

پیشنهاد روش خطی سازی معادل برای  
سیستم‌های مرکزگرا با برکنش کنترل شده

نوید رهگذر (دانشجوی دکتری)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران

عبدالرضا سروقدمقدم\* (دانشیار)

پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

آرمین عظیمی‌نژاد (استادیار)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران

سیستم‌های مرکزگرا با برکنش کنترل شده، توانایی کاهش آسیب‌های سازه‌ی ماندگار را در زمان وقوع زلزله‌های شدید دارند. هدف نوشتار حاضر، تخمین بیشینه‌ی جابه‌جایی غیرکشسان سیستم‌های مرکزگرا با روش خطی‌سازی معادل است. بدین منظور، پاسخ دقیق و تخمینی تغییرمکان غیرخطی سیستم‌های یک درجه آزادی مرکزگرا به ترتیب با روش‌های تحلیل تاریخچه‌ی زمانی و خطی‌سازی معادل محاسبه شده است. از آنجا که دقت روش خطی‌سازی معادل به نحوه‌ی تعریف پارامترهای مدل‌سازی، شامل: نسبت میرایی معادل و سختی مؤثر سیستم معادل وابسته است، ابتدا سیستم‌های معادل با سختی سکانت و میرایی فرضی جاکوبسن تحلیل می‌شوند. نتایج تحلیل آماری حاکی از آن است که میرایی جاکوبسن، پارامتری مناسب برای خطی‌سازی سیستم مرکزگرا نیست و منجر به تخمین دست‌پایین بیشینه‌ی جابه‌جایی می‌شود. از این رو، برای افزایش دقت مدل پیشنهادی، میرایی بهینه با کمیته‌سازی خطای بین تقاضاهای جابه‌جایی دقیق و تقریبی محاسبه و سپس رابطه‌ی جدیدی برای نسبت میرایی سیستم‌های مرکزگرا با روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک پیشنهاد شده است. ارزیابی روال خطی‌سازی پیشنهادی نشان می‌دهد که مدل مذکور، کارایی مناسبی در تخمین جابه‌جایی غیرکشسان سیستم‌های مرکزگرا دارد.

واژگان کلیدی: قاب مرکزگرا با برکنش کنترل شده، روش خطی‌سازی معادل، میرایی جاکوبسن، سختی سکانت.

## ۱. مقدمه

هدف آیین‌نامه‌های لرزه‌ی، ارائه‌ی کمیته‌ی ضوابط طراحی برای ممانعت از فروریزش کلی سازه و تأمین ایمنی جانی در زمان وقوع زلزله است. برای دستیابی به هدف مذکور، آیین‌نامه‌های موجود از شکل‌پذیری المان‌های اصلی سازه‌ها برای اتلاف انرژی لرزه‌ی ورودی استفاده می‌کنند. اگرچه راهکار ارائه‌شده به طور ضمنی از فروریزش سازه جلوگیری می‌کند، ولیکن بعضاً منجر به ایجاد آسیب غیرقابل تعمیر در زلزله‌های شدید می‌شود.

در سال‌های اخیر، پژوهشگران با هدف محدود کردن خسارت لرزه‌ی به توسعه‌ی سیستم‌های نوین لرزه‌ی، از جمله سیستم‌های مرکزگرا با حرکت گهواره‌ی پرداخته‌اند. سیستم‌های مرکزگرا قابلیت کاهش تغییرمکان ماندگار و تمرکز آسیب در المان‌های فداشونده‌ی قابل تعویض را دارند. سیستم‌های مرکزگرای مختلفی، مانند:

\* نویسنده مستقر

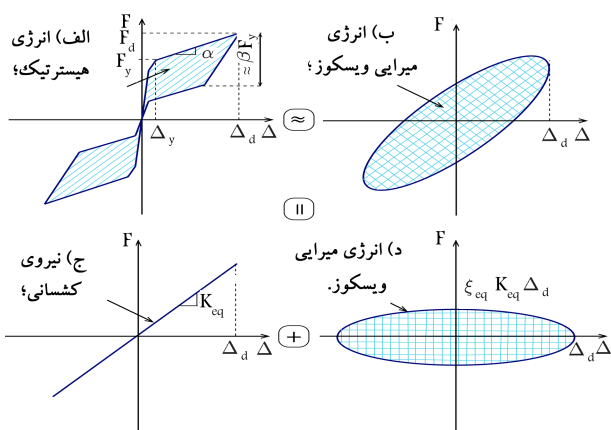
تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۱۲/۱۷، اصلاحیه ۱۳۹۶/۲/۲۴، پذیرش ۱۳۹۶/۲/۲۳.

DOI:10.24200/J30.2018.2070.2084

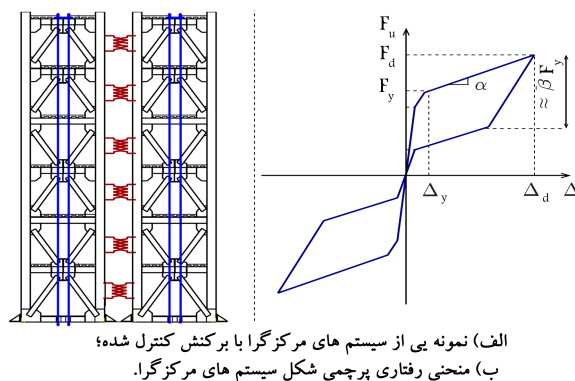
n.rahgozar@srbiau.ac.ir  
moghadam@iiees.ac.ir  
armin.aziminejad@gmail.com

قاب‌های خمشی مرکزگرا،<sup>[۱]</sup> و دیوارهای بتنی مرکزگرا،<sup>[۲]</sup> قاب‌های فولادی کنترل شده با کابل‌های پس‌کشیده،<sup>[۳]</sup> و سیستم‌های مهاربندی مرکزگرا،<sup>[۴]</sup> معرفی شده و در حال توسعه‌اند.

مشخصه‌ی اصلی این نوع از سیستم‌های نوین لرزه‌ی، رفتار پرچمی شکل است. در شکل ۱، نمونه‌ی از سیستم مرکزگرا و پاسخ پرچمی شکل آن برحسب نیرو - جابه‌جایی مشاهده می‌شود که مطابق آن رفتار پرچمی شکل را می‌توان با پارامترهای جابه‌جایی - مقاومت تسلیم  $(F_y - \Delta_y)$ ، ضریب سخت‌شوندگی  $(\alpha)$  و نسبت اتلاف انرژی  $(\beta)$  تعریف کرد. با این حال تخمین بیشینه‌ی جابه‌جایی غیرخطی  $(\Delta_d)$  در برابر نیروی زلزله‌ی طرح  $(F_d)$  به عنوان یکی از مراحل اصلی طراحی سیستم‌های مرکزگرا با روش‌های مبتنی بر نیرو و تغییرمکان از پیچیدگی خاصی برخوردار است. به‌طور کلی، جابه‌جایی غیرخطی سازه‌ها را می‌توان با انجام تحلیل تاریخچه‌ی پاسخ غیرخطی تعیین کرد. با این حال، انجام تحلیل‌های غیرخطی برای سیستم‌های مرکزگرا به دلیل دشواری در شبیه‌سازی نیاز به تجربه، هزینه و زمان زیاد



شکل ۲. خطی سازی معادل رفتار سیستم پرچمی شکل.



شکل ۱. پیکربندی و منحنی رفتاری نمونه یی از سیستم های مرکزگرا.

دارد. بنابراین، توسعه‌ی روش‌های تحلیل خطی برای طراحی اولیه‌ی سازه‌های مرکزگرا ضروری به نظر می‌رسد.

در نوشتار حاضر، به ارائه‌ی مدل خطی سازی معادل برای سیستم‌های مرکزگرا پرداخته شده است. این روش به عنوان یکی از روش‌های تحلیلی تقریبی و قابل اعتماد برای ساختمان‌های متعارف شناخته شده است به گونه‌ی که با تحلیل خطی مدل یک درجه آزادی معادل می‌توان بیشینه‌ی جابه‌جایی یک سیستم چند درجه آزادی را برآورد کرد. در سال‌های اخیر، مطالعه‌های محدودی برای برآورد بیشینه‌ی تقاضای جابه‌جایی سیستم‌های مرکزگرا انجام شده است. برخی پژوهشگران، روشی برای برآورد بیشینه‌ی جابه‌جایی سیستم‌های پرچمی شکل ارائه و تأثیر ضریب کاهش مقاومت، پارامتر سخت‌شوندگی، ضریب اتلاف انرژی را در طیف‌های جابه‌جایی با شکل پذیری ثابت بررسی کرده‌اند. همچنین اخیراً، در سال ۲۰۱۶، طیف‌های با مقاومت ثابت جابه‌جایی برای سیستم‌های مرکزگرا در معرض رکورد‌های دور و نزدیک گسل پالس ماندارانه شده است. با آنکه در مطالعات حاضر، روابطی برای تعیین تقاضای بیشینه‌ی جابه‌جایی سیستم پرچمی شکل پیشنهاد شده است، ارائه‌ی یک روش ساده و کاربردی در آیین‌نامه‌های ساختمان ضروری به نظر می‌رسد. بدین منظور، در ادامه پس از مرور روش‌های مبتنی بر خطی سازی معادل، روش مذکور برای سیستم‌های مرکزگرا توسعه داده شده است. سپس مدل‌های مورد مطالعه و نحوه‌ی شبیه‌سازی آن‌ها معرفی و تحلیل‌های غیرخطی با استفاده از مجموعه‌ی از رکورد‌های دوار گسل انجام شده است. مدل معادل سازی شده، ابتدا با پارامترهای میرایی جاکوبسن و سختی سکانت تحلیل شده است. از طریق نتایج تحلیل آماری، ضریب نسبت بیشینه‌ی جابه‌جایی کشسان به بیشینه‌ی جابه‌جایی غیرخطی سیستم‌های مرکزگرا تعیین و اثر پارامترهای مدل سازی و لرزه‌ی در آن بررسی شده است. نسبت میرایی بهینه با استفاده از الگوریتم ژنتیک تعیین و از طریق تحلیل رگرسیون، یک مدل میرایی جدید پیشنهاد و در انتها، نیز کارایی مدل خطی سازی معادل پیشنهادی ارزیابی شده است.

## ۲. خطی سازی معادل سیستم‌های مرکزگرا

نحوه‌ی خطی سازی سیستم مرکزگرا در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، رفتار پرچمی شکل با یک مدل خطی جایگزین شده است. روش‌های خطی سازی متفاوتی در ادبیات فنی معرفی شده است که تفاوت آن‌ها در به کارگیری تعاریف مختلف برای پارامترهای مدل سازی معادل، شامل: پارامترهای سختی معادل ( $K_{eff}$ )، دوره‌ی تناوب معادل ( $T_{eff}$ ) و میرایی معادل ( $\zeta_{eq}$ ) است. در ادامه، به نحوه‌ی تعریف پارامترهای مذکور برای سیستم‌های مرکزگرا پرداخته شده است.

