



## کنترل لرزه‌های مدل برشی یک قاب ۱۰ طبقه با استفاده از میراگر جرمی فعال و بهینه‌یابی با الگوریتم ازدحام ذرات

مازیار فهیمی فرزام\*، بابک علی نژاد، سید علی موسوی گاوگانی

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۱۲-۰۸  
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۲-۰۶  
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۲-۱۰  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۲-۲۳

### کلمات کلیدی:

کنترل فعال  
منطق فازی  
میراگر جرمی  
زلزله حوزه نزدیک  
الگوریتم ازدحام ذرات

**خلاصه:** کنترل ارتعاشات سازه‌های بلند تحت تحریک زلزله و باد به ترتیب بدلیل ایمنی سازه و حس آسایش ساکنین آن‌ها، همیشه جزء موضوعات مهم در حوزه مهندسی سازه بوده است. یکی از ابزارهای توسعه یافته به منظور کنترل ارتعاش سازه‌ها، میراگر جرمی هماهنگ شده (TMD) می‌باشد که به روش‌های مختلفی در سازه‌ها بکار برده می‌شود. در این مقاله مدل خطی یک ساختمان ۱۰ طبقه برشی در محیط متلب تحت تحریک ۲۸ رکورد زلزله حوزه دور و نزدیک مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور کنترل ارتعاش سازه، میراگر جرمی هماهنگ شده فعال (ATMD) مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین با توجه به ماهیت تصادفی تحریک زلزله از منطق فازی و سیستم استنتاج ممدانی به منظور تعیین نیروی کنترل استفاده شده است. به علاوه از الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) برای تعیین مقادیر بهینه توان عملگر در میراگر جرمی فعال استفاده شده است که در این بهینه‌یابی اثر اشباع عملگر نیز مد نظر قرار گرفته است. در ادامه با استفاده از نتایج بدست آمده از این الگوریتم و تحت رکوردهای مختلف، روشی جهت طراحی مقاوم کنترل‌کننده معرفی گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که در صورت استفاده از این سیستم کنترلی و مقدار بهینه توان عملگر، پاسخ سازه به مقدار ۴۴ درصد کاهش می‌یابد. همچنین به دلیل عدم قطعیت موجود در رکوردهای زلزله، اگر توان عملگر میانگین مورد استفاده قرار گیرد، به صورت کلی پاسخ سازه کنترل شده به روش فعال ۳۳ درصد کاهش یافته که به مراتب بیشتر از سازه کنترل شده به روش غیرفعال (۱۶ درصد) می‌باشد.

### ۱- مقدمه

دهه ۱۹۶۰ ایده استفاده از کنترل فعال مطرح گردید. مفاهیم اولیه کنترل فعال سازه شامل تحقیقات زوک در مورد سازه‌های جنبشی بود [۳، ۴] و در ادامه یائو در سال ۱۹۷۲ نظریات دقیق تری در حوزه کنترل فعال ارائه کرد و اجزای چنین سیستم‌های کنترلی را معرفی نمود [۵]. در این راستا ایده اولیه کنترل فعال سازه با استفاده از میراگر جرمی هماهنگ شده به صورت فعال نیز توسط لوند و در سال ۱۹۷۹ مطرح گردید [۶] و در ادامه چنگ و سونگ با معرفی روش‌های بهینه برای محاسبه نیروهای کنترلی، کار لوند را گسترش دادند [۷]. همچنین در سال ۱۹۹۸ وو و یانگ به صورت عملی از این میراگر فعال برای کنترل ارتعاش برج تلویزیونی نیانجینگ استفاده کردند [۸].

در طول سالیان گذشته تحقیقات گسترده‌ای بر روی پایداری سازه‌ها تحت اثر بارهای دینامیکی مانند زلزله و باد صورت گرفته که منجر به معرفی سیستم‌های کنترلی متنوعی شده است. یکی از توسعه یافته‌ترین سیستم‌های کنترلی، میراگر جرمی هماهنگ شده است که در اوایل قرن بیستم توسط فرام و به منظور کنترل ارتعاشات کشتی‌ها ارائه گردید [۱] که جزء روش‌های کنترل غیرفعال در کاهش پاسخ سازه‌ها می‌باشد. مشکل اصلی در استفاده غیرفعال از این ابزار کنترلی، کارایی آن در باندهای فرکانسی محدود می‌باشد [۲].

با توجه به این مشکل و بازدهی کم سیستم‌های غیرفعال، در اوایل

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m.farzam@maragheh.ac.ir



بین الگوریتم‌های هوشمند همچون فازی بدلیل در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در پارامترها و ... مورد استقبال محققین قرار گرفته‌اند.

ایده منطق فازی ابتدا در سال ۱۹۶۵ میلادی توسط پروفیسور لطفی‌زاده و در مقاله‌ای تحت عنوان "مجموعه‌های فازی" مطرح گردید [۱۹]. سیستم‌های فازی به دلیل محاسبات کیفی، توانایی در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود را دارند. در واقعیت نیز عدم قطعیت‌های موجود در سیستم‌های فازی دارای دلایل زیادی است که از آن جمله می‌توان به استفاده از داده‌های دارای اغتشاش اشاره کرد، که به این ترتیب اغلب مقداری عدم قطعیت وابسته به داده‌ها در سیستم‌های فازی موجود می‌باشد [۲۰، ۲۱].

مشابه سایر تکنولوژی‌های کنترل، منطق فازی نیز ابتدا در سایر علوم اعم از مکانیک و برق مورد استفاده قرار گرفت و برای اولین بار در سال ۱۹۹۸ از این منطق برای کنترل حرکت ارتعاش سازه همراه با سیستم جرمی فعال استفاده گردید [۲۲]. در این پژوهش صورت گرفته، پاسخ قاب ۳ طبقه‌ای تحت تحریک لرزه‌ای مورد بررسی قرار گرفته و تاثیر استفاده از محرک جرمی فعال و منطق فازی برای کنترل پاسخ این قاب نیز بررسی شده است. نتایج این پژوهش چگونگی استفاده از منطق فازی به عنوان یک راه ممکن برای کنترل پاسخ سازه را نشان می‌دهد. همچنین در سال ۱۹۹۹ برای اولین بار از منطق فازی برای کنترل ارتعاش لرزه‌ای سازه در برابر باد استفاده شد [۲۳]. در سال ۲۰۰۱ نیز مقایسه‌ای بین عملکرد کنترل‌کننده فازی و بهینه خطی گوسی (GQL) صورت پذیرفت که نتایج بیانگر عملکرد بهتر و مزایای بیشتر کنترل‌کننده فازی در مقایسه با سایر الگوریتم‌های کنترلی در سازه‌های بلند بود و رفتار مطلوبی در سازه مورد بررسی (۷۶ طبقه) مشاهده گردید [۲۴]. در طول سالیان متمادی نیز تلاش‌هایی در حوزه بهینه‌یابی کنترل فعال با منطق فازی و عملگرهای مختلف در راستای کاهش بهینه پاسخ‌های سازه صورت گرفته است [۱۲، ۲۵، ۲۶].

در این میان محققین توجه ویژه‌ای نیز به تاثیر بارهای دینامیکی ناشی از باد بر روی سازه‌های بلند داشتند که از آن جمله می‌توان به مقاله علای و همکاران اشاره نمود. در این مقاله کنترل سازه ۴۸ طبقه (۲۰۹ متر) مجهز به میراگر جرمی غیرفعال و فعال تحت

با وجود توسعه روش‌های کنترل در سه دهه گذشته و برتری قابل توجه سیستم‌های کنترل فعال در کاهش پاسخ سازه‌ها تحت بارهای دینامیکی، این سیستم‌ها چندان مورد اقبال مهندسان قرار نگرفته است که یکی از دلایل آن را می‌توان ناشی از مشکلات اجرایی این سیستم‌ها دانست. اثر اشباع عملگر، اثر سرریز نیروی کنترل، امکان اجرای تعداد محدود سنسورها و کنترل‌کننده‌ها، ایجاد نویزهای تصادفی در سنسورها، تاخیر زمانی، احتمال ناپایداری سازه در اثر اعمال نیروی مستقیم به سازه، نیاز به منبع انرژی بیشتر و پر هزینه بودن از مشکلات اجرایی این سیستم کنترل می‌باشد. همچنین در روند توسعه سیستم‌های کنترل، از سیستم‌های کنترل نیمه فعال بهره گرفته شده است. در سال ۱۹۸۳ هروات برای اولین بار از میراگر جرمی هماهنگ شده با میرایی متغیر برای کنترل ارتعاشات سازه‌های بلند تحت نیروی باد استفاده کرد [۹]. نکته قابل تامل در مواجهه با سیستم‌های کنترل نیمه فعال این است که تقریباً اکثر مشکلات فوق بجز نیاز به منبع انرژی بیشتر و احتمال ناپایداری، در سیستم‌های کنترل نیمه فعال نیز وجود دارد. البته باید توجه داشت که مزیت مهم سیستم‌های نیمه فعال علاوه بر نیاز کم به انرژی، کنترل و انعطاف پذیری بالای آن‌ها می‌باشد اما به دلیل این که سیستم‌های نیمه فعال به صورت غیرمستقیم و با تغییر میرایی یا سختی منجر به کنترل سازه می‌شوند، لذا عملگرهای این نوع کنترل (میراگرهای سیال مغناطیسی، میراگر جرمی نیمه فعال و ...) دارای طبیعتی غیرخطی و هیستریزس می‌باشند و به همین دلیل طراحی و حتی اجرای مناسب چنین سیستم کنترلی نیز در واقعیت بسیار مشکل می‌باشد [۱۰]. لذا در طول سالیان گذشته تحقیقات موازی و گسترده‌ای در مورد کنترل‌های غیرفعال، فعال و نیمه فعال صورت گرفته است که هدف از آن‌ها بررسی عملکرد این روش‌های کنترلی تحت بارهای دینامیکی مختلف و بهبود عملکرد آن‌ها بوده است.

در ادامه تحقیقات وسیعی در خصوص الگوریتم‌های کنترلی برای محاسبه نیروی کنترل آنلاین صورت گرفته است که از جمله این الگوریتم‌ها می‌توان به انتساب قطب [۱۱]، کنترل خطی کلاسیک [۱۲]، نرم  $H_2$  و  $H_\infty$  [۱۳]، کنترل بهینه خطی گوسی [۱۴]، کنترل مود لغزشی [۱۵]، کنترل بهینه لحظه‌ای [۱۶]، کنترل‌کننده PID [۱۷]، شبکه عصبی [۱۸] و منطق فازی و ... اشاره نمود که در این

زلزله‌های مخرب Northridge در سال ۱۹۹۴، Kobe در سال ۱۹۹۵ و Chichi در سال ۱۹۹۹، موضوع بررسی انواع زلزله از لحاظ حوزه نزدیک و دور بودن، جذابیت خاصی بین محققین پیدا نمود که می‌توان به منابع [۳۴، ۳۵] اشاره کرد. همچنین به عنوان مثال کالکان در سال ۲۰۰۶ به بررسی عملکرد دو سازه ۴ و ۶ طبقه فولادی تحت ۲۱ رکورد زلزله (۷ رکورد حوزه دور، ۷ رکورد حوزه نزدیک با جهت پذیری رو به جلو و ۷ رکورد حوزه نزدیک با اثر پرتابی) پرداخته است و نتایج نشان‌دهنده تخریب بیشتر سازه توسط رکوردهای حوزه نزدیک با جهت پذیری رو به جلو می‌باشد [۳۶]. در ادامه ماتا در سال ۲۰۱۱ به مطالعه عملکرد سازه‌ای تک درجه آزادی و چند درجه آزادی با استفاده از میراگر جرمی هماهنگ شده و تحت ۳۳۸ رکورد زلزله (۱۵۶ رکورد نزدیک با جهت پذیری رو به جلو و ۱۸۲ رکورد نزدیک بدون جهت پذیری رو به جلو) پرداخت و نشان داد که رکوردهای دارای جهت پذیری رو به جلو بدلیل ماهیت پالس‌گونه منجر به کاهش کارایی میراگر در مقایسه با رکوردهای بدون جهت پذیری رو به جلو می‌شوند [۳۷]. حاصلی و پورشاء در سال ۲۰۱۸ به مطالعه رفتار سازه‌هایی ۹ و ۱۲ طبقه جداسازی شده توسط جداسازهای هسته سربی (کنترل غیرفعال) تحت ۲۸ رکورد زلزله (۷ رکورد حوزه دور، ۷ رکورد حوزه نزدیک با اثر پرتابی، ۷ رکورد حوزه نزدیک با جهت پذیری رو به جلو و ۷ رکورد حوزه نزدیک بدون ضربه) پرداخته‌اند [۳۸]. بنابراین لازم است عملکرد میراگرهای جرمی هماهنگ شده به صورت فعال نیز تحت انواع مختلف زمین‌لرزه بررسی شود.

