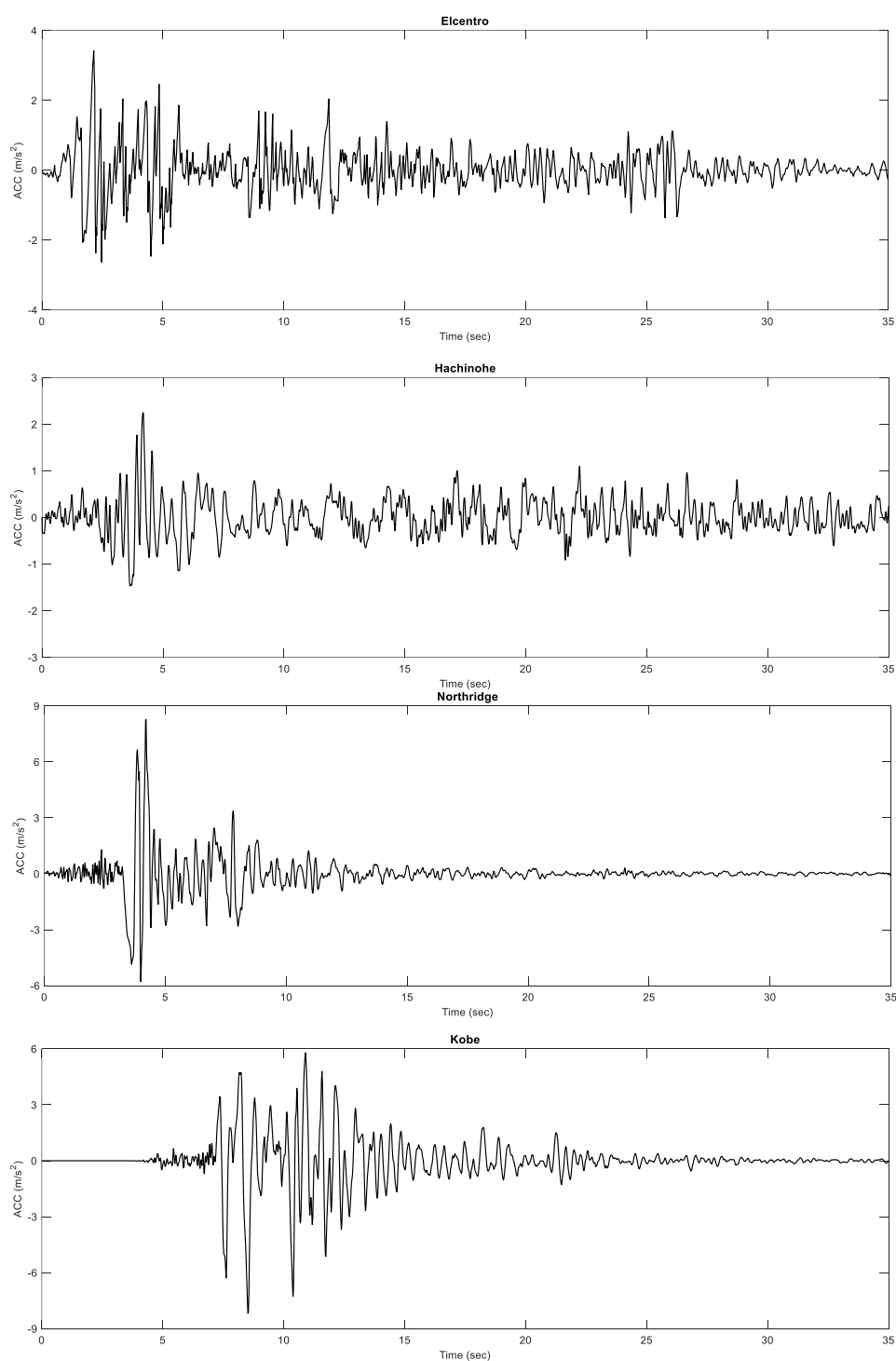
شکل ۱: راهبرد کنترل

## ۲- سازه معیار

در سال ۲۰۰۴ سازه های غیرخطی معیار برای مقایسه هرچه بهتر الگوریتم های پیشنهادی محققین، معرفی شدند [۱۱]. مدل مورد استفاده در این پژوهش سازه غیرخطی معیار ۳ طبقه می‌باشد که در شکل ۲ به نمایش درآمده است. ابعاد پلان این سازه ۳۶/۵۸ متر در ۵۴/۸۷ متر می‌باشد. ارتفاع هر طبقه ۳/۹۶ متر و ارتفاع کلی ساختمان ۱۱/۹۶ متر می‌باشد. سیستم قاب پیرامونی این سازه از نوع خمشی بوده که با میراگرهای مغناطیسی MR مجهز شده است. مدلسازی این سازه در نرم افزار متلب صورت گرفته است. در تحلیل سازه از روش عددی نیومارک-بتا بهره جوئی شده است. در این سازه به دلیل محدودیت در ظرفیت میراگر MR، سه محرک در طبقه اول و دو محرک در طبقات دوم و سوم به کار گرفته شده است [۱۰]. شتاب نگاشت های ال سنترو، هاجینوهه، نورثریچ و کوبه به دلیل ویژگی های خاص و محتوای فرکانسی متفاوت آنها مورد استفاده قرار گرفته‌اند (شکل ۳). در هر طبقه یک سنسور تعبیه شده که وظیفه اندازه گیری نیرو و شتاب طبقه را بر عهده دارد. اندازه گیری نیرو در میراگر نیز به کمک یک نیرو سنج صورت می‌گیرد [۱۲].



شکل ۲: توصیف ساختمان ۳ طبقه محک برای ارزیابی در این مطالعه



شکل ۳: شتاب نگاشت های ال سنترو، هاجینوهه، نورثریج و کوبه

مدلسازی مناسب دستگاه کنترلی برای پیش بینی رفتار سیستم از اهمیت بالائی برخوردار است. یک مدل ساده مکانیکی براساس مدل بوک-ون<sup>۵</sup> در کنار یک میراگر ویسکوز برای مدلسازی دقیق رفتار برشی میراگر MR پیشنهاد شده است [۱۳، ۱۴]. معادلات ۱ تا ۴ معادلات حاکم بر مدلسازی این میراگر می باشند.

<sup>5</sup> Bouc-wen

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

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

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

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

در این روابط  $x$  جابجائی نسبی دو سر میراگر و  $z$  متغیر تکاملی وابسته به تاریخچه پاسخ می‌باشد. با استفاده از پارامترهای  $\beta, \alpha$  و  $\gamma$  می‌توان شیب رفتار خطی و همچنین انحناى ناحیه‌ی گذر از خطی به غیر خطی را تغییر داد. خروجی جریان مدار الکتریکی توسط رابطه ۵ تعیین می‌شود.