## ۱.۲. پارامترهای سختی و میرایی ویسکوز معادل

در روش‌های خطی سازی معادل از سختی تجربی، سختی اولیه و یا سختی سکانت برای تعریف سختی مدل معادل استفاده می‌شود. در مدل‌هایی که از سختی سکانت استفاده می‌شود، سختی جانبی سیستم معادل نسبت به سختی اولیه‌ی مدل هیستریک مورد نظر کمتر است (یا دوره‌ی تناوب بیشتری دارد). در سال ۱۹۶۴، [۱۱] برای اولین بار از سختی سکانت برای مدل سازی سیستم‌های معادل استفاده شد. آیین‌نامه‌های ساختمان مدرن از جمله ایتو، [۱۲] یوروکد، [۱۳] فیما ۴۴۰، [۱۴] و آیین‌نامه‌ی طراحی ایتالیا، [۱۵] نیز از سختی سکانت استفاده می‌کنند. همچنین در سال ۲۰۰۲، [۱۶] تأثیر کاربرد انواع سختی‌ها، شامل: سختی اولیه، سختی سکانت و سختی تجربی در برآورد بیشینه‌ی تقاضای جابه‌جایی غیرخطی در قالب ۶ روش تقریبی بررسی شد. نسبت میرایی ویسکوز معادل، از دیگر پارامترهای کلیدی برای مدل سازی سیستم معادل است که نحوه‌ی تعریف آن در دقت روش خطی سازی تأثیر به‌سزایی دارد. مدل‌های متنوعی برای نسبت میرایی معادل سیستم‌های متعارف ارائه شده است. در سال ۱۹۶۴، [۱۱] مجموع مقدار انرژی اتلاف شده در پاسخ کشسان و غیرکشسان سیستم کشسان خمیری به عنوان نسبت میرایی معادل تعریف شده است. تعریف دیگری در سال ۱۹۳۰، [۱۷] مطابق قانون اتلاف انرژی یکسان، به صورت نسبت انرژی هیستریک اتلاف شده در سیستم غیرخطی تحت تحریک سینوسی هارمونیک به مقدار انرژی ذخیره شده در سیستم معادل ارائه شده است. در سال ۱۹۷۴، [۱۸] نیز با توسعه‌ی روش جاکوبسن، یک فرمول تجربی برای برآورد جابه‌جایی غیرکشسان قاب بتن مسلح ارائه شد. دقت میرایی جاکوبسن و گالکان توسط برخی دیگر از پژوهشگران، [۱۹-۲۴] بررسی شده است. در تعدادی از مطالعات ذکر شده به تخمین دست بالای نسبت میرایی معادل توسط مدل جاکوبسن اشاره و روابط اصلاح شده‌ی پیشنهاد شده است. به عنوان مثال، در سال ۲۰۰۷، [۲۵] رابطه‌ی اصلاح شده‌ی جاکوبسن برای برآورد دقیق‌تر نسبت میرایی معادل در سازه‌های جداسازی شده ارائه شد. همچنین در سال ۱۹۷۹، [۲۶] نسبت میرایی ویسکوز معادل برای المان‌های کشسان و اصطکاکی کولمب پیشنهاد شده است. در سال ۲۰۰۶، [۲۷] نیز معادلات جاکوبسن برای مدل‌های دوخطی، پیشچینگ و با زوال سختی و مقاومت توسعه داده شد. علاوه بر این، برخی پژوهشگران، [۲۸، ۲۹] مدل‌های میرایی ویسکوز را برای رفتار هیستریک تا کدا پیشنهاد کردند. در سال ۲۰۰۳، [۲۹] نیز روابطی برای اعضاء فولادی، قاب‌های بتنی، ستون بتنی، دیوار پیش‌ساخته و یا قاب با پیش‌تندگی مهار نشده پیشنهاد شده است. در روش‌های خطی سازی معادل موجود، ترکیبی از تعاریف مختلف برای سختی و نسبت میرایی معادل استفاده شده است. بسیاری از مطالعات اشاره شده به کارایی

که در آن،  $\omega_0$  و  $\zeta_0$  به ترتیب بسامد اولیه ارتعاش و نسبت میرایی ویسکوز ذاتی سیستم هستند که با استفاده از روابط ۴ و ۵ محاسبه می‌شوند:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} \quad (4)$$

که در آن،  $T$ ، دوره تناوب کشسان اولیه است.

$$\zeta_0 = \frac{c}{2m\omega_0} = \frac{c}{2\sqrt{k_0 m}} \quad (5)$$

با در نظر گرفتن سختی سکانت معادل (دوره تناوب معادل) و میرایی ویسکوز معادل برای سیستم خطی معادل، بیشینه پاسخ غیرخطی سیستم برای سیستم مرکزگرا با استفاده از معادله حرکت دینامیکی ۶ محاسبه می‌شود:

$$m\ddot{u}_{eq}(t) + c_{eq}\dot{u}_{eq}(t) + k_{eq}u_{eq}(t) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (6)$$

که در آن،  $\dot{u}_{eq}$ ،  $\ddot{u}_{eq}$  و  $u_{eq}$  به ترتیب برابر با پاسخ‌های نسبی شتاب، سرعت و جابه‌جایی سیستم خطی معادل است و  $c_{eq}$  و  $k_{eq}$  ضرایب میرایی معادل و سختی معادل هستند. با تقسیم معادله ۶ بر  $m$  رابطه ۷ به دست می‌آید:

$$\ddot{u}_{eq}(t) + 2\zeta_{eq}\omega_{eq}\dot{u}_{eq}(t) + \omega_{eq}^2 u_{eq}(t) = -\ddot{u}_g(t) \quad (7)$$

که در آن،  $\omega_{eq}$  و  $\zeta_{eq}$  به ترتیب برابر با بسامد و نسبت میرایی ویسکوز سیستم خطی معادل هستند، که از روابط ۸ و ۹ به دست می‌آیند:

$$\omega_{eq} = \frac{2\pi}{T_{eq}} \quad (8)$$

$$\zeta_{eq} = \frac{c_{eq}}{2m\omega_{eq}} = \frac{c_{eq}}{2\sqrt{k_{eq}m}} \quad (9)$$

که در آن‌ها،  $T_{eq}$  و  $k_{eq}$  دوره تناوب و سختی معادل سیستم هستند. همان‌طور که پیشتر ذکر شد، سختی معادل سیستم مرکزگرا برابر با سختی سکانت سیستم پرچمی شکل است، که با استفاده از رابطه ۱۰ تعیین می‌شود:

$$k_{eq} = k_s \frac{1 + \alpha(\mu - 1)}{\mu} \quad (10)$$

که در آن،  $\alpha$  نسبت سخت‌شوندگی و  $\mu_d$  نسبت شکل‌پذیری در جابه‌جایی طراحی است که از رابطه ۱۱ به دست می‌آید:

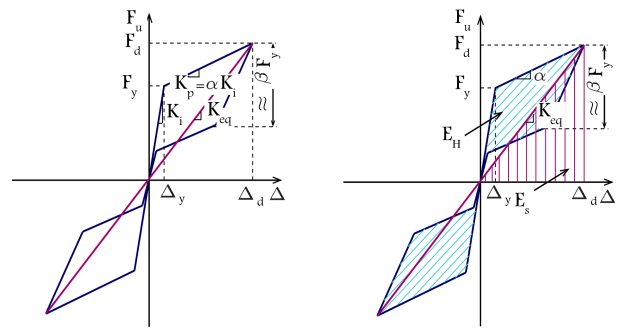
$$\mu_d = \frac{\Delta_d}{\Delta_y} \quad (11)$$

که در آن،  $\Delta_d$  و  $\Delta_y$  برابر با جابه‌جایی تسلیم و بیشینه جابه‌جایی سیستم هستند. با استفاده از معادله سختی سکانت (رابطه ۱۰)، دوره تناوب معادل سیستم پرچمی شکل با استفاده از رابطه ۱۲ محاسبه می‌شود:

$$T_{eq} = T_s \sqrt{\frac{\mu}{1 + \alpha\mu - \alpha}} \quad (12)$$

همان‌طور که پیشتر ذکر شد، در تحلیل خطی‌سازی اولیه مدل پرچمی شکل، ابتدا از روش جاکوبسن برای تعیین نسبت میرایی معادل ( $\zeta_{eq}$ ) سیستم مرکزگرا استفاده می‌شود و سپس در بخش ۶، نسبت مذکور اصلاح شده است. با در نظر گرفتن پارامترهای مدل‌سازی سیستم مرکزگرا، رابطه ۱۳ به دست می‌آید:

$$\zeta_{eq} = \zeta_0 + \zeta_{hyst} = \zeta_0 + \frac{\beta(1 - \alpha)(\mu - 1)}{\pi\mu[1 + \alpha(\mu - 1)]} \quad (13)$$



الف) سختی سکانت؛

ب) میرایی جاکوبسن برای مدل مرکزگرای پرچمی شکل.

شکل ۳. تعریف پارامترهای سختی سکانت و میرایی جاکوبسن برای منحنی پرچمی شکل.

روش مذکور برای سیستم‌های معمول با رفتار دوخطی ایده‌آل، کشسان - خمیری و تا کدا پرداخته‌اند. برای نمونه، در پژوهشی در سال ۲۰۰۲، [۱۶] نتیجه‌گیری شد که کاربرد سختی سکانت و نسبت میرایی جاکوبسن منجر به تخمین کم بیشینه تغییرشکل غیرخطی مدل‌های کشسان - خمیری و با زوال سختی می‌شود. در سال ۲۰۱۴، [۳۰] دقت روش‌های خطی‌سازی معادل برای سیستم‌های جداسازی شده از پایه ارزیابی شد. همچنین در برخی مطالعات، [۲۵]، [۳۱] مدلی برای سیستم دو خطی ارائه شد و برخی دیگر، [۳۰] نیز دریافتند که مدل‌های ذکر شده به دلیل محدودیت در پارامترهای مدل‌سازی، مدلی دقیق برای تمام سیستم‌ها با رفتار دو خطی نیستند. اخیراً، در پژوهشی در سال ۲۰۱۴، [۳۲] یک مدل خطی جدید برای سازه‌های جداسازی شده از پایه با میراگرهای لاستیکی با رفتار دو خطی ارائه شده است. در نوشتار حاضر، همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، برای برآورد بیشینه تغییرمکان، ابتدا از پارامترهای سختی سکانت (شکل ۳ الف) و میرایی جاکوبسن (شکل ۳ ب) برای خطی‌سازی مدل مرکزگرای پرچمی شکل استفاده شده است. سپس برای افزایش کارایی مدل پیشنهادی، یک رابطه جدید برای نسبت میرایی ویسکوز سیستم معادل پیشنهاد شده است.

## ۲.۲. مدل خطی‌سازی معادل برای سیستم مرکزگرا

معادله ریاضی حرکت برای یک سیستم یک درجه آزادی با رفتار غیرخطی پرچمی شکل در معرض مؤلفه افقی حرکت زمین به صورت رابطه ۱ است:

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + f(u(t), \dot{u}(t)) = F_{eff}(t) \quad (1)$$

که در آن،  $c$ ،  $m$  و  $f(u(t), \dot{u}(t))$  ضرایب جرم، میرایی و نیروی بازگرداننده (وابسته به جابه‌جایی و سرعت) هستند.  $u(t)$ ،  $\dot{u}(t)$  و  $\ddot{u}(t)$  به ترتیب جابه‌جایی، بردار سرعت و شتاب هستند و  $F_{eff}(t)$  بردار نیروی مؤثر زلزله است (رابطه ۲):

$$F_{eff}(t) = -mr\ddot{u}_g(t) \quad (2)$$

که در آن،  $r$  ضریب مؤثر زلزله است که برای سیستم یک درجه آزادی تحت نیروی افقی زلزله ( $\ddot{u}_g(t)$ ) برابر با ۱ است. با جایگزینی معادله ۲ در معادله ۱ و تقسیم آن بر  $m$ ، رابطه ۳ به دست می‌آید:

$$\ddot{u}(t) + 2\zeta_0\omega_0\dot{u}(t) + \frac{f(u(t), \dot{u}(t))}{m} = -\ddot{u}_g(t) \quad (3)$$

غیرخطی  $(\Delta_{max,ex})$  و نسبت شکل پذیری  $\mu$  تعیین شده است. با هدف دست یابی به طیف های پاسخ با شکل پذیری مشخص  $\mu_d$  برای سیستم های مرکزگرا، تحلیل های تکرارشونده با مقیاس کردن رکوردها انجام شده است. بدین منظور، رکوردها به صورت خطی مقیاس شدند تا بیشینه خطای نسبی شکل پذیری محاسبه شود و شکل پذیری مدنظر به مقدار کمتر از ۱٪ ( $|\mu - \mu_d| < 0.01$ ) برسد. از طرفی، برای برآورد بیشینه جابه جایی  $(\Delta_{max,pr})$  سیستم های معادل، مدل خطی با سختی معادل  $k_{eq}$  (رابطه ی ۱۰) و میرایی معادل  $(\zeta_{eq})$  (رابطه ی ۱۳) تحلیل شده است. شایان ذکر است که برای مقایسه ی میرایی هیسترتیک واقعی سیستم پرچمی شکل حاصل از تحلیل تاریخی زمانی با میرایی ویسکوز معادل متناظر در روش تحلیل خطی سازی، میرایی ویسکوز ذاتی سیستم معادل برابر با صفر در نظر گرفته شده است. برای مقایسه ی جابه جایی تخمین زده شده ی سیستم  $(\Delta_{max,pr})$  با جابه جایی غیرکشسان واقعی  $(\Delta_{max,ex})$ ، ضریب  $C_{EL}$  به صورت رابطه ی ۱۵ تعریف شده است:

