

Optimization of triple-friction pendulum isolator using Kriging as a surrogate model under El Centro earthquake

Mahnaz Akbarzoghi¹, Behrouz Ahmadi-Nedushan^{2*}, Hamed Tajammolian³

1- MSc of Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

ABSTRACT

The triple friction pendulum isolator is adaptable and can exhibit variable stiffness and damping in response to different earthquakes. Therefore, the need to optimize the effective parameters of this isolator to achieve the desired performance is significant. In this research, the Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy (CMA-ES) algorithm is used to optimize the effective parameters of the triple friction pendulum isolator to minimize the maximum relative displacement between floors and the roof acceleration in two separate optimization processes. As optimizing complex models is computationally intensive and time-consuming, substituting the actual responses of the finite element model with cost-effective surrogate models results in significant time savings. In this article, structural analysis is performed using a nonlinear model implemented in OpenSees software, making the structural optimization process time-consuming and computationally expensive. To address this challenge, the Kriging model is employed as a surrogate to replace the finite element analysis computations necessary to calculate the responses, i.e., minimizing the maximum relative displacement between floors and the roof acceleration. The optimization results using the combination of the CMA-ES algorithm and the surrogate model are compared with optimization using the genetic algorithm. The findings reveal that utilizing the surrogate model for optimization reduces relative displacement between floors by 66.39% and roof acceleration by 12.28%. Additionally, computational costs are reduced by over 84%.

ARTICLE INFO

Receive Date: 31 October 2023

Revise Date: 29 February 2024

Accept Date: 08 April 2024

Keywords:

Triple concave friction pendulum,
Optimization,
Surrogate model,
Kriging,
OpenSees

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2024.421572.3246>

*Corresponding author: Behrouz Ahmadi-Nedushan.
Email address: behrooz.ahmadi@yazd.ac.ir

بهینه‌سازی جداگر آونگی اصطکاکی سه‌گانه با استفاده از روش کریجینگ به عنوان

مدل جایگزین تحت زلزله‌ی ال سنتر

مهناز اکبرزاعی^۱، بهروز احمدی ندوشن^{۲*}، حامد تجملیان^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

چکیده

جداگر آونگی اصطکاکی سه‌گانه نوعی از جداگرهای انطباق‌پذیر است که می‌تواند در برابر زلزله‌های متفاوت سختی و میرایی متغیری از خود نشان دهد. بنابراین نیاز به بهینه‌سازی پارامترهای موثر این جداگر برای دستیابی به عملکرد مطلوب قابل توجه است. در این تحقیق، از الگوریتم استراتژی تکاملی انطباق ماتریس کوواریانس برای بهینه‌سازی پارامترهای موثر جداگر آونگی اصطکاکی سه‌گانه به منظور کمینه کردن حداکثر جابجایی نسبی بین طبقات و شتاب سقف در دو فرآیند بهینه‌سازی مجزا استفاده شده است. از آنجایی که بهینه‌سازی مدل‌های پیچیده از نظر محاسباتی زمان‌بر است، جایگزینی پاسخ‌های واقعی مدل اجزای محدود با مدل‌های جایگزین مقرون به صرفه منجر به صرفه جویی در زمان می‌شود. در این مقاله، تحلیل سازه با استفاده از یک مدل غیرخطی پیاده‌سازی شده در نرم‌افزار *OpenSees* انجام می‌شود که فرآیند بهینه‌سازی را زمان‌بر و از نظر محاسباتی گران می‌کند. برای پرداختن به این چالش، مدل کریجینگ به عنوان جایگزینی برای محاسبات تحلیل المان محدود لازم برای محاسبه پاسخ‌ها، یعنی حداکثر جابجایی نسبی بین طبقات و شتاب سقف، استفاده شده است. نتایج بهینه‌سازی با استفاده از ترکیب الگوریتم *CMAES* و مدل جایگزین با بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک مقایسه گردیده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که با استفاده از مدل کریجینگ به عنوان مدل جایگزین برای بهینه‌سازی، جابجایی نسبی بین طبقات را تا ۶۶.۳۹ درصد و شتاب سقف را ۱۲.۲۸ درصد کاهش یافته است. علاوه بر این، هزینه‌های محاسباتی نیز بیش از ۸۴٪ کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: جداگر آونگی اصطکاکی سه‌گانه، بهینه‌سازی، مدل جایگزین، کریجینگ، اپنسیس

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2024.421572.3246	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2024.421572.3246	۱۴۰۳/۰۹/۳۰	۱۴۰۳/۰۱/۲۰	۱۴۰۳/۰۱/۲۰	۱۴۰۲/۱۲/۱۰	۱۴۰۲/۰۸/۰۹
			بهروز احمدی ندوشن behrooz.ahmadi@yazd.ac.ir		*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

سازه‌های دارای جداگر لرزه‌ای به دلیل مزایایی که در کنترل پارامترهای تقاضای مهندسی^۱ و خسارات ناشی از آن دارند، برای کاهش خطر زلزله محبوبیت پیدا کرده‌اند [۱]. جداگر لرزه‌ای، دستگاه‌هایی هستند که در زیر روسازه و بالای فنداسیون قرار می‌گیرند تا با اجازه دادن به جابجایی جداگر به جای جابجایی کل روبنا، زمان تناوب روسازه را افزایش دهند و باعث جابجایی زیادی در جداگر شوند [۲]. به طور کلی، جداگرهای لرزه‌ای را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: (۱) جداگرهای الاستومری^۲ و (۲) جداگرهای اصطکاکی^۳. جداگرهای لاستیکی با هسته سربی محبوب‌ترین نمونه از جداگرهای الاستومری هستند، در حالی که سیستم‌های آونگ اصطکاکی و آونگ‌های اصطکاکی مقعر دو و سه‌گانه برجسته‌ترین موارد جداگرهای اصطکاکی هستند [۳].

جداگر آونگی اصطکاکی سه‌گانه، یکی از سیستم‌های جذابی هستند که انرژی اعمال شده توسط نیروی زلزله را از روبنا در یک پیکربندی تطبیقی جدا می‌کند. به طور خاص، با ترکیب سختی و میرایی‌های مختلف، طراحان می‌توانند به سطح عملکرد مطلوب خود در سطح خطرهای مختلف، به عنوان مثال، حداکثر زلزله در نظر گرفته شده (MCE)^۴ بر خلاف سیستم‌های سنتی برسند [۴، ۵].

طراحی بهینه سیستم‌های پیچیده یک موضوع قابل اهمیت است و مهندسان سازه، به دنبال طراحی سازه با راندمان بالا هستند، به طوری که طراحی و ساخت آن‌ها نیاز به حداقل هزینه و مواد داشته باشد. این مقاله با استفاده از بهینه‌سازی به دنبال بهترین پاسخ برای پارامترهای مؤثر جداگر آونگی اصطکاکی سه‌گانه با محدود کردن بیشینه پاسخ سازه می‌باشد. بهینه‌سازی مدل‌های پیچیده، زمان محاسباتی بالایی دارد و بار محاسباتی سنگینی را تحمیل می‌کند. در این‌گونه مدل‌ها، می‌توان پاسخ‌های واقعی مدل را با مدل‌های جایگزین ارزان قیمت جایگزین کرد. مدل جایگزین^۵ یا متامدلینگ^۶ همان جایگزین کردن مدل ساده بجای مدل اصلی است، به عنوان مثال، یک مدل پیچیده‌ی ساخته شده در اپنسیس [۶]، با استفاده از برخی تقریب‌ها، پاسخ‌های سازه را محاسبه می‌کند و مدل جایگزین را برای آن پیشنهاد می‌دهد. در میان مدل‌های جایگزین، محبوبیت روش کریجینگ^۷ [۷] در کاربردهای گسترده‌ای آشکار شده است.

امروزه سازه‌های دارای جداگر آونگی اصطکاکی سه‌گانه تحت زلزله‌های واقعی و مصنوعی، محبوبیت بسیاری پیدا کرده است. به عنوان مثال، بررسی شکنندگی لرزه‌ای برای سازه‌های فولادی غیرمستقران تحت زلزله‌ی حوزه نزدیک [۸]، ارزیابی عملکرد مبتنی بر ریسک ساختمان‌های فولادی و مقایسه آن‌ها با جداگرهای لاستیکی سربی تحت زلزله‌ی حوزه دور [۱]، ارزیابی عملکرد دو بعدی و سه بعدی گنبدی‌هایی که در معرض هر دو زلزله‌های حوزه دور و نزدیک [۹] و بررسی رفتار جداگر لرزه‌ای پل‌های کابلی پایه‌دار که بر روی جداگر آونگی اصطکاکی سه‌گانه قرار دارند و مقایسه آن‌ها با جداگر آونگی اصطکاکی دو‌گانه و ساده تحت دو زلزله واقعی و یک رکورد مصنوعی در هر دو جهت x و y [۱۰]. از طرفی، تحقیقات در زمینه‌ی بهینه‌سازی سازه‌های دارای جداگر آونگی اصطکاکی سه‌گانه، در حال انجام است. به عنوان مثال، معین درباری و تقی‌خانی [۵] اثر زلزله حوزه نزدیک را در بهینه‌سازی روبنای دارای جداگر آونگی اصطکاکی سه‌گانه وارد کردند. آن‌ها هر دو بهینه‌سازی تک و دو هدفه را با ترکیب دو پاسخ سازه، حداکثر جابجایی نسبی بین طبقه و حداکثر جابجایی در سطح جداگر به طور جداگانه و همزمان انجام دادند. اخیراً، از دیدگاه مهندسی زلزله، سه مطالعه مهم مربوط به بهینه‌سازی سازه‌های دارای جداگر لرزه‌ای که بر روی جداگر آونگی اصطکاکی سه‌گانه توسط زو و همکاران منتشر شده است. زو و همکاران در مقاله‌ی اول عملکرد جداگر آونگی اصطکاکی سه‌گانه را برای ساختمان‌های بلند در سطوح خرابی مختلف و تغییرات رکورد به رکورد را با پنج زلزله واقعی و دو زلزله مصنوعی بررسی کردند. در این مقاله بیشینه جابجایی نسبی بین طبقه و بیشینه شتاب بام در تابع هدف ترکیبی با استفاده از الگوریتم