در این مطالعه مدل خطی یک ساختمان ۱۰ طبقه برشی تحت ۲۸ رکورد زلزله (۴ گروه ۷ تایی از انواع مختلف رکوردها) به صورت فعال با استفاده از میراگر جرمی هماهنگ شده و کنترل‌کننده فازی به همراه الگوریتم فراکاوشی PSO کنترل گردیده است. ابتدا پاسخ‌های مربوط به این سازه در سه حالت کنترل نشده، کنترل شده به صورت غیرفعال و کنترل شده به صورت فعال ارائه شده و سپس مقایسه‌ای بین پاسخ سازه‌ها تحت تحریک زلزله‌های حوزه نزدیک (بدون ضربه، با اثر پرتابی و جهت پذیری رو به جلو) و حوزه دور صورت گرفته است. مواردی که در این پژوهش به صورت مشخص مورد توجه قرار گرفته است عبارتند از: (۱) در این مطالعه از تعداد مناسبی از رکوردها با مشخصات مختلف برای بررسی آماری استفاده گردیده و

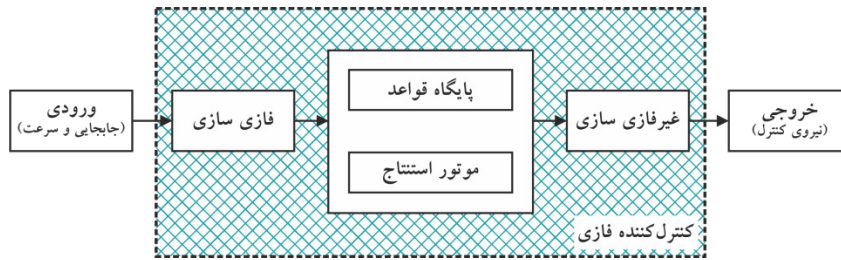
تاثیر ارتعاشات ناشی از بار باد بررسی شده است. عملکرد دو نوع کنترل‌کننده فازی و بهینه خطی کلاسیک (LQR) مورد ارزیابی قرار گرفته و در نهایت عملکرد بهتر کنترل‌کننده فازی نتیجه گرفته شده است. [۲۷]. همچنین سامالی و همکاران نیز به بررسی کنترل سازه ۷۶ طبقه (۳۰۶ متر) تحت تاثیر باد عرضی پرداخته‌اند که در این مطالعه از میراگر جرمی هماهنگ شده فعال به همراه کنترل‌کننده فازی و LQG استفاده گردیده است [۲۸].

اکثر روش‌های کنترلی به منظور بهبود عملکرد خود از روش‌های بهینه‌یابی بهره می‌برند. بنابراین تلاش‌های بسیاری نیز در حوزه استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی در راستای بهینه‌یابی پارامترهای کنترل‌کننده و عملکرد صورت گرفته است که می‌توان به مطالعات جیانگ و عادل اشاره کرد که با پیشنهاد الگوریتم ترکیبی عصبی - ژنتیک حاصل از توسعه الگوریتم ژنتیک نسبت به پیدا کردن نیروی کنترل بهینه در هر گام زمانی اقدام نمودند و روش پیشنهادی نیز همانند روش‌های شبکه عصبی نیازی به تربیت نداشته که نشان از کارایی بالای این روش پیشنهادی است [۲۹]. در ادامه شریعتمدار و مشکات رضوی با بهره‌گیری از الگوریتم ازدحام ذرات نسبت به بهینه‌یابی پارامترهای کنترل‌کننده فازی اقدام کردند [۳۰].

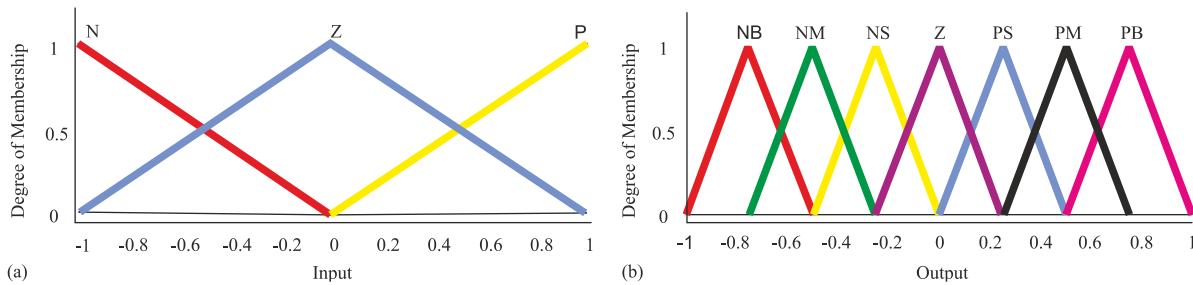
الگوریتم ازدحام ذرات (PSO<sup>۲</sup>) برای اولین بار در سال ۱۹۹۵ توسط جیمز کندی و راسل ابرهاردت در مقاله‌ای تحت عنوان "یک روش بهینه‌سازی جدید با استفاده از نظریه ازدحام ذرات" ارائه گردید [۳۱]. آن‌ها در ابتدا به دنبال نوعی از هوش محاسباتی بودند که نیازی به توانایی فردی نداشته و با استفاده از مدل‌های جمعی به هدف همگرا شود، که این تحقیق منجر به معرفی الگوریتم ازدحام ذرات بر پایه رفتار ماهی‌ها و پرندگان گردید. آن‌ها همچنین نشان دادند که این الگوریتم از لحاظ محاسباتی بسیار سریع و با صرفه می‌باشد. این الگوریتم برای اولین بار در بحث مربوط به میراگر جرمی هماهنگ شده توسط لئونگ و همکاران برای تعیین پارامترهای بهینه یک میراگر جرمی هماهنگ شده همچون نسبت جرمی بهینه، میرایی و فرکانس میراگر تحت ارتعاشی متغیر استفاده گردید [۳۲].

از حدود ۶۰ سال پیش زمین‌لرزه‌ها بر اساس فاصله ایستگاه اندازه‌گیری تا گسل به دو دسته حوزه نزدیک (کمتر از ۱۰ کیلومتر) و دور (بیشتر از ۲۰ کیلومتر) تقسیم شدند [۳۳] و بعد از وقوع

1 Linear Quadratic Regulator  
2 Particle Swarm Optimization



شکل ۱: نمایی شماتیک از منطق فازی



شکل ۲: توابع عضویت [۳۹]. (a) ورودی‌ها، (b) خروجی‌ها

جدول ۱: قوانین فازی [۳۹]

Displacement	Velocity		
	N	Z	P
N	PB	PM	PS
Z	PS	Z	NS
P	NS	NM	NB

جدول ۲: متغیرهای فازی [۳۹]

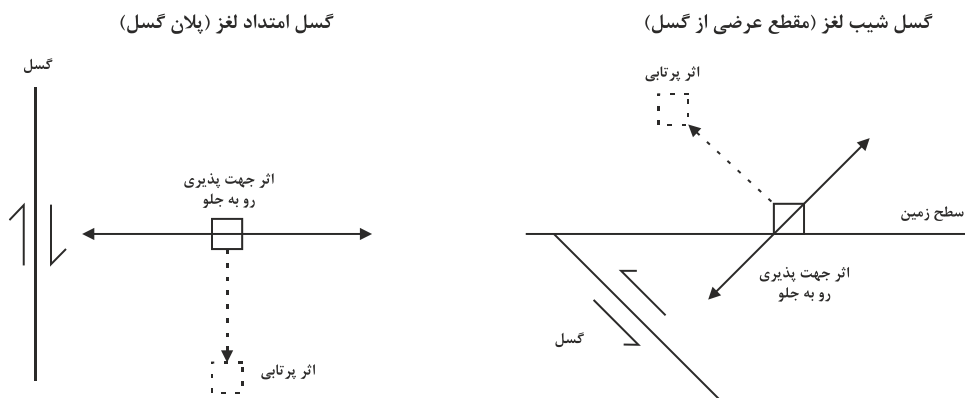
Membership function	Variable	Definition
Input	P	Positive
	Z	Zero
	N	Negative
Output	PB	Positive Big
	PM	Positive Medium
	PS	Positive Small
	Z	Zero
	NS	Negative Small
	NM	Negative Medium
	NB	Negative Big

تاثیر آن‌ها بر پاسخ سازه بررسی شده است. با توجه به اینکه روش‌های متداول پردازش حرکات شدید زمین (فیلتر نمودن رکوردها و اصلاح تراز پایه) باعث حذف ویژگی اثر پرتابی می‌شود از رکوردهایی بدون پردازش استفاده شده و وجود اثر پرتابی در رکوردها کنترل شده است. (۲) در این مطالعه روشی جهت مقاوم نمودن الگوریتم کنترل در حالت کنترل فعال با تاکید بر توان عملگر ارائه شده است. (۳) یکی از محدودیت‌های اجرایی موجود در سیستم‌های کنترل فعال یعنی اشباع عملگر<sup>۱</sup> در نظر گرفته شده است. (۴) سعی شده است پاسخ‌های ارائه شده در حالی بی‌بعد ارائه گردد تا قابل تعمیم به حالت‌های مختلف باشد.

## ۲- کنترل کننده فازی

در این مطالعه از منطق فازی برای کنترل فعال سازه استفاده شده است. منطق فازی دارای ۴ بخش اصلی فازی سازی، پایگاه قواعد، موتور استنتاج و غیرفازی سازی می‌باشد که به‌طور خلاصه در شکل ۱ نشان داده شده است. از آنجایی که ورودی کنترل کننده فازی، جابجایی و سرعت طبقه بام در نظر گرفته شده است، لذا در بخش

1 Actuator Saturation



شکل ۳: مقایسه جهت رکوردهای دارای جهت پذیری رو به جلو و اثر پرتابی در گسل‌های شیب لغز و امتداد لغز [۴۶]