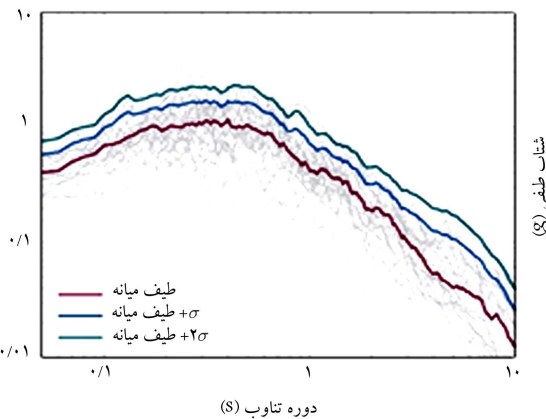
$$C_{EL}(\alpha, \beta, \mu, T) = \frac{\Delta_{max,pr}(\alpha, \beta, \xi_{eq}, k_{eq}, T)}{\Delta_{max,ex}(\alpha, \beta, \mu, \xi_0, k_0, T)} \quad (15)$$

نسبت مذکور نشان دهنده ی دقت و کارایی روش خطی سازی معادل در پیش بینی جابه جایی غیرخطی واقعی سیستم مرکزگراست. مقدار  $C_{EL}$  نزدیک به ۱، بیانگر دقت مناسب روش خطی سازی معادل در پیش بینی بیشینه ی جابه جایی غیرکشسان  $(\Delta_{max,ex})$ ، سیستم مرکزگراست و نسبت های کوچک تر و یا بزرگ تر از آن، دقت کم در محاسبه ی  $\Delta_{max,ex}$  را نشان می دهد. توجه داشته باشید که پارامترهای  $\Delta_{max,ex}$  و  $\Delta_{max,pr}$  به ترتیب با استفاده از روش های تحلیل خطی سازی مدل معادل و تاریخی زمانی سیستم مرکزگرا غیرخطی محاسبه شده اند. همچنین نسبت جابه جایی شکل پذیری  $(\mu)$ ، سیستم مرکزگرا برابر با نسبت  $\Delta_{max,ex}$  به جابه جایی تسلیم  $(\Delta_y)$  است که از رابطه ی ۱۶ محاسبه می شود:

$$\mu = \frac{\Delta_{max,ex}(\alpha, \beta, \mu, \xi_0, k_0)}{\Delta_y(\alpha, \beta, \mu, \xi_0, k_0)} \quad (16)$$

### ۵. نتایج تحلیل خطی سازی مدل های مرکزگرای معادل

تحلیل دینامیکی غیرخطی با استفاده از ۲۲ زوج حرکت دور از گسل (جدول ۱) معرفی شده در دستورالعمل FEMA P۶۹۵<sup>[۲۱]</sup> انجام شده است. شکل ۵،



شکل ۵. طیف های شتاب مجموعه رکوردهای دور از گسل مورد مطالعه به همراه طیف های میانه، ۱ و ۲ برابر انحراف استاندارد از میانه.

که در آن،  $\zeta$  میرایی کشسان و  $\zeta_{hyst}$  میرایی هیسترتیک هستند. مطابق با روش جاکوبسن با استفاده از اصل برابری انرژی، همان طور که در شکل ۳ مشاهده می شود،  $\zeta_{hyst}$  بر حسب پارامترهای مدل سازی  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\mu$  از رابطه ی ۱۴ محاسبه می شود:

$$\zeta_{hyst} = \frac{E_H}{4\pi E_S} = \frac{E_H}{2\pi k_{eq} \delta_d^2} = \frac{\beta(1-\alpha)(\mu-1)}{\pi\mu[1+\alpha(\mu-1)]} \quad (14)$$

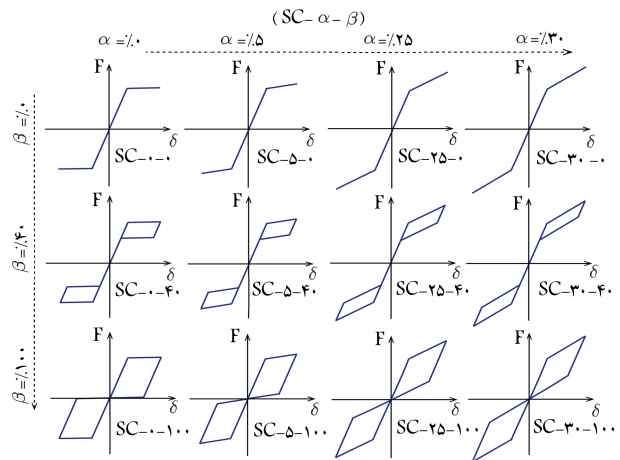
که در آن،  $E_s$  و  $E_h$  برابر با انرژی هیسترتیک و انرژی کرنشی کشسان سیستم هستند.

### ۳. مدل های مرکزگرای مورد مطالعه

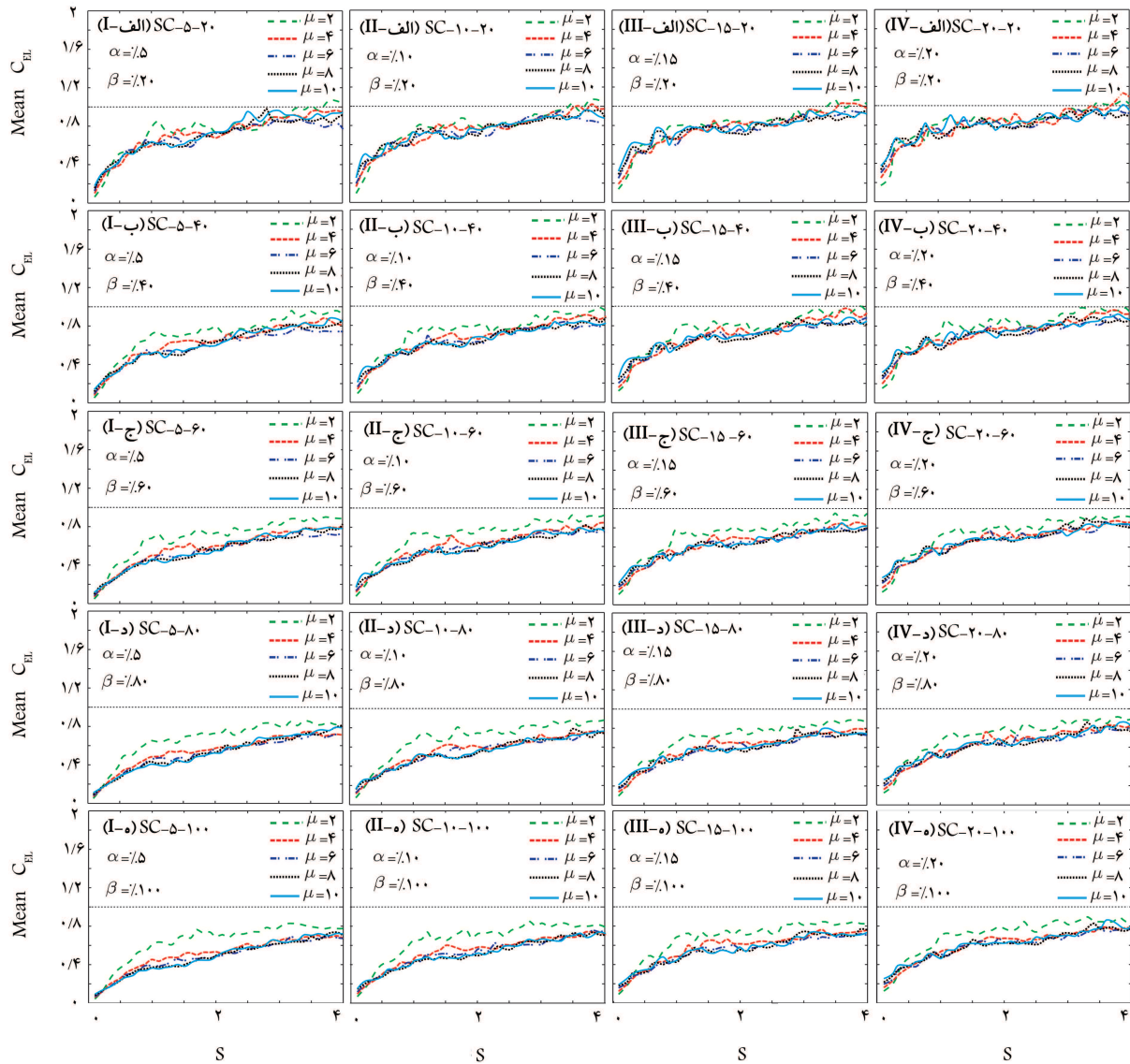
در بخش حاضر، طیف گسترده یی از مدل های مرکزگرا برای ارزیابی کارایی روش خطی سازی معادل پیشنهادی، مطالعه ی پارامتری، و ارائه ی فرمولی جدید برای میرایی معادل سیستم مرکزگرا انتخاب شده است. همان طور که در شکل ۴ مشاهده می شود، مدل های مرجع بر حسب پارامترهای نسبت سخت شونده گی  $(\alpha)$  و نسبت اتلاف انرژی  $(\beta)$  طبقه بندی شده اند. نسبت سخت شونده گی در محدوده ی بین ۰ تا ۳۰ درصد و نسبت اتلاف انرژی بین ۰ تا ۱۰۰ درصد در نظر گرفته شده است. عبارت  $SC - \alpha - \beta$  برای نامگذاری سیستم مرکزگرا انتخاب شده است. به عنوان مثال،  $SC - 10 - 100$ ، نشان دهنده ی مدلی با  $\alpha$  برابر ۱۰٪ و  $\beta$  برابر با ۱۰۰٪ است.  $SC - \alpha - 0$ ، نشان دهنده ی مدلی بدون ظرفیت اتلاف انرژی و همچنین  $SC - \alpha - 100$  نشان دهنده ی مدلی با میرایی برابر ۱۰۰٪ است. مجموعه ی بزرگی از مدل های مرکزگرا با دوره تناوب های کوتاه ( $T < 0.5s$ )، متوسط ( $0.5s < T < 1.5s$ ) و بلند ( $T > 1.5s$ ) در نظر گرفته شده است. به طور کلی، برای هر مدل مرجع با  $\alpha$  و  $\beta$  معین، سیستم های مرکزگرا با ۴ دوره ی تناوب مختلف بین ۰.۱ الی ۴ ثانیه و نسبت شکل پذیری  $\mu$  بین ۲ تا ۱۰، انتخاب شده است.

### ۴. روال شبیه سازی و تحلیل

سیستم های یک درجه ی آزادی معرفی شده در بخش ۳ با  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $T_0$  مشخص با استفاده از مصالح SelfCentering و المان ZeroLength در نرم افزار Opensees شبیه سازی شده است. با حل معادله ی ۳، تحلیل های دینامیکی سیستم های مرکزگرا با روش انتگرال گیری گام به گام نیومارک<sup>[۲۲]</sup> انجام و مقادیر بیشینه ی جابه جایی



شکل ۴. مدل های مرکزگرای مرجع مورد مطالعه.