¹ Engineering demand parameters

² Elastomeric bearings

³ Sliding bearings

⁴ Maximum Considered Earthquake

⁵ Surrogate model

⁶ Metamodeling

⁷ Kriging

ژنتیک بهینه شد. بر این اساس پارامترهای طراحی بهینه محاسبه شده، عملکرد لرزه‌ای یک ساختمان ۳۳ طبقه قاب خمشی دارای جداگر لرزه‌ای را به طور موثر بهبود بخشید [۱۱]. توسط زو و همکاران در مقاله دوم، تأثیر بارهای زلزله و باد به عنوان بار خارجی بر پارامترهای طراحی بهینه مورد مطالعه قرار گرفته است. بهینه‌سازی برای ساختمان بلندمرتبه مورد مطالعه در معرض زلزله و باد به طور جداگانه با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام شد. در این مطالعه، حداکثر جابجایی در سطح جداگر نیز در سطح MCE به بیشینه جابجایی نسبی بین طبقه و بیشینه شتاب بام اضافه شده‌است. با توجه به نتایج، بار زلزله تأثیر بیشتری بر پارامترهای طراحی سیستم‌های دارای جداگر آونگی اصطکاکی سه‌گانه در مقایسه با بار باد داشت [۱۲]. زو و همکاران در مطالعه جدیدتر، ایمنی سیستم‌های دارای جداگر آونگی اصطکاکی سه‌گانه با معرفی احتمال فروپاشی ساختمان در تابع هدف و محدود کردن آن به ۱۰ درصد در سطح MCE را بررسی کردند. در نتیجه پارامترهای طراحی پیشنهاد شده توسط رویکرد بهینه‌سازی چند هدفه پیشنهادی بهتر از بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک بود. این مطالعات، این نتیجه را تقویت می‌کند که طراحان باید در طول طراحی جداگر آونگی اصطکاکی سه‌گانه به جنبه‌های ایمنی توجه بیشتری داشته باشند [۱۳].

۲- فرمول بندی و فرضیات تحلیل

در این بخش توضیح مختصری در مورد مؤلفه‌های ریاضی و نظریه‌های به کار رفته در مطالعه حاضر ارائه می‌گردد.

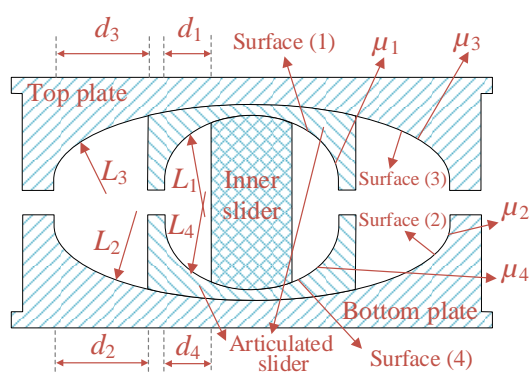
۲-۱- جداگر آونگی اصطکاکی سه‌گانه

همانطور که در شکل ۱ (الف) نشان داده شده است، یک جداگر اصطکاکی آونگی سه‌گانه شامل یک لغزنده صلب داخلی است که توسط چهار سطح مقعر از جنس فولاد ضد زنگ احاطه شده است که این سطوح با یک ماده‌ی لغزنده‌ی غیرفلزی پوشانده شده است. به طور کلی هر سطح دارای سه متغیر شعاع انحنای موثر، ضریب اصطکاک و ظرفیت جابجایی سطح لغزنده است که مطابق شکل با ۱۲ پارامتر تعریف می‌شود. تحت تحریک لرزه‌ای، جداگر اصطکاکی آونگی سه‌گانه با تغییر سختی و میرایی، عملکردهای لغزشی مختلفی را ایجاد می‌کند. همانطور که در شکل ۱ (ب) نشان داده شده است، جداگر آونگی اصطکاکی سه‌گانه برخلاف جداگر لرزه‌ای سنتی عملکرد تطبیقی مناسبی تحت شرایط مختلف خطر از خود نشان می‌دهند.

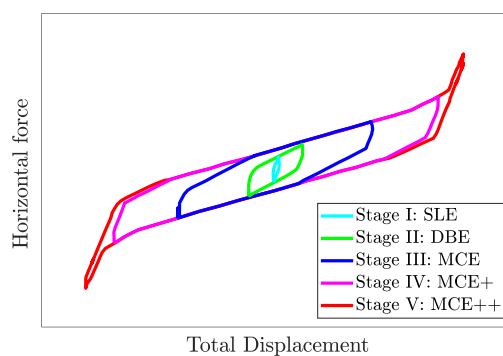
جداگر آونگی اصطکاکی سه‌گانه در طول سطوح مختلف، دارای چهار مرحله لغزش است. مرحله اول حرکت از سطوح دارای ضریب اصطکاک کمتر شروع می‌شود. بنابراین در حالی که سطوح ۲ و ۳ در حالت سکون هستند حرکت روی سطوح ۱ و ۴ آغاز می‌شود این مرحله تنها ویژگی‌های سیستم جداگر را در سطوح پایین تحریک مشخص می‌کند (زمین لرزه سطح سرویس^۸). مرحله دوم لغزش بر روی سطح ۲ شروع می‌شود و بعد از تغییر جهت، لغزش تنها روی سطوح ۱ و ۴ اتفاق می‌افتد. با متوقف شدن حرکت در سطح ۴، دوباره حرکت در سطح ۲ آغاز شده و حرکت در سطوح ۱ و ۲ ادامه می‌یابد. این عملکرد ویژگی‌های اولیه سیستم جداگری را تحت سطوح متوسط تحریک مشخص می‌کند (زمین لرزه سطح طراحی^۹). مرحله سوم حرکت بر روی سطح ۱ متوقف می‌شود و سپس لغزش در سطح ۲ و ۳ رخ می‌دهد. ضریب اصطکاک سطح مقعر فوقانی ۳ به اندازه کافی بزرگ است تا از لغزش تا سطوح شدید تحریک جلوگیری کند (زمین لرزه سطح حداکثری). مرحله چهارم تماس لغزنده با مهار کننده روی سطح ۲، حرکت روی سطح ۱ متوقف می‌شود و لغزش روی سطوح ۳ و ۴ رخ می‌دهد. این عملکرد ویژگی‌های جداگر لرزه‌ای را فراتر از زمین لرزه سطح حداکثری تعریف می‌کند. مرحله پنجم باربری لغزنده بر روی مهارکننده سطوح ۲ و ۳ و سپس لغزش روی سطوح ۱ و ۴ ادامه می‌یابد [۱۴].

⁸ Service level earthquake

⁹ Design basis earthquake

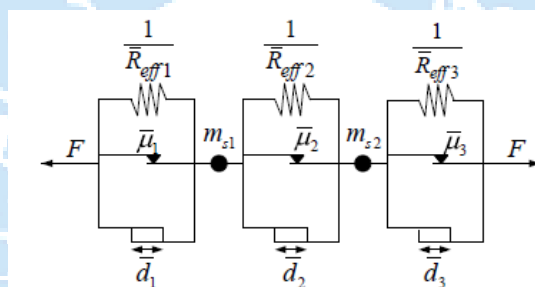


(الف)



(ب)

شکل ۱: الف) سطح مقطع یک جداگر آونگی اصطکاکی سه گانه و تعریف پارامترها. ب) رفتار پنج مرحله‌ای سیستم‌های جداگر آونگی اصطکاکی سه گانه. رفتار هیستریزس جداگر آونگی اصطکاکی سه گانه توسط فنز و کنستانتینو با استفاده از یک مدل با سه آونگ اصطکاکی تکی همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است شبیه‌سازی شده است و پارامترهای اختصاص داده شده به هر آونگ اصطکاکی یگانه در جدول ۱ خلاصه شده است [۴].



شکل ۲: سه المان جداگر آونگی تکی برای مدل‌سازی جداگر آونگی اصطکاکی سه گانه [۴].

جدول ۱: پارامترهای مدل سری از جداگر آونگی اصطکاکی سه گانه.

ظرفیت جابجایی	شعاع انحنا	ضریب اصطکاک	المان
$\bar{d}_1 = d_{Total} - (d_2 + d_3)$	$\bar{R}_{eff 1} = R_{eff 2} + R_{eff 3}$	$\bar{\mu}_1 = \mu_2 = \mu_3$	۱
$\bar{d}_2 = \frac{R_{eff 1} - R_{eff 2}}{R_{eff 1}} d_1$	$\bar{R}_{eff 2} = R_{eff 1} - R_{eff 2}$	$\bar{\mu}_2 = \mu_1$	۲
$\bar{d}_3 = \frac{R_{eff 4} - R_{eff 3}}{R_{eff 4}} d_4$	$\bar{R}_{eff 3} = R_{eff 4} - R_{eff 3}$	$\bar{\mu}_3 = \mu_4$	۳

۲-۲- به دست آوردن معادله حرکت

مطابق شکل ۲ برای مدل‌سازی جداگر آونگی اصطکاکی سه گانه از سه المان جداگر آونگی تکی به صورت سری استفاده شده است. برای هر المان سری، نیروی مقاوم از رابطه (۱) به دست می‌آید [۵]:

$$F_i = \frac{W}{N_{TFPB} R_{effi}} u_i + \mu_i \frac{W}{N_{TFPB}} z_i + \underbrace{k_{ri} (|u_i| - d_i) \operatorname{sgn}(u_i) H(|u_i| - d_i)}_{F_{ri}} \quad (1)$$

در رابطه‌ی (۱)، W وزن ساختمان و N_{TFPB} تعداد جداگر اصطکاکی استفاده شده در سازه است. R_{effi} شعاع انحنای سطح ۱ است و جابجایی نسبی با u_i نشان داده می‌شود. μ_i ضریب اصطکاک در رابط لغزشی و z_i پارامترهای هیستریزس مدل بوک-ون^{۱۰} است که از رابطه‌ی (۲) به دست می‌آید. سختی ناشی از برخورد لغزنده با نگهدارنده با k_{ri} نشان داده می‌شود. d_i ظرفیت جابجایی هر عنصر سری و H تابع هویساید است.

$$\frac{dZ_i}{dt} = \frac{1}{u_{yi}} \left\{ A_i - |Z_i|^{n_i} [\gamma_i \operatorname{sgn}(\dot{u}_i Z_i) + \beta_i] \right\} \dot{u}_i \quad (2)$$

