

ارائه الگوریتم کنترل فعال فازی بهینه شده با روش مسابقه طناب کشی برای کنترل پاسخ‌های پل بزرگراه

مصطفی قلیچی^۱، علی‌رضا میرزا گل تبار روشن^{۲*}، حمیدرضا توکلی^۳، عباس کرم‌الدین^۴

۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران

۲- دانشیار گروه سازه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران

۳- دانشیار گروه زلزله، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران

۴- دانشیار گروه سازه، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

چکیده

این تحقیق یک الگوریتم کنترل فعال فازی بهینه شده تحت بارگذاری زلزله‌های مختلف، با روش بهینه سازی جدید بسیار کارآمد در مورد سازه‌های عمرانی برگرفته از مسابقه طناب کشی پیشنهاد می‌دهد. روش کنترل بر پایه ترکیب شبکه عصبی فازی و روش بهینه سازی فراابتکاری بر پایه جمعیت مسابقه طناب کشی ارائه شده است. کارآمدی الگوریتم پیشنهادی بر روی پل بزرگراه پنج مارک با جداگرهای پایه غیرخطی و اعضای سازه‌ای غیر خطی مجهز به محرک‌های هیدرولیکی ارزیابی شده است. الگوریتم قادر است ماهیت میدان نزدیک یا دور بودن زلزله را تشخیص داده و براساس آن نیروی کنترلی لازم را برآورد نماید. نیروی کنترلی در این تحقیق با استفاده از یک شبکه عصبی پنج لایه بدست آمده است. شبکه عصبی برای تقریب قوانین غیرخطی کنترل، به صورت بهینه توسط روش بهینه‌سازی معرفی شده، توانمند شده است و محرک‌های نصب شده بر روی پایه های پل را کنترل می‌نماید. پایداری قوانین کنترل حین بهینه‌سازی برای رسیدن به بهترین پارامترها، توسط تئوری لیاپانوف کنترل می‌شود. نتایج مدل‌سازی عددی به صورت اندیس عملکرد و قابل قیاس با روش‌های پیشین ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد الگوریتم پیشنهادی در تمامی شش رکورد زلزله آزمایش شده در این تحقیق، از روش‌های ارائه شده پیشین در کاهش پاسخ‌های سازه موفق‌تر بوده است. الگوریتم در کنار کاهش کلی پاسخ‌های پل، سبب کاهش میزان خسارات سازه‌ای وارد بر آن نیز می‌شود.

کلمات کلیدی: کنترل فعال، الگوریتم مسابقه طناب کشی، انفیس، شبکه عصبی، پل بزرگراه، پایداری لیاپانوف.

*نویسنده مسئول: دکتر علی‌رضا میرزا گل تبار روشن
پست الکترونیکی: ar-goltabar@nit.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۰۰۰/۰۰/۰۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۰۰۰/۰۰/۰۰

امروزه به منظور کنترل رفتار لرزه‌ای سازه‌های خاص مانند پلها و ساختمانهای با اهمیت زیاد که حفظ عملکرد آنها پس از وقوع زلزله حیاتی است به شکل گسترده‌ای از تکنیک‌های کنترل غیرفعال، نیمه فعال و فعال و یا ترکیبی استفاده می‌شود. به همین جهت تحقیقات متعددی عمدتاً در دو گروه ابزارهای کنترلی جدید و الگوریتم‌های کنترلی جدید ارائه شده‌اند.

اثر بخشی سیستم‌های مختلف کنترل برای پل‌های راه‌آهن بوسیله چن و همکاران [۱] بررسی گردید. آنها نتیجه گرفتند سیستم TMD برای جذب ارتعاشات ناشی از تحریک زلزله، از بین سایر سیستم‌های غیرفعال بهترین کارایی را دارد. هیو و همکاران [۲] با استفاده از ترکیب میراگرهای MR و جداگرهای لاستیکی برای یک پل دو دهانه یک سیستم کنترل ترکیبی پیشنهاد دادند. این سیستم ترکیبی به طور چشم‌گیری توانست پاسخ‌های سازه و مخصوصاً جابجایی نسبی آن را کاهش دهد.

به منظور ایجاد یک بستر مناسب برای مقایسه عملکرد روش‌های مختلف ارائه شده، مدل‌های پنج‌مارک معرفی شدند. این مدل‌ها اولین بار در اواسط دهه ۱۹۹۰ میلادی توسط اسپنسر [۳ و ۴] در مهندسی کنترل به کار رفتند. بعد از آن مسائل پنج‌مارک در زمینه‌های مختلف مانند: ساختمان‌های غیر خطی تحت تحریک زلزله (اهتوری و همکاران [۵])، ساختمان‌های بلند مرتبه تحت تحریک باد (یانگ و همکاران [۶])، پل کابلی تحت زلزله (دایکه و همکاران [۷])، کایسیدو و همکاران [۸])، و سازه‌های خطی و غیر خطی جداسازی شده پایه هوشمند (ناراسیم‌هان و همکاران [۹])، ناراسیم‌هان [۱۰]، ساها [۱۱]، ماجکار و جنگید [۱۲]، ناگاراچه و ناراسیم‌هان [۱۳] و ناراسیم‌هان و همکاران [۱۴ و ۱۵]) به شدت توسعه یافتند.

یک مسئله پنج‌مارک، بر مبنای پل بزرگراه تحت تحریک زمین‌لرزه واقع در کالیفرنیا جنوبی مطرح گردید (آگراوال و همکاران [۱۶]، تان و آگراوال [۱۷] و ناگاراچه و همکاران [۱۸]). اثربخشی دمپرهای ویسکوز مایع غیرخطی (FV) برای پل بزرگراه پنج‌مارک تحت تحریک ۶ زلزله بوسیله ساها [۱۱] بررسی شد. او برای یافتن ضریب میرایی، دوره ارتعاش و شاخص سرعت میراگر ویسکوز مایع یک مطالعه پارامتریک انجام داد. نتایج نشان داد که پاسخ‌های سازه‌ای نظیر جابجایی وسط دهانه، برش پایه و جابجایی تکیه‌گاه‌ها به شکل قابل قبولی کاهش می‌یابد.

ماجکار و جنگید [۱۲] میزان کاهش پاسخ لرزه‌ای پل بزرگراه پنج‌مارک را با استفاده از میراگرهای اصطکاکی پیزوالکتریک (PFD) بررسی کردند. آنها مشاهده کردند که میراگرهای PFD در مقایسه با میراگرهای MR در کنترل پاسخ پل موثرتر هستند. تمرکز اصلی عمده تحقیقات ذکر شده بر روی معرفی الگوریتم‌های کنترلی جدید بر پایه اصول کلاسیک ریاضیات بوده است. به طور کل معطوف نمودن تمرکز و انرژی تحقیقات بر روی توسعه الگوریتم‌های جدید می‌تواند موجب استفاده مناسب‌تر از تجهیزات موجود شود. به همین جهت در سالهای اخیر پیشرفت بیشتری در ارائه الگوریتم‌های جدید ترکیبی، مخصوصاً با استفاده از شبکه‌های عصبی حاصل شده است.

پنگ و همکاران [۱۹] با استفاده از ترکیب شبکه عصبی فازی و روش بهینه سازی ازدحام ذرات PSO، یک روش کنترلی فازی جدید برای کنترل نیمه فعال سیستم تعلیق خودرو با میراگرهای MR پیشنهاد دادند. این تحقیق نشان داد روش ترکیبی ارائه شده در مقایسه با استفاده از همین روش‌ها به صورت غیر ترکیبی پاسخ‌های کاملاً قابل قبول‌تری ارائه می‌کند.

ناراسیم‌هان [۱۰] یک الگوریتم کنترلی فعال تطبیقی برای کنترل پل بزرگراه غیرخطی پنج‌مارک ارائه کرد. در این روش با استفاده از یک شبکه عصبی غیرخطی تک لایه به انضمام کنترل‌گر بر پایه مشتق، نیروی کنترل مورد نیاز محاسبه می‌شود. شبکه عصبی برای تخمین قوانین غیرخطی کنترل به کار گرفته شده است. نتایج نشان داد که روش ارائه شده می‌تواند پاسخ‌های سازه را بدون نیاز به تفسیر دقیق غیرخطی‌های موجود در مدل یا جزئیات وسیع سیستم سازه‌ای کاهش دهد.

