

# تخمین بیشینه‌ی پاسخ سیستم‌های غیرخطی تحت اثر طیف طرح حوزه‌ی نزدیک گسل با به‌کارگیری روش‌های خطی سازی معادل

محمدرشید سلیمی\* (استادیار)

مهران بایزیدی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

کاهران نوبخت وکیلی (هربی)

آزاد یزدانی (استاد)

گروه عمران، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه کردستان

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۱ (دوره‌ی ۲ - ۳۸، شماره‌ی ۲/۲، ص. ۹۸-۸۹، پژوهشی)

در مطالعه‌ی حاضر، پاسخ غیرخطی سیستم‌های هیستریزس دوخطی تحت اثر زمین‌لرزه‌های سازگار با طیف طرح هدف با به‌کارگیری روش‌های خطی‌سازی آماری معادل مرتبه‌های دوم و سوم محاسبه شده است. طیف طرح هدف براساس طیف آیین‌نامه‌ی لرزه‌ی ایران در منطقه با لرزه‌خیزی خیلی زیاد، خاک نوع II و در دو حالت با و بدون آثار حوزه‌ی نزدیک به گسل در نظر گرفته شده است. طیف پاسخ سیستم‌های خطی معادل به‌دست آمده از رویکردهای تئوری ارتعاش‌های تصادفی و تحلیل تاریخچه‌ی زمانی در محدوده‌ی رفتار کشسان با متوسط طیف پاسخ حاصل از تحلیل‌های تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی مربوط به ۲۵۰ رکورد مصنوعی سازگار شده با طیف هدف در مقادیر مختلف جابه‌جایی تسلیم و نسبت صلبیت سیستم مقایسه شده‌اند. براساس نتایج به‌دست آمده، انطباق مطلوب نتایج خطی‌سازی مرتبه‌ی سوم با نتایج تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی، بیانگر کارآمد بودن و دقت مناسب روش در تخمین پاسخ سیستم‌های غیرخطی تحت تحریک‌های شدید است.

واژگان کلیدی: ارتعاش‌های تصادفی، حوزه‌ی نزدیک گسل، روش خطی‌سازی، طیف توان، هیستریزس دوخطی.

## ۱. مقدمه

آیین‌نامه‌ی لرزه‌ی ایران، ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰<sup>[۶]</sup> نیز آثار حوزه‌ی نزدیک تحت ضریب اصلاح طیفی (N)، برای مناطق مختلف لرزه‌ی لحاظ شده است. از آنجا که زمین‌لرزه‌های حوزه‌ی نزدیک، ویژگی‌های مختلفی دارند، لذا ضریب اصلاحی طیف کشسان به تنهایی نمی‌تواند آثار واقعی حوزه‌ی نزدیک به گسل را دقیقاً ارائه کند.<sup>[۷]</sup>

یکی از مهم‌ترین آثار حوزه‌ی نزدیک به گسل، افزایش پاسخ‌های غیرخطی سیستم‌های سازه‌ی نسبت به پاسخ سازه‌ها در حوزه‌ی دور از گسل است، که این موضوع مورد توجه بسیاری از پژوهشگران واقع شده است.<sup>[۸-۱۰]</sup> مطالعات زیادی در راستای بررسی عملکرد سازه‌های مختلف تحت آثار حوزه‌ی نزدیک انجام شده است، به‌طوری‌که بیشتر آن‌ها به یک نتیجه‌ی تقریباً یکسان، یعنی افزایش پاسخ‌های مختلف لرزه‌ی سیستم‌های سازه‌ی دست پیدا کرده‌اند.<sup>[۱۱-۱۴]</sup>

بیشتر آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ی برای تخمین بارهای طراحی و ارزیابی عملکرد لرزه‌ی سازه‌های مهندسی، از طیف طرح کشسان به‌دست آمده از تحلیل خطر لرزه‌ی احتمالاتی استفاده می‌کنند. از آنجا که رفتار واقعی سازه‌های مهندسی

در مجاورت گسل‌های فعال، حرکت‌های زمین به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر مکانیسم گسل، راستا و جهت انتشار گسیختگی نسبت به ساختگاه و همچنین تغییرشکل‌های محتمل استاتیکی سطح زمین همراه با آثار جابه‌جایی ماندگار است.<sup>[۱]</sup> پیامدهای اخیر باعث می‌شود که بیشتر انرژی لرزه‌ی حاصل از گسیختگی در یک پالس با محدوده‌ی بسامد مشخص تجمیع شود و منجر به خسارت‌های شدیدی به سازه‌های واقع در مناطق نزدیک گسل مخصوصاً سازه‌های با دوره‌ی تناوب بالا شود. از این رو، بیشتر آیین‌نامه‌های بارگذاری بعد از وقوع زلزله‌های مخربی، از جمله: زمین‌لرزه‌های لندرز (۱۹۹۲)، نورتریج (۱۹۹۴) و کوبه (۱۹۹۵) در پی اعمال آثار حوزه‌ی نزدیک در دستورالعمل‌های لرزه‌ی شده‌اند. آثار ذکر شده در بیشتر استانداردها یا آیین‌نامه‌ها،<sup>[۲-۴]</sup> به‌صورت ضرایب بزرگ‌نمایی در طیف طرح کشسان و در برخی از آیین‌نامه‌ها،<sup>[۵]</sup> نیز مستقیماً در پهنه‌بندی لرزه‌ی اعمال شده است. در آخرین ویرایش

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۱۰/۱۱، اصلاحیه ۱۴۰۱/۱/۲۹، پذیرش ۱۴۰۱/۲/۲۵.

