

# طراحی کنترل‌کننده‌ی فازی بهینه‌شده برای کاهش پاسخ سازه در برابر نیروهای زلزله

حسام‌الدین مشکوه رضوی (دانشجوی دکتری)

هاشم شریعتمدار\* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۵ (ص. ۵۸-۴۹)  
دوری ۲ - ۳۲، شماره ۱/۲، ص. ۵۸-۴۹

با توجه به بررسی سوابق پژوهشی، تاکنون مطالعات قابل توجهی در به‌کارگیری الگوریتم‌های فراکاوشی برای بهینه‌سازی کنترل‌کننده‌ی فازی بر روی سازه‌های مجهز به ATMD صورت نگرفته است. لذا انجام پژوهش با تمرکز بر بهینه‌سازی کنترل‌کننده‌های فازی الزامی به‌نظر می‌رسد. این نوشتار به بررسی کاربرد میراگر جرمی تنظیم‌شده‌ی فعال (ATMD) برای کنترل پاسخ لرزه‌یی یک سازه‌ی واقعی ۱۱ طبقه پرداخته است. نیروی کنترل فعال از ترکیب کنترل‌کننده‌ی منطق فازی (FLC) و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) به‌دست آمده است. این کنترل‌کننده‌ی فازی بهینه‌شده، PSFLC نامیده شده است. در این مطالعه، معیار بهینه‌سازی، کمینه‌کردن تغییرمکان بام سازه است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از بهینه‌سازی برای ۴ زلزله‌ی مرجع، کنترل‌کننده‌ی PSFLC با ضرایب عمومی معرفی شده است. عملکرد کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی (PSFLC) برای زلزله‌های مختلف ارزیابی و تغییرمکان و جذر مجموع مربعات تغییرمکان بام سازه (RMS) با کنترل‌کننده‌های PSFLC و FLC محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد، در حالی که نیروی کنترل پیشینه در هر دو کنترل‌کننده اختلاف چندانی با هم ندارند، کنترل‌کننده‌ی PSFLC تغییرمکان و RMS تغییرمکان بام سازه را ۱۰ الی ۳۰ درصد بیشتر از کنترل‌کننده‌ی FLC کاهش می‌دهد. بنابراین کنترل‌کننده‌ی فازی بهینه‌شده (PSFLC) جایگزینی برای کنترل‌کننده‌ی فازی معمولی (FLC)، به‌منظور کاهش بیشتر پاسخ لرزه‌یی سازه‌ها پیشنهاد می‌شود.

واژگان کلیدی: میراگر جرمی تنظیم‌شده‌ی فعال، کنترل‌کننده‌ی منطق فازی، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، کاهش پاسخ، تحریک زلزله.

shariat.madar@um.ac.ir  
hessam-meshkat@yahoo.com

## ۱. مقدمه

امروزه ساخت انواع سازه‌های بلند تجاری، اداری، توریستی، و تفریحی در سراسر دنیا به سرعت رو به افزایش است. این سازه‌ها به علت اینکه عمدتاً لاغر هستند، در برابر نیروهای جانبی باد و زلزله، ارتعاشات زیادی دارند، که منجر به سلب آسایش ساکنین آن می‌شوند. در ۴۰ سال اخیر، انواع مختلفی از سیستم‌های کنترل سازه‌ها (غیرفعال، نیمه‌فعال، فعال و ترکیبی) برای کاهش ارتعاشات وارد شده به سازه‌ها، ناشی از این نیروهای جانبی به کار گرفته شده است. یکی از مؤثرترین این ابزارها، که توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است، میراگر جرمی تنظیم شده‌ی غیرفعال (TMD)<sup>۱</sup> است. TMD از یک جرم کوچک تشکیل شده است، که با کمک یک فنر و یک میراگر به بام سازه (قسمتی از ساختمان که بیشترین حرکت را دارد)، متصل می‌شود. یک TMD معمولاً براساس مد اصلی ارتعاشی

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۰/۹، اصلاحیه ۱۳۹۳/۶/۹، پذیرش ۱۳۹۳/۸/۴.

می‌شود. جرم ATMD، در مقایسه با TMD بسیار کوچک‌تر است. مطالعات تئوری و آزمایشگاهی زیادی بر روی ATMD برای کاهش پاسخ سازه‌ها تحت ارتعاشات باد و زلزله انجام شده است. در پژوهشی در سال ۱۹۷۳<sup>[۹]</sup>، عملکرد یک نیروی فعال بر روی یک TMD به صورت تئوری مطالعه شد و میراگر و فنر متصل به TMD با یک جک هیدرولیکی جایگزین شد. در پژوهش دیگری در سال ۱۹۷۹<sup>[۱۰]</sup>، به عنوان اولین پژوهش، امکان کاربرد یک ATMD در یک پروژه واقعی مهندسی عمران مطالعه شده است. برخی پژوهشگران<sup>[۱۱]</sup> نیز نظریه‌ی Lund را به کار گرفته و آن را گسترش داده و از کنترل بهینه‌ی مرتبه‌ی دوم خطی (LQR)<sup>[۲]</sup> برای وارد کردن نیروی کنترل به ATMD استفاده کرده‌اند. برای اولین بار در دنیا در سال ۱۹۹۱<sup>[۱۲]</sup>، از یک ATMD برای کاهش پاسخ یک سازه‌ی واقعی ۱۰ طبقه، که تحت نیروهای خارجی زلزله و طوفان قرار داشت، استفاده شده است. همچنین در سال ۱۹۹۲، روشی پیشنهاد شده است که در آن پارامترهای ATMD و ضرایب نیروی کنترل به طور هم‌زمان در حوزه‌ی بسامد بهینه شده‌اند.<sup>[۱۳]</sup> در پژوهش دیگری (۱۹۹۶)<sup>[۱۵]</sup>، نیز یک ATMD با ضرایب کنترلی کامل برای یک سازه، که مد اول آن به صورت یک سازه‌ی یک درجه آزادی مدل شده بود، طراحی شد. برخی پژوهشگران نیز در مطالعه‌ی خود با استفاده از آنالیز پارامتری پاسخ سازه، روش جدیدی را برای طراحی ATMD پیشنهاد کرده و آنالیزهای انجام‌شده‌ی آنها نشان داده است که روش کنترلی پیشنهادی، آنها شتاب سازه را در مقایسه با روش LQR، بیشتر کاهش می‌دهد.<sup>[۱۴]</sup> در تمامی مطالعاتی که تاکنون انجام شده است، عمدتاً ضرایب نیروی کنترلی و پارامترهای میراگر جرمی تنظیم شده (سختی و میرایی) برای بارگذاری‌های مختلف باد و زلزله بهینه شده است. برای پیدا کردن پارامترهای بهینه‌ی ذکر شده، یا پاسخ سازه و یا نیروی کنترل فعال کمینه می‌شوند. روش‌های مورد استفاده معمولاً به محاسبات ریاضی قابل توجهی نیاز دارند و عمدتاً زمان‌بر هستند. در سال‌های اخیر، استفاده از الگوریتم‌های نوین، مانند منطق فازی برای تولید نیروی کنترل رواج یافته است.<sup>[۱۶-۱۷]</sup> تئوری منطق فازی برای اولین بار در سال ۱۹۷۰ مطرح شده است.<sup>[۱]</sup> از مهم‌ترین مزایای کنترل‌کننده‌ی منطق فازی، پیاده‌سازی بسیار ساده‌ی آن است، که مدل‌سازی آن به روابط پیچیده‌ی ریاضی نیازی ندارد. علاوه بر این، کنترل‌کننده‌ی منطق فازی می‌تواند در مواجهه با انواع عدم قطعیت‌های موجود در سازه و بارگذاری، عملکرد قابل قبولی داشته باشد. تئوری منطق فازی، نیروی کنترل فعال را با استفاده از دانش تجربی بشر تخمین می‌زند و برخلاف سایر الگوریتم‌های کنترلی به اطلاعات ورودی زیادی نیاز ندارند. در پژوهشی در سال ۱۹۹۸<sup>[۱۸]</sup>، برای اولین بار به بررسی عملکرد کنترل‌کننده‌ی فازی بر روی یک ATMD، برای کنترل پاسخ سازه‌ی ۳ طبقه معیار پرداخته شده است. برخی پژوهشگران (۲۰۰۴) نیز به بررسی اثربخشی ATMD برای کنترل پاسخ سازه‌ی ۷۶ طبقه‌ی معیار، که تحت نیروی زلزله قرار گرفته بود، پرداخته،<sup>[۲۱]</sup> و نیروی کنترل را از دو روش کنترلی مرتبه‌ی دوم گوسی (LQG)<sup>[۴]</sup> و منطق فازی محاسبه کرده و دریافته‌اند که کنترل‌کننده‌ی منطق فازی، عملکرد بهتری نسبت به کنترل‌کننده‌ی LQG دارد. پژوهشگران دیگری نیز (۲۰۰۳)<sup>[۲۲]</sup>، عملکرد کنترل‌کننده‌ی منطق فازی را در تولید نیروی کنترل برای ATMD سازه‌ی ۵ طبقه که در آزمایشگاه ساخته شده بود، مطالعه کرده و نتیجه گرفته‌اند که عملکرد کنترل‌کننده‌ی منطق فازی به لحاظ مقدار کاهش پاسخ سازه و بیشینه‌ی نیروی کنترل فعال تولیدشده، مشابه با عملگر LQR است و آنها همچنین از توابع عضویت مثلثی برای متغیرهای ورودی و خروجی کنترل‌کننده‌ی فازی استفاده کرده‌اند. در پژوهش دیگری (۲۰۰۸)<sup>[۱۹]</sup>، نیز یک ATMD بر روی پام و یک جک هیدرولیکی در طبقه‌ی اول یک سازه‌ی ۱۵ طبقه قرار داده شد و از منطق فازی به عنوان الگوی کنترل استفاده و عملکرد کنترل‌کننده‌ی فازی با کنترل‌کننده‌ی تناسبی