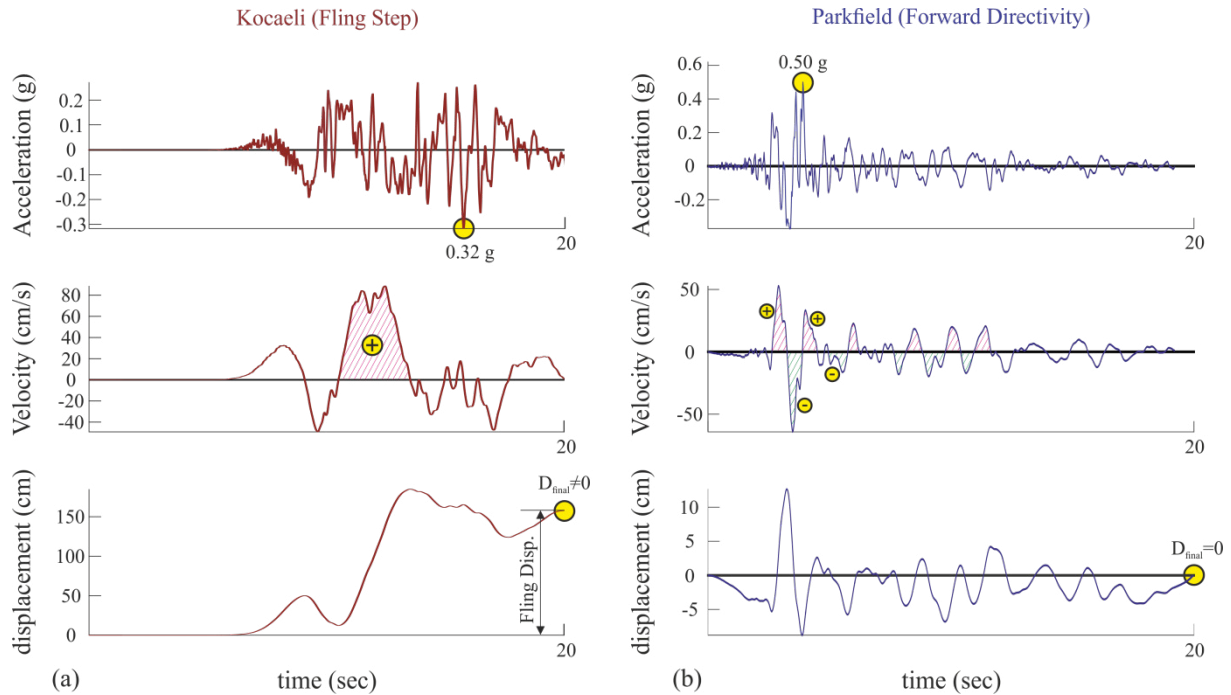
[۴۱]. در ادامه جوئی در پایان نامه خود به بررسی کارایی انواع توابع عضویت از نظر شکلی اعم از مثلثی، دوزنقه‌ای، سهمی و ... پرداخت و با بررسی تمامی حالت ممکن به این نتیجه رسید که تمامی انواع توابع عضویت در کاهش پاسخ جابجایی عملکردی تقریباً یکسان داشته‌اند ولی در کاهش پاسخ شتاب سازه، تابع عضویت مثلثی بطور محسوس عملکردی مطلوب‌تر ارائه می‌دهد [۴۲]. همچنین با توجه به حجم عملیات سبک در تابع عضویت مثلثی نیز، استفاده از این تابع اقتصادی می‌باشد. در ادامه پژوهش فوق، جوئی با بررسی پاسخ سازه در حالتی که دو ورودی (تغییر مکان و سرعت) و یا سه ورودی (تغییر مکان، سرعت و شتاب) به کنترل‌کننده فازی وارد شود، نشان داده که پاسخ تغییر مکان سازه در هر دو حالت با خطای بسیار اندکی یکسان می‌باشد. در خصوص انتخاب سیستم استنتاج مددانی نیز می‌توان به سادگی و شهودی بودن آن در مقایسه با سیستم استنتاج تاکاگی - سوگنو اشاره کرد. سیستم تاکاگی - سوگنو اصولاً برای مدلسازی سیستم‌های غیرخطی پیچیده با قوانین کم و دقت بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴۳].

### ۳- زلزله‌های حوزه نزدیک و دور

همانطور که در مقدمه اشاره شد، زمین‌لرزه‌ها به دو دسته کلی نزدیک و دور از گسل تقسیم‌بندی می‌شوند و زلزله‌های حوزه نزدیک خود به سه دسته دارای اثر پرتابی، دارای جهت پذیری رو به جلو و بدون ضربه تقسیم می‌شوند. زلزله‌های حوزه نزدیک برخلاف حوزه دور، به دلیل گسترش شکست گسل با سرعتی برابر با سرعت موج برشی دارای ضربه‌ای قوی در ابتدای رکورد خود هستند. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، زلزله‌های حوزه نزدیک با اثر

اول به منظور فازی سازی داده‌ها از توابع عضویت مختص ورودی‌ها استفاده شده است که برای هر یک از ورودی‌ها از ۳ تابع عضویت مثلثی در بازه ۱- تا ۱ استفاده شده است. در طول این فرآیند کنترلی، پارامتر خروجی نیروی کنترل می‌باشد و برای غیرفازی سازی نیروی کنترل نیز از توابع عضویت مختص خروجی که شامل ۷ تابع عضویت مثلثی در بازه ۱- تا ۱ می‌باشد، استفاده شده است [۳۹]. اشکال مربوط به توابع عضویت ورودی و خروجی در شکل ۲ نشان داده شده است. در بخش بعد که مربوط به پایگاه قواعد فازی می‌باشد، از ۹ قانون استفاده شده است که در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین متغیرهای فازی که در فرآیند کنترل فازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند نیز در جدول ۲ معرفی شده‌اند. در نهایت در بخش چهارم که مربوط به موتور استنتاج فازی می‌باشد از سیستم استنتاج مددانی بهره گرفته شده است که برای اولین بار در سال ۱۹۷۵ توسط مددانی و آسیلین معرفی گردید [۴۰].

بطور کلی تعیین تعداد و شکل توابع عضویت به صورت سعی و خطا بوده و مبنایی تجربی دارد. لذا در برخی تحقیقات از الگوریتم‌های فراکاوشی برای تعیین مقدار بهینه این پارامترها استفاده می‌گردد. به عنوان مثال پورزینلی و همکاران در سال ۲۰۰۷ بر روی بهینه‌یابی توابع عضویت ورودی‌ها (جابجایی و سرعت) که هر کدام دارای ۵ تابع دوزنقه‌ای و توابع عضویت خروجی (نیروی کنترل فعال) که دارای ۷ تابع مثلثی می‌باشد، پرداختند. در این مطالعه فاصله بین توابع با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه‌یابی شده است که منجر به کاهش بیشتر جابجایی طبقه بام گردیده است [۱۲]. در سال ۲۰۱۶ نیز مشکلات رضوی و شریعتمدار نیز به بررسی محل بهینه توابع عضویت پرداختند



شکل ۴: بررسی تفاوت بین تاریخچه زمانی رکوردهای حوزه نزدیک (a) اثر پرتابی، (b) جهت پذیری رو به جلو

جهت پذیری رو به جلو تقریباً دارای توزیعی یکسان در دو طرف محور افقی می‌باشند (پالس دو طرفه). با این وجود اصلی‌ترین تفاوت بین این دو رکورد، در تاریخچه زمانی جابجایی نمایان می‌شود. رکوردهای دارای جهت پذیری رو به جلو در انتها به مقدار صفر می‌رسند، در صورتی که رکوردهای دارای اثر پرتابی در انتهای تاریخچه زمانی جابجایی دارای مقداری مخالف صفر هستند که این مقدار غیرصفر تحت عنوان جابجایی ماندگار معرفی می‌شود.

#### ۴- صحت سنجی و مطالعه عددی

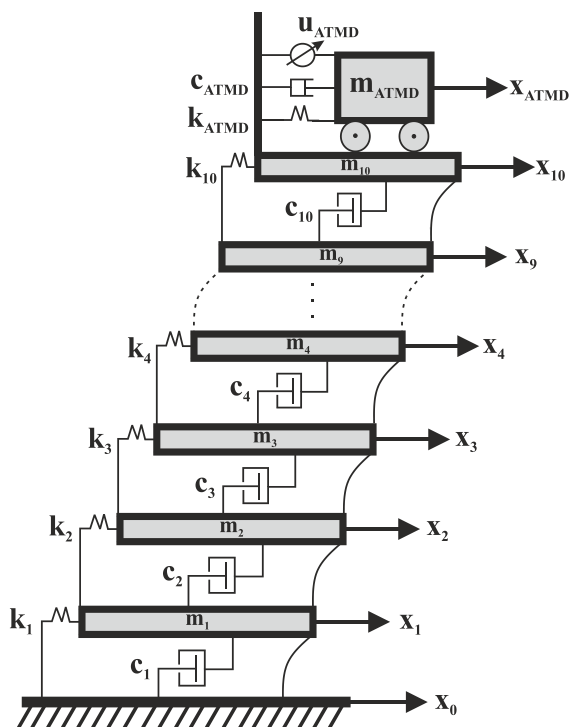
در این بخش به منظور اطمینان از روند حل مساله، ابتدا به صحت سنجی مدل‌سازی و روش تحلیل پرداخته خواهد شد و در ادامه مدل‌سازی صورت گرفته در این مطالعه به همراه مراحل الگوریتم بهینه‌یابی شرح داده خواهد شد.

##### ۴-۱- صحت سنجی

به منظور صحت سنجی روش‌های مدل‌سازی و تحلیل، سازه تک درجه آزادی موجود در مقاله شریعتمدار و همکاران [۳۹] که دارای میراگر جرمی فعال در طبقه بام و تحت تحریک زمین‌لرزه

پرتابی در گسل‌های امتداد لغز در جهت موازی امتداد گسل و در گسل‌های شیب لغز در جهت عمود بر امتداد گسل رخ می‌دهند [۳۶]. در مقابل زلزله‌های حوزه نزدیک با جهت پذیری رو به جلو در هر نوع گسل امتداد لغز و شیب لغز در جهت عمود بر امتداد گسل به وقوع می‌پیوندند. این پدیده موقعی رخ می‌دهد که انتشار گسیختگی در گسل جهتش به سمت ساختگاه بوده و همچنین سرعتی تقریباً برابر با سرعت انتشار امواج برشی داشته باشد [۴۴، ۴۵].

در شکل ۴ دو نمونه از رکوردهای مورد استفاده در این مطالعه (رکوردهای شماره ۱ و ۸ در جدول ۴ مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند. رکوردهای انتخابی به عنوان نماینده‌ای از رکوردهای حوزه نزدیک دارای اثر پرتابی و حوزه نزدیک دارای جهت پذیری رو به جلو می‌باشند. در این شکل، نمودارهای تاریخچه زمانی جابجایی، سرعت و شتاب برای هر دو رکورد رسم گردیده است. همانطور که مشاهده می‌شود، تفاوت بین این دو نوع رکورد از روی تاریخچه زمانی شتاب قابل تشخیص نمی‌باشد. با مشاهده تاریخچه زمانی سرعت می‌توان به اولین تفاوت این دو نوع رکورد پی برد. رکوردهای دارای اثر پرتابی دارای پالس بزرگی با مدت زمان طولانی در یکطرف محور افقی تاریخچه زمانی سرعت هستند (پالس یک طرفه) [۴۷]، در صورتی که رکوردهای دارای



شکل ۵: نمایی شماتیک از سازه مورد مطالعه [۵۱]

نظر نیز برابر با ۱٫۰۲ هرتر می‌باشد.

برای انجام مدلسازی در محیط نرم افزار متلب ابتدا ماتریس پارامترهای سازه (جرم، سختی و میرایی) تعریف می‌شوند. سپس ماتریس فضای حالت سیستم کنترل نشده تشکیل می‌گردد و با استفاده از توابع موجود در جعبه ابزار کنترل متلب، پاسخ تاریخیچه زمانی سازه تحت رکوردهای مورد بررسی، محاسبه می‌شود. در مرحله بعد ماتریس پارامترهای سازه کنترل شده با افزودن درجه آزادی مربوط به میراگر تشکیل می‌گردد و در نهایت به منظور تعیین پاسخ تاریخیچه زمانی سازه کنترل شده در هر لحظه نیروی کنترل با استفاده از الگوریتم کنترل فازی و توان عملگر بهینه محاسبه شده و به سازه اعمال می‌گردد.

#### ۴-۳- الگوریتم حل مساله

در این پژوهش برای مدلسازی سازه مذکور از معادلات فضای حالت استفاده شده است. برای دستیابی به معادلات فضای حالت، معادله دیفرانسیل حرکت سازه خطی  $n$  درجه آزادی را می‌توان به صورت رابطه (۱) بیان کرد:

هاچینو می‌باشد، با استفاده از کنترل کننده فازی مورد بررسی قرار گرفته است. این سازه دارای جرم  $0.57000 \text{ Kg}$  و سختی  $N/m$   $148000$  می‌باشد. همچنین نسبت میرایی این سازه ۵ درصد فرض شده است. برای میراگر جرمی نیز پارامترهای فوق به ترتیب برابر با  $0.29140 \text{ N/m}$  و  $7$  درصد می‌باشند. قوانین و متغیرهای فازی نیز به ترتیب مطابق جداول ۱ و ۲ فرض شده‌اند. همچنین مقادیر ماکزیمم جابجایی کنترل نشده، کنترل شده به صورت غیرفعال و کنترل شده به صورت فعال به ترتیب  $0.081$ ،  $0.066$  و  $0.049$  متر گزارش شده است. مقادیر این جابجایی‌ها با استفاده از مدلسازی صورت گرفته در پژوهش حاضر به ترتیب برابر  $0.076$ ،  $0.065$  و  $0.052$  متر بدست آمده است که نتایج حاصل از مدلسازی تطابق خوبی با نتایج موجود در مقاله مرجع دارد.