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

ظرفیت میراگر انتخاب شده ۱۰۰۰ کیلو نیوتن و مشخصات مکانیکی آن در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات مکانیکی میراگر مغناطیسی MR

parameter	Value	parameter	Value	parameter	Value
$\alpha_a$	1.0872e5 N/m	$c_{0b}$	44.0 N $\frac{s}{cm V}$	$\gamma$	3 cm <sup>-1</sup>
$\alpha_b$	4.9616e5 N/(cm V)	A	1.2	$\beta$	$\beta=3$ cm <sup>-1</sup>
$c_{0a}$	4.40 N s/cm	n	1	$\eta$	50 n <sup>-1</sup>

### ۳- منطق فازی

در اوایل دهه ۶۰ میلادی پروفسور لطفی زاده اظهار داشت که تئوری کنترل کلاسیک بسیار به مقادیر دقیق وابسته است و نیازمند شاخه‌ای از ریاضیات برای بیان و محاسبات مقادیر مبهم یا فازی هستیم که تئوری احتمالات برای آنها کارساز نیست. مطالعات او باعث جایگزین شدن تئوری احتمالات با تئوری امکان شد. وی در سال ۱۹۶۵ مباحث مرتبط با این نوع از ریاضیات را در قالب مقاله‌ای تحت عنوان مجموعه‌های فازی منتشر کرد. مجموعه‌های کلاسیک که تحت عنوان مجموعه‌های صفر و یک نیز شناخته می‌شوند، مجموعه‌هایی هستند که تعلق یا عدم تعلق یک شیء به یک مجموعه را نشان می‌دهد. در صورتی که در مجموعه‌های فازی انتقال از شمول به عدم شمول به نرمی و توسط توابع عضویت صورت می‌گیرد و هر عبارتی دارای درجه‌ای از درستی می‌باشد که میتواند عددی بین صفر تا یک باشد [۱۵]. یک سیستم فازی ممدانی مطابق شکل ۴ از چهار بخش اصلی تشکیل شده است.

- فازی سازی؛ نگاشت فضای ورودی به مجموعه‌های فازی توسط این بخش صورت می‌گیرد.

- قوانین اگر-آنگاه فازی: یک قاعده‌ی if-then که قاعده‌ی فازی رابطه‌ی دوتائی فازی R در فضای x, y هستند، به صورت زیر

تعریف می‌شوند:

If X is A then Y is B

A و B دو مجموعه‌ی فازی بر روی مجموعه جهانی X و Y هستند که "X is A" به عنوان مقدم یا فرض و "Y is B" به عنوان

تالی یا نتیجه تعریف می‌شوند.

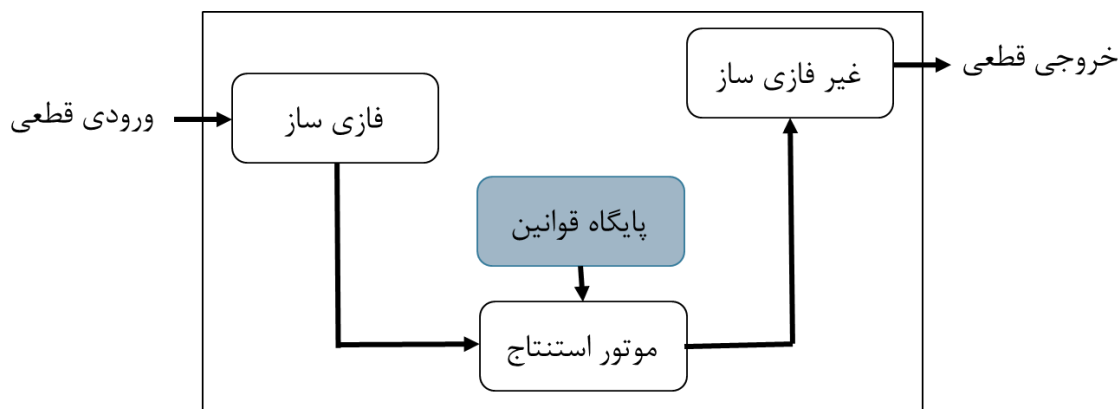
تفسیر یک قاعده‌ی اگر-آنگاه بدین صورت است که در ابتدا قسمت فرض ارزیابی شده و به همهی جملات فازی درجه‌ای از درستی بین صفر و یک تخصیص داده می‌شود. در صورتی که فرض دارای چند بخش باشد از عملگرهای فازی T-نرم برای AND و S-نرم

<sup>6</sup> Fuzzification

برای OR برای بدست آوردن درستی قسمت فرض استفاده می‌شود و سپس اعمال نتیجه عملگر بر روی قسمت نتیجه، خروجی مجموعه فازی حاصل می‌شود.

-**موتور استنتاج:** براساس داده های دریافتی، خروجی مطلوبی در اختیار سیستم کلی قرار می‌دهد

-**غیر فازی ساز:** تبدیل متغیر فازی به متغیر قطعی توسط این بخش صورت می‌گیرد. در سیستم فازی سوگنو خروجی قوانین یک کمیت عددی است و نیاز به غیر فازی کردن ندارد.



شکل ۴: ساختار یک سیستم فازی

#### ۴- الگوریتم ژنتیک

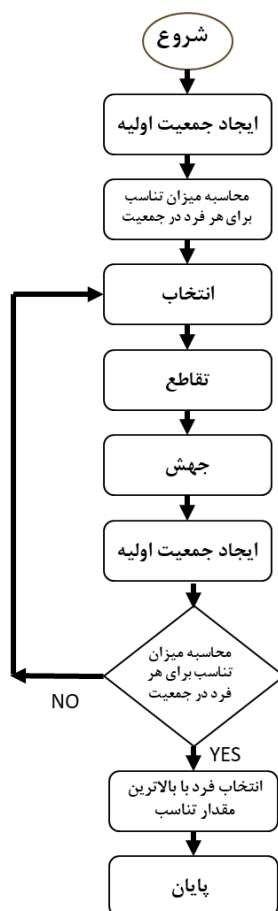
الگوریتم ژنتیک یک نسخه ساده از تکامل داروین را که در طبیعت رخ می‌دهد، اجرا می‌کند. اصول نظریه تکامل داروین را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

-**اصل تغییر:** صفات افراد منفرد متعلق به یک جمعیت ممکن است متفاوت باشند. در نتیجه، نمونه‌ها از هم تا حدی متفاوت هستند؛ برای مثال، در رفتار یا ظاهر آن‌ها

-**اصل وراثت:** بعضی از صفات به طور مداوم از نمونه‌ها به فرزندانشان منتقل می‌شوند. در نتیجه، فرزندان بیش از آنچه که شبیه به نمونه‌های دیگر باشند، بیشتر به والدینشان شباهت دارند.