(PD)<sup>۵</sup> مقایسه شده و این نتیجه به دست آمد که کنترل‌کننده‌ی منطق فازی پاسخ سازه را بهتر از کنترل‌کننده‌ی PD کاهش می‌دهد. همچنین برخی پژوهشگران<sup>[۲۳]</sup> از کنترل‌کننده‌ی فازی نوع دو بازه‌ی (IT2FLC)<sup>۶</sup> برای تولید نیروی کنترل فعال در ATMD استفاده کرده و دریافته‌اند که کنترل‌کننده‌ی ذکر شده، که قادر به در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها در پایگاه قواعد فازی است، عملکرد بهتری در برابر بارهای زلزله دارد و پاسخ سازه را بیشتر از حالتی که از کنترل‌کننده‌ی فازی معمولی استفاده می‌شود، کاهش می‌دهد. در پژوهش دیگری (۲۰۱۴)<sup>[۲۵]</sup>، نیز از ATMD و کنترل‌کننده‌ی فازی، برای کاهش ارتعاشات یک سازه‌ی بلند در برابر نیروهای باد استفاده شده است. در بیشتر پژوهش‌های ذکر شده، که در آن‌ها از کنترل‌کننده‌ی فازی به عنوان الگوی کنترل استفاده شده است، توابع عضویت متغیرهای ورودی و خروجی با استفاده از روش سعی و خطا تعیین می‌شوند. روش مذکور قطعاً منجر به پاسخ‌های بهینه نمی‌شود. برخی از پژوهشگران از روش‌های بهینه‌سازی فراکاوشی برای بهبود عملکرد کنترل‌کننده‌ی فازی استفاده کرده‌اند. در پژوهش دیگری (۲۰۰۴)<sup>[۲۰]</sup>، برای کنترل پاسخ سازه‌ی ۷۶ طبقه‌ی معیار تحت تحریک باد از یک ATMD استفاده شد و نیروی کنترل در حالی‌که الگوریتم منطق فازی به دست آمد، که از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی سیستم کنترل و پارامترهای ATMD استفاده شده است.<sup>[۲۶]</sup> همچنین در پژوهش ذکر شده نشان داده شده است که استفاده از پارامترهای شتاب و سرعت با توابع گوسی، به عنوان متغیرهای ورودی کنترل فازی، باعث کاهش بیشتر پاسخ سازه می‌شود. برخی پژوهشگران (۲۰۰۷)<sup>[۱۷]</sup>، نیز از ترکیب کنترل‌کننده‌ی منطق فازی و الگوریتم ژنتیک (GFLC) برای تولید نیروی کنترل در ATMD استفاده کردند و کنترل‌کننده‌ی ترکیبی خود را بر روی یک سازه‌ی واقعی ۱۱ طبقه قرار داده و دریافته‌اند که کنترل‌کننده‌ی GFLC در مقایسه با کنترل‌کننده‌ی LQR پاسخ سازه را بیشتر کاهش می‌دهد. این در حالی است که کنترل‌کننده‌ی GFLC نسبت به LQR به نیروی کنترل بیشتری نیازمند است.

در مقایسه با الگوریتم ژنتیک (الگوریتمی که در بهینه‌سازی سیستم‌های فازی زیاد به کار رفته است)، می‌توان از سایر الگوریتم‌های فراکاوشی الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) نیز استفاده نمود. PSO مزیت‌های زیادی از جمله پیاده‌سازی آسان، سرعت بالای هم‌گرایی، و نیاز به زمان محاسباتی کمتر برای رسیدن به پاسخ بهینه دارد. این الگوریتم در پژوهشی در سال ۱۹۹۵ ارائه شده است.<sup>[۲۷]</sup> PSO از حرکت طبیعی دسته‌جمعی پرندگان که به یک نقطه‌ی نامعلوم مهاجرت می‌کنند، نشأت گرفته و از آن برای بهینه‌سازی بسیاری از مسائل مهندسی استفاده شده است. برخی پژوهشگران (۲۰۰۹) نیز در پژوهش خود از PSO برای بهینه‌سازی پارامترهای TMD استفاده کرده‌اند.<sup>[۸]</sup>

در این پژوهش، یک کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی جدید با نام PSFLC معرفی شده است. PSFLC از ترکیب الگوریتم فازی و PSO برای تولید نیروی کنترل استفاده می‌کند. از PSO برای بهینه‌سازی پارامترهای کنترل‌کننده‌ی فازی، که بر روی یک ATMD که در پام یک سازه‌ی ۱۱ طبقه عمل می‌کند، استفاده شده است. معیار بهینه‌سازی، کمینه‌کردن بیشینه تغییر مکان پام سازه است. در این نوشتار، ابتدا پارامترهای سیستم فازی با استفاده از الگوریتم PSO برای هر یک از زلزله‌های معرفی شده توسط انجمن بین‌المللی کنترل سازه‌ها (Northridge, Kobe) و El-Centro و Hachinohe) بهینه شده و سپس با استفاده از نتایج به دست آمده و به‌کارگیری مجدد الگوریتم PSO، پارامترهای کنترل‌کننده‌ی PSFLC با نام پارامترهای عمومی معرفی شده است. توانایی کنترل‌کننده‌ی معرفی شده در کاهش پاسخ سازه‌ها، برای انواع زلزله‌های میدان - دور و میدان - نزدیک بررسی شده است. پاسخ سازه‌ی کنترل شده با ATMD توسط کنترل‌کننده‌ی PSFLC با نتایج حاصل از کنترل‌کننده‌ی

به سازه متصل شده است. نیروی کنترل فعال در جک، یک بار از طریق کنترل‌کننده‌ی فازی معمولی (FLC) و بار دیگر از طریق کنترل‌کننده‌ی PSFLC تعیین شده است. معادله‌ی حرکت سازه با ATMD، که تحت تحریک زلزله در تراز پایه قرار دارد با رابطه‌ی ۱ بیان شده است:

$$[M]\{\ddot{y}\} + [C]\{\dot{y}\} + [K]\{y\} = -[M]\{E\}\ddot{x}_g + [E_f].F \quad (1)$$

که در آن،  $\{y\}$ ،  $\{\dot{y}\}$  و  $\{\ddot{y}\}$  به ترتیب بردارهای شتاب، سرعت، و تغییرمکان طبقات هستند.  $\{E\}$  بردار تأثیر نامیده می‌شود، که یک ماتریس ستونی است و تمامی درایه‌های آن ۱ است. ماتریس  $[E_f]$  موقعیت نیروی کنترل فعال را نشان می‌دهد. ماتریس‌های  $[M]$ ،  $[C]$  و  $[K]$  به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سازه‌ی ۱۱ طبقه با ATMD هستند.  $\ddot{x}_g$  معرف نیروی زلزله است، که از طریق جابجایی پایه به سازه اعمال می‌شود.

میرایی دو مدل اول سازه، ۵٪ میرایی بحرانی در نظر گرفته شده و بسامدهای مدهای اول و دوم سازه به ترتیب ۶٫۵۷ و ۱۹٫۳۵ رادیان بر ثانیه هستند. به این ترتیب، ماتریس میرایی سازه از روش ریلی محاسبه شده است. میراگر جرمی بر روی مدل اول سازه تنظیم و جرم آن ۳٪ جرم کل سازه و با نسبت میرایی ۷٪ انتخاب شده است.<sup>[۱۷]</sup> انجمن بین‌المللی کنترل سازه‌ها، برای مقایسه‌ی عملکرد کنترل‌کننده‌های مختلف با یکدیگر تحت نیروهای زلزله، ۴ زلزله‌ی مرجع را معرفی کرده است. این زلزله‌ها شامل دو زلزله‌ی میدان - دور و دو زلزله‌ی میدان - نزدیک هستند. این پژوهش زلزله‌های میدان - دور Hachinohe و Elcentro با مقادیر واقعی خود به‌کار رفته‌اند، در حالی که زلزله‌ی میدان - نزدیک Northridge با ۳۰٪ مقدار واقعی خود و زلزله‌ی میدان - نزدیک Kobe با ۴۰٪ مقدار اصلی خود به‌کار رفته است.<sup>[۱۲]</sup> زلزله‌های میدان - نزدیک به دلیل داشتن شتاب‌های بسیار بالا، باعث بروز رفتار غیرخطی در سازه می‌شوند. کاهش‌ی که در مقادیر اصلی شتاب پایه‌های زلزله‌های Northridge و Kobe انجام شده است، به منظور نگه‌داشتن رفتار سازه در محدوده‌ی کشسان است. بیشینه‌ی شتاب واقعی برای زلزله‌های Hachinohe، Elcentro، Kobe و Northridge به ترتیب  $g/۰.۲۲۵$ ،  $g/۰.۳۴۱۷$ ،  $g/۰.۸۱۷۸$  و  $g/۰.۸۲۶۷$  بوده است. برای یک تحلیل آسان و سریع، معادلات تعادل دینامیکی سازه به فرم فضای حالت در آمده و در این فضا حل شده‌اند.