DOI:10.2400/J30.2022.59600.3063

mr.salimi@uok.ac.ir  
mehran21day@gmail.com  
k.vakili@uok.ac.ir  
a.yazdani@uok.ac.ir

تحت تحریک‌های شدید، از جمله زمین‌لرزه‌های حوزه‌ی نزدیک در محدوده‌ی رفتار غیرخطی قرار می‌گیرد؛ لذا برآورد دقیق پاسخ سیستم‌های غیرخطی جهت تأمین عملکرد مطلوب سازه‌ی، ضروری به نظر می‌رسد. در چند دهه‌ی اخیر، مطالعات مختلفی جهت لحاظ کردن آثار غیرخطی در تحلیل‌های مبتنی بر طیف طرح کشتان انجام شده است که در این راستا، به منظور استخراج طیف پاسخ غیرخطی، از ضرایب کاهش نیمه تجربی تعریف شده برای نیروهای لرزه‌ی و یا روش‌های مبتنی بر انتگرال‌گیری از معادلات حرکت سیستم غیرخطی و انجام تحلیل‌های تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی استفاده شده است.<sup>[۱۵-۱۷]</sup> یکی از ایرادهای استفاده از روش‌های مذکور، لزوم انتخاب و به مقیاس درآوردن تعداد زیادی شتاب‌نگاشت سازگار با طیف طرح کشتان است.<sup>[۱۸]</sup>

یکی از اهداف تئوری ارتعاش‌های تصادفی، تخمین بیشینه‌ی پاسخ‌های محتمل سیستم‌های سازه‌ی است. از این رو، تئوری ارتعاش‌های تصادفی، یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای ارزیابی احتمالاتی پاسخ لرزه‌ی سازه‌هاست.<sup>[۱۹]</sup> در حوزه‌ی ارتعاش‌های تصادفی، با توجه به اینکه حل دقیق معادله‌های حرکت حاکم بر سیستم‌های غیرخطی تحت تحریک‌های تصادفی محدود بوده و فقط برای تعداد محدودی از سیستم‌ها توسعه داده شده است؛ بنابراین، استفاده از روش‌های تقریبی برای تعیین آماره‌های پاسخ سیستم‌های غیرخطی امری اجتناب‌ناپذیر است. در این راستا، برای محاسبه‌ی پاسخ سیستم‌های غیرخطی، روش‌های مختلفی توسعه داده شده است که می‌توان به روش‌های: معادله‌ی فوکر-پلانک-کلموگروف<sup>۱</sup>، میانگین‌گیری تصادفی<sup>۲</sup>، اغتشاشی<sup>۳</sup>، بسط ممان‌ها<sup>۴</sup>، تعادل انرژی تلف شده<sup>۵</sup>، سیستم غیرخطی معادل<sup>۶</sup>، خطی‌سازی معادل (ELM)<sup>۷</sup> و روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی مونت‌کارلو اشاره کرد.<sup>[۲۰-۲۱]</sup> بیشتر روش‌های ذکر شده، به جز دو روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو و خطی‌سازی معادل، محدود به سیستم‌های غیرخطی با تعداد درجه‌های آزادی مشخص هستند و بیشتر در سیستم‌های تحت تحریک‌های تصادفی مانا، کاربرد دارند. اگرچه روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی مونت‌کارلو، محدودیت خاصی ندارند، اما آن‌ها یک فرایند تکراری، زمان‌بر و پرهزینه به منظور دستیابی به دقت مناسب پاسخ دارند. با توجه به محدودیت‌های اشاره شده، روش‌های خطی‌سازی معادل به‌عنوان محبوب‌ترین روش‌ها برای تخمین پاسخ سیستم‌های غیرخطی پذیرفته شده‌اند.

در روش خطی‌سازی معادل، سیستم غیرخطی موردنظر با یک سیستم خطی معادل با همان درجه آزادی جایگزین می‌شود. پارامترهای سیستم خطی معادل از طریق کمینه‌سازی میانگین مربعات خطا بین پاسخ سیستم‌های غیرخطی و خطی تعیین می‌شوند. فرض اصلی روش‌های خطی‌سازی معادل، در نظر گرفتن توزیع گوسین<sup>۸</sup> به عنوان توزیع حاکم بر پاسخ سیستم‌هاست. این فرض می‌تواند با افزایش درجه غیرخطی سیستم، باعث کاهش دقت روش ELM شود. دقت و کارایی روش‌های خطی‌سازی معادل توسط پژوهشگران مختلفی بررسی شده‌اند.<sup>[۲۱-۲۳]</sup> به‌طور کلی، روش ELM می‌تواند در تخمین میانگین پاسخ‌های سیستم غیرخطی، دقیق باشد؛ اما ممکن است برای تخمین پاسخ‌های غیرگوسی،<sup>[۲۴]</sup> به ویژه در ناحیه‌ی دم توزیع پاسخ،<sup>[۲۵]</sup> مؤثر نباشد. از دیگر معایب روش ELM می‌توان به عدم مدل‌سازی تغییرشکل‌های ماندگار و همچنین عدم برآورد دقیق احتمال خرابی سیستم‌های سازه‌ی تحت تحریک‌های تصادفی شدید اشاره کرد.<sup>[۲۵]</sup> اخیراً به منظور بهبود کارایی روش‌های ELM، مطالعات مختلفی صورت گرفته است. سو و همکاران<sup>[۱۸]</sup> (۲۰۱۸)، رویکردی را ارائه کردند که در آن روش خطی‌سازی معادل با روش فرمول‌بندی صریح حوزه‌ی زمانی ترکیب شده است. آن‌ها نشان دادند که الگوریتم عددی ترکیب‌شده از دو روش اخیر، برای تحلیل ارتعاش‌های تصادفی سیستم‌های دافینگ و هیستریزس بسیار کارآمد هستند. ژائو و هوانگ<sup>۹</sup> (۲۰۱۹)،<sup>[۲۶]</sup> نیز روش