-**اصل انتخاب:** جمعیت به طور معمول برای منابع در محیط خاص خود مبارزه می‌کند. نمونه‌های دارای ویژگی‌هایی که بهتر با محیط سازگار هستند، در زنده ماندن موفق‌تر خواهند بود و همچنین در نسل بعدی زاد و ولد بیشتری خواهند داشت. به عبارت دیگر تکامل، جمعیت نمونه‌های مختلفی را که از یکدیگر متفاوت است را حفظ می‌کند. آن‌هایی که بهتر با محیط خود سازگار هستند شانس بیشتری برای بقا، پرورش و انتقال ویژگی‌های خود به نسل بعدی دارند. به این ترتیب، با گذشت نسل‌ها، گونه‌ها با محیط خود و چالش‌های پیش روی آنها سازگارتر می‌شوند. یک عامل مهم تکامل، تقاطع یا باز ترکیب است که در آن زاد و ولد با ترکیبی از صفات پدر و مادرشان ایجاد می‌شوند. تقاطع به حفظ تنوع جمعیت و ایجاد ویژگی‌های بهتر در طول زمان کمک می‌کند. به علاوه، جهش‌های تصادفی می‌توانند با معرفی تغییرات، در تکامل نقش ایفا کنند. روند بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک در شکل ۵ به نمایش درآمده است.

<sup>7</sup> Defuzzification



شکل ۵: فرآیند کلی الگوریتم ژنتیک

## ۵- طراحی کنترل کننده

طراحی کنترل کننده خطی در فضای حالت صورت می‌گیرد. بدین منظور از مدل کاهش یافته سازه استفاده می‌شود. پس از حذف درجات آزادی وابسته و غیرفعال، مدل کاهش یافته سازه به دست می‌آید. در هر طبقه فقط یک درجه آزادی دینامیکی افقی در نظر گرفته شده است. کنترل کننده LQG از نوع حالت کامل نمی‌باشد. در این کنترل کننده بردار کامل حالت سیستم توسط مولفه های اندازه گیری شده و به وسیله فیلتر کالمن<sup>۸</sup> تخمین زده می‌شود. در فیلتر کالمن از بردارهای تصادفی نویز سفید<sup>۹</sup> برای خطای اندازه گیری و بارهای خارجی استفاده می‌شود. هر یک از پاسخ های اندازه گیری شده حاوی نویز است که جذر متوسط مربعات آن ۰/۰۳ ولت است که تقریباً ۰/۳٪ دامنه کامل مبدلهای A/D است. نویزهای اندازه گیری به صورت فرآیندهای پالس مستطیلی گوسی با گام زمانی ۰/۰۰۱ ثانیه مدل شده است. اساس تعیین نیروهای کنترلی، کمینه کردن اندیس رفتار J می‌باشد:

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \left[ \int_0^T \{ (C_{ed}x^d + D_{ed}u)^T Q (C_{ed}x^d + D_{ed}u) + Ru^2 \} dt \right] \quad (6)$$

که در آن ضرایب  $R$  و  $Q$  ماتریسهای وزنی می‌باشند که در آن  $R$  یک ماتریس  $[3 \times 3]$  با وزن برابر برای هر نیرو می‌باشد.  $Q$  نیز یک ماتریس  $[3 \times 3]$  با وزن برابر برای شتاب طبقات است. در این کنترل کننده  $R = (1/16)[I]$  و  $Q = 3 \times 10^9 [I]$  می‌باشد. ماتریسهای  $F_{ed}$ ,  $F_{md}$ ,  $D_{ed}$ ,  $D_{md}$ ,  $C_{ed}$ ,  $C_{md}$ ,  $E_d$ ,  $B_d$  و  $A_d$  ماتریسهای ضرایب مدل کاهش یافته سازه می‌باشند.

<sup>8</sup> Kalman Filter

<sup>9</sup> Gaussian white Noise



معادله کنترل کننده LQG در فضای حالت در این مساله به صورت زیر است:

$$\dot{\hat{x}}^d = A_c \hat{x}^d + B_c Y^s \quad (7)$$

$$U = C_c \hat{x}^d + D_c Y^s \quad (8)$$

که در آن:

$$A_c = A_d - B_d K - LC_{md} + LD_{md} K \quad (9)$$

$$B_c = L \quad (10)$$

$$C_c = -K \quad (11)$$

$$D_c = 0 \quad (12)$$

در این معادلات  $K$  ماتریس بهره و  $L$  برآوردگر بهینه فیلتر کالمن می باشد.

در ادامه با تبدیل معادلات از حالت پیوسته به حالت گسسته روابط زیر حاصل می شود:

$$x^c_{k+1} = A_{cd} x^c_k + B_{cd} Y^s_k \quad (13)$$

$$U_k = C_{cd} x^c_k + D_{cd} Y^s_k \quad (14)$$

$A_{cd}$ ،  $B_{cd}$ ،  $C_{cd}$ ،  $D_{cd}$  ماتریس های حالت کنترل کننده در فضای گسسته هستند. ماتریس های جرم و سختی کاهش یافته به شرح زیر است.

$$M_r = \begin{bmatrix} 4.8735E05 & 3.1289 & -19.8497 \\ 3.1289 & 4.7835E05 & -6.1985 \\ -19.8497 & -6.1985 & 5.1782E05 \end{bmatrix} N$$

$$K_r = \begin{bmatrix} 4.3645E08 & -2.3730E08 & 4.1527E07 \\ -2.3730E08 & 3.1342E08 & -1.2888E08 \\ 4.1527E07 & -1.2888E08 & 9.3407E07 \end{bmatrix} N/m$$

ماتریس میرائی سازه براساس روش رایلی محاسبه می شود. در رابطه ۱۵ ضرایب  $C_1$  و  $C_2$  بگونه ای انتخاب می شوند که میرائی

مود اول و دوم سازه ۲ درصد باشد. نسبت میرائی در روش رایلی توسط رابطه ۱۶ محاسبه می شود:

$$\hat{C} = C_1 M_r + C_2 K_r \quad (15)$$

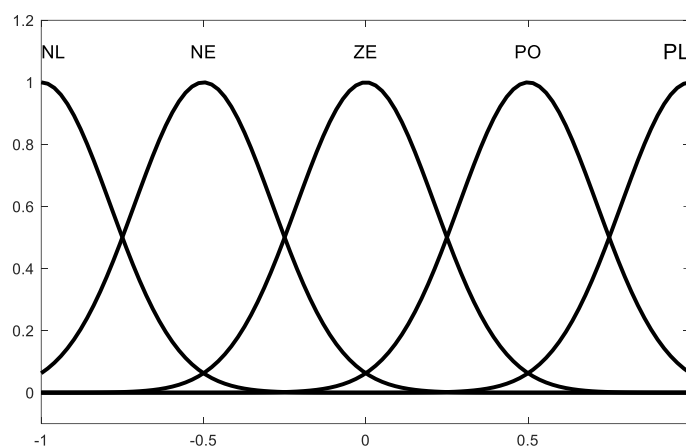
$$\xi_i = \xi_1 (\omega_1 \omega_2 + \omega_i^2) / (\omega_i \omega_1 + \omega_2^2) \quad (16)$$

در این پژوهش از یک سازه محک ۳ طبقه غیرخطی مجهز به میراگر MR استفاده شده است. ولتاژ ورودی به میراگر توسط یک کنترل کننده خطی LQG و یک کنترل کننده فازی سوگنو بهینه شده بدست می آید. ورودی کنترل کننده فازی نیروی تولید شده از کنترل کننده خطی و نیروی گام قبل میراگر است. فازی سازی متغیرهای ورودی توسط ۵ تابع عضویت گوسی به دلیل بهینگی بیشتر و تغییرات آرام صورت میگیرد. این توابع با دو پارامتر  $\sigma$  و  $C$  تعریف می شوند و به گونه ای انتخاب شده اند که توزیع یکنواختی در کل دامنه داشته باشند. مقادیر انتخابی توابع عضویت در جدول ۲ و نحوه توزیع آنها در دامنه در شکل ۶ به نمایش درآمده است. متغیرهای زبانی فازی در جدول ۳ به نمایش درآمده است.