#### ۴-۲- مدلسازی عددی

در این مطالعه مدل خطی یک ساختمان برشی ۱۰ طبقه‌ای با جرم، سختی و میرایی یکسان برای همه طبقات و به ترتیب برابر با  $360 \text{ ton}$ ،  $650000 \text{ kN/m}$  و  $6200 \text{ kN-s/m}$  در نظر گرفته شده است [۴۸]. اگرچه ساختمان‌های متداول معمولاً تحت زلزله طرح وارد محدوده غیرخطی می‌شوند و مدلسازی دقیق آن‌ها پیچیده است، اما برای بررسی کارایی سیستم‌های کنترل فعال در این ساختمان‌ها معمولاً سازه به صورت ساده شده و خطی مدل می‌گردد [۴۹]. همچنین با توجه به هزینه قابل توجه سیستم کنترل فعال معمولاً از این سیستم در سازه‌های با اهمیت استفاده می‌گردد. در این سازه‌ها انتظار می‌رود که پس از زلزله عملکرد بی وقفه داشته باشند و اعضای سازه در شرایط الاستیک باقی بمانند. نمایی شماتیک از سازه مورد نظر در شکل ۵ نمایش داده شده است که  $m_j$ ،  $c_j$  و  $k_j$  به ازای  $j$  از ۱ تا ۱۰ به ترتیب مبین جرم، میرایی و سختی طبقات می‌باشند و  $m_{ATMD}$ ،  $c_{ATMD}$ ،  $k_{ATMD}$  و  $u_{ATMD}$  نیز به ترتیب معرف جرم، میرایی، سختی و نیروی کنترل میراگر جرمی هماهنگ شده هستند. جرم میراگر هماهنگ شده به عنوان درصدی از جرم کل سازه در نظر گرفته شده که برابر با  $0.3$  جرم کل سازه فرض شده است. همچنین مقادیر مربوط به سختی و میرایی میراگر جرمی نیز توسط هادی و آرفیادی و با استفاده از الگوریتم فراکاوشی ژنتیک بهینه‌یابی شده‌اند [۵۰] که به ترتیب برابر با  $3750 \text{ kN/m}$  و  $151.5 \text{ kN-s/m}$  بدست آمده است. فرکانس اصلی سازه مورد

این معادله دارای مشتق درجه ۱ می‌باشد، لذا استفاده از این معادله نسبت به معادله دیفرانسیل مورد اقبال عمومی پژوهشگران در زمینه کنترل می‌باشد.

همانطور که قبلاً اشاره شد، برای کنترل فعال این سازه از منطق فازی استفاده شده است که توابع عضویت مربوطه در شکل ۲ و قوانین مورد استفاده نیز در جدول ۱ ارائه شده است. از طرفی مطابق مطالب بیان شده، تعداد توابع عضویت، شکل توابع عضویت و مجموعه قوانین فازی نیز به صورت بهینه توسط پوززینلی انتخاب شده است. همچنین در این تحقیق از الگوریتم ازدحام ذرات برای بهینه کردن مقدار توان عملگر در کنترل فعال استفاده شده است. تابع هدف<sup>۱</sup> مساله بهینه‌یابی مورد نظر، کمینه نمودن جابجایی بام سازه در طول زلزله می‌باشد و این الگوریتم مقدار توان عملگر را در بازه مشخص شده (حداکثر ظرفیت عملگر با توجه به اثر اشباع) بهینه می‌کند. در این بهینه‌یابی اثر اشباع عملگر به عنوان یکی از مشکلات اجرایی مهم در مسائل کنترلی و به صورت یک قید در نظر گرفته شده است. این توان در هر لحظه باید به گونه‌ای انتخاب شود که حداکثر جابجایی بام سازه به کمینه‌ترین مقدار خود برسد. بنابراین مراحل الگوریتم ازدحام ذرات مورد استفاده به صورت زیر می‌باشد:

• ابتدا موقعیت ذرات اولیه (مقدار توان‌های عملگر) به صورت تصادفی ایجاد می‌گردند.

• سپس مقدار تابع هدف (جابجایی بام سازه) برای هر ذره بدست می‌آید.

• مقادیر تابع هدف متناظر هر ذره با هم مقایسه شده و کمترین مقدار آن به عنوان بهترین مقدار کلی<sup>۲</sup> انتخاب می‌شود و ذره‌ای که کمترین مقدار را تولید کرده است تحت عنوان بهترین ذره<sup>۳</sup> انتخاب می‌شود.

• این حلقه با تشکیل ذرات بعدی تکرار می‌گردد تا در نهایت بهترین ذره به عنوان نتیجه بهینه‌یابی در نظر گرفته شود. ذرات جدید از روی موقعیت قبلی ذرات، سرعت آن‌ها، بهترین مقدار کلی و بهترین ذره انتخاب می‌گردد.

با بدست آمدن بهترین ذره که شامل توان عملگر بهینه می‌باشد، یک کنترل بهینه طراحی می‌شود و این بهینه‌یابی برای هر زلزله به

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = Du(t) + Ef(t) \quad (1)$$

که  $M$ ،  $C$  و  $K$  به ترتیب ماتریس‌های  $n \times n$  جرم، میرایی و سختی می‌باشند. همچنین  $x(t)$  بردار جابجایی  $n$  بعدی،  $f(t)$  بردار  $r$  بعدی تحریک خارجی و  $u(t)$  بردار  $m$  بعدی نیروی کنترل می‌باشند. ماتریس‌های موقعیت  $D$  و  $E$  نیز به ترتیب دارای ابعاد  $n \times m$  و  $n \times r$  بوده و نشانگر موقعیت اعمال نیروی کنترل و تحریک خارجی می‌باشند.

معادله فوق برای سیستم‌های خطی و تغییر ناپذیر با زمان می‌تواند به فرم فضای حالت ارائه شده در رابطه (۲) نوشته شود.

$$\dot{z}(t) = Az(t) + Bu(t) + Hf(t) \quad (2)$$

که در رابطه فوق،  $z$  بردار حالت  $n \times 1$  بعدی است و به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود.

$$z(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

همچنین  $A$  ماتریس سیستم با ابعاد  $n \times n$  و  $B$  و  $H$  نیز ماتریس‌های موقعیت نیروی کنترل و تحریک خارجی هستند و به ترتیب دارای ابعاد  $n \times m$  و  $n \times r$  می‌باشند که به صورت روابط (۴) الی (۶) تعریف می‌شوند.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}D \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$H = \begin{bmatrix} I \\ M^{-1}E \end{bmatrix} \quad (6)$$

در عبارات فوق  $I$  و  $0$  به ترتیب ماتریس صفر و همانی با ابعاد مناسب را نشان می‌دهند. همچنین در این مطالعه مقادیر  $n$ ،  $m$  و  $r$  برای حالت بدون کنترل به ترتیب برابر با ۱۰، ۰ و ۱ و برای حالت با کنترل برابر با ۱۱، ۱ و ۱ می‌باشد.

با توجه به اینکه پاسخ حاصل از معادله فضای حالت به فرم بسته بوده و نمایشی سیستماتیک از سیستم را ارائه می‌دهد و همچنین

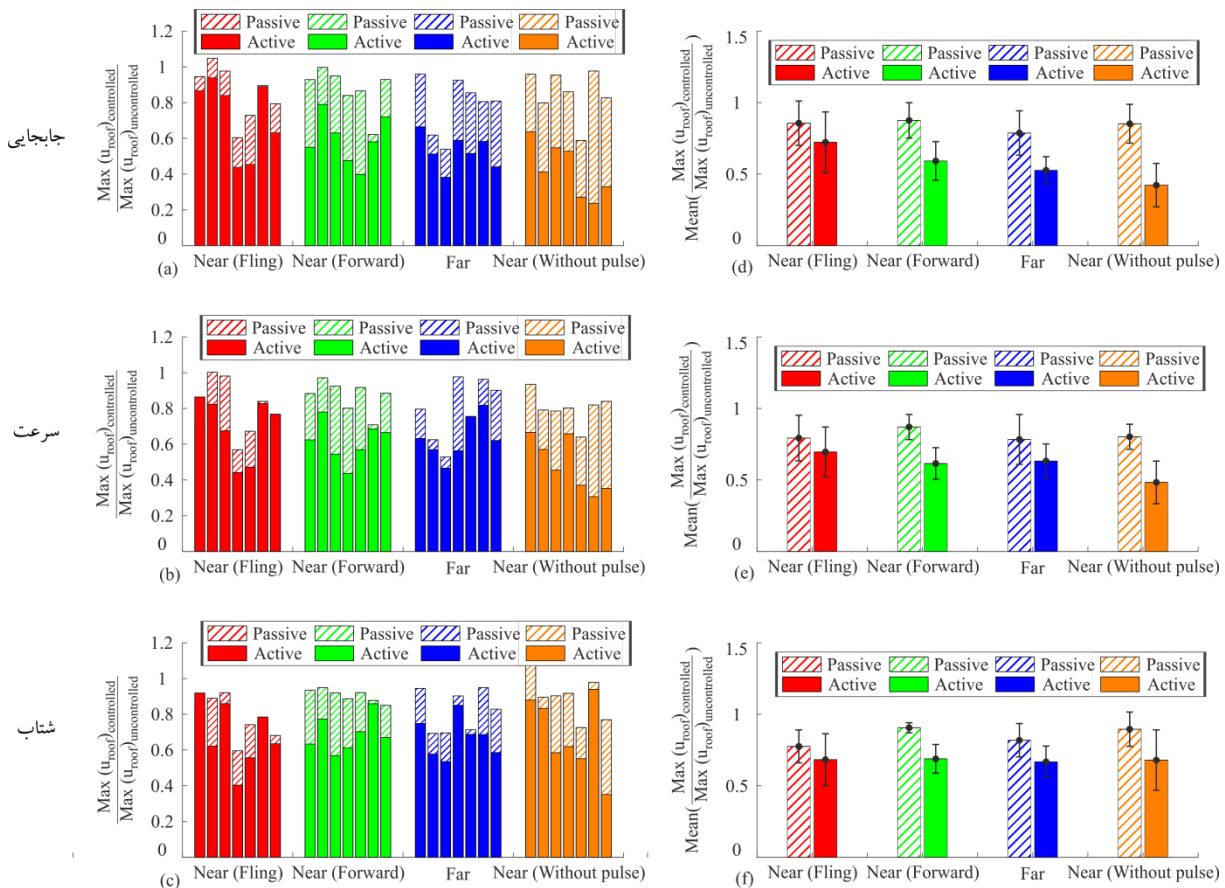
1 Criterion Function  
2 Global Best Cost  
3 Best Particle