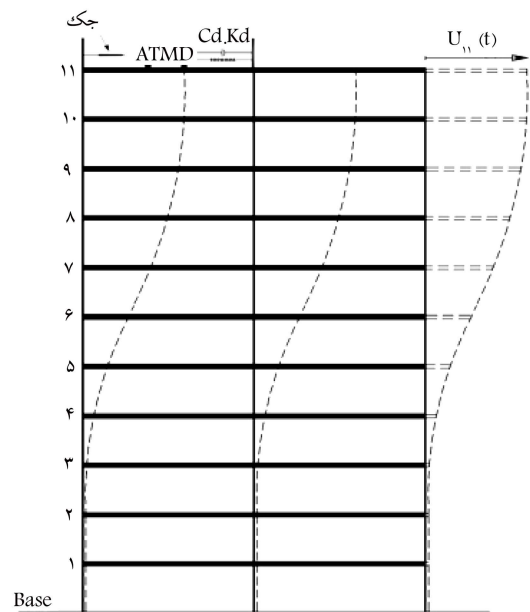
### ۳. سیستم منطق فازی

تئوری منطق فازی برای اولین بار در سال ۱۹۷۵ معرفی شده است.<sup>[۲۰]</sup> منطق فازی از عبارات زبانی برای تولید نیروی کنترل استفاده می‌کند. مهم‌ترین تفاوت بین سیستم‌های فازی و روش‌های کلاسیک این است که تئوری فازی به هر یک از متغیرهای ورودی و خروجی، تابع عضویتی بین ۰ و ۱ نسبت می‌دهد، در حالی که روش‌های کلاسیک، هر متغیر ورودی و خروجی را به صورت ۰ و ۱ می‌بیند. با این توصیف، تئوری منطق فازی می‌تواند عدم قطعیت‌های موجود در سازه و هم‌چنین رفتار غیرخطی احتمالی سازه را مدیریت کند. عدم قطعیت‌ها به شکل‌های متفاوتی در سازه‌ها ظاهر می‌شوند. بارهای اعمالی به سازه‌ها، پاسخ‌های اندازه‌گیری شده توسط حسگرها و مصالحی که اعضاء سازه از آنها ساخته شده‌اند، عدم قطعیت دارند. رفتار غیرخطی نیز غالباً به صورت تغییرشکل‌های بزرگ و یا تشکیل مفاصل خمیری در سازه‌ها بروز می‌کند. با کاهش بیشینه‌ی شتاب زلزله‌های میدان - نزدیک و همچنین کاهش تغییرمکان سازه توسط سیستم کنترلی،

فازی معمولی (FLC) مقایسه و نتایج نشان داده است که کنترل‌کننده‌ی PSFLC، تغییرمکان طبقه‌ی بام و جذر مجموع مربعات RMS تغییرمکان بام سازه را ۱۰ الی ۳۰ درصد بیشتر از کنترل‌کننده‌ی FLC کاهش می‌دهد. این در حالی است که نیروی کنترل بیشینه، در هر دو کنترل‌کننده اختلاف چندانی با هم ندارند.

### ۲. مدل سازه‌ی

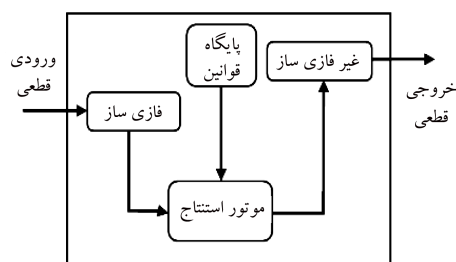
مدل مورد استفاده در این پژوهش، یک ساختمان ۱۱ طبقه است (شکل ۱).<sup>[۱۷]</sup> سقف‌ها کاملاً صلب بوده و برای هر طبقه، یک درجه آزادی انتقالی افقی در نظر گرفته شده است. جرم طبقات نیز در تراز سقف‌ها متمرکز شده‌اند. بنابراین ماتریس سختی سازه به صورت برشی و ماتریس جرم به صورت قطری است. مقادیر جرم‌ها و سختی‌های طبقات، در جدول ۱ نشان داده شده است. بر روی بام سازه یک میراگر جرمی قرار گرفته است، که با یک جک هیدرولیکی



شکل ۱. مدل سازه‌ی

جدول ۱. مقادیر جرم و سختی طبقات.

شماره‌ی طبقه	جرم (kg)	سختی (N/m)
۱	۲۱۵۳۷۰	۴٫۶۸ + ۰٫۸
۲	۲۰۱۷۵۰	۴٫۷۶ + ۰٫۸
۳	۲۰۱۷۵۰	۴٫۶۸ + ۰٫۸
۴	۲۰۰۹۳۰	۴٫۵۰ + ۰٫۸
۵	۲۰۰۹۳۰	۴٫۵۰ + ۰٫۸
۶	۲۰۰۹۳۰	۴٫۵۰ + ۰٫۸
۷	۲۰۳۱۸۰	۴٫۵۰ + ۰٫۸
۸	۲۰۲۹۱۰	۴٫۳۷ + ۰٫۸
۹	۲۰۲۹۱۰	۴٫۳۷ + ۰٫۸
۱۰	۱۷۶۱۰۰	۴٫۳۷ + ۰٫۸
۱۱	۶۶۲۳۰	۳٫۱۲ + ۰٫۸



شکل ۲. ساختار یک سیستم فازی.

مانند سایر الگوریتم‌های فراکاوشی، پاسخ بهینه‌ی یک مسئله را با تعداد زیادی تکرار پیدا می‌کند. این الگوریتم سرعت بالاتری در هم‌گرایی دارد و برای رسیدن به پاسخ بهینه به مدت زمان محاسباتی کمتری نسبت به الگوریتم ژنتیک - الگوریتمی که در بیشتر پژوهش‌های پیشین از آن استفاده شده است، [۲۸، ۲۴، ۱۷] نیاز دارد. در PSO برخلاف الگوریتم ژنتیک که در آن کروموزوم‌های (پاسخ‌های) جدید تولید و جایگزین کروموزوم‌های (پاسخ‌های) قدیمی می‌شوند، پرنده‌ی جدیدی (پاسخ جدیدی) تولید نمی‌شود و پرنده‌گان (پاسخ‌ها) حرکت طبیعی خود را به سمت مقصد (پاسخ بهینه) ادامه می‌دهند.

در الگوریتم PSO، هر پاسخ مسئله به صورت یک پرنده (ذره) که یک مقدار و یک سرعت دارد، مشخص شده است. هر پرنده در یک جهت مشخص پرواز می‌کند و پرنده‌ی را که موقعیت بهتری دارد، جستجو می‌کند (بهترین موقعیت فردی هر پرنده). پرنده، سرعت خود را تغییر می‌دهد و از پرنده‌های دیگر سبقت می‌گیرد تا در موقعیت بهتری قرار گیرد. این عمل را تک تک پرنده‌گان انجام می‌دهند تا در نهایت، همگی پرنده‌گان (همه‌ی پاسخ‌ها) به مقصد (پاسخ بهینه) برسند. در این عملیات، هر پرنده از تجربه‌ی شخصی خود و تجربه‌ی سایر پرنده‌گان استفاده می‌کند تا به موقعیت مطلوب برسد. مراحل الگوریتم PSO به این شرح است:

گام ۱. در ابتدا  $N$  ذره به طور تصادفی تولید می‌شوند. هر ذره موقعیتی در یک فضای  $d$  بعدی دارد و  $d$  تعداد متغیرهایی است که باید بهینه شوند.

گام ۲. تابع هدف به ازاء هر ذره محاسبه می‌شود. هر ذره وضعیت  $X_i$  و سرعت  $V_i$  دارد (رابطه‌ی ۳):

$$X_i = (X_{i1}, \dots, X_{id}), \quad V_i = (V_{i1}, \dots, V_{id}) \quad (3)$$

هر ذره موقعیتی دارد که در آن، ذره در بهترین حالت خود قرار گرفته است ( $P_{Besti}$ ). بهترین موقعیتی که مجموعه‌ی ذرات تاکنون داشته‌اند با ( $G_{Besti}$ ) نشان داده می‌شود.