خدابنده‌لو و همکاران [۲۰] بر اساس شبکه عصبی بر پایه موجک (WNN) و روش کنترل پیش‌بینی مدل (MPC) یک روش شناسایی و کنترل تطبیقی ارائه نمودند. در نتیجه این روش پاسخ‌های سازه شامل تغییرشکل‌ها و شتاب، هم برای زلزله‌های میدان دور و هم میدان نزدیک کاهش پیدا کرد. ساها [۲۱] با استفاده از جداگرهای آونگی اصطکاکی چند جمله‌ای غیر فعال پاسخ لرزه‌ای پل بزرگراه پنج‌مارک را بررسی نمود. مهمترین ویژگی این روش استفاده از طراحی دوگانه حلقه‌های هیستریسیس است. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی در

مقایسه با روش‌های کلاسیک جداسازی پایه، در کاهش پاسخ‌های ماکزیمم پل موثرتر است. پارک و اکی [۲۲] یک کنترل‌گر فعال فازی از پیش طراحی شده برای تامین سازگاری پایدار در مقابل محدودیت‌های ضربه ابزارها و نیروهای کنترلی ارائه نمودند. نتایج مدل‌سازی عددی نشان داد که روش ارائه شده به خوبی پایداری سیستم کنترل را تامین می‌نماید.

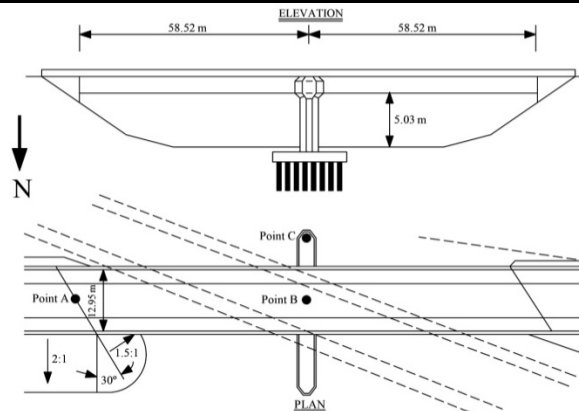
روشهای بهینه سازی ابزار قدرتمندی در مهندسی سازه محسوب می‌شوند. این روشها با صرف انرژی محاسباتی سبب کاهش هزینه اجرای سازه‌ها و بهبود عملکرد آنها می‌شوند. کاوه و ذوالقدر [۲۳] در تحقیق اخیر خود یک روش بهینه‌سازی فراابتکاری برپایه جمعیت برگرفته از مسابقه طناب کشی ارائه نمودند. در این روش، هر کاندید جواب به عنوان یک تیم در نظر گرفته می‌شود که می‌بایست در یک سری از رقابت‌ها شرکت نماید. نتایج عددی نشان می‌دهد که این روش در مقایسه با نتایج روش‌های ذکر شده قبلی عملکرد بهتری در یافتن پاسخ‌ها دارد. در تحقیق پیش‌رو با استفاده از مزایای ذکر شده از کنترل‌گر عصبی - فازی و همچنین عملکرد مناسب روش بهینه‌سازی مسابقه طناب کشی، یک کنترل کننده ترکیبی جدید ارائه می‌شود.

مهمترین نوآوری این تحقیق در این است که با استفاده از ترکیب یک الگوریتم موثر بهینه‌سازی با روش فازی به یک الگوریتم کنترل کننده فعال برسیم که بتواند پاسخ سازه را در برابر زلزله های مختلف به شکل مطلوبی کاهش دهد. تحقیق شامل بخش‌های زیر است: فرمول‌بندی دینامیکی پل بزرگراه پنج‌مارک در بخش دوم بیان می‌شود. جزئیات روش بهینه‌سازی مسابقه طناب کشی در بخش سوم ارائه می‌گردد. مدل‌سازی کنترل کننده عصبی- فازی پیشنهادی در بخش چهارم شرح داده می‌شود. تفسیر و نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی بر روی سازه پل، همچنین بیان دست‌آوردهای کلیدی این تحقیق در بخش پنجم به‌طور کامل ارائه می‌گردد و در بخش انتهایی نتیجه‌گیری تحقیق ذکر خواهد شد.

۲- پل بزرگراه مبنا

طرح شماتیک سازه پل پنج‌مارک در نظر گرفته‌شده در این پژوهش در شکل ۱ نشان داده‌شده است (آگراوال [۲۴]). مدل سازه بعد از ساخت پل بزرگراه ۹۱/۵ متری در ایالت کالیفرنیا ایجاد شد. این پل دارای تیر اصلی با مقطع باکس و از نوع بتنی پیش‌تنیده می‌باشد. با توجه به موقعیت قرارگیری پل پیش‌بینی می‌شود تحت تحریکات شدید میدان نزدیک قرار گیرد. در زمان ساخت اولیه این پل، سیستم جداگر لرزه‌ای پایه برای آن در نظر گرفته نشده بود. به جهت بهبود عملکرد لرزه‌ای آن، در هر یک از دو تکیه‌گاه شرقی و غربی آن تعداد ۴ عدد جداگر لرزه‌ای اضافه شد. در فاز ۲ مطالعات، عرشه پل نیز از ستون‌های میانی آن، به‌وسیله یک جداگر در هر ستون جدا شد. در تحقیق پیش‌رو مدل فاز ۱ مطالعات پنج‌مارک در نظر گرفته شده است. اثرات اندرکنش سازه و خاک در تکیه‌گاه‌های کناری با استفاده از فنرهای خطی و میراگرهای ویسکوز به مدل اضافه شده است. رفتار ستون‌های میانی به‌صورت غیرخطی مدل شده است که خود باعث غیرخطی شدن رفتار سازه پل می‌شود. با توجه به اینکه تمرکز ارائه مطالب در این تحقیق بر روی ارائه روش پیشنهادی کنترلی فازی بهینه‌شده با روش مسابقه طناب کشی است به خوانندگان توصیه می‌شود به‌منظور آشنایی با جزئیات مدل‌سازی سازه پل پنج‌مارک به مقاله آگراوال [۱۶] مراجعه نمایند.

مدل المان محدود پل دارای ۴۳۰ درجه آزادی است. رفتار غیرخطی سازه مربوط به رفتار ستون‌ها و جداگرهای لرزه‌ای است. رابطه ممان - انحنا در دو ستون میانی به‌وسیله منحنی هیستریسیس دوخطی مدل می‌شود. سایر روابط نیرو - جابجایی نظیر نیروی محوری، برش و پیچش به‌صورت خطی فرض می‌شوند. برای مدل کردن رفتار غیرخطی مصالح در ستون‌ها یک مدل پلاستیسیته متمرکز استفاده می‌شود.



شکل ۱: نمایش پلان و مقطع پل بزرگراه بنج‌مارک [۱۶].

معادلات حرکت که برای روابط کنترل‌گر استفاده می‌شود، در هر دو جهت عمود بر هم به صورت رابطه (۱) در نظر گرفته می‌شود:

$$M \Delta \ddot{U}(t) + C \Delta \dot{U}(t) + K(t) \Delta U(t) = M \eta \Delta \ddot{U}_g(t) + b \Delta F(t) \quad (1)$$

در حالی که ΔU بردار جابجایی، \ddot{U}_g بردار شتاب‌های زمین، $\Delta F(t)$ بردار نموی نیروی کنترلی است. در این رابطه η و b بردار موقعیت نیروی اعمالی برای به ترتیب شتاب زمین و نیروهای کنترلی می‌باشند. M ماتریس جرم می‌باشد. ماتریس سختی سازه $K(t)$ از ترکیب قسمت خطی K_L و قسمت غیرخطی $K_N(t)$ تشکیل شده است. رابطه (۱) در این تحقیق با استفاده از روش انتگرال‌گیری نیومارک حل شده است.

ابزارهای کنترلی فعال در این تحقیق به صورت محرک‌های هیدرولیکی ایده‌آل مدل می‌شوند. این‌طور فرض می‌شود که محرک‌های ایده‌آل قادرند نیروی کنترلی مورد نیازی را که به وسیله الگوریتم کنترلی دریافت می‌کنند بدون درنگ و با دقت کامل به سازه اعمال کنند.

۳- روش بهینه‌سازی مسابقه طناب‌کشی [۲۳]

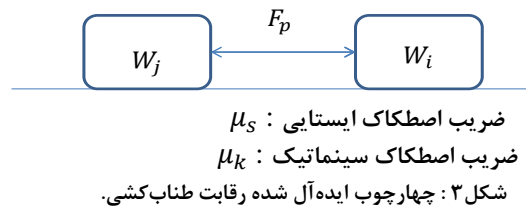
۳-۱- چهارچوب ایده‌آل‌سازی شده مسابقه طناب‌کشی

مسابقه طناب‌کشی یک رقابت قدرت در کشش طناب است. دو تیم رقابت کننده تلاش می‌کنند تا با کشش طناب آن را به سمت خود بیاورند. به‌طور طبیعی حرکت تیم ضعیف‌تر، حرکت طناب را باعث می‌شود. یک رقابت طناب‌کشی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: نمایش یک رقابت طناب‌کشی [۲۳].

یک چهارچوب ایده‌آل برای این روش با تعریف تیم‌ها به صورت دو جسم با وزن‌های w_i و w_j که بر روی یک زمین صاف قرار گرفته‌اند ساخته می‌شود. شکل ۳ چهارچوب تعریف شده را نشان می‌دهد.