جدول ۳: مشخصات رکوردهای مورد استفاده

No	year	Earthquake	Mw	Mech <sup>a</sup>	Station	Com p	Source b	PGA (g)	PGV (cm/sec)	PGD (cm)	Fling Disp.
<b>(a) Near-Fault Records (Fling-Step)</b>											
۱	۱۹۹۹	Kocaeli	۷.۴	SS	Yarimca(YPT)	EW	۳	۰.۲۳	۸۸.۸۳	۱۸۴.۸۴	۱۴۵.۷۹
۲	۱۹۹۹	Chi-Chi	۷.۶	TH	TCU052	NS	۴	۰.۴۴	۲۱۶.۰۰	۷۰۹.۰۹	۶۹۷.۱۲
۳	۱۹۹۹	Chi-Chi	۷.۶	TH	TCU068	EW	۴	۰.۵۰	۲۷۷.۵۶	۷۱۵.۸۲	۶۰۱.۸۴
۴	۱۹۹۹	Chi-Chi	۷.۶	TH	TCU074	EW	۴	۰.۵۹	۶۸.۹۰	۱۹۳.۲۲	۱۷۴.۵۶
۵	۱۹۹۹	Chi-Chi	۷.۶	TH	TCU084	EW	۴	۰.۹۸	۱۴۰.۴۲	۲۰۴.۵۹	۱۶۱.۸۲
۶	۱۹۹۹	Chi-Chi	۷.۶	TH	TCU102	EW	۴	۰.۲۹	۸۴.۵۲	۱۵۳.۸۸	۷۳.۶۶
۷	۱۹۹۹	Chi-Chi	۷.۶	TH	TCU128	EW	۴	۰.۱۴	۵۹.۴۲	۹۱.۰۵	۴۹.۸۸
<b>(b) Near-Fault Records (Forward-Rupture Directivity)</b>											
۸	۱۹۹۲	Cape Mendocino	۷.۱	TH	Petrolia	۹۰	۱	۰.۶۶	۹۰.۱۶	۲۸.۸۹	—
۹	۱۹۹۴	Northridge	۶.۷	TH	Olive View	۳۶۰	۱	۰.۸۴	۱۳۰.۳۷	۳۱.۷۲	—
۱۰	۱۹۹۲	Erzincan	۶.۷	SS	Erzincan	EW	۱	۰.۵۰	۶۴.۳۲	۲۱.۹۳	—
۱۱	۲۰۰۴	Parkfield	۶.۴	SS	Fault Zone 1	FN	۵	۰.۵۰	۶۴.۱۵	۱۲.۶۴	—
۱۲	۱۹۸۴	Morgan Hill	۶.۱	SS	Anderson Dam	۳۴۰	۲	۰.۲۹	۲۸.۰۰	۱۲.۱۹	—
۱۳	۱۹۸۷	Superstition Hills	۶.۴	SS	Parachute Test Site	۳۱۵	۱	۰.۴۵	۱۱۲.۰۰	۵۲.۴۶	—
۱۴	۱۹۷۹	Imperial-Valley	۶.۵	SS	Brawley Airport	۲۲۵	۱	۰.۱۶	۳۵.۸۵	۲۲.۳۹	—
<b>(c) Far-Fault Records</b>											
۱۵	۱۹۵۲	Kern County	۷.۵	TH/R EV	Taft	۱۱۱	۱	۰.۱۸	۱۷.۵۰	۸.۷۹	—
۱۶	۱۹۷۹	Imperial Valley	۶.۵	SS	Calexico	۲۲۵	۱	۰.۲۷	۲۱.۲۴	۹.۰۳	—
۱۷	۱۹۸۹	Loma Prieta	۷.۰	OB	Presidio	۰۰	۱	۰.۱۰	۱۲.۹۱	۴.۳۲	—
۱۸	۱۹۹۴	Northridge	۶.۷	TH	Century CCC	۹۰	۲	۰.۲۶	۲۱.۱۹	۷.۸۵	—
۱۹	۱۹۹۴	Northridge	۶.۷	TH	Moorpark	۱۸۰	۲	۰.۲۹	۲۰.۹۷	۵.۴۸	—
۲۰	۱۹۹۴	Northridge	۶.۷	TH	Montebello	۲۰۶	۱	۰.۱۸	۹.۴۱	۱.۵۱	—
۲۱	۱۹۷۱	San Fernando	۶.۶	REV	Castaic	۲۹۱	۱	۰.۲۷	۲۵.۹۰	۴.۸۷	—
<b>(d) Near-Fault Records (Without Pulse)</b>											
۲۲	۱۹۷۹	Imperial Valley-06	۶.۵	SS	Bonds Corner	۱۴۰	۱	۰.۵۹	۴۶.۷۵	۲۰.۲۱	—
۲۳	۱۹۷۹	Imperial Valley-06	۶.۵	SS	chihuahua	۱۲	۱	۰.۲۶	۲۴.۸۰	۹.۲۹	—
۲۴	۱۹۹۴	Northridge-01	۶.۷	REV	Saticoy	۹۰	۱	۰.۳۴	۳۱.۴۳	۸.۹۵	—
۲۵	۱۹۸۹	Loma Prieta	۷.۰	OB/R EV	Capitola	۰۰	۱	۰.۵۱	۳۸.۰۲	۷.۰۶	—
۲۶	۱۹۶۶	Parkfield	۶.۲	SS	Array #8	۵۰	۱	۰.۲۴	۱۱.۳۰	۵.۰۷	—
۲۷	۱۹۸۷	Superstition Hills	۶.۴	SS	Superstition Mtn	۴۵	۱	۰.۵۸	۲۴.۴۱	۲.۲۹	—
۲۸	۱۹۹۴	Northridge-01	۶.۷	REV	Rinaldi	۲۲۸	۱	۰.۸۷	۱۵۰.۸۶	۴۲.۶۸	—

<sup>a</sup> Faulting Mechanism = TH: Thrust; REV: Reverse; SS: Strike-slip; OB: Oblique  
<sup>b</sup> Data Source = 1: PEER (<http://peer.berkeley.edu/smcat>)  
 2: COSMOS (<http://db.cosmos-eq.org>)  
 3: ERD (<http://angora.deprem.gov.tr/>)  
 4: (<http://scman.cwb.gov.tw/eqv5/special/19990921/pgadata-ascii0704.htm>)  
 5: CSMIP ([http://www.quake.ca.gov/cisn-edc/idr/parkfield\\_28Sep2004/idr\\_dist.htm](http://www.quake.ca.gov/cisn-edc/idr/parkfield_28Sep2004/idr_dist.htm))



شکل ۶: پاسخ‌های سازه با توان عملگر بهینه. (a-c) پاسخ‌های سازه با کنترل فعال و غیرفعال تحت ۲۸ رکورد، (d-f) میانگین و انحراف معیار پاسخ‌های سازه در حالت کنترل غیرفعال و فعال با توان عملگر بهینه برای هر دسته رکورد

## ۵- ارزیابی نتایج

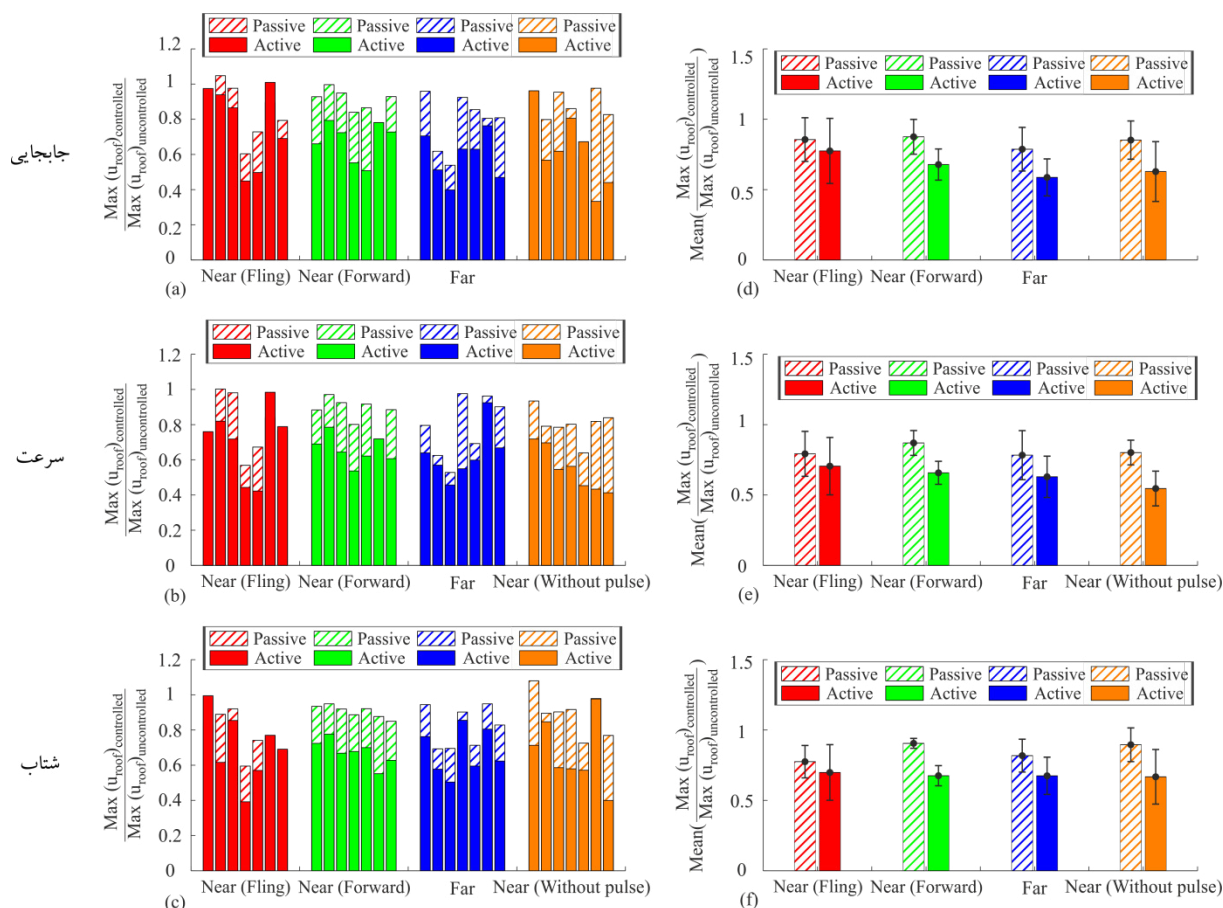
### ۵-۱- کنترل سازه با استفاده از توان عملگر بهینه

در این بخش توان عملگر بهینه برای اعمال نیروی کنترل مناسب به سازه محاسبه شده است. در شکل ۶ (a-c) به ترتیب ماکزیمم جابجایی، سرعت و شتاب کنترل شده به کنترل نشده طبقه بام برای هر ۲۸ رکورد زلزله و به تفکیک ۴ دسته متفاوت از رکوردها ترسیم شده است. در این شکل نمودارهای توپر نمایانگر پاسخ سازه در حالت کنترل فعال و نمودارهای هاشور خورده نمایانگر پاسخ سازه در حالت کنترل غیرفعال می‌باشند. نتایج نشان می‌دهد که تقریباً در همه موارد، کنترل فعال عملکردی مناسب‌تری نسبت به کنترل غیرفعال دارد و پاسخ‌های سازه در حالت فعال به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است.

مطابق با آیین‌نامه‌های معتبر بین‌المللی، اگر در بررسی عملکرد لرزه‌ای با استفاده از روش تاریخچه پاسخ، حداقل از ۷ رکورد زلزله

صورت جداگانه انجام می‌شود. در این مطالعه برای مدل‌سازی سازه مبنا، سیستم کنترل اعمالی بر آن و همچنین بهینه‌یابی صورت گرفته از نرم افزار متلب استفاده شده است.

در این مطالعه از تحلیل تاریخچه زمانی استفاده شده است و ۴ دسته ۷ تایی از رکوردهای زلزله حوزه دور، حوزه نزدیک با اثر پرتابی، جهت پذیری رو به جلو و بدون ضربه [۳۶] مورد بررسی قرار گرفته است که اطلاعات مربوط به شتاب نگاشت‌ها در جدول ۳ خلاصه شده است. مطابق مقاله حیدری [۵۲]، همه رکوردها به مقدار حداکثر  $0.3g$  مقیاس شده‌اند. هدف از یکسان سازی ماکزیمم شتاب رکوردها، حذف اثر ماکزیمم شتاب زمین هر زلزله در مقایسات صورت گرفته می‌باشد و از آنجایی که در آیین‌نامه‌های طراحی شتاب مبنای طرح بین  $0.2$  تا  $0.35$  در نظر گرفته می‌شود، لذا مقدار  $0.3$  به عنوان مقداری مناسب در نظر گرفته شده است.