گام ۳. موقعیت و سرعت جدید هر ذره برای رسیدن به موقعیت بهتر، با توجه به موقعیت ذره در گام قبل، با استفاده از رابطه‌های ۴ و ۵ به‌هنگام می‌شود:

$$\text{New } V_i = W \cdot \text{current } V_i + C_1 \cdot \text{Rand}_1 (P_{Besti} - X_i) + C_2 \cdot \text{Rand}_2 (G_{Besti} - X_i) \quad (4)$$

$$\text{New position } X_i = \text{Current position } X_i + \text{New } V_i \quad (5)$$

اکنون ذرات موقعیت‌های جدید و سرعت‌های جدید دارند.  $C_1$  و  $C_2$  دو ضریب ثابت هستند، که به ترتیب بیانگر بهترین وضعیت هر ذره و بهترین وضعیت همسایگی‌های ذره هستند. ضریب  $W$  نقش متعادل کردن بین جستجوی موضعی و جستجوی کلی را دارد، که به طور خطی از  $1/4$  تا  $0/5$  تغییر می‌کند.  $\text{Rand}_1$  و  $\text{Rand}_2$  دو تابع مستقل تصادفی در بازه‌ی  $[0, 1]$  هستند.  $V_i$  نیز در بازه‌ی  $[-V_{max}, V_{max}]$  تغییر می‌کند.

گام ۴. گام‌های ۲ و ۳،  $B$  مرتبه انجام می‌شوند و سپس موقعیت بهترین ذره به دست می‌آید، پارامترهای بهینه‌شده تعیین می‌شوند و فرایند بهینه‌سازی به اتمام می‌رسد.

در این پژوهش پارامترهای الگوریتم PSO به این شرح انتخاب شده‌اند:

$$B = 100; \quad N = 20; \quad d = 6; \quad C_1 = C_2 = 2;$$

$$W = 1; \quad V_{max} = 2$$

می‌توان از تغییر شکل‌های بزرگ و بروز مفاصل خمیری در سازه تا حد ممکن جلوگیری کرد. به این ترتیب می‌توان این انتظار را داشت که رفتار سازه در حد قابل قبولی خطی باشد. در این پژوهش، کارایی کنترل‌کننده‌ی فازی فقط در بررسی عدم قطعیت‌هایی که ناشی از بارهای ورودی به سازه بوده است، بررسی شده است.

کنترل‌کننده‌ی فازی از ترکیب قوانین اگر - آنگاه، نیروی کنترل را تخمین می‌زند. یک قانون اگر - آنگاه فازی، از دو بخش مقدم و تالی تشکیل شده است. مثلاً داریم (رابطه‌ی ۲):

$$\text{If } x_1 = A_1 \text{ and } x_2 = A_2 \dots \text{ and } x_i = A_i \text{ Then } y = B \quad (2)$$

که در آن،  $x_i$ ها و  $y$  به ترتیب متغیرهای ورودی و خروجی،  $A_i$ ها و  $B$  نیز متغیرهای فازی هستند. برای رسیدن به یک سطح مطلوب از کنترل، مجموعه‌ی قوانین اگر - آنگاه نیاز است. یک کنترل‌کننده‌ی فازی همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، از ۴ قسمت مهم تشکیل شده است:

-- فازی‌ساز: در این قسمت، متغیرهای ورودی اندازه‌گیری شده که اعداد قطعی هستند، به مجموعه‌های فازی نگاشت می‌شوند. با این کار، متغیرها آماده‌ی ورود به قوانین اگر - آنگاه فازی می‌شوند.

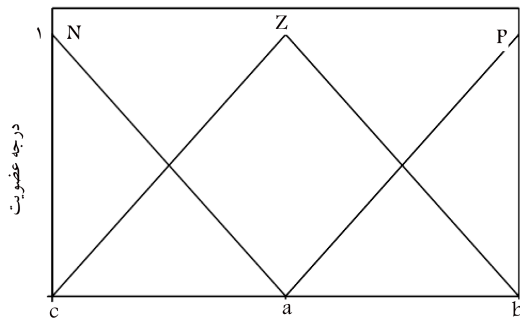
-- قوانین فازی‌ساز: قوانین فازی، مجموعه‌ی قواعد اگر - آنگاه هستند، که توسط افراد خبره ساخته می‌شوند. با ترکیب این قواعد با یکدیگر می‌توان به سطح مطلوبی از کنترل مورد نظر دست یافت.

-- موتور استنتاج: در این بخش که مهم‌ترین قسمت یک کنترل‌کننده‌ی فازی است، قوانین فازی با یکدیگر ترکیب می‌شوند و خروجی که معمولاً نیروی کنترل است، به صورت یک متغیر فازی ارائه می‌شود. معمول‌ترین موتور استنتاج، که در این پژوهش نیز از آن استفاده شده، موتور استنتاج مددانی است.

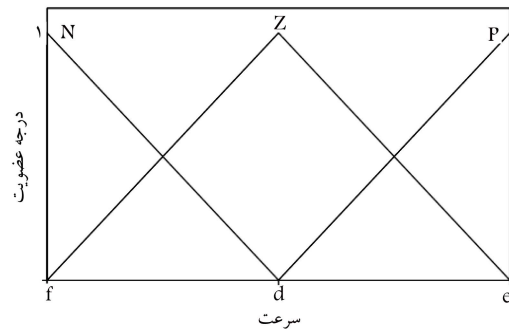
-- غیر فازی‌ساز: بعد از اینکه خروجی موتور استنتاج، به صورت یک متغیر فازی معلوم شد، باید توسط یک غیر فازی‌ساز به متغیر قطعی تبدیل شود. در این پژوهش، از غیر فازی‌ساز میانگین مراکز برای تبدیل متغیر فازی به متغیر قطعی استفاده شده است.

#### ۴. الگوریتم ازدحام ذرات

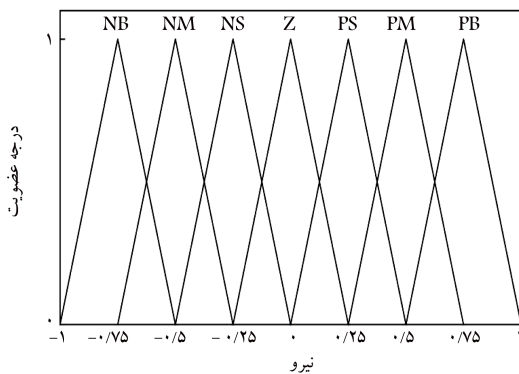
مشکلاتی که در الگوریتم‌های بهینه‌سازی کلاسیک وجود دارد، باعث گسترش کاربرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراکاوشی شده است. در سال ۱۹۹۵ الگوریتم جدیدی به نام ازدحام ذرات (PSO) ارائه شد، که از حرکت دسته‌جمعی پرنده‌گان که همگی در حال حرکت به یک مقصد نامعلوم هستند، الهام گرفته شده است. [۲۷] PSO



شکل ۴. توابع عضویت ورودی (تغییر مکان).



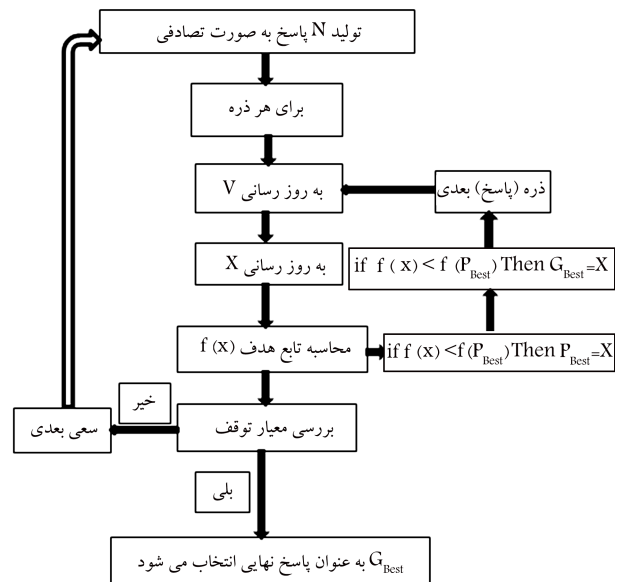
شکل ۵. توابع عضویت ورودی (سرعت).



شکل ۶. توابع عضویت خروجی (نیروی کنترل).

جدول ۲. متغیرهای فازی.

تعریف	متغیر	تابع عضویت
Positive	P	ورودی
Zero	Z	
Negative	N	
Positive Big	PB	خروجی
Positive Medium	PM	
Positive Small	PS	
Zero	Z	
Negative Small	NS	
Negative Medium	NM	
Negative Big	NB	



شکل ۳. ساختار الگوریتم PSO.

فلوچارتی که بیانگر نحوه اجرای الگوریتم PSO است، در شکل ۳ نمایش داده شده است.

در این پژوهش تابع هدف (معیار بهینه‌سازی)، کمینه کردن تغییر مکان بام سازی ۱۱ طبقه تحت تحریک زلزله است. از آنجا که متغیرهای ورودی به کنترل‌کننده فازی، نقش بسیار مهمی در تعیین نیروی کنترل دارند و توابع عضویت آن‌ها نیز می‌تواند از انواع مختلفی انتخاب شود، لذا انتخاب صحیح و بهینه‌ی توابع مذکور اهمیت ویژه‌ی دارد. بنابراین، مراکز توابع عضویت متغیرهای ورودی کنترل‌کننده فازی (تغییر مکان و سرعت)، به عنوان متغیرهای بهینه‌سازی انتخاب شده‌اند. پس از به دست آوردن مرکز توابع عضویت بهینه برای هر زلزله، با استفاده مجدد از الگوریتم PSO، پارامترهای کنترل‌کننده PSFLC، که پارامترهای عمومی نامیده می‌شوند، به دست آمده است.