خطی‌سازی معادل مبتنی بر تبدیل فوریه‌ی سریع را برای افزایش دقت و کارایی تخمین پاسخ سیستم‌های غیرخطی تحت تحریک‌های تصادفی مانا ارائه دادند. تلاش‌های زیادی در دهه‌ی اخیر، برای توسعه‌ی روش‌های خطی‌سازی معادل برای انواع سیستم‌های یک درجه و چند درجه آزادی صورت گرفته است، که در این میان می‌توان به مطالعات اسپانوس و جیارالیس<sup>۱۰</sup> (۱۳-۲۰، ۲۰۰۸-۲۰۱۳)،<sup>[۲۷-۲۸]</sup> برای سیستم‌های مختلف غیرخطی اشاره کرد. ایشان در مطالعات نخست خود به معرفی یک چارچوب ترکیبی از روش‌های خطی‌سازی آماری با طیف‌های توان سازگار شده با طیف پاسخ جهت تخمین بیشینه‌ی پاسخ لرزه‌ی نوسان‌گرهای غیرخطی بدون انجام تحلیل‌های تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی پرداختند.<sup>[۲۸]</sup> در مطالعات اخیر، با استفاده از روش میانگین‌گیری آماری، پارامترهای سیستم خطی معادل تخمین زده شده‌اند. این رویکرد در سطوح پاسخ غیرخطی شدید، دقت مناسبی ندارد. از این رو، اسپانوس و جیارالیس (۱۳-۲۰)،<sup>[۳۰]</sup> در مطالعه‌ی دیگر رویکرد مطالعات پیشین خود را با استفاده از روش‌های خطی‌سازی مرتبه‌ی بالا توسعه دادند که کاربرد آن برای سیستم‌های غیرخطی یک درجه آزادی،<sup>[۳۰]</sup> و چند درجه آزادی،<sup>[۳۱]</sup> تحت رکوردهای سازگار با طیف طرح کشتان بررسی شده است. در بیشتر مطالعات انجام شده در حوزه‌ی ارتعاش‌های تصادفی، بررسی کارایی رویکردهای خطی‌سازی معادل با استفاده از رکوردها با طیف‌های پاسخ حوزه‌ی دور از گسل انجام شده است. در صورتی که با اعمال آثار حوزه‌ی نزدیک گسل در آیین‌نامه‌های لرزه‌ی، بررسی کارایی رویکردهای خطی‌سازی معادل، امری ضروری به نظر می‌رسد.

در نوشتار حاضر، با استفاده از روش خطی‌سازی معادل، سیستم‌های غیرخطی یک درجه آزادی (SDOF) با رفتار نیرو-جابه‌جایی دوخطی تحت تحریک‌های تصادفی سازگار با طیف طرح آیین‌نامه‌ی لرزه‌ی ایران برای مناطق دور و نزدیک گسل ارزیابی شده‌اند. لرزه‌خیزی منطقه، خیلی زیاد و خاک ساختگاه، نوع II در نظر گرفته شده است. هدف اصلی نوشتار حاضر، بررسی آثار حوزه‌ی نزدیک گسل در پاسخ سیستم‌های غیرخطی است. علاوه بر این، در مطالعه‌ی حاضر، آثار مرتبه‌ی خطی‌سازی در دقت تخمین پاسخ‌های غیرخطی تحت تحریک‌های تصادفی سازگار با طیف طرح بررسی شده است. اهمیت این موضوع در انتخاب روش‌های خطی‌سازی معادل جهت تحلیل سیستم‌های غیرخطی تحت تحریک‌های تصادفی شدید، از جمله زمین‌لرزه‌های حوزه‌ی نزدیک است.

## ۲. خطی‌سازی آماری برای سیستم‌های غیرخطی یک درجه آزادی

در حالت کلی، معادله‌ی حاکم بر یک سیستم غیرخطی تحت تحریک تصادفی به صورت رابطه‌ی ۱ بیان می‌شود:

$$m\ddot{x} + \zeta m\omega_n \dot{x} + f(\dot{x}, z, x_y) = -G(t) \quad (1)$$

که در آن،  $G(t)$  تحریک ورودی،  $m$  جرم سیستم،  $\omega_n$  بسامد طبیعی،  $\zeta$  نسبت میرایی و  $x$  پاسخ سیستم غیرخطی هستند. علامت نقطه بالای متغیرها، نشان‌دهنده‌ی مشتق نسبت به زمان است. در رابطه‌ی ۱، عبارت  $f(\dot{x}, z, x_y)$  تابع نیروی بازگرداننده‌ی سیستم غیرخطی است که به صورت شکل ۱ تعریف شده است. تابع  $f(\dot{x}, z, x_y)$  به جابه‌جایی تسلیم  $(x_y)$  نسبت سختی بعد از تسلیم به سختی اولیه  $\alpha$  (نسبت صلبیت) و متغیر حالت هیستریزس  $z$  که به عنوان جابه‌جایی نسبی المان اصطکاکی