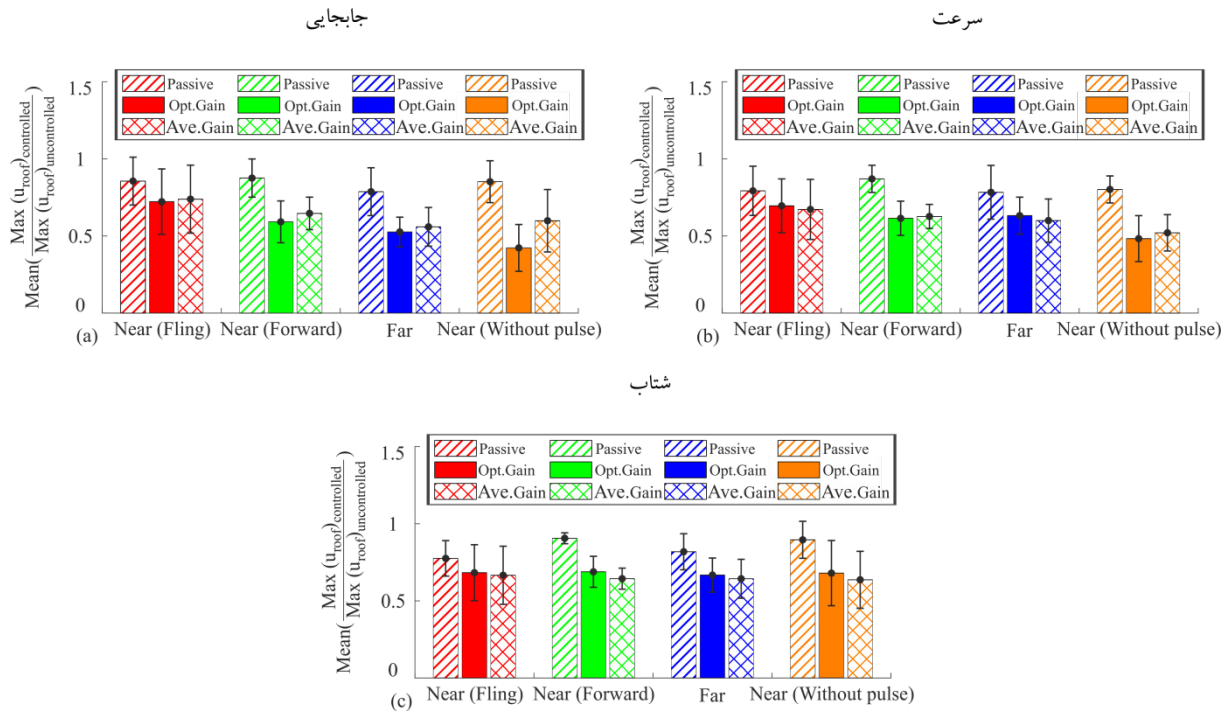
شکل ۷: پاسخ‌های سازه با توان عملگر میانگین. (a-c) پاسخ‌های سازه با کنترل فعال و غیرفعال تحت ۲۸ رکورد، (d-f) میانگین و انحراف معیار پاسخ‌های سازه در حالت کنترل غیرفعال و فعال با توان عملگر میانگین برای هر دسته رکورد

کنترل‌کننده تحت زلزله‌های آتی باشد. به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت موجود در رکوردهای زلزله از توان عملگر میانگین استفاده شده است که این توان میانگین حاصل از بررسی توان‌های ۷ رکورد از هر دسته می‌باشد و نتایج مربوط به پاسخ سازه مبنا تحت هر کدام از رکوردها چه در حالت غیرفعال و چه در حالت فعال در شکل ۷ (a-c) نشان داده شده است. همچنین در شکل ۷ (d-f) نیز میانگین و انحراف معیار مربوط به هر دسته رکورد و برای هر سه پاسخ سازه نشان داده شده است. جزئیات موجود در شکل ۷ مطابق با شکل ۶ می‌باشد و نتایج گویای عملکرد مناسب کنترل فعال با توان عملگر میانگین نسبت به کنترل غیرفعال است.

استفاده شود، میانگین پاسخ تحت این رکوردها می‌تواند جهت بررسی عملکرد سازه در نظر گرفته شود [۵۳]. لذا در شکل ۶ (d-f) میانگین هر دسته از رکوردها هم برای حالت غیرفعال و هم فعال ترسیم گردیده است. همچنین میزان انحراف معیار پاسخ سازه نیز در هر دو حالت (غیرفعال و فعال) روی نمودار مربوط به خود نشان داده شده است.

#### ۵-۲- کنترل سازه با استفاده از توان عملگر میانگین

با توجه به ماهیت تصادفی، تعیین مقادیر توان عملگر بهینه تحت یک زلزله مشخص نمی‌تواند تضمین‌کننده عملکرد مناسب



شکل ۸: مقایسه میانگین و انحراف معیار پاسخ‌های سازه در حالت غیرفعال، فعال با توان عملگر بهینه و میانگین

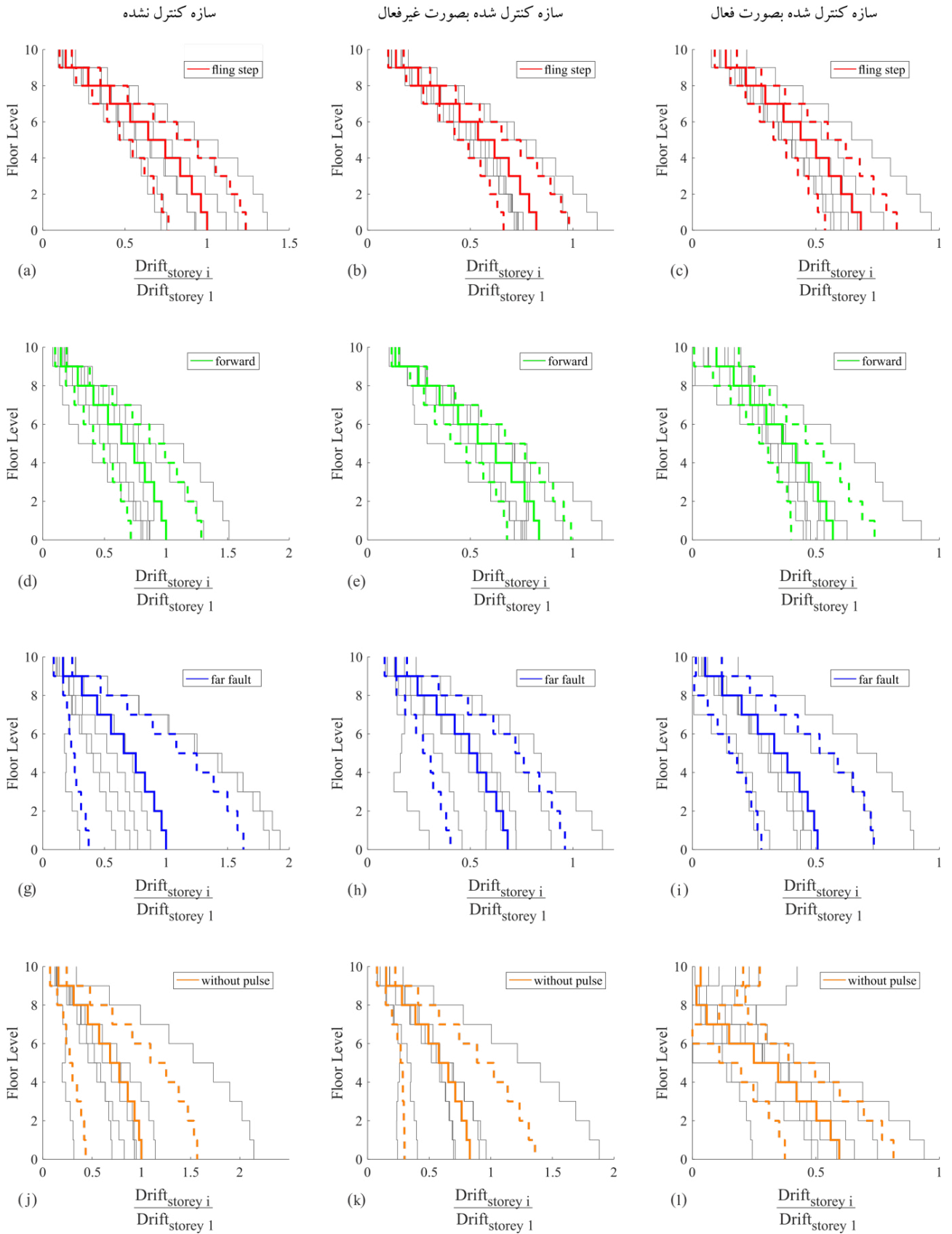
#### ۴-۵- تغییر مکان نسبی طبقات سازه تحت تاثیر ۴ دسته رکورد مختلف

در ادامه پاسخ‌های سازه در حالت کنترل فعال با در نظر گرفتن توان عملگر بهینه محاسبه شده است. در شکل ۹ نسبت حداکثر دریافت طبقه I-ام تحت هر رکورد به میانگین حداکثر دریافت طبقه اول در حالت کنترل نشده تحت همان رکورد نشان رسم شده است. نتایج برای سه حالت کنترل نشده، کنترل شده به صورت غیرفعال و کنترل شده به صورت فعال ترسیم گردیده که با خطوط کم‌رنگ توپر نشان داده شده است. همچنین میانگین پاسخ سازه تحت ۷ رکورد برای زلزله‌های حوزه نزدیک با اثر پرتابی، جهت پذیری رو به جلو، بدون ضربه و حوزه دور به ترتیب با خطوط قرمز، سبز، نارنجی و آبی توپر ترسیم شده و انحراف معیار آن‌ها نیز در طرفین میانگین به صورت خط‌چین نمایش داده شده است.

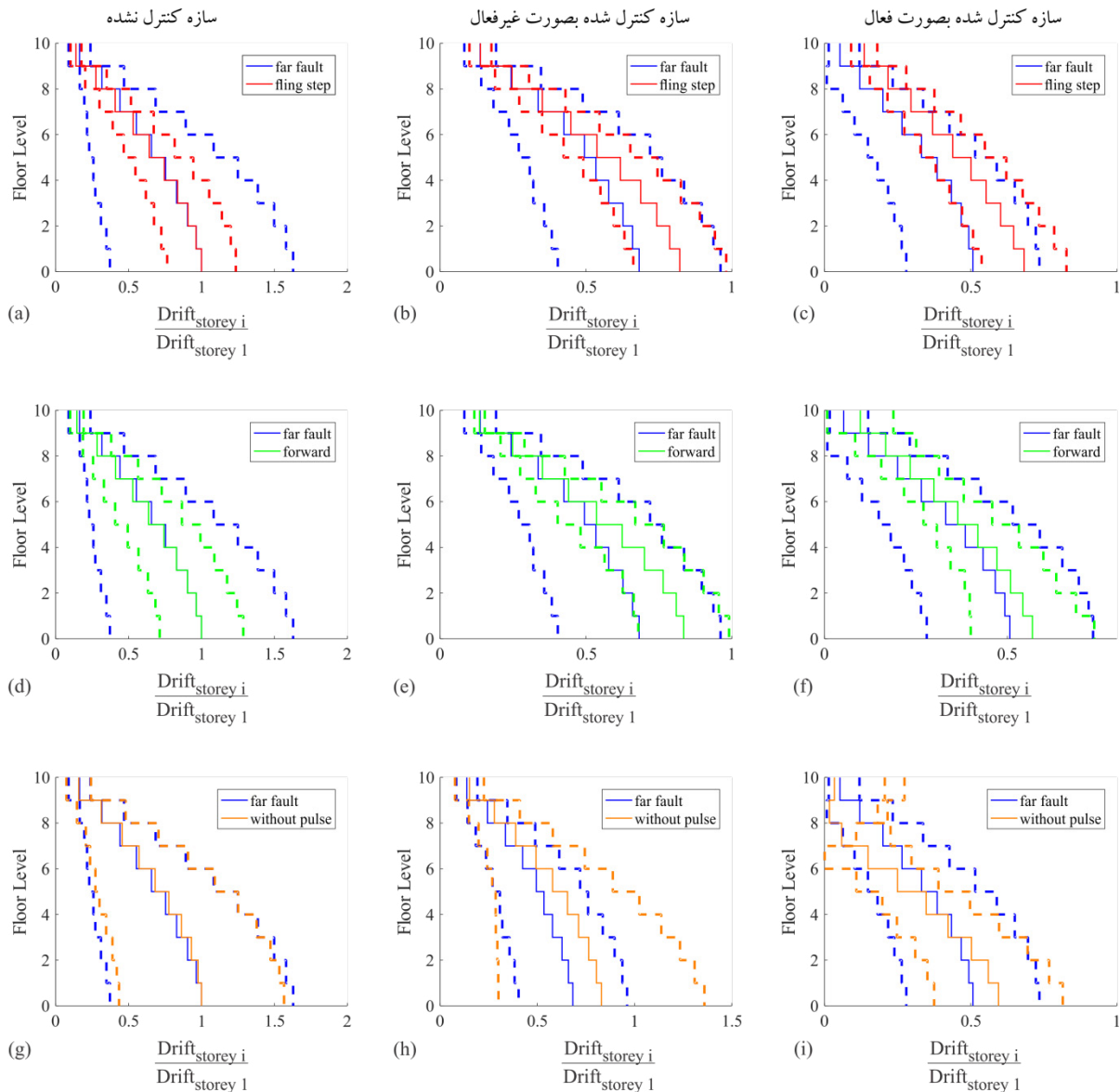
با توجه به شکل ۹ مشاهده می‌شود که رکوردهای حوزه نزدیک با اثر پرتابی دارای میانگین دریافت بیشتری در مقایسه با ۳ دسته رکورد دیگر می‌باشد ولی سازه‌های تحت رکوردهای حوزه دور دارای پراکندگی بیشتر در دریافت می‌باشد که نشان‌دهنده عدم قطعیت بیشتر عملکرد سازه تحت این رکورد می‌باشد. در ادامه پاسخ دریافت

