

طراحی بهینه جداساز لاستیکی هسته سربی با استفاده از یک روش فراکاوشی اصلاح شده بر مبنای آموزش متضاد

میلاد همتی

کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

چکیده

عوامل مختلفی بر عملکرد سامانه‌های جداسازی تحت بارگذاری‌های لرزه‌ای تاثیرگذار هستند که می‌توانند طراحی این ابزارهای کنترل لرزه‌ای را پیچیده نمایند. بنابراین لزوم استفاده از روش‌های بهینه‌سازی در طراحی آشکار می‌شود. در این مقاله روش آموزش بر مبنای تضاد برای اصلاح عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی چند جهانی (MVO) مورد استفاده قرار می‌گیرد. الگوریتم بهبود یافته چند جهانی (IMVO) برای حل مسائل بهینه‌سازی در توابع ریاضیاتی مینا و طراحی بهینه جداسازهای لاستیکی هسته سربی مورد استفاده قرار گرفت. تحلیل حساسیت رفتار لرزه‌ای سازه‌های ساختمانی جداسازی شده نسبت به مشخصات مکانیکی سامانه جداساز لاستیکی هسته سربی (LRB) مطالعه گردید. سپس رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های جداسازی شده با جداگر LRB تحت تحریکات لرزه‌ای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور مدل‌سازی رفتار غیرخطی جداساز LRB از مدل دو خطی استفاده گردید. همچنین برای مطالعه رفتار لرزه‌ای سازه‌های جداسازی شده از روش تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی استفاده شد. نتایج نشان دادند که الگوریتم اصلاح شده پیشنهادی از توانایی بالاتری در حل مسائل بهینه‌سازی در توابع ریاضیاتی مینا و طراحی بهینه جداسازهای لاستیکی هسته سربی برخوردار می‌باشد. همچنین نتایج تحلیل حساسیت در رفتار لرزه‌ای سازه‌های ساختمانی جداسازی شده با جداگرهای لاستیکی هسته سربی نشان می‌دهد که پارامتر ضریب برش پایه تسلیم بیشترین تاثیر را بر رفتار لرزه‌ای سازه‌های جداسازی شده را نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: بهینه‌سازی، الگوریتم بهینه‌سازی چند جهانی، آموزش بر مبنای تضاد، جداساز لاستیکی هسته سربی.

۱. مقدمه

در طی وقوع زلزله و حرکت زمین، سازه‌ها دچار ارتعاش می‌شوند و اگر ارتعاشات سازه افزایش یابد، چنانچه سازه‌ها دارای ضعف در اتلاف انرژی ورودی باشند، دچار آسیب و در موارد شدیدتر تخریب سازه‌ای می‌شوند. در دهه‌های اخیر مطالعات گسترده‌ای در توسعه سیستم‌ها کنترل سازه، برای طراحی مقاوم سازه‌ها تحت زمین‌لرزه‌ها انجام شده است (Spencer and Soong, 1999). در سیستم‌های کنترل سازه ابزارهای مستهلک کننده انرژی نقش اصلی را در اتلاف انرژی ناشی از زلزله را بر عهده دارند. یک سیستم جداساز لرزه‌ای که دارای

خصوصیات هیستریزیس مناسب نیرو-تغییر مکان باشد، می تواند مشخصات مورد نظر مانند انعطاف پذیری مطلوب، میرایی بالا و کاستن نیروهای افقی زلزله را به همراه داشته باشد (Soong and Spencer, 2002). هدف اصلی در روش جداسازی لرزه ای، جلوگیری از انتقال حرکات افقی زمین به سازه و جلوگیری از انتقال مستقیم نیروی زلزله از پی به سازه می باشد. جداسازی لرزه ای از دو طریق افزایش دوره ی تناوب طبیعی سازه و استهلاک انرژی در محل جداساز نیروی منتقل شده به روسازه را کاهش می دهند (Cheng et al, 2008). یکی از انواع متداول جداسازهای لاستیکی، جداسازهای لاستیکی هسته سربی (LRB) می باشد.

در زمینه سازه های جداسازی شده مطالعات مختلفی صورت گرفته است که می توان به بررسی تاثیر نوع جداسازها و تاثیر پارامترهای جداساز (Matsagar and Jangid, 2004) و (Tanwer et al, 2018)، تاثیر اندرکنش خاک بر سیستم جداسازی (Spirakos et al, 2009)، جداسازی در سازه های بلند (Ei-Bayoumi et al, 2015)، ارزیابی منحنی های شکنندگی در سیستم های جداسازی شده (Flora et al, 2020)، تحلیل قابلیت اطمینان (Castaldo et al, 2015) و طراحی مبتنی بر قابلیت اطمینان (Peng et al, 2020) در سیستم های جداسازی شده، سیستم های جداسازی نیمه فعال (Vargas et al, 2020) و تاثیر جداسازها در طراحی لرزه ای سازه ها و کاهش میلگردهای مصرفی (Yurdakul and Yıldız, 2020) اشاره نمود. همچنین مطالعات نشان می دهد که عواملی مانند شرایط هندسی سازه، منظمی یا نامنظمی سازه و مشخصات تحریک لرزه ای مانند زلزله های نزدیک یا دور از گسل، می تواند رفتار و عملکرد سیستم جداسازی را تحت تاثیر قرار دهد.

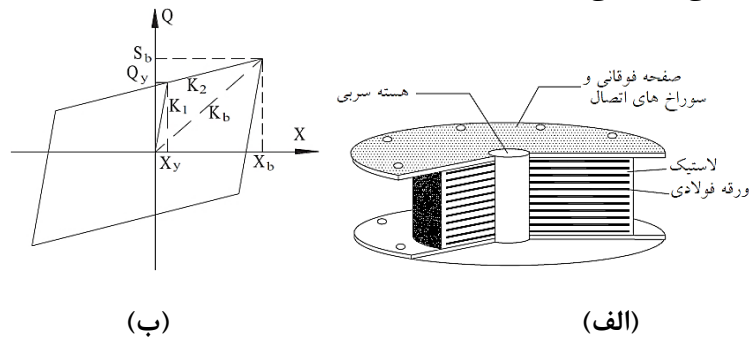
میزان خرابی ایجاد شده در اثر وقوع زلزله به عوامل بسیاری از جمله مکانیزم شکست، فاصله گسل تا محل، نوع خاک و خصوصیات رکورد زلزله شامل محتوای فرکانسی، طول مدت زمان و دامنه و همچنین خصوصیات دینامیکی سازه وابسته است (Hayden et al, 2014). زلزله بسته به موقعیت ساختگاه نسبت به گسل به دو نوع زلزله های حوزه نزدیک گسل و حوزه دور از گسل تقسیم بندی می شود. برخی از محققین تاثیر جهت حرکت زمین (Mavronicola et al, 2020)، تاثیر مولفه افقی و قائم (Jamalzadeh and Barghian, 2015) و تاثیر محتوای فرکانسی زلزله (Cancellara and Angelis, 2016) را در عملکرد سیستم های جداسازی شده مورد بررسی قرار دادند. همچنین تاثیر زمین لرزه های نزدیک گسل و دور از گسل در برخی از پژوهش ها (Providakis, 2009)، (Rong, 2019) و (Anajafi et al, 2020) مورد توجه بوده است. لازم به ذکر است که ساختمان هایی که به لحاظ خصوصیات کالبدی شامل شکل هندسی، توزیع جرم و توزیع سختی در پلان و در ارتفاع دارای حداقل یکی ضوابط نامنظمی باشند نامنظم محسوب می شوند. در تعداد از پژوهش ها تاثیر نامتقارنی سازه (Kilar and Koren, 2009)، وجود طبقات نرم (Choudhury and Patro, 2020) و خروج از مرکزیت (Colungaa and Rojas, 2006) بر جداسازها مورد مطالعه قرار گرفته است.