در نتیجه کشش طناب، دو نیروی برابر و مخالف جهت F_p بر طبق قانون سوم نیوتن به تیم‌ها وارد می‌شود. تا زمانی که نیروی کشش برای جسم i کمتر از ماکزیمم نیروی اصطکاک ایستایی $W_i \mu_s$ باشد، آن جسم در مکان اولیه خود باقی می‌ماند. در غیر این صورت نیروی برآیند مقداری غیر صفر خواهد داشت که طبق رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$F_r = F_p - W_i \mu_k \quad (2)$$

در نتیجه طبق قانون دوم نیوتن، جسم i به سمت جسم j با شتابی مطابق رابطه (۳) حرکت می‌کند:

$$a = \frac{F_r}{(W_i/g)} \quad (3)$$

از آنجا که سرعت جسم i در ابتدای حرکت صفر در نظر گرفته می‌شود، مکان جدید آن طبق رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$X_{i,new} = \frac{1}{2} a t^2 + X_{i,old} \quad (4)$$

۳-۲- الگوریتم بهینه‌سازی

هر کاندید جواب $X_i = \{x_{i,j}\}$ در الگوریتم بر پایه جمعیت مسابقه طناب‌کشی به‌عنوان یک تیم در یک مجموعه رقابت در نظر گرفته می‌شود. وزن تیم بر مبنای کیفیت پاسخ آن و نیروی کشش یک تیم در رقابت به‌عنوان مضربی از وزن آن در نظر گرفته می‌شود. تیم سبک‌تر به سمت تیم سنگین‌تر حرکت می‌کند و بدین ترتیب عملگر همگرایی الگوریتم شکل می‌گیرد. در ادامه مراحل گام‌به‌گام این الگوریتم شرح داده می‌شود:

• گام اول - شروع الگوریتم

یک جمعیت از جواب‌های اولیه به صورت رندم انتخاب می‌شود. رابطه (۵) نحوه این انتخاب را تشریح می‌کند:

$$x_{ij}^0 = x_{j,min} + rand(x_{j,max} - x_{j,min}) \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

در حالی که x_{ij}^0 مقدار اولیه متغیر j از کاندید جواب i است. $x_{j,min}$ و $x_{j,max}$ مقادیر مجاز برای کران بالا و پایین برای متغیر j می‌باشند. $rand$ یک عدد رندم از یک توزیع یکنواخت در بازه $[0,1]$ است. n تعداد متغیرهای بهینه‌سازی است.

• گام دوم - ارزیابی کاندیدها و اختصاص وزن

مقادیر تابع هدف برای کاندیدهای جواب ارزیابی می‌گردند. پاسخ‌های اولیه مرتب شده و در یک حافظه با عنوان لیگ ذخیره می‌شوند. وزن هر کاندید جواب با رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$W_i = \left(\frac{fit(i) - fit_{worst}}{fit_{best} - fit_{worst}} \right) + 1 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

در حالی که $fit(i)$ مقدار تابع هدف برای ذره i ام خواهد بود. fit_{best} و fit_{worst} مقادیر هدف برای بهترین و بدترین جواب کاندید در مرحله فعلی می‌باشند. طبق رابطه (۶) مقدار وزن یک تیم بین ۱ تا ۲ متغیر است.

• گام سوم - رقابت و جابجایی

هرکدام از تیم‌های حاضر در لیگ با سایر تیم‌ها به صورت تک به تک در هر مرحله تکرار رقابت می‌کنند تا به مکان جدید خود حرکت کنند. نیروی کشش اعمال شده توسط یک تیم برابر با نیروی اصطکاک ایستایی آن است ($W\mu_s$). بنابراین ماکزیمم نیروی کششی که می‌تواند بین دو تیم i و j وجود داشته باشد ($F_{p,ij}$) می‌تواند به عنوان ماکزیمم دو مقدار $\{W_i\mu_s, W_j\mu_s\}$ محاسبه شود. چنین تعریفی جایگاه تیم سنگین‌تر را ثابت نگاه می‌دارد. زمانی که تیم i با تیم سنگین‌تر j در k امین تکرار روبرو می‌شود، نیروی برآیند می‌تواند با رابطه (۷) محاسبه شود:

$$F_{r,ij}^k = F_{p,ij}^k - W_i^k \mu_k \quad (7)$$

در نتیجه تیم i به سمت تیم j با رابطه (۸) شتاب می‌گیرد:

$$a_{ij}^k = \left(\frac{F_{r,ij}^k}{W_i^k \mu_k} \right) g_{ij}^k \quad (8)$$

در حالی که a_{ij}^k شتاب تیم i به سمت تیم j در k امین تکرار است. g_{ij}^k ثابت شتاب گرانش است که به صورت رابطه (۹) تعریف می‌شود:

$$g_{ij}^k = X_j^k - X_i^k \quad (9)$$

در حالی که X_i^k و X_j^k بردارهای موقعیت برای کاندیدهای پاسخ i و j در k امین تکرار می‌باشند. در نهایت پس از رقابت دو تیم i و j ، جابجایی تیم i با رابطه (۱۰) می‌تواند محاسبه شود:

$$\Delta X_{ij}^k = \frac{1}{2} a_{ij}^k \Delta t^2 + \alpha^k \beta (X_{max} - X_{min}) \circ \text{randn}(1, n) \quad (10)$$

ترم دوم در رابطه (۱۰) به عنوان بخش رندم الگوریتم در نظر گرفته می‌شود. نقش α^k این است که به تدریج اثر بخش رندم را در حرکت تیم کاهش دهد. α برای کاربردهای معمول می‌تواند به عنوان یک مقدار ثابت از بازه [۰/۹۹/۰/۹۰] انتخاب شود. هرچه مقدار بزرگ‌تری برای α انتخاب شود، سرعت همگرایی الگوریتم کاهش می‌یابد اما فضای مسأله به صورت دقیق‌تری توسط کاندیدها جست‌وجو می‌شود. β به عنوان یک فاکتور مقیاس از بازه [۰ ۱] می‌تواند انتخاب شود. گام‌های کاندیدهای پاسخ هنگام حرکت در بازه جست‌وجو به وسیله این پارامتر کنترل می‌شود. زمانی که نیاز به جست‌وجوی فضای مسأله با گام‌های کوچک‌تر وجود داشته باشد، توصیه می‌شود مقادیر کوچک‌تری برای این پارامتر انتخاب گردد. X_{min} و X_{max} مقادیر کران بالا و پایین متغیرهای طراحی هستند.

نهایتاً جابجایی کلی تیم i در مرحله تکرار k ام، با رابطه (۱۱) بیان می‌شود (i نامساوی زاست):

$$\Delta X_i^k = \sum_{j=1}^N \Delta X_{ij}^k \quad (11)$$

بنابراین در انتهای تکرار k ام، موقعیت جدید تیم i با رابطه (۱۲) به دست می‌آید:

$$X_i^{k+1} = X_i^k + \Delta X_i^k \quad (12)$$

• گام چهارم - بهروزرسانی لیگ

بعد از اینکه یک دور رقابت کامل بین همه تیم‌ها انجام شد، بهروزرسانی لیگ می‌بایست با مقایسه میان تیم‌های فعلی لیگ و کاندیدهای جدید پاسخ انجام شود. هرکدام از کاندیدهای جدید یا N امین تیم لیگ که مقدار ضعیف‌تری را در تابع هدف کسب کرده است از دور رقابت حذف می‌شود.

• گام پنجم - اعمال قیود مرزی

می‌بایست برای زمانی که یک کاندید جواب از فضای حل مسأله خارج می‌شود یک‌راه حل مناسب داشته باشیم. این موقعیت معمولاً زمانی رخ می‌دهد که برای یک تیم ضعیف‌تر مقداری بزرگ دارد. در این مقاله از روش بهترین جواب کلی^۱ استفاده شده است. در مرحله تکرار k ام برای تعریف یک مقدار جدید برای i امین متغیر بهینه‌سازی از i امین تیم که از حدود مرزی بازه جست‌وجو عبور کرده است، می‌توان از رابطه (۱۳) استفاده کرد:

$$x_{ij}^k = GB_j + \left(\frac{randn}{k}\right)(GB_j - x_{ij}^{k-1}) \quad (13)$$

در حالی که GB_j متغیر j ام از بهترین جواب کلی که تاکنون به دست آمده است می‌باشد.

گام ششم - خاتمه الگوریتم

تا زمانی که الگوریتم به یک معیار خاتمه موردنظر نرسیده است، گام‌های ۲ تا ۵ می‌بایست تکرار گردد.