#### ۳-۵- مقایسه عملکرد سازه‌های کنترل شده با توان عملگر بهینه و میانگین

در این بخش پاسخ‌های سازه در حالت کنترل شده به صورت غیرفعال، فعال با توان عملگر بهینه و فعال با توان عملگر میانگین به صورت آماری مقایسه شده است. به منظور مقایسه توانایی روش‌های مورد بررسی، پاسخ سازه‌های کنترل شده به پاسخ سازه کنترل نشده تقسیم شده است و مقادیر بی‌بعد پاسخ مقایسه شده‌اند. مقایسه‌ها برای هر دسته رکورد و برای هر سه پاسخ سیستم (جابجایی، سرعت و شتاب) به صورت مجزا صورت گرفته است که در شکل ۸ قابل مشاهده می‌باشد. در شکل ۸ (a) پاسخ جابجایی سازه با توان عملگر بهینه مناسب‌تر از توان عملگر میانگین می‌باشد ولی در شکل ۸ (b,c) مواردی را می‌توان مشاهده نمود که عملکرد سازه کنترل شده با توان عملگر میانگین بهتر از سازه کنترل شده با توان عملگر بهینه می‌باشد که دلیل این موضوع می‌تواند ناشی از بهینه‌یابی توان عملگر با هدف کاهش جابجایی طبقه بام سازه باشد. به صورت کلی عملکرد سازه کنترل شده به صورت فعال بهتر از سازه کنترل شده به صورت غیرفعال می‌باشد.



شکل ۹: نسبت حداکثر دریفت طبقات به میانگین حداکثر دریفت طبقه اول تحت هر دسته رکورد برای رکوردهای مختلف حوزه دور و نزدیک



شکل ۱۰: مقایسه میانگین و انحراف معیار حداکثر دررفت طبقات با مبنا قرار گرفتن میانگین و انحراف معیار رکوردهای حوزه دور

مورد مقایسه قرار گرفته است. این بررسی در سه حالت کنترل نشده، کنترل شده به صورت غیرفعال و فعال انجام پذیرفته است. در تمام حالات مورد بررسی کمترین پراکندگی پاسخ‌ها مربوط به رکوردهای حوزه نزدیک با اثر پرتابی می‌باشد و بیشترین عدم قطعیت در حالت کنترل نشده، کنترل شده به صورت غیرفعال و کنترل شده به صورت فعال به ترتیب تحت رکوردهای حوزه دور، حوزه نزدیک بدون ضربه و به صورت مشترک برای رکوردهای حوزه دور و حوزه نزدیک بدون ضربه می‌باشد.

طبقات سازه تحت زلزله‌های حوزه نزدیک با دررفت سازه تحت زلزله‌های حوزه دور مورد مقایسه قرار گرفته است.

#### ۵-۵- مقایسه میانگین و انحراف معیار دررفت طبقات

در تمام نمودارهای شکل ۱۰ پاسخ دررفت سازه تحت رکورد حوزه دور به عنوان مبنا با رنگ آبی ترسیم شده است و با پاسخ سازه تحت سه دسته رکورد حوزه نزدیک با اثر پرتابی، جهت پذیری رو به جلو و بدون ضربه که به ترتیب با رنگ قرمز، سبز و نارنجی ترسیم شده‌اند،

جدول ۴: درصد کاهش پاسخ سازه در رکوردهای حوزه نزدیک دارای اثر پرتابی

Record No.	Passive Control	Active Control (Opt. Gain)	Active Control (Ave. Gain)
۱	۵.۴۴	۱۳.۴۰	۲.۵۰
۲	-۴.۵۶	۶.۱۱	۶.۰۵
۳	۲.۳۳	۱۶.۰۳	۱۳.۵۱
۴	۳۹.۵۹	۵۶.۲۳	۵۵.۰۸
۵	۲۷.۱۳	۵۴.۴۲	۵۰.۲۵
۶	۱۰.۴۷	۱۱.۰۲	-۰.۹۶
۷	۲۰.۶۳	۳۶.۸۲	۳۰.۹۳
Mean	۱۴.۴۳	۲۷.۷۱	۲۲.۴۸

جدول ۶: درصد کاهش پاسخ سازه در رکوردهای حوزه دور

Record No.	Passive Control	Active Control (Opt. Gain)	Active Control (Ave. Gain)
۱۵	۴.۰۳	۳۳.۵۲	۲۹.۴۷
۱۶	۳۸.۱۵	۴۸.۷۸	۴۸.۷۸
۱۷	۴۶.۱۰	۶۱.۸۰	۶۰.۱۵
۱۸	۷.۵۰	۴۱.۰۸	۳۶.۹۳
۱۹	۱۴.۵۱	۴۸.۴۷	۳۷.۰۱
۲۰	۱۹.۴۵	۴۱.۷۴	۲۳.۶۷
۲۱	۱۹.۱۳	۵۵.۹۵	۵۳.۰۵
Mean	۲۱.۲۶	۴۷.۳۳	۴۱.۲۹

جدول ۵: درصد کاهش پاسخ سازه در رکوردهای حوزه نزدیک دارای جهت پذیری رو به جلو

Record No.	Passive Control	Active Control (Opt. Gain)	Active Control (Ave. Gain)
۸	۷.۱۷	۴۴.۹۷	۳۳.۹۲
۹	۰.۳۲	۲۰.۹۹	۲۰.۶۴
۱۰	۵.۰۵	۳۶.۹۶	۲۷.۵۹
۱۱	۱۶.۰۲	۵۲.۴۷	۴۴.۷۰
۱۲	۱۳.۴۴	۶۰.۲۲	۴۹.۲۰
۱۳	۳۷.۸۸	۴۱.۹۵	۲۱.۸۵
۱۴	۷.۱۲	۲۸.۰۸	۲۷.۲۲
Mean	۱۲.۴۲	۴۰.۸۰	۳۲.۱۶

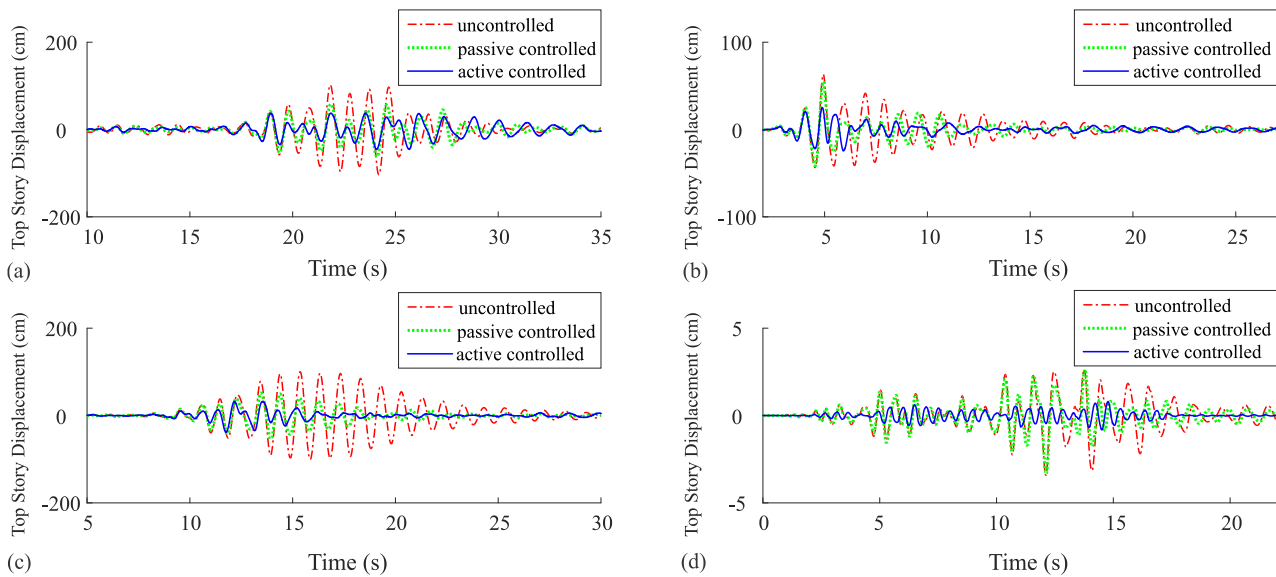
جدول ۷: درصد کاهش پاسخ سازه در رکوردهای حوزه نزدیک بدون ضربه

Record No.	Passive Control	Active Control (Opt. Gain)	Active Control (Ave. Gain)
۲۲	۴.۰۷	۳۶.۳۸	۳.۸۱
۲۳	۲۰.۱۳	۵۸.۷۶	۴۳.۲۲
۲۴	۴.۵۸	۴۵.۳۱	۳۸.۱۴
۲۵	۱۳.۹۶	۴۷.۲۲	۱۹.۴۰
۲۶	۴۱.۱۵	۷۲.۸۷	۳۲.۷۶
۲۷	۲.۳۳	۷۶.۳۱	۶۶.۶۶
۲۸	۱۷.۳۱	۶۷.۱۳	۵۵.۹۶
Mean	۱۴.۷۹	۵۷.۷۱	۳۷.۱۳

#### ۵-۶- درصد کاهش پاسخ‌های سازه

در جداول ۴ تا ۷ میزان درصد کاهش پاسخ جابجایی سازه برای هر سه حالت کنترل غیرفعال، کنترل فعال با توان عملگر بهینه و میانگین و تحت هر ۴ دسته رکورد ارائه شده است. با توجه به نتایج گزارش شده، بهترین عملکرد میراگر غیرفعال تحت رکوردهای حوزه دور ثبت شده است که با توجه به محتوای فرکانسی محدود این دسته رکوردها، نتیجه ای منطقی به شمار می‌رود. در صورتی که کمترین

میزان کاهش پاسخ میراگر جرمی هماهنگ شده غیرفعال نیز تحت رکوردهای حوزه نزدیک با جهت پذیری رو به جلو می‌باشد. در ادامه با مشاهده نتایج مربوط به کنترل فعال با توان عملگر بهینه می‌توان به این نتیجه رسید که بیشترین کاهش پاسخ مربوط به رکوردهای حوزه نزدیک بدون ضربه می‌باشد. همچنین دسته رکوردهای مربوط به حوزه دور، دارای کمترین اختلاف بین پاسخ کنترل فعال با توان عملگر بهینه و میانگین می‌باشند.



شکل ۱۱: مقایسه تاریخچه پاسخ جابجایی طبقه بام سازه. (a) رکورد ۴، (b) رکورد ۱۲، (c) رکورد ۱۷، (d) رکورد ۲۷

با اثر پرتابی است که نشان از عدم قطعیت کمتر موجود در پاسخ سازه تحت این رکوردها می‌باشد.

• همچنین بیشترین عدم قطعیت پاسخ‌ها نیز به صورت مشترک تحت رکوردهای حوزه دور و حوزه نزدیک بدون ضربه می‌باشد.

• به طور کلی سیستم‌های کنترل فعال (با توان عملگر بهینه و حتی میانگین) دارای عملکرد به مراتب بهتری نسبت به سیستم‌های کنترل غیرفعال می‌باشند که در هر ۴ دسته رکورد قابل مشاهده می‌باشد.

• در حالت بهینه، بهترین عملکرد کنترل فعال با الگوریتم فازی مربوط به رکوردهای حوزه نزدیک بدون ضربه (به طور میانگین ۵۷٫۷۱ درصد کاهش پاسخ) و بدترین عملکرد نیز تحت رکوردهای حوزه نزدیک با اثر پرتابی (به طور میانگین با ۲۷٫۷۱ درصد کاهش پاسخ) می‌باشد.

• استفاده از توان عملگر میانگین بجای توان عملگر بهینه نیز توانایی کاهش پاسخ‌های سازه تا حد قابل قبول را داراست.

• هر چند توان عملگر میانگین منجر به کاهش پاسخ سازه می‌شود اما بهترین عملکرد کنترل با توان عملگر میانگین مربوط به رکوردهای حوزه دور است که دارای اختلافی کمتر نسبت به توان عملگر بهینه می‌باشد.