با توجه به تاثیر عوامل مختلف بر عملکرد سیستم های جداسازی و رفتار سازه های جداسازی شده، نیاز به طراحی این سیستم ها با در نظر گرفتن تاثیر عوامل موثر می باشد. یکی از روش های طراحی در سازه ها استفاده از روش های بهینه سازی بر مبنای الگوریتم های فراکاوشی می باشد (Kaveh, 2014). تاکنون الگوریتم های فراکاوشی متعددی مانند جستجوی سیستم ذرات باردار، برخورد ذرات، الگوریتم کلونی مورچه (Dorigo and Caro, 1999)، الگوریتم بهینه سازی ملخ (Saremi et al, 2017) و الگوریتم بهینه سازی چند جهانی (Mirjalili et al, 2016) غیره اشاره نمود. بنابراین در این پژوهش طراحی بهینه سیستم جداسازی لرزه ای با جداگرهای LRB با استفاده از الگوریتم بهینه سازی چند جهانی مورد مطالعه قرار می گیرد.

۲. سیستم های جداساز لرزه ای

تکیه گاه های لاستیکی می توانند انعطاف پذیری و تغییر شکل لازم را برای جداسازی ارتعاشی تامین کنند. اگر این تکیه گاه ها با سرب به صورت یک یا چند هسته به منظور اتلاف هیستریزیس انرژی ترکیب شوند، میرایی لازم برای این سیستم نیز فراهم می شود. صفحات فولادی بکار رفته در این سیستم سبب تغییر شکل هسته سربی در برش می شوند. هسته های سربی در برابر نیروهای برشی تغییر شکل داده و سبب ایجاد پاسخ دو خطی در نشیمن می شوند (Naeim and Kelly, 1999). بخش لاستیکی این تجهیزات مشابه جداسازهای لاستیکی با ورقه های فولادی است و وظیفه تامین نیروی بازگرداننده به مبدا را پس از پایان ارتعاش سازه به عهده دارد (شکل ۱ الف).

سیستم LRB قادر به نگهداری سازه در جهت قائم، تامین انعطاف پذیری افقی همراه با نیروی بازگرداننده و تامین میرایی هیستریزس مورد نیاز می باشد. در عمل، همه تکیه گاه های جداساز بر مبنای سه پارامتر سختی الاستیک (K_2)، سختی ثانویه (K_z) و مقاومت مشخصه (Q_y) به صورت دو خطی مدل می شوند، که در شکل ۱ (ب) نشان داده شده است. سختی الاستیک از حلقه های هیستریزس آزمایش تکیه گاه های الاستومری بدست می آید که بر روی تکیه گاه های لاستیکی - سربی (LRB) و تکیه گاه های آونگ اصطکاکی (FPS) سختی الاستیک به صورت ضربی از سختی ثانویه می باشد (Rong, 2019).



شکل ۱. جداساز لاستیکی هسته سربی

در ابتدا یک دوره تناوب برای سازه جداسازی شده مورد نظر (T_2) در سطح تغییر مکان طرح که معمولاً دوره تناوبی بین ۲ تا ۳ ثانیه مطلوب است، انتخاب می شود. سپس سختی ثانویه سیستم جداسازی شده برای دوره تناوب انتخاب شده به استفاده رابطه (۱) قابل محاسبه است:

$$K_2 = M \times \left(\frac{2\pi}{T_2}\right)^2 \quad (1)$$

در این رابطه، M جرم کل سازه جداسازی شده در پایه می باشد. همچنین نیروی برشی تسلیم در تراز جداسازی (Q_y) با استفاده از رابطه (۲) قابل تعریف می باشد:

$$Q_y = \alpha M g \quad (2)$$

که در این رابطه α ضریب برش تسلیم می باشد. با فرض یک مقدار بین ۰ تا ۱ می توان نیروی برشی موثر بر سازه را تعیین نمود. در مدل رفتاری دوخطی، با انتخاب مولفه تغییر شکل تسلیم (X_y) به عنوان حد رفتار الاستیک، مقدار سختی الاستیک سیستم (K_1) قابل تعیین می باشد.

$$K_1 = \frac{Q_y}{X_y} \quad (3)$$

بنابراین نسبت سختی اولیه به سختی پس از تسلیم به صورت پارامتر α_k به صورت رابطه (۴) تعریف می شود:

$$\alpha_k = \frac{K_1}{K_2} \quad (4)$$

همچنین میرایی سیستم جداسازی (C_b) بر حسب مقدار نسبت میرایی موثر (ξ_b) که بیانگر انرژی مستهلک شده است، برابر است با رابطه (۵) می باشد:

$$c_b = 2\xi_b \sqrt{K_2 \times M} \quad (5)$$

۳. تحلیل لرزه‌ای سازه‌های ساختمانی با رفتار غیرخطی

پاسخ دینامیکی یک سیستم فراتر از محدوده الاستیک خطی آن معمولاً با حل تحلیلی قابل محاسبه نیست. حتی اگر تغییرات زمانی تحریک با یک تابع ساده توصیف شود. بنابراین روش‌های عددی در تحلیل سیستم‌های غیرخطی لازم است. عموماً برای حل دینامیکی معادلات غیرخطی از روش نیومارک همراه با روش تکرار نیوتن-رافسون اصلاح شده استفاده می‌شود (Newmark, 1959). معادله دینامیکی سازه با رفتار غیرخطی بصورت رابطه (۶) نوشته می‌شود:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + f_s(x) = -m\ddot{x}_g \quad (6)$$

که در معادله فوق m جرم سازه، c میرایی و f_s نیروی مقاوم می‌باشد. همچنین e ضریب تاثیر زلزله می‌باشد. برای ساده‌تر شدن معادله رابطه (۶)، سمت راست معادله فوق را $-m\ddot{x}_g$ با $p(t)$ نشان داده و معادله بصورت رابطه (۷) بازنویسی می‌شود.

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + f_s(x) = p(t) \quad (7)$$

با توجه به روش‌های عددی و با بازنویسی معادله رابطه (۷) بصورت نموی $(\Delta t_i = t_{i+1} - t_i)$ ، معادله رابطه (۸) بدست می‌آید.

$$m\Delta\ddot{x}_i + c\Delta\dot{x}_i + (\Delta f_s)_i = \Delta p_i \quad (8)$$

تغییرات نیروی مقاوم بصورت معادله رابطه (۹) قابل محاسبه می‌باشد.

$$(\Delta f_s)_i = (k_i)_{sec} \times \Delta u_i \quad (9)$$

که در آن k_i سختی سکانتی می‌باشد.

با توجه به این نکته که پاسخ سازه در گام $i+1$ مجهول بوده و هدف یافتن آن است؛ لذا از سختی مماسی $(k_i)_T$ بجای سختی سکانتی استفاده می‌گردد. مشکل اصلی استفاده از سختی مماسی؛ ایجاد خطا در گام $i+1$ می‌باشد که منجر به یک نیروی ناپایدار کننده می‌شود که برای به حداقل رساندن آن نیز می‌توان از یک روش تکرار مانند نیوتن-رافسون استفاده کرد. پس از اصلاح تعادل نیروها در هر گام به روش تکراری نیوتن رافسون اصلاح شده، با استفاده از روش نیومارک پاسخ‌های جابجایی، سرعت و شتاب در گام بعد با استفاده از فرمول‌های ارائه شده در جدول ۱ بدست می‌آید.

جدول ۱. شبه کد روش نیومارک

$\beta = \frac{1}{4}, \gamma = \frac{1}{2}$	روش شتاب متوسط
(۱) محاسبات اولیه:	
$\ddot{u}_0 = \frac{p_0 - c\dot{u}_0 - (f_s)_0}{m}$	(۱-۱)
(۲-۱) Δt را انتخاب کن	

$$a = \frac{1}{\beta \Delta t} m + \frac{\gamma}{\beta} c; \quad (3-1)$$

$$b = \frac{1}{2\beta} m + \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) c$$

(۲) محاسبات برای هر گام زمانی

$$\Delta \hat{p}_i = \Delta p_i + a \dot{u}_i + b \ddot{u}_i \quad (1-2)$$

(۲-۲) سختی مماسی K_i را تعیین کنید.

$$\hat{k} = k + \frac{\gamma}{\beta \Delta t} c + \frac{1}{\beta (\Delta t)^2} m \quad (3-2)$$

(۴-۲) با استفاده از روش نیوتن رافسون اصلاح شده Δu را تعیین کنید.

$$\Delta \dot{u}_i = \frac{\gamma}{\beta \Delta t} (\Delta u_i) + -\frac{\gamma}{\beta} \dot{u}_i + \Delta t \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta} \right) \ddot{u}_i \quad (5-2)$$

$$\Delta \ddot{u}_i = \frac{1}{\beta (\Delta t)^2} (\Delta u_i) - \frac{1}{\beta \Delta t} \dot{u}_i - \frac{1}{2\beta} \ddot{u}_i \quad (6-2)$$

$$\ddot{u}_{i+1} = \ddot{u}_i + \Delta \ddot{u}_i \quad (7-2)$$

$$\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + \Delta \dot{u}_i$$

$$u_{i+1} = u_i + \Delta u_i$$

(۳) تکرار برای هر گام زمان بعدی i را با $i+1$ جایگزین کرده و گام‌های ۱-۲ الی ۷-۲ را برای گام زمانی بعدی اجرا کنید.

