

# کنترل لرزه‌ی پل بزرگراه محک با بهره‌گیری از سیستم کنترل نیمه‌فعال و کنترل‌کننده‌ی فازی خودتنظیم

سجاد ابریشمی (دانشجوی دکتری)

عباس کریم‌الدین\* (دانشیار)

گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

محمدرضا اکبرزاده توتونچی (استاد)

گروه مهندسی برق، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۴۰۱ (دور ۲ - ۳۸، شماره ۴/۱، ص. ۷۳-۸۴، پژوهشی)

در پژوهش حاضر، به منظور کنترل لرزه‌ی پل بزرگراه محک، از کنترل‌کننده‌ی انطباق‌پذیر فازی خودتنظیم (STFC) و میراگرهای نیمه‌فعال MR استفاده شده است. کنترل‌کننده‌ی STFC، با استفاده از یک ساختار دو قسمتی، مزایای سیستم‌های استنتاج فازی را با الگوریتم انطباق‌پذیر ترکیب می‌کند. ساختار خودتنظیم توانایی تنظیم برخت کنترل‌کننده را با توجه به مشخصات تحریکات لرزه‌ی و شرایط سازه‌ی به دست می‌دهد. به منظور افزایش کارآمدی، برخی پارامترهای کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی توسط الگوریتم ژنتیک تنظیم می‌شود. نهایتاً کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی تحت تحریک‌های تعیین شده برای پل محک قرار گرفته و معیارهای سنجش رفتار پل محاسبه شده است. بررسی رفتار سازه‌ی کنترل شده و مقادیر معیارهای سنجش از یک سو نشان می‌دهد که سیستم پیشنهادی، توانمندی بالایی در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ی، به ویژه معیارهای مرتبط با خسارت، نظیر: جابه‌جایی میانه‌ی پل، تغییرشکل جداسازها و انرژی اتلافی در اعضاء سازه‌ی و از سوی دیگر، توان انطباق با شرایط مختلف لرزه‌ی را دارد.

واژگان کلیدی: کنترل لرزه‌ی، کنترل نیمه‌فعال، میراگر MR، کنترل‌کننده‌ی فازی خودتنظیم، کنترل‌کننده‌ی انطباق‌پذیر، پل بزرگراه محک، خسارت.

## ۱. مقدمه

امروزه حفاظت از سازه‌ها در برابر خطرهای طبیعی، نظیر باد و زلزله، یکی از دغدغه‌های اصلی مهندسان سازه محسوب می‌شود. به همین جهت، در سال‌های اخیر، مطالعات زیادی پیرامون کنترل ارتعاش‌های سازه‌ها در برابر باد و زلزله صورت گرفته است. بر این اساس، انواع مختلفی از میراگرها و سیستم‌های کنترل برای سازه‌ها معرفی و ارزیابی شده‌اند که شامل: سیستم‌های فعال، نیمه‌فعال، غیرفعال و ترکیبی هستند.<sup>[۱-۳]</sup> در این میان، عملکرد و رفتار دستگاه‌های کنترل فعال و نیمه‌فعال قابل تنظیم است. این مهم به وسیله‌ی یک کنترل‌کننده که فرمان مناسب را جهت تنظیم عملکرد رفتار دستگاه صادر می‌کند، صورت می‌گیرد. یکی از اصلی‌ترین پارامترهای مؤثر در کارآمدی سیستم‌های کنترل فعال و نیمه‌فعال، عملکرد مناسب الگوریتم‌های کنترل در تعیین دستور کنترل است. تاکنون انواع مختلفی از کنترل‌کننده‌ها در کنترل سازه‌ها استفاده شده‌اند که می‌توان آن‌ها را در دو دسته‌ی کلی الگوریتم‌های کلاسیک،

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۵/۸، اصلاحیه ۱۴۰۱/۶/۲۲، پذیرش ۱۴۰۱/۷/۲.

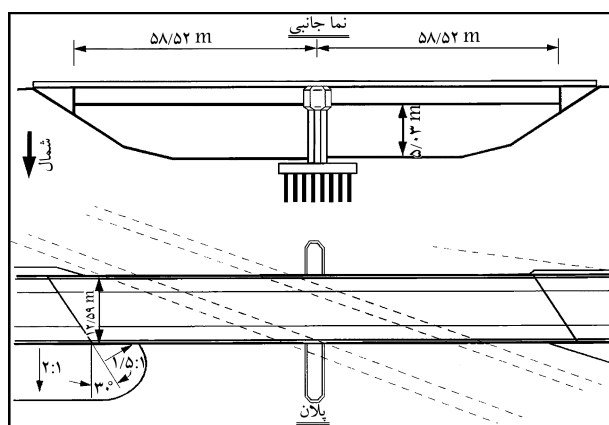
DOI:10.24200/J30.2022.60707.3117

sajjada.brishami@mail.um.ac.ir  
a-karam@um.ac.ir  
akbazar@um.ac.ir

نظیر LQG، LQR،  $H_2$  و  $H_\infty$  و الگوریتم‌های نوین یا مبتنی بر هوش، نظیر منطق فازی و شبکه‌های عصبی تقسیم‌بندی کرد.<sup>[۴]</sup>

در میان انواع سیستم‌های کنترل، سیستم‌های نیمه‌فعال به دلیل داشتن همزمان قابلیت اطمینانی مشابه سیستم‌های غیرفعال و قابلیت انطباق‌پذیری با شرایط مختلف مشابه با سیستم‌های فعال، بیشتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند. باید افزود که سیستم‌های نیمه‌فعال می‌توانند کارایی مشابه و قابل رقابتی با سیستم‌های فعال داشته باشند، اگرچه در مقایسه با آن‌ها، دارای مزایایی نظیر کم هزینه‌تر بودن و نیاز به منبع توان کوچکتر هستند.<sup>[۴-۶]</sup>

به منظور سنجش کارایی سیستم‌های مختلف کنترل لرزه‌ی و انجام یک مقایسه‌ی قاعده‌دار و هدفمند میان راهکارهای مختلف، تاکنون انواع سازه‌های محک به عنوان یک بسته‌ی آزمونی در محیط نرم‌افزار متلب<sup>۱</sup> ایجاد شده‌اند،<sup>[۵-۹]</sup> که از جمله‌ی آن‌ها، پل بزرگراه جداسازی شده است.<sup>[۱۰-۱۱]</sup> از آنجا که پل‌ها نقشی اساسی در شبکه‌ی حمل و نقل ایفا می‌کنند، اختلال در سرویس‌دهی آن‌ها می‌تواند منجر به بروز خسارت‌های گسترده‌ی مالی و جانی شود. لذا محافظت از پل‌ها در برابر زلزله، به



شکل ۱. پلان و برش پل بزرگراه محک.<sup>[۱۰]</sup>

کنترل نصب در پل است. به منظور بررسی سیستم‌های کنترل در سازه‌ی پل بزرگراه محک، ۶ شتاب‌نگاشت مختلف در دو راستای افقی متعامد در نظر گرفته شده است که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. ارزیابی کارایی سیستم‌های کنترل از طریق ۲۱ معیار سنجش تعریف شده برای پل بزرگراه محک صورت می‌پذیرد. در این میان، معیارهای اول تا ششم مربوط به پیشینه‌ی پاسخ‌ها، معیارهای هفتم و هشتم مربوط به رفتار غیرخطی سازه، معیارهای نهم تا چهاردهم مربوط به نرم پاسخ‌ها (انتگرال مربعات پارامتر پاسخ در طول زلزله) و سایر معیارها مربوط به ارزیابی امکانات موردنیاز برای سیستم کنترل است. باید افزود که مقدار معیارهای سنجش ۱ تا ۱۶، بیانگر نسبت پاسخ سازه‌ی کنترل شده به سازه‌ی کنترل نشده است. شرح بیشتر معیارهای سنجش پل بزرگراه محک در نوشتار آگروال و همکارانش (۲۰۰۹)<sup>[۱۰]</sup> ارائه شده است.

### ۳. سیستم کنترل نیمه‌فعال

به دلیل مزایای موجود برای کنترل نیمه‌فعال، از قبیل قابلیت اطمینان بالا، هزینه‌ی اندک، عدم نیاز به منبع انرژی بزرگ و توان انطباق با شرایط<sup>[۱۴]</sup> در پژوهش حاضر از سیستم نیمه‌فعال استفاده شده است. سیستم کنترل نیمه‌فعال متشکل از سه بخش است:

۱. دستگاه‌های کنترل قابل تنظیم که نیروی مقاوم کنترل را براساس رفتار سازه و فرمان کنترلی تولید می‌کنند.
۲. حسگرها که پاسخ‌های سازه را ثبت می‌کنند و در اختیارکنترل‌کننده قرار می‌دهند.
۳. کنترل‌کننده که وظیفه‌ی تعیین و صدور دستور کنترل (عموماً به شکل ولتاژ) را براساس اطلاعات حسگرها عهده‌دار است.

از جمله انواع دستگاه‌های کنترل نیمه‌فعال، میراگرهای MR هستند. میراگرهای MR علاوه بر مزایای ذکر شده برای سیستم‌های نیمه‌فعال، به دلیل داشتن توان واکنش بسیار سریع، قابلیت اطمینان بالا، توانمندی در کنترل سازه و هزینه‌ی نسبتاً پایین ساخت<sup>[۱۵]</sup> در پژوهش حاضر استفاده شده است.

به منظور کنترل لرزه‌ای پل بزرگراه محک، مشابه سیستم نیمه‌فعال نمونه‌ی فاز اول مطالعاتی پل<sup>[۱۱]</sup>، ۱۶ عدد میراگر MR با ظرفیت ۱۰۰۰ کیلونیوتن در پیشینه‌ی ولتاژ ۱۰ ولت بین انتهای عرشه و کوله‌ها مدل شده است؛ به گونه‌ای که در محل هر یک از کوله‌ها، ۸ میراگر (نیمی در امتداد طولی و نیمی عمود بر امتداد طولی پل) در نظر گرفته شده است (شکل ۲).

جهت وجود قابلیت سرویس‌دهی پس از وقوع زمین‌لرزه، حائز اهمیت است.<sup>[۱۲]</sup> تخریب‌های شدید پل‌ها در اثر وقوع زمین‌لرزه‌هایی نظیر زلزله‌ی نورث‌ریج<sup>۲</sup> (۱۹۹۴)، کوه<sup>۳</sup> (۱۹۹۵) و چی - چی<sup>۴</sup> (۱۹۹۹)، اهمیت این موضوع را بیش از پیش نشان داده است.<sup>[۱۳]</sup> بهره‌گیری از سیستم‌های کنترل لرزه‌ای در پل‌ها می‌تواند دستیابی به هدف اخیر را ممکن سازد. از دیگر مزایای استفاده از سیستم کنترل در پل‌ها می‌توان به کاهش جابه‌جایی‌ها و تغییرشکل‌های زیاد در جداسازهای لرزه‌ای که در زمان بروز زمین‌لرزه‌ها محتمل است، اشاره کرد.