قوانین ساختار بر شبکه فازی، قوانین اگر-آنگاه هستند. ۲۵ حالت ترکیب با تعریف ۵ تابع عضویت برای ورودی نیروی خطی و ۵ تابع عضویت برای نیروی گام قبل وجود دارد. این ترکیب از نوع AND و T-NORM می باشد. جدول ۴ پایگاه قوانین کنترل کننده فازی را نشان می دهد.

جدول ۲- پارامترهای توابع عضویت گوسی

	NL	NE	ZE	PO	PL
$\sigma$	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
c	-1.00	-0.50	0	0.50	100



شکل ۶: توابع عضویت انتخابی کنترل کننده فازی پیشنهادی

جدول ۳- متغیرهای زبانی فازی

متغیر	تعریف
NL	منفی بزرگ
NE	منفی
ZE	صفر
PO	مثبت
PL	مثبت بزرگ

جدول ۴: پایگاه قوانین فازی

		LQG force				
		NL	NE	ZE	PO	PL
Measured Force	NL	mf1	mf2	mf3	mf4	mf5
	NE	mf6	mf7	mf8	mf9	mf10
	ZE	mf11	mf12	mf13	mf14	mf15
	PO	mf16	mf17	mf18	mf19	mf20
	PL	mf21	mf22	mf23	mf24	mf25

خروجی کنترل کننده ولتاژ نرمال شده است و مقادیر خروجی آن در بازه [۰ ۱] جای می گیرد. با ضرب این خروجی در ماکزیمم ولتاژ میراگر، ولتاژ مورد نیاز بدست می آید. خروجی کنترل کننده فازی تاکاگی سوگنو بر دو نوع عدد ثابت و خطی می باشد. در این پژوهش

به دلیل دقت بالا و عملکرد بهتر کنترل کننده از نوع خطی آن استفاده شده است. در این حالت ولتاژ خروجی ترکیبی از ورودی ها با یک عدد ثابت خواهد بود.

$$f_i = p_i a + q_i b + r_i \quad i = 1, 2, \dots, 25 \quad (17)$$

در معادله بالا مقادیر  $a$  و  $b$  مقادیر نیروی ورودی و ضرایب  $p$ ،  $q$  و  $r$  ضرایب مجهول این معادلات خواهند بود. با توجه به ۲۵ حالت یاد شده در پایگاه قوانین، ۷۵ ضریب برای تعریف معادله فوق نیاز می باشد. در این پژوهش از الگوریتم ژنتیک در نرم افزار متلب برای تعیین این پارامترها بر مبنای بهینه سازی پاسخ سازه استفاده می شود. معیار بهینه سازی کمینه کردن بیشینه جابجایی نسبی طبقات سازه است. در ابتدا کنترل کننده به وسیله الگوریتم ژنتیک برای ۱/۵ برابر زلزله ال سنترو توسط نرم افزار متلب آموزش داده شده و سپس عملکرد کنترل کننده در سایر زلزله ها با شدت های مختلف مورد محاسبه قرار می گیرد.

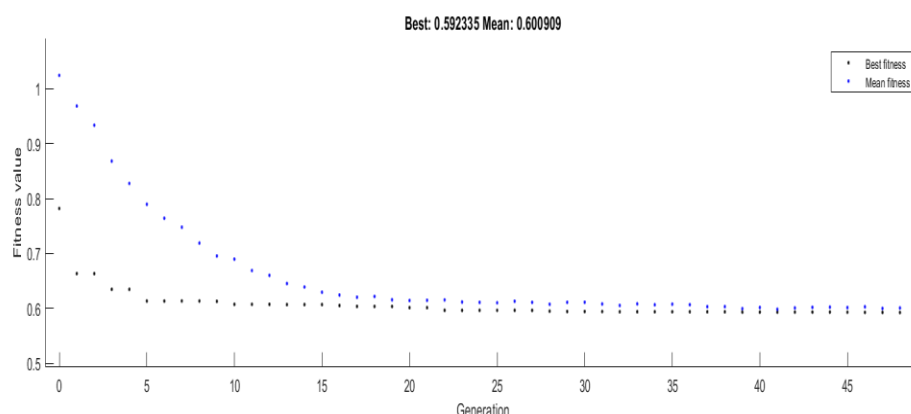
در جدول ۵ مشخصات الگوریتم ژنتیک در جعبه ابزار بهینه سازی نرم افزار متلب آورده شده است. جمعیت الگوریتم ژنتیک شامل ۷۵ عضو می باشد که به صورت تصادفی انتخاب می شوند. نوع جمعیت از نوع double vector است. عضوی از جمعیت که دارای بالاترین شایستگی می باشد، بدون تغییر به نسل بعد منتقل می شود. در ادامه سایر اعضای نسل جدید به وسیله دو عملگر پیوند و جهش به وجود می آیند. عملگر پیوند از نوع Scattered و عملگر جهش از نوع Adaptive feasible می باشد. ۸۰ درصد اعضا از طریق عملگر پیوند و ۲۰ درصد از طریق عملگر جهش تولید می شوند. تعداد نخبگان برگزیده برای تولید مجدد نیز ۲ عدد است. تابع شایستگی الگوریتم ژنتیک بر مبنای کمینه کردن بیشینه تغییر مکان نسبی طبقات سازه کنترل شده به کنترل نشده نوشته شده است. سایر تنظیمات جعبه ابزار ژنتیک به صورت پیش فرض در نظر گرفته شده است. جدول ۶ پارامترهای توابع نتیجه سیستم فازی را نشان می دهد. شکل ۷ فرآیند طراحی کنترل کننده فازی-ژنتیک را نشان می دهد.