۴. الگوریتم بهینه‌سازی چند جهانی

براساس نظریه انفجار بزرگ، جهان ما با یک انفجار عظیم شروع گردید که منشا همه چیز در این جهان است. نظریه چندجهانی نشان می‌دهد که بیش از یک انفجار بزرگ وجود دارد و هر انفجار بزرگ باعث تولد یک جهان می‌شود. اصطلاح چندجهانی در مقابل کیهان قرار دارد که به وجود جهان‌های دیگر علاوه بر جهانی که همه ما در آن زندگی می‌کنیم اشاره دارد. در نظریه چندجهانی، جهان‌های چندگانه برهم کنش دارند و حتی ممکن است با یکدیگر برخورد کنند. الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر نظریه چندجهانی مطابق با سه مفهوم اصلی این نظریه به‌عنوان سفیدچاله‌ها، سیاهچاله‌ها و کرم‌چاله‌ها فرمول‌بندی شده است. فیزیکدانان انفجار بزرگ را یک سفیدچاله می‌دانند و سفیدچاله‌ها جزء اصلی تولد یک جهان هستند. سیاهچاله‌ها با نیروی گرانشی بسیار بالای خود همه چیز از جمله پرتوهای نور را جذب می‌کنند. کرم‌چاله‌ها بخش‌های مختلف جهان را به هم متصل می‌کنند و به‌عنوان تونل‌های سفر در زمان/فضا عمل می‌کنند که در آن اجسام می‌توانند فوراً بین هر گوشه‌ای از جهان حرکت کنند (Mirjalili et al, 2016).

الگوریتم بهینه‌سازی چند جهانی یک الگوریتم فراکاوشی مبتنی بر جمعیت می‌باشد که فرآیند جستجو را به دو مرحله اکتشاف و بهره‌برداری تقسیم می‌کند. مفاهیم سفیدچاله و سیاهچاله به منظور اکتشاف در فضاهای جستجو استفاده می‌شود. کرم‌چاله‌ها نیز به بهره‌برداری از فضاهای جستجو کمک می‌کنند. در این الگوریتم، هر راه‌حل مشابه یک جهان است و هر متغیر متناظر با یک شی در آن جهان می‌باشد. علاوه بر این، یک نرخ تورم به هر جهان اختصاص داده می‌شود که متناسب با مقدار تابع هدف راه‌حل متناظر است. در

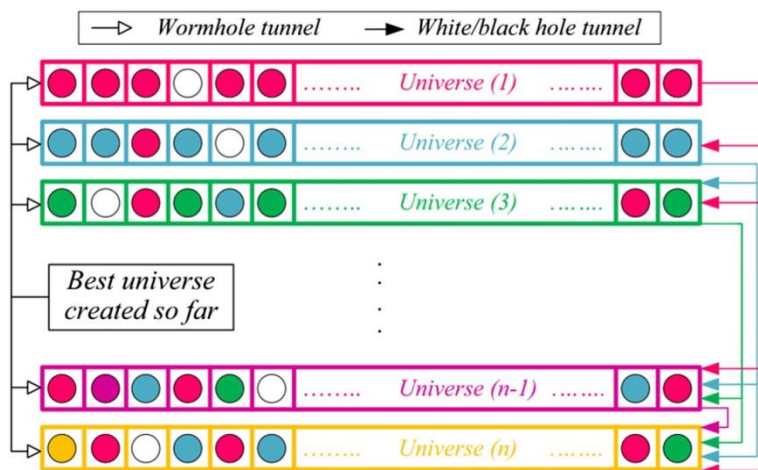
این الگوریتم، اجسام اجازه دارند از طریق تونل‌های سفید/سیاه‌چاله بین جهان‌های مختلف حرکت کنند. هنگامی که یک تونل سفید/سیاه بین دو جهان ایجاد می‌شود، جهانی با نرخ تورم بالاتر به عنوان دارای سفیدچاله در نظر گرفته می‌شود، در حالی که جهانی با نرخ تورم کمتر، صاحب سیاه‌چاله‌ها است. سپس اجسام از سفیدچاله‌های جهان مبدا به سیاه‌چاله‌های جهان مقصد منتقل می‌شوند. مدل شماتیکی از الگوریتم چند جهانی در شکل ۲ نشان داده شده است.

به منظور مدل‌سازی ریاضی تونل‌های سفید/سیاه‌چاله و تبادل اجسام جهان‌ها، مکانیزم چرخ رولت انتخاب می‌شود. در هر تکرار، جهان‌ها براساس نرخ تورم‌شان دسته‌بندی می‌شوند و یکی از آنها توسط چرخ رولت انتخاب می‌شود تا یک سفیدچاله داشته باشد. فرض می‌شود U کل جهان است.

$$U = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_1^2 & \dots & x_1^d \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_n^1 & x_n^2 & \dots & x_n^d \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$x_i^j = \begin{cases} x_k^j & r_1 < NI(U_i) \\ x_i^j & r_1 \geq NI(U_i) \end{cases} \quad (11)$$

که در آن d تعداد پارامترها (متغیرها)، n تعداد جهان‌ها (راه‌حل) است. عبارت x_i^j پارامتر j -ام جهان i را نشان می‌دهد، U_i جهان i -ام را نشان می‌دهد، $NI(U_i)$ نرخ تورم نرمال شده جهان i -ام است، r_1 یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت بین $[0,1]$ است. و x_k^j پارامتر j -ام جهان k را نشان می‌دهد که توسط مکانیزم چرخ رولت انتخاب شده است.



شکل ۲: مدل شماتیک از الگوریتم بهینه‌سازی چند جهانی

برای ایجاد تغییرات محلی برای هر جهان و داشتن احتمال بالا برای بهبود نرخ تورم با استفاده از کرم‌چاله‌ها، تونل‌های کرم‌چاله همیشه بین یک جهان با بهترین جهانی که تاکنون شکل گرفته است ایجاد می‌شود. این مکانیسم به صورت رابطه (۱۲) فرمول‌بندی می‌شود:

$$x_i^j = \begin{cases} \begin{cases} X_j + TDR \times ((ub_j - lb_j) \times r_4 + lb_j) & r_3 < 0.5 \\ X_j + TDR \times ((ub_j - lb_j) \times r_4 + lb_j) & r_3 \geq 0.5 \end{cases} & r_2 < WEP \\ x_i^j & r_2 \geq WEP \end{cases} \quad (12)$$

که در آن X_j پارامتر j -ام بهترین جهان تشکیل شده را نشان می‌دهد، lb_j کران پایینی متغیر j -ام، ub_j کران بالایی متغیر j -ام، x_i^j پارامتر j -ام جهان i را نشان می‌دهد. همچنین r_1 و r_2 و r_3 اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه $[0, 1]$ می‌باشند. WEP (احتمال وجود کرم چاله) عاملی برای تعریف احتمال وجود کرم چاله در جهان‌ها است. همچنین TDR (نرخ مسافت سفر) عاملی برای تعریف نرخ مسافت است که یک جسم می‌تواند توسط یک کرم چاله به اطراف بهترین جهان به دست آمده از راه دور منتقل شود.

$$WEP = \min + l \times \left(\frac{\max - \min}{L} \right) \quad (13)$$

$$TDR = 1 - \frac{l^{1/p}}{L^{1/p}} \quad (14)$$

که در آن \min یک مقدار حداقل، \max یک مقدار حداکثر، l نشان دهنده تکرار فعلی، L نشان دهنده حداکثر تکرار، و p دقت بهره‌برداری در تکرار را تعریف می‌کند.