## ۵. طراحی کنترل‌کننده فازی بهینه‌شده (PSFLC)

در این پژوهش، به منظور طراحی کنترل‌کننده PSFLC از یک سازه واقعی ۱۱ طبقه، که یک ATMD بر روی بام آن قرار گرفته، استفاده شده است. نیروی کنترل فعال از ترکیب کنترل‌کننده منطقی فازی و الگوریتم بهینه‌سازی PSO به دست آمده است. کنترل‌کننده PSFLC، با استفاده از دو متغیر ورودی تغییر مکان و سرعت بام سازه، هر یک با ۳ تابع عضویت مثلثی و یک متغیر خروجی (نیروی کنترل فعال) با ۷ تابع عضویت مثلثی طراحی شده است. این توابع عضویت در بازه  $[-1, 1]$  تعریف و به ترتیب در شکل‌های ۴ الی ۶ نشان داده شده‌اند. شرح حروف مخفف نشان داده شده بر روی توابع عضویت، نیز در جدول ۲ ارائه شده است.

در ابتدا با به کارگیری الگوریتم PSO، مراکز بهینه‌ی توابع عضویت متغیرهای ورودی (تغییر مکان و سرعت)،  $a, b, c, d, e, f$  برای هر یک از زلزله‌های Hachinohe, Northridge, Kobe و Elcentro به دست آمده است (جدول ۳). در فرایند بهینه‌سازی، کران پایین و بالای همه پارامترها به ترتیب ۱ و -۱ است. معیار

جدول ۳. پارامترهای بهینه‌شدهی توابع عضویت فازی متغیرهای ورودی برای ۴ زلزله.

c		b		a		زلزله‌ها	
-۰٫۶۰۷۸	c <sub>۱</sub>	۰٫۲۰۲۰	b <sub>۱</sub>	-۱	a <sub>۱</sub>	Hachinohe	۱
-۰٫۲۶۶۵	c <sub>۲</sub>	۰٫۸۳۹۶	b <sub>۲</sub>	-۱	a <sub>۲</sub>	El-Centro	۲
۰	c <sub>۳</sub>	۰٫۵۴۳۱	b <sub>۳</sub>	۰	a <sub>۳</sub>	Kobe	۳
-۱	c <sub>۴</sub>	۱	b <sub>۴</sub>	۰٫۲۴۶۱	a <sub>۴</sub>	Northridge	۴
f		e		d		زلزله‌ها	
-۰٫۹۶۷۵	f <sub>۱</sub>	۱	e <sub>۱</sub>	۰٫۱۹۸۱	d <sub>۱</sub>	Hachinohe	۱
-۰٫۴۰۲۷	f <sub>۲</sub>	۰٫۷۲۸۲	e <sub>۲</sub>	۰٫۱۱۸۳	d <sub>۲</sub>	El-Centro	۲
-۱	f <sub>۳</sub>	۰٫۶۹۷۳	e <sub>۳</sub>	-۰٫۱۲۶۵	d <sub>۳</sub>	Kobe	۳
-۱	f <sub>۴</sub>	۱	e <sub>۴</sub>	۰٫۲۵۳۲	d <sub>۴</sub>	Northridge	۴

جدول ۴. پارامترهای عمومی.

f <sub>g</sub>	e <sub>g</sub>	d <sub>g</sub>	c <sub>g</sub>	b <sub>g</sub>	a <sub>g</sub>	پارامترهای عمومی
-۰٫۸۴۲۵	۰٫۸۵۶۴	۰٫۱۱۰۸	-۰٫۴۶۸۶	۰٫۶۴۶۲	-۰٫۴۸۳۵	مقدار

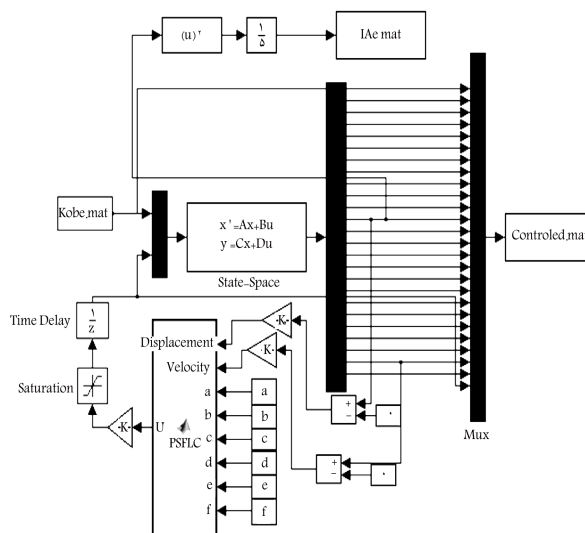
است. به این ترتیب که در رابطه‌ی ۶، پارامترهای  $b_g, c_g, d_g, e_g$  و  $f_g$  به نوبت جایگزین  $a_g$  و همچنین به جای پارامتر  $a_i$  به نوبت سایر پارامترهای  $b_i, c_i, d_i, e_i$  و  $f_i$  جایگزین شده‌اند. به این ترتیب پارامترهای عمومی کنترل‌کننده‌ی PSFLC به دست آمده‌اند، که در جدول ۴ نشان داده شده است.

## ۶. بررسی عملکرد کنترل‌کننده‌ی PSFLC

برای بررسی عملکرد کنترل‌کننده‌ی PSFLC، که در قسمت قبل طراحی شده است، از زلزله‌های متفاوت میدان - دور و میدان - نزدیک استفاده شده است. خصوصیات این زلزله‌ها، که هر یک محتوای بسامدی و زمان بارگذاری متفاوت و شتاب‌های بیشینه‌ی مختلفی دارند، در جدول ۵ نشان داده شده است.

از آنجایی که پایداری یک سازه معمولاً به بیشینه‌ی تغییرمکان آن که در بام است، مربوط می‌شود؛ از این معیار و RMS تغییرمکان بام برای بررسی توانایی کنترل‌کننده‌ی PSFLC و مقایسه‌ی عملکرد آن با کنترل‌کننده‌ی FLC در کاهش پاسخ سازه استفاده شده است. تغییرمکان بام و RMS تغییرمکان بام در سازه‌ی ۱۱ طبقه، برای کنترل‌کننده‌های PSFLC و FLC به همراه درصد کاهش آنها نسبت به سازه‌ی کنترل‌نشده، برای زلزله‌های مختلف محاسبه و به ترتیب در جدول‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. لازم به ذکر است کنترل‌کننده‌ی FLC بهینه نیست و دارای توابع عضویتی با مراکز ۱، ۰ و -۱، برای توابع عضویت تغییرمکان و سرعت است.

همان‌طور در جدول ۶ مشاهده می‌شود، کنترل‌کننده‌ی FLC تغییرمکان بام سازه را در حدود ۲۳٪ برای زلزله‌ی Kern-County و در حدود ۵۲٪ برای زلزله‌ی Chi-Chi کاهش می‌دهد، این در حالی است که کنترل‌کننده‌ی PSFLC تغییرمکان بام را برای زلزله‌های Kern-County و Chi-Chi به ترتیب در حدود ۳۷ و ۶۲ درصد کاهش می‌دهد. همچنین، کنترل‌کننده‌ی PSFLC تغییرمکان بام سازه را برای زلزله‌های Landers و Coalinga به ترتیب در حدود ۵۷ و ۴۱ درصد کاهش می‌دهد. این مقادیر کاهش برای کنترل‌کننده‌ی FLC برای زلزله‌های مذکور به ترتیب ۴۶ و ۱۳ درصد است. این نتایج نشان می‌دهند که کنترل‌کننده‌ی PSFLC بیشینه‌ی تغییرمکان سازه را در حدود ۱۰٪ بیشتر از کنترل‌کننده‌ی FLC برای زلزله‌های Chi-Chi و Coalinga کاهش می‌دهد. همچنین، کنترل‌کننده‌ی PSFLC تغییرمکان



شکل ۷. شبیه‌سازی مدل معرفی شده با نرم‌افزار Matlab.

بهینه‌سازی نیز کمینه کردن تغییرمکان بام سازه است. کلیدی شبیه‌سازی‌ها با نرم‌افزار Matlab انجام شده است (شکل ۷).