۴- مدل‌سازی کنترل‌گر عصبی - فازی بهینه‌شده

کنترل‌کننده عصبی فازی طراحی شده خود از دو بخش اصلی تشکیل می‌شود:

دو کنترل‌کننده ANFIS بهینه‌شده داخلی، یکی به منظور کنترل رفتار لرزه‌ای پل تحت زمین‌لرزه‌های میدان دور با نام F_ANFIS و دیگری به منظور کنترل رفتار لرزه‌ای پل تحت زمین‌لرزه‌های میدان نزدیک با نام N_ANFIS.

۴-۱- ناظر زمین - لرزه

یکی از مواردی که رفتار لرزه‌ای سازه‌ها را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد ماهیت میدان دور یا میدان نزدیک بودن زمین‌لرزه است. وجه تمایز زمین‌لرزه‌های میدان نزدیک با میدان دور مشخصاتی نظیر پالس‌های شدید سرعت و جابجایی با دوره تناوب طولانی است (ماوروئیدیز و همکاران [۲۵]). نظر به تفاوت‌های اساسی رفتار پل‌ها تحت زمین‌لرزه‌های میدان دور و میدان نزدیک کارایی سیستم کنترل نیز در این دو حالت متفاوت خواهد بود. با توجه به این مسئله یکی از راهکارهایی که می‌تواند به عملکرد سیستم کنترل کمک نموده و توان آن را برای کنترل پاسخ‌ها در هر دو حالت زمین‌لرزه بالا ببرد استفاده از ناظر زمین‌لرزه و کنترل‌کننده‌های جداگانه برای زمین‌لرزه‌های میدان دور و میدان نزدیک است.

¹ The global best answer method

در حقیقت وظیفه ناظر این است که در ابتدا تشخیص دهد زلزله وارده به سازه میدان دور است یا میدان نزدیک و سپس بسته به نوع زمین لرزه پاسخ‌های کنترل‌کننده مطلوب را انتخاب نماید و مشخص کند که کدامیک از کنترل‌کننده‌های ANFIS داخلی می‌بایست در محاسبه نیروی محرک‌های فعال سهم باشند.

در این پژوهش سرعت زمین به‌عنوان وجه تمایز زمین‌لرزه‌های میدان نزدیک و میدان دور انتخاب می‌گردد. لذا با قرار دادن دو شتاب‌سنج در محل پی کوله‌های پل، شتاب زمین در جهت عمود بر هم اندازه‌گیری شده و با انتگرال‌گیری از آن، سرعت زمین در دو جهت محاسبه می‌گردد. سپس قدر مطلق مقادیر سرعت حرکت زمین در ۳ ثانیه اخیر اعمال زمین‌لرزه در هر دو جهت ذخیره‌شده، بیشینه سرعت ثبت‌شده در ۳ ثانیه اخیر به‌عنوان پارامتر مشخص‌کننده میزان میدان دور یا میدان نزدیک بودن زلزله در اختیار ناظر زمین‌لرزه قرار می‌گیرد. گفتنی است در نظر گرفتن بیشینه قدر مطلق سرعت رخ داده در ۳ ثانیه اخیر بدان جهت است که عموماً تأثیر پالس سرعت در رفتار سازه کمی با تأخیر بروز می‌کند.

با تعریف دو تابع عضویت فازی Z شکل و S شکل که ورودی آن بیشینه سرعت تحریک زمین در ۳ ثانیه اخیر است سهم هر کنترل‌کننده داخلی در محاسبه میزان نیروی محرک‌ها تعیین می‌گردد. بر این مبنا تابع فازی Z شکل با نام FF، مربوط به زلزله‌های میدان دور بوده و درجه عضویت سرعت ماکزیمم در این تابع معرف سهم کنترل‌کننده داخلی بهینه‌شده برای زمین‌لرزه‌های میدان دور در تعیین نیرو است. همچنین درجه عضویت سرعت ماکزیمم در توابع فازی S شکل با نام NF که مربوط به زلزله‌های میدان نزدیک است سهم کنترل‌کننده داخلی بهینه‌شده برای زمین‌لرزه‌های میدان نزدیک در تعیین نیروی محرک را معین می‌کند. برای این منظور نیروی هر محرک از رابطه (۱۴) به دست می‌آید:

$$F = \frac{w_N F_N + w_F F_F}{w_N + w_F} \quad (14)$$

در این رابطه F نیروی نهایی محاسبه شده توسط ناظر زمین‌لرزه، F_N نیروی به دست آمده از کنترل‌کننده بهینه شده برای زلزله-های میدان نزدیک، F_F نیروی به دست آمده از کنترل‌کننده بهینه شده برای زلزله‌های میدان دور، w_N وزن مشخص‌کننده میزان میدان نزدیک بودن زلزله که درجه عضویت سرعت ورودی به ناظر در تابع فازی NF است و w_F نیز وزن مشخص‌کننده میزان میدان دور بودن زلزله است که برابر با درجه عضویت سرعت ورودی به ناظر در تابع فازی FF در نظر گرفته می‌شود.

با توجه بررسی‌های جنگید و کلی [۲۶] معمولاً در زلزله‌های میدان نزدیک بیشینه سرعت حرکت زمین به حدود ۰٫۵ متر بر ثانیه می‌رسد بر این اساس توابع فازی NF و FF به‌گونه‌ای تعریف می‌گردند که:

۱- در سرعت ۰٫۵ درجه عضویت در هر دو تابع ۰٫۵ شود به‌عبارت‌دیگر به ازای سرعت مذکور سهم هر یک از دو کنترل‌کننده داخلی از تعیین نیرو ۵۰٪ باشد.

۲- به ازای سرعت‌های کمتر از ۰٫۴۲۵ زمین‌لرزه کاملاً میدان دور در نظر گرفته شود.

۳- به ازای سرعت‌های بیشتر از ۰٫۵۷۵ زمین‌لرزه کاملاً میدان نزدیک در نظر گرفته شود.

لازم به ذکر است ناظر زمین‌لرزه طراحی شده برای دو امتداد موازی با راستای طولی پل و عمود بر راستای طولی پل جداگانه عمل می‌کند. به عبارت دیگر تعیین سهم هر یک از کنترل‌کننده‌های داخلی در محاسبه ولتاژ بر مبنای رابطه (۱۴) برای هر یک از جهت‌ها به‌صورت مجزا صورت می‌گیرد.

۲-۴- ورودی‌ها

با توجه به اینکه تعداد زیاد ورودی‌ها از یک‌سو پیچیدگی سیستم را زیاد کرده و یافتن حالت بهینه را مشکل می‌نماید و از سوی دیگر الزاماً سبب پاسخ‌های مناسب‌تر کنترل‌کننده نخواهد شد لذا انتخاب تعداد زیاد ورودی کار مفیدی به نظر نمی‌رسد. از این‌رو برای کنترل‌کننده مورد نظر خود تعداد ۲ ورودی در نظر می‌گیریم که عبارت‌اند از:

۱- شتاب نرمال شده که با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده به وسیله شتاب‌سنج‌ها محاسبه می‌گردد. با توجه به اینکه مقادیر ثبت‌شده توسط شتاب‌سنج‌ها پس از عبور از مبدل A/D مقداری بین ۱۰- تا ۱۰+ برحسب ولت دارد با ضرب این مقادیر در شتاب نرمال شده به‌عنوان اولین ورودی کنترل‌کننده در بازه [۱- ۱] به دست می‌آید.

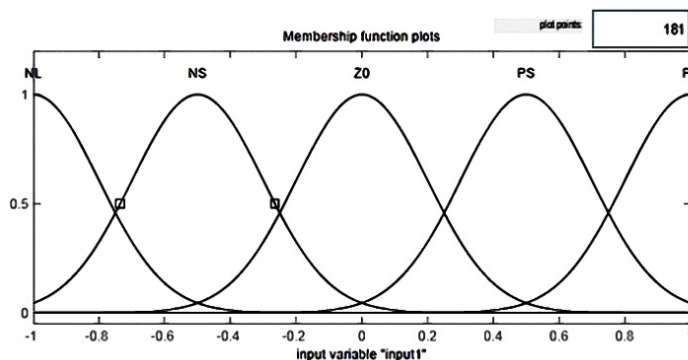
۲- جابجایی نرمال شده که با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده به وسیله جابجایی‌سنج‌ها محاسبه می‌گردد. با توجه به اینکه مقادیر ثبت‌شده توسط جابجایی‌سنج‌ها پس از عبور از مبدل A/D مقداری بین ۱۰- تا ۱۰+ برحسب ولت دارد با ضرب این مقادیر در ۰/۱ جابجایی نرمال شده به‌عنوان دومین ورودی کنترل‌کننده ANFIS در بازه [۱- ۱] به دست می‌آید.

۳-۴- توابع عضویت ورودی

برای هر یک از ورودی‌های کنترل‌کننده ANFIS داخلی ۶ تابع عضویت گوسی در نظر گرفته می‌شود. پارامترهای این توابع ثابت بوده و قابل تنظیم نیستند. مقادیر پارامترهای تابع عضویت مورد استفاده در جدول ۱ و نمودار توابع در شکل ۴ به تصویر کشیده شده است.

