

# تعیین مقادیر بهینه‌ی پارامترهای جداگر اصطکاکی پاندولی سه‌گانه تحت زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک

حسام‌الدین معین‌درباری (دانشجوی دکتری)

تورج تقی‌خانی\* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۳  
دوره ۲-۳، شماره ۲، ص. ۳۱-۳۵

یک سیستم جداگر لرزه‌یی انطباقی می‌تواند سختی و میرایی متغیری از خود ارائه دهد. مهم‌ترین فایده‌ی این رفتار، پاسخگویی مناسب این سیستم‌ها در برابر عملکردهای مختلف و سطوح خطر متفاوت است. جداگر اصطکاکی پاندولی سه‌گانه، که یکی از انواع جداگرهای لرزه‌یی اصطکاکی چندقوسی است، در زمره‌ی این سیستم‌های لرزه‌یی انطباق‌پذیر است. ساختار داخلی این سیستم‌ها با توجه به سطوح مقعر چندگانه و اینکه لغزش بر روی کدام یک از سطوح اتفاق بیفتد، مشخص می‌شود. لغزش بر روی این سطوح با توجه به مقادیر جابه‌جایی، بین سطوح تعویض می‌شود و سختی و میرایی موردنظر حاصل می‌شود. بنابراین لزوم بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر در طراحی این‌گونه سیستم‌ها، با توجه به عملکرد موردنظر، امری شایان توجه خواهد بود. در این پژوهش با استفاده از روش الگوریتم‌های ژنتیک، پارامترهای مؤثر طراحی برای محدودکردن بیشینه‌ی پاسخ‌های سازه بهینه شده‌اند و محدوده‌ی مناسب برای آن‌ها ارائه شده است.

واژگان کلیدی: جداگر اصطکاکی پاندولی سه‌گانه، حوزه‌ی نزدیک، طرح لرزه‌یی، الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی.

hessammoeen@aut.ac.ir  
ttaghikhany@aut.ac.ir

## ۱. مقدمه

امروزه، جداسازی لرزه‌یی<sup>۱</sup> فناوری توسعه یافته‌یی است که در بسیاری از کشورها به‌کار می‌رود و مبنای ساخت و اجرای انواع متعددی از آن به خوبی شناخته شده است. به نظر می‌رسد که این مفهوم، جاذبه‌ی اجتناب‌ناپذیری برای مخترعان داشته است و هر ساله سیستم‌های نوین و متنوعی از روش‌های جداسازی پیشنهاد می‌شوند و به‌ثبت می‌رسند. بیشتر سیستم‌های جداسازی که امروزه به‌کار می‌روند یا شامل نشیمن‌های الاستومری هستند؛ که ماده‌ی اولیه‌ی آن لاستیک طبیعی یا نئوپرن است؛ و یا در آن‌ها نشیمن‌های لغزشی، که سطح لغزنده از جنس تفلون و فولاد ضد زنگ است (هر چند که از سطوح لغزنده دیگری نیز استفاده شده است) به‌کار گرفته شده‌اند.

سیستم‌های دیگری نیز پیشنهاد شده‌اند که در آن‌ها نشیمن‌های الاستومری و لغزان با یکدیگر ترکیب شده‌اند.<sup>[۱]</sup>

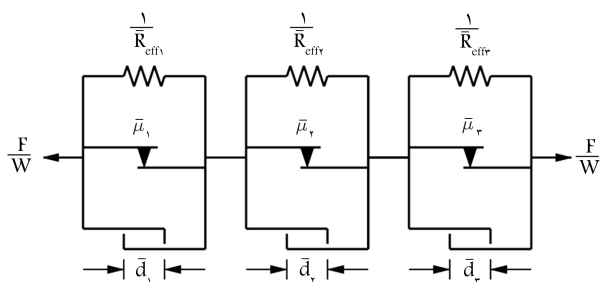
یکی از مقوله‌هایی که با توجه به خرابی‌های ساختمان‌های مهندسی‌ساز در زلزله‌های اخیر توجه جوامع علمی مهندسان زلزله را به خود جلب کرده است، بررسی حرکات نیرومند زمین در حوزه‌ی نزدیک منبع لرزه‌زا و تأثیر آن‌ها در عملکرد سازه‌هاست. دوره‌ی تناوب و دامنه‌ی نسبتاً بلند رکوردهای حرکات نیرومند زمین در حوزه‌ی نزدیک، تردیدهایی را در مورد قابلیت‌های آن نوع از سیستم‌های جداگر لرزه‌یی که فقط از تمرکز نرمی در تراز کف بهره می‌برند، به وجود آورده است. هرچند

این معضل با به‌کارگیری مستهلک‌کننده‌ها در تراز جداگرها قابل حل است، لیکن این روش موجب افزایش شتاب طبقات می‌شود؛ به‌گونه‌یی که زلزله‌هایی با سطوح شتاب پایین موجب خرابی تجهیزات حساس در ساختمان می‌شود. از این روستفاده از یک سیستم جداساز که در سطوح پایین لرزه‌یی با ایجاد نرمی مناسب شتاب طبقه را کنترل کند و در سطوح بالا با استهلاک مناسب تغییرشکل طبقه‌یی را کاهش دهد، یکی از دلایل توجه جامعه‌ی مهندسان به استفاده از سیستم‌هایی است که بتوانند در هنگام زمین‌لرزه خصوصیات خود را منطبق بر نیاز طراح تغییر دهند.<sup>[۲]</sup>

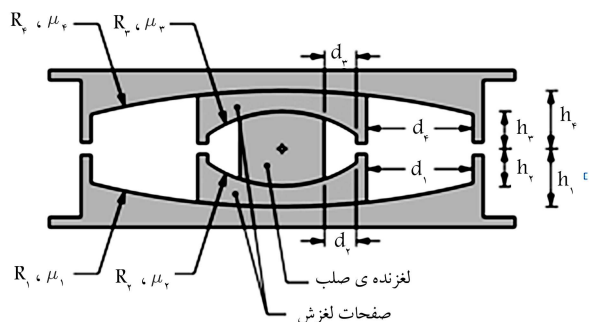
در این نوشتار، طراحی لرزه‌یی سیستم‌های جداگر اصطکاکی پاندولی سه‌گانه<sup>۲</sup> (شکل ۱) که از انواع سیستم‌های با نشیمن لغزشی هستند، مورد بررسی قرار گرفته است. این سیستم‌ها که از انواع پیشرفته‌ی سیستم‌های ساده‌ی اصطکاکی پاندولی تک قوسی هستند،<sup>[۳]</sup> با توجه به جابه‌جایی‌های ایجادشده در کف ساختمان، سختی‌های متفاوتی از خود نشان می‌دهند، که باعث می‌شود رفتاری متناسب با سطح زلزله‌ی واردشده به ساختمان از خود نشان دهند؛ به همین دلیل برخلاف سیستم‌های معمول جداسازی، می‌توان از این سیستم‌ها برای طراحی در سطوح مختلف زلزله‌استفاده کرد. جداگرهای اصطکاکی پاندولی سه قوسی شامل ۴ سطح لغزنده با شعاع انحناهای مؤثر  $(R_{effi} = R_i - h_i)$  و ضرایب اصطکاک  $(\mu_i)$  متمایز هستند. با توجه به شکل ۱ برای هر یک از سطوح، ظرفیت‌های جابه‌جایی مشخصی  $(d_i)$  قابل طراحی است تا لغزش از سطحی به سطح دیگر منتقل شود. در زمینه‌ی توضیح رفتار مکانیکی و مدل‌سازی جداگرهای پاندولی چند قوسی،

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۱/۲/۴، اصلاحیه ۱۳۹۱/۸/۱، پذیرش ۱۳۹۱/۱۰/۹.



شکل ۲. سه المان جداگر اصطکاکی یگانه که برای مدل سازی جداگر اصطکاکی پاندولی سه گانه به کار رفته اند. [۶]



شکل ۱. برشی از جداگر اصطکاکی پاندولی سه گانه. [۵]

پژوهش‌های متعددی انجام شده است. در پژوهشی در سال ۲۰۰۸، طی گزارشی به تشریح خصوصیات و روابط مکانیکی انواع مختلف جداگرهای چند قوسی از انواع یگانه تا سه گانه‌ی این جداگرها پرداخته شده است. [۵] با وجود این، به دلیل ظهور این سیستم‌ها در سال‌های اخیر، در زمینه‌ی طراحی و بهینه‌سازی پارامترهای مربوط به این نوع جداگرها و به طور اخص جداگرهای دوگانه و سه گانه، کارشایان توجهی صورت نگرفته است. در این نوشتار سعی شده است تا با شناخت کامل رفتار جداگرهای اصطکاکی پاندولی سه گانه، ابتدا پارامترهای طراحی مؤثر این جداگرها در تعیین پاسخ‌های سازه شناسایی و سپس با روش‌های مناسب بهینه‌سازی عددی، این پارامترها به گونه‌ی انتخاب شوند تا پاسخ‌های سازه مانند جابه‌جایی نسبی طبقه، شتاب بام و جابه‌جایی تراز جداگرها کم‌ترین مقدار را داشته باشند. در طی این روند از زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک با خصوصیات متفاوت در سطوح مختلف زلزله‌ی طرح استفاده شده است تا به نیاز جامعه‌ی مهندسان سازه در زمینه‌ی طراحی این جداگرها برای زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک پاسخ داده شود. با توجه به اینکه پارامترهای طراحی در جداگر اصطکاکی پاندولی سه گانه متعدد هستند و تابعی با رفتار نامشخص و پیچیده در تعیین پاسخ‌های سازه نسبت به پارامترهای جداگر وجود دارد، از الگوریتم ژنتیک به‌منزله‌ی یکی از روش‌های مناسب در برآورد مقادیر بهینه‌ی متغیرها استفاده شده است.

## ۲. مدل سازی و فرضیات تحلیل

در اینجا رفتار مکانیکی جداگرهای لرزه‌ی اصطکاکی پاندولی سه گانه با یک مدل عددی و با فرض ترکیب سری سه جداگر تک قوسی مطابق با تحقیقات فنز و کنستانتینو (۲۰۰۸) ارائه شده است. [۶] با استفاده از این مدل، معادلات تعادل دینامیکی سازه‌ی، که توسط جداگر سه گانه جداسازی شده است، به دست آمده و پاسخ سازه تحت رکورد زلزله‌ی مشخص با پاسخ‌های به دست آمده از همان مرجع مقایسه و صحت‌سنجی شده است.

### ۱.۲. پارامترهای جداگرهای تک قوسی سری شده [۶]

شکل ۲ نمایی شماتیک از جداگرهای تک قوسی سری شده را نمایش می‌دهد. به گونه‌ی که نیروی وارده بر هر یک از المان‌ها (جداگرهای تک قوسی) یکسان، ولی جابه‌جایی هر کدام از آن‌ها متفاوت خواهد بود. هر جداگر اصطکاکی تک قوسی، به صورت المانی متشکل از سه جزء موازی تشکیل شده است، که این اجزاء عبارت‌اند از: الف) یک فنر خطی کشسان برای ایجاد نیروی ناشی از انحنای سطوح، ب) یک المان اصطکاکی خمیری سخت<sup>۳</sup> با وابستگی ضریب اصطکاک به سرعت، و ج) یک تک المان خلاص - گیر<sup>۴</sup> برای محدود کردن میزان جابه‌جایی هر یک از جداگرهای تک قوسی. برای المان<sup>۴</sup> آم، سختی فنر برابر با  $\frac{1}{R_{effi}}$  نمایش داده شده است، که شعاع مؤثر انحناء برای هر المان تک قوسی است. همچنین برای هر المان تک قوسی  $\bar{\mu}_i$  به عنوان ضریب اصطکاک وابسته به سرعت و  $\bar{d}_i$  به عنوان میزان بیشینه‌ی جابه‌جایی هر المان خلاص - گیر در نظر گرفته شده است. وابستگی ضریب اصطکاک با توجه به رابطه‌ی ۱ تأمین شده است: [۶]

$$\mu = f_{max} - (f_{max} - f_{min}) \exp(-a |\dot{u}|) \quad (1)$$

که در آن،  $f_{max}$  ضریب اصطکاک در سرعت‌های بالا و  $f_{min}$  ضریب اصطکاک در سرعت‌های ناچیز است. همچنین  $a$  پارامتر سرعت است که تغییرات ضریب اصطکاک بین  $f_{max}$  و  $f_{min}$  را کنترل می‌کند.

بر این اساس اگر سیستم سری شده را جایگزین سیستم جداگر پاندولی اصطکاکی سه گانه کنیم (شکل ۱) و در عین حال انتظار رفتاری یکسان را داشته باشیم. پارامترهای جداگرهای تک قوسی بر اساس جدول ۱ به دست خواهند آمد.