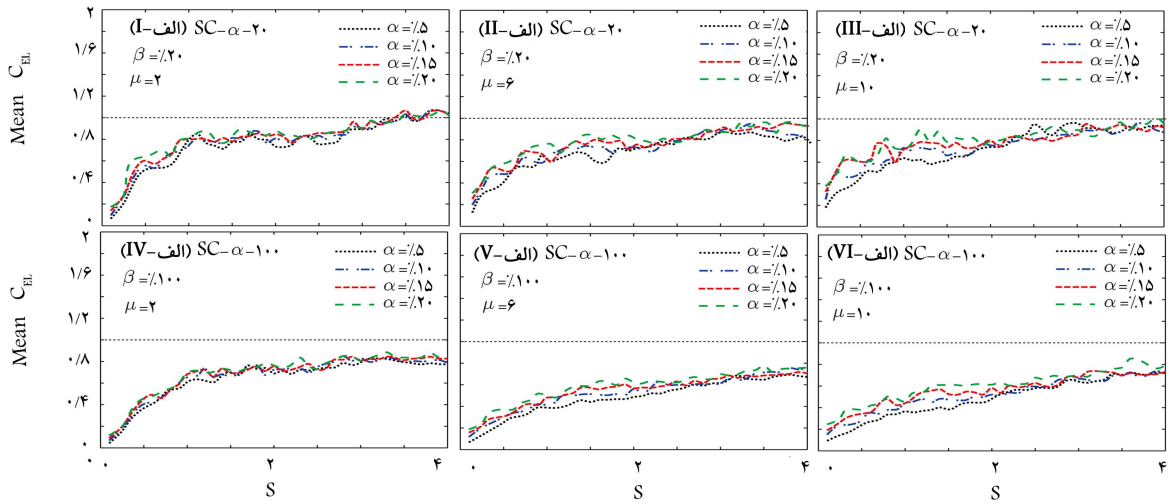
شکل ۶. تأثیر پارامترهای مدل‌سازی  $(R, \beta, \alpha)$  بر روند متوسط طیف‌های  $C_{EL}$  برای سیستم‌های مرکزگرا با  $\mu$  بین ۲ تا ۱۰ درصد،  $\alpha$  بین ۵ تا ۲۰ درصد و  $\beta$  بین ۲۰ تا ۱۰۰ درصد.

غیرخطی را کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌کند و نیاز به اصلاح دارد. علاوه بر این مشاهده می‌شود که طیف میانگین به‌طور کلی با افزایش مقدار  $\mu$  کاهش می‌یابد که نشان می‌دهد کارایی روش خطی‌سازی معادل با افزایش مقدار  $\mu$  کاهش یافته است.

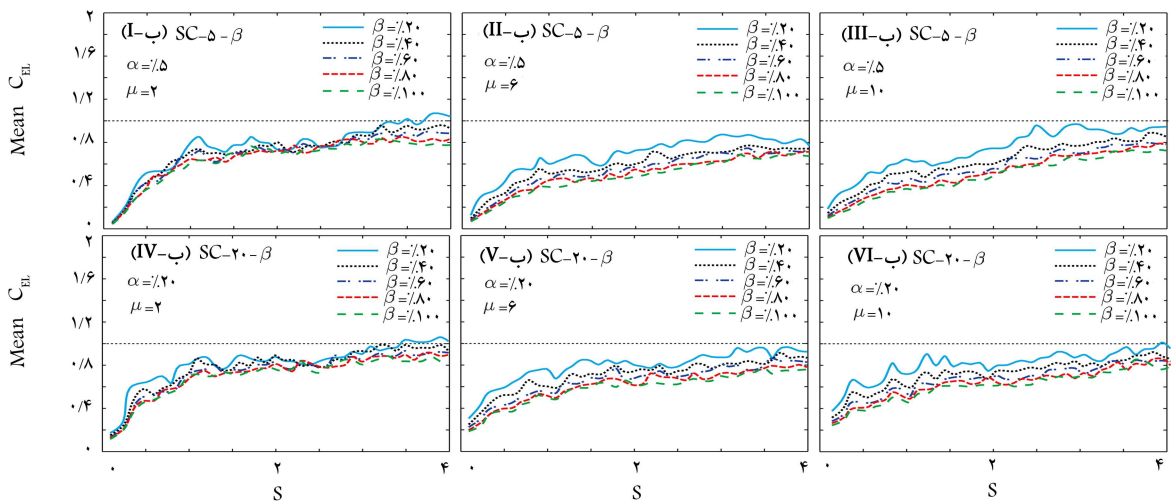
### ۱.۵. تأثیر پارامترهای مدل‌سازی

به منظور بررسی اثر پارامترهای مدل‌سازی در کارایی روش خطی‌سازی معادل، شکل ۷ تأثیر نسبت شکل‌پذیری، ضریب انرژی اتلاف، و نسبت سخت‌شوندگی را در طیف‌های  $C_{EL}$  مدل مرکزگرا نشان می‌دهد. به منظور بررسی فقط اثر نسبت سخت‌شدگی در طیف‌ها، نسبت‌های  $\beta$  و  $\mu$  ثابت انتخاب شده‌اند. به‌طور مشابه، برای بررسی تأثیر مقادیر ضریب انرژی اتلاف، پارامترهای مدل‌سازی  $\mu$  و  $\alpha$  ثابت در نظر گرفته شده‌اند. شکل ۷ الف، تأثیر نسبت سخت‌شدگی در طیف‌های مدل‌های  $\alpha - 20 - SC$ ،  $\alpha - 60 - SC$  و  $\alpha - 100 - SC$  با پارامتر  $\beta$  ثابت برابر با ۲۰،

طیف‌های شتاب رکوردهای دور از گسل را نشان می‌دهد. رکوردها از ۱۴ رویداد زلزله برگرفته شده‌اند. با روال معرفی شده در بخش ۴، طیف‌های  $C_{EL}$  برای مدل‌های مرکزگرا به‌دست آمده‌اند. طیف‌های مذکور ابتدا برای سیستم‌های معادل مدل‌شده با مشخصات میرایی جاکوبسن و سختی سکانت ترسیم شده‌اند. شکل ۶، طیف‌های میانگین  $C_{EL}$  برای نمونه مدل‌های مرکزگرای مورد مطالعه در معرض رکوردهای دور از گسل را نشان می‌دهد. هر نقطه از طیف ذکر شده، بیانگر متوسط نسبت بیشینه‌ی جابه‌جایی تخمینی به جابه‌جایی واقعی یک مدل مرکزگرا با پارامترهای  $\alpha, \mu, T_0$  مشخص در معرض مجموعه‌ی رکوردهاست. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، طیف‌ها به‌صورت نمایی با افزایش دوره‌ی تناوب اولیه‌ی سیستم افزایش می‌یابند. مشاهده می‌شود که نسبت  $C_{EL}$  برای دوره تناوب‌های کوتاه به‌طور کلی کمتر از دوره تناوب‌های متوسط و بزرگ است. همچنین مشاهده می‌شود که نسبت‌های متوسط جابه‌جایی تقریبی، به‌ویژه برای سیستم‌های مرکزگرا با دوره‌ی تناوب کوتاه، تقریباً کمتر از ۱ است. بنابراین، روش خطی‌سازی معادل سیستم مرکزگرا با میرایی جاکوبسن، بیشینه‌ی جابه‌جایی



الف) تاثیر نسبت  $\alpha$  در میانگین طیف سیستم های  $SC-\alpha-20$  و  $SC-\alpha-100$  با  $M$  برابر ۲، ۶، ۱۰ و ۱۰۰



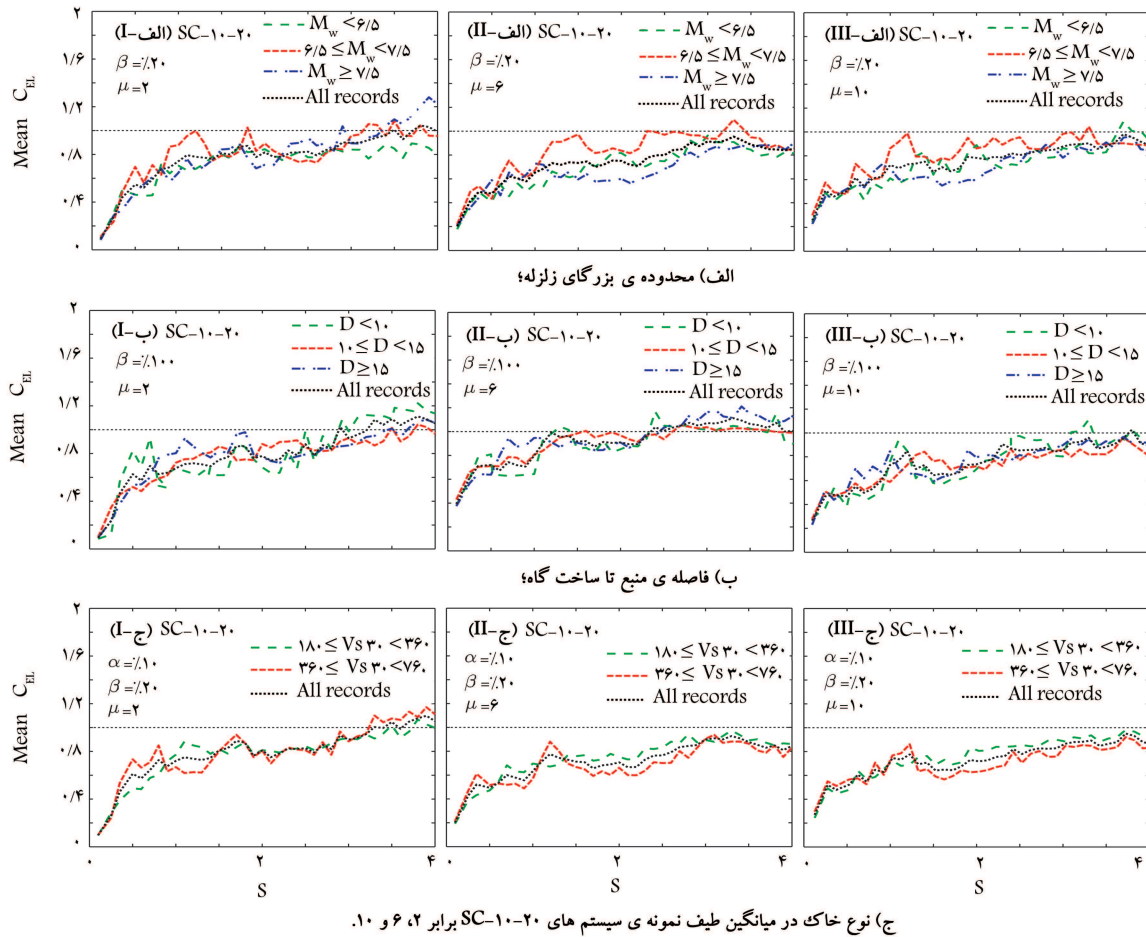
ب) تاثیر نسبت  $\beta$  میانگین طیف سیستم های  $SC-20-\beta$  و  $SC-100-\beta$  با  $M$  برابر ۲، ۶، ۱۰ و ۱۰۰

شکل ۷. تاثیر پارامترهای مدل سازی ( $\mu$  و  $\beta$  و  $\alpha$ ) بر طیف های میانگین نمونه هایی از سیستم مرکزگرا.

۶۰ و ۱۰۰ درصد و مقدار  $\mu$  برابر ۲، ۶ و ۱۰ را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، نسبت های  $C_{EL}$  با افزایش نسبت سخت شدگی، افزایش یافته و تأثیر آن برای سیستم های با شکل پذیری کم (به عنوان مثال  $\mu = 2$ ) نسبت به سیستم های با شکل پذیری متوسط و زیاد کمتر است. بنابراین، خطای روش خطی سازی معادل کاهش می یابد و نسبت  $C_{EL}$  با افزایش سختی سخت شدگی، به ویژه برای سیستم های با دوره تناوب بلند، به سمت ۱ میل می کند. به عنوان مثال، بیشینه جابه جایی غیرخطی سیستم ها با نسبت  $\alpha = 20\%$  در مقایسه با سیستم های با نسبت  $\alpha = 5\%$  محافظه کارانه تر است.