با توجه به آنچه بیان شد، هدف از پژوهش حاضر، طرح یک سیستم کنترل لرزه‌ای به‌منظور کاهش هر چه بیشتر پاسخ‌های لرزه‌ای مرتبط با خسارت در سازه‌های پل، نظیر جابه‌جایی‌ها و تغییرشکل‌ها در پل و جداگرهای لرزه‌ای آن و نیز انرژی تلف شده در اعضاء سازه‌ای است. سنجش کارآمدی سیستم کنترل پیشنهادی پژوهش حاضر بر روی فاز نخست مطالعاتی سازه‌ی پل بزرگراه محک بررسی و ارزیابی شده است. برای این منظور و با توجه به مزایای ذکر شده برای سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال، در پژوهش حاضر از میراگرهای نیمه‌فعال MR استفاده شده است. برای ارائه‌ی دستور کنترل مناسب به میراگرها، یک الگوریتم انطباق‌پذیر فازی خودتنظیم طراحی و استفاده شده است. همچنین به منظور افزایش کارایی کنترل‌کننده‌ی استفاده شده، بخشی از پارامترهای اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی آن توسط الگوریتم ژنتیک تنظیم شده‌اند. لازم به ذکر است به دلیل تفاوت اثر زمین‌لرزه‌های مختلف در رفتار سازه‌ها، در کنترل‌کننده‌ی طراحی شده، علاوه بر شرایط رفتاری سازه، از مشخصات تحریک اعمالی نیز برای تعیین دستورکنترلی مناسب استفاده شده است. در ادامه، با معرفی پل بزرگراه محک و نیز کنترل‌کننده‌ی فازی خودتنظیم طراحی شده در پژوهش حاضر و مطالعه‌ی عددی آن بر سازه‌ی پل بزرگراه محک و بررسی پاسخ‌ها و معیارهای سنجش، کارایی سیستم کنترل پیشنهادی ارزیابی شده است.

### ۲. سازه‌ی معیار پل بزرگراه

مدل پل بزرگراه محک، توسط آگروال<sup>۵</sup> و همکارانش (۲۰۰۹)<sup>[۱۰]</sup> و بر مبنای تقاطع غیر هم‌سطح ۹۱/۵ واقع در شهرستان اورنج<sup>۶</sup> در کالیفرنیا جنوبی تعریف شده است. تقاطع مذکور، شامل یک پل جداسازی شده و پیوسته‌ی دو دهانه است که شاه‌تیری با مقطع قوطی‌شکل از جنس بتن پیش‌تنیده دارد. این پل، متشکل از دو دهانه، هر یک به طول ۵۸/۵ متر، و دو کوله‌ی اریب با زاویه‌ی ۳۳ درجه است. عرشه متکی بر پایه‌ی با ستون‌ها و تیر عمیق سرستون پیش‌تنیده با طول ۳۱/۴ متر است (شکل ۱).

در فاز نخست مطالعاتی پل بزرگراه محک، در مدل آن از ۸ جداگر لرزه‌ای لاستیکی - سربی در محل اتصال عرشه به کوله‌های انتهایی استفاده شده است. همچنین مجموعاً از ۱۶ دستگاه کنترل نیز که در محل بین عرشه و کوله‌های انتهایی و در دو راستای متعامد نصب هستند، استفاده شده است. مدل اجزاء محدود سه‌بعدی پل محک با ۴۳۰ درجه آزادی، نخست در نرم‌افزار آباکوس<sup>۷</sup> ایجاد شده و سپس ماتریس‌های سختی، جرم و میرایی سازه به محیط نرم‌افزار متلب انتقال یافته است. برای تحلیل لرزه‌ای سازه از آنالیز دینامیکی غیرخطی به روش انتگرال‌گیری نیومارک استفاده و مدل سازه‌ی پل به همراه سیستم کنترل پیشنهادی در محیط سیمولینک<sup>۸</sup> تهیه و قابل اجرا شده است. لازم به ذکر است منشأ رفتارهای غیرخطی در مدل اشاره شده، مربوط به رفتار غیرخطی جداسازهای لرزه‌ای نصب در تکیه‌گاه‌ها، عملکرد غیرخطی مصالح در ستون‌های میانی پل، و رفتار غیرخطی دستگاه‌های

جدول ۱. مشخصات زمین‌لرزه‌های انتخابی پل بزرگراه محک.<sup>[۱۰]</sup>

زلزله	سال وقوع	بزرگی (Mw)	فاصله گسل (km)	بیشینه‌ی زمین			
				شتاب (g)	سرعت (cm/s)	شرقی - شمالی	غربی - جنوبی
نورث پالم اسپرینگز	۱۹۸۶	۶/۰	۷/۳	۰/۶۱۲	۰/۴۹۲	۳۳/۸	۷۳/۳
چی - چی	۱۹۹۹	۷/۶	۱۰/۳۹	۰/۴۱۷	۱/۱۵۷	۴۵/۶	۱۱۴/۷
امپریال ولی	۱۹۴۰	۷/۰	۸/۳	۰/۲۱۵	۰/۳۱۳	۳۰/۲	۲۹/۸
نورتریج	۱۹۹۴	۶/۷	۷/۱	۰/۴۷۲	۰/۸۳۸	۷۳/۰	۱۶۶/۱
دوزچه - ترکیه	۱۹۹۹	۷/۱	۱۷/۶	۰/۸۲۲	۰/۷۲۸	۶۲/۱	۵۶/۴
کوبه	۱۹۹۵	۶/۹	۱۱/۱	۰/۵۰۳	۰/۵۰۹	۳۶/۶	۳۷/۳

جدول ۲. پارامترهای مدل بوک - ون میراگر MR با بیشینه‌ی ظرفیت ۱۰۰۰ KN و بیشینه‌ی ولتاژ ۱۰ v.<sup>[۱۱]</sup>

$a_a = ۱۷۰۸۷۲ \times ۱۰^{-۵} N/cm$	$A = ۱/۲$
$a_b = ۴/۹۶۱۶ \times ۱۰^{-۵} N/(cm.v)$	$\eta = ۵۰ s^{-۱}$
$c_{\cdot a} = ۴/۴۰ N.s/cm$	$\gamma = ۳ cm^{-۱}$
$c_{\cdot b} = ۴۴ N.s/(cm.v)$	$\beta = ۳ cm^{-۱}$
	$n = ۱$

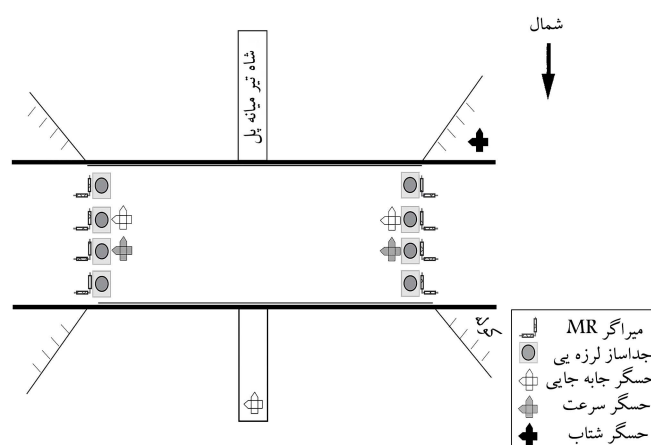
$$\dot{u}_c = -\eta(u_c - u_a) \quad (۵)$$

که در آن‌ها،  $\dot{x}$  و  $c_{\cdot}$  به ترتیب سرعت و میرایی ویسکوز میراگر، متغیرهای  $\gamma, \beta, n$  و  $A$  نیز پارامترهای تنظیم‌کننده‌ی شکل حلقه‌های هیستریسیس میراگر،  $u_a$  و  $u_c$  به ترتیب ولتاژ ورودی و خروجی از فیلتر مرتبه‌ی اول،  $\eta$  ثابت زمان در فیلتر مرتبه‌ی اول و متغیرهای  $\alpha_a, \alpha_b, c_{\cdot a}, c_{\cdot b}$  نیز پارامترهایی برای در نظر گرفتن وابستگی نیروی میراگر به ولتاژ اعمالی هستند.<sup>[۱۱]</sup> به جهت تطابق با رفتار واقعی میراگر MR و برآورده ساختن ظرفیت اشاره شده، پارامترهای مدل بوک - ون با مقیاس‌سازی نتایج آزمایش‌های صورت گرفته در دانشگاه واشنگتن،<sup>[۱۶]</sup> محاسبه و در جدول ۲ درج شده است.<sup>[۱۱]</sup>

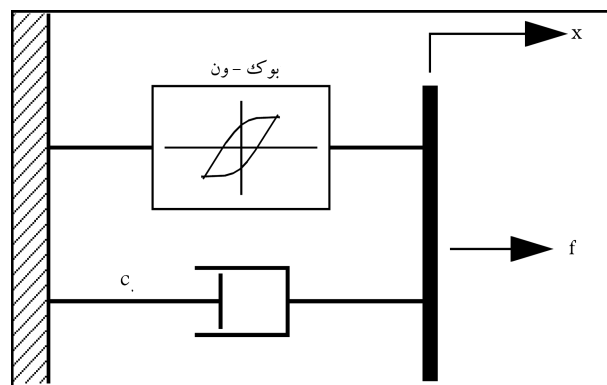
#### ۴. حسگرها

در سیستم کنترل طراحی شده برای پژوهش حاضر، از ۱۲ عدد حسگر، شامل چهار دسته استفاده شده است (مطابق شکل ۲):

۱. چهار عدد جابه‌جایی‌سنج در دو راستای متعامد طولی و عرضی (۲ عدد برای هر یک از دو انتهای عرشه) به منظور اندازه‌گیری تغییرمکان نسبی در محل قرارگیری جداسازهای لرزه‌ی و میراگرهای MR.
۲. چهار عدد سرعت‌سنج در دو راستای متعامد (۲ عدد در هر یک از دو انتهای عرشه) به منظور اندازه‌گیری سرعت انتهای عرشه که محل قرارگیری جداسازهای لرزه‌ی و میراگرهای MR است.
۳. دو عدد جابه‌جایی‌سنج روی شاه‌تیر میانی در دو راستای متعامد طولی و عرضی پل، به منظور اندازه‌گیری تغییرمکان نسبی و ارائه‌ی اطلاعات از وضعیت رفتاری میانه‌ی پل.



شکل ۲. محل قرار گرفتن دستگاه‌های کنترل و حسگرها در مدل پل بزرگراه محک.



شکل ۳. مدل رفتاری میراگر MR.<sup>[۱۶]</sup>

برای مدل‌سازی رفتار میراگرهای MR از مدل بوک - ون مطابق شکل ۳ استفاده شده است. در این حالت، معادلات حاکم بر رفتار میراگر به صورت روابط ۱ الی ۵ خواهد بود:<sup>[۱۱]</sup>

$$f = c_{\cdot} \dot{x} + \alpha z \quad (۱)$$

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x}| z |z|^{(n-1)} - \beta \dot{x} |z|^n + A \dot{x} \quad (۲)$$

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_b u_c \quad (۳)$$

$$c_{\cdot} = c_{\cdot a} + c_{\cdot b} u_c \quad (۴)$$

۴. دو عدد شتاب‌سنج در محل پی کوله‌ی غربی در دو راستای طولی و عرضی پل، برای اندازه‌گیری شتاب لحظه‌ای زمین در حین زلزله و ارائه‌ی اطلاعات از تحریک زمین‌لرزه، گفتمنی است با انتگرال‌گیری از شتاب ثبت شده توسط دو شتاب‌سنج اخیر، می‌توان سرعت زمین را تعیین کرد.