جدول ۱: پارامترهای توابع عضویت ورودی.

	NL	NS	ZO	PS	PL
σ	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲
C	-۱/۰	-۰/۵	۰/۰	۰/۵	۱/۰



شکل ۴: توابع عضویت ورودی کنترل‌کننده ANFIS (جابجایی یا شتاب نرمال شده).

۴-۴- توابع عضویت خروجی

خروجی کنترل‌کننده، ولتاژ نرمال شده در بازه [۰ ۱] است که از ضرب آن در حداکثر نیروی قابل اعمال به محرک‌های مورد استفاده (۱۰۰ KN)، نیروی مورد نیاز برای هر محرک محاسبه می‌گردد. هر یک از شبکه‌های ANFIS مورد استفاده در کنترل‌کننده از ۳۶ تابع نتیجه خطی تشکیل شده است. مقادیر پارامترهای این توابع برای هر یک از کنترل‌کننده‌های داخلی پس از بهینه‌سازی توسط الگوریتم به دست می‌آید.

۴-۵- بهینه‌سازی کنترل‌کننده‌های ANFIS داخلی

بهینه‌سازی هر یک از کنترل‌کننده‌های ANFIS داخلی توسط الگوریتم بهینه‌سازی و از طریق تنظیم پارامترهای توابع نتیجه انجام می‌گیرد.

۱-۵-۴- تابع هدف

برای تنظیم پارامترها و بهینه نمودن کارایی کنترل کننده مورد نظر می‌بایست مدل عددی پل بزرگراه با اعمال سیستم کنترل پیشنهادی بر آن، تحت زمین لرزه‌های خاص قرار گرفته و به‌عنوان تابع شایستگی کد نویسی شود. مسئله حائز اهمیت انتخاب شتاب‌نگاشتی به‌عنوان زلزله میدان دور برای بهینه‌سازی کنترل کننده داخلی F_ANFIS و به‌طور مشابه انتخاب شتاب‌نگاشتی به‌عنوان زلزله میدان نزدیک برای بهینه‌سازی کنترل کننده داخلی N_ANFIS است به‌گونه‌ای که کنترل کننده‌های داخلی به ترتیب تحت زمین لرزه‌های میدان دور و میدان نزدیک بهترین عملکرد ممکن را داشته باشند. برای این منظور در این پژوهش به‌صورت زیر عمل می‌شود:

برای بهینه نمودن پاسخ‌های کنترل کننده داخلی F_ANFIS به‌عنوان زمین لرزه میدان دور، ۴ شتاب‌نگاشت شامل زلزله‌های السنترو با ضرایب ۱ و ۱/۵ و نورس پالم اسپرینگز با ضرایب ۱، ۱/۵، انتخاب گردیده و عملیات بهینه‌سازی و تنظیم پارامترها برای هر کدام از این شتاب‌نگاشت‌ها جداگانه صورت می‌گیرد. نهایتاً کنترل کننده بهینه‌شده‌ای که بهترین عملکرد را در زلزله‌های میدان دور داشته باشد انتخاب می‌گردد. برای بهینه نمودن پاسخ‌های کنترل کننده داخلی عنوان زمین لرزه میدان نزدیک N_ANFIS دو شتاب‌نگاشت شامل زلزله نورتریج با ضرایب ۱ و ۱/۵، انتخاب گردیده، عملیات بهینه‌سازی و تنظیم پارامترها برای هر کدام از این شتاب‌نگاشت‌ها جداگانه صورت می‌گیرد. نهایتاً کنترل کننده بهینه‌شده‌ای که بهترین عملکرد را در زلزله‌های میدان نزدیک داشته باشد انتخاب می‌گردد. از آنجاکه هدف بهبود پاسخ‌های لرزه‌های پل با اولویت کاهش برش پایه است و نظر به تأثیر شتاب پل بر برش پایه آن، خروجی تابع شایستگی می‌بایست یا بیشینه برش پایه پل (J1) و یا بیشینه شتاب آن (J4) در نظر گرفته شود. به این منظور برای هر یک از شتاب‌نگاشت‌های در نظر گرفته شده برای بهینه‌سازی خروجی تابع شایستگی یک‌بار معیار مربوط به بیشینه برش پایه و بار دیگر معیار مربوط به بیشینه شتاب در نظر گرفته می‌شود. مشخصات رکورد زلزله انتخاب شده در جدول ۲ بیان شده است.

جدول ۲: مشخصات شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده جهت طراحی کنترل کننده و تحلیل سازه.

Earthquake Name	Station Name	D5-75(s)	D5-95(s)	Vs30(m/s)	Year
Northridge-01	LA - Chalon Rd	۵/۶	۹/۰	۷۴۰/۰۵	۱۹۹۴
Turkey	Istanbul	۱۸/۰	۳۸/۰	۵۹۵/۰	۱۹۹۹
Kobe	Morigawachi	۱۷/۵	۵۵/۲	۲۵۶	۱۹۹۵
ChiChi	CHY050	۲۳/۶	۳۹/۵	۵۳۸/۹۳	۱۹۹۹
NorthPalm Spr.	San Jacinto	۲۴	۲۸	۴۲۵	۱۹۸۶
El Centro	El Centro Array	۲۱/۳	۲۴	۴۸۶	۱۹۴۰

۲-۵-۴- تنظیمات الگوریتم بهینه‌سازی

به‌طور معمول توابع خروجی انفیس از درجه صفر یا یک هستند. در این تحقیق توابع خروجی خطی به شکل رابطه (۱۵) در کنترل گر انفیس استفاده شده است:

$$f_i = p_i x + q_i y + r_i, \quad i = 1, 2, \dots, 36 \quad (15)$$

x اولین ورودی شبکه عصبی (شتاب نرمال شده) و y دومین ورودی (جابجایی نرمال شده) آن است. p، q و r پارامترهای تابع خروجی i ام هستند. این پارامترها نقش تیم‌های رقابت کننده در الگوریتم بهینه‌سازی معرفی شده را دارند.

۵- مقایسه نتایج روند بهینه‌سازی در حالت‌های مختلف

با مقایسه‌ای میان حالات مختلف مشخص می‌گردد که کنترل‌کننده بهینه‌شده تحت شتاب‌نگاشت زلزله پالم اسپرینگ با ضریب ۱/۵ و بر اساس کمینه نمودن معیار J1 (نسبت ماکزیمم برش پایه سازه کنترل شده به سازه کنترل نشده)، علاوه بر موفقیت بیشتر نسبت به سایر حالات در کاهش معیار مربوط به شتاب پایه تحت زمین‌لرزه‌های میدان دور، معیارهای مربوط به تغییر مکان میانه پل و تغییر شکل جداسازها را نیز به نحو مطلوبی کاهش داده است. لذا از پارامترهای این کنترل‌کننده به‌عنوان پارامترهای توابع نتیجه کنترل‌کننده F_ANFIS استفاده می‌گردد. جدول ۳ حالت‌های مختلف بهینه‌سازی برای کنترل‌گر داخلی میدان دور F_ANFIS را نشان می‌دهد. در این جدول J3 (نسبت ماکزیمم جابجایی وسط دهانه)، J4 (نسبت ماکزیمم شتاب وسط دهانه) و J5 (نسبت ماکزیمم تغییر شکل جداگر) می‌باشد. همچنین شکل ۵ روند این بهینه‌سازی را نشان می‌دهد.

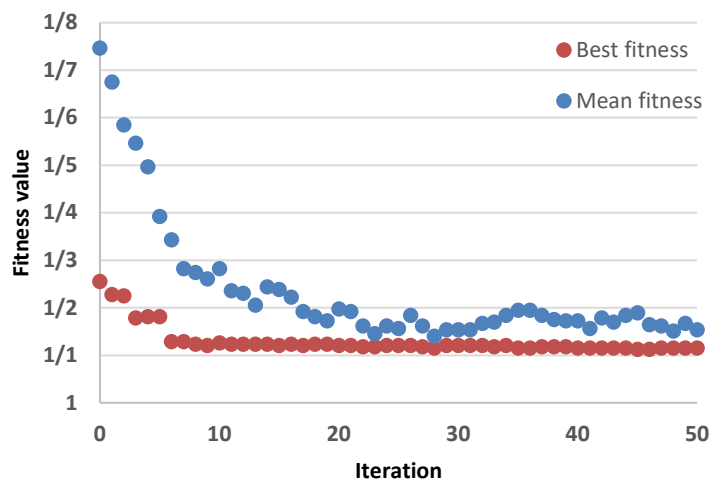
با مقایسه میان حالات مختلف مشخص می‌گردد که کنترل‌کننده بهینه‌شده تحت زلزله نورتریج با ضریب ۱/۵ و بر اساس کمینه نمودن معیار J1، در کاهش معیارهای مربوط به شتاب پایه، تغییر مکان میانه پل و تغییر شکل جداسازها تحت زمین‌لرزه‌های میدان نزدیک نسبت به سایر حالات موفق‌تر بوده لذا بر اساس آن پارامترهای توابع نتیجه کنترل‌کننده N_ANFIS تعیین می‌گردد. جدول ۴ حالت‌های مختلف بهینه‌سازی برای کنترل‌گر داخلی میدان دور N_ANFIS را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۶ روند این بهینه‌سازی را نشان می‌دهد.