شکل ۷ ب، تأثیر نسبت اتلاف انرژی ( $\beta$ ) در محدوده ۱۰-۲۰ درصد در طیف  $C_{EL}$  برای مدل های  $SC-\beta-5$ ،  $SC-\beta-10$ ،  $SC-\beta-20$  و  $SC-\beta-100$  مقادیر  $\mu$  برابر ۲، ۶ و ۱۰ و  $\alpha$  برابر ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، طیف  $C_{EL}$  با افزایش نسبت به ویژه برای سیستم های با شکل پذیری زیاد (به عنوان مثال  $\mu$  برابر با ۱۰) کاهش یافته است. برخلاف تأثیر نسبت  $\alpha$  در روند طیف، خطای نسبی برآورد شده با استفاده از روش خطی سازی معادل با افزایش نسبت  $\beta$  اتلاف انرژی  $\beta$  افزایش یافته است. به عنوان مثال، برای سیستم های مرکزگرا با نسبت

۱۰۰٪، بیشینه جابه جایی غیرخطی حاصل از روش خطی سازی معادل به طور قابل توجهی کمتر از سیستم های با نسبت  $\beta = 20\%$  است. علاوه بر این، به طور قابل توجهی بزرگ تر از موارد با میرایی زیاد (به عنوان مثال  $SC-20-100$ )، به ویژه برای سیستم ها با شکل پذیری بالاست. بنابراین، دقت روش خطی سازی معادل برای پیش بینی بیشینه جابه جایی غیرخطی سیستم مرکزگرا به طور یکنواخت با افزایش نسبت  $\beta$  کاهش می یابد. به عنوان یک نتیجه مهم، دقت و صحت روش مذکور برای پیش بینی بیشینه جابه جایی غیرخطی برای مدل مرکزگرا با نسبت کم  $\beta$ ، نسبت  $\alpha$  زیاد،  $\mu$  کم و دوره تناوب بلند بیشتر از مدل های دیگر است. برای مثال، برای مدل  $SC-20-20$  در محدوده دوره تناوب بین ۳٫۵ تا ۴ ثانیه، نسبت خطای  $C_{EL}$  کمتر از ۱۵٪ است، در حالی که خطا برای  $SC-5-100$  بیشتر از ۳۵٪ است. علاوه بر این، تغییر در روند نسبت  $C_{EL}$  برای سیستم های مرکزگرای مختلف نسبتاً مشابه هستند که به طبیعت یکسان در مدل سازی و مجموعه ی رکورد های در نظر گرفته شده مرتبط است. این نتایج تأیید می کند که برآورد جابه جایی غیرخطی به روش خطی سازی به طور قابل توجهی به پارامترهای مدل سازی بستگی دارد.



شکل ۸. تأثیر پارامترهای بزرگای زلزله، فاصله منبع تا ساختگاه و نوع خاک بر طیف‌های میانگین سیستم‌های مرکزگرا.

جدول ۱. مجموعه‌ی شتاب‌نگاشت‌های دور از گسل. [۲۰]

فاصله‌ی ساختگاه تا چشمه	ضرایب نرمالانیز	$PGA_{max}$ (g)*	نوع گسل	ایستگاه	نام	سال	$M_w$
۱۳٫۳°	۰٫۶۵	۰٫۵۲	Blind thrust	Beverly Hills Mulhol	Northridge	۱۹۹۴	۶٫۷
۲۶٫۵°	۰٫۸۳	۰٫۴۸		Canyon W Lost Cony	Northridge	۱۹۹۴	۶٫۷
۴۱٫۳°	۰٫۶۳	۰٫۸۲	Strike slip	Bolu	Duzce,Turkey	۱۹۹۹	۷٫۱
۲۶٫۵°	۱٫۰۹	۰٫۳۴		Hector	Hector Mine	۱۹۹۹	۷٫۱
۳۳٫۷°	۱٫۳۱	۰٫۳۵		Delta	Imperial Valley	۱۹۷۹	۶٫۵
۲۹٫۴°	۱٫۰۱	۰٫۳۸		El Centro Array #۱۱	Imperial Valley	۱۹۷۹	۶٫۵
۸٫۷°	۱٫۰۳	۰٫۵۱		Nishi-Akashi	Kobe,Japan	۱۹۹۵	۶٫۹
۴۶٫۰°	۱٫۱۰	۰٫۲۴		Shin-Osaka	Kobe,Japan	۱۹۹۵	۶٫۹
۹۸٫۲°	۰٫۶۹	۰٫۳۶		Duzce	Kocaeli,Turkey	۱۹۹۹	۷٫۵
۵۳٫۷°	۱٫۳۶	۰٫۲۲		Areolik	Kocaeli,Turkey	۱۹۹۹	۷٫۵
۸۶٫۰°	۰٫۹۹	۰٫۲۴		Yermo Fire Station	Landers	۱۹۹۲	۷٫۳
۸۲٫۱°	۱٫۱۵	۰٫۴۲		Coolwater	Landers	۱۹۹۲	۷٫۵
۹٫۸°	۱٫۰۹	۰٫۵۳		Capitola	Loma Prieta	۱۹۸۹	۶٫۹
۳۱٫۴°	۰٫۸۸	۰٫۵۶		Gilroy Array # ۳	Loma Prieta	۱۹۸۹	۶٫۹
۴۰٫۴°	۰٫۷۹	۰٫۵۱		Abbar	Loma Prieta	۱۹۹۰	۷٫۴
۳۵٫۸°	۰٫۸۷	۰٫۳۶		El Centro Imp.Cent	Superstition Hills	۱۹۸۷	۶٫۵
۱۱٫۲°	۱٫۱۷	۰٫۴۵	Peo Road (temp)	Superstition Hills	۱۹۸۷	۶٫۵	
۲۲٫۷°	۰٫۸۲	۰٫۵۵	Rio Dell Overpass FF	Cape Medocino	۱۹۹۲	۷٫۰	
۳۲٫۰°	۰٫۴۱	۰٫۴۴	CHY ۱۰ ۱	Chi-Chi-Taiwan	۱۹۹۹	۷٫۶	
۷۷٫۵°	۰٫۹۶	۰٫۵۱	TCU ۰۴۵	Chi-Chi-Taiwan	۱۹۹۹	۷٫۶	
۳۹٫۵°	۲٫۱۰	۰٫۲۱	LA-Hollywood Stor	San Fernando	۱۹۷۱	۶٫۶	
۲۰٫۲°	۱٫۴۴	۰٫۳۵	Tolmezzo	Friuli,Italy	۱۹۷۶	۶٫۵	

\* مقدار بزرگ‌تر از دو مولفه‌ی عمودی گزارش شده است.

## ۲.۵. تأثیر ویژگی های حرکت زمین

از روش برازش غیرخطی استفاده شده است. بدین منظور برای محاسبه ی نسبت های میرایی بهینه از نسل دوم الگوریتم ژنتیک (NSGA-II)<sup>[۲۵]</sup>، با کمیته سازی فاصله بین مقادیر جابه جایی تقریبی و واقعی استفاده شده است. بدین منظور، نسبت میرایی به عنوان متغیر و تابع هدف، خطای نسبی بین پیشینه ی جابه جایی های خطی و غیرخطی در نظر گرفته شده است. در ابتدا ۱۵ نسبت میرایی به صورت تصادفی به عنوان راه حل های مناسب مسئله ایجاد شده است، که از توزیع هندسی نرمال برای رتبه بندی و از احتمال وقوع ۰.۸ برای انتخاب بهترین میرایی استفاده شده است. برای ثابت باقی ماندن جمعیت میرایی، از میانگین وزنی مولدها با احتمال تکثیر ۰.۷ استفاده شده است. همچنین برای حفظ پراکندگی تولید، از جهش غیر یکنواخت با احتمال جهش ۰.۲ استفاده شده است.

شکل ۹، طیف متوسط نسبت میرایی بهینه ( $\zeta_{opt}$ ) برای نمونه ی سیستم های مرکزگرا با  $\mu$  برابر ۲ تا ۱۰،  $\alpha$  برابر ۵ تا ۲۰ درصد و  $\beta$  برابر با ۲۰ تا ۱۰۰ درصد را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، نسبت میرایی بهینه ی سیستم های مرکزگرا با افزایش نسبت شکل پذیری به تدریج کاهش یافته است. شکل ۱۰، اثر نسبت های  $\alpha$  (شکل ۱۰ الف) و  $\beta$  (شکل ۱۰ ب) را در طیف میرایی بهینه نشان می دهد. همان طور که در شکل ۱۰ الف مشاهده می شود، اگرچه به طور کلی نسبت  $\zeta_{opt}$  با افزایش نسبت  $\alpha$  کاهش می یابد، در مدل ها با شکل پذیری کم و با دوره ی تناوب کوتاه، به افزایش  $\alpha$  بستگی ندارد. بنابراین، نسبت میرایی معادل کمتری برای مدل های کشسان معادل با نسبت  $\alpha$  زیاد در مقایسه با سیستم ها با نسبت  $\alpha$  کم مورد نیاز است. به عنوان مثال، نسبت  $\zeta_{opt}$  برای سیستم  $SC - 5 - 100$  با  $\mu = 10$  و  $T = 2s$  (شکل ۱۰ الف VI) ۳۸٪ بیشتر از مدل  $SC - 20 - 100$  با  $\mu = 10$  و  $T = 2s$  است. برخلاف اثر نسبت  $\alpha$  در نسبت میرایی بهینه، نسبت  $\zeta_{opt}$  با افزایش مقدار  $\beta$  افزایش یافته است (شکل ۱۰ ب). به عنوان مثال، نسبت  $\zeta_{opt}$  برای سیستم  $SC - 5 - 100$  و  $\mu = 2$  با  $T = 2s$  (شکل ۱۰ ب I) ۷۷٪ بیشتر از سیستم  $SC - 5 - 20$  و  $\mu = 2$  با  $T = 2s$  (شکل ۱۰ ب II) است. با در نظر گرفتن  $\zeta_0 = 0$  و مرتب سازی معادله ی ۱۷، مقادیر دقیق ضریب میرایی اصلاح شده ( $M_\zeta$ ) را می توان با استفاده از نسبت بهینه ( $\zeta_{opt}$ ) ضریب در قسمت هیسترتیک معادل، مدل میرایی جاکوبسن را با استفاده از معادله ی ۱۸ محاسبه کرد:

$$M_\zeta = \zeta_{opt} \times \frac{\pi \mu [1 + \alpha(\mu - 1)]}{\beta(1 - \alpha)(\mu - 1)} \quad (18)$$

شکل ۱۱، ضرایب اصلاحی به دست آمده برای مدل جاکوبسن برای سیستم های مرکزگرا با  $\mu = 2 - 10$ ،  $\alpha = 5 - 20$  و  $\beta = 20 - 100$  را نشان می دهد. اگرچه روند کلی تغییر در ضرایب  $M_\zeta$  برای هر مدل مرکزگرای مرجع مشابه هستند، مقادیر آن ها به صورت تصادفی تغییر کرده است. با توجه به ضرایب به دست آمده و با فرض تغییرات یکنواخت برای آن ها، معادله ی تقریبی ضریب میرایی برای سیستم های مرکزگرا با استفاده از معادله ی ۱۹ بیان می شود:

$$M_\zeta = T^{\theta_1 \mu} + T^{\theta_2} (0.7 \times \theta_1 T + \theta_2) \quad (19)$$

که در آن،  $\theta_1$  و  $\theta_2$  ثابت هستند.

مقادیر دقیق ضرایب برازش را می توان با تحلیل رگرسیون کمیته ی مربعات غیرخطی با استفاده از روش هایی نظیر الگوریتم لونیبرگ - مارکواریت (LMA)<sup>[۲۶]</sup> محاسبه کرد. با این حال، روابطی تقریبی برای محاسبه ی ضرایب برازش بر حسب

همان طور که در جدول ۱ مشاهده می شود، مقادیر لنگر گشتاوری ( $M_w$ )، نزدیک ترین فاصله به سطح شکست ( $Clst.D$ ) و فاصله ی رومرکزی زمین لرزه از ساختگاه ( $Epi.D$ ) مجموعه رکوردهای مورد مطالعه به ترتیب در محدوده ی ۰.۷۶-۵، ۰.۰۷-۱۰۲.۳۹ و ۲.۴۷-۱۵۱.۶۵ کیلومتر قرار دارند. تأثیر پارامترهای مذکور با مقایسه ی سه مجموعه طیف میانگین  $C_{EL}$  تعدادی از رکوردها (خطوط رنگی) با میانگین تمام طیف ها (خط چین سیاه) در شکل ۸ مشاهده می شود. شکل ۸ الف، تأثیر محدوده ی  $M_w$  را در طیف سیستم های  $20 - 10 - SC$  با  $\mu = 6$  و  $\mu = 10$  نشان می دهد. در مثال مذکور، طیف ها برای سه مجموعه رکورد با  $M_w < 6.5$ ،  $6.5 < M_w < 7.5$  و  $M_w > 7.5$  ترسیم شده است.