### ۲.۲. به دست آوردن معادلات حرکت

برای هر یک از المان‌های سری، نیروی مقاوم از رابطه‌ی ۲ به دست می‌آید: [۷]

جدول ۱. پارامترهای مدل سری برای حالتی که جداگر سه گانه کاملاً تطبیق پذیر عمل کند. [۵]

شماره‌ی المان سری	$\bar{\mu}_i$	$\bar{R}_{effi}$	$\bar{d}_i$	$\bar{a}_i$
۱	$\bar{\mu}_1 = \mu_2 = \mu_3$	$\bar{R}_{eff1} = R_{eff1} + R_{eff2} + R_{eff3}$	$\bar{d}_1 = d_{tot} - (d_2 + d_3)$	$\bar{a}_1 = \frac{1}{\gamma} \frac{(a_2 + a_3)}{\gamma}$
۲	$\bar{\mu}_2 = \mu_1$	$\bar{R}_{eff2} = R_{eff1} - R_{eff2}$	$\bar{d}_2 = \frac{R_{eff1} - R_{eff2}}{R_{eff1}} d_1$	$\bar{a}_2 = \frac{R_{eff1}}{R_{eff1} - R_{eff2}} a_1$
۳	$\bar{\mu}_3 = \mu_2$	$\bar{R}_{eff3} = R_{eff2} - R_{eff3}$	$\bar{d}_3 = \frac{R_{eff2} - R_{eff3}}{R_{eff2}} d_2$	$\bar{a}_3 = \frac{R_{eff2}}{R_{eff2} - R_{eff3}} a_2$

$$m_r \ddot{u}_r + \frac{W}{N_{TFPB} R_{effr}} (u_r - u_v) + \mu_r \frac{W}{N_{TFPB}} Z_r + F_{r\tau} - \frac{W}{N_{TFPB} R_{effr}} (u_r - u_r) - \mu_r \frac{W}{N_{TFPB}} Z_r - F_{r\tau} = -m_r \ddot{u}_g(t) \quad (6)$$

$$m_v \ddot{u}_v + \frac{W}{N_{TFPB} R_{effv}} u_v + \mu_v \frac{W}{N_{TFPB}} Z_v + F_{r\tau} - \frac{W}{N_{TFPB} R_{effv}} (u_r - u_v) - \mu_r \frac{W}{N_{TFPB}} Z_r - F_{r\tau} = -m_v \ddot{u}_g(t) \quad (7)$$

$$\frac{dZ_v}{dt} = \frac{1}{u_{yv}} \underbrace{\{A_v - |Z_v|^{\eta_v} [\gamma_v \text{sgn}(\dot{u}_v Z_v) + \beta_v]\}}_{z_1} \dot{u}_v \quad (8)$$

$$\frac{dZ_r}{dt} = \frac{1}{u_{yr}} \underbrace{\{A_r - |Z_r|^{\eta_r} [\gamma_r \text{sgn}((\dot{u}_r - \dot{u}_v) Z_r) + \beta_r]\}}_{z_1} (\dot{u}_r - \dot{u}_v) \quad (9)$$

$$\frac{dZ_r}{dt} = \frac{1}{u_{yr}} \underbrace{\{A_r - |Z_r|^{\eta_r} [\gamma_r \text{sgn}((\dot{u}_r - \dot{u}_v) Z_r) + \beta_r]\}}_{z_1} (\dot{u}_r - \dot{u}_v) \quad (10)$$

لازم به توضیح است که جرم‌های  $m_1$  تا  $m_4$  به ترتیب عبارت‌اند از: ۱. جرم لغزنده، ۲. جرم صفحات لغزش دو و سه، ۳. جرم صفحه‌ی لغزنده همراه با جرم کف، ۴. جرم روسازه (شکل ۳).

معادلات تعادل را می‌توان به صورت معادله‌ی دیفرانسیل از درجه‌ی ۱ نمایش داد، که به آن معادله‌ی حالت می‌گویند (رابطه‌ی ۱۱):

$$\{\dot{X}\} = [A] \{X\} + \{B\} \quad (11)$$

که در آن، بردار حالت  $\{X\}$  به صورت رابطه‌ی ۱۲ تعریف می‌شود:

$$\{x\} = \{u_v \ u_r \ u_r \ u_r \ \dot{u}_v \ \dot{u}_r \ \dot{u}_r \ \dot{u}_r \ Z_v \ Z_r \ Z_r\}^T \quad (12)$$

با توجه به تعریف بردار حالت  $\{X\}$ ، هر یک از مؤلفه‌های بردار  $\{\dot{X}\}$  در روابط ۱۳ الی ۲۳ نشان داده شده‌اند:

$$\dot{u}_v = x(5) \quad (13)$$

$$\dot{u}_r = x(6) \quad (14)$$

$$\dot{u}_r = x(7) \quad (15)$$

$$\dot{u}_r = x(8) \quad (16)$$

$$\ddot{u}_v = - \left[ \frac{W}{N_{TFPB} m_v R_{effv}} + \frac{W}{N_{TFPB} m_v R_{effr}} \right] u_v + \frac{W}{N_{TFPB} m_v R_{effv}} u_r - \mu_v \frac{W}{N_{TFPB} m_v} Z_v + \mu_r \frac{W}{N_{TFPB} m_v} Z_r + \frac{F_{r\tau}}{m_v} - \frac{F_{r\tau}}{m_v} - \ddot{u}_g(t) \quad (17)$$

$$F_i = \frac{W}{N_{TFPB} R_{effi}} u_i + \mu_i \frac{W}{N_{TFPB}} z_i + \underbrace{k_{ri} (|u_i| - d_i) \text{sgn}(u_i) H(|u_i| - d_i)}_{F_{ri}} \quad (2)$$

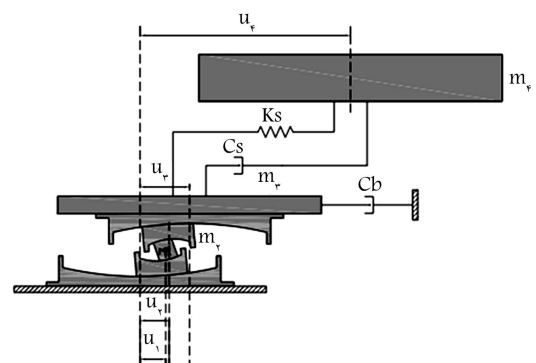
که در آن،  $W$  وزن ساختمان و  $N_{TFPB}$  تعداد جداگرهای استفاده شده برای جداسازی ساختمان است.  $R_{effi}$  شعاع انحنای مؤثر هر یک از المان‌های سری است و جابه‌جایی نسبی هر یک از المان‌های سری با  $u_i$  نشان داده شده است،  $\mu_i$  ضریب اصطکاک هر یک از المان‌های سری و  $Z_i$  پارامتر هیستریسیس مدل بوک-ون<sup>۵</sup> است که بین ۱ و -۱ تغییر می‌کند و با توجه به رابطه‌ی ۳ به دست می‌آید. سختی ناشی از برخورد لغزنده با نگاه‌دارنده‌های جابه‌جایی با  $k_{ri}$  نشان داده شده است. همچنین  $d_i$  ظرفیت جابه‌جایی هر یک از المان‌های سری و  $H$  نیز تابع پلکانی هویساید<sup>۶</sup> است. پارامتر هیستریسیس ( $Z_i$ ) را می‌توان با توجه به معادله‌ی دیفرانسیل ۳ به دست آورد: [۷]

$$\frac{dZ_i}{dt} = \frac{1}{u_{yi}} \{A_i - |Z_i|^{\eta_i} [\gamma_i \text{sgn}(\dot{u}_i Z_i) + \beta_i]\} \dot{u}_i \quad (3)$$

که در آن،  $u_{yi}$  جابه‌جایی تسلیم و  $\dot{u}_i$  سرعت لغزش در المان‌های سری است. همچنین  $\beta_i$  و  $A_i$  متغیرهای بدون بعدی هستند که شکل لوپ هیستریسیس را کنترل می‌کنند. بر طبق نوشتار فنز و همکاران [۶] در این زمینه،  $u_{yi}$  برابر با  $0.1$ ،  $A_i$  برابر با ۱،  $\gamma_i$  برابر با  $0.9$ ،  $\eta_i$  برابر با ۲ و  $\beta_i$  برابر با ۲ در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل‌های ۲ و ۳، معادلات تعادل برای جرم‌های متفاوت در قالب معادله‌های ۳ الی ۹ خواهد بود:

$$m_r \ddot{u}_r + c_s (\dot{u}_r - \dot{u}_r) - k_s (u_r - u_r) = -m_r \ddot{u}_g(t) \quad (4)$$

$$m_r \ddot{u}_r + N_{TFPB} \left[ \frac{W}{N_{TFPB} R_{effr}} (u_r - u_r) + \mu_r \frac{W}{N_{TFPB}} Z_r + k_{r\tau} (|u_r - u_r| - d_r) \text{sgn}(u_r - u_r) H(|u_r - u_r| - d_r) - \frac{C_s}{N_{TFPB}} (\dot{u}_r - \dot{u}_r) - \frac{K_s}{N_{TFPB}} (u_r - u_r) \right] + C_b \dot{u}_r = -m_r \ddot{u}_g(t) \quad (5)$$



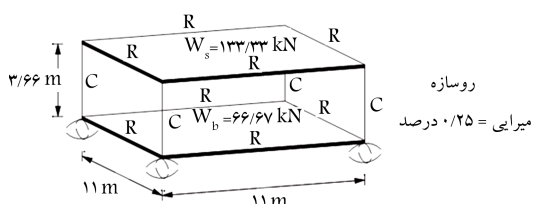
شکل ۳. مدل یک درجه آزادی از ساختمان جداسازی شده توسط جداگر پاندولی اصطکاکی سه‌گانه.

ستون‌ها در شکل ۴ و جدول ۲ آورده شده است. این تذکر لازم است که نتایج این مدل با نتایج آزمایشگاهی در این مرجع مورد تأیید قرار گرفته است.

رکورد زلزله، مؤلفه‌ی ۱۸۰ درجه‌ی زلزله‌ی سال ۱۹۴۰ السترئو با شتاب بیشینه‌ی ۰/۳۱g، شتاب g و ضریب بزرگ‌نمایی زلزله برای اینکه میراگر تمام رژیم‌های لغزش را داشته باشد، ۲/۱۵ است که فقط در یک جهت وارد شده است. مشخصات جداگر اصطکاکی پاندولی سه‌گانه در جدول ۳ آورده شده است. همچنین با توجه به جدول ۱ مشخصات المان‌های سری نیز به دست آمده است.

برای حل معادله‌ی حالت در MATLAB از تابع ode15s استفاده شده است. این تذکر لازم است که برای به دست آوردن  $F_{r_i}$  از جابه‌جایی به دست آمده از مراحل قبل استفاده شده است. همچنین برای به دست آوردن ضرایب اصطکاکی سرعت‌های به دست آمده در مراحل قبلی محاسبات استفاده شده است.  $k_r$  را مقدار زیادی در نظر می‌گیریم.

شکل ۵ نمودارهای نیرو - تغییر مکان به دست آمده از حل معادلات توسط MATLAB و نمودار نیرو تغییر مکان به دست آمده از پژوهش فنز و کنستانتینو (۲۰۰۸) را نشان می‌دهد.



شکل ۴. ساختمان جداسازی شده جهت بررسی مدل و مشخصات آن.

$$\ddot{u}_r = \frac{W}{N_{TFPB} m_r R_{effr}} u_1 - \left[ \frac{W}{N_{TFPB} m_r R_{effr}} + \frac{W}{N_{TFPB} m_r R_{effr}} \right] u_r + \frac{W}{N_{TFPB} m_r R_{effr}} u_r - \mu_r \frac{W}{N_{TFPB} m_r} Z_r + \mu_r \frac{W}{N_{TFPB} m_r} Z_r - \frac{F_{r_r}}{m_r} + \frac{F_{r_r}}{m_r} - \ddot{u}_g(t) \quad (18)$$

$$\ddot{u}_r = \frac{W}{m_r R_{effr}} u_r - \left[ \frac{W}{m_r R_{effr}} + \frac{K_s}{m_r} \right] u_r + \frac{K_s}{m_r} u_r - \frac{(C_s + C_b)}{m_r} \dot{u}_r + \frac{C_s}{m_r} \dot{u}_r - \mu_r \frac{W}{m_r} Z_r - N_{TFPB} \frac{F_{r_r}}{m_r} - \ddot{u}_g(t) \quad (19)$$

$$\ddot{u}_r = 2\xi_s \omega_s (\dot{u}_r - \dot{u}_r) + \omega_s^2 (u_r - u_r) \quad (20)$$

$$\dot{Z}_1 = z_1 \dot{u}_1 \quad (21)$$

$$\dot{Z}_2 = z_2 (\dot{u}_2 - \dot{u}_1) \quad (22)$$

$$\dot{Z}_3 = z_3 (\dot{u}_3 - \dot{u}_r) \quad (23)$$

بنابراین ماتریس A و بردار B به دست خواهند آمد.

### ۳.۲. تصدیق صحت مدل سازی عددی

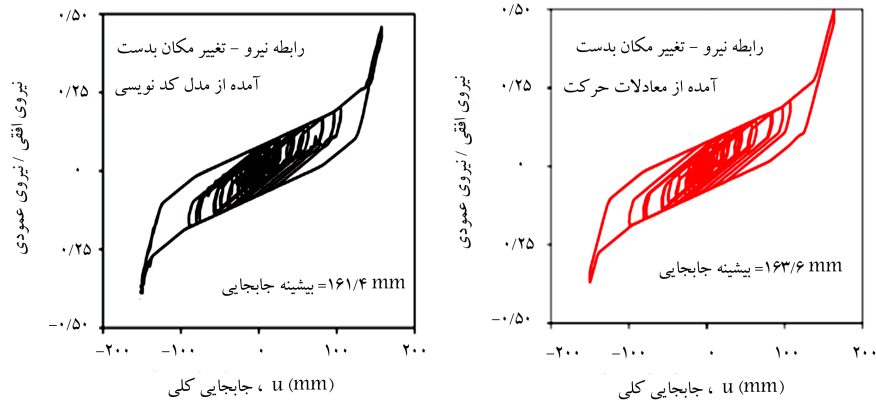
برای بررسی صحت روابط به دست آمده، برنامه‌ی برای حل معادله‌ی حالت در MATLAB نوشته شده و نتایج به دست آمده با نتایج آنالیز مدل مشخصی در نوشتار فنز و کنستانتینو مقایسه شده است.<sup>[۶]</sup> مشخصات مدل از قبیل ابعاد تیر و

جدول ۲. مشخصات ساختمان جداسازی شده جهت بررسی مدل.