جدول ۳: مینیمم معیارهای J1، J3، J5 در زلزله میدان دور، برای حالت‌های مختلف بهینه‌سازی کنترل‌کننده F_ANFIS

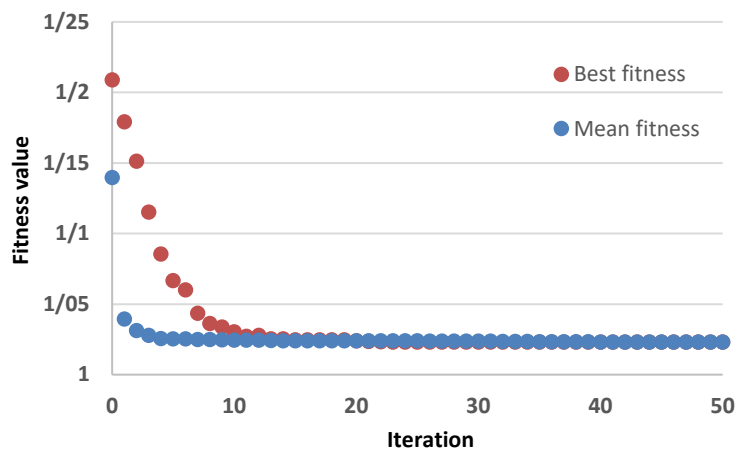
زلزله	بهینه‌سازی با مینیمم کردن معیار J1				بهینه‌سازی با مینیمم کردن معیار J4			
	السنتره ×۱	السنتره ×۱/۵	نورث پالم اسپرینگ ×۱	نورث پالم اسپرینگ ×۱/۵	السنتره ×۱	السنتره ×۱/۵	نورث پالم اسپرینگ ×۱	نورث پالم اسپرینگ ×۱/۵
J1	۱/۱۱۹۸	۱/۱۱۵۳	۰/۸۹۴۲	۰/۸۸۶۷	۱/۱۳۳۶	۱/۱۲۹۵	۰/۸۸۹۵	۰/۹۴۵۹
J3	۰/۶۱۵۳	۰/۵۲۳۵	۰/۸۸۵۶	۰/۸۱۷۱	۰/۵۹۸۳	۰/۵۴۶۷	۰/۸۷۶۳	۰/۵۸۴۳
J5	۰/۳۵۸۶	۰/۲۶۸۴	۰/۶۱۲۵	۰/۵۹۲۸	۰/۳۳۴۷	۰/۲۷۲۳	۰/۵۸۲۶	۰/۶۳۷۲

جدول ۴: مینیمم معیارهای J1، J3، J5 در زلزله میدان نزدیک، برای حالت‌های مختلف بهینه‌سازی کنترل‌کننده N_ANFIS

زلزله	بهینه‌سازی با مینیمم کردن معیار J1		بهینه‌سازی با مینیمم کردن معیار J4	
	نورتریج ×۱	نورتریج ×۱/۵	نورتریج ×۱	نورتریج ×۱/۵
J1	۰/۷۳۲۱	۰/۷۱۲۵	۰/۷۴۶۶	۰/۷۳۸۹
J3	۰/۳۹۸۸	۰/۳۸۴۶	۰/۴۰۳۸	۰/۶۰۸۹
J5	۰/۳۸۳۳	۰/۳۶۴۴	۰/۳۹۵۷	۰/۴۷۸۲



شکل ۵: روند بهینه‌سازی کنترل‌کننده F_ANFIS تحت زلزله نورث پالم اسپرینگ با ضریب ۱/۵ و معیار J1.



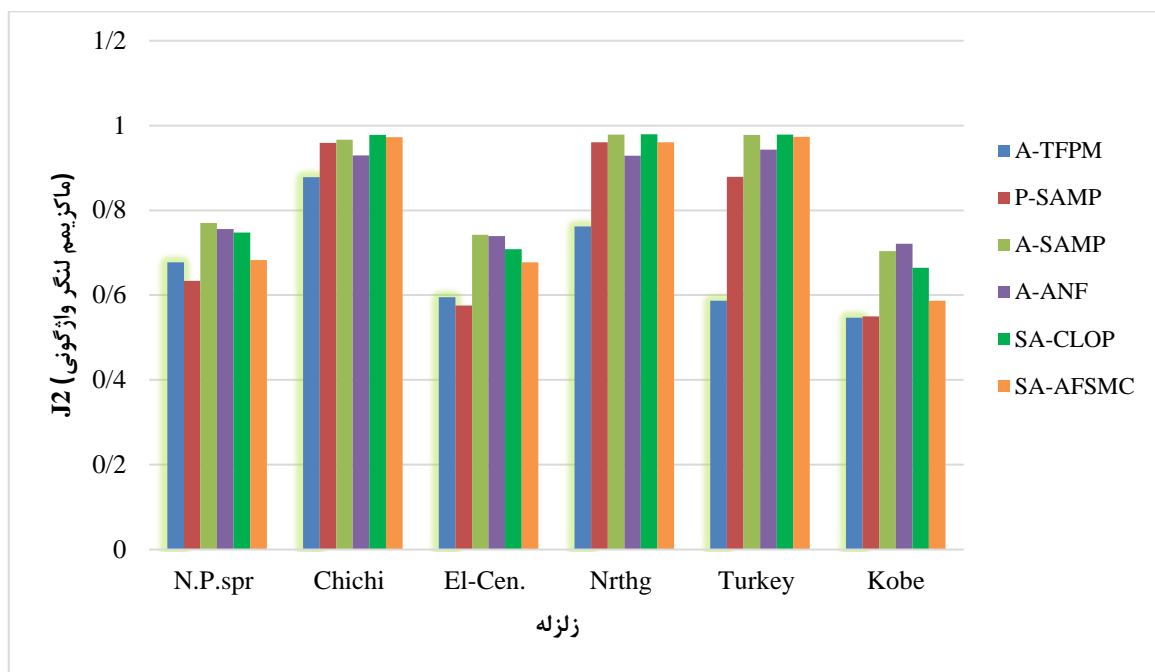
شکل ۶: روند بهینه‌سازی کنترل‌کننده N_ANFIS تحت زلزله نورتریج با ضریب ۱/۵ و معیار J1.

بعد از آنالیز سازه پل با استفاده از الگوریتم کنترلی ارائه شده با ضرایب بیان شده در جداول ۳ و ۴، پاسخ‌های مختلف آن طبق معیارهای تعریف شده در مقاله آگراوال و همکاران [۱۶] نسبت به پاسخ‌های مشابه سازه در زمانی که هیچ نوع ابزار کنترلی در مورد آن به کار نرفته است مقایسه می‌گردد. در جدول ۵ شاخص پاسخ‌های سازه کنترل شده با الگوریتم کنترلی ترکیبی پیشنهادی در برابر زلزله‌های مختلف بیان شده است. همچنین در هر کدام از شکل‌های ۷ و ۸ یک شاخص به‌عنوان نمونه از مجموعه پاسخ‌های سازه کنترل شده با روش پیشنهادی در مقابل روش‌های موجود در تحقیقات گذشته و زلزله‌های مختلف مقایسه شده است.

جدول ۵: نتایج الگوریتم کنترل پیشنهادی.