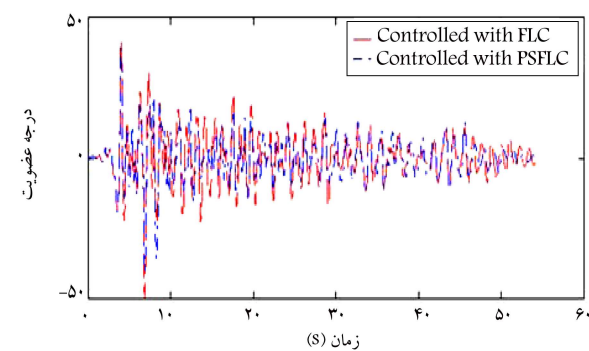
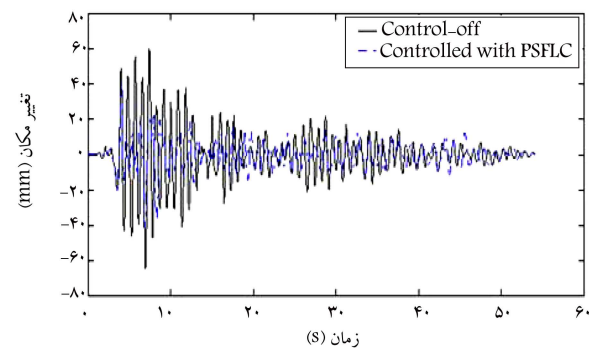
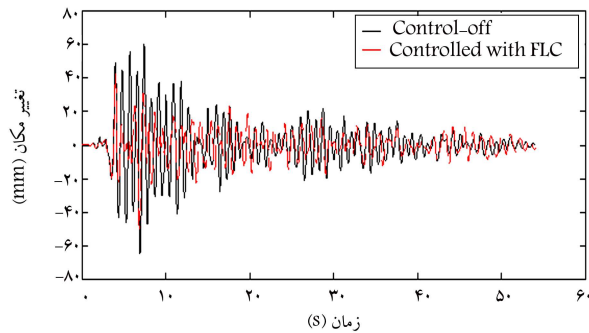
پس از محاسبه‌ی پارامترهای بهینه برای هر یک از زلزله‌ها، باید پارامترهای عمومی کنترل‌کننده‌ی PSFLC محاسبه شوند. پارامترهای کنترل‌کننده‌ی PSFLC، با  $a_g, b_g, c_g, d_g, e_g$  و  $f_g$  (پارامترهای عمومی) نشان داده شده و برای محاسبه‌ی آنها، مجدداً از الگوریتم PSO استفاده شده است. با به‌کاربردن الگوریتم PSO، RMS خطا برای هر یک از پارامترهای عمومی، کمینه شده است. به‌عنوان مثال، پارامتر  $a_g$  با رابطه‌ی ۶ محاسبه شده است:

$$E(a_g) = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (a_g - a_i) \right]^{0.5} \quad (6)$$

که در آن،  $N$  تعداد زلزله بوده که برابر با ۴ است.  $a_i$  پارامتر بهینه‌شده‌ی  $a$  برای زلزله‌ی  $i$ ام و  $a_g$  پارامتر عمومی کنترل‌کننده‌ی PSFLC است. رابطه‌ی ۶، به طریق مشابه برای محاسبه‌ی سایر پارامترهای عمومی  $b_g, c_g, d_g, e_g$  و  $f_g$  به‌کار رفته

جدول ۵. مشخصات زلزله‌ها.

شماره	نام زلزله	نوع زلزله	ایستگاه	مدت زمان (ثانیه)	بیشینه‌ی شتاب (g)
۱	Kern-County	میدان - دور	Taft Lincoln School ۱۰۹۵	۵۴٫۱۵	۰٫۱۷۸
۲	Chi-Chi	میدان - دور	CHY۱۰۱	۸۹٫۹۵	۰٫۳۵۳
۳	Landers	میدان - نزدیک	Lucerne ۲۴	۴۸٫۱۲	۰٫۷۸۵
۴	Coalinga	میدان - نزدیک	Transmitter Hill ۱۶۵۱	۲۱٫۷۵	۰٫۸۴



جدول ۶. تغییر مکان بام سازه به همراه درصد کاهش آنها برای کنترل‌کننده‌های FLC و PSFLC.

زلزله	تغییر مکان بام سازه (میلیمتر)		کاهش پاسخ نسبت به پاسخ سازه‌ی کنترل نشده (%)	
	پاسخ سازه‌ی کنترل نشده	پاسخ سازه‌ی کنترل شده با کنترل‌کننده‌های	PSFLC	FLC
Kern-County	۶۵	۵۰	۴۱	۲۳
Chi-Chi	۱۷۵	۸۴	۶۸	۵۲
Coalinga	۲۱۳	۱۱۵	۹۲	۴۶
Landers	۷۵	۶۵	۴۴	۱۳

جدول ۷. RMS تغییر مکان بام سازه به همراه درصد کاهش آنها برای کنترل‌کننده‌های PSFLC و FLC.

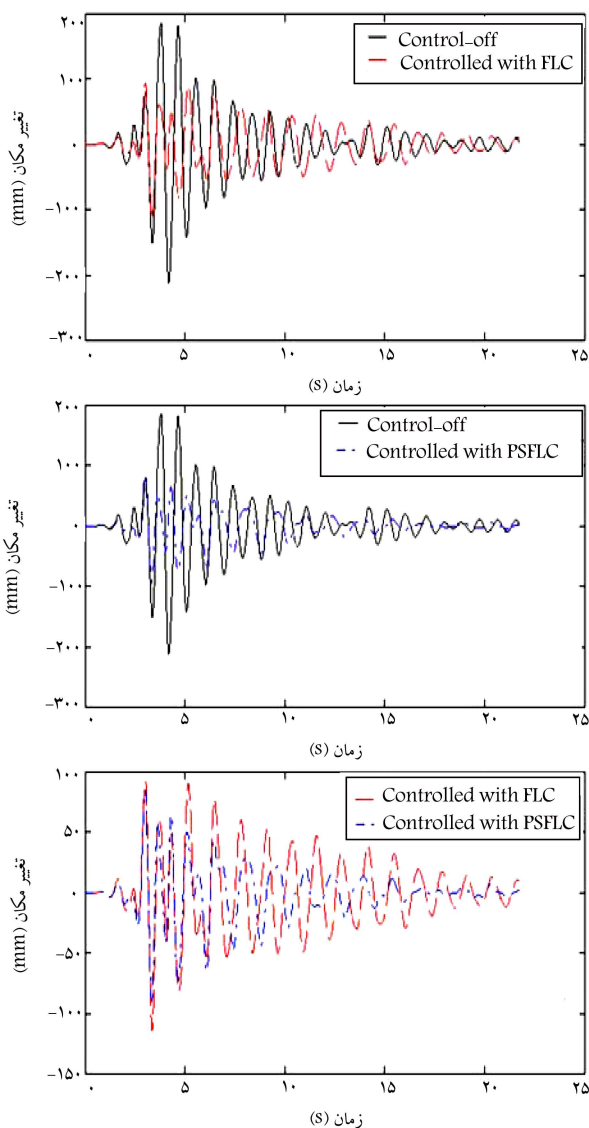
زلزله	RMS تغییر مکان بام سازه (میلیمتر)		کاهش پاسخ نسبت به پاسخ سازه‌ی کنترل نشده (%)	
	پاسخ سازه‌ی کنترل نشده	پاسخ سازه‌ی کنترل شده با کنترل‌کننده‌های	PSFLC	FLC
Kern-County	۱۴	۸٫۷	۷٫۶	۳۸
Chi-Chi	۲۷	۱۷	۱۶٫۸	۳۶
Coalinga	۴۸	۳۱	۲۱	۳۵
Landers	۱۱	۱۰	۹	۹

بام را به ترتیب در حدود ۱۵ و ۲۷ درصد بیشتر از کنترل‌کننده‌ی FLC برای زلزله‌های Kern-County و Landers کاهش می‌دهد. شکل‌های ۸ الی ۱۱، تاریخچه‌ی تغییر مکان بام سازه‌ی ۱۱ طبقه را برای حالت‌های مختلف سازه‌ی کنترل نشده<sup>۸</sup> و سازه‌ی کنترل شده با کنترل‌کننده‌های FLC و PSFLC برای هر یک از زلزله‌های Kern-County، Chi-Chi، Coalinga و Landers به ترتیب نشان می‌دهد. در هر یک از شکل‌ها، ابتدا پاسخ سازه‌ی کنترل نشده با پاسخ سازه‌ی کنترل شده با کنترل‌کننده‌ی FLC مقایسه شده است. سپس در شکل دوم، پاسخ سازه‌ی کنترل نشده با پاسخ سازه‌ی کنترل شده با کنترل‌کننده‌ی PSFLC مقایسه و در شکل سوم پاسخ‌های سازه‌ی کنترل شده با کنترل‌کننده‌های FLC و PSFLC با یکدیگر مقایسه شده است.

با توجه به شکل‌های ۸ الی ۱۱ مشاهده می‌شود که تغییر مکان بام سازه برای هر دو کنترل‌کننده‌ی PSFLC و FLC در مدت زمان اعمال زلزله، به طور

شکل ۸. مقایسه‌ی تاریخچه‌ی زمانی تغییر مکان بام سازه برای حالت‌های مختلف سازه‌ی کنترل نشده و سازه‌ی کنترل شده با کنترل‌کننده‌های FLC و PSFLC برای زلزله‌ی Kern-County.