که u_{yi} جابجایی تسلیم و \dot{u}_i سرعت لغزشی در عنصر سری است. A_i ، γ_i و β_i بدون بعد هستند و شکل حلقه هیستریزس را کنترل می‌کنند معادلات تعادل برای جرم‌های مختلف به صورت زیر است:

$$m_4 \ddot{u}_4 + c_s (\dot{u}_4 - \dot{u}_3) - k_s (u_4 - u_3) = -m_4 \ddot{u}_g(t) \quad (3)$$

$$m_3 \ddot{u}_3 + N_{TFPB} \left[\frac{W}{N_{TFPB} R_{eff3}} (u_3 - u_2) + \mu_3 \frac{W}{N_{TFPB}} Z_3 + k_{r3} (|u_3 - u_2| - d_3) \operatorname{sgn}(u_3 - u_2) H(|u_3 - u_2| - d_3) - \frac{c_s}{N_{TFPB}} (\dot{u}_4 - \dot{u}_3) - \frac{K_s}{N_{TFPB}} (u_4 - u_3) \right] + C_b \dot{u}_3 = -m_3 \ddot{u}_g(t) \quad (4)$$

$$m_2 \ddot{u}_2 + \frac{W}{N_{TFPB} R_{eff2}} (u_2 - u_1) + \mu_2 \frac{W}{N_{TFPB}} Z_2 + F_{r2} - \frac{W}{N_{TFPB} R_{eff3}} (u_3 - u_2) - \mu_3 \frac{W}{N_{TFPB}} Z_3 - F_{r3} = -m_2 \ddot{u}_g(t) \quad (5)$$

$$m_1 \ddot{u}_1 + \frac{W}{N_{TFPB} R_{eff1}} u_1 + \mu_1 \frac{W}{N_{TFPB}} Z_1 + F_{r1} - \frac{W}{N_{TFPB} R_{eff2}} (u_2 - u_1) - \mu_2 \frac{W}{N_{TFPB}} Z_2 - F_{r2} = -m_1 \ddot{u}_g(t) \quad (6)$$

$$\frac{dZ_1}{dt} = \frac{1}{u_{y1}} \underbrace{\left\{ A_1 - |Z_1|^{n_1} [\gamma_1 \operatorname{sgn}(\dot{u}_1 Z_1) + \beta_1] \right\}}_{z_1} \dot{u}_1 \quad (7)$$

$$\frac{dZ_2}{dt} = \frac{1}{u_{y2}} \underbrace{\left\{ A_2 - |Z_2|^{n_2} [\gamma_2 \operatorname{sgn}((u_2 - \dot{u}_1) Z_2) + \beta_2] \right\}}_{Z_1} (\dot{u}_2 - \dot{u}_1) \quad (8)$$

$$\frac{dZ_3}{dt} = \frac{1}{u_{y3}} \underbrace{\left\{ A_3 - |Z_3|^{n_3} [\gamma_3 \operatorname{sgn}((u_3 - \dot{u}_2) Z_3) + \beta_3] \right\}}_{Z_1} (\dot{u}_3 - \dot{u}_2) \quad (9)$$

لازم به ذکر است که m_1 تا m_4 به ترتیب عبارتند از: ۱. جرم لغزنده، ۲. جرم صفحات لغزش دو و سه، ۳. جرم صفحه لغزنده همراه با جرم کف و ۴. جرم روسازه.

¹⁰ Bouc-Wen model of hysteresis

در نتیجه معادله تعادل به صورت زیر:

$$\{ \dot{X} \} = [A] \{ X \} + [B] \quad (10)$$

که در نهایت $[A]$ و $[B]$ به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{W}{N_{TFPB} m_1 R_{eff 1}} + \frac{W}{N_{TFPB} m_1 R_{eff 2}} & \frac{W}{N_{TFPB} m_1 R_{eff 2}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_1 \frac{W}{N_{TFPB} m_1} & \mu_2 \frac{W}{N_{TFPB} m_1} & 0 & 0 \\ \frac{W}{N_{TFPB} m_2 R_{eff 2}} & -\left[\frac{W}{N_{TFPB} m_2 R_{eff 1}} + \frac{W}{N_{TFPB} m_2 R_{eff 2}} \right] & \frac{W}{N_{TFPB} m_2 R_{eff 3}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_2 \frac{W}{N_{TFPB} m_2} & \mu_3 \frac{W}{N_{TFPB} m_2} & 0 \\ 0 & \frac{W}{m_3 R_{eff 3}} & -\left[\frac{W}{m_3 R_{eff 3}} + \frac{K_s}{m_3} \right] & \frac{K_s}{m_3} & 0 & 0 & -\frac{(C_s + C_b)}{m_3} & \frac{C_s}{m_3} & 0 & 0 & \mu_3 \frac{W}{m_3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_s}{m_4} & \frac{K_s}{m_4} & 0 & 0 & \frac{C_s}{m_4} & -\frac{C_s}{m_4} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -z_2 & z_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -z_3 & z_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{F_{r2} - F_{r1} - \ddot{u}_g(t)}{m_1} \\ \frac{F_{r2} + F_{r3} - \ddot{u}_g(t)}{m_2 + m_2} \\ \frac{F_{r3} - \ddot{u}_g(t)}{m_3} \\ -\ddot{u}_g(t) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

۲-۳- مسئله بهینه‌سازی

در یک مسئله طراحی بهینه، هدف کاهش هزینه سازه و یا کاهش خسارت اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای در عین رعایت برخی محدودیت‌های عملکردی است. هر مسئله بهینه‌سازی شامل سه جز اصلی تابع هدف، قید و متغیرهای طراحی است. یک مسئله بهینه‌سازی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد [۱۶، ۱۵]:

$$\begin{aligned} f(x) &= f(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ g(x) &= g_i(x_1, x_2, \dots, x_m) < 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \\ x_k^l &\leq x_k \leq x_k^u \quad k = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (11)$$

$f(x)$ تابع هدف، $g(x)$ قیود نامساوی و m تعداد متغیرهای نامساوی، x_n متغیر طراحی و n تعداد متغیرهای طراحی و x_k^l و x_k^u به ترتیب کران پایین و بالای متغیر طراحی هستند.

۲-۴- الگوریتم‌های بهینه‌سازی

برای حل مسائل بهینه‌سازی الگوریتم‌های زیادی وجود دارد؛ یکی از روش‌های رایج حل چنین مسائلی استفاده از الگوریتم‌های تکاملی است [۱۷]. در این مقاله از الگوریتم ژنتیک و الگوریتم CMAES برای حل مسئله بهینه‌سازی استفاده شده است که در ادامه در این مورد توضیح داده شده است.

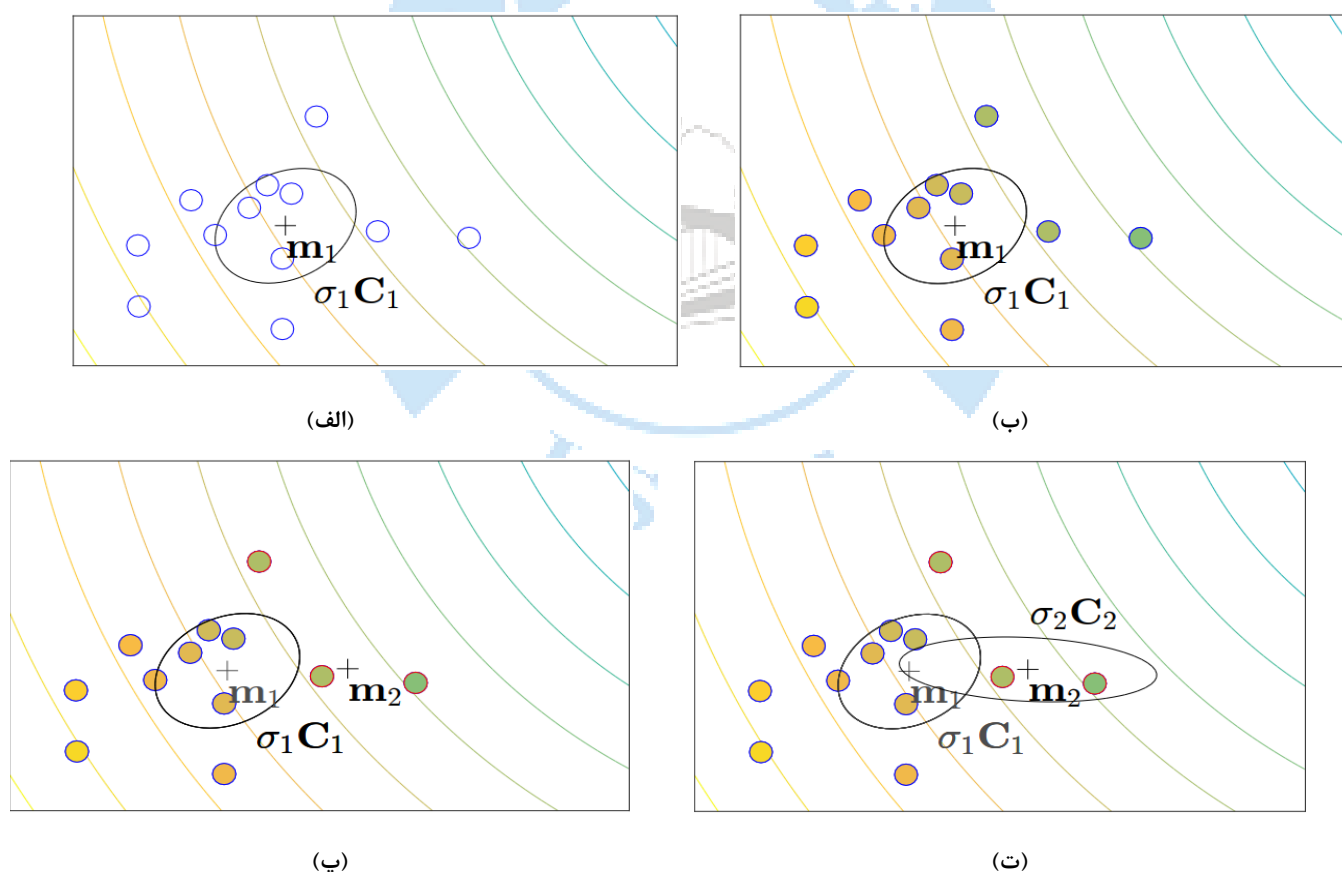
۲-۴-۱- الگوریتم CMAES

الگوریتم CMAES¹¹ یک الگوریتم بهینه‌سازی است که برای حل مسائل بهینه‌سازی استفاده می‌شود. اولین بار این الگوریتم توسط هانس [۱۸] ارائه شد. این الگوریتم در دسته‌ی الگوریتم‌های تکاملی قرار دارد و مبتنی بر نظریه تکامل روش‌های تطبیقی می‌باشد. الگوریتم CMAES ترکیبی از الگوریتم‌های تکاملی و روش‌های گرادیانی است که در بهینه‌سازی روابط غیرخطی با تعداد پارامترهای زیاد کاربرد دارد.