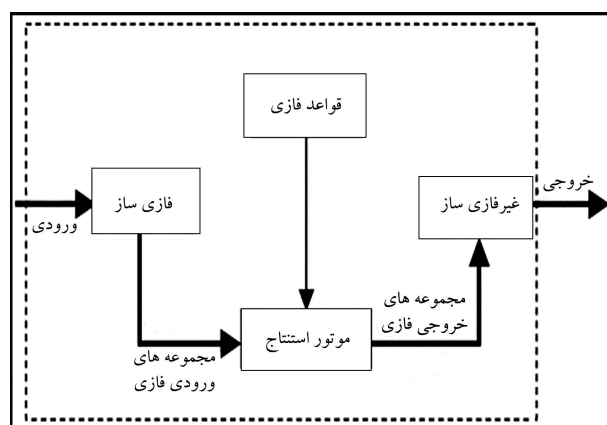
لازم به ذکر است که جانمایی و تعداد حسگرها به گونه‌ی انتخاب شده‌اند که با تعداد کمینه‌ی حسگر، دست‌یابی به رفتار سازه صورت گیرد و اطلاعات کاربردی را برای اخذ تصمیم مناسب در اختیار کنترل‌کننده قرار دهد. باید افزود که ظرفیت خروجی حسگرها و دامنه‌ی میدل A/D برابر با  $\pm 10^\circ$  ولت بوده و هر یک از پاسخ‌های اندازه‌گیری شده، اغتشاشی از نوع پالس مستطیلی گوسی با مقدار مؤثر (جذر میانگین مربعات)  $3^\circ/0$  ولت داشته‌اند (معادل  $3^\circ/0$  دامنه‌ی میدل A/D).

## ۵. کنترل‌کننده‌ی فازی خودتنظیم

در طراحی الگوریتم کنترل برای سیستم پیشنهادی، هدف ارائه‌ی کنترل‌کننده‌ی است که بتواند از یک سو، پاسخ‌های لرزه‌ی سازه را به منظور کمینه‌سازی خسارت کاهش دهد و از سوی دیگر، در شرایط مختلف لرزه‌ی قابلیت و کارایی خود را حفظ کند. برای این منظور از کنترل‌کننده‌ی فازی خودتنظیم استفاده می‌شود. کنترل‌کننده‌ی ذکر شده، می‌تواند با بهره‌گیری همزمان از مزایای سیستم‌های استنتاج فازی و الگوریتم‌های انطباق‌پذیر خودتنظیم (که در ادامه بیان شده است)، اهداف سیستم کنترل را برآورده سازد. در ادامه‌ی بخش حاضر، نخست به مبانی سیستم‌های استنتاج فازی و کنترل‌کننده‌های انطباق‌پذیر خودتنظیم و قابلیت‌های آن‌ها پرداخته و سپس ارکان کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی شرح داده شده است.

### ۱.۵. مبانی سیستم‌های استنتاج فازی

از جمله شیوه‌های نوین در علم کنترل، استفاده از سیستم‌های استنتاج فازی است. تئوری مجموعه‌های فازی نخستین بار توسط زاده (۱۹۶۵)،<sup>[۱۷]</sup> مطرح شده و تکامل آن، شکل‌گیری منطق فازی و سیستم‌های استنتاج فازی را به دنبال داشته است. یک سیستم استنتاج فازی از چهار جزء: فازی‌ساز، پایگاه قواعد، موتور استنتاج و غیرفازی‌ساز تشکیل شده است (شکل ۴)؛<sup>[۱۸]</sup> که در آن، نخست درجه شمول ورودی‌های مختلف در مجموعه‌های فازی تعریف شده از طریق توابع عضویت مشخص می‌شود. در گام بعد، با بهره‌گیری از قواعد «اگر - آنگاه»<sup>۹</sup> فازی تعیین شده



شکل ۴. سیستم استنتاج فازی.<sup>[۱۸]</sup>

برای سیستم، استفاده از عملگرها و نیز ترکیب قواعد، خروجی موتور استنتاج تعیین می‌شود. در نهایت، با استفاده از فرایند غیرفازی‌سازی، خروجی به عدد غیرفازی تبدیل می‌شود.

از معروف‌ترین مدل‌های استنتاج فازی می‌توان به مدل مددانی و سوگنو اشاره کرد. در مدل مددانی، بخش نتیجه‌ی قواعد از مجموعه‌های فازی با توابع عضویت مشخص تشکیل می‌شود؛ اما در مدل سوگنو، برخلاف مدل مددانی، بخش نتیجه‌ی قواعد را توابع چندجمله‌ی درجه‌ی اول و یا مقادیر ثابت (درجه صفر) تشکیل می‌دهند.<sup>[۱۹]</sup> این امر موجب افزایش سهولت و سرعت محاسبات در مدل سوگنو شده است که در کنترل‌کننده‌های لرزه‌ی می‌تواند حائز اهمیت باشد.

الگوریتم‌های کنترل فازی، مزایایی نظیر: سادگی در مدل‌سازی و طراحی، قابلیت در نظر گرفتن رفتارهای غیرخطی و عدم قطعیت‌ها، کارآمدی بالا در صورت تنظیم مناسب دارند. تاکنون پژوهش‌های متعددی به بررسی عملکرد کنترل‌کننده‌های فازی در زمینه‌ی کنترل لرزه‌ی سازه‌ها پرداخته‌اند که بیانگر عملکرد مطلوب این دسته از کنترل‌کننده‌ها در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ی بی‌ویژه در مقایسه با الگوریتم‌های کلاسیک، نظیر LQG و الگوریتم بهینه‌ی مختصر شده<sup>۱۰</sup> بوده‌اند.<sup>[۲۰-۲۶]</sup> باید افزود از جمله مهم‌ترین مشکلات در برپا کردن سیستم استنتاج فازی، تعیین پارامترهای مناسب برای توابع ورودی و خروجی و نیز تعیین پایگاه قواعد فازی به گونه‌ی است که اهداف کنترل هر چه بهتر برآورده شود. پژوهش‌های متعددی ضمن تأکید بر این مشکل، استفاده از الگوریتم ژنتیک به جهت بهینه‌سازی کنترل‌کننده‌ی فازی از طریق تعیین مقادیر بهینه برای توابع عضویت و یا قواعد فازی را در بهبود عملکرد و افزایش کارایی کنترل‌کننده‌ی فازی مؤثر دانسته‌اند.<sup>[۲۶-۲۹]</sup>

### ۲.۵. مبانی کنترل‌کننده‌های انطباق‌پذیر خودتنظیم

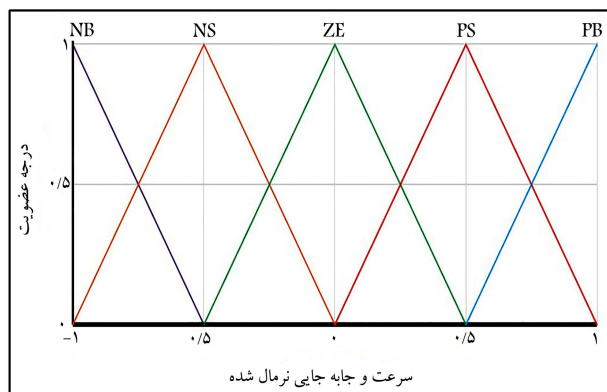
یکی از چالش‌های مهم در بحث طراحی الگوریتم‌های کنترل برای سازه‌های تحت زلزله، وجود عدم قطعیت‌های مختلف، نظیر: تغییر در مشخصات سازه (مانند سختی) در طول رخداد زلزله و ساختار غیرقابل پیش‌بینی تحریک لرزه‌ی است که کارآمدی بسیاری از الگوریتم‌های کنترل به ویژه کنترل‌کننده‌های خطی را با مشکل مواجه می‌سازد.<sup>[۳۰]</sup> یکی از انواع الگوریتم‌های کنترل، که به منظور ارائه‌ی عملکرد مناسب در برابر عدم قطعیت‌ها و تغییرات مشخصات سازه پیشنهاد می‌شوند، کنترل‌کننده‌های انطباق‌پذیر<sup>۱۱</sup> هستند. در علم کنترل، عبارت انطباق‌پذیر به آن دسته از الگوریتم‌های کنترلی اطلاق می‌شود که دارای پارامترها و یا ساختاری با قابلیت تغییر و تنظیم در طول زمان استفاده و از طریق مکانیزم‌های خودکار باشد.<sup>[۳۰-۳۱]</sup> در این دسته از الگوریتم‌ها، پس از تشکیل ساختار کنترل‌کننده، قاعده‌ی تطبیق به گونه‌ی تعریف می‌شود که پایداری و همگرایی به پاسخ مطلوب را تضمین کند. تاکنون پژوهش‌های متعددی بر قابلیت‌ها و توانمندی‌های انواع الگوریتم‌های انطباق‌پذیر در کنترل سازه‌ها دلالت کرده‌اند.<sup>[۳۲-۳۸]</sup>

ارائه‌ی قاعده‌ی تطبیق مناسب، چالشی است که موجب پیچیده شدن طراحی کنترل‌کننده‌های انطباق‌پذیر می‌شود. از همین رو، دسته‌ی دیگر از کنترل‌کننده‌های انطباق‌پذیر، با نام خودتنظیم<sup>۱۲</sup> پیشنهاد شده‌اند که در آن‌ها از یک کنترل‌کننده‌ی فرعی به منظور تخمین و تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده‌ی اصلی استفاده می‌شود. با رویه‌ی اخیر، ضمن حفظ انطباق‌پذیری، از پیچیدگی‌های ساختاری الگوریتم نیز کاسته می‌شود. در مبحث کنترل لرزه‌ی بی‌ویژه با وجود پیچیدگی‌های رفتاری سازه‌ها، ساختار خودتنظیم می‌تواند ضمن کاستن از دشواری‌های ارائه‌ی قاعده‌ی تطبیق، با کاهش حجم و زمان محاسبات، مانع بروز آثار منفی تأخیر زمانی شود.

سیستم‌های استنتاج فازی است. چنانچه ضریب مقیاس بیشینه برای خروجی سیستم استنتاج فازی مشابه با وضع موجود انتخاب و ضرایب مقیاس خروجی سایر سیستم‌های استنتاج کمینه شود، دستیابی به پاسخ بهینه و حرکت صحیح مکانیزم تطبیق در جهت افزایش کارآمدی کنترل‌کننده تضمین می‌شود. لازم به ذکر است در هر لحظه، به نسبت شباهت شرایط موجود به شرایط بهینه‌سازی هر یک از سیستم‌های استنتاج کنترل‌کننده اصلی، ضرایب مقیاس خروجی سیستم‌های استنتاج متغیر خواهد بود. در ادامه، ساختار کنترل‌کننده‌های اصلی و فرعی تشکیل دهنده الگوریتم کنترل پیشنهادی معرفی شده است:

۱. **کنترل‌کننده اصلی:** این کنترل‌کننده، از ۴ سیستم استنتاج فازی سوگو با نام‌های FIS۱ تا FIS۴ تشکیل شده است که ورودی سیستم‌های فازی سوگو، سرعت و جابه‌جایی نرمال شده در بازه  $[-1, 1]$  است (که از تقسیم خروجی حسگرها بر بیشینه مقدار ولتاژ دامنه‌ی خروجی حسگر، یعنی  $10^\circ$  ولت، به دست می‌آید) که از حسگرهای نصب شده در محل بین عرشه و کوله‌ی پل به دست می‌آید. در شکل ۶، توابع عضویت مرتبط با فضای ورودی FISها مشاهده می‌شود که براساس توزیع یکنواخت بین ۵ تابع عضویت مثلثی انتخاب شده‌اند. با توجه به استفاده از مدل سوگو، خروجی هر یک از FISها به صورت یک عدد ثابت در بازه  $[0, 1]$  است که به عنوان ولتاژ نرمال شده استفاده می‌شود و از ضرب آن در بیشینه ولتاژ قابل اعمال ( $10^\circ$  ولت)، ولتاژ کنترلی میراگر MR به دست می‌آید.