در الگوریتم MVO، فرآیند بهینه‌سازی با ایجاد مجموعه‌ای از جهان‌های تصادفی آغاز می‌شود. در هر تکرار، اجسامی در جهان‌های با نرخ تورم بالا تمایل دارند از طریق سفید/سیاه چاله‌ها به جهان‌هایی با نرخ تورم پایین حرکت کنند. در همین حال، هر جهان منفرد با انتقال تصادفی در اجسام خود از طریق کرم چاله‌ها به سمت بهترین جهان مواجه است. این فرآیند تا برآورده شدن معیارهای همگرایی تکرار می‌شود. هر دو معادله نرخ‌های اکتشاف و بهره‌برداری از الگوریتم اصلی (MVO) را نشان می‌دهند.

۴-۱. روش Opposition Based Learning

روش یادگیری OBL یک روش جدیدی می‌باشد که برای اولین بار توسط Tizhoosh ارائه گردید. این روش که به طور وسیعی در بهینه‌سازی کاربرد دارد و از اعداد متضاد، در جستجوی نقطه بهینه استفاده می‌کند. برای توضیح بیشتر فرض کنید که $X = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ یک نقطه جستجو در فضای N بعدی است و $x_i \in [a_i, b_i]$ باشد ($i = 1, 2, \dots, N$). متضاد X که آنرا با X' نمایش می‌دهیم بصورت رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$x'_i = a_i + b_i - x_i \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (15)$$

اصل روش OBL در بهینه‌سازی بر اساس X و X' برای جستجو و پیدا کردن پاسخ‌های بهینه به این صورت می‌باشد که در هر تکرار بردار X' از X محاسبه می‌گردد و سپس با محاسبه توابع هدف برای هر یک از بردارها $f(X)$ و $f(X')$ ، در صورتی که $f(X) \geq f(X')$ باشد، X به عنوان بردار پاسخ در نظر گرفته می‌شود، در غیر اینصورت، $f(X') \geq f(X)$ به عنوان بردار پاسخ در نظر گرفته می‌شود. در واقع استفاده از روش OBL باعث تنوع در ایجاد بردارهای پاسخ می‌شود که این امر منجر به افزایش قدرت اکتشاف الگوریتم می‌شود.

۴-۲. پیشنهاد الگوریتم چند جهانی اصلاح شده (IMVO)

در این قسمت الگوریتم IMVO توضیح داده می‌شود. با توجه به اینکه الگوریتم چند جهانی نیز مشابه سایر الگوریتم‌های فراکاوشی از یک جمعیت اولیه تصادفی برای ساختن جواب‌های اولیه استفاده می‌کند، و توزیع جمعیت تاثیر زیادی در عملکرد الگوریتم و رسیدن به جواب بهینه را ایفا می‌کند، لذا در این رساله، برای ارتقا قدرت اکتشاف الگوریتم MVO از روش OBL استفاده شده است. بدین صورت که بعد از تولید یکسری جواب‌های اولیه تصادفی توسط الگوریتم MVO، با استفاده از روش OBL مکمل‌های جواب‌های تصادفی ایجاد شده در مرحله قبل نیز ایجاد می‌شوند، سپس از بین جواب‌های اولیه، میزان تابع هدف محاسبه گردیده و این توابع بصورت صعودی یا

نزولی مرتب می گردند و به اندازه تعداد راه حل ها، جواب های اولیه حفظ گردیده و الباقی حذف می گردند. با تکرار این کار، در واقع فضای جستجو دو برابر شده و میزان اکتشاف الگوریتم برای رهایی از نقاط اکسترمم محلی، بالا می رود.

۳-۴. صحت سنجی الگوریتم بهینه سازی چند جهانی بهبود یافته

به منظور اطمینان از عملکرد الگوریتم بهبود یافته پیشنهادی ابتدا نتایج ارزیابی عملکرد الگوریتم بهینه سازی چند جهانی بهبود یافته در مقایسه با الگوریتم چند جهانی ارائه می گردد. سپس کارآیی روش بهینه سازی چند جهانی بهبود یافته در حل مسئله طراحی بهینه سامانه های جداسازی با جداگرهای لاستیکی هسته سربی مورد ارزیابی واقع می گردد. برای ارزیابی عملکرد الگوریتم IMVO و مقایسه عملکرد آن با الگوریتم MVO، مجموعه ای از توابع ریاضیاتی مبنا در حالات مختلف تک گانه (unimodal) و چندگانه (multimodal) استفاده می گردد. توابع تک گانه (unimodal) در دامنه خود، فقط یک نقطه اکسترمم دارند و برای ارزیابی سرعت همگرایی الگوریتم ها استفاده می شوند، در حالی که توابع چندگانه (multimodal) بر روی دامنه خود دارای بیش از یک نقطه اکسترمم هستند و برای ارزیابی عملکرد الگوریتم برای جستجوی نقطه حداقل جهانی استفاده می شوند. در حالت کلی این توابع می توانند معیار خوبی برای بررسی قدرت اکتشاف و استخراج الگوریتم های بهینه سازی باشند.

در جدول ۳ توصیفی از توابع ریاضیاتی مبنا ارائه شده است، همان گونه که مشاهده می شود این توابع با دو نوع تک گانه (unimodal) و چندگانه (multimodal) ارائه شده است. همچنین در این جدول برای هر رابطه ریاضی، تعداد متغیرها، بازه تغییرات هر متغیر و حداقل جهانی این تابع ریاضیاتی در بازه تغییرات متغیرها ارائه شده است. برای مقایسه منطقی بین عملکرد الگوریتم IMVO و MVO در مواجهه با توابع مذکور، لازم است از یکسری فرض های یکسان برای هر دو الگوریتم استفاده کرد. برای محاسبه نتایج آماری عملکرد الگوریتم ها، از ۳۰ تحلیل مجزا استفاده می شود. برای حل مسئله بهینه سازی در هر تحلیل، تعداد راه حل و حداکثر تکرار به ترتیب ۵۰ و ۲۰۰ انتخاب شده اند. مقایسه عملکرد این الگوریتم ها با استفاده از پاسخ بهترین نتیجه، میانگین و انحراف معیار (STD) حل ها انجام می شود.

جدول ۳. توابع مبنا برای آزمون عددی الگوریتم ها

ID	Equation	Lower	Upper	Dim	Type	f_{min}
F1	$f(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2$	-100	100	10	Unimodal	0
F2	$f(x) = \sum_{i=1}^n x_i + \prod_{i=1}^n x_i $	-10	10	10	Unimodal	0
F3	$f(x) = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^i x_j \right)^2$	-100	100	10	Unimodal	0
F4	$f(x) = \sum_{i=1}^n ([x_i + 0.5])^2$	-100	100	10	Unimodal	0
F5	$f(x) = \sum_{i=1}^{n-1} [100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2]$	-30	30	10	Unimodal	0
F6	$f(x) = \sum_{i=1}^n -x_i \sin(\sqrt{ x_i })$	-500	500	10	Multimodal	418.983
F7	$f(x) = \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10]$	-5.12	5.12	10	Multimodal	0

F8	$f(x) = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1$	-600	600	10	Multimodal	0
F9	$f(x) = (4x_1^2 - 2.1x_1^4 + \frac{1}{5}x_1^6 + x_1x_2 - 4x_2^2 + 4x_2^4)$	-5	5	2	Multimodal	-1.0316
F10	$f(x) = \left(x_2 - \frac{5.1}{4\pi^2}x_1^2 + \frac{5}{\pi}x_1 - 6\right)^2 + 10\left(1 - \frac{1}{8\pi}\right)\cos x_1 + 10$	-5	5	2	Multimodal	0.398

نتایج هر آزمون برای دو روش الگوریتم چند جهانی (MVO) و الگوریتم چند جهانی اصلاح شده (IMVO) در جدول ۴ آورده شده است. همانطور که از جدول ۴ مشاهده می‌گردد، الگوریتم IMVO در تمامی موارد عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم MVO دارد. بنابراین پایداری الگوریتم اصلاح شده پیشنهادی در حل مسائل بهینه‌سازی بالاتر از پایداری الگوریتم چند جهانی اصلی می‌باشد.