که به صورت روابط ۶ الی ۸ محاسبه می‌شوند: [۲۸]

$$\omega_{eff}^{\uparrow} = \omega_n^{\uparrow} \times \left\{ 1 - \frac{\lambda(1-\alpha)}{\pi} \int_1^{\infty} \left( \frac{1}{z^{\uparrow}} + \frac{1}{\theta z} \right) \sqrt{z-1} \exp\left(\frac{-z^{\uparrow}}{\theta}\right) dz \right\} \quad (6)$$

$$\zeta_{eff} = \zeta \frac{\omega_n}{\omega_{eff}} + \left( \frac{\omega_n}{\omega_{eff}} \right)^{\uparrow} \frac{1-\alpha}{\sqrt{\pi\theta}} \left( 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{1}{\sqrt{\theta}}\right) \right) \quad (7)$$

$$\theta = \uparrow \int_0^{\infty} \frac{G(\omega)/x_y^{\uparrow}}{(\omega^{\uparrow} - \omega_{eff}^{\uparrow})^{\uparrow} + (\uparrow \zeta_{eff} \omega_{eff})^{\uparrow}} d\omega \quad (8)$$

حل روابط اخیر به پارامترهای  $\omega_n$ ،  $\zeta$  و  $\alpha$  مربوط به مشخصه‌های سیستم غیرخطی  $G(\omega)$  تابع طیف توان مربوط به تحریک ورودی وابسته است. پارامترهای سیستم خطی معادل  $\omega_{eff}$  و  $\zeta_{eff}$  از طریق حل عددی معادلات غیرخطی ۶ الی ۸ محاسبه می‌شوند.

## ۲.۲. خطی‌سازی معادل با استفاده از روش خطی‌سازی مرتبه‌ی سوم

به منظور افزایش دقت تخمین پاسخ سیستم‌های غیرخطی با استفاده از رویکردهای خطی‌سازی معادل می‌توان از معادلات مرتبه بالای سیستم‌های خطی معادل استفاده کرد. در این راستا، آسانو و ون [۱۹۸۴]، [۲۳] روابط مربوط به سیستم خطی معادل مرتبه‌ی سوم را ارائه کردند. فرم کلی معادله‌ی حرکت مربوط به سیستم خطی معادل ذکر شده به صورت رابطه‌ی ۹ است:

$$\begin{cases} \ddot{x} + \uparrow \zeta \omega_n \dot{x} + \alpha \omega_n^{\uparrow} x + \omega_n^{\uparrow} (1-\alpha)(C_1 \dot{x} + C_2 z) = -\ddot{u}_g \\ \dot{z} + C_3 \dot{x} + C_4 z = 0 \end{cases} \quad (9)$$

ضرایب  $C_1$  تا  $C_4$  که در معادلات اخیر ظاهر شده‌اند، پارامترهای سیستم خطی معادل مرتبه‌ی سوم در محدوده‌ی زمانی هستند که از رویکرد کمینه ساختن میانگین مجذور خطا بین روابط ۱ و ۹ محاسبه می‌شوند. نحوه‌ی محاسبه‌ی ضرایب ذکر شده به صورت مفصل در نوشتار اسپانوس [۱۳] و همکارش [۲۰، ۱۳] ارائه شده است. ضرایب  $C_1$  تا  $C_4$  وابسته به واریانس  $\dot{x}$ ،  $z$  و کوواریانس  $\dot{x}z$  هستند، به همین جهت  $\sigma_{\dot{x}}^{\uparrow}$ ،  $\sigma_z^{\uparrow}$  و  $\rho_{\dot{x}z}$  از فرمول‌بندی در حوزه‌ی بسامد وابسته به تحریک ورودی برای سیستم خطی مطابق روابط ۱۰ الی ۱۲ به دست می‌آیند. [۲۰]

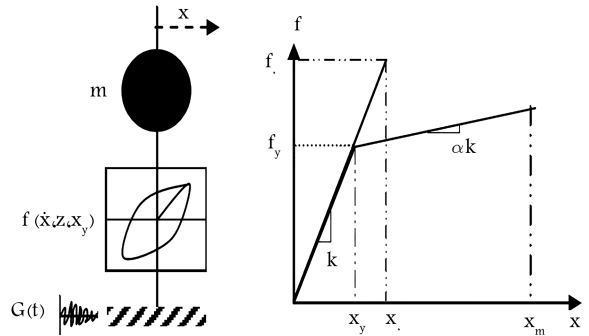
$$\sigma_{\dot{x}}^{\uparrow} = \int_0^{\infty} \omega^{\uparrow} \left| \frac{i\omega + C_1}{\sum_{j=0}^{\uparrow} (i\omega)^j A_j} \right|^2 G(\omega) d\omega \quad (10)$$

$$\sigma_z^{\uparrow} = \int_0^{\infty} \left| \frac{-i\omega C_4}{\sum_{j=0}^{\uparrow} (i\omega)^j A_j} \right|^2 G(\omega) d\omega \quad (11)$$

$$\rho_{\dot{x}z} = -\frac{C_4 \sigma_z}{C_1 \sigma_{\dot{x}}} \quad (12)$$

که در روابط ۱۰ و ۱۱، پارامتر  $A_j$  نیز به صورت روابط ۱۳ بیان می‌شود:

$$\begin{cases} A_0 = \alpha \omega_n^{\uparrow} C_1 \\ A_1 = \alpha \omega_n^{\uparrow} + (\uparrow \zeta \omega_n + (1-\alpha) \omega_n^{\uparrow} C_1) C_4 - (1-\alpha) \omega_n^{\uparrow} C_2 C_4 \\ A_2 = C_1 + \uparrow \zeta \omega_n + (1-\alpha) \omega_n^{\uparrow} C_1 \\ A_3 = 1 \end{cases} \quad (13)$$



شکل ۱. سیستم غیرخطی یک درجه آزادی تحت تحریک تصادفی  $G(t)$ .