پایگاه قواعد سیستم‌های استنتاج مذکور در جدول ۳ ارائه شده است؛ که مطابق آن، مقادیر  $r_1$  تا  $r_{25}$  پارامترهای ثابت بخش خروجی هستند که با استفاده از الگوریتم ژنتیک تنظیم می‌شوند. به منظور افزایش کارآمدی در شرایط مختلف لرزه‌ی، هر یک از FISها برای شرایط خاصی از زمین لرزه بهینه شده‌اند. بر این اساس، FIS۱ تا FIS۴ به ترتیب برای زلزله‌های نورث‌پالم اسپرینگز با



شکل ۶. توابع عضویت فازی ورودی در سیستم‌های استنتاج فازی FIS۱ تا FIS۴.

جدول ۳. پایگاه قواعد سیستم‌های استنتاج فازی FIS.

جابه‌جایی نرمال شده					
PB	PS	ZE	NS	NB	
$r_5$	$r_4$	$r_3$	$r_2$	$r_1$	N
$r_{10}$	$r_9$	$r_8$	$r_7$	$r_6$	NS
$r_{15}$	$r_{14}$	$r_{13}$	$r_{12}$	$r_{11}$	Z
$r_{20}$	$r_{19}$	$r_{18}$	$r_{17}$	$r_{16}$	PS
$r_{25}$	$r_{24}$	$r_{23}$	$r_{22}$	$r_{21}$	PB

کنترل‌کننده‌های فازی خودتنظیم، از جمله انواع کنترل‌کننده‌های انطباقی پذیر هستند، که از یک کنترل‌کننده اصلی  $13^\circ$  فازی به همراه یک کنترل‌کننده فرعی  $14^\circ$  که می‌تواند فازی، عصبی، یا از انواع دیگر باشد، تشکیل شده‌اند. در کنترل‌کننده‌های فازی خودتنظیم رایج، کنترل‌کننده فرعی از طریق تنظیم ضرایب مقیاس برای متغیرهای ورودی یا خروجی کنترل‌کننده اصلی (و یا هر دو)، قابلیت انطباقی پذیر بودن را مهیا می‌سازد. [۳۹] مطالعات انجام شده در حوزه کنترل سازه روی کنترل‌کننده‌های فازی خودتنظیم حاکی از توانمندی آن‌ها در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ی سازه‌ها و نیز مقاوم بودن در برابر عدم قطعیت در مشخصات سازه‌ی و در شرایط مختلف لرزه‌ی است. [۴۰-۴۵]

### ۳.۵. طراحی کنترل‌کننده فازی خودتنظیم پیشنهادی

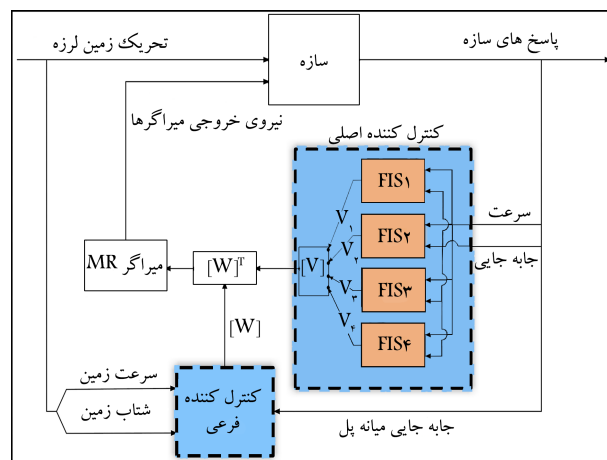
با توجه به مرایای ذکر شده برای سیستم‌های فازی و نیز الگوریتم‌های انطباقی پذیر خودتنظیم، در پژوهش حاضر به عنوان الگوریتم کنترل سیستم پیشنهادی از کنترل‌کننده فازی خودتنظیم (STFC) استفاده شده است. اگرچه در برخی پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه کنترل لرزه‌ی سازه‌ها با استفاده از کنترل‌کننده فازی خودتنظیم، تلاش شده است که تنظیم ضرایب مقیاس متغیرهای ورودی و خروجی کنترل‌کننده اصلی با استفاده از مشخصات تحریک اعمالی به سازه انجام پذیرد؛ [۴۵، ۴۴، ۴۳] اما راهکاری قاعده‌مند که تضمین‌کننده عملکرد مکانیزم تطبیق (با استفاده از تنظیم ضرایب مقیاس) در جهت افزایش کارآمدی کنترل‌کننده باشد، ارائه نشده است.

به جهت رفع نقطه ضعف ذکر شده، در طراحی کنترل‌کننده فازی خودتنظیم پیشنهادی در پژوهش حاضر که ساختار کلی آن به صورت دیاگرام بلوکی در شکل ۵ مشاهده می‌شود، دو ویژگی مضاعف در نظر گرفته شده است:

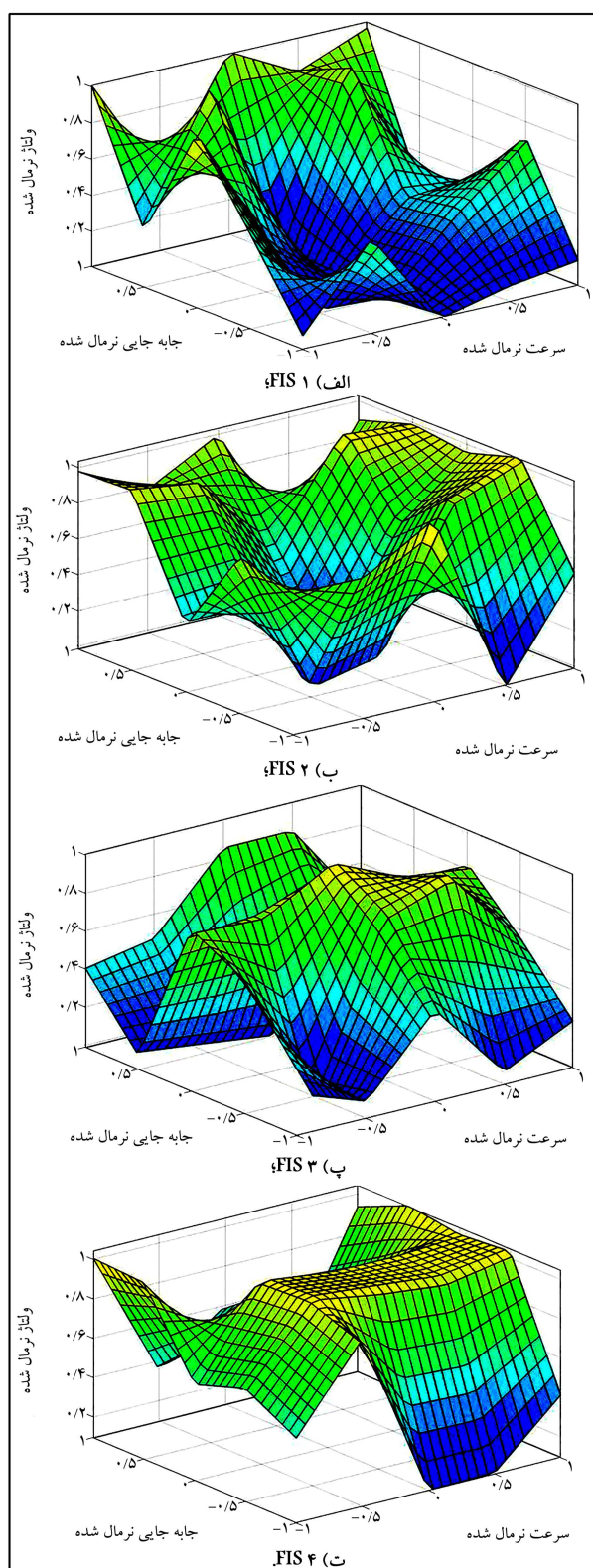
۱. در بخش کنترل‌کننده اصلی، از ۴ سیستم استنتاج فازی مجزا استفاده شده است که هر یک برای شرایط لرزه‌ی و سازه‌ی متفاوتی توسط الگوریتم ژنتیک بهینه شده‌اند.

۲. در کنترل‌کننده فرعی فازی، برای انجام فرایند تنظیم ضرایب مقیاس، علاوه بر استفاده از پارامترهای مرتبط با تحریک لرزه‌ی (که در کنترل‌کننده‌های فازی خودتنظیم لرزه‌ی پژوهش‌های پیشین معمول بوده است)، شرایط رفتاری سازه نیز در تصمیم‌گیری دخیل می‌شود.

به کمک پارامترهای استفاده شده در کنترل‌کننده فرعی تعیین می‌شود که شرایط سازه و تحریک اعمالی به آن در هر لحظه، مشابه کدامیک از حالت‌های بهینه‌سازی



شکل ۵. نمودار بلوکی کنترل‌کننده فازی خودتنظیم پیشنهادی.



شکل ۷. خروجی سیستم استنتاج فازی.

به منظور متمایز کردن نوع تحریک لرزه‌ای و اخذ تصمیم صحیح در کنترل‌کننده‌ی فرعی، با استفاده از دو شتاب‌سنج، شتاب زمین در دو جهت عمود بر هم اندازه‌گیری می‌شود و با انتگرال‌گیری، سرعت زمین در این دو جهت نیز به دست

ضریب شدت ۵/۵، نورث پالم اسپرینگز با ضریب شدت ۱/۵، نورث‌ریچ با ضریب شدت ۵/۵ و نورث‌ریچ با ضریب شدت ۱/۵ بهینه شده‌اند. همچنین با توجه به اینکه هدف در استفاده از کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی، کاهش پاسخ‌های مرتبط با خسارت است، تابع هدف در استفاده از الگوریتم ژنتیک، باید از معیارهای سنجش مرتبط با خسارت در سازه‌ی پل بزرگراه محک تشکیل شود. یکی از پاسخ‌های سازه‌ی پل، که با خسارت حین زلزله مرتبط است، جابه‌جایی‌های رخ داده در میانه‌ی پل است. بر این اساس از دو معیار بیشینه‌ی جابه‌جایی میانه‌ی پل ( $J_2$ ) و نرم جابه‌جایی میانه‌ی پل ( $J_{11}$ ) در تابع هدف استفاده شده است. همچنین انحنای ناشی از لنگر خمشی رخ داده در ستون‌های میانی پل نیز از جمله پاسخ‌های سازه‌ی پل مرتبط با خسارت است که با استفاده از وارد کردن دو معیار بیشینه‌ی شکل‌پذیری رخ داده ( $J_6$ ) و نرم شکل‌پذیری ( $J_{12}$ ) در تابع هدف لحاظ شده است. بیشینه‌ی شتاب میانه‌ی پل (معیار  $J_2$ ) نیز به جهت احتمال تأثیر در خسارت ادوات غیرسازه‌ای در تابع هدف استفاده می‌شود. با توجه به آنچه بیان شد، تابع هدف طبق رابطه‌ی ۶ تعیین شده است:

$$CF = \sqrt{0.25(J_1^2 + J_2^2 + J_6^2) + 0.125(J_{11}^2 + J_{12}^2)} \quad (6)$$

که در آن،  $CF$  مقدار تابع هدف و  $J_1, J_2, J_6, J_{11}$  و  $J_{12}$  معیارهای سنجش سازه‌ی پل هستند که پیش‌تر معرفی شده‌اند. لازم به ذکر است به دلیل تأثیرگذاری بیشتر بیشینه‌ی پاسخ‌ها در خسارت وارد به سازه‌ی پل در مقایسه با نرم پاسخ‌ها، ضریب وزن معیارهای مرتبط با بیشینه‌ی پاسخ‌ها در تعریف تابع هدف، دو برابر معیارهای نرم در نظر گرفته شده است.