مشخصات	سطح مقطع	ممان اینرسی	ثابت پیچش	سطح مقطع برشی	جرم	وزن
مقطع	(mm <sup>2</sup> )	(mm <sup>4</sup> )	(mm <sup>2</sup> )	(mm <sup>2</sup> )	(kg)	(KN)
ستون (C)	۵۷۰ × ۱۰ <sup>۶</sup>	۶۷۸۵۱ × ۱۰ <sup>۷</sup>	۱۷۰ × ۱۰ <sup>۸</sup>	۵۷۰ × ۱۰ <sup>۶</sup>	۰/۰	۰/۰
اعضای صلب (R)	۵۷۰ × ۱۰ <sup>۶</sup>	۱۷۰ × ۱۰ <sup>۱۱</sup>	۱۷۰ × ۱۰ <sup>۸</sup>	۵۷۰ × ۱۰ <sup>۶</sup>	۰/۰	۰/۰

جدول ۳. مشخصات جداگر اصطکاکی پاندولی سه‌گانه‌ی استفاده شده برای تأیید مدل سازی.

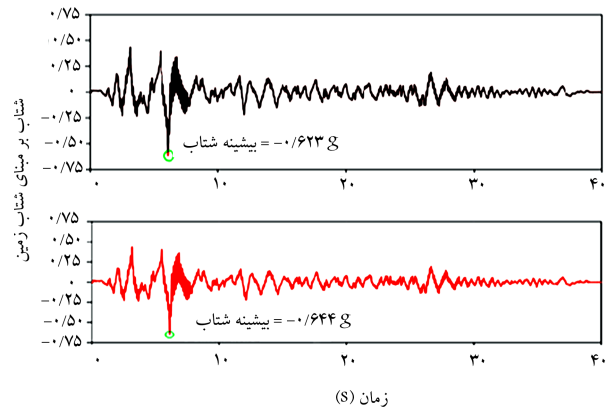
مشخصات جداگر اصطکاکی پاندولی سه‌گانه						
$a_1 = 0/1 \text{ sec/mm}$	$d_1 = 64 \text{ mm}$	$\mu_1 = 0/02 - 0/04$	$R_{eff1} = 435 \text{ mm}$	سطح ۱		
$a_2 = 0/1 \text{ sec/mm}$	$d_2 = 19 \text{ mm}$	$\mu_2 = 0/01 - 0/02$	$R_{eff2} = 52 \text{ mm}$	سطح ۲		
$a_3 = 0/1 \text{ sec/mm}$	$d_3 = 19 \text{ mm}$	$\mu_3 = 0/01 - 0/02$	$R_{eff3} = 52 \text{ mm}$	سطح ۳		
$a_4 = 0/1 \text{ sec/mm}$	$d_4 = 64 \text{ mm}$	$\mu_4 = 0/06 - 0/13$	$R_{eff4} = 435 \text{ mm}$	سطح ۴		
مشخصات المان‌های سری						
$\bar{a}_1 = 1/005 \text{ sec/mm}$	$\bar{d}_1 = 53/6 \text{ mm}$	$\bar{\mu}_1 = 0/01 - 0/02$	$\bar{R}_{eff1} = 106 \text{ mm}$	المان سری ۱		
$\bar{a}_2 = 1/005 \text{ sec/mm}$	$\bar{d}_2 = 56/2 \text{ mm}$	$\bar{\mu}_2 = 0/02 - 0/04$	$\bar{R}_{eff2} = 382 \text{ mm}$	المان سری ۲		
$\bar{a}_3 = 1/005 \text{ sec/mm}$	$\bar{d}_3 = 56/2 \text{ mm}$	$\bar{\mu}_3 = 0/06 - 0/13$	$\bar{R}_{eff3} = 382 \text{ mm}$	المان سری ۳		



شکل ۵. مقایسه‌ی نمودار نیرو - تغییر مکان به دست آمده از حل معادلات توسط MATLAB (سمت چپ) و پژوهش فنز و کنستانتینو (۲۰۰۸) (سمت راست).

#### ۴. تحلیل حساسیت

جهت طراحی بهینه‌ی جداگرهای اصطکاکی و پاندولی همانند هر طراحی بهینه‌ی دیگری، باید پارامترهایی از پاسخ سازه به‌منزله‌ی معیار کنترل طراحی کمینه شود. از این رو لازم است حساسیت آن‌ها نسبت به متغیرهای مختلف بررسی و از میان آن‌ها مؤثرترین‌شان در تابع هدف به‌کارگرفته شوند. بدین منظور اثر ۷ پارامتر یا متغیر طراحی سیستم‌های جداگر سه‌گانه در بیشینه‌ی جابه‌جایی کف، جابه‌جایی نسبی طبقه و شتاب سقف یک سازه‌ی جداسازی‌شده تحت ۳ سطح مختلف زلزله بررسی شده است تا در زمینه‌ی بهینه‌سازی جداگرهای لرزه‌ی، کمینه‌سازی این ۳ پارامتر، به‌عنوان معیار کنترل طراحی قرار گیرند. مدل سازه‌ی فوقانی مورد نظر در این تحلیل، همان مدلی است که برای صحت‌سنجی مدل‌سازی استفاده شده است.



شکل ۶. مقایسه‌ی شتاب مطلق سقفِ روسازه‌ی به دست آمده از حل معادلات حالت توسط MATLAB (شکل بالا) و پژوهش فنز و کنستانتینو (۲۰۰۸) (شکل پایین).

با توجه به شکل‌های ۵ و ۶ می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌سازی انجام‌گرفته صحیح است و می‌توان به نتایج به دست آمده از حل معادلات حالت، اطمینان داشت.

#### ۱.۴. متغیرهای مؤثر در طراحی بهینه‌ی جداگرها

متغیرها زیادی را می‌توان در معیار کنترل طراحی مؤثر دانست که با توجه به این فرضیات، تعداد آن‌ها به ۷ متغیر محدود می‌شود:

— جداگر لرزه‌ی به‌صورت تطبیق‌پذیر کامل  $1^\circ$  در نظر گرفته شده است. این عبارت مطابق مرجع [۵] برای آن دسته از جداگرهای پاندولی به کار می‌رود که نسبت ضرایب اصطکاک و شعاع سطوح مختلف لغزش آن به نحوی انتخاب شده است که قادر به نمایش تمامی رژیم‌های نیرو و جابه‌جایی ممکن ناشی از لغزش بر روی سطوح مختلف برای این سیستم‌ها باشد. بنابراین فرض، شعاع انحناء سطوح ۱ با ۴ و سطوح ۲ با ۳ باید مساوی باشند. همچنین ضرایب اصطکاک سطوح لغزش ۲ و ۳ نیز با هم برابر باشند.

— ظرفیت‌های جابه‌جایی سطوح ۱ با ۴ و سطوح ۲ با ۳ با هم برابر در نظر گرفته شده‌اند، تا تعداد پارامترها و ترکیبات آن کاهش یابد.

— پارامتر سرعت  $a$ ، برای تمامی سطوح عدد منطقی  $0.1 \text{ sec/mm}$  در نظر گرفته شده است، که عددی معقول است.

— بر اساس مقادیر موجود برای پارامترهای طراحی در پژوهش‌های گذشته‌ی محققان و در راستای کاهش تعداد پارامترهای طراحی، مقدار بیشینه‌ی ضریب اصطکاک، ۲ برابر مقدار کمینه در نظر گرفته شده است. [۶] بنابراین، منظور از ضرایب اصطکاک در این نوشتار، فقط مقادیر کمینه است.

#### ۳. رکوردهای مورد استفاده در این مطالعه

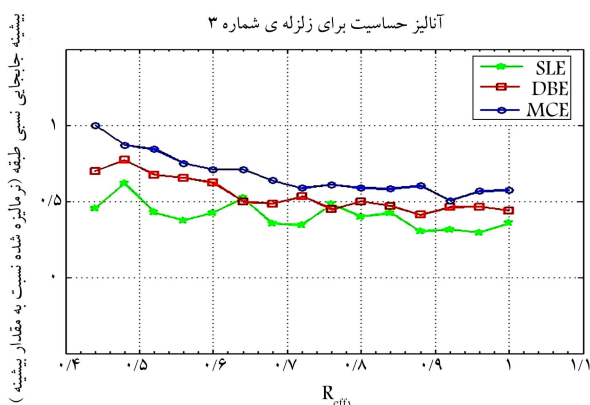
برای در نظر گرفتن تأثیر زلزله‌های حوزی نزدیک، از ۷ رکورد پالس‌دار این زلزله‌ها در محدوده‌ی دوره‌ی تناوب پالس ۱ تا ۷ ثانیه در آنالیز تاریخیچه‌ی زمانی مدل‌های مختلف جداساز استفاده شده است. مقدار دوره‌ی تناوب پالس این رکوردها بر مبنای تحقیقاتی در زمینه‌ی دسته‌بندی زلزله‌های حوزی نزدیک (۲۰۰۷) به دست آمده است. [۸] نام و مشخصات دیگر رکوردهای انتخاب‌شده در جدول ۴ آمده است. برای تعیین شتاب بیشینه‌ی زلزله برای سطوح مختلف MCE، DBE، SLE<sup>۹</sup> از نتایج تحلیل خطر لرزه‌ی سایتی در حوالی شهر قزوین استفاده شده است. سایت مورد نظر دارای طول و عرض جغرافیایی ۵۰/۵۶ و ۳۶/۷۳ بوده است. همچنین شعاع مورد مطالعه ۱۵۰ کیلومتر و محدوده‌ی زمانی داده‌های لرزه‌خیزی از سال‌های ۱۹۰۱ الی ۲۰۰۴ در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج تحلیل خطر این سایت، مقادیر شتاب طرح برای سطوح SLE، DBE، MCE برابر با ۰/۲۹۱، ۰/۵۱۷ و ۰/۷۵۹ شتاب زمین است. رکورد تمامی زلزله‌های مورد نظر به شتاب سه سطح طراحی مقیاس شد.

جدول ۴. خلاصه‌ی مشخصات رکوردهای زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک پالس دار استفاده‌شده.

شماره زلزله	نام زلزله	سال وقوع	شماره زلزله در طبقه‌بندی بیکر [۸]	ایستگاه ثبت زلزله	دوره تناوب پالس (ثانیه)	بزرگای زلزله (Mw)
۱	Morgan Hill	۱۹۸۴	۲۴	Coyote Lake Dam (SW Abut)	۱	۶٫۲
۲	Loma Prieta	۱۹۸۹	۳۳	Alameda Naval Air Stn Hanger	۲	۶٫۹
۳	Cape Mendocino	۱۹۹۲	۳۸	Petroliia	۳	۷
۴	Imperial Valley_۰۶	۱۹۷۹	۱۳	El Centro Array #۶	۳٫۸	۶٫۵
۵	Imperial Valley_۰۶	۱۹۷۹	۱۴	El Centro Array #۷	۴٫۲	۶٫۵
۶	Landers	۱۹۹۲	۴۰	Lucerne	۵٫۱	۷٫۳
۷	Chi-Chi Taiwan	۱۹۹۹	۶۴	TCU۰۳۸	۷	۷٫۶

جدول ۵. مقادیر هر یک از متغیرهای طراحی در تحلیل حساسیت.

$d_r$ (m)	$d_1$ (m)	$\mu_3$	$\mu_2$	$\mu_1$	$R_{eff2}$ (m)	$R_{eff1}$ (m)	
۰٫۰۵-۰٫۰۲۲	۰٫۱۱-۰٫۰۵۴	۰٫۱۵-۰٫۰۵	۰٫۰۲-۰٫۰۱	۰٫۰۶-۰٫۰۱۸	۰٫۱-۰٫۰۴۴	۱-۰٫۴۴	بازه‌ی تغییرات هر پارامتر
۰٫۰۱۹	۰٫۰۶۴	۰٫۰۶	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۵۳	۰٫۴۳۵	مقدار هر پارامتر برای تحلیل حساسیت بقیه‌ی پارامترها



شکل ۷. تغییرات بیشینه‌ی جابه‌جایی نسبی طبقه نسبت به  $R_{eff1}$  برای زلزله‌ی ۱ در سطوح سه‌گانه‌ی زلزله.

#### ۱.۲.۴. بیشینه‌ی جابه‌جایی نسبی طبقه

شکل ۷، تغییرات بیشینه‌ی جابه‌جایی نسبی طبقه نسبت به  $R_{eff1}$  برای زلزله‌ی شماره‌ی یک در سطوح سه‌گانه‌ی زلزله را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار بیشینه‌ی جابه‌جایی نسبی طبقه‌ی به‌دست‌آمده از هر یک از رکوردها با تغییرات شعاع انحنای مؤثر سطوح ۱ و ۴ ( $R_{eff1}$ )، متناسب با هر یک از سطوح لرزه‌یی تغییر می‌کند. جهت ارائه‌ی یک تصویر کلی از اثر میزان تغییرات  $R_{eff1}$  در بیشینه‌ی جابه‌جایی نسبی طبقه، نسبت تغییرات بیشینه‌ی جابه‌جایی نسبی طبقه به مقدار میانگین این میزان مد نظر قرار گرفته است؛ که برای هر منحنی، پارامتر  $\gamma$  با توجه به رابطه‌ی ۲۴ به‌دست آمده است:

$$\gamma = \frac{\text{Max}_R - \text{Min}_R}{(\text{Max}_R + \text{Min}_R)} \quad (24)$$

در این رابطه،  $\text{Max}_R$  و  $\text{Min}_R$  بیانگر مقادیر بیشینه و کمینه‌ی پاسخ سازه در محدوده‌ی تغییرات پارامتر موردنظر برای منحنی هر یک از رکوردهاست. برای مثال  $\text{Max}_R$ ،  $\text{Min}_R$  و  $\gamma$  برای زلزله‌ی سطح MCE در شکل ۷ به ترتیب برابر ۱٫۰۶، ۰٫۷۵ و ۰٫۶ است. نتایج به‌دست‌آمده از میان منحنی‌های ۷ رکورد حوزه‌ی نزدیک در ۳

-- سختی زاینده‌های پیرامونی سطوح ( $k_r$ ) که کار نگه‌دارندگی لغزنده‌ها را در محدوده‌ی سطوح به عهده دارند، یکسان و عدد بزرگی در نظر گرفته شده‌اند ( $17500 \text{ kN/mm}$ ).