کولمب تعریف می‌شود، بستگی دارد. تابع  $f(\dot{x}, z, x_y)$  به صورت رابطه‌ی ۲ بیان می‌شود:

$$f(\dot{x}, z, x_y) = k[\alpha x + (1+\alpha)f_1(\dot{x}, z, x_y)] \quad (2)$$

که در آن،  $\dot{z}$  و  $f_1(\dot{x}, z, x_y)$  مطابق روابط ۳ و ۴ تعریف می‌شوند:

$$\dot{z} = \dot{x}(1 - U\{z - x_y\}U\{\dot{x}\} - U\{-z - x_y\}U\{-\dot{x}\}) \quad (3)$$

$$f_1(\dot{x}, z, x_y) = z(1 - U\{z - x_y\}U\{\dot{x}\} - U\{-z - x_y\}U\{-\dot{x}\}) + \dots \\ x_y(U\{z - x_y\}U\{\dot{x}\} - U\{-z - x_y\}U\{-\dot{x}\}) \quad (4)$$

که در آن‌ها،  $U\{\cdot\}$  تابع پله‌ی هویساید است که به ازاء مقادیر  $v \geq 0$ ،  $U\{v\} = 1$  و به ازاء مقادیر  $v < 0$ ،  $U\{v\} = 0$  است. حل معادله‌ی دیفرانسیل رابطه‌ی ۱ به دلیل وجود ترم غیرخطی  $f(\dot{x}, z, x_y)$  کار ساده‌ی نیست. از این رو، در بخش حاضر، به منظور تخمین پاسخ سیستم غیرخطی، دو رویکرد مختلف جهت تعریف سیستم خطی معادل متناظر با سیستم‌های غیرخطی یک درجه آزادی ارائه شده است. در رویکرد اول، از روش میانگین‌گیری آماری جهت استخراج پارامترهای سیستم خطی معادل استفاده می‌شود. در رویکرد دوم نیز با بهره‌گیری از روش‌های خطی‌سازی مرتبه‌ی بالا در محدوده‌ی بسامدی و جایگزین کردن آن با سیستم غیرخطی، امکان تعریف سیستم خطی معادل فراهم می‌شود.

## ۱.۲. خطی‌سازی معادل با استفاده از روش میانگین‌گیری آماری

برای سیستم‌های دارای رفتار هیستریزیسی، توابع سیستم غیرخطی به تاریخچه‌ی پاسخ سیستم وابسته است. در این راستا، کاهی [۱۱]، [۱۹۶۰]، [۲۳] از رویکرد میانگین‌گیری مربعات خطاها برای خطی‌سازی سیستم‌های غیرخطی استفاده کرده است. معادله‌ی سیستم خطی معادل متناظر با سیستم‌های غیرخطی با رابطه‌ی تغییرشکل - نیرو دوخطی، به صورت رابطه‌ی ۵ تعریف می‌شود:

$$\ddot{x} + \uparrow \zeta_{eff} \omega_{eff} \dot{x} + \omega_{eff}^{\uparrow} x = -\ddot{u}_g \quad (5)$$

که در آن،  $\ddot{u}_g$  شتاب تحریک ورودی و  $\omega_{eff}$  و  $\zeta_{eff}$  بسامد و نسبت میرایی سیستم خطی معادل با کمینه‌سازی میانگین مجذور خطای پاسخ بین روابط ۱ و ۵ هستند

که در آن،  $\lambda_{j,m,G}$  ممان‌های مرتبه‌ی  $m$  پاسخ طیفی است که مطابق رابطه‌ی ۱۸ محاسبه می‌شود: [۳۷]

$$\lambda_{j,m,G} = \int_0^\infty \frac{\omega^m G(\omega)}{(\omega_j^2 - \omega^2)^2 + (\zeta_j \omega_j \omega)^2} d\omega \quad (18)$$

از آنجا که محاسبه‌ی ضریب بزرگ‌نمایی ( $\eta_j$ ) در سیستم‌های تحت ارتعاش‌های تصادفی، نیازمند حل دقیق مسئله‌ی اولین عبور پاسخ از سطحی خاص از شدت با احتمال  $p$  است، لذا برای محاسبه‌ی ضریب  $\eta_j$ ، روابطی دقیق و کلی در دسترس نیست. از این رو، پژوهشگران از طریق روش‌های نیمه‌تجربی اقدام به تخمین ضریب بزرگ‌نمایی تحریک‌های غیرمانند کرده‌اند. [۳۸, ۳۹] در مطالعه‌ی حاضر، از رابطه‌ی نیمه‌تجربی و کاربردی وانمارک (۱۹۷۶)، [۳۶] مطابق رابطه‌ی ۱۹ استفاده شده است:

$$\eta_j = \sqrt{2 \ln \left\{ 2v_j \left[ 1 - \exp \left( -q_j^{1/2} \sqrt{\pi \ln(2v_j)} \right) \right] \right\}} \quad (19)$$

که در آن  $v_j$ ،  $q_j$  و  $\eta_j$  مطابق روابط ۲۰ و ۲۱ محاسبه می‌شوند:

$$v_j = - \frac{\omega_j T_s \exp \left( -2 \left( \frac{1 - \exp(-2\zeta_j \omega_j T_s)}{1 - \exp(-\zeta_j \omega_j T_s)} - 1 \right) \right)}{2\pi \ln(\delta)} \quad (20)$$

$$q_j = \sqrt{1 - \frac{1}{1 - \zeta_j^2} \left( 1 - \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \frac{\zeta_j}{\sqrt{1 - \zeta_j^2}} \right)}; \quad \zeta_j = \frac{\zeta}{1 - \exp(-2\zeta \omega_j T_s)} \quad (21)$$