¹¹ Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy

این الگوریتم در هر مرحله، با تولید یک زیرمجموعه از نقاط، تنوع جمعیت را حفظ می‌کند و براساس عملکردهای هر نقطه، توزیعی جدید از نقاط را تولید می‌کند. یکی از پارامترهای توزیع، ماتریس کوواریانس^{۱۲} است که در هر نسل به روزرسانی می‌شود و در کیفیت جمعیت جدید این الگوریتم و در نتیجه، هدایت تکامل نقش مهمی دارد. به‌روزرسانی توزیع احتمال ادامه پیدا می‌کند تا مجموعه‌ی نقاط را به سمت رسیدن به کمینه مطلوب حرکت دهد. در این مقاله از الگوریتم CCMAES استفاده شده است. تفاوت اصلی این الگوریتم با الگوریتم CMAES در نحوه استفاده از ماتریس کوواریانس است. در این الگوریتم از یک به‌روزرسانی افزایشی کولسکی^{۱۳} برای ماتریس کوواریانس استفاده می‌شود که جایگزین تجزیه محاسباتی و عددی ماتریس کوواریانس می‌شود و هزینه‌ی محاسباتی را کاهش می‌دهد [۱۹].

همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود حلقه اصلی شامل چهار بخش اصلی است: (۱) در ابتدا همانند شکل ۳ (الف) تعدادی نقطه با استفاده از توزیع نرمال با میانگین، انحراف معیار و ماتریس کوواریانس مشخص در نظر گرفته می‌شود (در مرحله‌ی اول به صورت پیش‌فرض در نظر گرفته می‌شود؛ ۲) در مرحله‌ی دوم همانند شکل ۳ (ب) بر اساس مقادیر تابع هدف، نقاط وزندهی می‌شوند و مطلوبیت آن‌ها سنجیده می‌شود؛ ۳) در مرحله‌ی سوم همانند شکل ۳ (پ) میانگین نقاط با وزندهی جدید به روزرسانی می‌شود و (۴) در آخر همانند شکل ۳ (ت) میانگین انحراف معیار و کوواریانس به روزرسانی می‌شود و مراحل از مرحله‌ی ۱ تکرار می‌شود. این روند تا رسیدن به همگرایی ادامه دارد [۲۰].



شکل ۳: نحوه‌ی عملکرد الگوریتم CMA-ES [۱۹]

¹² Covariance Matrix Adaptation

¹³ Cholesky

۲-۴-۲- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یک روش بهینه‌سازی الهام گرفته از طبیعت و مبتنی بر تکرار است که اصول اولیه آن از علم ژنتیک اقتباس گردیده است [۲۲،۲۱]. پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک، معمولاً با تولید جمعیتی از کروموزوم‌ها (جمعیت اولیه از کروموزوم‌ها در الگوریتم‌های ژنتیک، معمولاً تصادفی تولید می‌شود و مقید به حد بالا و پایین متغیرهای مسئله هستند) آغاز می‌شود. در مرحله بعد، ساختارهای داده‌ای تولید شده (کروموزوم‌ها) ارزیابی می‌شوند و کروموزوم‌هایی که به شکل بهتری می‌توانند جواب بهینه مسئله مورد نظر (هدف) را نمایش دهند، شانس بیشتری برای تولید مثل نسبت به جواب‌های ضعیف‌تر پیدا می‌کنند. به عبارت دیگر، فرصت‌های تولید مثل بیشتری به این دسته از کروموزوم‌ها اختصاص داده می‌شود. میزان خوب بودن یک جواب، معمولاً نسبت به جمعیت جواب‌های کاندید فعلی سنجیده می‌شود و با این روش جواب بهینه مسئله پیدا می‌شود [۲۳].

۲-۵- مدل جایگزین

در سال‌های اخیر علی‌رغم توسعه در ظرفیت و پردازش کامپیوترها، هزینه بالای محاسباتی مدل‌های پیچیده مقرون به صرفه نیست. به همین دلیل روش‌های مدل جایگزین، به دلیل کارایی محاسباتی بالا برای تحلیل، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. مدل جایگزین یک تقریب ریاضی از یک مدل شبیه‌سازی پیچیده است که رابطه بین ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم را نشان می‌دهد. روش‌های مختلف مدل جایگزین، مانند روش سطح پاسخ^{۱۴} [۲۵،۲۴]، شبکه‌های عصبی مصنوعی^{۱۵} [۲۷،۲۶]، آشوب چندجمله‌ای^{۱۶} [۲۸] و روش کریجینگ [۳۰،۲۹]، برای مسائل مهندسی، به عنوان مثال، بهینه‌سازی پیشنهاد شده‌اند.

استفاده از مدل جایگزین به جای مدل واقعی در کاهش هزینه محاسباتی بسیار موثر است [۳۱]. بنابراین، یک راهکار موثر را می‌توان با تولید یکنواخت نمونه‌ها از طریق نمونه برداری هایپرکعب لاتین در کل فضا، و سپس غنی‌سازی^{۱۷} نمونه در منطقه مورد علاقه با استفاده از مدل جایگزین با استفاده از الگوریتم‌های "یادگیری فعال"^{۱۸} فرموله کرد. در نتیجه، یک مدل جایگزین قابل قبول را می‌توان در اطراف سطح حالت حد توسعه داد.

در مطالعه حاضر، مدل جایگزین معروف کریجینگ بجای پاسخ‌های سازه‌ی واقعی استفاده شده است. برای به حداقل رساندن خطای کریجینگ در فرآیند غنی‌سازی، از رابطه (۱۲) برای محاسبه‌ی تابع امکان‌پذیری مورد انتظار (EFF^{۱۹}) استفاده شده است [۳۲].

$$EFF(x) = \mu_{\hat{g}}(x) \left[2\phi\left(\frac{-\mu_{\hat{g}}(x)}{\sigma_{\hat{g}}(x)}\right) - \phi\left(\frac{-\epsilon - \mu_{\hat{g}}(x)}{\sigma_{\hat{g}}(x)}\right) - \phi\left(\frac{\epsilon - \mu_{\hat{g}}(x)}{\sigma_{\hat{g}}(x)}\right) \right] - \sigma_{\hat{g}}(x) \left[2\phi\left(\frac{-\mu_{\hat{g}}(x)}{\sigma_{\hat{g}}(x)}\right) - \phi\left(\frac{-\epsilon - \mu_{\hat{g}}(x)}{\sigma_{\hat{g}}(x)}\right) - \phi\left(\frac{\epsilon - \mu_{\hat{g}}(x)}{\sigma_{\hat{g}}(x)}\right) \right] + \epsilon \left[\phi\left(\frac{-\epsilon - \mu_{\hat{g}}(x)}{\sigma_{\hat{g}}(x)}\right) - \phi\left(\frac{\epsilon - \mu_{\hat{g}}(x)}{\sigma_{\hat{g}}(x)}\right) \right] \quad (12)$$

¹⁴ Responses surface

¹⁵ Artificial neural networks

¹⁶ Polynomial chaos

¹⁷ Enrichment

¹⁸ Active learning

¹⁹ Expected feasibility function

که در آن $\mu_{\hat{g}}$ و $\sigma_{\hat{g}}$ میانگین و انحراف معیار پیش‌بینی \hat{g} را توصیف می‌کنند و $\epsilon = 2\sigma_{\hat{g}}(x)$. علاوه بر این، ϕ و φ به ترتیب تابع توزیع احتمال و تابع توزیع تجمعی یک متغیر نرمال استاندارد را نشان می‌دهند. بنابراین، یافتن نمونه غنی‌سازی بعدی را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$s^* = \arg \max_{s \in S} EFF(s) \quad (13)$$

برای نظارت بر دقت لازم در مرحله غنی‌سازی، معیار همگرایی زیر برای توقف غنی‌سازی به صورت زیر اعمال می‌شود:

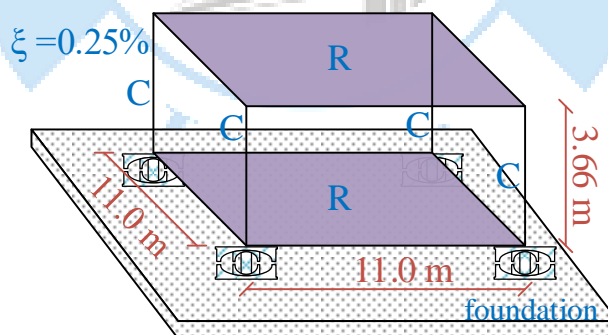
$$\max_{s \in S} EFF(s) \geq 10^{-3} \quad (14)$$

بعد از اینکه یک فضای طراحی نسبتاً دقیق به کمک کریجینگ ساخته شده است برای یافتن بهترین طرح ممکن، استفاده از یک الگوریتم جستجوی کلی ضروری است.

۳- مثال عددی

۳-۱- صحت سنجی مدل

برای بررسی صحت‌سنجی مدل، برنامه‌ای با لینک کردن نرم افزار متلب و اپنسیس نوشته و نتایج آن مدل با مدل مقاله فنز و کنستانتینو مقایسه شده است [۳۳]. مشخصات مدل از قبیل ابعاد تیر و ستون‌ها در شکل ۴ و جدول ۲ ارائه شده است. سازه یک طبقه با وزن روسازه ۱۳۳/۳۴ کیلو نیوتون و وزن دال کف ۶۶/۶۷ کیلو نیوتون با دوره تناوب رو سازه ۰/۲ ثانیه است. رکورد زلزله استفاده شده برای صحت سنجی، مولفه‌ی ۱۸۰ درجه زلزله السنترو ۱۹۴۰ با شتاب بیشینه‌ی ۰/۳۱ شتاب g و ضریب بزرگنمایی برای اینکه میراگر تمام رژیم‌های لغزش را داشته باشد برابر با ۲/۱۵ در نظر گرفته شده است.