قابل ملاحظه‌ی کاهش یافته است. RMS تغییر مکان بام، بیانگر مقدار متوسط تغییر مکان بام سازه در مدت زمان اعمال بارگذاری است، که مقادیر آن برای زلزله‌های مختلف در جدول ۷ ارائه شده است. مقدار کاهش RMS تغییر مکان بام برای کنترل‌کننده‌ی FLC نسبت به سازه‌ی کنترل نشده برای زلزله‌های Coalinga، Chi-Chi، Kern-County و Landers به ترتیب: ۳۸، ۳۶، ۳۵ و ۹ درصد است. این مقادیر کاهش برای کنترل‌کننده‌ی PSFLC برای زلزله‌های ذکر شده به

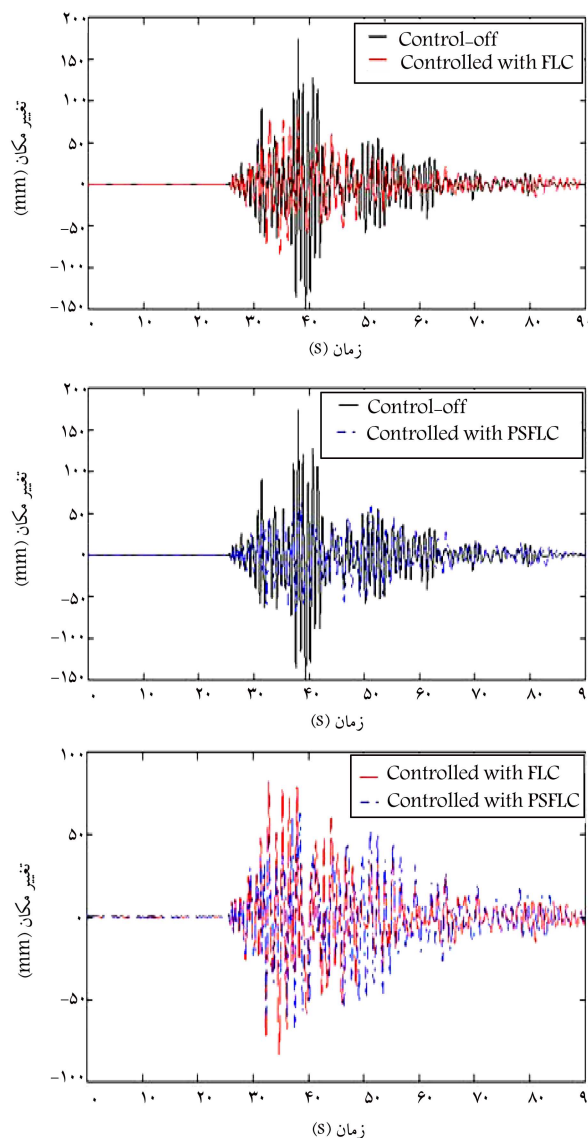


شکل ۱۰. مقایسه‌ی تاریخچه‌ی زمانی تغییرمکان بام سازه برای حالت‌های مختلف سازه‌ی کنترل‌نشده و سازه‌ی کنترل‌شده با کنترل‌کننده‌های FLC و PSFLC برای زلزله‌ی Coalinga.

در جدول ۸، بیشینه‌ی نیروی کنترل تولیدشده توسط دو کنترل‌کننده‌ی PSFLC و FLC نشان داده شده است. نیروهای کنترل تولیدشده در تمامی زلزله‌ها به جز زلزله‌ی Kern-County، اختلاف چندانی با هم ندارند. این مسئله نشان می‌دهد که با بهینه‌کردن توابع عضویت فازی، با صرف نیروی کنترل نه چندان زیادتری، می‌توان بیشینه‌ی تغییرمکان سازه را بیشتر کاهش داد.

## ۷. پایداری کنترل‌کننده‌ی PSFLC

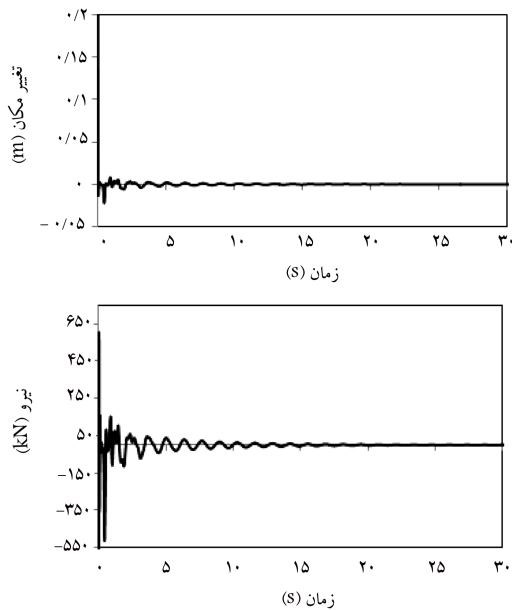
از آنجایی که کنترل‌کننده PSFLC دارای مدل ریاضی نمی‌باشد، مهم‌ترین مسئله، ناپایداری احتمالی آن است. پایداری کنترل‌کننده‌های فازی به روش‌های مختلفی بررسی می‌شوند. یکی از معروف‌ترین روش‌های ذکرشده، ایجاد یک تغییرمکان اولیه در سازه است. پس از ایجاد این ارتعاش اولیه بررسی می‌شود که آیا کنترل‌کننده‌ی



شکل ۹. مقایسه‌ی تاریخچه‌ی زمانی تغییرمکان بام سازه برای حالت‌های مختلف سازه‌ی کنترل‌نشده و سازه‌ی کنترل‌شده با کنترل‌کننده‌های FLC و PSFLC برای زلزله‌ی Chi-Chi.

ترتیب: ۴۶، ۳۷، ۵۶ و ۱۸ درصد است. نتایج بیان‌گر آن است که کنترل‌کننده‌ی PSFLC، تغییرمکان بام را بسیار بهتر از کنترل‌کننده‌ی FLC کاهش می‌دهد، به طوری که در بهترین حالت در زلزله‌ی Coalinga، کنترل‌کننده‌ی PSFLC، تغییرمکان بام را ۲۱٪ بیشتر از کنترل‌کننده‌ی FLC کاهش داده و در بدترین حالت در زلزله‌ی Landers، مقدار کاهش RMS تغییرمکان بام برای هر دو کنترل‌کننده‌ی PSFLC و FLC تقریباً یکسان است. این نکته نیز قابل توجه است که هر چه تغییرمکان بام و RMS آن کمتر شود، سازه پایدارتر خواهد بود. این تذکر لازم است که به دلیل اینکه کنترل‌کننده‌ی PSFLC، حالت بهینه‌ی کنترل‌کننده‌ی FLC است؛ ملاحظه می‌شود که همواره عملکرد بهتری نسبت به کنترل‌کننده‌ی FLC دارد. در همه‌ی حالات، کاهش پاسخ تغییرمکان بام و RMS تغییرمکان بام در کنترل‌کننده‌ی PSFLC بیشتر از کنترل‌کننده‌ی FLC است.





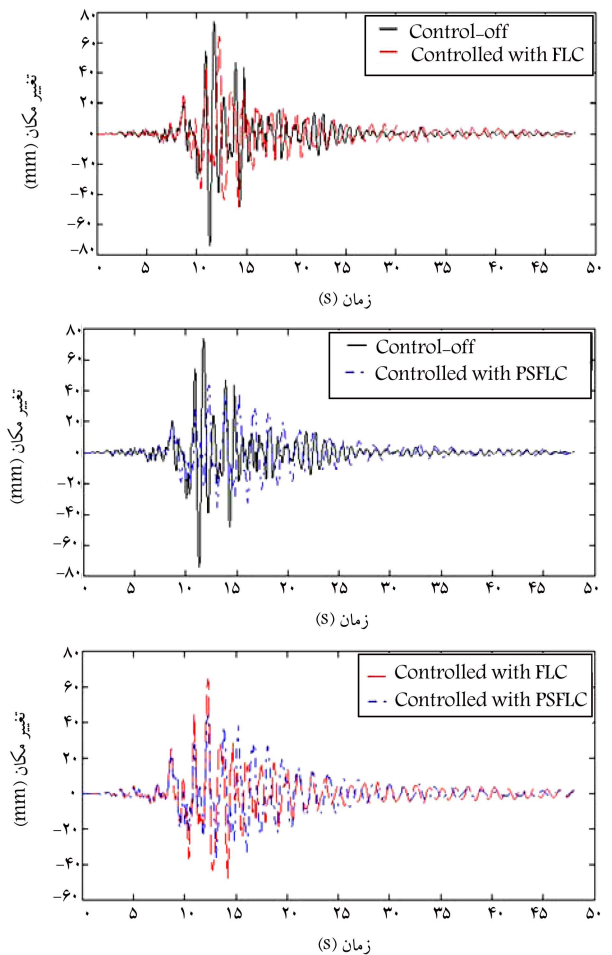
شکل ۱۲. پایداری کنترل‌کننده PSFLC در قالب کاهش تغییر مکان و نیروی کنترل فعال.