اکنون با دراختیار داشتن طیف طرح/پاسخ مشخص، طیف توان گسسته از رابطه‌ی بازگشتی زیر در تعداد نقاط مشخص  $N$  و بسامد طبیعی  $\Delta\omega = \omega_k - \omega_{k-1}$  با گام‌های  $\Delta\omega$  به دست می‌آید. [۴۰] رابطه‌ی طیف توان در محدوده‌ی بسامد به صورت رابطه‌ی ۲۲ بیان می‌شود:

$$G(\omega_k) = \frac{\zeta_k}{\omega_k \pi - \zeta_k \omega_{k-1}} \times \left( \frac{Sa^2(2\pi/\omega_k, \zeta)}{\eta_k^2} - \Delta\omega \sum_{i=1}^{k-1} G(\omega_i) \right) \quad (22)$$

که در آن، هر چقدر  $\Delta\omega$  کوچک‌تر باشد، میزان دقت بیشتر می‌شود. برای کاربردهای مهندسی مقدار  $\Delta\omega = \omega/1$ ، دقت کافی دارد.  $\omega_N$  بسامدی است که از آن بسامد به بعد، دامنه‌ی طیف توان به صفر میل می‌کند و همچنین  $\omega_0$  کمترین مقدار بسامد طبیعی جهت تعریف رابطه‌ی ۱۹ است (رابطه‌ی ۲۳):

$$\omega_0 = \min_{\omega_k} \left( \ln \left\{ 2v_j \left[ 1 - \exp \left( -q_j^{1/2} \sqrt{\pi \ln(2v_j)} \right) \right] \right\} \geq 0 \right) \quad (23)$$

براساس روابط ۱۷ الی ۲۱، می‌توان طیف پاسخ شبه شتاب  $D(\omega_{k,\xi})$  مربوط به طیف توان به دست‌آمده از رابطه‌ی ۲۲ را محاسبه کرد. در گام اول محاسبات ممکن است طیف پاسخ شبه شتاب  $D(\omega_{k,\xi})$  در تمام بسامدهای طبیعی سیستم به طیف پاسخ/طرح هدف، یعنی  $Sa_{target}$  همگرا نشود. از این رو، جهت سازگاری مطلوب طیف  $D(\omega_{k,\xi})$  با طیف  $Sa_{target}$ ، از یک فرایند تکراری براساس رابطه‌ی ۲۴ استفاده می‌شود: [۴۰]

$$G^{(M+1)}(\omega_k) = G^{(M)}(\omega_k) \left( \frac{Sa(2\pi/\omega_k, \zeta)}{D^{(M)}(2\pi/\omega_k, \zeta)} \right)^2 \quad (24)$$

که در آن،  $M$  تعداد تکرارهای لازم برای رسیدن به یک همگرایی قابل قبول است.

ضرایب  $C_1$  تا  $C_4$  و معادلات ۱۰ الی ۱۲، تشکیل یک دستگاه معادله‌ی غیرخطی و مجهول را می‌دهند که برای حل دستگاه معادلات غیرخطی مذکور می‌توان از الگوریتم‌های بهینه‌سازی، مانند روش ناحیه‌ی اطمینان داگ‌لگ [۴۱] استفاده کرد. [۳۵] از دیدگاه تئوری و آنالیزهای عددی می‌توان دریافت که سیستم‌های خطی مرتبه‌ی سوم نسبت به سیستم‌های خطی مرتبه‌ی دوم، [۲۸, ۲۹, ۳۳] مشخصات آماری پاسخ سیستم غیرخطی را دقیق‌تر برآورد می‌کنند. با این حال، سیستم خطی مرتبه‌ی سوم را نمی‌توان به راحتی به پیشینه‌ی پاسخ‌های سیستم خطی یا طیف طرح/پاسخ مرتبط ساخت. جهت رفع مشکل اخیر، با تعریف یک سیستم خطی مرتبه‌ی دوم متناظر با سیستم خطی معادل مرتبه‌ی سوم این ارتباط ایجاد می‌شود. این کار از طریق برابر قراردادن مشخصات آماری پاسخ سیستم‌های خطی مرتبه‌ی سوم با مرتبه‌ی دوم تحقق پیدا می‌کند. [۳۷] معادله‌ی حرکت سیستم خطی مرتبه‌ی دوم متعارف با پارامترهای معادل  $\omega_{eff}$  و  $\zeta_{eff}$  و شرایط اولیه‌ی سکون تحت شتاب  $\ddot{u}_g$  به صورت رابطه‌ی ۱۴ است:

$$\ddot{x} + 2\zeta_{eff}\omega_{eff}\dot{x} + \omega_{eff}^2 x = -\ddot{u}_g \quad (14)$$