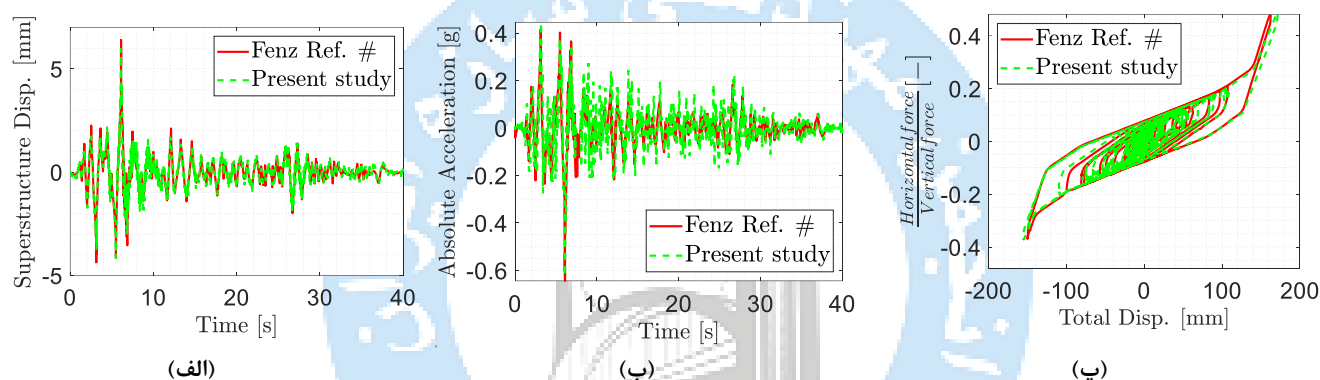


شکل ۴: ساختمان دارای جداگر لرزه‌ای برای بررسی مدل و مشخصات آن

جدول ۲: مشخصات سازه دارای جداگر جهت بررسی مدل و صحت‌سنجی

مشخصات مقطع	سطح مقطع	ممان اینرسی	ثابت پیچش	سطح مقطع برشی	جرم	وزن
	(mm ²)	(mm ⁴)	(mm ⁴)	(mm ²)		
ستون (C)	5.0×10 ⁶	6.851×10 ⁷	1.0×10 ⁸	5.0×10 ⁶	0	0
اعضای صلب (R)	5.0×10 ⁶	1.0×10 ¹¹	1.0×10 ⁸	5.0×10 ⁶	0	0

برای ساخت جداگر اصطکاکی آونگی سه‌گانه در نرم افزار اپنسیس از المان TripleFrictionPendulum استفاده شده است. بعد از مدل‌سازی کامل مسئله، خروجی‌ها از قبیل جابجایی روبنا، تاریخچه زمانی شتاب و منحنی هیستریزیس محاسبه گردید و با نمودارهای موجود در مقاله‌ی مرجع مقایسه شد. در شکل ۵ نتایج مقایسه آورده شده است که رنگ قرمز نتایج مقاله مرجع و رنگ سبز نتایج مربوط به مدل ساخته شده در اپنسیس است که با توجه به انطباق خوب منحنی‌ها می‌توان نتیجه گرفت که مدل ایجاد شده در اپنسیس صحیح است و می‌توان از آن برای بررسی‌های دیگر از این مدل استفاده نمود.



شکل ۵: مقایسه خروجی مثال عددی با مرجع [۵]: (الف) تاریخچه زمانی جابجایی روبنا؛ (ب) تاریخچه زمانی شتاب (پ) منحنی هیستریزیس

۳-۲- بهینه‌سازی جداگر اصطکاکی آونگی سه‌گانه

در مسئله‌ی بهینه‌سازی قبل از هر چیزی لازم است که سه جز اصلی تابع هدف، قید و متغیرهای طراحی تعریف شوند.

۳-۲-۱- متغیر طراحی

در عمل، طراحی جداگر اصطکاکی آونگی سه‌گانه از یک دستورالعمل سه‌گانه پیروی می‌کند.

الف) سطوح لغزنده بیرونی دارای شعاع انحنای بسیار بالاتری هستند و در طراحی آن‌ها مطابق رابطه‌ی (۱۵) تقارن وجود دارد.

$$L_1 = L_4 \ll L_2 = L_3 \quad (15)$$

ب) ضرایب اصطکاک به گونه‌ای طراحی شده اند که رابطه‌ی (۱۶) برقرار باشد.

$$\mu_1 = \mu_4 < \mu_2 < \mu_3 \quad (16)$$

پ) سطوح لغزنده بیرونی دارای ظرفیت جابجایی بالاتری هستند و در آن‌ها مطابق رابطه‌ی (۱۷) تقارن وجود دارد.

$$d_1 = d_4 < d_2 = d_3 \quad (17)$$

با اعمال محدودیت‌های ذکر شده، تعداد متغیرهای جداگر اصطکاکی آونگی سه‌گانه طراحی از ۱۲ به $(L_1, L_2, d_1, d_2, \mu_1, \mu_2, \mu_3)$ کاهش می‌یابد. حدود بالا و پایین متغیرهای طراحی از [۵] گرفته شده و در جدول ۳ خلاصه شده است.

جدول ۳: محدوده‌ی طراحی پیشنهادی برای بهینه‌سازی جداگر اصطکاکی آونگی سه‌گانه

متغیرهای طراحی	L_1	L_2	μ_1	μ_2	μ_3	d_1	d_2
حدود متغیرها	[۰/۰۴۴ ۰/۱]	[۰/۴۴ ۱/۰]	[۰/۰۱ ۰/۰۲]	[۰/۰۱۸ ۰/۰۶]	[۰/۰۵ ۰/۱۵]	[۰/۰۲۲ ۰/۰۵]	[۰/۵۴ ۰/۱۱]

۳-۲-۲- تابع هدف

طراحی سیستم‌های کارا و ارزان با برآورده شدن تمامی نیازهای عملکردی برای مهندسان یک چالش محسوب می‌شود [۳۴-۳۷]. هر دو طراحی متداول و بهینه می‌توانند در طی مراحل مختلف تکامل سیستم مورد استفاده قرار گیرند. در روند طراحی متداول بصیرت، تجربه و مهارت طراح نقش اصلی را دارد. طراحی بهینه، طراح را مجبور به تعیین یک مجموعه از متغیرهای طراحی می‌کند به گونه‌ای که ضمن در نظر گرفتن قیود طراحی برای سیستم، تابع هدف بهینه شود. جداگرها معمولاً در سازه‌های حساس و مهم به کار می‌روند بنابراین اهمیت کاهش خسارت اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای از کاهش هزینه بیشتر است. برای کاهش خسارت به سازه، جابجایی نسبی بین طبقات و شتاب بام نقش مهمی ایفا می‌کنند. در نتیجه با توجه به اهمیت اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای، خسارت به سازه را می‌توان با استفاده از توابع جابجایی نسبی بین طبقات و شتاب بام کاهش داد و پارامترهای مؤثر در جداگر را تعیین نمود. در این مطالعه در بهینه‌سازی مجزای انجام شده، تابع هدف در بهینه‌سازی اول بیشینه جابجایی نسبی بین طبقه و در بهینه‌سازی دوم، بیشینه شتاب طبقه بام مطابق با روابط (۱۸) و (۱۹) در زلزله ال‌سنترو در نظر گرفته شده است.

$$F_{Acc}(L_1, L_2, \mu_1, \mu_2, \mu_3, d_1, d_2) = \max(\text{abs}(Acc)) \quad (18)$$

$$F_{Drift}(L_1, L_2, \mu_1, \mu_2, \mu_3, d_1, d_2) = \max(\text{abs}(Drift)) \quad (19)$$

۳-۲-۳- محدودیت‌های طراحی

در مسئله‌ی بهینه‌سازی توابع هدف باید به گونه‌ای برآورده شود که قیود طراحی را ارضا کند. در این مثال علاوه بر قیود اجرایی و مدل‌سازی قید طراحی مربوط به حالت‌های آسیب پیشنهاد شده توسط HAZUS [۸]، به عنوان قید مسئله در نظر گرفته شده است. که بر اساس دستور العمل فنی HAZUS چهار سطح خرابی متفاوت شامل سطح خرابی خفیف، متوسط، گسترده و فروریزش تعریف شده است. سطوح خرابی DS1 و DS2 برای سازه‌های حساس و سازه‌هایی به کار می‌رود که خرابی در آن‌ها باعث خسارت‌های زیاد می‌شود (نیروگاه-ها DS1 و بیمارستان‌ها DS2). همچنین مطابق پیشنهاد فنز و کنستانتینو [۴] برای طراحی جداگرهای آونگی اصطکاکی سطح خرابی جداگر یک مرحله مانده به آخرین حد جابجایی در نظر گرفته می‌شود تا در صورت وقوع زلزله‌ای بالاتر از سطح طراحی آیین‌نامه، جداگر قدرت تحمل آن را داشته باشد. به همین منظور در بهینه‌سازی جداگر آونگی اصطکاکی از سطح خرابی DS4 صرف نظر شده و برای سازه‌ی مسکونی مورد بررسی در این مطالعه سطح DS3 مورد بررسی قرار گرفته است. در جدول ۴ مقادیر مجاز شتاب بام و جابجایی نسبی بین طبقات برای حالت‌های مختلف آسیب آورده شده است. همچنین مقدار $0/۲۶۵$ از رابطه‌ی $\max(d_2 + d_2 + d_1 + \frac{d_1}{2})$ محاسبه شده است.