در شکل ۷، نمودار خروجی سیستم‌های استنتاج فازی FIS ۱ تا FIS ۴ پس از بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک مشاهده می‌شود. بر این اساس، برای ورودی کنترل‌کننده‌ی اصلی با استفاده از ۴ سیستم استنتاج فازی مختلف، تعداد ۴ دستور کنترل (ولتاژ) در قالب بردار  $[v^T] = [v_1, v_2, v_3, v_4]$  ارائه شده است.

۲. کنترل‌کننده‌ی فرعی: همان‌گونه که پیش‌تر نیز بیان شد، به منظور دستیابی به ساختاری انطباق‌پذیر و تعیین فرمان کنترل مناسب از میان خروجی FIS‌ها، از کنترل‌کننده‌ی فرعی استفاده می‌شود. در واقع در کنترل‌کننده‌ی فرعی، هدف تشخیص شباهت وضع سازه تحت تحریک به وضعیت‌های بهینه‌سازی صورت گرفته برای FIS‌های موجود در کنترل‌کننده‌ی اصلی و بر مبنای آن وزن‌دهی به ولتاژهای خروجی هر یک از FIS‌ها به منظور تعیین پاسخ مطلوب است. تأثیرگذاری ویژگی‌های زمین‌لرزه در عملکرد کنترل‌کننده‌ها به حدی است که در برخی مواقع مشاهده می‌شود که پاسخ‌هایی نظیر شتاب یا جابه‌جایی در زمین‌لرزه‌های میدان نزدیک و پالس‌گونه در سازه‌ی کنترل شده نسبت به کنترل نشده افزایش یافته است. [۲۸، ۳۱، ۳۲-۴۵] به همین جهت مشخصات زلزله به عنوان پارامتر تمایزدهنده و اثرگذار در کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی در نظر گرفته می‌شود. از جمله مواردی که رفتار لرزه‌ای سازه‌ها و به دنبال آن کارایی سیستم کنترل را تحت تأثیر قرار می‌دهد، ماهیت میدان‌دور یا میدان‌نزدیک زمین‌لرزه است. [۴۶] به عنوان وجه تمایز زلزله‌های میدان‌دور و میدان‌نزدیک، سرعت زمین انتخاب می‌شود. [۴۶] وجود پالس‌های بزرگ شتاب و سرعت در تحریک لرزه‌ای نیز اثر قابل توجهی در رفتار سازه و عملکرد سیستم کنترل خواهد داشت. به عنوان وجه تمایز برای مشخص کردن پالس‌های ذکر شده و کلاً زلزله‌های پالس‌گونه می‌توان از نسبت بیشینه‌ی سرعت زمین به بیشینه‌ی شتاب زمین (PGV/PGA) استفاده کرد. [۴۵]

به عنوان «اندک» و مشابه تحریکات میدان دور فرض شده است. برای بیشینه‌ی جابه‌جایی میانه‌ی پل (mD) نیز مقادیر بیش از  $m/0.4$  به عنوان «زیاد» و نشان‌دهنده‌ی شرایط آستانه‌ی خسارت سازه و مقادیر کمتر از  $m/s/0.2$  ثانیه به عنوان «اندک» و بیانگر شرایط عادی سازه در نظر گرفته شده است.

لازم به ذکر است، از آنجا که در کنترل‌کننده‌ی فرعی تشخیص شباهت وضع سازه تحت تحریک به وضعیت‌های بهینه‌سازی FIS ها انجام می‌گیرد، بنابراین تعیین کران‌های توابع عضویت متغیرهای PV/PA و PV با توجه به وضعیت شتاب نگاشت زلزله‌های استفاده شده در بهینه‌سازی صورت گرفته است. همچنین کران‌های توابع عضویت دو پارامتر PV/PA و PV به گونه‌ی انتخاب شده است که بتوان با استفاده از آن‌ها تقسیم‌بندی زمین‌لرزه‌های میدان دور، میدان نزدیک، و پالس‌گونه‌ی بررسی شده در پژوهش کالکان و کونا<sup>۱۵</sup> (۲۰۰۶)،<sup>[۲۷]</sup> را مشابه پژوهش مذکور انجام داد. همچنین تعیین کران متغیر mD نیز با توجه به شرایط سازه‌ی پل بوده است، که در آستانه‌ی بروز خسارت و رفتار غیرخطی قرار می‌گیرد. بنابراین، کران‌های پارامترهای مذکور براساس انتخاب نویسندگان پژوهش حاضر بر مبنای ارائه‌ی عملکرد مناسب فقط در پژوهش فعلی صورت گرفته است و تعیین آن در سایر سازه‌ها و پژوهش‌های مرتبط نیازمند بررسی و مطالعه جامع‌تر خواهد بود.

در جدول ۴، پایگاه قواعد کنترل‌کننده‌ی فازی ارائه شده است. تنظیم پایگاه قواعد نیز به گونه‌ی صورت گرفته است که چنانچه شرایط لرزه‌ی و سازه‌ی مشابه شرایط بهینه‌سازی هر یک از چهار FIS بود، ضریب وزن خروجی مربوط به آن FIS برابر با ۱ باشد و ضریب وزن خروجی سایر FIS ها صفر شود. از عملکرد ترکیبی کنترل‌کننده‌های اصلی و فرعی، ساختار خودتنظیم به گونه‌ی به دست خواهد آمد که با تنظیم برخظ خروجی کنترل‌کننده‌ی اصلی، بتواند در شرایط مختلف لرزه‌ی و رفتاری سازه، دستور مناسب کنترلی را ارائه دهد.

## ۶. مطالعه‌ی عددی کنترل‌کننده‌ی فازی خودتنظیم

### (STFC) در پل بزرگراه محک

به منظور بررسی عملکرد سیستم کنترل پیشنهادی با کنترل‌کننده‌ی STFC، مدل‌سازی عددی سیستم کنترل نیمه‌فعال با میراگر MR و کنترل‌کننده‌ی STFC بر روی برنامه‌ی تهیه شده برای سازه‌ی پل بزرگراه محک در محیط نرم‌افزارهای متلب و سیمولینک انجام شده است، سازه‌ی پل تحت شتاب‌نگاشت‌های ذکر شده در جدول ۱ قرار

جدول ۴. پایگاه قواعد کنترل‌کننده‌ی فازی فرعی.

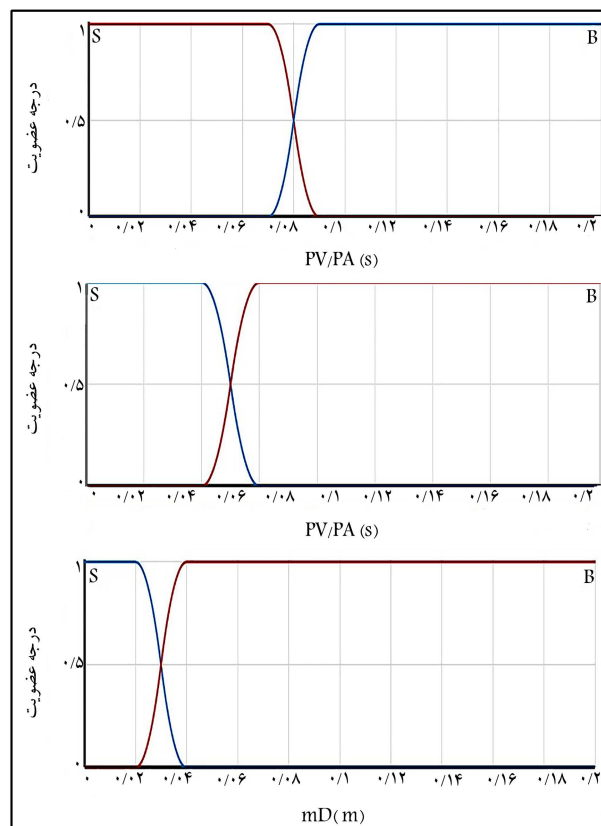
قاعده	بخش خروجی (نتیجه)				بخش ورودی (فرض)		
	$w_4$	$w_3$	$w_2$	$w_1$	mD	PV	PV/PA
۱	۰	۰	۰	۱	S	S	S
۲	۰	۰	۱	۰	B	S	S
۳	۰	۱	۰	۰	S	B	S
۴	۰	۱	۰	۰	B	B	S
۵	۰	۱	۰	۰	S	S	B
۶	۱	۰	۰	۰	B	S	B
۷	۱	۰	۰	۰	S	B	B
۸	۱	۰	۰	۰	B	B	B

می‌آید. سپس با استفاده از جذر مجموع مربعات دو راستای متعامد، برآیند شتاب و سرعت زمین محاسبه و برای ۳ ثانیه‌ی اخیر ذخیره می‌شود و بیشینه‌ی سرعت ثبت شده‌ی زمین (PV) و نیز نسبت بیشینه‌ی سرعت به بیشینه‌ی شتاب زمین (PV/PA) در این مدت به عنوان پارامتر تفکیک‌کننده‌ی تحریک لرزه‌ی تعیین می‌شود. همچنین از جابه‌جایی میانه‌ی پل (mD)، به عنوان معیاری که نشان‌دهنده‌ی شرایط پاسخ‌های سازه‌ی است در کنترل‌کننده‌ی فرعی استفاده می‌شود. در نهایت از یک سیستم استنتاج فازی سوگنو با ۳ ورودی (PV/PA، PV و mD) و ۴ خروجی که شامل ضرایب وزن هر یک از FIS ها است (با مقداری بین ۰ و ۱) استفاده می‌شود. بنابراین خروجی کنترل‌کننده‌ی فرعی  $[w]^T = [w_1, w_2, w_3, w_4]$  (برداری از ضرایب مقیاس) خواهد بود که برای تنظیم دستور مطلوب از کنترل‌کننده‌ی اصلی در رابطه‌ی ۷ استفاده می‌شود:

$$V = [w]^T [v] \quad (7)$$

که در آن،  $V$  ولتاژ نهایی خروجی کنترل‌کننده‌ی STFC،  $[v]$  بردار خروجی کنترل‌کننده‌ی اصلی و  $[w]$  بردار خروجی کنترل‌کننده‌ی فرعی هستند. برای هر یک از ورودی‌های کنترل‌کننده‌ی فرعی، دو تابع عضویت Z شکل و S شکل در نظر گرفته شده است که در شکل ۸ مشاهده می‌شود.

در تعریف توابع عضویت ورودی، برای  $PV/PA$ ، مقادیر بزرگتر از  $0.9$  ثانیه به عنوان «زیاد» و مشابه زلزله‌های پالس‌گونه و مقادیر کمتر از  $0.7$  ثانیه به عنوان «اندک» و مشابه تحریکات زمین‌لرزه‌ی غیرپالسی در نظر گرفته شده است. همچنین برای سرعت زمین حین زلزله (PV)، مقادیر بیش از  $m/s/0.6$  به عنوان «زیاد» و مشابه زلزله‌های میدان نزدیک و مقادیر کمتر از  $m/s/0.4$  ثانیه



شکل ۸. توابع عضویت ورودی کنترل‌کننده‌ی فازی فرعی.