همان طور که در شکل های ۸ الف (II و III) مشاهده می شود، طیف ها تا حدی تحت تأثیر محدوده ی  $M_w$ ، به ویژه برای سیستم ها با شکل پذیری متوسط و زیاد ( $\mu = 6$  و  $\mu = 10$ ) است، اما اثر آن برای سیستم ها با شکل پذیری کم ناچیز است (شکل ۸ الف II). بنابراین، می توان نتیجه گرفت که کارایی روش خطی سازی معادل، مستقیماً اما نه به طور قابل توجهی، به پارامتر  $M_w$  بستگی دارد. به طور مشابه، اثر کم پارامترهای  $Clst.D$  و  $Epi.D$  در طیف ها را می توان در شکل های ۸ ب و ۸ ج مشاهده کرد. همان طور که در شکل ۸ ب مشاهده می شود، طیف  $C_{EL}$  برای مدل های مرکزگرا تحت رکوردهای مجموعه های  $Clst.D > 15 km$  و  $10 km < Clst.D < 15 km$ ،  $Clst.D < 10 km$  بسیار به میانگین طیف نزدیک هستند. همچنین اثر طبقه بندی ساختگاه در طیف  $C_{EL}$  (شکل ۸ ج) نشان می دهد که تأثیر گروه های ذکر شده در کارایی روش خطی سازی معادل جزئی است. شایان ذکر است برای بررسی اثر گروه بندی ساختگاه در طیف ها، رکوردها بر اساس مقدار پارامتر متوسط زمانی سرعت موج برشی در عمق ۳۰ متر ( $VS_{30}$ ) برای ساختگاه  $C$  و  $D$  به ترتیب برابر با:  $\frac{m}{s} < VS_{30} < \frac{m}{s}$  و  $\frac{m}{s} < VS_{30} < \frac{m}{s}$  در نظر گرفته شده اند.

## ۶. پیشنهاد مدل خطی سازی معادل برای سیستم های

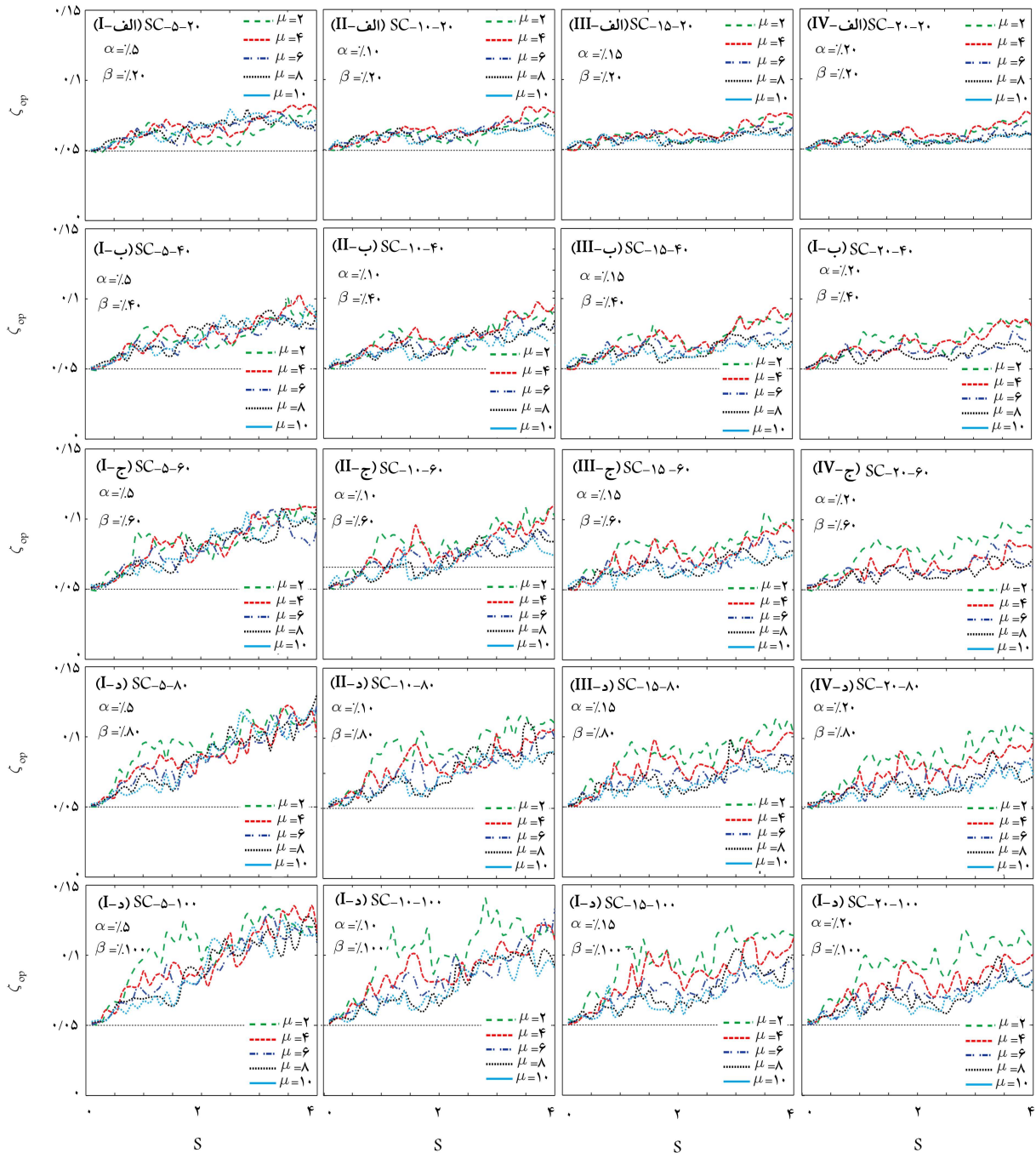
### مرکزگرا

نتایج تحلیل آماری در بخش ۵ نشان داد که روش خطی سازی معادل برای سیستم های مرکزگرای مدل شده با سختی سکانت و میرایی جاکوبسن کارآمد نیست و منجر به تخمین غیر محافظه کارانه ی پیشینه ی جابه جایی غیرخطی سیستم می شود. افزایش دقت روش خطی سازی معادل از طریق اصلاح مشخصات سیستم معادل، یعنی پارامترهای سختی مؤثر (یا دوره ی تناوب مؤثر)، نسبت میرایی معادل، یا جرم معادل، میسر است.<sup>[۲۲]</sup> در نوشتار حاضر، از اصلاح مدل میرایی جاکوبسن برای خطی سازی معادل سیستم مرکزگرا استفاده شده است. بر این اساس می توان مدل میرایی ویسکوز جاکوبسن را با معادله ی ۱۷ اصلاح کرد:

$$\zeta_{opt} = \zeta_0 + \zeta_{hyst} = \zeta_0 + \frac{\beta(1 - \alpha)(\mu - 1)}{\pi \mu [1 + \alpha(\mu - 1)]} \times M_\zeta \quad (17)$$

که در آن،  $\zeta_{opt}$  نسبت میرایی معادل بهینه و  $M_\zeta$  ضریب اصلاح میرایی ویسکوز جاکوبسن است. برای محاسبه ی نسبت میرایی بهینه ( $\zeta_{opt}$ ) از روش تحلیل بهینه سازی و برای فرموله کردن ضریب  $M_\zeta$  برای سیستم های مرکزگرای مورد مطالعه





شکل ۹. میانگین نسبت میرایی بهینه برای سیستم‌های مرکزگرا با  $\mu$  برابر ۲ تا ۱۰ درصد و  $\alpha$  برابر ۵ تا ۲۰ درصد و  $\beta$  برابر با ۲۰ تا ۱۰۰ درصد.

پارامترهای مدل‌سازی  $\mu$ ،  $\alpha$  و  $\beta$  با استفاده از روابط ۲۰ و ۲۱ به دست آمده است: دور از گسل را می‌توان با استفاده از معادله ۲۲ بیان کرد:

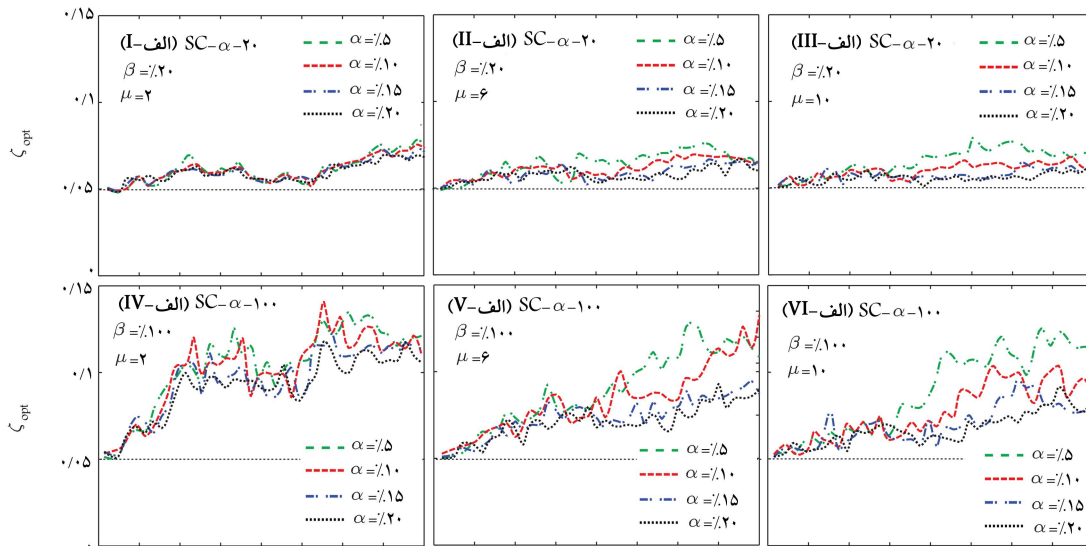
$$\zeta_{eq} = \zeta_0 + \zeta_{hyst} = \zeta_0 + \frac{\beta(1-\alpha)(\mu-1)}{\pi\mu[1+\alpha(\mu-1)]} \times [T^{\theta_1\mu} + T^{\theta_2}(\theta_1 \times \theta_2 T + \theta_2)] \quad (22)$$

$$\theta_1 = ((-0,261\beta + 0,219)\mu + 2,725\beta - 2,264)\alpha + (0,0345\beta - 0,067)\mu - 0,327\beta + 1,045 \quad (20)$$

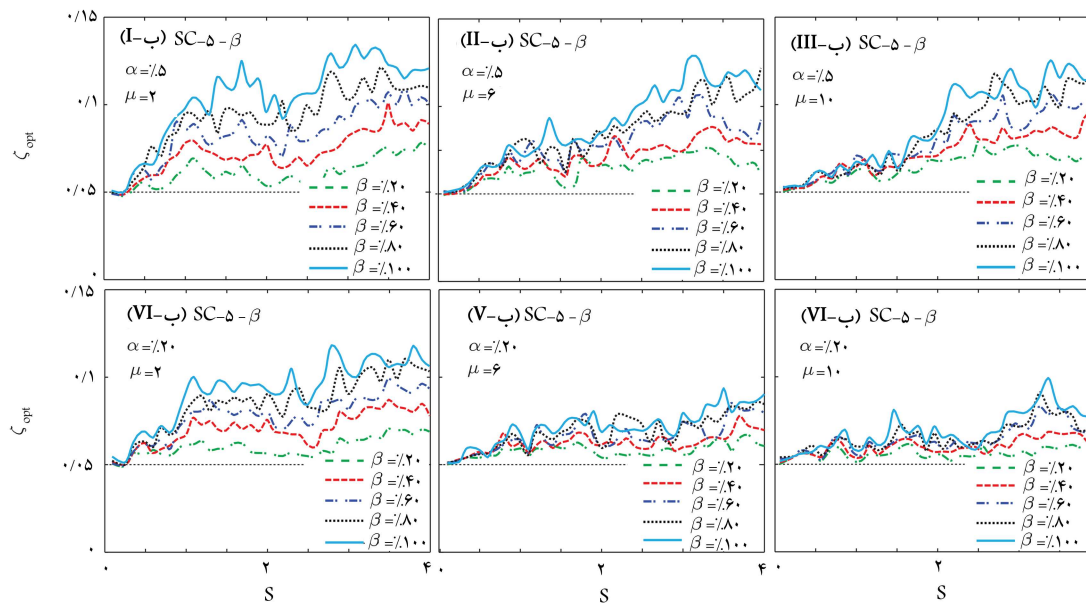
$$\theta_2 = ((0,096\beta - 0,113)\mu - 3,681\beta + 3,208)\alpha + (-0,035\beta + 0,029)\mu + 0,454\beta - 1,143 \quad (21)$$