که در آن،  $x$  پاسخ سیستم خطی مرتبه‌ی دوم است. پارامترهای سیستم خطی  $\omega_{eff}$  و  $\zeta_{eff}$  نیز با برابر قرار دادن واریانس‌های پاسخ سرعت و جابه‌جایی سیستم‌های خطی مرتبه‌ی دوم و سوم مطابق روابط ۱۵ و ۱۶ به دست می‌آیند:

$$\sigma_x^2 = \int_0^\infty \frac{G(\omega)}{(\omega^2 - \omega_{eff}^2)^2 + (2\zeta_{eff}\omega_{eff}\omega)^2} d\omega = \int_0^\infty \left| \frac{i\omega + C_1}{\sum_{j=0}^2 (i\omega)^j A_j} \right|^2 G(\omega) d\omega \quad (15)$$

$$\sigma_{\dot{x}}^2 = \int_0^\infty \frac{\omega^2 G(\omega)}{(\omega^2 - \omega_{eff}^2)^2 + (2\zeta_{eff}\omega_{eff}\omega)^2} d\omega = \int_0^\infty \omega^2 \left| \frac{i\omega + C_1}{\sum_{j=0}^2 (i\omega)^j A_j} \right|^2 G(\omega) d\omega \quad (16)$$

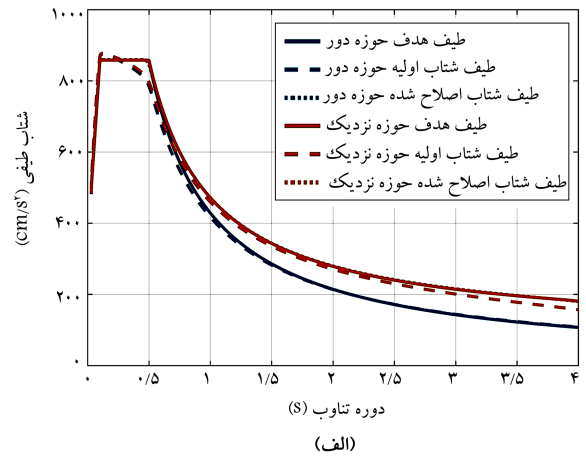
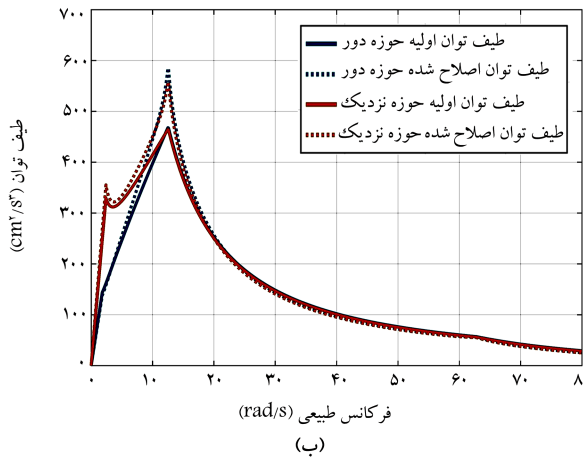
مقادیر پارامترهای سیستم خطی  $\omega_{eff}$  و  $\zeta_{eff}$  در روابط اخیر نیز براساس رویکرد اشاره شده برای حل دستگاه معادلات غیرخطی با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی، قابل محاسبه هستند. اکنون می‌توان براساس سیستم خطی تعریف شده، طیف پاسخ خطی معادل متناظر با سیستم‌های غیرخطی تحت تحریک‌های ورودی را محاسبه کرد.

### ۳. محاسبه‌ی طیف توان سازگار با طیف پاسخ

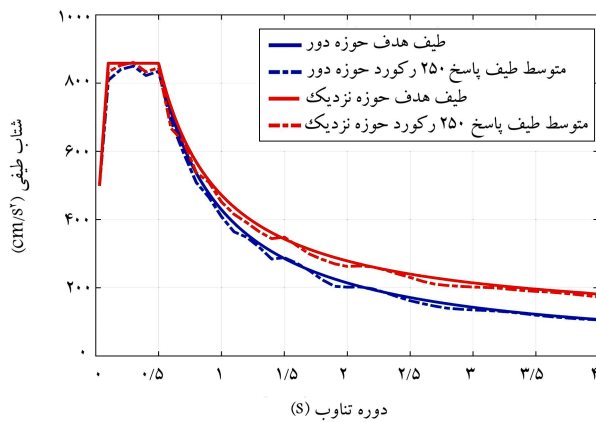
فرمول‌بندی سیستم‌های خطی معادل در بخش‌های ۱,۲ و ۲,۲ براساس تابع طیف توان مربوط به تحریک ورودی در حوزه‌ی بسامدی  $G(\omega)$  است. لذا به منظور ارتباط دادن طیف توان تحریک ورودی با طیف طرح/پاسخ، لازم است تحریک ورودی لرزه‌یی توسط طیف پاسخ شبه شتاب

$Sa(2\pi/\omega_j)$  سیستم یک درجه آزادی خطی با بسامد طبیعی  $\omega_j$  و نسبت میرایی  $\zeta$  بیان شود. در این چارچوب، تحریک ورودی به صورت یک فرایند شبه‌مانا دارای زمان ارتعاش محدود  $T_s$  مبتنی بر طیف پاسخ  $Sa$  به‌وسیله‌ی مفهوم ضریب بزرگ‌نمایی  $\eta_j$  به صورت رابطه‌ی ۱۷ بیان می‌شود: [۳۶]

$$Sa \left( \frac{2\pi}{\omega_j}, \zeta \right) = \eta_j \omega_j^2 \sqrt{\lambda_{j,0,G}} \quad (17)$$



شکل ۲. الف) طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ برای حوزه‌های نزدیک و دور از گسل و خاک نوع II؛ ب) طیف توان متناظر با طیف‌های هدف.



شکل ۳. متوسط طیف پاسخ ۲۵۰ شتاب‌نگاشت مصنوعی و سازگار شده با طیف هدف در حوزه‌های نزدیک و دور از گسل.