کنترل پیشنهادی در کاهش پالس‌های جابه‌جایی میانه‌ی پل است، که حاکی از قابلیت کنترل‌کننده‌ی STFC در کاهش جابه‌جایی‌های سازه‌ی پل و خسارت‌های ناشی از آن است. همچنین در جدول ۵، معیارهای سنجش محاسبه شده برای سیستم کنترل پیشنهادی پژوهش حاضر در کلیه‌ی زمین‌لرزه‌های بررسی شده و میانگین هر معیار ارائه شده است. مقادیر معیارهای سنجش مربوط به سیستم کنترل دیگری با میراگرهای مشابه و کنترل‌کننده‌ی فازی متشکل از FIS<sup>۲</sup> معرفی شده در بخش قبل (بهینه شده برای زمین‌لرزه‌ی نورث پالم اسپرینگز با ضریب شدت ۱/۵) نیز در جدول ۵ با عنوان GFLC درج شده است. علاوه بر این، معیارهای سنجش به دست آمده از سیستم کنترل پژوهش نینگ<sup>۱۶</sup> و همکاران (۲۰۰۹)،<sup>[۲۷]</sup> با میراگرهای نیمه فعال MR و کنترل‌کننده‌ی فازی انطباق پذیر ترکیب شده با مود لغزش (AFSMC)<sup>۱۷</sup> نیز در جدول ۵ ارائه شده است. از بررسی مقادیر معیارهای سنجش برای کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی STFC و مقایسه‌ی آن با دو سیستم GFLC و AFSMC در زلزله‌های مختلف، می‌توان دریافت که:

۱. کنترل‌کننده‌ی STFC، بیشینه و نرم برش پایه‌ی پل تحت زلزله‌های مختلف (به جز نورث پالم اسپرینگز) را کاهش داده است. این کاهش در زلزله‌های نورث ریج و چی - چی قابل ملاحظه است. همچنین بیشینه و نرم لنگرهای واژگونی نیز کاهش یافته است.

۲. بیشینه و نرم جابه‌جایی میانه‌ی پل توسط سیستم پیشنهادی در زلزله‌های مختلف کاهش چشم‌گیری داشته‌اند (به طور میانگین به ترتیب در حدود ۴۵ و ۵۵ درصد). بیشینه و نرم تغییرشکل در جداسازهای لرزه‌ی دواتهای پل نیز تحت زلزله‌های مختلف به طور میانگین نسبت به حالت کنترل نشده به ترتیب در حدود ۶۰ و ۷۳ درصد کاهش یافته‌اند.

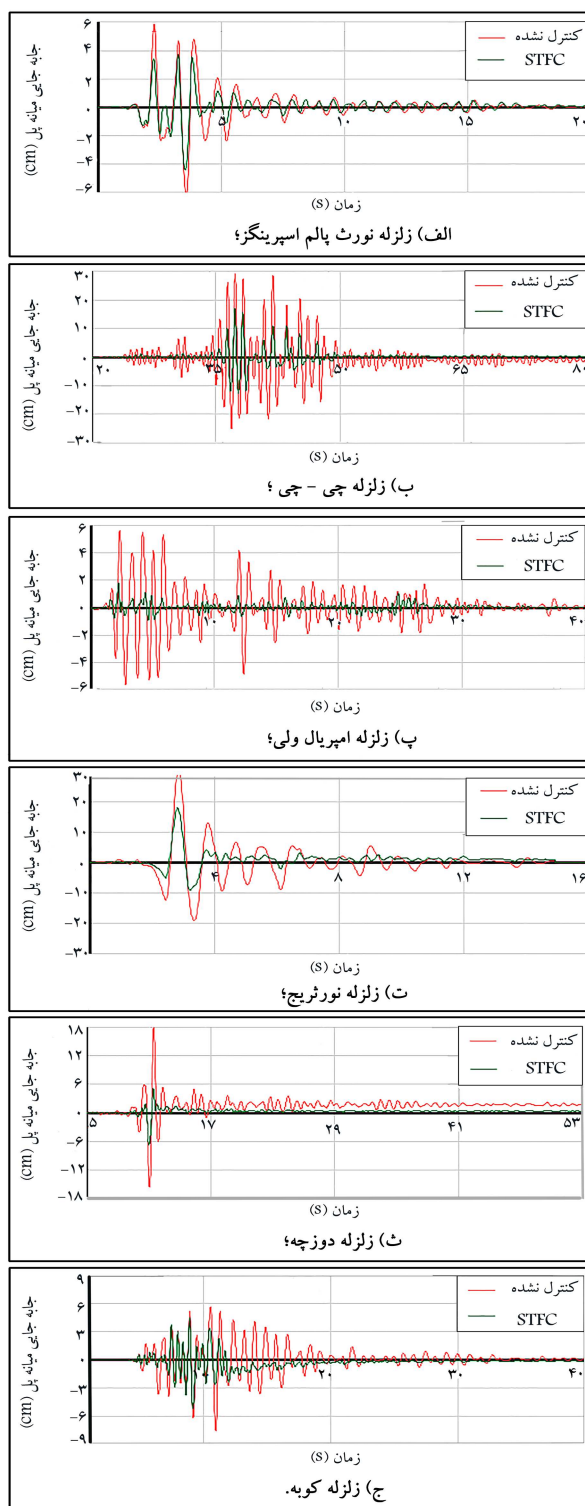
۳. به جز زمین‌لرزه‌های نورث ریج و چی - چی، در سایر زلزله‌ها، کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی STFC در کاهش بیشینه‌ی شتاب موفق نبوده است. تعدد معیارهای مرتبط با تغییرشکل ( $J_2$ ,  $J_6$ ,  $J_{11}$  و  $J_{14}$ ) در تابع هدف بهینه‌سازی را می‌توان علت این امر دانست. البته امر اخیر در سازه‌ها با جداسازهای لرزه‌ی دور از انتظار نیست و مشاهده می‌شود که کنترل‌کننده‌های GFLC و AFSMC نیز در کاهش بیشینه‌ی شتاب پل وضعیت مشابهی داشته و موفق نبوده‌اند.

۴. کاهش بیشینه و نرم انحنای پایه‌های پل (معیار شکل‌پذیری) نیز توسط STFC به طور میانگین بیش از ۵۰٪ بوده است. حتی در زلزله‌ی دوزچه‌ی ترکیه، کاهش بیشینه‌ی شکل‌پذیری به ۸۷٪ رسیده است.

۵. سیستم کنترل پیشنهادی تعداد مفاصل خمیری تشکیل شده در زلزله‌های چی‌چی و نورث ریج را به نصف حالت کنترل نشده و در زلزله‌ی دوزچه‌ی ترکیه از ۳ عدد در حالت کنترل نشده،<sup>[۱۰]</sup> به صفر کاهش داده است. انرژی تلف شده در سازه نیز نسبت به حالت کنترل نشده بیش از ۸۳٪ کاهش یافته است.

۶. از مقایسه‌ی معیارهای سنجش به دست آمده از کنترل‌کننده‌ی STFC با کنترل‌کننده‌ی انطباق پذیر فازی AFSMC، مشاهده می‌شود که کنترل‌کننده‌ی STFC در کاهش عموم پاسخ‌ها در زمین‌لرزه‌های مختلف توانمندتر بوده است. به ویژه برتری مذکور در معیارهای مرتبط با خسارت (مانند: جابه‌جایی میانه‌ی پل، تغییرشکل در تکیه‌گاه‌ها، شکل‌پذیری، انرژی تلف شده در سازه، و تعداد مفاصل خمیری ایجاد شده) مشهود است.

۷. از مقایسه‌ی معیارهای سنجش به دست آمده از کنترل‌کننده‌ی STFC با کنترل‌کننده‌ی فازی GFLC نیز مشاهده می‌شود که اگرچه عملکرد هر دو کنترل‌کننده در کاهش پاسخ‌ها تحت زلزله‌ی نورث پالم اسپرینگز تقریباً مشابه



شکل ۹. تاریخچه جابه‌جایی میانه پل.

گرفته است. در نهایت پاسخ‌های لرزه‌ی سازه با انجام آنالیز غیرخطی و معیارهای سنجش پل محاسبه شده‌اند.

در شکل ۹، تاریخچه‌ی جابه‌جایی میانه‌ی دهانه‌ی پل را در زمین‌لرزه‌های مختلف برای دو حالت سازه‌ی کنترل نشده و کنترل شده با کنترل‌کننده‌ی STFC مشاهده می‌شود. بررسی و مقایسه‌ی تصاویر مذکور به خوبی نشان‌گر توانمندی سیستم



جدول ۵. معیارهای سنجش پل بزرگراه محک کنترل شده به وسیله ی میراگر MR و کنترل کننده های STFC، GFLC و AFSMC.