## ۸. نتیجه‌گیری

با بررسی‌های انجام شده ملاحظه می‌شود که تاکنون هیچ پژوهشی در ترکیب کنترل‌کننده منطق فازی و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای تولید نیروی کنترل فعال به یک میراگر جرمی تنظیم شده انجام نشده است. در این پژوهش با ترکیب کنترل‌کننده منطق فازی (FLC) و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)، کنترل‌کننده جدید PSFLC معرفی شده است. از آنجایی که توابع عضویت فازی، مهم‌ترین نقش در تولید نیروی کنترل را دارند، بهینه‌سازی آن‌ها مسئله‌ی بسیار تأثیرگذاری است. در بسیاری از پژوهش‌ها، توابع عضویت فازی با استفاده از سعی و خطا به دست می‌آیند و به دلیل اینکه بهینه نیستند، معمولاً بهترین عملکرد را نخواهند داشت. به این منظور در این پژوهش از الگوریتم PSO برای بهینه‌سازی توابع عضویت متغیرهای ورودی کنترل‌کننده فازی استفاده شده است.

در ابتدا تحلیل‌ها، برای سازه ۱۱ طبقه‌ی مجهز به ATMD در بام، برای هر یک از زلزله‌های معرفی شده توسط انجمن IASC انجام شده و پارامترهای بهینه‌ی توابع عضویت فازی به دست آمده است. سپس با استفاده از الگوریتم PSO، پارامترهای کنترل‌کننده PSFLC (پارامترهای عمومی) به دست آمده‌اند. توانمندی کنترل‌کننده PSFLC برای زلزله‌های مختلف میدان - دور و میدان - نزدیک آزمایش و نتایج نشان داده است که کنترل‌کننده PSFLC از کنترل‌کننده فازی معمولی (FLC) بسیار بهتر عمل می‌کند. این نتایج در این پژوهش به دست آمده است:

۱. کنترل‌کننده PSFLC بیشینه‌ی تغییر مکان سازه را در حدود تقریباً ۱۰٪ الی ۳۰٪ درصد بیشتر از کنترل‌کننده FLC کاهش داده است.
۲. کنترل‌کننده PSFLC، RMS تغییر مکان بام سازه را در همه‌ی زلزله‌ها به جز زلزله Landers، در حدود تقریباً ۱۰٪ الی ۲۰٪ درصد بیشتر از کنترل‌کننده FLC کاهش داده است.
۳. الگوریتم PSO یک ابزار قوی برای بهینه‌سازی است، به طوری که می‌تواند پارامترهای زیادی را هم‌زمان با هم بهینه سازد.



شکل ۱۱. مقایسه‌ی تاریخی زمانی تغییر مکان بام سازه برای حالت‌های مختلف سازه کنترل نشده و سازه‌ی کنترل شده با کنترل‌کننده‌های FLC و PSFLC برای زلزله‌ی Landers.

جدول ۸. بیشینه‌ی نیروی کنترل.

زلزله‌ها	بیشینه‌ی نیروی کنترل (kN)	
	PSFLC	FLC
Kern-County	۳۳۵	۲۲۵
Chi-Chi	۱۱۰۰	۹۱۰
Landers	۱۱۸۹	۹۸۱
Coalinga	۲۰۰۰	۱۸۲۰

PSFLC توانایی برگرداندن سازه به حالت اولیه‌ی خود را دارد یا خیر؟ در صورتی که کنترل‌کننده PSFLC بتواند سازه را به موقعیت اولیه‌ی خود (حالت استراحت) برگرداند، پایدار است.

در این پژوهش در بام سازه ۱۱ طبقه، تغییر مکان اولیه‌ی ۲۰۰ میلی‌متر ایجاد شده است. شکل ۱۲، پایداری کنترل‌کننده PSFLC را در قالب تغییر مکان بام سازه و نیروی کنترل فعال تولید شده نشان می‌دهد. با توجه شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، که کنترل‌کننده PSFLC در مدت زمان بسیار کوتاهی، سازه را به موقعیت اولیه‌ی خود بر می‌گرداند و این نشان‌دهنده‌ی پایداری بودن کنترل‌کننده PSFLC است.

## پانوشتها

1. Tuned Mass damper
2. Active Tuned Mass damper
3. linear quadratic regulator
4. linear quadratic Gavssian
5. propertional Derivative
6. Inreval Type 2 Fuzzy logic Controller
7. Root mean square
8. control-off

## (References) منابع

1. Den Hartog, J.P., *Mechanical Vibrations*, 4th Edition ed., New York, McGraw-Hill (1956).
2. Kaynia, A.M., Bigges, J.M. and Veneziano, D. "Seismic effectiveness of tuned mass dampers", *Structural Division*, **107**(8), pp. 1468-1484 (1981).
3. Warburton, G.B. "Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **10**(3), pp. 381-40 (1982).
4. Sadek, F., Mohraz, B., Taylor, A.W. and Chung, R.M. "A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **26**(6), pp. 617-635 (1997).
5. Bakre, S.V. and Jangid, R.S. "Optimum parameters of tuned mass damper for damped main system", *Structural Control and Health Monitoring*, **14**(3), pp. 448-470 (2007).
6. Mohebbi, M. and Joghataie, A. "Designing optimal tuned mass dampers for nonlinear frames by distributed genetic algorithms", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, **21**(1), pp. 57-76 (2012).
7. Bekdaş, G. and Nigdeli, S.M. "Estimating optimum parameters of tuned mass dampers using harmony search", *Engineering Structures*, **33**(9), pp. 2716-2723 (2011).
8. Leung, A.Y.T. and Zhang, H. "Particle swarm optimization of tuned mass dampers", *Engineering Structures*, **31**(3), pp. 715-728 (2009).
9. Morison, J. and Karnopp, D. "Comparison of optimized active and passive vibration absorbers", *In Joint Automatic Control Conference*, 14th, Columbus, Ohio (1973).
10. Lund, R. A. "Active damping of large structures in winds", IUTAM (1979).
11. Chang, J.C.H. and Soong, T.T. "Structural control using active tuned mass dampers", *Engineering Mechanics Division*, **106**(6), pp. 1091-1098 (1980).
12. Kobori, T., Koshika, N., Yamada, K. and Ikeda, Y. "Seismic-response-controlled structure with active mass driver system. Part 1: Design", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **20**(2), pp. 133-149 (1991).
13. Kobori, T., Koshika, N., Yamada, K. and Ikeda, Y. "Seismic-response-controlled structure with active mass driver system. Part 2: Verification", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **20**(2), pp. 151-166 (1991).
14. Nishimura, I., Kobori, T., Sakamoto, M., Koshika, N., Sasaki K. and Ohru, S. "Active tuned mass damper", *Smart Materials and Structures*, **1**(4), p. 306 (1992).
15. Ankireddi, S. and Yang, H.Y. "Simple ATMD control methodology for tall buildings subject to wind loads", *Structural Engineering*, **122**(1), pp. 83-91 (1996).
16. Cao, H. and Li, Q.S. "New control strategies for active tuned mass damper systems", *Computers & Structures*, **82**(27), pp. 2341-2350 (2004).
17. Pourzeynali, S., Lavasani, H.H. and Modarayi, A.H. "Active control of high rise building structures using fuzzy logic and genetic algorithms", *Engineering Structures*, **29**(3), pp. 346-357 (2007).
18. Battaini, M., Casciati, F. and Faravelli, L. "Fuzzy control of structural vibration. An active mass system driven by a fuzzy controller", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **27**(11), pp. 1267-1276 (1998).
19. Guclu, R. and Yazici, H. "Vibration control of a structure with ATMD against earthquake using fuzzy logic controllers", *Sound and Vibration*, **318**(1-2), pp. 36-49 (2008).
20. Zadeh, L.A. "The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning", *I. Information Sciences*, **8**(3), pp. 199-249 (1975).
21. Samali, B. and et al. "Active control of cross wind response of 76-story tall building using a fuzzy controller", *Engineering Mechanics*, **130**(4), pp. 492-498 (2004).
22. Samali, B. and Al-Dawod, M. "Performance of a five-storey benchmark model using an active tuned mass damper and a fuzzy controller", *Engineering Structures*, **25**(13), pp. 1597-1610 (2003).
23. Shariatmadar, H. and Golnargesi, S. "Structural control with active tuned mass damper by type 2 fuzzy logic controller for seismic excitations", *Sharif Journal of Civil Engineering* (Accepted for publication), (2013) (In Persian).
24. Shariatmadar, H., Golnargesi, S. and Akbarzadeh Totonchi, M.R. "Vibration control of buildings using atmd against earthquake excitations through interval type-2 fuzzy logic controller", *Asian Journal of Civil Engineering (Bhrc)*, **15**(3), pp. 321-338 (2014).
25. Aly, M.A. "Vibration control of high-rise buildings for wind: A robust passive and active tuned mass damper", *Smart Structures and Systems*, **13**(3), pp. 473-500 (2014).
26. Ahlawat, A. and Ramaswamy, A. "Multiobjective optimal fuzzy logic control system for response control of wind-excited tall buildings", *Engineering Mechanics*, **130**(4), pp. 524-530 (2004).
27. Kennedy, J. and Eberhart, R. "Particle swarm optimization", *In Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*, **4**, pp. 1942-1948 (1995).
28. Ahlawat, A.S. and Ramaswamy, A. "Multi-objective optimal design of FLC driven hybrid mass damper for seismically excited structures", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **31**(7), pp. 1459-1479 (2002).