جدول ۵: مشخصات الگوریتم ژنتیک

Population type: double vector	Population size: 75
Elite count: 2	Migration direction: both
Generation: 50	Fitness limit: 0
Creation function: feasible population	Selection function: Stochastic uniform
Crossover factor: 0.8	Mutation factor: 0.2
Crossover function: scattered	Mutation function: Adaptive feasible

جدول ۶: پارامترهای توابع نتیجه

	$p_i$	$q_i$	$r_i$		$p_i$	$q_i$	$r_i$
mf1	-3.7134	0.7662	-0.5371	mf14	3.4031	-1.4617	0.5249
mf2	3.3605	-3.7478	1.7461	mf15	1.4191	2.7654	0.7594
mf3	3.7403	-0.0703	-0.6263	mf16	-3.4860	-3.5133	0.9004
mf4	-0.6506	0.6372	0.9021	mf17	2.8105	-2.0687	1.5096
mf5	2.0788	-1.8200	1.4616	mf18	0.9253	-0.1680	1.2508
mf6	1.1529	-1.9311	1.3624	mf19	3.0152	3.4123	1.9763
mf7	-3.2199	-2.2351	-0.4417	mf20	3.1346	-2.3937	1.8075
mf8	-0.4369	-1.5966	1.9993	mf21	2.7499	-3.6917	1.6156
mf9	1.5925	-0.6391	1.7569	mf22	-2.2337	-0.5505	-0.6211
mf10	1.6221	-1.4492	0.5303	mf23	1.8422	-0.4246	0.1076
mf11	-0.6703	-0.6428	-1.1406	mf24	-1.7513	1.5281	1.6070
mf12	3.2386	1.6055	0.1971	mf25	-2.7232	3.1868	1.3965
mf13	-0.7563	-3.5762	1.8666				



شکل ۷: فرایند آموزش کنترل کننده فازی ژنتیک

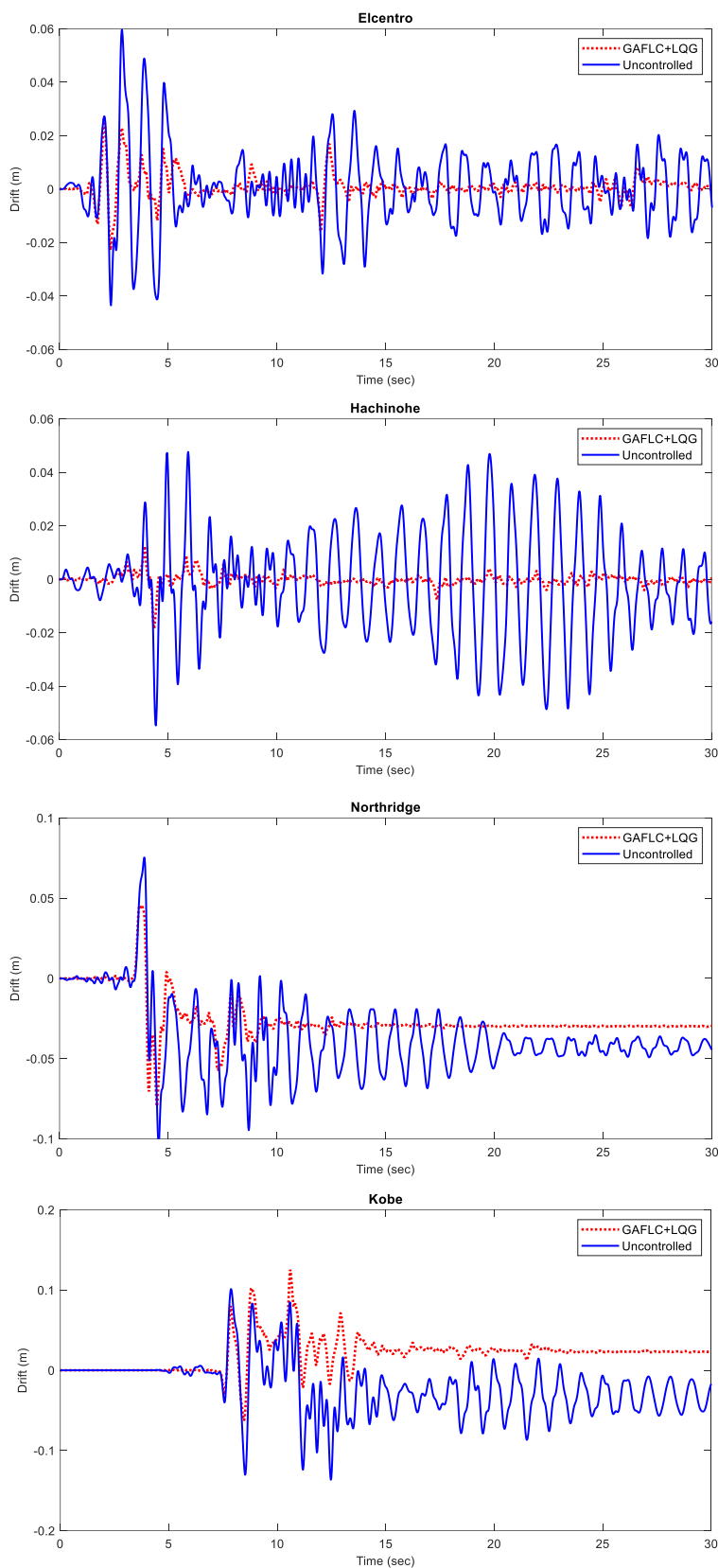
## ۶- نتایج عددی

عملکرد کنترل کننده پیشنهادی نسبت به سازه کنترل نشده در چهار زلزله ال سنترو، هاجینوهه، نورثریج و کوبه مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقایسه از تاریخچه تغییر مکان نسبی طبقه سوم و شتاب طبقه سوم به دلیل اهمیت این پارامتر در مهندسی زلزله، استفاده می‌شود. این دو تاریخچه در شکل های ۸ و ۹ به نمایش درآمده است. نتایج نشان می‌دهد که این کنترل کننده به طور موثری قادر به کاهش تغییر مکان نسبی طبقه بوده است. این کاهش در دو زلزله دور از گسل ال سنترو و هاجینوهه بیشتر از دو زلزله دیگر می‌باشد. از نقطه نظر شتاب نیز می‌توان گفت که گرچه بیشینه شتاب کاهشی نداشته است، لکن مقدار متوسط شتاب در زلزله های مختلف کاهش پیدا نموده است.