معیارهای ارزیابی	کنترل کننده	نورث پالم اسپرینگر	جی جی	امپریال ولی	نورث ریج	دوزچه ترکیه	کوبه	میانگین
$J_1$ (پیشینه برش پایه)	GFLC AFSMC STFC	۱/۰۳۵۹ ۰/۹۷۴۷ ۱/۰۳۷۲	۰/۷۰۰۳ ۰/۷۵۶۲ ۰/۶۴۶۸	۰/۷۲۶۴ ۰/۷۳۲۵ ۰/۶۶۷۳	۰/۷۷۵۸ ۰/۸۱۱۵ ۰/۷۰۰۱	۰/۸۸۰۱ ۰/۸۹۰۰ ۰/۹۶۲۵	۰/۸۸۹۸ ۰/۸۷۱۹ ۰/۸۲۲۹	۰/۸۳۴۷ ۰/۸۳۹۵ ۰/۸۰۶۲
$J_2$ (پیشینه لنگر واژگونی)	GFLC AFSMC STFC	۰/۶۷۷۲ ۰/۶۸۲۴ ۰/۶۷۲۰	۰/۹۵۹۱ ۰/۹۷۲۸ ۰/۹۵۱۵	۰/۶۵۳۳ ۰/۶۷۷۷ ۰/۳۶۳۹	۰/۹۵۹۰ ۰/۹۶۰۸ ۰/۹۳۸۶	۰/۹۷۰۸ ۰/۹۷۳۲ ۰/۵۶۹۷	۰/۶۳۰۷ ۰/۵۸۶۸ ۰/۶۰۵۸	۰/۸۰۸۴ ۰/۸۰۹۰ ۰/۶۸۳۶
$J_3$ (پیشینه جابه جایی میانه ی پل)	GFLC AFSMC STFC	۰/۷۰۶۹ ۰/۷۲۷۵ ۰/۷۱۴۹	۰/۶۷۸۰ ۰/۷۹۶۶ ۰/۵۸۰۵	۰/۷۳۲۸ ۰/۷۵۴۰ ۰/۳۱۷۳	۰/۷۰۶۳ ۰/۷۴۹۵ ۰/۵۸۲۷	۰/۶۷۳۵ ۰/۶۷۲۷ ۰/۳۷۶۵	۰/۷۲۵۲ ۰/۶۷۵۵ ۰/۶۸۹۲	۰/۷۰۳۸ ۰/۷۲۹۳ ۰/۵۴۳۵
$J_4$ (پیشینه شتاب میانه ی پل)	GFLC AFSMC STFC	۱/۰۰۷۴ ۱/۰۰۵۳۲ ۰/۹۸۰۰	۰/۹۷۶۱ ۱/۰۰۳۰۴ ۰/۸۲۳۰	۱/۱۰۵۹ ۰/۹۵۵۰ ۱/۰۲۱۴	۰/۹۳۲۴ ۰/۹۵۷۳ ۰/۷۶۴۳	۰/۸۹۱۱ ۰/۹۰۳۸ ۱/۱۹۸۴	۰/۹۷۶۵ ۱/۰۰۴۰ ۱/۰۳۲۲	۰/۹۸۱۶ ۰/۹۸۴۰ ۰/۹۶۹۹
$J_5$ (پیشینه تغییر شکل در تکیه گاه)	GFLC AFSMC STFC	۰/۶۳۲۰ ۰/۴۹۴۸ ۰/۶۱۶۸	۰/۶۲۸۷ ۰/۷۴۱۹ ۰/۵۴۳۶	۰/۳۹۱۷ ۰/۴۱۷۳ ۰/۱۲۲۹	۰/۶۶۴۶ ۰/۷۰۰۷ ۰/۵۴۰۵	۰/۶۴۶۵ ۰/۶۱۶۷ ۰/۳۱۲۸	۰/۳۷۲۰ ۰/۳۰۵۴ ۰/۳۵۱۳	۰/۵۵۵۹ ۰/۵۴۶۷ ۰/۴۱۴۶
$J_6$ (پیشینه شکل پذیری)	GFLC AFSMC STFC	۰/۶۷۷۲ ۰/۶۸۲۴ ۰/۶۷۲۰	۰/۵۲۱۸ ۰/۷۲۵۴ ۰/۴۲۴۲	۰/۶۵۳۳ ۰/۶۷۷۷ ۰/۳۶۳۹	۰/۵۹۵۴ ۰/۶۵۷۳ ۰/۳۹۳۷	۰/۲۴۴۳ ۰/۲۵۴۵ ۰/۱۲۵۵	۰/۶۳۰۷ ۰/۵۸۶۸ ۰/۶۰۵۸	۰/۵۵۳۸ ۰/۵۹۷۴ ۰/۴۳۰۸
$J_7$ (پیشینه انرژی تلف شده)	GFLC AFSMC STFC	*	*	*	۰/۳۴۸۷ ۰/۴۱۸۷ ۰/۱۶۷۴	۰/۰۱۶۱ ۰/۰۲۱۳ *	*	۰/۰۹۸۵ ۰/۱۲۷۴ ۰/۰۴۱۰
$J_8$ (تعداد مفصل پلاستیک)	GFLC AFSMC STFC	*	*	*	۰/۷۵ ۱ ۰/۵	۰/۳۳۳۳ ۰/۳۳۳۳ *	*	۰/۲۹۱۷ ۰/۳۳۳۳ ۰/۱۶۶۷
$J_9$ (نرم برش پایه)	GFLC AFSMC STFC	۰/۸۸۹۲ ۰/۹۲۹۹ ۰/۸۶۱۲	۰/۷۶۵۱ ۰/۷۷۷۲ ۰/۵۰۹۵	۰/۵۸۱۸ ۰/۵۳۷۷ ۰/۵۵۶۹	۰/۷۳۵۱ ۰/۷۵۷۱ ۰/۵۸۶۵	۰/۷۴۷۵ ۰/۷۵۸۶ ۰/۸۵۸۹	۰/۷۲۵۶ ۰/۷۱۴۳ ۰/۷۳۵۵	۰/۷۴۰۷ ۰/۷۴۵۸ ۰/۶۸۴۸
$J_{10}$ (نرم لنگر واژگونی)	GFLC AFSMC STFC	۰/۶۲۱۳ ۰/۶۲۱۴ ۰/۶۰۵۶	۰/۷۴۸۹ ۰/۷۴۳۱ ۰/۴۶۸۱	۰/۵۳۲۳ ۰/۴۹۵۰ ۰/۲۸۱۴	۰/۷۴۰۳ ۰/۷۸۱۷ ۰/۶۳۶۹	۰/۴۱۱۸ ۰/۴۲۰۶ ۰/۲۳۸۲	۰/۶۲۷۹ ۰/۶۰۰۸ ۰/۵۳۴۴	۰/۶۱۳۷ ۰/۶۱۰۴ ۰/۴۶۰۸
$J_{11}$ (نرم جابه جایی میانه ی پل)	GFLC AFSMC STFC	۰/۶۵۵۶ ۰/۶۵۱۴ ۰/۶۴۴۸	۰/۶۲۲۵ ۰/۶۶۱۵ ۰/۳۹۰۵	۰/۵۵۵۴ ۰/۵۱۴۷ ۰/۱۹۳۶	۰/۶۵۸۵ ۰/۶۸۹۷ ۰/۵۱۲۰	۰/۴۹۲۸ ۰/۴۹۷۸ ۰/۲۹۱۶	۰/۶۶۱۴ ۰/۶۳۱۲ ۰/۵۷۱۱	۰/۶۰۷۷ ۰/۶۰۷۷ ۰/۴۳۳۹
$J_{12}$ (نرم شتاب میانه ی پل)	GFLC AFSMC STFC	۰/۸۴۴۵ ۰/۹۰۹۰ ۰/۸۵۶۹	۰/۷۹۲۱ ۰/۸۵۵۷ ۰/۶۵۱۸	۰/۷۴۱۰ ۰/۶۹۸۹ ۰/۸۵۱۵	۰/۷۹۷۲ ۰/۸۶۴۰ ۰/۷۹۷۰	۰/۹۲۴۴ ۰/۹۴۸۶ ۱/۲۱۴۴	۰/۹۵۳۷ ۰/۹۷۰۰ ۱/۰۳۶۲	۰/۸۴۲۲ ۰/۸۷۴۴ ۰/۹۰۱۳
$J_{13}$ (نرم تغییر شکل در تکیه گاه)	GFLC AFSMC STFC	۰/۲۸۸۶ ۰/۳۳۸۰ ۰/۲۸۶۴	۰/۵۸۹۶ ۰/۶۲۰۷ ۰/۳۵۶۱	۰/۳۴۶۸ ۰/۳۲۱۱ ۰/۱۱۰۴	۰/۶۳۰۳ ۰/۶۵۱۴ ۰/۴۷۲۸	۰/۳۲۹۶ ۰/۳۲۷۰ ۰/۲۰۴۵	۰/۲۴۶۳ ۰/۲۳۴۵ ۰/۲۲۳۹	۰/۴۰۵۲ ۰/۴۱۵۵ ۰/۲۷۵۷
$J_{14}$ (نرم شکل پذیری)	GFLC AFSMC STFC	۰/۶۲۱۳ ۰/۶۲۱۴ ۰/۶۰۵۶	۰/۳۷۸۲ ۰/۴۴۵۰ ۰/۲۶۰۱	۰/۵۳۲۳ ۰/۴۹۵۰ ۰/۲۸۱۴	۰/۸۷۹۰ ۰/۵۷۴۰ ۰/۸۲۴۰	۰/۰۶۱۵ ۰/۰۷۳۱ ۰/۰۲۲۹	۰/۶۲۷۹ ۰/۶۰۰۸ ۰/۵۳۴۴	۰/۵۱۶۷ ۰/۴۶۸۲ ۰/۴۲۱۴

## ۷. نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، پس از اشاره به مزایای سیستم های استنتاج فازی و نیز الگوریتم های کنترل انطباق پذیر، کنترل کننده ی فازی خودتنظیم بهینه شده به عنوان الگوریتمی انطباق پذیر برای کنترل لرزه یی پیشنهاد شده است. به منظور سنجش کارایی الگوریتم

است، اما کنترل کننده ی STFC در کاهش عموم پاسخ ها و به ویژه معیارهای مرتبط با خسارت، در دیگر زمین لرزه ها (اعم از زمین لرزه های میدان نزدیک، نظیر نورث ریج و میدان دور، نظیر کوبه) کارآمدتر بوده است. لذا می توان نتیجه گرفت که فرایند تطبیق در کنترل کننده ی STFC به خوبی عملکرد کنترل کننده را در جهت کاهش پاسخ ها و رسیدن به هدف (کاهش خسارت) پیش می برد.

ادامه‌ی جدول ۵.

میانگین	کوبه	دوزچه ترکیه	نورثریج	امپریال ولی	چی چی	نورث پالم اسپرینگز	کنترل کننده	معیارهای ارزیابی
۰/۰۱۸۲ ۰/۰۱۶۹ ۰/۰۲۳۴	۰/۰۱۲۱ ۰/۰۱۲۸ ۰/۰۲۲۸	۰/۰۲۳۴ ۰/۰۱۸۸ ۰/۰۲۴۶	۰/۰۲۵۱ ۰/۰۲۳۷ ۰/۰۲۴۹	۰/۰۱۰۶ ۰/۰۰۹۲ ۰/۰۲۳۰	۰/۰۲۵۳ ۰/۰۲۴۱ ۰/۰۲۴۸	۰/۰۱۳۷ ۰/۰۱۲۸ ۰/۰۲۰۴	GFLC AFMSC STFC	$J_{15}$ (بیشینه نیروی کنترل)
۰/۵۳۰۶ ۰/۵۲۰۸ ۰/۳۹۶۰	۰/۳۶۶۸ ۰/۳۰۱۱ ۰/۳۴۶۳	۰/۶۴۰۹ ۰/۶۱۱۴ ۰/۳۱۰۰	۰/۶۰۵۴ ۰/۶۳۸۲ ۰/۴۹۲۳	۰/۳۶۰۲ ۰/۳۸۳۸ ۰/۱۱۳۰	۰/۶۰۲۰ ۰/۷۱۰۴ ۰/۵۲۰۵	۰/۶۰۸۴ ۰/۴۷۹۷ ۰/۵۹۳۷	GFLC AFMSC STFC	$J_{16}$ (بیشینه حرکت دستگاه کنترل)
- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	GFLC AFMSC STFC	$J_{17}$ (بیشینه توان مورد نیاز)
- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	GFLC AFMSC STFC	$J_{18}$ (انرژی توان مورد نیاز)
۱۶ ۱۶ ۱۶	۱۶ ۱۶ ۱۶	۱۶ ۱۶ ۱۶	۱۶ ۱۶ ۱۶	۱۶ ۱۶ ۱۶	۱۶ ۱۶ ۱۶	۱۶ ۱۶ ۱۶	GFLC AFMSC STFC	$J_{19}$ (تعداد دستگاه های کنترل)
۸ ۴۸ ۱۲	۸ ۴۸ ۱۲	۸ ۴۸ ۱۲	۸ ۴۸ ۱۲	۸ ۴۸ ۱۲	۸ ۴۸ ۱۲	۸ ۴۸ ۱۲	GFLC AFMSC STFC	$J_{20}$ (تعداد حسگرها)
- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	GFLC AFMSC STFC	$J_{21}$ (بعد منبع محاسباتی)

AFSMC، توانمندی‌های الگوریتم انطباق‌پذیر خودتنظیم پیشنهادی در پژوهش حاضر را بیش از پیش اثبات می‌کند.

- توانایی و کارایی بیشتر کنترل‌کننده‌ی فازی خودتنظیم پیشنهادی در مقایسه با کنترل‌کننده‌ی فازی GFLC در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ی پل محک، علاوه بر اینکه بیانگر صحت عملکرد کنترل‌کننده‌های اصلی و فرعی در STFC است، نشان می‌دهد که فرایند تطبیق‌پذیری در کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی، دستور کنترل را به درستی در شرایط مختلف در جهت کمینه‌سازی پاسخ‌های سازه، اصلاح و صادر می‌کند. باید افزود که بررسی کاهش معیارهای نرم پاسخ در کنار معیارهای بیشینه‌ی پاسخ تحت تحریک‌های مختلف، می‌تواند گواه مضاعفی بر این ادعا باشد.
- قابلیت کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی (با توجه به استفاده از سیستم نیمه‌فعال) در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ی، می‌تواند هزینه‌ی ساخت و نگهداری را کاهش دهد.