جدول ۴. مقایسه نتایج بهینه روش MVO و IMVO برای توابع مبنا

ID	MVO			IMVO		
	Best	Ave	STD	Best	Ave	STD
F1	1.9688e-011	1.7626e-05	4.1185e-05	1.7882e-015	3.4134e-010	1.6403e-09
F2	3.013e-05	0.019959	0.047602	9.3802e-07	0.011098	0.023504
F3	0.0003242	0.1963	0.33547	3.0701e-06	0.012135	0.02513
F4	0	0.76667	1.2507	0	0.3	0.53498
F5	0	6.9667	2.9418	0	0.0333	0.18257
F6	-4189.8281	-4181.955	15.8585	-4189.8288	-4189.7958	0.1291
F7	0	1	1.4142	0	0.1	0.40258
F8	0.00015516	0.091902	0.093176	2.4331e-06	0.064527	0.044855
F9	-1.0316	-1.0044	0.14901	-1.0316	-1.0316	6.1849e-016
F10	0.39789	0.39789	0	0.39789	0.39789	0

۵. مطالعات عددی

در این پژوهش، مطالعات عددی در سه حالت انجام می‌شود. در حالت اول رفتار لرزه‌ای یک سازه ساختمانی مجهز به جداساز لرزه‌ای لاستیکی هسته سربی (LRB) نسبت به پارامترهای جداگر LRB مورد تحلیل حساسیت قرار می‌گیرد. در حالت دوم، با استفاده از روش طراحی بهینه برای سازه‌های ساختمانی، جداگرهای LRB طراحی می‌شود. نهایتاً در حالت سوم، رفتار لرزه‌ای سازه‌های ساختمانی مجهز به جداسازهای LRB طراحی شده با روش بهینه‌سازی با الگوریتم‌های بهینه‌سازی چند جهانی استاندارد و بهبود یافته تحت

زمین لرزه‌های مختلف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد تا عملکرد الگوریتم چند جهانی بهبود یافته برای طراحی جداساز LRB مورد مقایسه قرار گیرد.

مدل‌های سازه‌ای مورد مطالعه شامل مدل‌های ساختمانی مینا با ارتفاع‌های مختلف می‌باشد. بنابراین به عنوان مطالعه موردی از دو مدل سازه‌ی ساختمانی ۵ طبقه (مثال ۱) و ۱۰ طبقه (مثال ۲) با سیستم قاب برشی دو بعدی و جرم متمرکز در تراز طبقه استفاده می‌شود. مشخصات سازه‌ی ساختمانی انتخاب شده اعم از جرم طبقات، سختی طبقات و میرایی برای تمام طبقات سازه یکسان و مشابه فرض شده است. مشخصات دینامیکی این مدل‌های سازه‌ای اعم از جرم و سختی طبقات در جدول ۵ ارائه شده است. برای این مدل‌ها، نسبت میرایی (ξ_b) ۰.۰۲ فرض شده است که مقدار ضریب میرایی (C) برای هر طبقه با استفاده از روش رایلی قابل محاسبه می‌باشد.

جدول ۵. مشخصات دینامیکی مدل‌های سازه‌ای

مدل سازه‌ای	طبقه	جرم (ton)	سختی (MN/m)
ساختمان ۵ طبقه	۱ تا ۵	۴۴۵	۴۴۸
ساختمان ۱۰ طبقه	۱ تا ۱۰	۲۵۲.۱	۳۵۴.۲

طراحی بهینه سامانه جداسازی پایه برای سازه‌های ساختمانی در قالب یک مسئله بهینه‌سازی تعریف می‌شود. در این پژوهش تابع هدف در مسئله بهینه‌سازی براساس شاخص‌های عملکرد سیستم کنترل تعریف می‌شود. این شاخص‌ها میزان تاثیر ابزارهای کنترل بر عملکرد سیستم را نشان می‌دهد و بر مبنای پاسخ‌های جابجایی، دررفت و شتاب به صورت نسبت پاسخ‌های سازه در حالت کنترل شده به پاسخ سازه در حالت کنترل نشده بیان می‌شوند.

$$\text{Objective Function} = J_1 = \left| \frac{\text{Max}(\text{drift}_i, \text{Controlled})}{\text{Max}(\text{drift}_i, \text{Uncontrolled})} \right| \quad (16)$$

در این رابطه، drift_i جابجایی نسبی (دررفت) طبقه i ام می‌باشد.

متغیرهای طراحی شامل مجموعه‌ای از پارامترهایی است که جزئیات طراحی و نتایج طراحی را تحت تاثیر قرار می‌دهند. پارامترهای مختلفی طراحی یک سامانه جداسازی پایه در سازه‌های ساختمانی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. پارامترهایی که به صورت مستقل در مکانیزم رفتار جداسازهای لاستیکی هسته سربی نقش دارند به عنوان متغیرهای طراحی انتخاب می‌شوند. مدل رفتاری هر جداساز لاستیکی هسته سربی تحت تاثیر پارامترهای مستقلی مانند جابجایی تسلیم (X_y)، زمان تناوب ثانویه (T_2)، ضریب برش پایه تسلیم (α)، نسبت میرایی (ξ_b) و غیره می‌باشد که پارامترهایی مانند سختی اولیه (K_1)، سختی ثانویه (K_2)، نیروی برشی تسلیم (Q_y) و ضریب میرایی (c_b) تابعی از این متغیرها می‌باشند. در طراحی بهینه یک جداساز لاستیکی هسته سربی، این پارامترهای مستقل به عنوان متغیرهای طراحی انتخاب می‌شوند. قیود موجود در مسئله طراحی بهینه جداسازها با توجه به محدودیت‌های فیزیکی و قابل پذیرش بودن نتایج مسئله برای متغیرهای طراحی اعمال می‌شود. با توجه به مطالب بیان شده، مسئله طراحی بهینه جداسازهای لاستیکی هسته سربی برای سازه‌های ساختمانی به صورت رابطه (۱۷) فرمول‌بندی می‌شود:

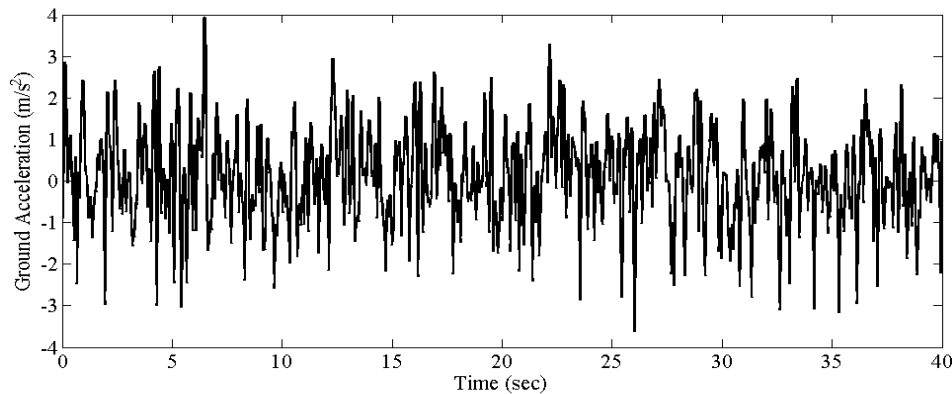
$$\text{Find: Design Variables } X = \begin{Bmatrix} X_y \\ T_2 \\ \alpha \\ \xi_b \end{Bmatrix}$$

$$\text{which minimizes Objective Function: } f(X) = J_1 + J_2 \quad (17)$$

$$\text{Subject to: } \begin{cases} X_{y \min} \leq X_y \leq X_{y \max} \\ T_{2 \min} \leq T_2 \leq T_{2 \max} \\ \alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max} \\ \xi_{b \min} \leq \xi_b \leq \xi_{b \max} \end{cases}$$

جهت تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی سازه‌ها و محاسبه پاسخ‌های لرزه‌ای برای بهینه‌سازی طراحی جداساز LRB از شتاب‌نگاشت تولید شده بوسیله روش تصادفی نویز سفید گوسی با دوره زمانی ۴۰ ثانیه و بیشینه شتاب $g \cdot 0.4$ استفاده می‌شود. شکل ۳

تصویر شتاب نگاشت تولید شده را نشان می‌دهد. همچنین در راستای اهداف تعریف شده، به منظور مطالعه رفتار و پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌های ساختمانی که با استفاده جداگرهای لاستیکی هسته سربی بهینه‌سازی شده، جداسازی شده‌اند از شتاب‌نگاشت زمین‌لرزه‌های نزدیک گسل استفاده می‌شود. به همین منظور از مولفه افقی و نزدیک گسل شتاب‌نگاشت زلزله‌های Northridge, Imperial Valley و Chichi استفاده می‌شود. مشخصات و جزئیات این زمین‌لرزه‌ها در جدول ۶ ارائه شده است.