جدول ۴: تعریف همه حالت های آسیب پیشنهاد شده توسط HAZUS [۸]

DS4	DS3	DS2	DS1	حالت آسیب
۳/۶g	۱/۸g	۰/۹g	۰/۴۵g	بیشینه شتاب بام
۰/۰۸	۰/۰۳	۰/۰۱۲	۰/۰۰۶	بیشینه جابجایی نسبی بین طبقه‌ای

بنابراین به طور خلاصه قیود به صورت زیر نوشته می‌شوند؛ قیود ۲۰ تا ۲۳ از جمله قیودهای اجرایی بوده و قیود ۲۴ تا ۲۶ جز قیود عملکردی محسوب می‌شوند. لازم به ذکر است که رابطه‌ی ۲۴ فقط برای تابع هدف دریفت و رابطه‌ی ۲۵ فقط برای تابع هدف شتاب استفاده می‌شود.

$$g_1(d) = L_1 \leq L_2 \quad (20)$$

$$g_2(d) = \mu_1 \leq \mu_2 \leq \mu_3 \quad (21)$$

$$g_3(d) = L_1 \times (\mu_3 - \mu_1) \leq d_1 \quad (22)$$

$$g_4(d) = \mu_3 \leq \frac{d_1}{L_1} + \mu_1 \quad (23)$$

$$g_5(d) = \max(\text{abs}(\text{Acc})) \leq \text{Acc}_{\text{HAZUS}} \quad (24)$$

$$g_6(d) = \max(\text{abs}(\text{Drift})) \leq \text{Drift}_{\text{HAZUS}} \quad (25)$$

$$g_7(d) = \max(\text{abs}(\text{IsoDisp})) \leq 0.265 \quad (26)$$

۴- بررسی نتایج

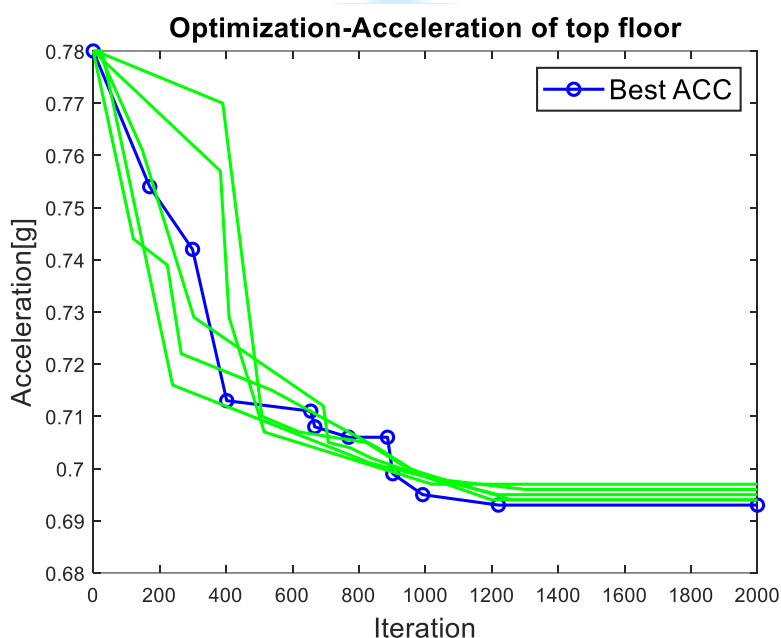
بر اساس تئوری‌های زیربنایی و مطالعه موردی تشریح شده به ترتیب در بخش‌های ۲ و ۳، بهینه‌سازی برای طراحی جداگر اصطکاکی آونگی سه‌گانه انجام شده و نتایج در این بخش ارائه می‌گردد. مدل‌سازی سازه در نرم افزار اپنسیس و کد مربوط به ساخت مدل جایگزین و بهینه‌سازی در نرم افزار متلب انجام شده است.

همانطور که گفته شد تابع هدف، یکبار بیشینه جابجایی نسبی بین طبقه و یکبار بیشینه شتاب بام تحت رکورد واقعی ال سنتر در نظر گرفته شده است که هر دو تابع به صورت تک‌هدفه در نظر گرفته می‌شوند. برای کاهش هزینه محاسباتی مربوط به جمع شبیه‌سازی‌های عددی، از مدل جایگزین کریجینگ در بهینه‌سازی استفاده شده است. برای ساخت مدل‌های جایگزین برای اولین مرحله، تعداد اولیه ثابتی از ۱۵ نمونه، با استفاده از روش شبکه توزیع یکنواخت^{۲۰} در فضای قابل قبول طراحی تولید می‌شود، در مرحله بعد غنی‌سازی نمونه‌ها تا حداکثر ۳۰ نمونه برای ساخت مدل جایگزین کریجینگ به صورت تطبیقی با توجه به یادگیری EFF در نظر گرفته می‌شود. مرحله‌ی غنی‌سازی تا رسیدن به تطابق قابل قبول بین مدل اصلی و مدل جایگزین ادامه می‌یابد. بر این اساس، تعداد کل نمونه برای ساخت مدل جایگزین از پاسخ مدل اپنسیس ۱۶ تا ۴۵ نمونه است. برای ساخت مدل جایگزین از پاسخ مدل اپنسیس، تعداد نمونه‌ها برای تابع هدف جابجایی نسبی بین طبقه ۲۷ و برای شتاب بام ۳۳ بوده است. پس از ساخت مدل جایگزین، از الگوریتم بهینه‌سازی

²⁰ Latin hypercube samples

CCMAES برای بدست آوردن نتایج بهینه استفاده شده است که در این الگوریتم اگر اختلاف بین نتایج تابع هدف در طول نسلها کمتر یا مساوی با 10^{-6} باشد، الگوریتم متوقف می شود. تمام بررسیها در سطح خرابی DS3 انجام شده است و علاوه بر یک سری قیود اجرایی، این سطح خرابی به عنوان قیود دیگر مسئله در نظر گرفته می شود، زیرا روند بهینه سازی بدون یک سری قیود، ممکن است پاسخ سازه از سطوح عملکردی عبور کند و باعث فریزش سازه شود. در ادامه همین مسئله با الگوریتم ژنتیک بدون مدل جایگزین اجرا شد و نتایج هر دو باهم مقایسه شد.

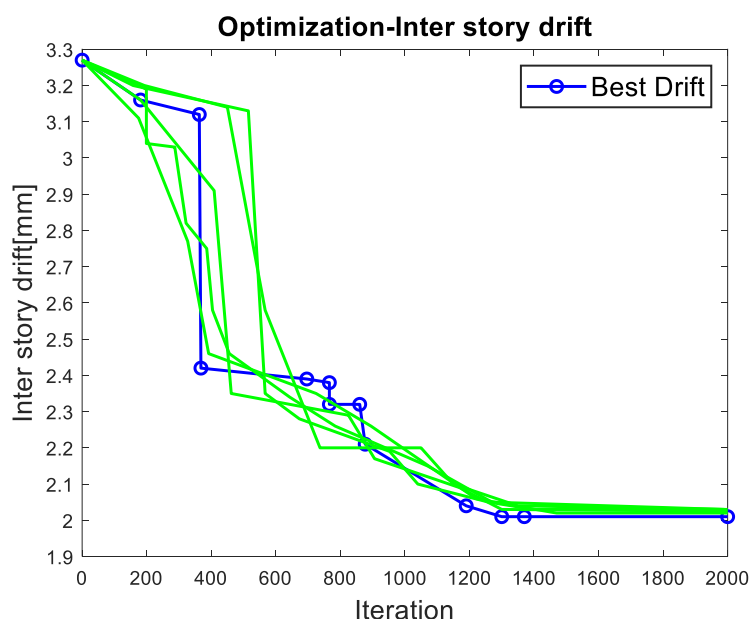
در شکل ۶ روند کاهش تابع هدف بیشینه شتاب بام در چرخه های^{۲۱} مختلف نشان داده شده است. تابع هدف شتاب ۱۴ بار اجرا شد و بهترین نمودار با کمترین جواب بدست آمده به همراه ۵ نمودار از جواب های دیگر در شکل آورده شده است. لازم به ذکر است که نقطه ی شروع الگوریتم نقطه اولیه ی وسط بازه است. تعداد تکرار ۲۰۰۰ در نظر گرفته شده است ولی همانطور که مشاهده می شود، نمودار از تکرار ۱۲۰۰ روند ثابتی پیش رفته است و به همگرایی رسیده است. همچنین در نمودار تا تکرار ۹۰۰ شیب تندى در همگرایی مشاهده می شود و در بقیه مسیر با شیب کمتر روند همگرایی ادامه یافته است. بنابراین می توان نتیجه گرفت، در مواردی که هزینه ی محاسباتی کمتر مد نظر باشد، می توان با تعداد تکرار ۹۰۰ به نتیجه ی مطلوبی دست یافت.



شکل ۶: روند کاهش تابع هدف بیشینه شتاب بام با مدل جایگزین

در شکل ۷ روند کاهش تابع هدف بیشینه جابجایی نسبی بین طبقات در چرخه های مختلف نشان داده شده است. تابع هدف جابجایی نسبی بین طبقات ۶ بار اجرا شد و تمامی جوابها با بهترین نموداری که ما را به جواب بهتر می رساند در شکل آورده شده است. لازم به ذکر است که در پیدا کردن نتیجه، نمودار از نقطه اولیه ی وسط بازه شروع شده است. تعداد تکرار ۲۰۰۰ در نظر گرفته شده است ولی همانطور که مشاهده می شود، در تکرار ۱۴۰۰ روند نمودار ثابت شده و به همگرایی رسیده است. همچنین تا تکرار ۹۰۰ شیب تندى در همگرایی مشاهده می شود ولی در بقیه مسیر با شیب کمتر روند همگرایی ادامه یافته است. بنابراین می توان نتیجه گرفت، در تابع هدف جابجایی نسبی بین طبقات همانند تابع هدف شتاب در مواردی که هزینه ی محاسباتی کمتر مد نظر باشد، می توان با تعداد تکرار ۹۰۰ به نتیجه ی مطلوبی دست یافت.

²¹ Iteration



شکل ۷: روند کاهش تابع هدف بیشینه جابجایی نسبی طبقات با مدل جایگزین

در جدول ۵ پاسخ سازه برای نتایج بهینه‌سازی به روش مدل جایگزین، بهینه‌سازی با روش الگوریتم ژنتیک و مقاله مرجع ارائه شده است. استفاده از الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی شتاب می‌تواند با زیاد کردن بیشینه جابجایی جداگر نتایج شتاب را تا ۱۲/۶۵ درصد کاهش دهد و این مقدار کاهش برای روش مدل جایگزین ۱۲/۲۸ درصد است، هر چند روش مدل جایگزین به جواب بهتری نسبت به روش الگوریتم ژنتیک نرسیده است ولی نتیجه بسیار به آن نزدیک است. همین نتایج برای بهینه‌سازی جابجایی نسبی بین طبقه با زیاد کردن بیشینه جابجایی جداگر نتایج جابجایی نسبی طبقه را به روش الگوریتم ژنتیک تا ۶۵/۷۲ درصد کاهش می‌دهد و این مقدار کاهش برای روش مدل جایگزین ۶۶/۳۹ درصد است. دیده می‌شود که در روش مدل جایگزین برای جابجایی نسبی بین طبقه، به نتیجه‌ای بهتر از روش الگوریتم ژنتیک رسیده است.