۵-۷- مقایسه تاریخچه پاسخ سازه کنترل شده و بدون کنترل تحت رکوردهایی با بیشترین کاهش پاسخ

در شکل ۱۱ تاریخچه زمانی پاسخ جابجایی طبقه بام سازه تحت رکوردهایی که در بین ۴ دسته رکورد مورد بررسی بیشترین کاهش پاسخ را با استفاده از کنترل فعال بهینه داشته‌اند (رکوردهای ۴، ۱۲، ۱۷ و ۲۷)، ارائه شده است. تحت هر رکورد پاسخ سازه در مدت زمان حرکت شدید زلزله و در سه حالت کنترل نشده، کنترل شده به صورت غیرفعال و فعال ترسیم گردیده است که نشان‌دهنده عملکرد مثبت کنترل فعال با الگوریتم کنترلی فازی همراه با توان عملگر بهینه در تمام مدت رکورد می‌باشند.

#### ۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش سعی شده است عملکرد سازه کنترل شده به روش فعال تحت مجموعه گسترده‌ای از رکوردها با خصوصیات مختلف تحت بررسی آماری قرار گیرد و روشی جهت مقاوم کردن الگوریتم کنترل فعال ارائه شود که با توجه به ارزیابی نتایج حاصله می‌توان به نتیجه‌گیری‌های زیر اشاره نمود:

• در تمام حالات کنترل نشده، کنترل غیرفعال و فعال کمترین پراکندگی در پاسخ‌های سازه مربوط به دسته رکوردهای حوزه نزدیک



- Wind and Structures, 332-313 (2009) (4)12.
- [14] H. Chen, Z. Sun, L. Sun, Active mass damper control for cable stayed bridge under construction: an experimental study, *Structural Engineering and Mechanics*, (2)38 156-141 (2011).
- [15] X.B. Nguyen, T. Komatsuzaki, Y. Iwata, H. Asanuma, Robust adaptive controller for semi-active control of uncertain structures using a magnetorheological elastomer-based isolator, *Journal of Sound and Vibration*, 212-192 (2018) 434.
- [16] L. Chung, R. Lin, T. Soong, A. Reinhorn, Experimental study of active control for MDOF seismic structures, *Journal of Engineering Mechanics*, -1609 (1989) (8)115 1627.
- [17] S. Etedali, A.-A. Zamani, S. Tavakoli, A GBMO-based PI  $\lambda$  D  $\mu$  controller for vibration mitigation of seismic-excited structures, *Automation in Construction*, 12-1 (2018) 87.
- [18] B. Blachowski, N. Pnevmatikos, Neural Network Based Vibration Control of Seismically Excited Civil Structures, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, (2018) (3)62 628-620.
- [19] L.A. Zadeh, Fuzzy sets, *Information and control*, (3)8 353-338 (1965).
- [20] N.N. Karnik, J.M. Mendel, Q. Liang, Type2- fuzzy logic systems, *IEEE transactions on Fuzzy Systems*, (1999) (6)7 658-643.
- [21] J.M. Mendel, R.B. John, Type2- fuzzy sets made simple, *IEEE Transactions on fuzzy systems*, -117 (2002) (2)10 127.
- [22] M. Battaini, F. Casciati, L. Faravelli, Fuzzy control of structural vibration. An active mass system driven by a fuzzy controller, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1276-1267 (1998) (11)27.
- [23] M. Aldawod, F. Naghdy, B. Samali, K. Kwok, Active control of wind excited structures using fuzzy logic, in: *Fuzzy Systems Conference Proceedings*, IEEE International, 1999, pp. 77-72.
- [24] M. Aldawod, B. Samali, F. Naghdy, K.C.S. Kwok, Active control of along wind response of tall building using a fuzzy controller, *Engineering Structures*, (2001) (11)23
- [1] M.P. Singh, S. Singh, L.M. Moreschi, Tuned mass dampers for response control of torsional buildings, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 769-749 (2002) (4)31.
- [2] G. Warburton, E. Ayorinde, Optimum absorber parameters for simple systems, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 217-197 (1980) (3)8.
- [3] W. Zuk, Kinetic structures, civil engineering, in: ASCE, 1968, pp. 64-62.
- [4] W. Zuk, R.H. Clark, Kinetic architecture, Van Nostrand Reinhold, 1970.
- [5] J. Yao, Concept of structural control, *Journal of the Structural Division*, 98(st 1972) (7).
- [6] R.A. Lund, Active Damping of Large Structures in Winds, *Structural Control*, H. H. E. Leipholz, ed., North-Holland Publishing Co., New York, N.Y, 1980
- [7] J.C. Chang, T.T. Soong, Structural control using active tuned mass dampers, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 1098-1091 (1980) (6)106.
- [8] J. Wu, J. Yang, Active control of transmission tower under stochastic wind, *Journal of Structural Engineering*, 1312-1302 (1998) (11)124.
- [9] D. Hrovat, P. Barak, M. Rabins, Semi-active versus passive or active tuned mass dampers for structural control, *Journal of Engineering Mechanics*, 705-691 (1983) (3)109.
- [10] L. Xu, Y. Yu, Y. Cui, Active vibration control for seismic excited building structures under actuator saturation, measurement stochastic noise and quantisation, *Engineering Structures*, 11-1 (2018) 156.
- [11] F. Amini, M.Z. Samani, A wavelet-based adaptive pole assignment method for structural control, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, (2014) (6)29 477-464.
- [12] S. Pourzeynali, H. Lavasani, A. Modarayi, Active control of high rise building structures using fuzzy logic and genetic algorithms, *Engineering Structures*, (2007) (3)29 357-346.
- [13] S. Park, J. Lee, H.-J. Jung, D.-D. Jang, S. Kim, Numerical and experimental investigation of control performance of active mass damper system to high-rise building in use,

- Isolated Buildings, *Journal of Earthquake Engineering*, (20-1 (2018).
- [35] M. Mastali, A. Kheyroddin, B. Samali, R. Vahdani, Optimal placement of active braces by using PSO algorithm in near-and far-field earthquakes, *International Journal of Advanced Structural Engineering (IJASE)*, (1)8 44-29 (2016).
- [36] E. Kalkan, S.K. Kunnath, Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings, *Earthquake spectra*, 390-367 (2006) (2)22.
- [37] E. Matta, Performance of tuned mass dampers against near-field earthquakes, *Structural Engineering and Mechanics*, 642-621 (2011) (5)39.
- [38] S. Haseli, M. Puorsha, Investigation of the seismic responses of base-isolated buildings under the influence of near-field ground motions, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 596-579 (2018) (3)50. (in Persian)
- [39] H. Shariatmadar, S. Golnargesi, M.R. Akbarzadeh Totonchi, Vibration control of buildings using ATMD against earthquake excitations through interval type2-fuzzy logic controller, *Asian Journal of Civil Engineering-Building And Housing*, 2014) 15).
- [40] E.H. Mamdani, S. Assilian, An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller, *International journal of man-machine studies*, 13-1 (1975) (1)7.
- [41] H. Meshkat Razavi, H. Shariatmadar, DESIGN OF AN OPTIMIZED FLC SYSTEM FOR SEISMIC STRUCTURAL RESPONSE REDUCTION, *Sharif Journal of Civil Engineering*, 58-49 (2016) (2.1)32.2. (in Persian)
- [42] P. Joei, Multi-objective and semi-active control of buildings using variable stiffness and fuzzy logic, University of Guilan, 2012. (in Persian)
- [43] S.-I. Kwak, G. Choe, I.-S. Kim, G.-H. Jo, C.-J. Hwang, A Study of an Modeling Method of TS fuzzy System Based on Moving Fuzzy Reasoning and Its Application, arXiv preprint arXiv:2015) ,1511.02432).
- [44] K. Mousavi Darzikolaei, T. Taghikhany, Seismic Performance Factors of Special Moment Resisting Steel Frames Subjected to Far- and Near-Field Ground Motions, 1522-1512.
- [25] A. Ahlawat, A. Ramaswamy, Multiobjective optimal fuzzy logic control system for response control of wind-excited tall buildings, *Journal of engineering mechanics*, 530-524 (2004) (4)130.
- [26] F. Amini, R. Vahdani, Fuzzy optimal control of uncertain dynamic characteristics in tall buildings subjected to seismic excitation, *Journal of Vibration and Control*, 1867-1843 (2008) (12)14.
- [27] A. Aly, A. Zasso, F. Resta, Two Directional Active Control of a High-Rise Building Under Wind Loads with Different Attack Angles: Comparison between LQR and Fuzzy Logic Controllers, in: *The 7th European Conference on Structural Dynamics*, University of Southampton, Highfield, Southampton, UK, 2008.
- [28] B. Samali, M. Al-Dawod, K.C. Kwok, F. Naghdy, Active control of cross wind response of -76story tall building using a fuzzy controller, *Journal of engineering mechanics*, 498-492 (2004) (4)130.
- [29] X. Jiang, H. Adeli, Neuro-genetic algorithm for non-linear active control of structures, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 786-770 (2008) (7)75.
- [30] H. Shariatmadar, H. Meshkat Razavi, Seismic control response of structures using an ATMD with fuzzy logic controller and PSO method, *Structural Engineering and Mechanics*, 2014) 51).
- [31] R. Eberhart, J. Kennedy, A new optimizer using particle swarm theory, in: *Micro Machine and Human Science*, 1995. MHS'95., *Proceedings of the Sixth International Symposium on*, IEEE, 1995, pp. 43-39.
- [32] A.Y. Leung, H. Zhang, C. Cheng, Y. Lee, Particle swarm optimization of TMD by non-stationary base excitation during earthquake, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1246-1223 (2008) (9)37.
- [33] H. Benioff, Mechanism and strain characteristics of the White Wolf fault as indicated by the aftershock sequence, *Bull., Calif. Div. Mines*, 202-199 (1955) 171.
- [34] S. Bhagat, A.C. Wijeyewickrema, N. Subedi, Influence of Near-Fault Ground Motions with Fling-Step and Forward-Directivity Characteristics on Seismic Response of Base-

- of Civil Engineering, 39(C21 (2015) (1).
- [49] C.-W. Lim, Active vibration control of the linear structure with an active mass damper applying robust saturation controller, *Mechatronics*, 399-391 (2008) (8)18.
- [50] M.N. Hadi, Y. Arfiadi, Optimum design of absorber for MDOF structures, *Journal of Structural Engineering*, 1280-1272 (1998) (11)124.
- [51] R. Guclu, H. Yazici, Vibration control of a structure with ATMD against earthquake using fuzzy logic controllers, *Journal of Sound and Vibration*, 49-36 (2008) (2-1)318.
- [52] A.H. Heidari, S. Etedali, M.R. Javaheri-Tafti, A hybrid LQR-PID control design for seismic control of buildings equipped with ATMD, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 57-44 (2018) (1)12.
- [53] American Society of Civil Engineers, ASCE 10-7 (Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures), (2010) Reston, Virginia.
- Amirkabir Journal of Civil Engineering, -37 (2018) (1)50 52. (in Persian)
- [45] P. Somerville, Development of an improved representation of near fault ground motions, in: SMIP98 Seminar on Utilization of Strong-Motion Data, 1998.
- [46] J.P. Stewart, S.-J. Chiou, J.D. Bray, R.W. Graves, P.G. Somerville, N.A. Abrahamson, Ground motion evaluation procedures for performance-based design, *Soil dynamics and earthquake engineering*, 772-765 (2002) (12-9)22.
- [47] E. Garini, G. Gazetas, Damage potential of near-fault records: sliding displacement against conventional "Intensity Measures", *Bulletin of Earthquake Engineering*, 480-455 (2013) (2)11.
- [48] A. Kaveh, S. Mohammadi, O.K. Hosseini, A. Keyhani, V. Kalatjari, Optimum parameters of tuned mass dampers for seismic applications using charged system search, *Iranian Journal of Science and Technology. Transactions*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Fahimi Farzam, B. Alinejad, S.A. Mousavi Gavvani, *Seismic Control of a 10-Storey Shear Frame Using Active Tuned Mass Dampers and Particle Swarm Optimization Algorithm*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(8) (2020) 2073-2092.

DOI: 10.22060/ceej.2019.15883.6064