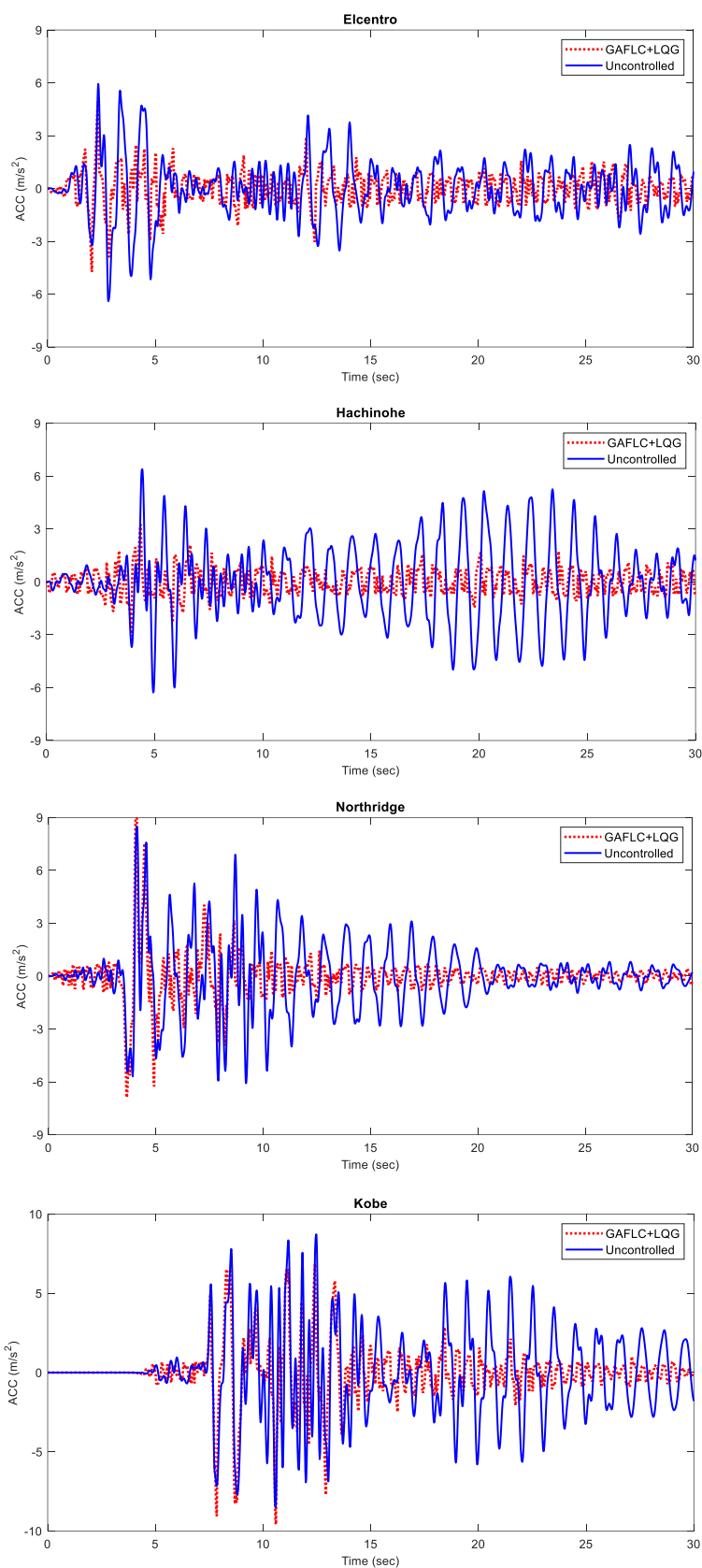
در این پژوهش همچنین از ۶ معیار ارزیابی (J1-J6) مطابق جدول ۷ برای بررسی رفتار کنترل کننده و مقایسه ساده تر آن با سایر کنترل کننده ها برای این سازه استفاده شده است. در این روابط مقادیر جابجایی نسبی، شتاب طبقات و برش پایه در حالت کنترل شده به کنترل نشده و نرم این سه پاسخ مورد محاسبه قرار گرفته است. در این معیارها از زلزله ال سنترو و هاجینوهه با شدت های ۰/۵، ۱ و ۱/۵ و زلزله های کوبه و نورثریج با شدت های ۰/۵ و ۱ استفاده شده است. ارزیابی کمی کنترل کننده پیشنهادی در مقایسه با کنترل کننده فعال (LQG)، کنترل قطع و وصل بهینه (COC)، نیمه فعال عصبی پیش بین (NNPC) و کنترل کننده ژنتیک فازی GFSL در جدول ۸ به نمایش در آمده است [۱۶]. در کنترل کننده GFSL شتاب ها مستقیم وارد کنترل کننده فازی شده اند و تمامی ضرایب آن توسط الگوریتم ژنتیک بهینه شده است. در شکل ۱۰ نیز نمودار میله ای معیارهای ارزیابی تحت اثر زلزله ها و کنترل کننده های مختلف به نمایش درآمده است.

جدول ۷: معیارهای ارزیابی سازه

Interstory drift ratio	Level acceleration	Base shear
$J_1 = \max_{\text{ElCentro, Hachinohe, Northridge, Kobe}} \left\{ \frac{\max_{t,i} \left  \frac{d_i(t)}{h_i} \right }{\delta^{\max}} \right\}$	$J_2 = \max_{\text{ElCentro, Hachinohe, Northridge, Kobe}} \left\{ \frac{\max_{t,i}  \ddot{x}_{ai}(t) }{\ddot{x}_{ai}^{\max}} \right\}$	$J_3 = \max_{\text{ElCentro, Hachinohe, Northridge, Kobe}} \left\{ \frac{\max_i  \sum_i m \ddot{x}_{ai}(t) }{F_b^{\max}} \right\}$
Normed interstory drift	Normed Level acceleration	Normed base shear
$J_4 = \max_{\text{ElCentro, Hachinohe, Northridge, Kobe}} \left\{ \frac{\max_{t,i} \left  \frac{d_i(t)}{h_i} \right }{\ \delta^{\max}\ } \right\}$	$J_5 = \max_{\text{ElCentro, Hachinohe, Northridge, Kobe}} \left\{ \frac{\max_{t,i} \ \ddot{x}_{ai}(t)\ }{\ \ddot{x}_{ai}^{\max}\ } \right\}$	$J_6 = \max_{\text{ElCentro, Hachinohe, Northridge, Kobe}} \left\{ \frac{\max_i \ \sum_i m \ddot{x}_{ai}(t)\ }{\ F_b^{\max}\ } \right\}$