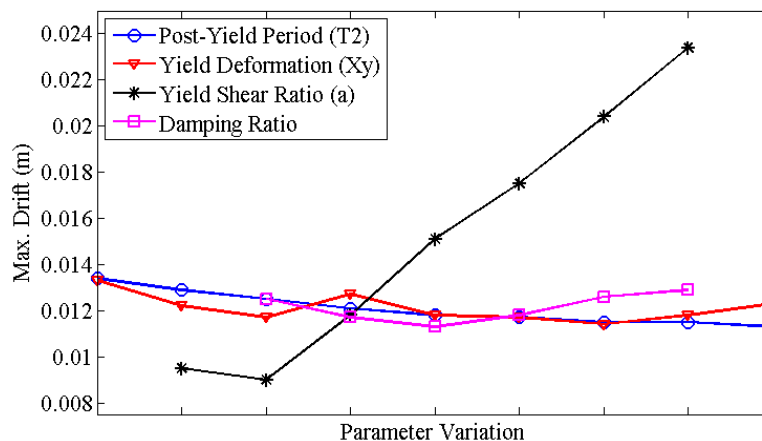
شکل ۳. تاریخچه زمانی شتاب زمین در حالت نویز سفید تصادفی

جدول ۶. مشخصات و جزئیات زمین‌لرزه‌های مورد استفاده در این پژوهش [۱۸]

زلزله	ایستگاه	بزرگا	فاصله (km)	PGA ($\frac{m}{s^2}$)	$\frac{PGV}{PGA}$
Imperial Valley	El Centro	۶.۵	۱.۳۵	۴.۴۰	۰.۲۶
Northridge	NWH-360	۶.۷	۶.۷	۵.۷۹	۰.۱۷
Chichi	TCU-052	۷.۶	۱.۸۴	۳.۵۶	۰.۵۲

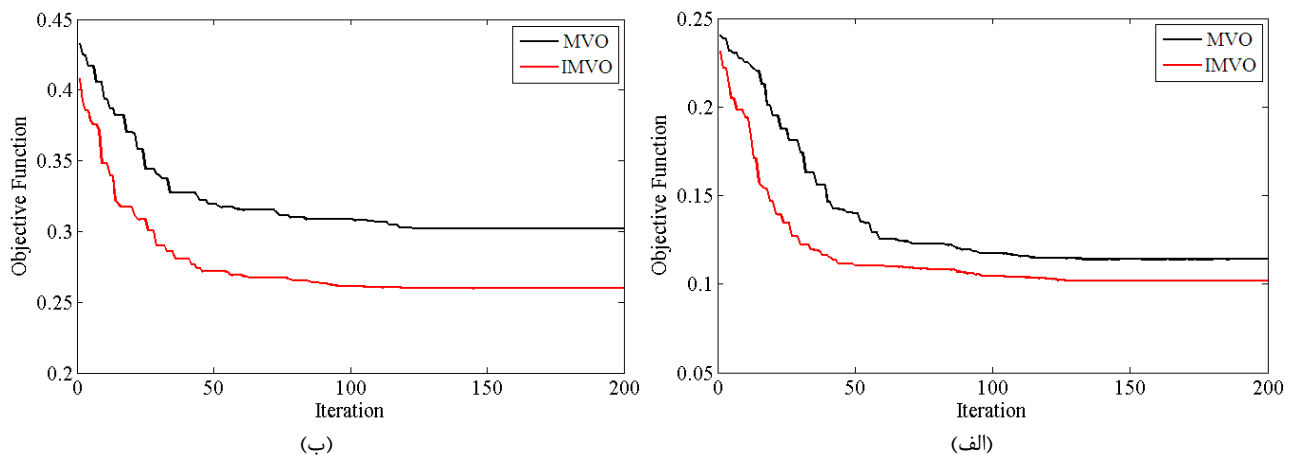
۶. بحث و بررسی نتایج

به منظور نمایش تاثیر هر یک از پارامترهای سیستم در طراحی جداساز از تحلیل حساسیت استفاده می‌شود. بنابراین در ابتدا، حساسیت رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های جداسازی شده با جداگرهای لاستیکی هسته سربی نسبت به تغییرات در مقادیر ضریب برش پایه تسلیم، زمان تناوب ثانویه، جابجایی تسلیم و ضریب میرایی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. تغییرات هر پارامتر در بازه $[-\%35, +\%35]$ نسبت به مقدار اولیه طراحی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. تغییرات پاسخ لرزه‌ای حداکثر دررفت به ازای تغییر هر مولفه در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، پاسخ دررفت سازه از حساسیت بسیار بالایی نسبت به ضریب برش پایه تسلیم برخوردار می‌باشد.



شکل ۴. تغییرات پاسخ دریافت حداکثر در سازه ساختمانی ۵ طبقه جداسازی شده به ازای تغییرات پارامترها سیستم

در بخش دوم، نتایج و خروجی مسئله بهینه سازی در طراحی سامانه های جداسازی با جداگر لاستیکی هسته سربی که شامل تاریخچه همگرایی تابع هدف، حداقل مقدار محاسبه شده برای تابع هدف و مقادیر متغیرهای طراحی بهینه می باشد، ارائه می گردد. در شکل ۵ نمودار تاریخچه همگرایی برای تابع هدف تعریف شده براساس پاسخ های لرزه ای کنترل شده در ساختمان جداسازی شده با جداگرهای لاستیکی هسته سربی برای الگوریتم های فراکاوشی بهینه سازی چند جهانی (MVO) و چند جهانی اصلاح شده (IMVO) نشان داده شده است. نتایج بدست آمده نشان می دهد که الگوریتم پیشنهاد شده IMVO از توانایی بهتری در حل مسئله طراحی بهینه جداسازی لاستیکی هسته سربی برخوردار می باشد. الگوریتم پیشنهادی IMVO در مقایسه با الگوریتم استاندارد MVO از قابلیت اکتشافی و سرعت همگرایی بالاتری برخوردار می باشد. مطابق با این نتایج، حداقل مقدار تعیین شده برای تابع هدف در مسئله بهینه سازی طراحی جداگرهای LRB، برای مدل سازه ای ۵ طبقه در حالت استفاده از الگوریتم MVO برابر با ۰.۱۱۳۸۹ و در حالت استفاده از الگوریتم IMVO برابر با ۰.۱۰۱۸۴ می باشد. همچنین برای مدل سازه ای ۱۰ طبقه در حالت استفاده از الگوریتم MVO برابر با ۰.۳۰۲۰۲ و در حالت استفاده از الگوریتم IMVO برابر با ۰.۲۵۹۵۷ می باشد. جداول ۷ و ۸ نتایج بدست آمده از طراحی بهینه جداگرهای لاستیکی هسته سربی را اعم از متغیرهای طراحی و قیود برای مدل سازه ای ۵ و ۱۰ طبقه نشان می دهند.