مدل میرایی پیشنهادی (معادله ۲۲) در مقایسه با مدل جاکوبسن (معادله ۱۳) قابلیت در نظر گرفتن اثر دوره تناوب اولیه‌ی مدل مرکزگرا را در محاسبات دارد. اگرچه مدل میرایی معادل پیشنهادی نمی‌تواند مقدار دقیق  $\zeta_{opt}$  را به دست آورد، روند آن

بنابراین، نسبت میرایی ویسکوز معادل برای سیستم‌های مرکزگرا در معرض حرکت



الف) طیف‌های میرایی بهینه برای سیستم‌های مرکزگرای  $SC-\alpha-20$  و  $SC-\alpha-100$  با  $M$  برابر ۲، ۶، ۱۰ و ۱۰۰



ب) طیف‌های میرایی بهینه برای سیستم‌های  $SC-\delta-\beta$  و  $SC-\delta-\beta$  با  $M$  از ۲، ۶، ۱۰ و ۱۰۰

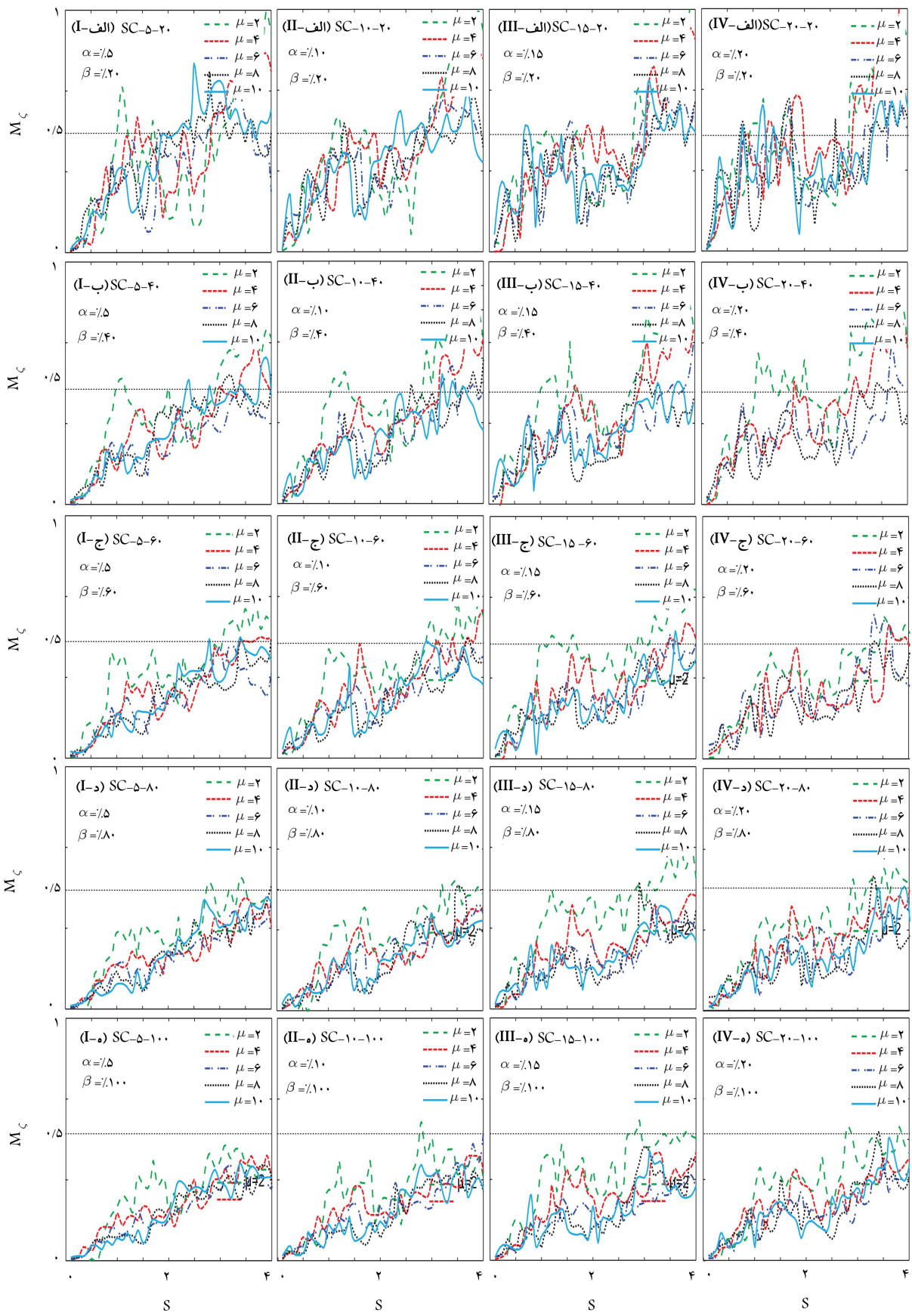
شکل ۱۰. تأثیر پارامترهای مدل‌سازی ( $\alpha$ ،  $\beta$ ،  $\mu$ ) بر طیف‌های میانگین میرایی بهینه سیستم‌های مرکزگرا.

با روش تحلیل دینامیکی مقایسه شده است. شکل ۱۲، نسبت مقادیر  $C_{EL}$  برای سیستم‌های مرکزگرا با  $\mu$  برابر با ۲ تا ۱۰ را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نسبت مقادیر  $C_{EL}$  برای مدل‌های مرکزگرا، به غیر از سیستم‌ها با دوره تناوب کوتاه ( $T < 0.5s$ ) نزدیک به مقدار ۱ است. مقایسه‌ی نتایج با شکل ۷، افزایش دقت روش تحلیل خطی‌سازی معادل را با اصلاح مدل میرایی جاکوبسن نشان می‌دهد. خطاهای نسبی مدل پیشنهادی برای سیستم‌ها با  $T > 0.5s$  کمتر از ۱۵٪ است. شایان ذکر است که مقدار خطا بین ۱۰ و ۲۰ درصد از نقطه نظر مهندسی در محدوده‌ی مطلوب است.<sup>[۱۶]</sup> این موضوع بیانگر دقت قابل قبول مدل پیشنهادی در پیش‌بینی بیشینه‌ی جابه‌جایی غیرخطی سیستم‌های مرکزگراست.

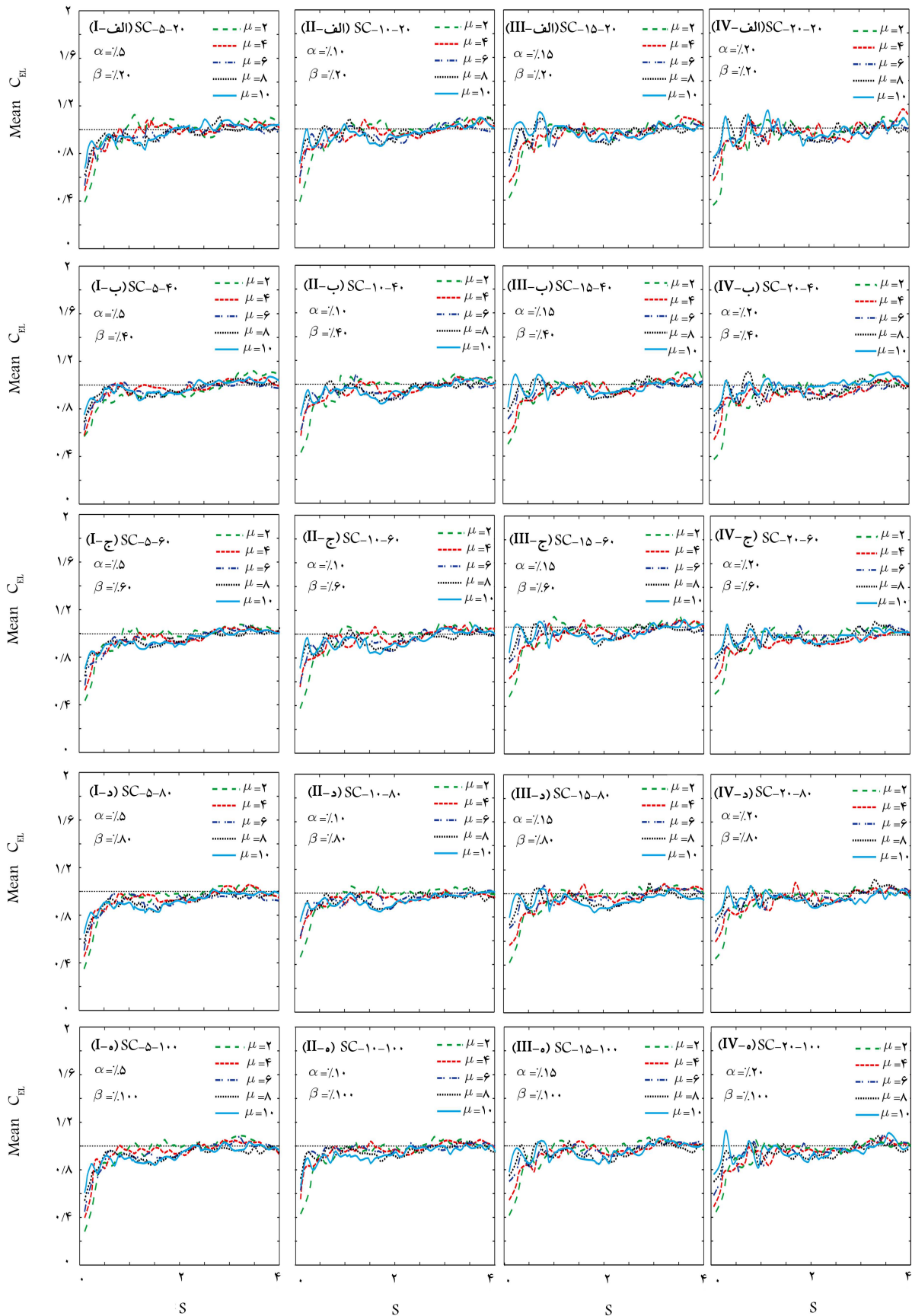
شبهه به نسبت  $\zeta_{opt}$  است و به طور قابل ملاحظه‌ی با افزایش دوره تناوب سیستم افزایش می‌یابد و با افزایش نسبی مقدار  $\mu$  و نسبت  $\beta$  کاهش می‌یابد. کارایی مدل میرایی پیشنهادی در بخش‌های آتی ارزیابی شده است.

### ۱.۶. صحت‌سنجی روش خطی‌سازی معادل پیشنهادی

در بخش حاضر، دقت روش خطی‌سازی معادل اصلاح‌شده برای تخمین بیشینه‌ی جابه‌جایی غیرخطی سیستم‌های مرکزگرا با استفاده از معیار  $C_{EL}$  (معادله‌ی ۱۵) ارزیابی شده است. برای این منظور، بیشینه‌ی جابه‌جایی با استفاده از سختی سکانت و مدل میرایی جاکوبسن اصلاح‌شده، محاسبه و با جابه‌جایی بیشینه‌ی محاسبه‌شده



شکل ۱۱. ضریب اصلاح میرایی ویسکوز جاکوبسن برای سیستم‌های مرکزگرا با  $\mu = 2 - 10$ ،  $\alpha = 5 - 20$  و  $\beta = 20 - 100$ .



شکل ۱۲. متوسط خطا در برآورد بیشینه‌ی جابه‌جایی غیرکشسان ( $C_{EL}$ ) طیف) برای سیستم‌های مرکزگرا با  $\mu = 2 - 10$ ،  $\alpha = 5 - 20$  و  $\beta = 20 - 100$ .