جدول ۵: نتایج بهینه‌سازی و مقاله مرجع

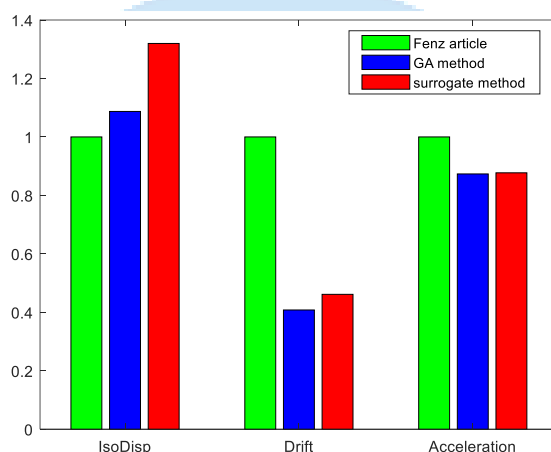
بیشینه جابجایی جداگر (mm)	بیشینه جابجایی نسبی طبقات (mm)	بیشینه شتاب نسبی طبقه بام (m/s^2)	مقاله مرجع [۲] بیشینه شتاب بام روش الگوریتم ژنتیک بیشینه شتاب بام روش مدل جایگزین جابجایی نسبی بین طبقات روش الگوریتم ژنتیک جابجایی نسبی بین طبقات روش مدل جایگزین
۱۷۲	۵/۹۸	۰/۷۹g	
۱۸۷	۲/۴۴	۰/۶۹g (۸۷/۳۴ %)	
۲۲۷	۲/۷۶	۰/۶۹۳g (۸۷/۷۲ %)	
۲۱۸	۲/۰۵ (۳۴/۲۸ %)	۰/۷۱g	
۲۰۵	۲/۰۱ (۳۳/۶۱ %)	۰/۷۵g	

برای اجرای این مسئله در هر دو روش از سیستم ۸ هسته پردازشی مجازی، ظرفیت حافظه اصلی ۳۲ گیگابایت، ظرفیت هارد دیسک ۲۰۰ گیگابایت استفاده شده است و زمان اجرا برای همه حالات اندازه‌گیری شد. زمان اجرای کدها در روش الگوریتم ژنتیک در کمترین حالت حدود ۵۳ ساعت بود که این مقدار برای روش مدل جایگزین در بیشترین مقدار برابر با ۹ ساعت بود. آنچه که از اندازه‌گیری

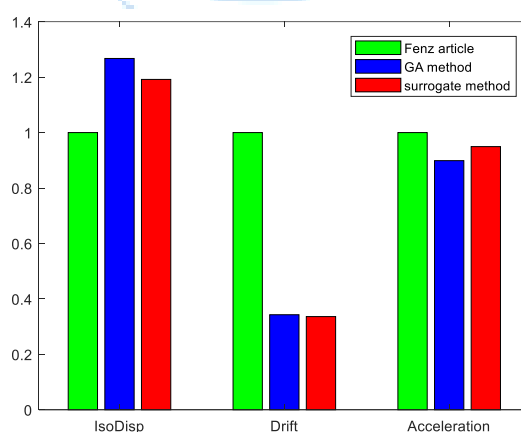
زمان بدست می‌آید آن است که حجم محاسبات به روش مدل جایگزین کمتر از ۱۶ درصد روش الگوریتم ژنتیک است و حجم محاسبات ۸۴ درصد کاهش می‌یابد.

به طور کلی سازه متشکل از دو قسمت اصلی اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای می‌باشد که جهت ارزیابی لرزه‌ای کامل ساختمان بایستی هر یک از اجزا به صورت کامل مورد تحلیل و ارزیابی قرار گیرند. شتاب باعث خرابی در اجزای غیر سازه‌ای و جابجایی نسبی باعث خرابی‌های اجزای سازه‌ای می‌شود. بنابراین با توجه به اهمیت اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای می‌توان توابع هدف را به ترتیب شتاب بام و جابجایی نسبی طبقه در نظر گرفت و با استفاده از روش مدل جایگزین تابع هدف را بهینه کرد.

در اشکال ۸ و ۹ به ترتیب پاسخ سازه برای نتایج شتاب بام و جابجایی نسبی طبقات آورده شده است. در هر دو نمودار مقدار نتایج به نتایج فنز و کنستانتینو نرمالیزه شده است. همانطور که در شکل ۸ مشخص است بهینه‌سازی شتاب، با زیاد شدن جابجایی در سطح جداگر، جابجایی نسبی سازه را در هر دو روش الگوریتم ژنتیک و مدل جایگزین کاهش می‌دهد. همچنین در شکل ۹ مشاهده می‌شود که بهینه‌سازی جابجایی نسبی بین طبقات، با زیاد شدن جابجایی در سطح جداگر، شتاب بام را در هر دو روش الگوریتم ژنتیک و مدل جایگزین کاهش می‌دهد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در سازه‌های دارای جداگر با زیاد شدن جابجایی جداگر، پاسخ سازه بهبود می‌یابد.



شکل ۸: مقایسه‌ی نتایج پاسخ سازه در بهینه‌سازی شتاب طبقه بام



شکل ۹: مقایسه‌ی نتایج پاسخ سازه در بهینه‌سازی جابجایی نسبی طبقات

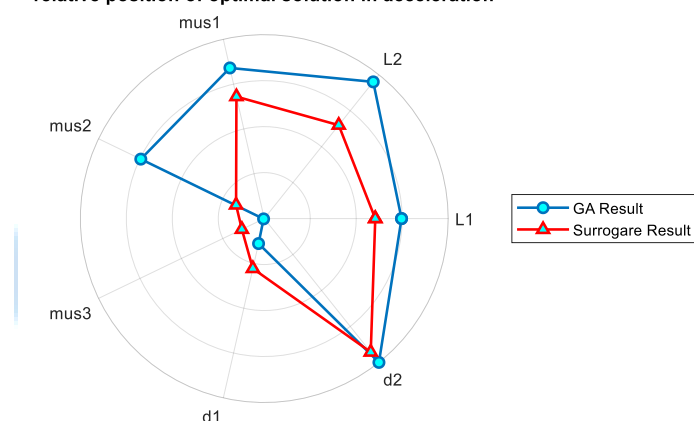
در ادامه پاسخ نتایج متغیرهای طراحی بدست آمده در روش مدل جایگزین، روش الگوریتم ژنتیک و مقاله مرجع در جدول ۶ آورده شده است. شکل ۱۰ و ۱۱ موقعیت نسبی نتایج نسبت به بازه طراحی در هر دو تابع هدف شتاب بام (شکل ۱۰) و جابجایی نسبی بین

طبقه‌ای (شکل ۱۱) را نشان می‌دهد. در هر دو شکل خط آبی با نشانه‌ی دایره مربوط به روش الگوریتم ژنتیک و خط قرمز با نشانه‌ی مثلث مربوط به نتایج مدل جایگزین است. همانطور که در هر دو شکل مشخص است با بزرگتر انتخاب شدن مقادیر L_1 ، L_2 و d_2 در بازه و کوچک انتخاب شدن مقدار μ_3 در بازه، نتیجه‌ی بهتری در بهینه‌سازی ایجاد می‌کند. در مورد بقیه پارامترها نمی‌توان به طور قطعی نظر داد.

جدول ۶: نتایج متغیرهای طراحی در مسئله‌ی بهینه‌سازی و مقاله مرجع

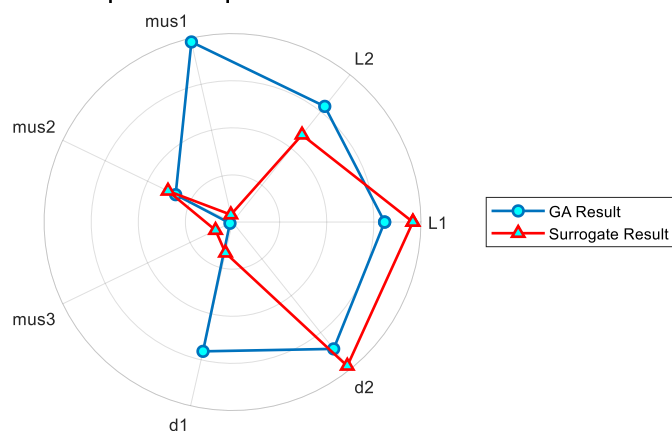
d_2	d_1	μ_3	μ_2	μ_1	L_2	L_1	
۰/۰۶۴	۰/۰۱۹	۰/۰۶	۰/۰۲	۰/۰۱۵	۰/۴۳۵	۰/۰۵۳	مقاله مرجع [۲]
۰/۱۱۰۰	۰/۰۲۵۹	۰/۰۵۰۴	۰/۰۴۹۸	۰/۰۱۸۴	۰/۹۷۲۳	۰/۰۸۵۸	شتاب به روش الگوریتم ژنتیک
۰/۱۰۶۰	۰/۰۲۹۸	۰/۰۶۳۵	۰/۰۲۶۸	۰/۰۱۶۸	۰/۸۰۷۳	۰/۰۷۷۸	شتاب به روش مدل جایگزین
۰/۱۰۲۲	۰/۰۴۱۷	۰/۰۵۱۵	۰/۰۳۳۴	۰/۰۱۹۸	۰/۸۷۹۶	۰/۰۸۹۲	جابجایی نسبی روش الگوریتم ژنتیک
۰/۱۰۸۷	۰/۰۲۶۷	۰/۰۶۰۰	۰/۰۳۵۲	۰/۰۱۰۴	۰/۷۷۱۳	۰/۰۹۷۶	جابجایی نسبی روش مدل جایگزین

relative position of optimal solution in acceleration



شکل ۱۰: مقایسه‌ی نتایج متغیرهای طراحی در بهینه‌سازی شتاب بام

relative position of optimal solution in drift



شکل ۱۱: مقایسه‌ی نتایج متغیرهای طراحی در بهینه‌سازی جابجایی نسبی بین طبقات

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش در یک فرآیند بهینه‌سازی با استفاده از دو الگوریتم ژنتیک و CMAES، پارامترهای مؤثر در طراحی جداگر آونگی اصطکاکی سه‌گانه بررسی شده است. در طراحی لرزه‌ای جداگر آونگی اصطکاکی سه‌گانه از مدل جایگزین به روش کریجینگ برای ساخت جانشین کم هزینه محاسباتی به جای مدل اپنسیس استفاده شد. پارامترهای جداگر برای تابع هدف بیشینه جابجایی نسبی بین طبقه و بیشینه شتاب طبقه بام انجام شد و نتایج ارائه شد. با توجه به اهمیت اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای، به ترتیب با روش بهینه‌سازی جابجایی نسبی بین طبقات و شتاب، پارامترهای مؤثر در جداگر را تعیین نمود و میزان خسارت به سازه را کاهش داد. نتایج اصلی زیر را می‌توان به شرح زیر خلاصه نمود:

۱- استفاده از مدل جایگزین در بهینه‌سازی شتاب بام می‌تواند با زیاد کردن بیشینه جابجایی جداگر نتایج شتاب را تا $12/28$ درصد کاهش دهد.