شکل ۵. همگرایی تابع هدف بهینه سازی جداگر LRB برای مدل (الف) ۵ طبقه (ب) ۱۰ طبقه

جدول ۷. نتایج طراحی بهینه برای مدل ۵ طبقه با الگوریتم های IMVO و IMVO

گروه	پارامتر	واحد	روش طراحی	
			الگوریتم MVO	الگوریتم IMVO
تابع هدف	تابع نسبت پاسخ کنترل شده	-	۰.۱۱۳۸۹	۰.۱۰۱۸۴
	نسبت برش پایه تسلیم (α)	-	۰.۰۷۳۱۳	۰.۰۵۰۹۴
متغیرهای طراحی	جابجایی تسلیم (X_y)	m	۰.۰۲۰۹۹	۰.۰۱۲۴۹۷
	زمان تناوب ثانویه (T_2)	sec	۲.۷۶۸۶	۲.۹۶۸۶
	نسبت میرایی (ξ_b)	%	۰.۱۴۰۸۱	۰.۲۳۰۳۸
قیود	نسبت سختی (α_k)	-	۰.۱۵۰۷۴	۰.۱۱۲۰۷
	جابجایی جداگر	m	۰.۹۸۴۰	۰.۳۸۳۴

جدول ۸. نتایج طراحی بهینه برای مدل ۱۰ طبقه با الگوریتم های IMVO و MVO

گروه	پارامتر	واحد	روش طراحی	
			الگوریتم MVO	الگوریتم IMVO
تابع هدف	تابع نسبت پاسخ کنترل شده	-	۰.۳۰۲۰۲	۰.۲۵۹۵۷
متغیرهای طراحی	نسبت برش پایه تسلیم (α)	-	۰.۰۹۸۲۶۹	۰.۰۶۴۶۶۲

طراحی	جابجایی تسلیم (X_y)	m	۰.۰۲۸۵۴۲	۰.۰۳۴۸۴۶
	زمان تناوب ثانویه (T_2)	sec	۲.۸۶۲۷	۲.۸۴۲۶
	نسبت میرایی ($\bar{\gamma}_B$)	%	۰.۲۴۱۸۲	۰.۲۱۶۷۵
	نسبت سختی (α_R)	-	۰.۱۴۲۶۹	۰.۲۶۸۵
قیود	جابجایی جداگر	m	۰.۶۵۹۲۳	۰.۵۰۶۳۶

در بخش آخر، رفتار لرزه‌ای سازه‌های ساختمانی جداسازی شده با LRB، برای حالت مختلف طراحی بهینه با الگوریتم‌های MVO و IMVO تحت زمین‌لرزه‌های حوزه نزدیک گسل ارزیابی می‌شود. در همین راستا نتایج پاسخ حداکثر دریافت بین طبقات و شتاب جانبی سازه در حالت‌های کنترل نشده و کنترل شده جداسازهای بهینه‌سازی شده تحت هر یک از زمین‌لرزه‌های نزدیک گسل Imperial Valley، Northridge و Chichi مقایسه می‌شوند. جدول ۹ مقادیر پاسخ‌های لرزه‌ای مدل‌های سازه‌ای ۵ و ۱۰ طبقه ارائه می‌دهد. مطابق با نتایج بدست آمده از تحلیل لرزه‌ای مدل‌های سازه‌ای تحت انواع مختلفی از زمین‌لرزه‌ها مشاهده می‌شود که جداسازهای طراحی شده با الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراکاوشی MVO و IMVO از قابلیت مناسبی در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای دریافت و شتاب برخوردار می‌باشد. در این میان جداسازهای طراحی شده با الگوریتم اصلاح شده پیشنهادی IMVO از توانایی بیشتری در بهبود رفتار لرزه‌ای سازه‌های جداسازی شده برخوردار است. همچنین همان طور که مشاهده می‌شود عملکرد سامانه‌های جداسازی شده برای مدل‌های سازه‌ای ۵ و ۱۰ طبقه با ارتفاع مختلف مشابه می‌باشد.

جدول ۹. پاسخ لرزه‌ای سازه جداسازی شده با جداگر طراحی شده با روش بهینه‌سازی

مدل سازه‌ای	پاسخ سازه	حالت	رویداد		
			Northridge	Imperial Valley	Chichi
۵ طبقه	دریافت حداکثر	کنترل نشده	۰.۰۳۱۵۵	۰.۰۲۹۹۸۷	۰.۰۵۰۱۸۱
		طراحی LRB با MVO	۰.۰۰۵۳۲	۰.۰۱۳۵۲۲	۰.۰۱۳۱۵۳
		طراحی LRB با IMVO	۰.۰۰۴۸۴	۰.۰۱۱۹۹۵	۰.۰۰۹۴۹
	شتاب حداکثر	کنترل نشده	۹.۵۹۷۷	۱۱.۸۹۵	۱۲.۴۹۳
		طراحی LRB با MVO	۳.۲۴۶۹	۷.۲۳۸۴	۶.۵۲۹۲
		طراحی LRB با IMVO	۲.۹۰۳۳	۶.۷۷۸۹	۵.۳۴۸۹
۱۰ طبقه	دریافت حداکثر	کنترل نشده	۰.۰۴۰۶۴۱	۰.۰۳۴۰۹	۰.۰۶۳۹۰۱
		طراحی LRB با MVO	۰.۰۱۱۵۶۳	۰.۰۱۷۳۷	۰.۰۱۸۴۲۲
		طراحی LRB با IMVO	۰.۰۰۷۶۱۶	۰.۰۱۵۲۱۸	۰.۰۱۴۵۲۲
	شتاب حداکثر	کنترل نشده	۱۰.۷۰۲	۱۱.۶۴۱	۱۳.۴۵۴
		طراحی LRB با MVO	۴.۰۷۸۹	۷.۲۵۳۴	۷.۷۲۱۳
		طراحی LRB با IMVO	۲.۳۳۴۶	۶.۳۲۸۴	۶.۰۰۹۳

۷. نتیجه‌گیری

یکی از ابزارهای موثر در بهبود رفتار سازه‌ها تحت بارهای خارجی، استفاده از سامانه‌های جداسازی لرزه‌ای می‌باشد که با مکانیزم ممانعت از انتقال ارتعاشات ناشی از حرکت زمین موجب کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای سازه می‌شود. با توجه به این که عوامل مختلفی می‌توانند عملکرد سامانه‌های جداسازی و رفتار لرزه‌ای سازه‌ها را تحت تاثیر قرار دهند، نیاز به مطالعه وابستگی رفتار سازه‌های جداسازی شده نسبت به عوامل خارجی و پارامترهای داخلی سیستم می‌باشد. در نتیجه طراحی سامانه‌های جداسازی می‌تواند با در نظر گرفتن این عوامل به عنوان متغیر تصادفی و در چهارچوب مسئله بهینه‌سازی صورت پذیرد. در همین راستا، هدف اصلی از انجام این پژوهش طراحی بهینه سیستم جداساز لرزه‌ای لاستیکی هسته سربی با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراکاوشی می‌باشد. همچنین تحلیل

حساسیت رفتار لرزه‌ای سازه‌های ساختمانی جداسازی شده نسبت به مشخصات مکانیکی سامانه جداساز لاستیکی هسته سربی و ارزیابی پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌های ساختمانی جداسازی شده‌ی تحت زمین لرزه‌های نزدیک گسل بررسی شدند. به عنوان یک الگوریتم فراکاوشی پرکاربرد و قدرتمند در حل مسائل بهینه‌سازی مهندسی از الگوریتم بهینه‌سازی چند جهانی (MVO) استفاده گردید. برای اصلاح قابلیت‌های الگوریتم در فاز اکتشاف و استخراج از روش آموزش برمی‌نای تضاد (OBL) استفاده گردید که روش پیشنهادی به عنوان الگوریتم بهینه‌سازی چند جهانی اصلاح شده (IMVO) معرفی شد. عملکرد الگوریتم چند جهانی اصلاح شده (IMVO) برای حل مسائل بهینه‌سازی در توابع ریاضیاتی مبنا و طراحی بهینه جداسازهای لاستیکی هسته سربی مورد استفاده قرار گرفت. برای توابع ریاضیاتی از ۱۰ تابع مبنا استفاده شد. همچنین برای انجام مطالعات عددی از مدل‌های سازه ساختمانی ۵ و ۱۰ طبقه با سیستم قاب برشی جرم متمرکز تحت یک زمین‌لرزه با توزیع تصادفی با بیشینه شتاب $0.4g$ استفاده گردید. به منظور مدل‌سازی رفتار غیرخطی جداساز لاستیکی هسته سربی از مدل دو خطی استفاده گردید. همچنین برای مطالعه رفتار لرزه‌ای سازه‌های جداسازی شده از روش تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی استفاده شد. جهت ارزیابی پاسخ‌های لرزه‌ای، مولفه‌های افقی شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک گسل زمین‌لرزه‌های پیشین مانند Northridge, Imperial Valley و Chichi مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج تحلیل حساسیت در رفتار لرزه‌ای سازه‌های ساختمانی جداسازی شده با جداگرهای لاستیکی هسته سربی نشان می‌دهد که پارامتر ضریب برش پایه تسلیم بیشترین تاثیر را بر عملکرد جداگرها دارد. نتایج نشان دادند که الگوریتم اصلاح شده پیشنهادی از توانایی بالاتری در حل مسائل بهینه‌سازی در توابع ریاضیاتی مبنا و طراحی بهینه جداسازهای لاستیکی هسته سربی برخوردار می‌باشد. نتایج پاسخ حداکثر دریافت بین طبقات و شتاب جانبی سازه در حالت‌های کنترل نشده و کنترل شده جداسازهای بهینه‌سازی شده تحت هر یک از زمین‌لرزه‌های نزدیک گسل Northridge, Imperial Valley و Chichi مقایسه شدند. مطابق با نتایج بدست آمده از تحلیل لرزه‌ای مدل‌های سازه‌ای تحت انواع مختلفی از زمین‌لرزه‌ها مشاهده می‌شود که جداسازهای طراحی شده با الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراکاوشی MVO و IMVO از قابلیت مناسبی در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای دریافت و شتاب برخوردار می‌باشد. در این میان جداسازهای طراحی شده با الگوریتم اصلاح شده پیشنهادی IMVO از توانایی بیشتری در بهبود رفتار لرزه‌ای سازه‌های جداسازی شده برخوردار است. همچنین همان طور که مشاهده می‌شود عملکرد سامانه‌های جداسازی شده برای مدل‌های سازه‌ای ۵ و ۱۰ طبقه با ارتفاع مختلف مشابه می‌باشد.