میانگین	کوبه Kobe	ترکیه Turkey	نورتریج Northridge	السنترو El Centro	چای چی ChiChi	نورث پالم - اسپرینگ N.P.Spr	زلزله (معیار)
۰/۷۰۳	۰/۸۹۲	۰/۶۳۴	۰/۷۱۲	۰/۶۷۸	۰/۵۷۸	۰/۹۲۵	ماکزیمم برش پایه J1:
۰/۶۷۴	۰/۵۴۷	۰/۵۷۸	۰/۷۶۲	۰/۵۹۵	۰/۸۷۸	۰/۶۷۷	ماکزیمم لنگر J2:
۰/۶۳۹	۰/۵۹۷	۰/۶۴۴	۰/۵۴۶	۰/۶۶۷	۰/۷۰۱	۰/۶۸۴	ماکزیمم جابجایی وسط دهانه: J3:
۰/۸۵۲	۰/۸۲۲	۰/۸۱۲	۰/۷۸۳	۰/۷۸۸	۰/۹۱۲	۰/۹۹۷	ماکزیمم شتاب وسط دهانه: J4:
۰/۵۳۷	۰/۴۵۱	۰/۵۹۴	۰/۵۱۴	۰/۵۶۳	۰/۵۵۴	۰/۵۴۶	ماکزیمم تغییر شکل جداگر J5:
۰/۴۶۱	۰/۵۴۹	۰/۱۲۸	۰/۳۴۷	۰/۵۷۶	۰/۵۱۷	۰/۶۴۷	ماکزیمم شکل پذیری J6:
۰/۰۴۳	۰/۰۰۰	۰/۰۵۰	۰/۱۲	۰/۰۰۰	۰/۰۸۷	۰/۰۰۰	انرژی اتلاف شده J7:
۰/۱۶۶	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۵۰۰	۰/۰۰۰	۰/۵۰۰	۰/۰۰۰	اتصال پلاستیک J8:
۰/۶۵۴	۰/۶۹۸	۰/۷۲۴	۰/۵۷۶	۰/۵۸۷	۰/۵۵۶	۰/۷۸۶	نرم برش پایه J9:
۰/۵۷۴	۰/۶۱۲	۰/۴۴۵	۰/۶۵۴	۰/۶۰۹	۰/۵۷۶	۰/۵۴۸	نرم لنگر J10:
۰/۵۳۸	۰/۶۳۲	۰/۵۱۴	۰/۴۷۳	۰/۵۱۴	۰/۴۸۷	۰/۶۱۱	نرم جابجایی وسط دهانه J11:
۰/۷۴۶	۰/۸۹۷	۰/۸۴۲	۰/۶۸۱	۰/۵۶۸	۰/۶۹۴	۰/۷۹۸	نرم شتاب وسط دهانه J12:
۰/۴۰۴	۰/۳۲۴	۰/۲۱۴	۰/۶۱۶	۰/۴۱۵	۰/۴۵۶	۰/۳۹۷	نرم تغییر شکل جداگر J13:
۰/۵۹۱	۰/۶۸۳	۰/۰۴۳	۱/۰۲۳	۰/۵۶۱	۰/۶۲۳	۰/۶۱۵	نرم شکل پذیری J14:
۰/۰۱۶	۰/۰۱۲	۰/۰۱۸	۰/۰۲۵	۰/۰۰۷	۰/۰۲۴	۰/۰۱۰	ماکزیمم نیروی کنترل J15:
۰/۵۱۳	۰/۴۵۶	۰/۵۹۸	۰/۴۵۲	۰/۵۲۸	۰/۵۳۵	۰/۵۱۳	ماکزیمم ضربه J16:
۰/۰۶۹	۰/۰۳۴	۰/۰۷۹	۰/۱۰۸	۰/۰۲۵	۰/۱۲۵	۰/۰۴۱	ماکزیمم توان J17:
۰/۰۱۵	۰/۰۳۴	۰/۰۱۵	۰/۰۱۴	۰/۰۰۴	۰/۰۱۷	۰/۰۱۰	توان کل J18:
۱۶	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶	تعداد ابزار کنترلی J19:
۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	تعداد سنسورها J20:
۱۶	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶	بعد منابع محاسباتی: J21:

¹ Computational resource



شکل ۷*: مقایسه نتایج کسب شده روش پیشنهادی با روش های ارائه شده در سایر تحقیقات از نظر معیار J2.

* نام گذاری روش های مختلف در شکل شماره ۷ برگرفته از نام کلی آن ها در مقاله ارائه شده، بوده است.

Active Tug of war Fuzzy Proposed Method

A-TFPM: روش کنترلی پیشنهادی در این مقاله.

Passive Sample control method

P-SAMP: روش کنترلی غیرفعال ارائه شده در مقاله تن [۱۷]

Active Sample control method

A-SAMP: روش کنترل فعال ارائه شده در مقاله تن [۱۷]

Active ANFIS controller

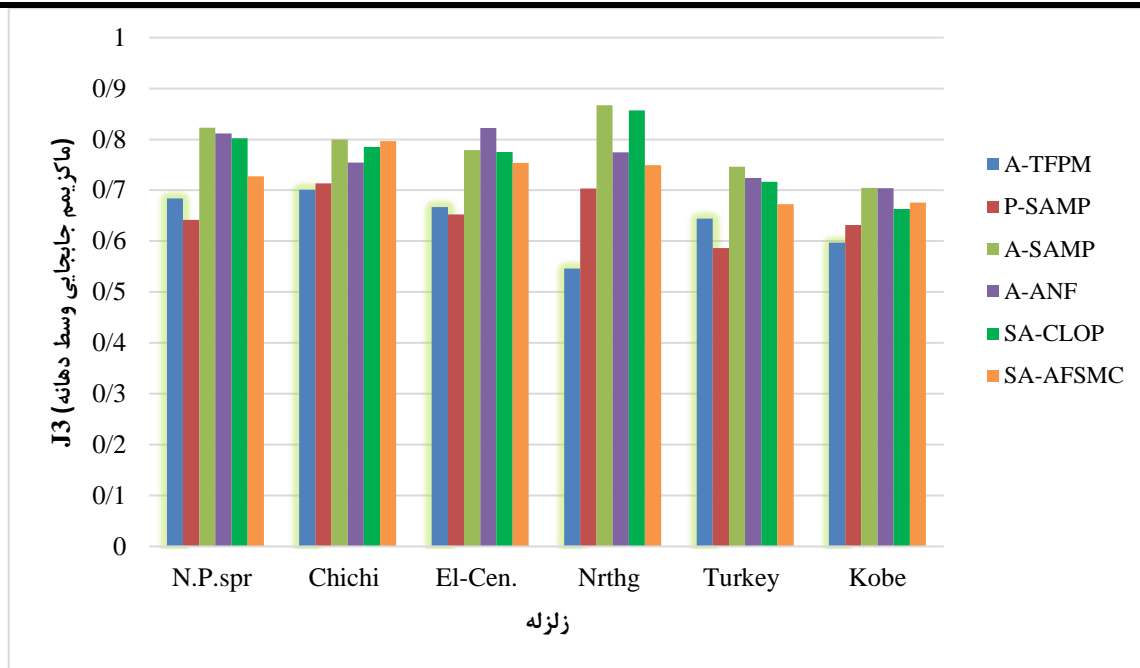
A-ANF: روش کنترل کننده شبکه عصبی فعال ارائه شده در مقاله علی [۲۷]

SA-AFSMC: روش کنترل مود لغزش فازی تطبیقی نیمه فعال ارائه شده در مقاله نینگ [۲۸]

Semi Active Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control

Semi Active Sample control method

SA-CLOP: روش نیمه فعال ارائه شده در مقاله تن [۱۷]



شکل ۸: مقایسه نتایج کسب شده روش پیشنهادی با روش‌های ارائه شده در سایر تحقیقات از نظر معیار J3.

- همان‌طور که در شکل‌های ۷ و ۸ و نیز جدول ۵ مشاهده گردید، روش کنترل پیشنهادی تأثیر چشم‌گیری بر کاهش اندیس‌های عملکردی پل داشته است. از جمله مهم‌ترین نتایج و دست‌آوردهای روش پیشنهادی می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:
- توانمندی بالای سیستم در کاهش برش پایه پل J1 تحت زلزله‌های مختلف که هدف اصلی کنترل بوده است، به گونه‌ای که به‌طور میانگین بیشینه برش پایه حدود ۳۰ درصد نسبت به حالت کنترل نشده کاهش نشان داده است. کمترین اثر در مورد زلزله کوبه و به میزان ۱۱ درصد بوده است. همچنین نرم برش پایه J9 نیز به‌طور میانگین حدود ۳۵ درصد کاهش نشان داده است.
 - توانمندی بالای سیستم در کاهش لنگر واژگونی پل J2 تحت زلزله‌های مختلف، به گونه‌ای که به‌طور میانگین بیشینه لنگر واژگونی در پل حدود ۳۳ درصد نسبت به حالت کنترل نشده کاهش نشان داده است. میانگین نرم لنگر واژگونی J10 در پل در حدود ۴۳ درصد کاهش نشان داده است.
 - توانمندی سیستم در کاهش جابجایی میانه پل J3 تحت زمین‌لرزه‌های مختلف به گونه‌ای که به‌طور میانگین بیشینه جابجایی میانه پل حدود ۳۷ درصد کاهش نشان داده است. همچنین نرم تغییر مکان میانه پل J11 به‌طور میانگین حدود ۴۷ درصد نسبت به حالت کنترل نشده کاهش نشان داده است.
 - توانمندی سیستم در کاهش بیشینه تغییر شکل جداسازها J5 تحت زلزله‌های مختلف به نحوی که به‌طور میانگین بیشینه تغییر شکل جداسازها حدود ۴۷ درصد کاهش یافته است. همچنین نرم تغییر شکل تکیه‌گاه‌های جداسازی شده J13 حدود ۶۰ درصد به‌طور میانگین نسبت به حالت کنترل نشده کاهش یافته است.
 - قابلیت فوق‌العاده سیستم پیشنهادی در کاهش تخریب و خسارات سازه‌ای با توجه به اینکه پارامترهایی نظیر انحنای ایجاد شده در ستون‌ها انرژی جذب شده در اثر رفتار غیرخطی و پیمودن حلقه‌های هیسترسیس و همچنین تعداد مفاصل پلاستیک ایجاد شده در پل به‌طور مستقیم با خسارت و تخریب وارد بر سازه در ارتباطند معیارهای دربرگیرنده این پارامترها نیز برای سنجش

خسارات وارده بر پل مناسب خواهد بود. بنابراین اندیس‌های (J6, J7, J8) می‌توانند نشان‌دهنده پتانسیل موجود برای خسارات سازه‌ای به پل باشند.