پیشنهادی، کنترل‌کننده‌ی موردنظر به همراه میراگرهای نیمه‌فعال MR برای کنترل لرزه‌ی پل بزرگراه محک استفاده شده است. از بررسی نتایج و محاسبه‌ی معیارهای سنجش مرتبط به سازه‌ی پل محک، می‌توان دریافت که:

- با توجه به کاهش قابل ملاحظه‌ی معیارهای مرتبط با خسارت (نظیر: جابه‌جایی میانه‌ی پل، تغییرشکل جداسازها، شکل‌پذیری، انرژی تلف شده، و تعداد مفاصل خمیری تشکیل شده در سازه)، می‌توان سیستم پیشنهادی را در دستیابی به هدف طراحی شده برای آن که کاهش خسارت سازه‌ی پل بزرگراه محک است، توانمند ارزیابی کرد.
- کارآمدی چشمگیر کنترل‌کننده‌ی فازی خودتنظیم پیشنهادی در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ی در انواع زمین‌لرزه‌ها، بیانگر عملکرد مطلوب سیستم انطباق‌پذیر الگوریتم ذکرشده و مقاوم بودن آن نسبت به عدم قطعیت در تحریک زمین‌لرزه است. مضاف بر اینکه برتری کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی در مقایسه با کنترل‌کننده‌ی انطباق‌پذیر

## پانویس‌ها

1. Matlab
2. Northridge
3. Kobe
4. Chi-Chi

5. Agrawal
6. Orange
7. ABAQUS
8. SIMULINK
9. if-then
10. clipped-optimal algorithm
11. adaptive controller

12. self-tuning
13. primary controller
14. secondary controller
15. Kalkan & Kunnath
16. Ning
17. adaptive fuzzy sliding mode controller

## منابع (References)

1. Bathaei, A. and Zahrai, S.M. "Improving semi-active vibration control of an 11-story structure with non-linear behavior and floating fuzzy logic algorithm", *Structures*, **39**, pp. 132-146, (2022).
2. Bozorgvar, M. and Zahrai, S.M. "Semi-active seismic control of buildings using MR damper and adaptive neural-fuzzy intelligent controller optimized with genetic algorithm", *Journal of Vibration and Control*, **25**(2), pp. 273-285 (2019).
3. Gkatzogias, K.I. and Kappos, A. "Semi-Active control systems in bridge engineering: A review of the current state of practice", *Structural Engineering International*, **26**(4), pp. 290-300 (2016).
4. Ou, J. and Li, H. "Design approaches for active, semi-active and passive control systems based on analysis of characteristics of active control force", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **8**(4), pp. 493-506 (2009).
5. Spencer Jr., B.F., Dyke, S.J. and Deoskar, H.S. "Benchmark problems in structural control-part I: Active mass driver system", *Journal of Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **27**(11), pp. 1127-1139 (1998).
6. Ohtori, Y., Christenson, R.E., Spencer Jr., B.F. and et al. "Benchmark control problems for seismically excited nonlinear buildings", *Journal of Engineering Mechanics*, **130**(4), pp. 366-385 (2004).
7. Yang, J.N., Agrawal, A.K., Samali, B. and et al. "Benchmark problem for response control of wind excited tall buildings", *Journal of Engineering Mechanics*, **130**(4), pp. 437-446 (2004).
8. Dyke, S.J., Caicedo, J.M., Turan, G. and et al. "Phase I benchmark control system for seismic response of cable-stayed bridges", *Journal of Structural Engineering*, **129**(7), pp. 857-872 (2003).
9. Narasimhan, S., Nagarajaiah, S., Gavin, H. and et al. "Smart base-isolated benchmark building. Part I: Problem definition", *Journal of Structural Control and Health Monitoring*, **13**(2-3), pp. 573-588 (2006).
10. Agrawal, A.K., Tan, P., Nagarajaiah, S. and et al. "Benchmark structural control problem for a seismically excited highway bridge-Part I: Problem definition", *Journal of Structural Control and Health Monitoring*, **16**(5), pp. 509-529 (2009).
11. Tan, P. and Agrawal, A.K. "Benchmark structural control problem for a seismically excited highway bridge-Part II: Phase I sample control designs", *Journal of Structural Control and Health Monitoring*, **16**(5), pp. 530-548 (2009).
12. Bhowmik, K. and Saha, P. "Seismic response control of benchmark highway bridge using passive hybrid control systems", *International Journal of Materials and Structural Integrity*, **11**(4), pp. 155-174 (2017).
13. Hosseini, R., Rashidi, M., Bulajić, B. and et al. "Multi-Objective optimization of three different SMA-LRBs for seismic protection of a benchmark highway bridge against real and synthetic ground motions", *Applied Sciences*, **10**(12), pp. 4076-4101 (2020).
14. Soto, M.G. and Adeli, H. "Semi-active vibration control of smart isolated highway bridge structures using replicator dynamics", *Engineering Structures*, **186**, pp. 536-552 (2019).
15. Takin, K., Doroudi, R. and Doroudi, S. "Vibration control of structure by optimizing the placement of semi-active dampers and fuzzy logic controllers", *Australian Journal of Structural Engineering*, **22**(3), pp. 222-235 (2021).
16. Yi, F., Dyke, S.J., Caicedo, J.M. and et al. "Experimental verification of multi-input seismic control strategies for smart dampers", *Journal of Engineering Mechanics*, **127**(11), pp. 1152-1164 (2001).
17. Zadeh, L.A. "Fuzzy Set", *Journal of Information and Control*, **8**, pp. 338-353 (1965).
18. Mendel, J.M., John, R.I. and Liu, F. "Interval type-2 fuzzy logic systems made simple", *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on*, **14**(6), pp. 808-821 (2006).
19. Kia, S.M. "Soft computing in MATLAB", Tehran: Rayane Sabz, 5th Ed., (in Persian) (2018).
20. Baghban, A., Karamodin, A. and Kazemi, H.H. "The effect of fuzzy controller on damage of steel structure considering structural uncertainties", *Journal of Scientia Iranica C*, **23**(6), pp. 2441-2450 (2016).
21. Bozorgvar, M. and Zahrai, S.M. "Semi-active seismic control of a 9-story benchmark building using adaptive neural-fuzzy inference system and fuzzy cooperative co-evolution", *Smart Structures and Systems*, **23**(1), pp. 1-14 (2019).
22. Datta, T.K. and Madan, A. "Semi-active fuzzy control of the seismic response of building frames with MR dampers", *Journal of Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **41**(1), pp. 99-118 (2012).
23. Bathaei, A., Zahrai, S.M. and Ramezani, M. "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*, **24**(13), pp. 2938-2953 (2017).
24. Lakhani, M.T. and Soni, D.P. "Comparative study of smart base-isolation using fuzzy control and neural network", *Procedia Engineering*, **173**, pp. 1825-1832 (2017).
25. Reigles, D.G. and Symans, M.D. "Supervisory fuzzy control of a base isolated benchmark building utilizing a neuro-fuzzy model of controllable fluid viscous dampers", *Journal of Structural Control and Health Monitoring*, **13**(2-3), pp. 724-747 (2006).
26. Azadvar, M., Hajkazemi, H. and Karamodin, A. "A Study on the optimization of the performance of type 1 fuzzy controller based on the IDA method", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, **43**, pp. 807-819 (2019).

27. Ali, S.F. and Ramaswamy, A. "GA-optimized FLC-driven semi-active control for phase-II smart nonlinear base-isolated benchmark building", *Journal of Structural Control & Health Monitoring*, **15**(5), pp. 797-820 (2008).
28. Karamodin, A., Irani, F. and Baghban, A. "Effectiveness of a fuzzy controller on the damage index of nonlinear benchmark buildings", *Journal of Sciatica Iranica A*, **19**(1), pp. 1-10 (2012).
29. Bathaei, A., Ramezani, M. and Zahrai S.M. "Comparing fuzzy type-1 and -2 in semi-active control with TMD considering uncertainties", *Smart Structures and Systems*, **23**(2), pp. 155-171 (2019).
30. Venazi, I. "A review on adaptive methods for structural control", *The Open Civil Engineering Journal*, **10**(1), pp. 653-667 (2016).
31. Ozbulut, O.E., Bitaraf, M. and Hurlebaus, S. "Adaptive control of base-isolated structures against near-field earthquakes using variable friction dampers", *Journal of Engineering Structures*, **33**(12), pp. 3143-3154 (2011).
32. Soares, R.W., Barroso, L.R. and Al-Fahdawi, O.A. "Simple adaptive control to attenuate bridge's seismic responses considering parametric variations", *Advances in Structural Engineering*, **23**(1), pp. 1-14 (2019).
33. Bitaraf, M. and Hurlebaus, S. "Semi-active adaptive control of seismically excited 20-story nonlinear building", *Journal of Engineering Structures*, **56**(11), pp. 2107-2118 (2013).
34. Hosseini, A., Taghikhany, T. and Yeganeh Fallah, A. "Direct adaptive algorithm for seismic control of damaged structures with faulty sensors", *Journal of Vibration and Control*, **24**(24), pp. 5854-5866 (2018).
35. Hosseini, A., Taghikhany, T. and Jahangiri, M. "Optimal tuned direct adaptive controller for seismic protecting of structures", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **32**(18-19), pp. 2139-2152 (2021).
36. Rahmani, B., Ziaiefar, A. and Hashemi, Sh. "Output feedback-based adaptive fuzzy sliding mode control for seismic response reduction of base-isolated buildings", *ISA Transactions*, **126**, pp. 94-108 (2022).
37. Ning, X.L., Tan, P., Huang, D.Y. and Zhou, F.L. "Application of adaptive fuzzy sliding mode control to a seismically excited highway bridge", *Journal of Structural Control and Health Monitoring*, **16**(6), pp. 639-656 (2009).
38. Zhu, H., Chen, Z., Wang, J. and et al. "Fuzzy adaptive compensation control for uncertain building structural systems by sliding-mode technology", *Complexity*, **2018**, pp. 1-6 (2018).
39. Mosè, G. and Bartolomeo, C. "Adaptive type-2 fuzzy control of non-linear systems", *2009 IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems*, pp. 705-709 (2009).
40. Zamani, A.A., Tavakoli, S. and Etedali, S. "Control of piezoelectric friction dampers in smart base-isolated structures using self-tuning and adaptive fuzzy proportional-derivative controllers", *Journal of Fuzzy Sets and Systems*, **28**(10), pp. 1-16 (2016).
41. Saeed, M.U., Sun, Z. and Elias, S. "Semi-active vibration control of building structure by self tuned brain emotional learning based intelligent controller", *Journal of Building Engineering*, **46**(2), pp. 1-24 (2022).
42. Hosseini, A. and Taghikhany, T. "Online self-tuning mechanism for direct adaptive control of tall building", *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, **32**(3), pp. 424-446 (2018).
43. Guclu, R. and Yazici, H. "Self-tuning fuzzy logic control of a non-linear structural system with ATMD against earthquake", *Journal of Nonlinear Dynamic*, **56**, pp. 199-211 (2009).
44. Zhao, D. and Li, Y. "Fuzzy control for seismic protection of semiactive base-isolated structures subjected to near-Fault earthquakes", *Journal of Mathematical Problems in Engineering*, **1**, pp. 1-17 (2015).
45. Zhao, D., Liu, Y. and Li, H. "Self-tuning fuzzy control for Seismic protection of smart base-isolated buildings subjected to pulse-type near-Fault earthquakes", *Journal of Applied Sciences*, **7**(2), pp. 185-206 (2017).
46. Mavroeidis, G.P., Dong, G. and Papageorgiou, A.S. "Near-fault ground motions, and the response of elastic and inelastic single-degree-of-freedom (SDOF) systems", *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **33**(9), pp. 1023-1049 (2004).
47. Kalkan, E. and Kunnath, S.K. "Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings", *Earthquake Spectra*, **22**(2), pp. 367-390 (2006).