منابع

- Camisón, César. And Villar-López, Ana. (2011). Non-technical innovation: Organizational memory and learning capabilities as antecedent factors with effects on sustained competitive advantage. *Industrial Marketing Management*. 40 (2011). 1294–1304
- Hazen, Benjamin and Terry Anthony. (2012). Toward creating competitive advantage with logistics information technology. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*. Vol. 42. No. 1. 8-35
- Anajafi, H.R., Poursadr, K., Roohi, M. and Bell, E.S. (2020). Effectiveness of Seismic Isolation for Long-Period Structures Subject to Far-Field and Near-Field Excitations. *Frontiers in Built Environment*, 6(24)
- Cancellara, D. and Angelis F.D. (2016). A base isolation system for structures subject to extreme seismic events characterized by anomalous values of intensity and frequency content. *Composite Structures*, 157, 285-302
- Castaldo, P., Palazzo, B. and Vecchia, P.D. (2015). Seismic Reliability of Base-Isolated Structures With Friction Pendulum Bearings. *Engineering Structures*, 95, 80-93



- Choudhury, S.S. and Patro, S.K. (2020). Seismic Control of Soft Storey Buildings Using LRB Isolation System. Recent Developments in Sustainable Infrastructure. Lecture Notes in Civil Engineering, 75. Springer, Singapore
- Cheng, F.Y., Jiang, H. and Lou, K. (2008). Smart Structures, Innovative Systems for Seismic Response Control. CRC Press, Boca Raton, FL, USA
- Colungaa, A.T. and Rojas, C.Z. (2006). Dynamic torsional amplifications of base-isolated structures with an eccentric isolation system. Engineering Structures, 28, 72-83
- Dorigo, M. and Caro, G.D. (1999). Ant colony optimization: a new meta-heuristic. Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation-CEC99, Washington, DC, USA, 2, 1470-1477
- Ei-Bayoumi, K., Naguib, M. and Salem, F.A. (2015). Dynamic Analysis of High Rise Seismically Isolated Buildings. American Journal of Civil Engineering, SciencePG, 20150302.13
- Flora, A., Perrone, G. and Cardone, D. (2020). Evaluating Collapse Fragility Curves for Existing Buildings Retrofitted Using Seismic Isolation. Applied Sciences, 10, 2844
- Hayden, C.P., Bray, J.D. and Abrahamson, N.A. (2014). Selection of Near-Fault Pulse Motions. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 140(7), 04014030
- Jamalzadeh, A. and Barghian, M. (2015). Dynamic Response of a Pendulum Isolator System Under Vertical and Horizontal Earthquake Excitation. Periodica Polytechnica Civil Engineering
- Kaveh, A. (2014). Advances in Metaheuristic Algorithms for Optimal Design of Structures. Springer Verlag, Wien
- Kilar, V. and Koren, D. (2009). Seismic behaviour of asymmetric base isolated structures with various distributions of isolators. Engineering Structures, 31, 910-921
- Matsagar, V.A. and Jangid, R.S. (2004). Influence of isolator characteristics on the response of base-isolated structures. Engineering Structures, 26, 1735-1749
- Mavronicola, E.A., Polycarpou, P.C. and Komodromos, P. (2020). Effect of ground motion directionality on the seismic response of base isolated buildings pounding against adjacent structures. Engineering Structures, 207, 110202
- Mirjalili, S., Mirjalili, S.M., Hatamlou, A. (2016). Multi-Verse Optimizer: a nature-inspired algorithm for global optimization. Neural Computing and Applications, 27, 495-513
- Naeim, F. and Kelly, J.M. (1999). Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice. John Wiley & Sons, Inc.
- Newmark, N.M. (1959). A method of computation for structural dynamics. Journal of the engineering mechanics division, 85(3), 67-94
- Peng, Y., Ma, Y., Huang, T. and Domenico, D. (2020). Reliability-Based Design Optimization of Adaptive Sliding Base Isolation System for Improving Seismic Performance of Structures. Reliability Engineering and System Safety.
- Providakis, C.P. (2009). Effect of supplemental damping on LRB and FPS seismic isolators under near-fault ground motions. Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 29, 80-90
- Rong, Q. (2019). Optimum parameters of a five-story building supported by lead-rubber bearings under near-fault ground motions. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 1-16
- Saremi, S., Mirjalili, S. and Lewis, A. (2017). Grasshopper Optimisation Algorithm: Theory and application. Advances in Engineering Software, 105, 30-47
- Soong, T.T. and Spencer, B.F. (2002). Supplemental energy dissipation: state of the art and state of the practice. Engineering Structures, 24, 243-259
- Spencer, B.F. and Soong, T.T. (1999). New application and development of active, semi-active and hybrid control techniques for seismic and non-seismic vibration in the USA. Proceedings of International Post-SMIRT Conference Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibration of Structures Cheju, Korea
- Spyrakos, C.C., Koutromanos, I.A. and Maniatakis, C.A. (2009). Seismic response of base-isolated buildings including soil-structure interaction. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 29, 658-668
- Tanwer, M.T., Kazi, T.A. and Desai, M. (2018). A Study on Different Types of Base Isolation System over Fixed Based. Information and Communication Technology for Intelligent Systems, Smart Innovation, Systems and Technologies, 106, 724-734
- Vargas, C.A.B., Diaz, I.M., Soria, J.M. and Palacios, J.H.G. (2020). Enhancing Friction Pendulum Isolation Systems Using Passive and Semi-Active Dampers. Applied Sciences, 10, 5621
- Yurdakul, M. and Yıldız, M.B. (2020). A study on seismic isolation of building used LRB. Challenge Journal of Structural Mechanics, 6(2), 52-60

Optimal design of lead rubber bearing isolator using an improved metaheuristic method based on opposition based learning

Milad Hemmati

MSc of Civil Engineering, University of Tabriz

Abstract

Various factors affect the performance of isolation systems under seismic loading, which can complicate the design of these seismic control tools. Therefore, the necessity of using optimization methods in design is revealed. In this article, the opposition-based learning method is used to improve the performance of the multi-verse optimization (MVO) algorithm. The improved multi-verse algorithm (IMVO) was used to solve optimization problems in mathematical benchmark functions and optimal design of lead rubber isolators. The sensitivity analysis of the seismic behavior of isolated building structures was studied in relation to the mechanical characteristics of the lead core rubber isolator (LRB) system. Then the seismic behavior of isolated buildings with LRB isolator was evaluated under different seismic excitations. In order to model the nonlinear behavior of the LRB isolator, a bilinear model was used. Also, the time history dynamic analysis method was used to study the seismic behavior of isolated structures. The results showed that the proposed modified algorithm has a higher ability to solve optimization problems in mathematical functions and the optimal design of lead rubber isolators. Also, the results of sensitivity analysis on the seismic behavior of isolated building structures with lead rubber isolators show that the yield base shear coefficient parameter shows the greatest impact on the seismic behavior of isolated structures.

Keywords: Optimization, multi-verse optimization algorithm, opposition based learning, lead rubber bearing isolator