۶- نتیجه‌گیری

یک روش کنترل جدید برای کنترل فعال پل بزرگراه پنج‌مارک با سیستم جداگرهای دوخطی ارائه شد. قوانین کنترل موردنظر از یک کنترل‌کننده عصبی فازی انفیس که پارامترهای خروجی آن توسط الگوریتم بهینه‌سازی فرا ابتکاری تنظیم شده‌اند به دست آمده‌اند. کنترل‌کننده انفیس قادر است با دریافت نوع تحریک وارد بر سازه و پاسخ آن در هر لحظه، میزان نیروی محرک‌ها را تعیین نموده و فرمان لازم را به سمت ابزارهای کنترلی ارسال نماید. از جمله ویژگی‌های مهم روش پیشنهادی می‌توان سادگی مدل‌سازی، حجم محاسبات عددی کم، قابلیت در نظر گرفتن رفتارهای غیرخطی و عدم قطعیت‌ها نام برد. مهم‌ترین عیب استفاده از شبکه‌های عصبی در طرح کنترل‌کننده‌ها پیچیدگی طراحی ساختار شبکه عصبی و نیز نحوه تعیین پارامترهای مناسب برای توابع ورودی و خروجی است که در روش پیشنهادی با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری مسابقه طناب‌کشی این مشکلات برطرف شده است. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد روش پیشنهادی تأثیر به‌سزایی در کاهش جابجایی و شتاب پایه پل و سایر پارامترهای مهم از نظر طراحی و سرویس‌دهی سازه برای بارهای مختلف زلزله داشته است.

سپاسگزاری

این تحقیق با استفاده از گرنت اعطایی دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل با شماره BNUT/370680/97 انجام گردیده است. نویسندگان از حمایت‌های دانشگاه کمال تشکر را دارند.

مراجع

- [1] Chen, Z., Han, Z., Fang, H. and Wei, K. (2018). Seismic vibration control for bridges with high-piers in Sichuan-Tibet Railway. *Structural Engineering and Mechanics*, 66(6), 749-759.
- [2] Heo, G., Kim, C., Jeon, S., Lee, C. and Jeon, J., (2017). A hybrid seismic response control to improve performance of a two-span bridge. *Structural Engineering and Mechanics*, 61(5), 675-684.
- [3] Spencer, Jr. B.F., Dyke, S.J and Deoskar, H.S. (1998). Benchmark problems in structural control—Part I: active mass driver system. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 27(11), 1127-1139.
- [4] Spencer, Jr. B.F., Dyke, S.J and Deoskar, H.S. (1998). Benchmark problems in structural control—Part II: active tendon system. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 27(11), 1141-1147.
- [5] Ohtori, Y., Christenson R.E., Spencer, B.F. and Dyke, S.J. (2004). Benchmark control problems for seismically excited nonlinear buildings. *Engineering Mechanics*, 130(4), 366-385.
- [6] Yang, J.N., Agrawal, A.K., Samali, B. and Wu, J, C. (2004). A benchmark problem for response control of wind excited tall buildings. *Engineering Mechanics*, 130(4), 437-446.
- [7] Dyke, S.J, Caicedo, J.M., Turan, G., Bergman, L.A. and Hague, S. (2003). Phase 1: benchmark control problem for seismic response of cable-stayed bridges. *Structural Engineering*, 129(7), 857-872.
- [8] Caicedo, J.M., Dyke, S.J., Moon, S.J., Bergman, L.A., Turan, G., Hague, S. (2003). Phase II benchmark control problem for seismic response of cable-stayed bridges. *Structural Control*, 10(4), 137-168.
- [9] Narasimhan, S., Nagarajaiah, S., Gavin, H. and Johnson, E.A. (2006). Smart base-isolated benchmark building. Part I: problem definition. *Structural Control and Health Monitoring*, 13(3), 573-588.
- [10] Narasimhan, S. (2009). Robust direct adaptive controller for the nonlinear highway bridge benchmark. *Structural Control and Health Monitoring*, 13(4), 327-337.
- [11] Saha, A., Saha, P. and Patro, S.K. (2017). Polynomial friction pendulum isolators (PFPIs) for seismic performance control of benchmark highway bridge. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 16(4), 827-840.
- [12] Madhekar, S. N. and Jangid, R.S. (2011). Seismic Performance of Benchmark Highway Bridge Installed with Piezoelectric Friction Dampers. *IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering*, 4(4), 191-212.
- [13] Nagarajaiah, S. and Narasimhan, S. (2006). Base isolated benchmark building part ii: Phase i sample controllers for linear isolation systems. *Structural Control and Health Monitoring*, 13(2), 589-604.

- [14] Narasimhan, S., Nagarajaiah, S. and Johnson, E.A. (2008). Structural control benchmark problem: Phase ii—nonlinear smart base isolated building subjected to near-fault earthquakes. *Structural Control and Health Monitoring*, 15(5), 653–656.
- [15] Narasimhan, S., Nagarajaiah, S. and Johnson, E.A. (2008). Smart base-isolated benchmark building part iv: Phase ii sample controllers for nonlinear isolation systems. *Structural Control and Health Monitoring*, 15(5), 657–672.
- [16] Agrawal, A., Tan, P., Nagarajaiah, S. and Zhang, J. (2008). Benchmark structural control problem for a seismically excited highway bridge—part i: Phase i problem definition. *Structural Control and Health Monitoring*, 16(5), 509-529.
- [17] Tan, P. and Agrawal, A. (2008). Benchmark structural control problem for a seismically excited highway bridge—part ii: Phase i sample control design. *Structural Control and Health Monitoring*, 16(5), 530-548.
- [18] Nagarajaiah, S., Narasimhan, S., Agrawal, A. and Tan, P. (2008). Benchmark structural control problem for a seismically excited highway bridge—part iii: Phase ii sample controller for the fully base-isolated case. *Structural Control and Health Monitoring*, 16(5), 549-563.
- [19] Pang, H., Liu, F. and Xu, Z. (2018). Variable universe fuzzy control for vehicle semi-active suspension system with MR damper combining fuzzy neural network and particle swarm optimization. *neurocomputing*, 306(10), 130-140.
- [20] Khodabandolehlou, H., Pekcan, G., Fadali, M.S. and Salem, M.M.A. (2017). Active neural predictive control of seismically isolated structures. *Structural Control and Health Monitoring*, 25(1), 184-195.
- [21] Saha, A., Saha, P. and Patro, S.K. (2017). Polynomial friction pendulum isolators (PFPIs) for seismic performance control of benchmark highway bridge. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 16(4), 827-840.
- [22] Park, K.S., Ok, S.Y. (2014). Fuzzy gain-tuning approach for active control system adaptable to physical constraints. *KSCE journal of Civil Engineering*, 19(5), 1468-1474.
- [23] Kaveh, A., Zolghadr, A. (2016). A novel meta-heuristic algorithm: tug of war optimization. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, 6(4), 469-492.
- [24] Agrawal, A., Tan, P., Nagarajaiah, S. and Zhang, J. (2006). Benchmark structural control problem for a seismically excited highway bridge. In *Proceedings of the 2006 Structures Congress, Brad Cross JF (ed.)*, SEI, St. Louis, MO.
- [25] Mavroeidis, G.P., Dong, G. and Papageorgiou, A.S. (2004). Near-fault ground motions, and the response of elastic and inelastic single-degree-of-freedom (SDOF) systems. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 33(3), 1023-1049.
- [26] Jangid, R.S. and Kelly, J.M. (2001). Base isolation for near-fault motions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30(5), 691-707.
- [27] Ali, S.F. (2008). *Semi-active Control of Earthquake Induced Vibrations in Structures using MR Dampers: Algorithm Development, Experimental Verification and Benchmark Applications*. Ph. D. Thesis. Indian Institute of Science.
- [28] Ning, X.L., Tan, P., Huang, D.Y. and Zhou, F.L. (2009). Application of adaptive fuzzy sliding mode control to a seismically excited highway bridge. *Structural Control and Health Monitoring*, 16(6), 639-656.