۲- استفاده از مدل جایگزین در بهینه‌سازی جابجایی نسبی بین طبقات می‌تواند با زیاد کردن بیشینه جابجایی جداگر نتایج شتاب را تا $65/72$ درصد کاهش دهد.

۳- روش مدل جایگزین حجم محاسبات را نسبت به روش الگوریتم ژنتیک 84 درصد کاهش می‌دهد و این در حالی است که نتیجه بهینه‌سازی شتاب بام بدست آمده نزدیک به روش الگوریتم ژنتیک است و نتیجه بهینه‌سازی جابجایی نسبی بین طبقات بهتر از روش الگوریتم ژنتیک شده است.

۴- در بهینه‌سازی سازه‌های دارای جداگر صرف نظر از تابع هدف با زیاد شدن جابجایی جداگر، پاسخ سازه بهبود می‌یابد.

۵- در توابع هدف جابجایی نسبی بین طبقات و شتاب بام در مواردی که هزینه‌ی محاسباتی کمتر مد نظر باشد، می‌توان با تعداد تکرار 900 نیز با مدل جایگزین به نتیجه‌ی مطلوبی دست یافت.

۶- در بهینه‌سازی سازه دارای جداگر آونگی اصطکاکی سه‌گانه انتخاب مقادیر بزرگتر نزدیک به حدود بالایی جدول پارامترهای L_1 ، L_2 و d_2 و انتخاب مقادیر کوچکتر نزدیک به حدود پایینی پارامتر μ_3 ، نتیجه‌ی بهتری در بهینه‌سازی ایجاد می‌کند.

۶- منابع

1. Rezaei Rad, A. and M. Banazadeh. (2018). *Probabilistic risk-based performance evaluation of seismically base-isolated steel structures subjected to far-field earthquakes*. Buildings. **8**(9): p. 128.
2. Nguyen, N.V., H.D. Nguyen, and N.D. Dao. (2022). *Machine learning models for predicting maximum displacement of triple pendulum isolation systems*. in Structures. Elsevier.
3. Montazeri, M., P. Namirani, A.A. Pasand, and L. Aceto. (2023). *Seismic performance of isolated buildings with friction spring damper*. in Structures. Elsevier.
4. Fenz, D.M. and M.C. Constantinou. (2008). *Modeling triple friction pendulum bearings for response-history analysis*. Earthquake Spectra. **24**(4): p. 1011-1028.
5. Moeindarbari, H. and T. Taghikhany. (2014). *Seismic optimum design of triple friction pendulum bearing subjected to near-fault pulse-like ground motions*. Structural and Multidisciplinary Optimization. **50**: p. 701-716.
6. Mazzoni, S., F. McKenna, M.H. Scott, and G.L. Fenves. (2006). *OpenSees command language manual*. Pacific earthquake engineering research (PEER) center. **264**(1): p. 137-158.
7. Krige, D.G.. (1951). *A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand*. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. **52**(6): p. 119-139.
8. Tajammolian, H., F. Khoshnoudian, A.R. Rad, and V. Loghman. (2018). *Seismic fragility assessment of asymmetric structures supported on TCFP bearings subjected to near-field earthquakes*. in Structures. Elsevier.
9. Zhang, H., X. Liu, H. Li, and N. An. (2021). *A comparative study on the effectiveness of bidirectional and tridirectional isolation systems used in large-scale single-layer lattice domes during earthquakes*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. **141**: p. 106488.

10. Han, Q., J. Wen, X. Du, Z. Zhong, and H. Hao. (2018). *Nonlinear seismic response of a base isolated single pylon cable-stayed bridge*. Engineering Structures. **175**: p. 806-821.
11. Xu, Y., T. Guo, and P. Yan. (2019). *Design optimization of triple friction pendulums for base-isolated high-rise buildings*. Advances in Structural Engineering. **22**(13): p. 2727-2740.
12. Xu, Y., T.C. Becker, and T. Guo. (2021). *Design optimization of triple friction pendulums for high-rise buildings considering both seismic and wind loads*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. **142**: p. 106568.
13. Xu, Y., T. Guo, J. Xiong, B. Chen, Q. Zhi, and J. Yang. (2022). *Optimization design of triple friction pendulums for Base-isolated High-rise buildings based on bearing displacement and collapse fragility*. in Structures. Elsevier.
14. Moeindarbari, H. and T. Taghikhany. (2012). *Optimum Design of Triple Friction Pendulum Bearing Subjected by Near-Field Ground Motions*. in 15th World Conference on Earthquake Engineering (15WCEE).
15. Javanmardi, R. and B. Ahmadi-Nedushan. (2023). *Reliability-based design optimization of double layer barrel vault using pattern search algorithm and optimized neural network as an surrogate model*. Journal of Structural and Construction Engineering. **10**(7): p. -.
16. Akbarzaghi, M. and B. Ahmadi-Nedushan. (2018). *Improvement of Pareto Diagrams in Topology Optimization using Unstructured Polygonal Finite Elements*. Journal of Ferdowsi Civil Engineering. **31**(2).
17. Kaveh, A. and A.D. Eslamlou. (2020). *Metaheuristic optimization algorithms in civil engineering: new applications*. Springer.
18. Hansen, N.. (2006). *The CMA evolution strategy: a comparing review*. Towards a new evolutionary computation: Advances in the estimation of distribution algorithms: p. 75-102.
19. Arnold, D.V. and N. Hansen. (2012). *A (1+ 1)-CMA-ES for constrained optimisation*. in Proceedings of the 14th annual conference on Genetic and evolutionary computation.
20. Pitra, Z., L. Bajer, J. Repický, and M. Holeňa. (2017). *Overview of surrogate-model versions of covariance matrix adaptation evolution strategy*. in Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion.
21. Liu, J. and Y. Xia. (2022). *A hybrid intelligent genetic algorithm for truss optimization based on deep neural network*. Swarm and Evolutionary Computation. **73**: p. 101120.
22. Nazari-Heris, M., B. Mohammadi-Ivatloo, and G. Gharehpetian. (2018). *A comprehensive review of heuristic optimization algorithms for optimal combined heat and power dispatch from economic and environmental perspectives*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. **81**: p. 2128-2143.
23. Katoch, S., S.S. Chauhan, and V. Kumar. (2021). *A review on genetic algorithm: past, present, and future*. Multimedia Tools and Applications. **80**: p. 8091-8126.
24. Alibrandi, U. . (2014). *A response surface method for stochastic dynamic analysis*. Reliability Engineering & System Safety. **126**: p. 44-53.
25. Chouinard, L.E., Nedushan, B.A. and Feknous, N. (1996). November. *Statistical analysis in real time of monitoring data for idukki arch dam*. In 2nd International conference on dam safety evaluation, Trivandrum, India (pp. 381-385).
26. Izquierdo, J., A.C. Márquez, and J. Uribeixebarria. (2019). *Dynamic artificial neural network-based reliability considering operational context of assets*. Reliability Engineering & System Safety. **188**: p. 483-493.
27. Nedushan, B.A. and Chouinard, L.E., (2003). *Use of artificial neural networks for real time analysis of dam monitoring data*. In Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering (pp. 4-7).
28. Ni, P., Y. Xia, J. Li, and H. Hao. (2019). *Using polynomial chaos expansion for uncertainty and sensitivity analysis of bridge structures*. Mechanical Systems and Signal Processing. **119**: p. 293-311.
29. Li, D., H. Tang, S. Xue, and X. Guo. (2019). *Reliability analysis of nonlinear dynamic system with epistemic uncertainties using hybrid Kriging-HDMR*. Probabilistic Engineering Mechanics. **58**: p. 103001.
30. Zhang, X., L. Wang, and J.D. Sørensen. (2019). *REIF: a novel active-learning function toward adaptive Kriging surrogate models for structural reliability analysis*. Reliability Engineering & System Safety. **185**: p. 440-454.
31. Javanmardi, R. and B. Ahmadi-Nedushan. (2023). *Optimal design of double-layer barrel vaults using genetic and pattern search algorithms and optimized neural network as surrogate model*. Frontiers of Structural and Civil Engineering. p. 1-18.
32. Abdollahi, A., A. Amini, and M.A. Hariri-Ardebili. (2022). *An uncertainty-aware dynamic shape optimization framework: Gravity dam design*. Reliability Engineering & System Safety. **222**: p. 108402.
33. Fenz, D.M. and M.C. Constantinou. (2006). *Behaviour of the double concave friction pendulum bearing*. Earthquake engineering & structural dynamics. **35**(11): p. 1403-1424.
34. Jahangiri, M. and B. Ahmadi-Nedushan. (2016). *Structural damage identification using MOPSO and MOEA/D multi-objective evolutionary optimization algorithms*. J Ferdowsi Civil Eng. **30**(1): p. 63-77.

35. Jahangiri, M., B. Ahmadi-Nedushan, and H. Rahimi Bondarabadi. (2015). *Structural damage localization and quantification based on multi-objective optimization method*. in *2nd International & 6th National Conference on Earthquake & Structures, At ACECR of Kerman, Kerman, Iran*.
36. Jahangiri, M., B. Ahmadi, and H. Rahimi. (2015). Application of single-objective optimization techniques for structural health monitoring. in *2nd International & 6th National Conference on Earthquake & Structures, At ACECR of Kerman, Kerman, Iran*
37. Hoque, A., P. Halder, M. Parvez, and T. Szecsi. (2013). *Integrated manufacturing features and Design-for-manufacture guidelines for reducing product cost under CAD/CAM environment*. *Computers & Industrial Engineering*. **66**(4): p. 988-1003.