پارامترهای طراحی با توجه به فرضیات در نظر گرفته شده عبارت‌اند از:

-- شعاع انحنای مؤثر سطح ۱ و ۴ ( $R_{eff1}$ );

-- شعاع انحنای مؤثر سطح ۲ و ۳ ( $R_{eff2}$ );

-- ضریب اصطکاک سطح ۱ ( $\mu_1$ );

-- ضریب اصطکاک سطح ۲ و ۳ ( $\mu_2$ );

-- ضریب اصطکاک سطح ۴ ( $\mu_3$ );

-- ظرفیت جابه‌جایی سطح ۱ و ۴ ( $d_1$ );

-- ظرفیت جابه‌جایی سطح ۲ و ۳ ( $d_r$ ).

برای انجام تحلیل حساسیت، یکی از پارامترها تغییر داده شده است و بقیه‌ی پارامترها ثابت در نظر گرفته شده‌اند. این کار برای هر پارامتر برای ۲۱ رکورد مختلف تکرار شده است. محدوده‌ی تغییرات هر پارامتر طبق ابعاد معمول شرکت‌های سازنده‌ی این جداگرها برای ساختمان‌های متعارف، در نظر گرفته شده است.<sup>[۵]</sup> محدوده‌ی تغییرات مقادیر ضرایب اصطکاک نیز با همان فرض و اینکه سیستم باید به‌صورت کاملاً تطبیق‌پذیر عمل کند، در نظر گرفته شده‌اند. مقادیر ثابت و محدوده‌ی تغییرات پارامترها در جدول ۵ نشان داده شده‌اند. مقادیر ثابت نیز مطابق با فرضیات مطالعه‌ی انجام‌شده‌ی فنز و کنستانتینو<sup>[۶]</sup> در بازه‌ی بیشینه و کمینه‌ی محدوده‌ی تغییرات در نظر گرفته شده‌اند.

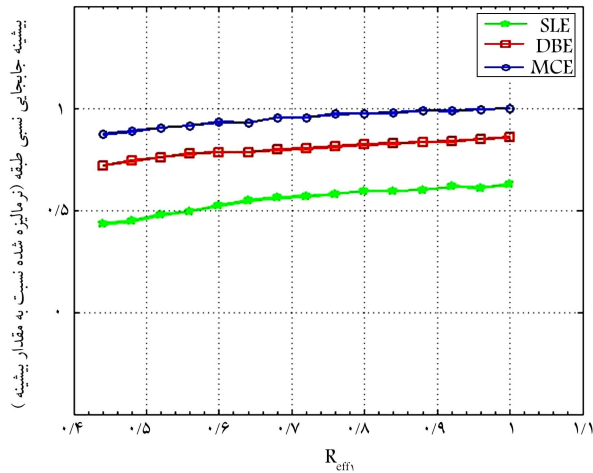
#### ۲.۴. تحلیل حساسیت پارامترها

اولین پارامتری که در این تحلیل بر اساس میزان تأثیرگذاری در پاسخ سازه مورد بررسی قرار گرفته است،  $R_{eff1}$  است. اثر این پارامتر در سطوح مختلف زلزله یعنی DBE، MCE و SLE و برای ۲۱ رکورد زلزله در پاسخ‌های مختلف سازه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. خلاصه‌ی نتایج این تحلیل در ادامه آورده شده است.

جدول ۷. بیشترین و کم‌ترین میزان  $\gamma$  برای پارامتر  $R_{eff1}$ .

SLE	DBE	MCE	(%) سطوح مختلف زلزله
۱۶٫۴	۱٫۶	۱	کم‌ترین میزان $\gamma$
۳۷٫۱	۳۱٫۸	۲۴٫۵	بیشترین میزان $\gamma$

آنالیز حساسیت برای زلزله ی شماره ۶



شکل ۸. تغییرات بیشینه‌ی جابه‌جایی تراز جداگرها نسبت به  $R_{eff1}$  برای زلزله ی ۱ در سطوح سه‌گانه‌ی زلزله.

علاوه بر شعاع انحنای سطوح ۱ و ۴ ( $R_{eff1}$ )، اثر بقیه‌ی پارامترها مانند شعاع انحنای مؤثر سطوح ۲ و ۳ ( $R_{eff2}$ )، ضریب اصطکاک سطح ۱ ( $\mu_1$ )، ضریب اصطکاک سطح ۲ و ۳ ( $\mu_2$ )، ضریب اصطکاک سطح ۴ ( $\mu_3$ )، ظرفیت جابه‌جایی سطوح ۱ و ۴ ( $d_1$ )، ظرفیت جابه‌جایی سطوح ۲ و ۳ ( $d_2$ ) در پاسخ بیشینه‌ی جابه‌جایی نسبی طبقه و بیشینه‌ی جابه‌جایی تراز جداگرها در جدول ۸ خلاصه شده است.

## ۵. نتایج بهینه‌سازی به روش الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک با الهام از طبیعت و تکامل تدریجی آن شکل گرفته است و فلسفه‌ی آن اعتقاد به این موضوع است که اولاً، محصولات فرآیندهای طبیعی به نوعی بهینه هستند و ثانیاً، روشی که طبیعت برای ساختن این محصولات به‌کار می‌برد، در واقع یک روش بهینه‌سازی تکاملی است. در این روش مجموعه‌ی پاسخ‌های ممکن مسئله در نظر گرفته می‌شوند و با استفاده از روش جستجو، پاسخ‌هایی که به حل مسئله نزدیک‌تر باشند، تعیین می‌شوند. با استفاده از فرآیند حاکم بر سیستم‌های طبیعی، در نهایت جمعیت جدیدی از پاسخ‌ها به‌دست می‌آید و با تکرار این روند، جمعیتی که دارای افراد تکامل‌یافته‌تری هستند، تولید و فردی از جمعیت که تطبیق بیشتری با حل مسئله دارد، به‌عنوان پاسخ نهایی انتخاب می‌شود.<sup>[۱۰۹]</sup>

با توجه به اینکه مسئله‌ی موردنظر در این نوشتار، طراحی بهینه‌ی پارامترهای جداگر لرزه‌ی سه‌گانه برای زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک است و از آنجایی که پاسخ‌های ساده، تابعی از پارامترهای طراحی جداگر پاندولی اصطکاکی سه‌گانه خواهند بود، از این رو در این قسمت سعی شده است تا با تعریف توابعی برای مقادیر بیشینه‌ی پاسخ سازه و همچنین فرضیاتی برای روش حل الگوریتم ژنتیک، مقادیر پارامترهای بهینه‌ی جداگر معرفی شوند. در این رابطه، روند بهینه‌سازی برای زلزله‌های پالس‌دار

سطح مختلف زلزله در جدول ۶ در قالب کم‌ترین و بیشترین میزان  $\gamma$  خلاصه شده است.

همان‌طور که از جدول ۶ مشاهده می‌شود، تغییرات شعاع انحنای مؤثر سطوح ۱ و ۴ ( $R_{eff1}$ ) می‌تواند میزان جابه‌جایی نسبی بیشینه‌ی طبقه را نسبت به میانگین آن تا حدود ۶۰ الی ۷۰ درصد تغییر دهد، که نشان از تأثیرگذاری روشن این پارامتر در بیشینه‌ی جابه‌جایی نسبی طبقات است.

### ۳.۲.۴. شتاب بیشینه‌ی بام

شتاب بام ( $\ddot{u}_3$ ) از رابطه‌ی ۲۵ به‌دست می‌آید:

$$\ddot{u}_3 = 2\xi_s \omega_s (\ddot{u}_3 - \ddot{u}_2) + \omega_s^2 (u_3 - u_2) \quad (25)$$

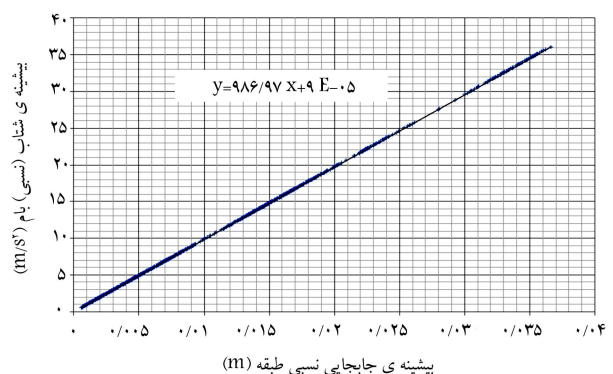
که در آن،  $\omega_s$  بسامد طبیعی روسازه و  $\xi_s$  ضریب میرایی روسازه است. از آنجایی که میرایی روسازه مقدار بسیار ناچیزی (۲۵٪) در نظر گرفته شده است، بنابراین شتاب بام، تابعی خطی از جابه‌جایی نسبی طبقه خواهد بود. این استدلال از شکل ۸ که شتاب بیشینه‌ی بام نسبت به جابه‌جایی نسبی طبقه را برای تمامی زلزله‌ها (۷ زلزله) در همه‌ی سطوح (SLE، DBE، MCE) و تغییرات تمامی پارامترهای طراحی (۷ پارامتر) نشان می‌دهد، قابل درک است. با توجه به اینکه دوره‌ی تناوب روسازه برابر با ۰٫۲ ثانیه است، بنابراین  $\omega_s^2 = ۹۸۶٫۹۶$  که این مقدار همان شیب خط برازش‌شده برای نقاط نشان داده شده در شکل ۸ است، با توجه به این مباحث، اثر تغییر پارامترهای جداگر در پاسخ شتاب بام را می‌توان مشابه اثر آن در تغییرات جابه‌جایی نسبی طبقه در نظر گرفت و از مطالعه‌ی جداگانه‌ی آن صرف‌نظر کرد.

### ۳.۲.۴. بیشینه‌ی جابه‌جایی تراز جداگرها

برای این پاسخ، کم‌ترین و بیشترین میزان تغییرات در سطوح مختلف زلزله در جدول ۶ مشاهده می‌شود. با توجه به جدول ۷ مشاهده می‌شود که با وجود اینکه تأثیر شعاع انحنای سطوح ۱ و ۴ در جابه‌جایی جداگر کمتر از جابه‌جایی نسبی طبقه و یا شتاب سازه است، اما این تأثیر به هیچ‌وجه قابل اغماض نیست. در شکل ۹، برای نمونه، تأثیر شعاع انحنای سطوح ۱ و ۴ را برای زلزله‌ی ۶ و در سطوح سه‌گانه‌ی زلزله می‌توان مشاهده کرد.

جدول ۶. بیشترین و کم‌ترین میزان  $\gamma$  برای پارامتر  $R_{eff1}$ .

SLE	DBE	MCE	(%) سطوح مختلف زلزله
۲۷٫۱	۹	۸٫۹	کم‌ترین میزان $\gamma$
۷۵	۶۴٫۹	۶۵٫۹	بیشترین میزان $\gamma$



شکل ۹. تغییرات شتاب بیشینه‌ی بام نسبت به جابه‌جایی نسبی طبقه برای همه‌ی زلزله‌ها در تمام سطوح و تمامی پارامترهای طراحی.

جدول ۸. نتایج خلاصه شده تحلیل حساسیت در پارامترهای طراحی.

شعاع انحنای موثر سطح دو و سه $Reff_{2,3}$				
SLE	DBE	MCE	سطح زلزله (%)	
۵٫۷	۴٫۱	۴٫۸	کمترین میزان	بیشینه جابه‌جایی
۳۱٫۸	۲۵٫۲	۳۶٫۱	بیشترین میزان	نسبی طبقه
۲٫۴	۱٫۸	۰٫۸	کمترین میزان	بیشینه جابه‌جایی
۸٫۱	۷٫۳	۱۶٫۷	بیشترین میزان	تراز جداگرها
ضریب اصطکاک سطح یک $\mu_1$				
SLE	DBE	MCE	سطح زلزله (%)	
۱۳٫۷	۴٫۲	۳٫۱	کمترین میزان	بیشینه جابه‌جایی
۳۳٫۷	۵۲٫۹	۴۲٫۶	بیشترین میزان	نسبی طبقه
۶٫۱	۱٫۵	۲٫۲	کمترین میزان	بیشینه جابه‌جایی
۴۴٫۶	۲۶٫۸	۱۹٫۹	بیشترین میزان	تراز جداگرها
ضریب اصطکاک سطح دو و سه $\mu_{2,3}$				
SLE	DBE	MCE	سطح زلزله (%)	
۹٫۱	۳٫۶	۱٫۹	کمترین میزان	بیشینه جابه‌جایی
۴۲٫۳	۲۱٫۵	۲۶٫۱	بیشترین میزان	نسبی طبقه
۴٫۲	۱٫۱	۰٫۳	کمترین میزان	بیشینه جابه‌جایی
۱٫۲	۲	۱۱٫۳	بیشترین میزان	تراز جداگرها
ضریب اصطکاک سطح چهار $\mu_4$				
SLE	DBE	MCE	سطح زلزله (%)	
۸٫۶	۷٫۴	۳٫۳	کمترین میزان	بیشینه جابه‌جایی
۴۵٫۲	۴۴٫۲	۲۴٫۸	بیشترین میزان	نسبی طبقه
۲٫۷	۲٫۷	۲٫۱	کمترین میزان	بیشینه جابه‌جایی
۲۷٫۳	۱۴٫۸	۹٫۵	بیشترین میزان	تراز جداگرها
ظرفیت جابه‌جایی سطح یک و چهار $d_1$				
SLE	DBE	MCE	سطح زلزله (%)	
۰	۰	۹٫۴	کمترین میزان	بیشینه جابه‌جایی
۸۲٫۷	۱۰۴٫۴	۷۱٫۶	بیشترین میزان	نسبی طبقه
۰	۰	۲٫۱	کمترین میزان	بیشینه جابه‌جایی
۲۴٫۲	۳۵٫۲	۵۷٫۸	بیشترین میزان	تراز جداگرها
ظرفیت جابه‌جایی سطح دو و سه $d_{2,3}$				
SLE	DBE	MCE	سطح زلزله (%)	
۰	۰	۰	کمترین میزان	بیشینه جابه‌جایی
۰	۲۵٫۱	۳۲٫۳	بیشترین میزان	نسبی طبقه
۰	۰	۰	کمترین میزان	بیشینه جابه‌جایی
۰	۵٫۸	۱۳٫۴	بیشترین میزان	تراز جداگرها

حوزه‌ی نزدیک در سطوح سه‌گانه‌ی زلزله (SLE و DBE، MCE) به صورت مجزا انجام و نتایج در قالب نمودار بیان شده‌اند.