## ۷. خلاصه و نتیجه‌گیری

این‌نامه‌های طراحی لرزه‌ی موجود، اجازه‌ی آسیب محدودی به سازه را برای اتلاف انرژی لرزه‌ی می‌دهد. دیدگاه مذکور طراحی بعضاً منجر به خسارت‌های فراوان در زلزله‌های شدید به دلیل نیاز به تعمیر و یا بازسازی می‌شود. از این رو در سال‌های اخیر، سیستم‌های مرکزگرا با برگشت کنترل‌شده با قابلیت کاهش خسارت لرزه‌ی نسبت به سیستم‌های متعارف معرفی شده است. در مطالعه‌ی حاضر، به ارائه‌ی مدل خطی‌سازی معادل برای سیستم مرکزگرا در معرض حرکت دور از گسل پرداخته شده است. مدل پیشنهادی حاضر، قابلیت تخمین برآورد بیشینه‌ی جابه‌جایی غیرخطی سیستم مرکزگرای پرچمی شکل را با استفاده از یک مدل کشسان معادل میسر می‌سازد. برای بررسی کارایی مدل ارائه‌شده و ارزیابی اثر پارامترهای لرزه‌ی و مدل‌سازی، از تحلیل‌های غیرخطی و خطی به ترتیب در سیستم‌های پرچمی شکل و کشسان معادل انجام شده است. سپس نسبت  $C_{EL}$  با مقایسه‌ی جابه‌جایی تقریبی حاصل از تحلیل مدل خطی معادل و جابه‌جایی دقیق محاسبه‌شده توسط تحلیل دینامیکی تعیین شده است. نتایج کلی حاصل از پژوهش حاضر، به این شرح است:

۱. در مطالعه‌ی حاضر، ابتدا نسبت  $C_{EL}$  برای سیستم معادل مدل‌شده با سختی سکانت و میرایی جاکوبسن برآورد و مشخص شد که با روال مذکور، مدل‌سازی میانگین نسبت  $C_{EL}$  برای سیستم‌های مرکزگرا تقریباً کمتر از ۱ است و با روندی نمایی با افزایش دوره تناوب اولیه‌ی سیستم افزایش می‌یابد. در نتیجه، استفاده از مدل میرایی جاکوبسن برای سیستم‌های مرکزگرا منجر به تخمین دست‌پایین بیشینه‌ی جابه‌جایی غیرکشسان سیستم، به ویژه برای سیستم‌های با دوره‌ی تناوب
۲. نتایج نشان می‌دهد که کارایی مدل خطی‌سازی معادل در پیش‌بینی بیشینه‌ی جابه‌جایی غیرخطی برای سیستم‌های مرکزگرا به‌طور قابل توجهی به پارامترهای مدل‌سازی ( $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\mu$ ) وابسته است، در حالی که پارامترهای لرزه‌ی، مانند: بزرگی زلزله، فاصله‌ی منبع به ساخت‌گاه و نوع ساخت‌گاه به همان اندازه تأثیرگذار نبوده است.
۳. با استفاده از تحلیل بهینه‌سازی، نسبت میرایی بهینه‌ی معادل ( $\zeta_{opt}$ ) برای سیستم‌های مرکزگرا استخراج و نشان داده شد که نسبت برای مدل‌های مرکزگرا به‌طور کلی با افزایش  $\alpha$  و  $\mu$  کاهش یافته است. علاوه بر این، نسبت  $\zeta_{opt}$  با افزایش نسبت اتلاف انرژی و دوره‌ی تناوب اولیه افزایش یافته است. همچنین، نسبت  $\zeta_{opt}$  با افزایش  $\alpha$  برای مدل‌های با شکل پذیری کم و دوره‌ی تناوب کوتاه بسیار تأثیرگذار نبودند.
۴. در مطالعه‌ی حاضر، برای برآورد نسبت میرایی بهینه، مدل میرایی جاکوبسن اصلاح‌شده برای سیستم معادل پیشنهاد شده است. این مدل برخلاف مدل جاکوبسن، قابلیت در نظر گرفتن اثر دوره‌ی تناوب اولیه‌ی ارتعاش ( $T$ ) بر نسبت میرایی بهینه را علاوه بر پارامترهای مدل‌سازی ( $\alpha$ ،  $\beta$  و  $R$ ) دارد.
۵. برای تخمین تقاضای جابه‌جایی غیرخطی، مدل خطی‌سازی‌شده‌ی جدیدی برای سیستم‌های مرکزگرا پیشنهاد شده است. در مدل مذکور از پارامترهای سختی سکانت سیستم مرکزگرا و مدل میرایی جاکوبسن اصلاح‌شده‌ی پیشنهادی استفاده و نشان داده شد که مدل پیشنهادی قادر به پیش‌بینی بیشینه‌ی تقاضای جابه‌جایی سیستم‌های مرکزگرا در معرض حرکت دور از گسل است.

## منابع (References)

1. Priestley, M., Sritharan, S., Conley, J. and et al. "Preliminary results and conclusions from the press five-story precast concrete test building", *PCI J.*, **42**(4), pp. 44-67 (1999).
2. Kurama, Y., Pessiki, S., Sause, R. and et al. "Seismic behaviour and design of unbonded post-tensioned precast concrete walls", *PCI J.*, **44**(5), pp. 72-89 (2010).
3. Eatherton, M.R., Ma, X. and Krawinkler, H. "Design concepts for controlled rocking of self-centering steel-braced frames", *J. Struct. Eng.*, **140**(11), pp. 1-10 (2014).
4. Wiebe, L., Christopoulos, C., Tremblay, R. and et al. "Mechanisms to limit higher mode effects in a controlled rocking steel frame. 1: Concept, modelling, and low-amplitude shake table testing", *Earthq. Eng. & Struct. Dyn.*, **42**(3), pp. 1053-1068 (2013).
5. Christopoulos, C., Tremblay, R., Kim, H. and et al. "Self-centering energy dissipative bracing system for the seismic resistance of structures: Development and validation", *J. Struct. Eng.*, **134**(6), pp. 96-107 (2008).
6. Erochko, J., Christopoulos, C., Tremblay, R. and et al. "Shake table testing and numerical simulation of a self-centering energy dissipative braced frame", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **42**(1), pp. 1617-1635 (2013).
7. Christopoulos, C., Filiatrault, A. and Folz, B. "Seismic response of self-centering hysteretic SDOF systems", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **31**(5), pp. 1131-1150 (2002).
8. Christopoulos, C., Pampanin, S. and Nigel Priestley, M.J. "Performance-based seismic response of frame structures including residual deformations, Part I: Single-degree of freedom systems", *J. Earthq. Eng.*, **7**(1), pp. 119-147 (2003).
9. Seo, C-Y. and Sause, R. "Ductility demands on self-centering systems under earthquake loading", *ACI Struct. J.*, **102**(2), pp. 275-285 (2005).
10. Rahgozar, N., Moghadam, A.S. and Aziminejad, A. "Inelastic displacement ratios of fully self-centering controlled rocking systems subjected to near-source pulse-like ground motions", *Eng. Struct.*, **108**(9), pp. 113-133 (2016).
11. Rosenblueth, E. and Herrera, I. "On a kind of hysteretic damping", *J. Eng. Mech. Div.*, **90**(4), pp. 37-48 (1964).

12. AASHTO, Guide specifications for seismic isolation design, American Association of State Highway and Transportation Officials, 444 North Capitol Street, N.W. Suite 249, Washington, D.C. (2002).
13. Eurocode 8, Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures. Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings, BS EN 1998-1, Brussels (2004).
14. Federal Emergency Management Agency (FEMA). Improvement of Inelastic Seismic Analysis Procedures, Report FEMA-440, Washington (DC, USA) (2005).
15. NTC (Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni). Chapter 7.10: Costruzioni E Ponti Con Isolamento E/O Dissipazione (in Italian), Roma: Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, No. 29 del 4 febbraio 2008-S.O, 30(3), pp. 471-90 (2008).
16. Miranda, E. and Ruiz-Garcia, J. "Evaluation of approximate methods to estimate maximum inelastic displacement demands", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **31**(4), pp. 539-560 (2002).
17. Jacobsen, L.S. "Steady forced vibrations as influenced by damping", *ASME Trans.*, **52**(15), pp. 169-181 (1930).
18. Gulkan, P. and Sozen, M.A. "Inelastic responses of reinforced concrete structure to earthquake motions", *ACI J. Proc.*, **71**(12), pp. 604-610 (1974).
19. Judi, H.J., Davidson, B.J. and Fenwick, R.C. "The direct displacement based design-A damping perspective", *In: Proc 12th World Conf. Earthq. Eng.*, New Zealand (2000).
20. Kowalsky, M.J. and Ayers, J.P. "Investigation of equivalent viscous damping for direct displacement-based design", *In: Proc 3rd US-Japan Workshop on Performance-Based Earthq. Eng. Metho. for Reinf. Conc. Build. Structures*, Univ. of California, Washington, DC, pp. 173-185 (2001).
21. Priestley, M.J.N. and Grant, D.N. "Viscous damping in seismic design and analysis", *J. Earthq. Eng.*, **9**(Sup2), pp. 229-255 (2005).
22. Kowalsky, M. and Dwairi, H. "Investigation of Jacobsen's equivalent viscous damping approach as applied to displacement-based seismic design", *In: Proc 13th World Conf. Earthq. Eng.*, Canada (2004).
23. Blandon, C.A. and Priestley, M.J. "Equivalent viscous damping equations for direct displacement based design", *J. Earthq. Eng.*, **9**(sup2), pp. 257-278 (Jan., 2005).
24. Liu, T., Zordan, T., Zhang, Q. and et al. "Equivalent viscous damping of bilinear hysteretic oscillators", *J. Struct. Eng.*, **141**(11), pp. (Feb., 2015).
25. Dicleli, M. and Buddaram, S. "Comprehensive evaluation of equivalent linear analysis method for seismic-isolated structures represented by SDOF systems", *J. Eng. Struct.*, **29**(8), pp. 1653-1663 (2007).
26. Iwan, W.D. and Gates, N.C. "The effective period and damping of a class of hysteretic structures", *J. Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **7**(3), pp. 199-211 (1979).
27. Guyader, A.C. and Iwan, W.D. "Determining equivalent linear parameters for use in a capacity spectrum method of analysis", *J. Struct. Eng.*, **132**(1), pp. 59-67 (2006).
28. Kowalsky, M.J. "Displacement based design: A methodology for seismic design applied to RC bridge columns", Master's Thesis, San Diego (CA): University of California (1994).
29. Priestley, M.N. "Myths and fallacies in earthquake engineering, revisited", The Mallet Milne Lecture: IUSS Press, Pavia, Italy (2003).
30. Liu, T., Zordan, T., Briseghella, B. and et al. "Evaluation of equivalent linearization analysis methods for seismically isolated buildings characterized by SDOF systems", *J. Eng. Struct.*, **59**(4), pp. 619-634 (2014).
31. Guyader, A.C. and Iwan, W.D. "An improved capacity spectrum method employing statistically optimized linearization parameters", *In: Proc. 13th World Conf. Earthq. Eng.*, Vancouver, Canada (2004).
32. Zordan, T., Liu, T., Briseghella, B. and et al. "Improved equivalent viscous damping model for base-isolated structures with lead rubber bearings", *Eng. Struct.*, **75**(12), pp. 340-352 (2014).
33. Newmark, N.M. "A method of computation for structural dynamics", *J. Eng. Mech.*, **85**(EM3), pp. 67-94 (1959).
34. Rahmatabadi, P. and Khaloo, A. "Dual criterion equivalent linearization approach for yielding structures under earthquake excitation", *Struct. Des. Tall Spec. Build.*, **21**(3), pp. 155-177 (2012).
35. Deb, K., Pratab, A., Agarwal, S. and et al. "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II", *IEEE Trans. Evol. Comput.*, **6**(2), pp. 182-197 (2002).
36. Bates, D.M. and Watts, D.G. "Nonlinear regression: Iterative estimation and linear approximations", *In: Nonlinear regression analysis and its applications*: Hoboken, N.J., USA, John Wiley & Sons Inc., pp. 32-66 (1988).