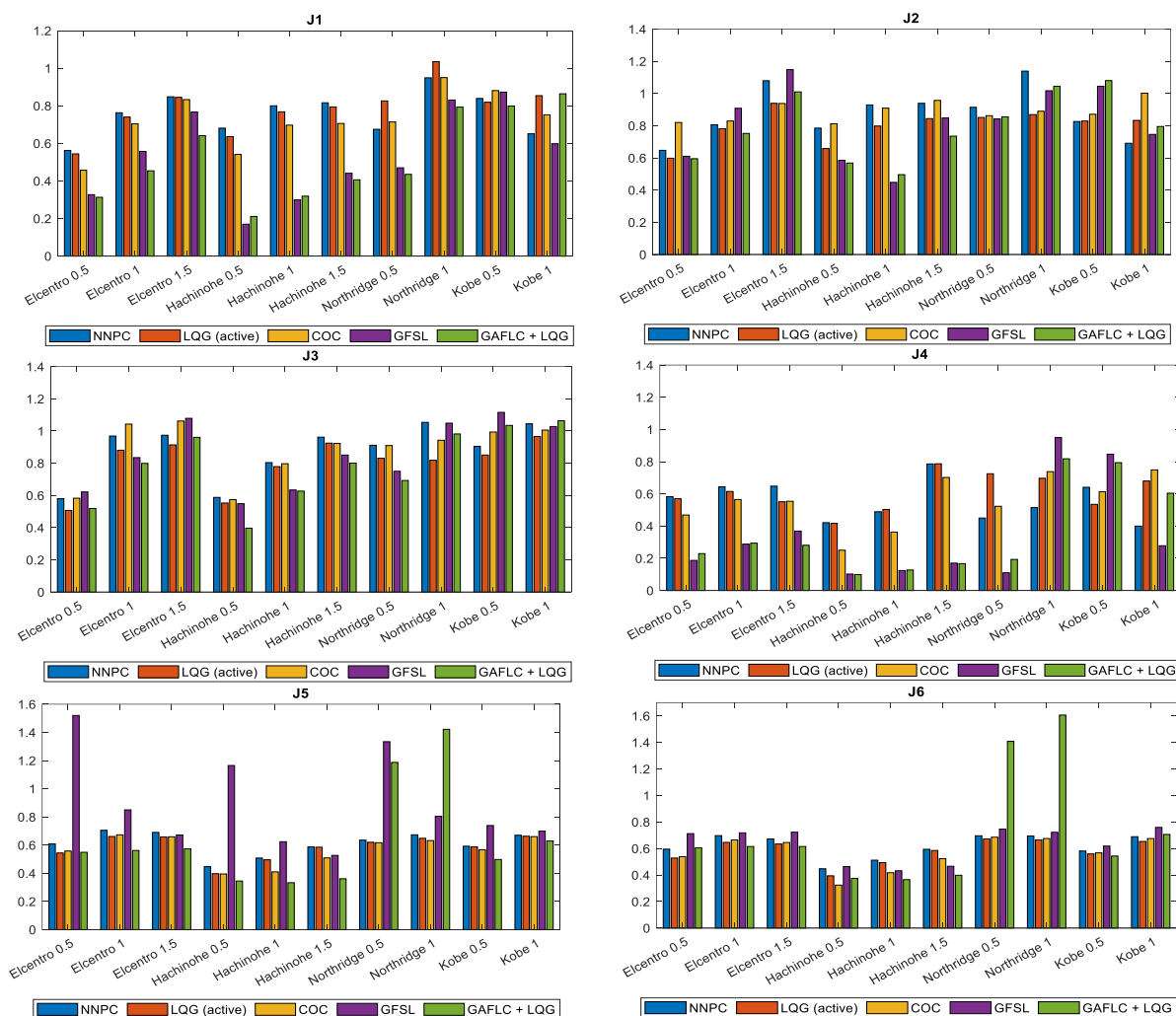
شکل ۸: تاریخچه تغییرمکان نسبی طبقه سوم سازه تحت اثر زلزله های مختلف و کنترل کننده پیشنهادی



شکل ۹: تاریخچه شتاب طبقه سوم سازه تحت اثر زلزله های مختلف و کنترل کننده پیشنهادی

جدول ۸: معیارهای ارزیابی J1 تا J6 برای کنترل‌کننده‌ها و زلزله‌های مختلف در سازه سه طبقه

	Controller	Elcentro			Hachinohe			Northridge		Kobe		AVG
		0.5	1	1.5	0.5	1	1.5	0.5	1	0.5	1	
J1	NNPC	0.562	0.763	0.848	0.681	0.800	0.816	0.675	0.949	0.839	0.651	0.758
	LQG (active)	0.544	0.740	0.845	0.636	0.768	0.794	0.826	1.035	0.819	0.854	0.790
	COC	0.457	0.704	0.833	0.541	0.697	0.706	0.714	0.950	0.881	0.752	0.728
	GFSL	0.327	0.557	0.767	0.170	0.299	0.441	0.470	0.831	0.873	0.598	0.533
	GAFLC+LQG	0.313	0.454	0.641	0.211	0.319	0.406	0.435	0.793	0.799	0.864	0.524
J2	NNPC	0.647	0.806	1.079	0.785	0.929	0.939	0.914	1.139	0.826	0.691	0.876
	LQG (active)	0.598	0.781	0.939	0.658	0.798	0.844	0.851	0.869	0.829	0.833	0.800
	COC	0.820	0.829	0.938	0.812	0.909	0.957	0.862	0.890	0.871	1.002	0.889
	GFSL	0.610	0.908	1.148	0.585	0.448	0.848	0.842	1.017	1.045	0.746	0.820
	GAFLC+LQG	0.595	0.752	1.010	0.568	0.496	0.735	0.855	1.045	1.080	0.795	0.793
J3	NNPC	0.580	0.969	0.974	0.588	0.804	0.962	0.912	1.054	0.905	1.045	0.879
	LQG (active)	0.507	0.881	0.914	0.553	0.779	0.925	0.831	0.819	0.851	0.966	0.803
	COC	0.583	1.043	1.062	0.574	0.797	0.923	0.910	0.943	0.994	1.006	0.883
	GFSL	0.622	0.835	1.079	0.549	0.634	0.851	0.750	1.049	1.116	1.028	0.851
	GAFLC+LQG	0.519	0.799	0.961	0.397	0.627	0.801	0.693	0.982	1.035	1.064	0.788
J4	NNPC	0.583	0.644	0.648	0.421	0.489	0.786	0.450	0.515	0.641	0.400	0.558
	LQG (active)	0.570	0.615	0.551	0.417	0.503	0.787	0.725	0.697	0.535	0.680	0.608
	COC	0.469	0.565	0.554	0.250	0.363	0.702	0.523	0.738	0.613	0.749	0.553
	GFSL	0.187	0.288	0.369	0.102	0.124	0.170	0.110	0.950	0.846	0.278	0.342
	GAFLC+LQG	0.229	0.294	0.281	0.099	0.127	0.167	0.193	0.818	0.794	0.604	0.360
J5	NNPC	0.609	0.705	0.690	0.447	0.508	0.587	0.635	0.673	0.592	0.670	0.612
	LQG (active)	0.544	0.661	0.658	0.397	0.496	0.585	0.620	0.648	0.587	0.663	0.586
	COC	0.558	0.673	0.659	0.395	0.410	0.509	0.617	0.632	0.567	0.660	0.568
	GFSL	1.520	0.850	0.672	1.165	0.624	0.527	1.334	0.804	0.739	0.699	0.894
	GAFLC+LQG	0.549	0.562	0.574	0.345	0.333	0.361	1.187	1.422	0.498	0.629	0.646
J6	NNPC	0.595	0.697	0.672	0.447	0.512	0.594	0.696	0.694	0.581	0.689	0.618
	LQG (active)	0.528	0.646	0.634	0.394	0.493	0.585	0.672	0.664	0.559	0.653	0.583
	COC	0.538	0.664	0.645	0.324	0.417	0.523	0.685	0.675	0.567	0.675	0.571
	GFSL	0.712	0.718	0.723	0.464	0.432	0.466	0.746	0.722	0.618	0.759	0.636
	GAFLC+LQG	0.605	0.615	0.615	0.375	0.365	0.398	1.408	1.606	0.543	0.706	0.724



شکل ۱۰: مقایسه معیارهای ارزیابی J1 تا J6 تحت اثر زلزله های مختلف و کنترل کننده های NNPC، LQG (active)، COC، GFSL و GAFLC+LQG