### ۱.۵. بیان مسئله و فرضیات

در سازه‌های کوتاه و میان‌طبقه، که از سیستم جداسازی لرزه‌ی بهره می‌برند، مود اول ارتعاشی روسازه تحت تأثیر جداگر، اصطلاحاً مود ارتعاشی صلب است. به بیان دیگر، مشخصات دینامیکی روسازه در پاسخ دینامیکی سیستم بسیار کم تأثیر است. تنها پارامتر مؤثر در این نوع سازه‌ها جرم روسازه است که مقدار آن مستقیماً

با دوره‌ی تناوب ارتعاش مود اول مرتبط است. از سوی دیگر، یکی از مشخصه‌هایی که جداگرهای پاندولی اصطکاکی را از سایر جداگرها متمایز می‌سازد، این است که دوره‌ی تناوب ارتعاشی مود اول سیستم، فقط به شعاع قوس جداگر بستگی دارد و برخلاف سیستم‌های جداسازی شده به وسیله‌ی جداگرهای الاستومری، حتی جرم سازه‌ی فوقانی نیز در مشخصات ارتعاشی آن بی‌تأثیر است.<sup>[۱۴]</sup> از این رو، هر چند در این مطالعه از یک سازه‌ی یک طبقه با مشخصات معینی برای طراحی بهینه‌ی جداگر پاندولی اصطکاکی سه‌گانه استفاده شده است، ولی به دلایل مذکور، نتایج حاصله برای سازه‌های کوتاه و میان‌طبقه، که محدوده‌ی اصلی کاربری سیستم‌های جداساز لرزه‌ی است، قابل بسط است.

برای طراحی بهینه‌ی جداگر پاندولی اصطکاکی سه‌گانه به گونه‌ی که پاسخ بیشینه‌ی جابه‌جایی نسبی طبقه و جابه‌جایی تراز جداگرها کمترین مقدار را داشته باشد، در اولین گام برای استفاده از روش الگوریتم ژنتیک، دو تابع برازندگی  $f_1$  و  $f_2$  در نظر گرفته می‌شود. روابط ۲۶ و ۲۷، هر دو تابعی از پارامترهای ۷ گانه‌ی طراحی جداگر هستند، که  $f_1$  مقدار بیشینه‌ی جابه‌جایی نسبی طبقه و  $f_2$  مقدار بیشینه‌ی جابه‌جایی تراز جداگرها را محاسبه می‌کنند. این دو تابع با توجه به اصول مدل‌سازی قسمت ۲، در نرم‌افزار MATLAB به صورت عددی و در قالب تابعی جداگانه نوشته شده‌اند. برای هر بار تحلیل بهینه، یکی از این دو تابع برای زلزله‌ی مشخص (۱ از ۷ زلزله‌ی حوزه‌ی نزدیک) در سطحی از طراحی در نظر گرفته شده‌اند.

$$f_1(Reff_1, Reff_2, \mu_1, \mu_2, \mu_3, d_1, d_2) = (Story\ Drift)_{max} \quad (26)$$

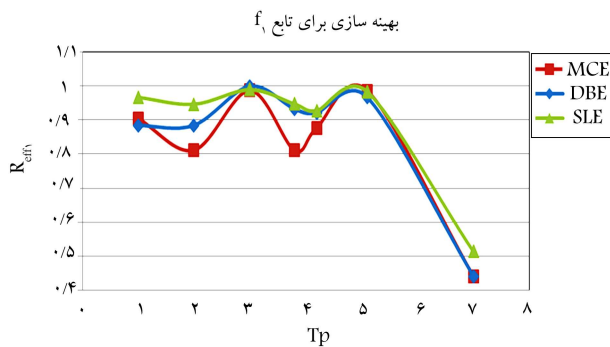
$$f_2(Reff_1, Reff_2, \mu_1, \mu_2, \mu_3, d_1, d_2) = (Isolator\ Level\ Displ.)_{max} \quad (27)$$

محدوده‌ی تغییرات ۷ پارامتر مؤثر در بازه‌های مشخص شده در قسمت ۴ تعریف شده‌اند. همچنین محدودکننده‌ی غیرخطی<sup>۱۲</sup> برای تأمین شرایط تطبیق پذیری کامل جداگر نوشته شده است تا پارامترهای بهینه، شرایط سیستم جداگر سه‌گانه‌ی کاملاً تطبیقی را ارضاء کنند و فرضیات استفاده‌شده در مدل‌سازی صادق باشند.

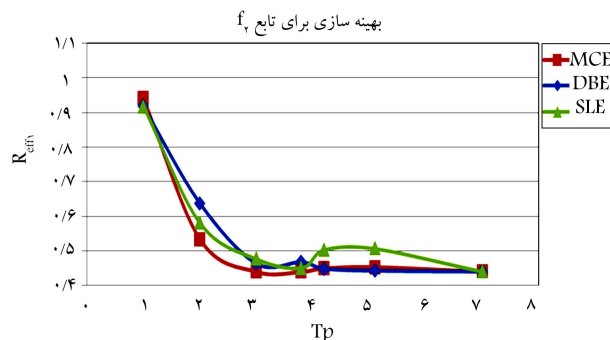
نوع جمعیت<sup>۱۳</sup> در نظر گرفته‌شده از نوع بردار عددی و اندازه‌ی جمعیت<sup>۱۴</sup>، از آنجایی که به دست آوردن مقادیر مناسب برای این الگوریتم به صورت سعی و خطاست، در اولین انتخاب برابر با ۲۰ فرض و تابع سازنده‌ی<sup>۱۵</sup> جمعیت اولیه، وابسته به محدوده‌ی تغییرات متغیرها<sup>۱۶</sup> در نظر گرفته شده است؛ بنابراین جواب‌های اولیه‌ی به دست آمده در هر مرحله ممکن<sup>۱۷</sup> خواهند بود. در هر تکرار پس از ایجاد نسل جدید از مکانیزم رتبه‌بندی خطی<sup>۱۸</sup> برای نمونه‌گیری استفاده شده است و تابع انتخاب‌کننده<sup>۱۹</sup>، که مسئول انتخاب والد برای نسل بعدی با استفاده از احتمال‌های ایجادشده توسط مکانیزم رتبه‌بندی است، از طریق چرخ رولت<sup>۲۰</sup> انجام شده است. برای تولید نسل جدید<sup>۲۱</sup>، کمینه‌ی تعداد بهترین ژن‌هایی که در نسل بعد ظاهر می‌شوند<sup>۲۲</sup>، ۲ و نرخ تقاطع<sup>۲۳</sup>، ۰٫۸ در نظر گرفته شده و تابع جهش<sup>۲۴</sup> وابسته به محدوده‌ی تغییرات و تابع تقاطع<sup>۲۵</sup> به صورت پراکنده<sup>۲۶</sup> فرض شده است. مقدار جرمی اولیه<sup>۲۷</sup> و فاکتور<sup>۲۸</sup> آن،<sup>[۱۰]</sup> به ترتیب ۱۰ و ۱۰۰ انتخاب و به عنوان راهکار جریمه در نظر گرفته شده‌اند. برای توقف بهینه‌سازی نیز، ۲ معیار لحاظ شده است که به ترتیب عبارت‌اند از: الف) تعداد نسل‌ها بیشتر از ۱۰۰ شود، ب) میزان تغییرات مقدار تابع برازندگی کمتر از  $10^{-6}$  شود.<sup>[۱۱]</sup>

این تذکر لازم است که تعدادی از مقادیر پارامترهای الگوریتم ژنتیک ذکرشده، به صورت مقادیر اولیه در نظر گرفته شده‌اند که پس از چندین بار اجرای الگوریتم، مقادیر آنها برای زلزله‌های مختلف تنظیم شده‌اند (جدول ۹).





شکل ۱۱. مقادیر بهینه‌ی  $R_{eff1}$  برای کمینه‌کردن تابع  $f_1$  در ۳ سطح MCE، DBE و SLE.



شکل ۱۲. مقادیر بهینه‌ی  $R_{eff2}$  برای کمینه‌کردن تابع  $f_2$  در ۳ سطح MCE، DBE و SLE.

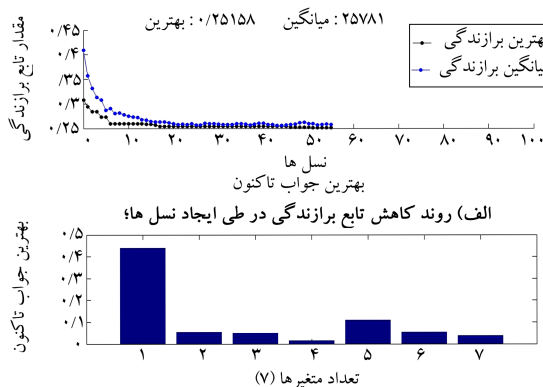
شکل ۱۲، نمودار مقادیر بهینه‌ی شعاع انحنای سطوح ۱ و ۴ را برای کمینه‌کردن تابع  $f_2$  یا بیشینه‌ی جابه‌جایی تراز جداگرها نشان می‌دهد. در این نمودار نیز مقادیر بهینه‌ی  $R_{eff1}$  برای ۳ سطح زلزله‌ی طرح و برای زلزله‌های حوزه‌ی نزدیکی با دوره‌ی تناوب پالس، بین ۱ تا ۷ ثانیه به دست آمده‌اند. بر اساس این نمودار، برای بازه‌ی وسیعی از دوره‌های تناوب پالس (۲ تا ۷ ثانیه) مقادیر بهینه‌ی  $R_{eff1}$  فقط بین ۰/۴ تا ۰/۶ متر تغییر می‌کنند؛ یعنی برای کمینه‌کردن جابه‌جایی تراز جداگرها در اثر زلزله‌هایی با دوره‌ی تناوب پالس ۲ تا ۷ ثانیه، بهترین مقادیر شعاع انحنای سطوح ۱ و ۴ در بازه‌ی ۰/۴ تا ۰/۶ متر هستند. مقادیر جواب‌های بهینه‌ی  $R_{eff1}$  برای سطوح مختلف زلزله (MCE، DBE و SLE) به هم نزدیک هستند و این کار را برای طراحی سطوح مختلف آسان‌تر می‌کند. مقادیر بهینه‌ی شعاع برای سطوح ۱ و ۴ در هر دو حالت فوق از یک محدوده‌ی ۰/۴ تا ۰/۶ متری انتخاب شده است. همچنین با نگاهی دیگر به نمودار شکل ۱۲ می‌توان دریافت که هر چه دوره‌ی تناوب پالس به مقادیر کوچک‌تری نزدیک شود، مقادیر بهینه‌ی شعاع انحنای سطوح ۱ و ۴ برای کمینه‌کردن مقدار تابع  $f_2$ ، بزرگ‌تر می‌شوند.

### ۲.۲.۵. شعاع انحنای مؤثر سطوح ۲ و ۳ ( $R_{eff2}$ )

برای شعاع انحنای مؤثر سطوح ۲ و ۳، همان‌طور که در نمودار شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، نظم چندان مشخصی در نتایج بهینه‌سازی برای تابع  $f_1$  مانند نتایج بهینه‌سازی برای شعاع انحنای مؤثر سطوح ۱ و ۴ دیده نمی‌شود. با توجه به این نمودار می‌توان گفت با وجود اینکه محدوده‌ی تغییرات پارامتر  $R_{eff2}$  بین ۰/۴۴ تا ۰/۸ متر در نظر گرفته شده است، اما مقادیر بهینه بین ۰/۰۶ تا ۰/۱ متر تغییرات دارند. همچنین با توجه به این نمودار، برای دوره‌ی تناوب پالس‌های بزرگ‌تر از ۴ ثانیه، نتایج پارامترهای

جدول ۹. پارامترهای الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی تحت زلزله‌های مختلف.

شماره‌ی زلزله	اندازه‌ی جمعیت	تعداد بهترین جواب‌هایی که حتماً به نسل بعد منتقل می‌شوند	نرخ تقاطع
۱	۳۰	۲	۰/۸۵
۲	۲۸	۳	۰/۹۰
۳	۳۲	۳	۰/۹۵
۴	۲۵	۳	۰/۸۵
۵	۳۵	۴	۰/۹۵
۶	۲۵	۳	۰/۹۰
۷	۳۰	۳	۰/۹۰



(ب) مقادیر نهایی متغیرهای طراحی جداگر سه قوسی.

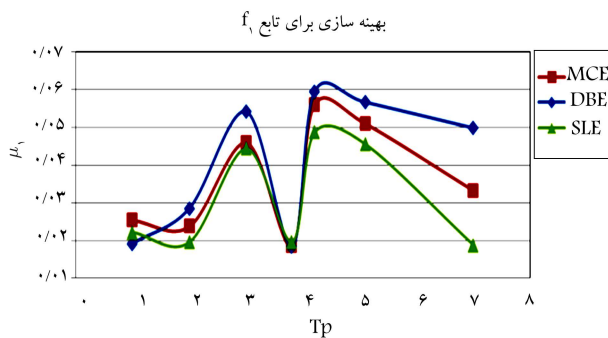
شکل ۱۰. نمونه‌ی از روند بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک.

### ۲.۲.۵. نتایج بهینه‌سازی برای توابع $f_1$ و $f_2$

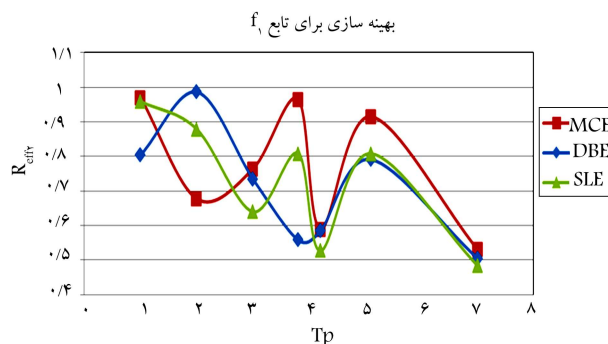
در شکل ۱۰، نمونه‌ی از روند بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک نشان داده شده است. این شکل برای بهینه‌سازی تابع ارزیابی  $f_2$  تحت زلزله‌ی ۴ انجام شده است، که در نهایت میزان کمینه‌ی این تابع برابر با ۰/۲۵۱ به دست آمده است. یعنی کمترین مقدار به دست آمده برای بیشینه‌ی جابه‌جایی تراز جداگرها تحت زلزله‌ی ۴، ۲۵۱ میلی‌متر بوده است. همان‌طور که شکل ۱۰ الف روند کاهش مقدار تابع هدف برای بهترین جواب و میانگین جواب‌ها برای هر نسل و در شکل ۱۰ ب مقادیر نهایی بهینه‌ی متغیرهای طراحی که ۷ متغیر (از  $R_{eff1}$  تا  $d_2$ ) هستند، نشان داده شده است. روند بهینه‌سازی در نسل ۱۵۵ موقوف شده است.

### ۱.۲.۵. شعاع انحنای مؤثر سطوح ۱ و ۴ ( $R_{eff1}$ )

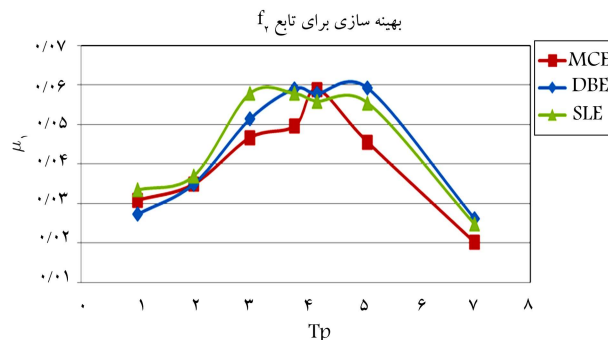
در نمودار شکل ۱۱، نتایج بهینه‌سازی شعاع انحنای مؤثر  $R_{eff1}$  برای تابع  $f_1$  نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این نتایج در ۳ سطح از زلزله‌ی طرح یعنی MCE، DBE و SLE و برای زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک، که پیش از این با دوره‌های تناوب پالس مختلف معرفی شده‌اند، در محدوده‌ی دوره‌ی تناوب پالس‌های ۱ تا ۷ ثانیه به دست آمده‌اند. بر اساس این نمودار می‌توان مشاهده کرد که برای سطوح مختلف زلزله‌ی طرح، مقادیر بهینه‌ی  $R_{eff1}$  برای کمینه‌کردن مقدار تابع  $f_1$ ، بسیار به هم نزدیک هستند و روند یکسانی را نشان داده‌اند. همچنین برای بازه‌ی بزرگی از دوره‌های تناوب پالس (۱ تا ۶ ثانیه) جواب‌های بهینه‌ی  $R_{eff1}$  تنها بین ۰/۸ تا ۱ متر تغییر مقدار می‌دهند. بنابراین برای محدود کردن جابه‌جایی نسبی طبقه برای زلزله‌هایی با دوره‌ی تناوب پالس بین ۱ تا ۶ ثانیه و سطوح مختلف طرح، می‌توان شعاع انحنای صفحات ۱ و ۴ را بین ۰/۸ تا ۱ متر انتخاب کرد.



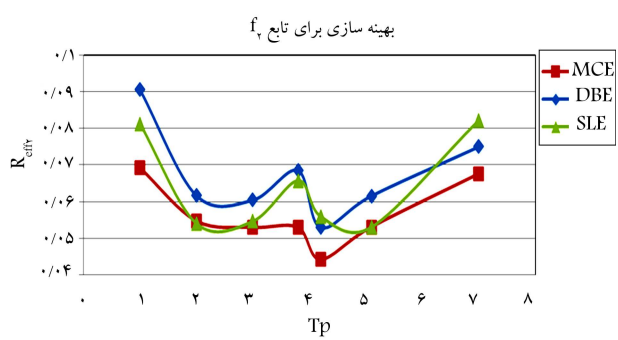
شکل ۱۵. مقادیر بهینه  $\mu_1$  برای کمیته کردن تابع  $f_1$  در سطح MCE، DBE و SLE.



شکل ۱۳. مقادیر بهینه  $R_{eff}$  برای کمیته کردن تابع  $f_1$  در سطح MCE، DBE و SLE.



شکل ۱۶. مقادیر بهینه  $\mu_1$  برای کمیته کردن تابع  $f_2$  در سطح MCE، DBE و SLE.



شکل ۱۴. مقادیر بهینه  $R_{eff}$  برای کمیته کردن تابع  $f_2$  در سطح MCE، DBE و SLE.

این شکل، برای بازه وسیعی از دوره تناوب پالس زلزله‌های حوزه نزدیک، مقادیر بهینه  $\mu_1$  برای کمیته کردن میزان جابه‌جایی تراز کف در سطوح متفاوت زلزله‌ی طرح، بسیار به هم نزدیک هستند. همچنین با توجه به شکل گنبدگونه‌ی این نمودار، مقادیر بیشینه‌ی جواب‌های بهینه  $\mu_1$  برای محدود کردن جابه‌جایی تراز جداگرها، در زلزله‌هایی با دوره تناوب پالس حدود ۴ ثانیه به دست می‌آیند. همچنین برای زلزله‌هایی با دوره تناوب پالس بین ۲ تا ۶ ثانیه، مقادیر بهینه بین ۰٫۶ تا ۰٫۰۶ محدود می‌شوند.

#### ۴.۲.۵. ضریب اصطکاک سطح ۲ و ۳ ( $\mu_2$ )

مقادیر بهینه‌ی ضریب اصطکاک سطح ۲ و ۳ (که تغییرات آن در بازه‌ی کوچک ۰٫۰۱ تا ۰٫۰۲ تغییرات دارند) برای کمیته کردن مقدار تابع  $f_1$  و  $f_2$ ، به ترتیب در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ دیده می‌شوند. گرچه در این نمودارها روند خاصی مشاهده نمی‌شود، اما با توجه به تأثیر کمتر این پارامتر در بیشینه‌ی پاسخ‌های سازه (مخصوصاً بیشینه‌ی جابه‌جایی تراز جداگرها) نسبت به  $\mu_1$ ، که در فصل ۵ در مورد آن صحبت شد، انتخاب مقادیر بهینه را آسان‌تر می‌سازد.

#### ۵.۲.۵. ضریب اصطکاک سطح ۴ ( $\mu_3$ )

روند ثابت و نزدیک به هم مقادیر بهینه‌ی ضریب اصطکاک سطح ۴ در سطوح متفاوت زلزله‌ی طرح برای کمیته کردن مقدار تابع  $f_1$  در نمودار شکل ۱۹ مشاهده می‌شود. مطابق این شکل، مقادیر بهینه  $\mu_3$  با تغییر دوره‌ی تناوب پالس روندی سینوسی را طی می‌کنند.

از شکل ۲۰ که مقادیر بهینه  $\mu_3$  را برای کمیته کردن میزان تابع  $f_2$  نمایش می‌دهد، می‌توان مشاهده کرد که برای زلزله‌هایی با دوره‌ی تناوب پالس بین ۱ تا ۴ ثانیه مقادیر متفاوت سطوح زلزله‌ی طرح در تعیین مقادیر بهینه  $\mu_3$  تأثیر چندانی

بهبوده‌سازی برای کمیته کردن مقدار جابه‌جایی نسبی طبقه (یا شتاب بام) برای سطوح مختلف زلزله جواب‌هایی یکسان و نزدیک به هم خواهند داشت و سطوح مختلف زلزله در تعیین مقادیر بهینه نقش مؤثری را ایفا نمی‌کنند.

در شکل ۱۴، مقادیر نتایج بهینه‌سازی شده‌ی  $R_{eff}$  برای کمیته کردن مقدار تابع  $f_2$  به دست آمده‌اند. نکته‌ی مثبت دیده شده در این نمودار آن است که برای سطوح مختلف زلزله، نتایج بهینه بسیار به هم نزدیک هستند؛ یعنی برای طراحی جداگر برای محدود کردن جابه‌جایی تراز جداگرها می‌توان نتایج به دست آمده در هر یک از سطوح زلزله‌ی MCE، DBE و یا SLE در یک دوره‌ی تناوب پالس مشخص را برای بقیه‌ی سطوح نیز تعمیم داد. همچنین با توجه به شکل ۱۴ می‌توان دریافت که تغییرات مقادیر بهینه  $R_{eff}$  برای تابع  $f_2$  شکلی کاسه‌یی دارد و در محدوده‌ی ۰٫۰۵ تا ۰٫۰۷ مقادیر کمیته‌ی این پارامتر طراحی در دوره‌های تناوب پالس حوالی ۴ ثانیه اتفاق می‌افتند.

#### ۳.۲.۵. ضریب اصطکاک سطح ۱ ( $\mu_1$ )

برای ضریب اصطکاک سطح ۱، با توجه به اینکه بازه‌ی تغییرات آن بین ۰٫۱۸ تا ۰٫۰۶ تعریف شده است، محدوده‌ی خاصی را برای جواب‌های بهینه‌ی این پارامتر برای کمیته کردن تابع  $f_1$  با توجه به نمودار شکل ۱۵ می‌توان قائل شد. همچنین با دقت در شکل ۱۵ می‌توان مشاهده کرد که برای زلزله‌هایی با دوره‌ی تناوب پالس کمتر از ۵ ثانیه، سطوح زلزله در تعیین مقادیر بهینه  $\mu_1$  مؤثر نیستند و برای زلزله‌هایی با دوره‌های تناوب پالس بیشتر از ۵ ثانیه، گرچه در سطوح مختلف زلزله‌ی طرح روند یکسانی در جواب‌های بهینه مشاهده می‌کنیم، اما جواب‌ها با هم اختلافی غیر قابل اغماض دارند.

شکل ۱۶، مقادیر بهینه  $\mu_1$  برای کمیته کردن تابع  $f_2$  را نمایش می‌دهد. مطابق

ندارند. همچنین دیده می‌شود که برای سطح زلزله‌ی MCE، بیشترین مقدار بهینه‌ی  $\mu_2$  در زلزله‌هایی با دوره‌ی تناوب پالس ۳ ثانیه اتفاق می‌افتد.

#### ۶.۲.۵. ظرفیت جابه‌جایی سطوح ۱ و ۴ ( $d_1$ )

شکل ۲۱، نمودار مقادیر بهینه‌ی ظرفیت جابه‌جایی سطوح ۱ و ۴ برای کمینه‌کردن مقدار تابع  $f_1$  است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بهینه‌ی ظرفیت جابه‌جایی بین مختلف زلزله‌ی طرح، مخصوصاً سطوح SLE و DBE، مشاهده می‌شود؛ اما اختلاف بین مقادیر در این سطوح نیز زیاد است.

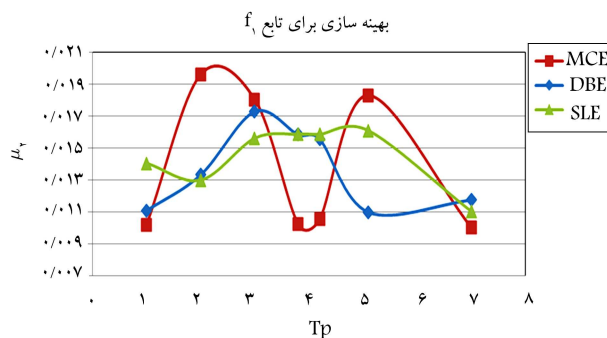
با توجه به شکل ۲۲، مقادیر بهینه‌ی  $d_1$  برای کمینه‌کردن میزان جابه‌جایی تراز جداگرا برای اغلب زلزله‌ها، بین مقادیر ۰/۰۶ تا ۰/۰۸ متر تغییر می‌کنند. در این نمودار روند یکسانی برای مقادیر بهینه در سطوح سه‌گانه‌ی زلزله‌ی طرح مشاهده نمی‌شود.