معیار J1 نشان دهنده کاهش بیشینه جابجائی نسبی طبقات می‌باشد. مقدار متوسط این معیار برای کنترل کننده پیشنهادی (GAFLC+LQG) ۰/۵۲۴ است که از کنترل کننده های دیگر کمتر است و عملکرد بهتری نسبت به سایر کنترل کننده ها در کاهش بیشینه جابجائی طبقات داشته است. معیار J2 نیز کاهش بیشینه شتاب طبقات را نشان می‌دهد. مقدار متوسط این معیار برای زلزله های مختلف ۰/۷۹۳ بدست آمده است. عملکرد این کنترل کننده در کاهش بیشینه شتاب با توجه به اینکه ساختار کنترل کننده برای کاهش شتاب طراحی نشده بود، قابل قبول است. عملکرد کنترل کننده در کاهش بیشینه برش پایه با معیار J3 ارزیابی می‌شود. مقدار کاهش در این معیار نیز نسبت به سایر کنترل کننده ها بیشتر بوده است و عملکردی مشابه با کنترل فعال دارد. عملکرد کنترل کننده ها در کاهش نرُم جابجایی نسبی طبقات با معیار J4 سنجیده می شود. هر دو کنترل کننده فازی GFSL و GAFLC+LQG عملکرد بهتری در کاهش این معیار داشته اند. در این بین نیز کنترل کننده فازی GFSL عملکرد بهتری نسبت به کنترل کننده پیشنهادی این پژوهش داشته است. سنجش میزان نرُم شتاب طبقات توسط معیار J5 صورت می‌گیرد. مقدار متوسط این معیار برای کنترل کننده پیشنهادی ۰/۶۴۶ بوده است. کاهش نرُم شتاب نیز توسط این کنترل کننده مشهود است لکن کنترل کننده های NNPC، LQG(active) و کنترل کننده COC عملکرد بهتری دارند. عملکرد کنترل کننده در میزان نرُم برش پایه توسط معیار J6 صورت می‌گیرد. با وجود کاهش، عملکرد سایر کنترل کننده ها در کاهش این معیار مطلوب تر بوده است.



## نتیجه گیری

در سال های اخیر الگوریتم های بسیاری در کنترل سازه مورد مطالعه قرار گرفته است. در این پژوهش برای رسیدن به ولتاژ مطلوب میراگر MR از نیروی خطی کنترل کننده LQG بهره جوئی شده است. از سویی دیگر استفاده از یک کنترل کننده فازی در جهت جبران عدم قطعیت ها و تطابق با پاسخ های غیرخطی مدنظر قرار گرفته است. آموزش این کنترل کننده فازی به منظور دستیابی به بهترین ولتاژ مورد نیاز میراگر جهت کاهش پاسخ های سازه توسط الگوریتم ژنتیک صورت گرفته است.

مطالعه عملکرد این کنترل کننده بر روی سازه سه طبقه غیرخطی محک مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا عملکرد کنترل کننده مورد مطالعه در کاهش پاسخ های سازه نظیر جابجائی نسبی و شتاب طبقه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان از کارایی خوب این کنترل کننده در کاهش پاسخ های مذکور دارد. در سویی دیگر معیارهای ارزیابی J1 تا J6 تعریف و برای مقایسه بهتر با سایر راهبرد های کنترل مورد تحلیل قرار گرفت. کنترل کننده پیشنهادی در سه معیار J1 ، J2 و J3 از سایر کنترل کننده ها عملکرد بهتری داشت. کنترل کننده پیشنهادی کاهش ۱ تا ۲۶ درصدی معیار J1 را نسبت به سایر کنترل کننده ها نشان می دهد. این کاهش در معیار J2 و J3 بین ۱ تا ۹ درصد متغیر است. میزان نرم تغییر مکان نیز کاهش محسوسی نسبت به کنترل کننده های NNPC، COC و LQG(active) داشته و عملکرد تقریباً مشابهی با کنترل کننده فازی GFSL دارد. بیشترین کاهش این معیار نسبت به کنترل کننده LQG(active) و به میزان ۲۵ درصد است. میزان کاهش نرم شتاب نسبت به کنترل کننده فازی GFSL بیشتر بوده است و کاهش ۲۵ درصدی را نشان می دهد. ولی در کل عملکرد سایر کنترل کننده ها بهتر بوده است. کنترل کننده پیشنهادی باعث افزایش ۹ تا ۱۵ درصدی نرم برش پایه در قیاس با سایر کنترل کننده ها شده است.

## مراجع

- [1] Raeesi F, Azar BF, Veladi H, Talatahari S (2020). An inverse TSK model of MR damper for vibration control of nonlinear structures using an improved grasshopper optimization algorithm. In: *Structures*. Vol 26. Elsevier, pp 406-416
- [2] Guclu R, Yazici H (2007). Fuzzy logic control of a non-linear structural system against earthquake induced vibration. *Journal of Vibration and Control* 13(11): pp 1535-1551
- [3] Lin TK, Lu LY, Chang H (2015). Fuzzy logic control of a stiffness-adaptable seismic isolation system. *Structural Control and Health Monitoring* 22(1): pp 177-195
- [4] Azizi M, Ghasemi SAM, Ejlali RG, Talatahari S (2020). Optimum design of fuzzy controller using hybrid ant lion optimizer and Jaya algorithm. *Artificial Intelligence Review* 53(3): pp 1553-1584
- [5] Holland J (1975) *Adaptation in natural and artificial systems*, university of mich. Press. Ann Arbor
- [6] Karamodin A, Khajekaramodin S (2017). Structural damage control using Neuro-GA algorithm. *Journal of civil engineering, Journal of school of engineering* vol. 29, no. 1 (17), pp. -, 2017. [Online]. Available: <https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?ID=538024>.
- [7] Uz ME, Hadi MN (2014). 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: pp 135-148
- [8] Hejazi F, Toloue I, Jaafar M, Noorzaei J (2013). Optimization of earthquake energy dissipation system by genetic algorithm. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 28(10): pp 796-810
- [9] K-Karamodin A, H-Kazemi H (2010). Semi-active control of structures using neuro-predictive algorithm for MR dampers. *Structural Control and Health Monitoring* 17(3): pp 237-253. 10.1002/stc.278
- [10] Hashemi SMA, Haji Kazemi H, Karamodin A (2016). Localized genetically optimized wavelet neural network for semi-active control of buildings subjected to earthquake. *Structural Control and Health Monitoring* 23(8): pp 1074-1087
- [11] Ohtori Y, Christenson R, Spencer Jr B, Dyke S (2004). Benchmark control problems for seismically excited nonlinear buildings. *Journal of engineering mechanics* 130(4): pp 366-385
- [12] Yoshida O, Dyke SJ (2004). Seismic control of a nonlinear benchmark building using smart dampers. *Journal of engineering mechanics* 130(4): pp 386-392
- [13] Dyke SJ, Yi F, Frech S, Carlson JD (1999). Application of magnetorheological dampers to seismically excited structures. In: *SPIE proceedings series*, pp 410-416
- [14] Spencer Jr B, Dyke S, Sain M, Carlson J (1997). Phenomenological model for magnetorheological dampers. *Journal of engineering mechanics* 123(3): pp 230-238
- [15] Zadeh LA (1965). Fuzzy sets. *Information and control* 8(3): pp 338-353
- [16] Karamodin A (2008). *Damage control of structures*. PhD. Ferdowsi university of Mashhad