#### ۷.۲.۵. ظرفیت جابه‌جایی سطوح ۲ و ۳ ( $d_2$ )

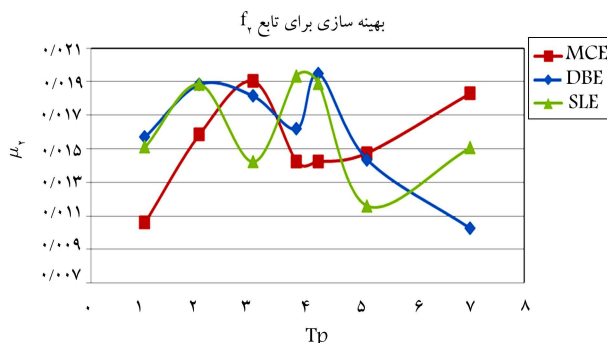
در شکل‌های ۲۳ و ۲۴، مقادیر بهینه‌ی  $d_2$  برای کمینه‌کردن توابع  $f_1$  و  $f_2$  دیده می‌شوند. با توجه به اینکه تأثیر این پارامتر در تغییرات مقادیر بیشینه‌ی پاسخ‌ها ناچیز هستند، خطا در استفاده از مقادیر بهینه بسیار کم خواهد بود. بنابراین، برای  $d_2$  می‌توان مقادیری بین ۰/۰۳ تا ۰/۰۵ را پیشنهاد کرد.

#### ۸.۲.۵. مقادیر بیشینه‌ی پاسخ‌های بهینه‌شده

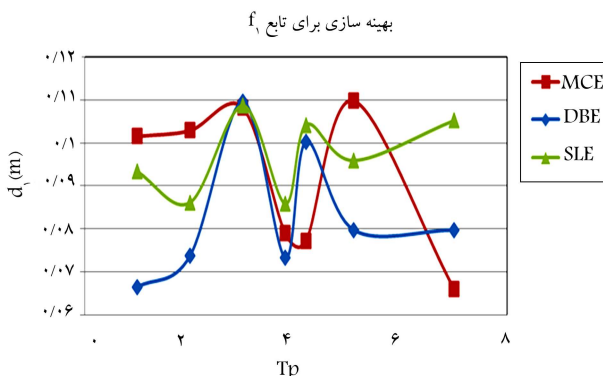
شکل‌های ۲۵ و ۲۶ به ترتیب مقادیر بیشینه‌ی جابه‌جایی نسبی طبقه و بیشینه‌ی جابه‌جایی تراز جداگرا در ۳ سطح زلزله‌ی طرح، که از روش بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک به‌دست آمده‌اند، را نمایش می‌دهند.



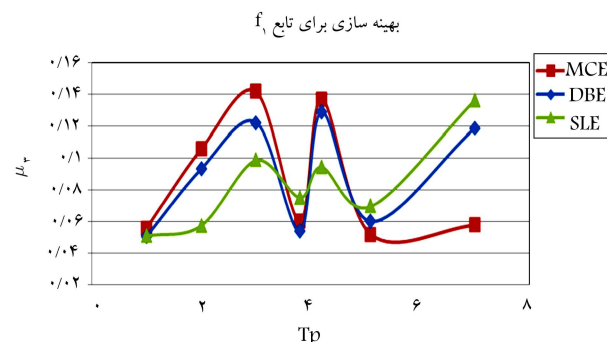
شکل ۱۷. مقادیر بهینه‌ی  $\mu_2$  برای کمینه‌کردن تابع  $f_1$  در سطح MCE، DBE و SLE.



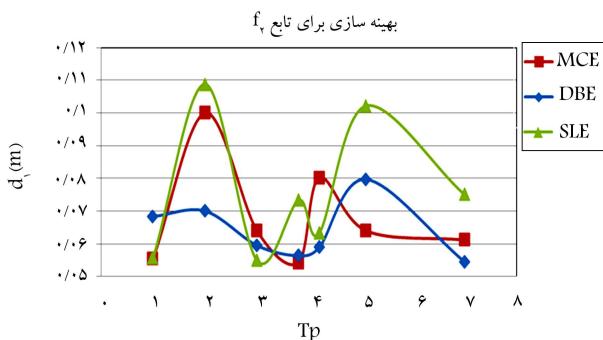
شکل ۱۸. مقادیر بهینه‌ی  $\mu_2$  برای کمینه‌کردن تابع  $f_2$  در سطح MCE، DBE و SLE.



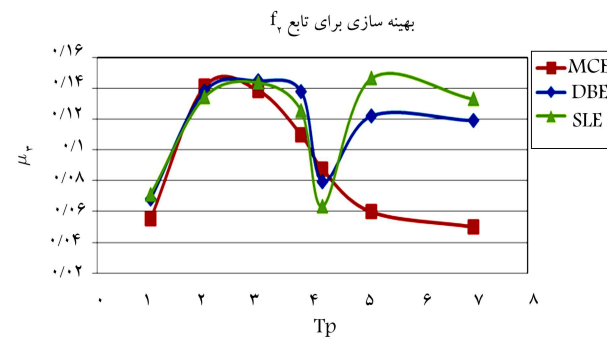
شکل ۲۱. مقادیر بهینه‌ی  $d_1$  برای کمینه‌کردن تابع  $f_1$  در سطح MCE، DBE و SLE.



شکل ۱۹. مقادیر بهینه‌ی  $\mu_2$  برای کمینه‌کردن تابع  $f_1$  در سطح MCE، DBE و SLE.



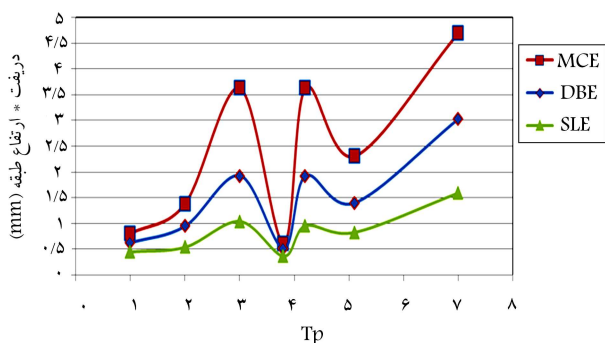
شکل ۲۲. مقادیر بهینه‌ی  $d_1$  برای کمینه‌کردن تابع  $f_2$  در سطح MCE، DBE و SLE.



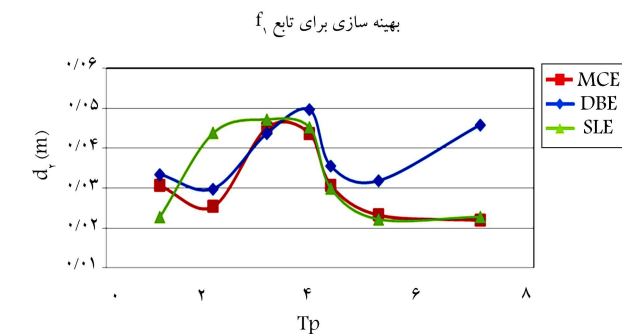
شکل ۲۰. مقادیر بهینه‌ی  $\mu_2$  برای کمینه‌کردن تابع  $f_2$  در سطح MCE، DBE و SLE.

جدول ۱۰. محدوده‌ی مناسب پارامترهای طراحی جداگر سه‌گانه برای کمینه‌کردن مقادیر بیشینه‌ی پاسخ.

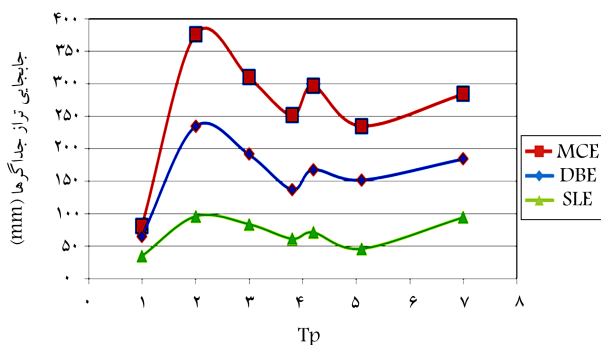
پارامتر طراحی	محدوده‌ی مناسب برای کمینه‌کردن بیشینه‌ی جابه‌جایی نسبی طبقه (با بیشینه‌ی شتاب بام)	محدوده‌ی مناسب برای کمینه‌کردن بیشینه‌ی جابه‌جایی تراز جداگرها
شعاع انحنای مؤثر سطوح ۱ و ۴ ( $R_{eff1}$ ) (متر)	۰٫۸ - ۱ متر	۰٫۶ - ۰٫۴ متر
شعاع انحنای مؤثر سطوح ۲ و ۳ ( $R_{eff2}$ ) (متر)	۰٫۶ - ۰٫۱ متر	۰٫۷ - ۰٫۰۵ متر
ضریب اصطکاک سطح ۱ ( $\mu_1$ )	۰٫۰۲ - ۰٫۰۶	۰٫۰۶ - ۰٫۰۴
ضریب اصطکاک سطح ۲ و ۳ ( $\mu_2$ )	۰٫۰۱ - ۰٫۰۱۸	۰٫۱۵ - ۰٫۰۱۸
ضریب اصطکاک سطح ۴ ( $\mu_3$ )	۰٫۰۶ - ۰٫۱۴	۰٫۰۸ - ۰٫۱۴
ظرفیت جابه‌جایی سطح ۱ و ۴ ( $d_1$ ) (متر)	۰٫۰۸ - ۰٫۱۱ متر	۰٫۰۶ - ۰٫۰۸ متر
ظرفیت جابه‌جایی سطح ۲ و ۳ ( $d_2$ ) (متر)	۰٫۰۲۲ - ۰٫۰۳۵ متر	۰٫۰۴ - ۰٫۰۵ متر



شکل ۲۵. مقادیر بیشینه‌ی جابه‌جایی نسبی طبقه در ۳ سطح زلزله‌ی طرح، که از روش بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک به دست آمده‌اند.



شکل ۲۳. مقادیر بهینه‌ی  $d_2$  برای کمینه‌کردن تابع  $f_1$  در ۳ سطح MCE، DBE و SLE.



شکل ۲۶. مقادیر بیشینه‌ی جابه‌جایی تراز جداگرها در ۳ سطح زلزله‌ی طرح، که از روش بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک به دست آمده‌اند.



شکل ۲۴. مقادیر بهینه‌ی  $d_2$  برای کمینه‌کردن تابع  $f_2$  در ۳ سطح MCE، DBE و SLE.

این منظور تابعی مانند  $f$  طبق رابطه‌ی ۲۸ تعریف شده است:

$$f(R_{eff1}, R_{eff2}, \mu_1, \mu_2, \mu_3, d_1, d_2) = \sum_{i=1}^n a_i \frac{f_i}{\min(f_i)} \quad (28)$$

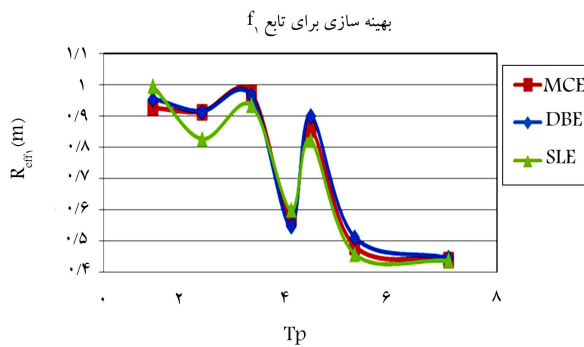
در این رابطه، مقادیر  $f_i$  تابعی هستند که فقط مربوط به یکی از پاسخ‌های (بیشینه‌ی) سازه هستند (مثلاً توابع  $f_1$  و  $f_2$  که با توجه به روابط ۲۶ و ۲۷ به دست می‌آیند) که اصطلاحاً این نوع توابع را تک‌هدفه<sup>۲۹</sup> می‌نامند. بنابراین  $n$ ، تعداد توابع تک‌هدفه‌ی استفاده‌شده خواهد بود. از بهینه‌سازی هر یک از توابع تک‌هدفه به صورت جداگانه  $\min(f_i)$  به دست می‌آید (مثلاً مقادیر  $\min(f_1)$  و  $\min(f_2)$ ) مقادیر کمینه‌ی توابع  $f_1$  و  $f_2$  هستند که با توجه به نتایج به دست آمده در قسمت ۲.۵ به

### ۳.۵. محدوده‌ی پیشنهادی برای پارامترهای طراحی

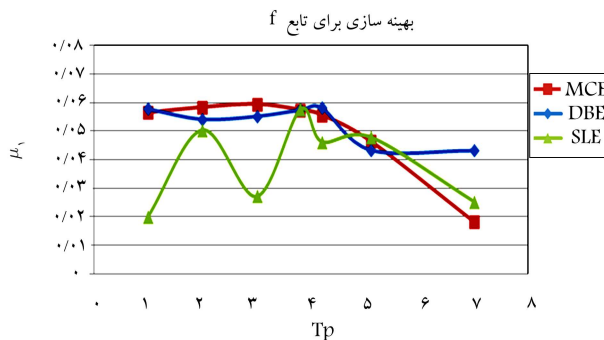
با توجه به مباحث و نمودارهای مطرح شده در قسمت ۲.۵، جدول ۱۰ برای محدوده‌ی مناسب پارامترهای طراحی جهت کمینه‌کردن مقادیر بیشینه‌ی جابه‌جایی نسبی طبقه (یا بیشینه‌ی شتاب بام) و بیشینه‌ی جابه‌جایی تراز جداگرها ارائه شده است.

### ۴.۵. بهینه‌سازی برای کمینه‌کردن مقادیر توابع به طور هم‌زمان

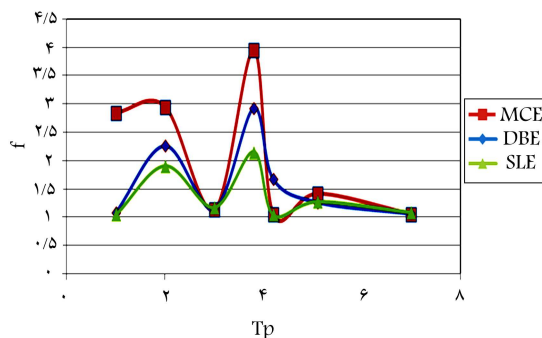
در بخش ۲.۵، در هر مرحله از بهینه‌سازی، فقط یکی از توابع  $f_1$  یا  $f_2$  مستقلاً برای مقادیر مشخصی از پارامترهای طراحی، کمینه شده‌اند؛ اما ایده‌آل آن است که سیستم جداساز به طور هم‌زمان هر دو مقدار بیشینه‌ی پاسخ سازه را محدود کند. برای



شکل ۲۷. مقادیر بهینه  $R_{eff1}$  برای کمیته کردن تابع  $f$  در سطح MCE، DBE و SLE.



شکل ۲۸. مقادیر بهینه  $\mu_1$  برای کمیته کردن تابع  $f$  در سطح MCE، DBE و SLE.



شکل ۲۹. مقادیر کمیته  $f$  برای مقادیر بهینه پارامترهای طراحی در سطوح مختلف زلزله‌ی طرح.

به دست آیند که به طور هم‌زمان بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقه و بیشینه جابه‌جایی تراز جداگرها را به مقادیر کمیته‌ی آنها برساند، و این نشان‌گر قابلیت منحصر به فرد این نوع از جداگرهاست.

برای مقادیر بهینه که مقدار تابع  $f$  را کمیته می‌سازد، جدول ۱۱ پیشنهاد شده است.

## ۶. نتیجه‌گیری

این نوشتار تلاش دارد تا با کمک روش‌های بهینه‌سازی مشخصات طراحی جداگرهای اصطکاکی پاندولی سه‌گانه را برای سازه‌هایی که تحت زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک قرار دارند، تعیین کند. در این راستا رفتار جداگر اصطکاکی پاندولی سه‌گانه توسط ۳

دست آمده‌اند.  $a_i$  ها، وزن‌های توابع تک‌هدفی  $f_i$  هستند که با توجه به اهمیت هر یک از این توابع تعیین می‌شوند. معمولاً جمع مقادیر  $a_i$  برابر با ۱ در نظر گرفته می‌شود ( $\sum_{i=1}^n a_i = 1$ ). با توجه به اینکه تابع  $f$  از جمع جبری چندین تابع تک‌هدفی به دست آمده است، آن را تابعی خطی از توابع تک‌هدفی می‌نامند. حال اگر روند بهینه‌سازی انجام‌گرفته در مرحله‌ی قبل را برای کمیته‌کردن تابع  $f$  انجام دهیم، می‌توانیم پارامترهای طراحی بهینه را برای کمیته‌کردن هم‌زمان بیشینه‌ی پاسخ‌های متفاوت سازه به دست آوریم. با توجه به اینکه روند بهینه‌سازی برای توابع  $f_1$  یا  $f_2$  قبلاً انجام شده است، با در نظر گرفتن  $n = 2$ ، تابع  $f$  قابل تعریف خواهد بود. اهمیت وزنی هر یک از توابع  $f_1$  یا  $f_2$  برابر هم در نظر گرفته شده‌اند؛ بنابراین برای انجام روند بهینه‌سازی مقادیر  $a_1$  و  $a_2$  با هم برابر و مساوی ۰/۵ انتخاب شده‌اند. در ادامه، منحنی تغییرات مقادیر بهینه‌ی دو پارامتر  $R_{eff1}$ ،  $\mu_1$  برای کمیته‌سازی هم‌زمان هر دو پاسخ نشان داده شده است و در انتها، فقط به مقادیر بهینه‌ی سایر پارامترها در جدول ۱۱ اشاره شده است.

### ۱.۴.۵. شعاع انحنای مؤثر سطح ۱ و ۴ ( $R_{eff1}$ )

با توجه به شکل ۲۷ گرچه نمی‌توان محدوده‌ی خاصی را برای مقادیر بهینه‌ی  $R_{eff1}$  برای کمیته‌کردن تابع  $f$  به دست آورد، اما همان‌طور که مشاهده می‌شود برای سطوح مختلف زلزله، مقادیر بهینه‌شده‌ی شعاع انحنای سطوح لغزش ۱ و ۴ بسیار به هم نزدیک هستند؛ با توجه به نتایج به دست آمده، این استنباط برای پارامترهای دیگر طراحی قابل بسط نخواهد بود.

### ۲.۴.۵. ضریب اصطکاک سطح ۱

شکل ۲۸ نشان می‌دهد که برای سطوح زلزله‌ی MCE و DBE و برای زلزله‌هایی با دوره‌ی تناوب پالس ۱ تا ۶ ثانیه، مقدار بهینه‌ی  $\mu_1$  برای تابع  $f$  بین محدوده‌ی ۰/۴ تا ۰/۶ محدود می‌شود؛ اما برای سطح SLE نوسانات بسیار زیاد است.

### ۳.۴.۵. مقادیر بهینه‌ی تابع f

در شکل ۲۹، مقادیر کمیته‌ی تابع  $f$  برای سطوح مختلف زلزله نمایش داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای تعدادی از زلزله‌ها این مقدار به ۱ بسیار نزدیک است؛ با توجه به تعریف تابع  $f$ ، نزدیک شدن مقدار تابع به ۱ بیان‌گر این مطلب است که توابع تک‌هدفی تشکیل‌دهنده‌ی  $f$  به طور هم‌زمان به مقادیر کمیته‌ی خود نزدیک شده‌اند. یعنی برای تعداد زیادی از زلزله‌ها، پارامترهای طراحی می‌توانند به گونه‌ی

جدول ۱۱. محدوده‌ی مناسب برای کمیته‌کردن بیشینه‌ی جابه‌جایی نسبی طبقه و جابه‌جایی تراز جداگرها به طور هم‌زمان با استفاده از تابع هدف  $f$ .

پارامتر طراحی	محدوده‌ی مناسب برای کمیته‌کردن بیشینه‌ی جابه‌جایی نسبی طبقه و جابه‌جایی تراز جداگرها به طور هم‌زمان با استفاده از تابع هدف $f$
شعاع انحنای مؤثر سطح ۱ و ۴ ( $R_{eff1}$ ) (متر)	۰/۷ - ۱ متر
شعاع انحنای مؤثر سطح ۲ و ۳ ( $R_{eff2}$ ) (متر)	۰/۰۵ - ۰/۰۷ متر
ضریب اصطکاک سطح ۱ ( $\mu_1$ )	۰/۰۴۵ - ۰/۰۶
ضریب اصطکاک سطح ۲ و ۳ ( $\mu_2$ )	۰/۰۱۳ - ۰/۰۱۹
ضریب اصطکاک سطح ۴ ( $\mu_4$ )	۰/۱ - ۰/۱۵
ظرفیت جابه‌جایی سطوح ۱ و ۴ ( $d_1$ ) (متر)	۰/۰۸ - ۰/۱۱ متر
ظرفیت جابه‌جایی سطوح ۲ و ۳ ( $d_2$ ) (متر)	۰/۰۳ - ۰/۰۵ متر

سطوح ۱ و ۴ تأثیر بیشتری نسبت به شعاع انحنای سطوح ۲ و ۳ در تغییرات پاسخ‌های سازه دارند. همچنین این روند برای ضرایب اصطکاک و ظرفیت‌های جابه‌جایی نیز مشاهده شد؛ به طوری که ضرایب اصطکاک سطح لغزش ۲ و ۳ و همچنین ظرفیت جابه‌جایی این سطوح لغزش تأثیرات بسیار ناچیزی در تغییرات بهینه‌ی پاسخ‌های سازه داشتند.

۲. به جز در مواردی معدود، پارامترهای بهینه‌شده برای سطوح مختلف MCE، DBE و SLE جواب‌هایی نزدیک به هم داشته و اثر سطوح لرزه‌ی در پارامتر طراحی قابل صرف‌نظر کردن بود. این موضوع باعث می‌شود تا بتوان پارامترهای طراحی بهینه‌ی به‌دست‌آمده برای یک سطح از زلزله را برای سطوح دیگر نیز به کار گرفت.

۳. برای چندین پارامتر از جمله شعاع انحنای سطوح ۱ و ۴ دیده شد که می‌توان محدوده‌ی کوچکی برای کمینه‌کردن مقادیر بهینه‌ی پاسخ سازه در زلزله‌هایی با دوره‌ی تناوب پالس‌های متفاوت به‌دست آورد، که البته این محدوده‌ها برای پاسخ‌های بهینه‌ی جابه‌جایی نسبی و جابه‌جایی تراز جداگرها، متفاوت هستند.

۴. برای تعدادی از زلزله‌ها مقادیر کمینه‌ی  $f$  نشان می‌دهند که می‌توان مقادیر بهینه‌ی پاسخ سازه را با پارامترهای طراحی مشخص به طور هم‌زمان کمینه کرد.

جداگر اصطکاکی پاندولی تک قوسی که به‌صورت سری با هم کار می‌کنند، جایگزین و پارامترهای آن‌ها متناسب با رفتار جداگر سه‌گانه به‌دست آمد. در ادامه، معادلات حالت برای ساختمانی جداسازی‌شده به‌صورت پارامتری به‌دست‌آمده و به کمک نرم‌افزار MATLAB تحت رکورد زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک به‌صورت تاریخچه‌ی زمانی و عددی تحلیل و صحت‌سنجی شد. در ادامه، به دلیل وجود پارامترهای مختلف طراحی برای جداگر پاندولی سه‌گانه (۷ پارامتر مختلف)، با انجام تحلیل حساسیت رفتار مقادیر بهینه‌ی پاسخ‌های سازه تحت تأثیر تغییر مقدار این پارامترها ارزیابی شد. در این مطالعه، ۷ رکورد متفاوت زلزله‌ی حوزه‌ی نزدیک پالس‌دار با دوره‌های تناوب پالس ۱ تا ۷ ثانیه در نظر گرفته شد که بهینه‌ی شتاب هر یک برای ۳ سطح شتاب زلزله‌های طرح (MCE، DBE و SLE) مقیاس شد. در ادامه، به کمک روش بهینه‌سازی الگوریتم‌های ژنتیک، پارامترهای طراحی جداگر برای کمینه‌کردن بهینه‌ی مقادیر پاسخ سازه تحت زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک به‌دست آمد و برای هر یک از آن‌ها محدوده‌ی مشخصی پیشنهاد شد که نتایج حاصل می‌تواند به این شکل خلاصه شود:

۱. تمامی پارامترهای هفت‌گانه‌ی در نظر گرفته‌شده برای بهینه‌سازی پاسخ‌های بهینه، به یک اندازه در تعیین مقادیر بهینه‌ی پاسخ سازه مؤثر نیستند. مثلاً شعاع انحنای

## پانوشتها

1. base isolation
2. triple friction Pendulum bearing
3. rigid plastic friction element
4. gap element
5. Bouc-Wen model of hysteresis
6. Heaviside
7. maximum credible earthquake
8. design basis earthquake
9. service level earthquake
10. fully adaptive
11. fitness function
12. nonlinear constraint
13. population type
14. population size
15. creation function
16. constraint dependent function
17. feasible
18. linear ranking mechanism
19. selection function
20. Roulette wheel
21. reproduction
22. elite count
23. crossover fraction

24. mutation function
25. crossover function
26. Scattered
27. initial penalty
28. penalty factor
29. single objective

## منابع (References)

1. Bertero, V.V., Mahin, S.A. and Herrera, R.A. "A seismic design implications of near-fault San Fernando earthquake records", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **6**(1), pp. 31-42 (1978).
2. Hall, J.F. and et al. "Near-source ground motion and its effects on flexible buildings", *Earthquake Spectra*, **11**(4), pp. 596-605 (1995).
3. Alavi, B. and Krawinkler, H. "Effects of near-fault ground motions on frame structures", *Stanford. California, Blume Center*, **138** (2001).
4. Zayas, V. A., Low, S.S. and Mahin, S.A. "A simple pendulum technique for achieving seismic isolation", *Earthq. Spectra*, **6**(2), pp. 317-334 (1990).

5. Fenz, D.M. and Constantinou, M.C., *Mechanical Behavior of Multi-Spherical Sliding Bearings*, University at Buffalo, The State University of New York. [S.l.]. (ISSN 1520-295X) (2008).
6. Fenz, D.M. and Constantinou, M.C. "Modeling triple friction pendulum bearings for response history analysis", *Earthquake Spectra*, **24**(4), pp. 1011-1028 (2008c).
7. Fenz, D.M., *Development, Implementation and Verification of Analysis Model for Multi-Spherical Sliding Bearings*, State University of New York at Buffalo, Dissertation Submitted to the Faculty of Graduate School (June 2008).
8. Baker, J.W. "Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis", *Bulletin of the Seismological of America*, **97**(5), pp. 1486-1501 (October 2007).
9. Goldberg, D.E., *Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning*, MA (1989).
10. Michalewicz, Z., *A Survey of Constraint Handling Techniques in Evolutionary Computation Methods*, Evolutionary Programming IV, MIT press, Cambridge, MA, pp. 135-155 (1995).
11. Rudolf, G. "Convergence properties of canonical genetic algorithm", *IEEE Transaction on Neural Network*, **5**, pp. 96-101 (1994).