مشخص شدن پارامترهای مربوط به سیستم‌های خطی معادل جهت تخمین پاسخ سیستم‌های خطی معادل از رویکردی‌های مبتنی بر ارتعاش‌های تصادفی خطی و تحلیل‌های تاریخیچه‌ی زمانی خطی استفاده شده است. علاوه بر این، نتایج حاصل از رویکردهای مذکور با نتایج به دست آمده از تحلیل‌های تاریخیچه‌ی زمانی غیرخطی مقایسه شده‌اند. در این راستا، برای استخراج نتایج تحلیل‌های تاریخیچه‌ی زمانی سیستم‌های غیرخطی از ۲۵۰ رکورد مصنوعی تولیدی سازگار با دو حالت طیف هدف استاندارد ۲۸۰۰ استفاده شده است. در مطالعه‌ی حاضر، جهت تولید رکوردهای مصنوعی از نرم‌افزار SeismoArtif استفاده شده است، که در آن رکوردهای مصنوعی با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی در حوزه‌ی ارتعاش‌های تصادفی با اتخاذ توابع پوش و چگالی طیف توان تولید شده‌اند.<sup>[۲۲،۲۱]</sup> در شکل ۳، متوسط طیف پاسخ کشسان مربوط به ۲۵۰ رکورد تولیدی سازگار با طیف‌های هدف مشاهده می‌شود.

پاسخ سیستم‌های یک درجه آزادی غیرخطی با استفاده از تئوری ارتعاش‌های تصادفی به کمک رابطه ۲۵ محاسبه می‌شود:

$$\max_T \{|x(t)|\} = \eta_{eff} \sigma_x \quad (25)$$

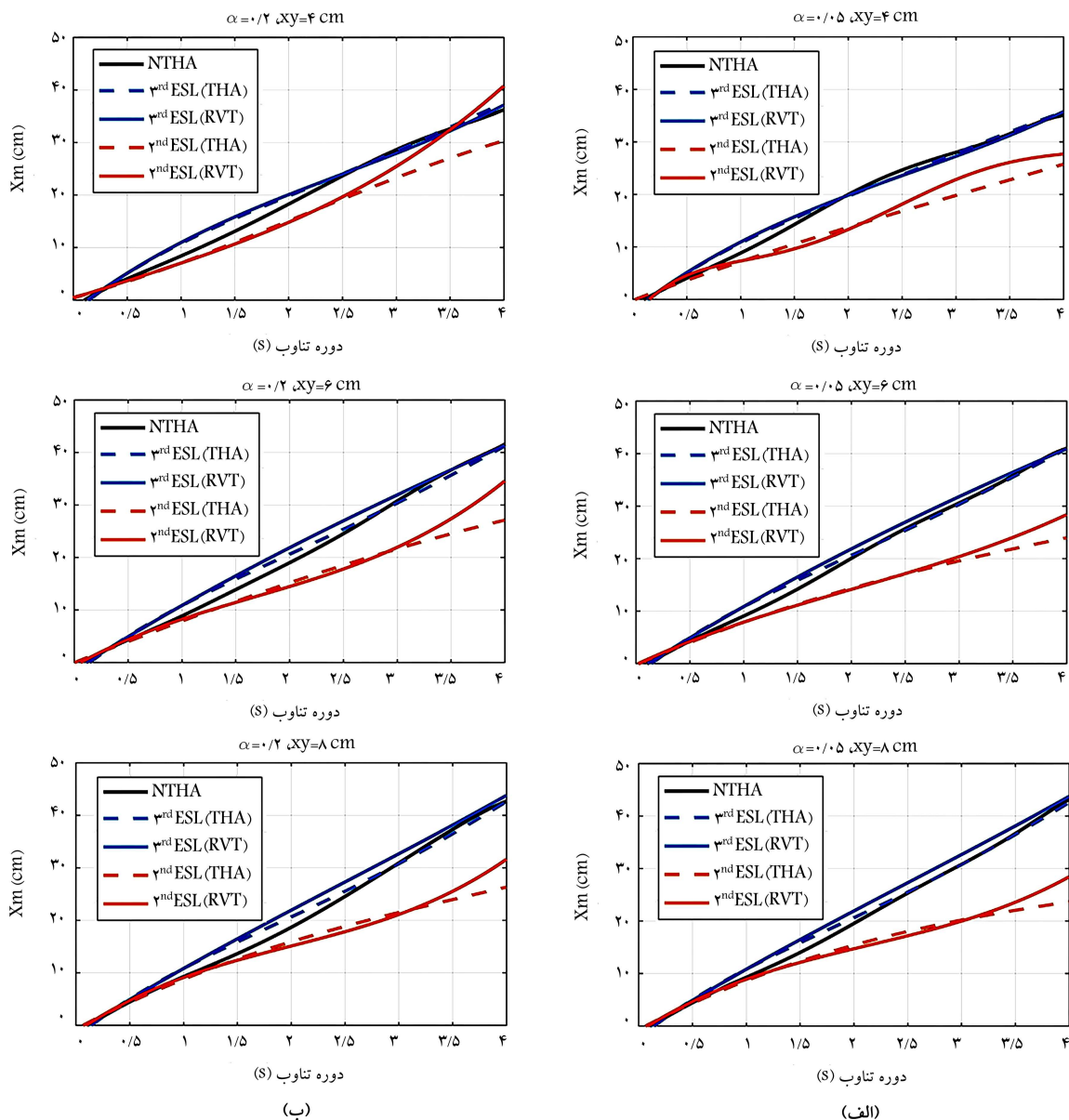
که در آن،  $\sigma_x$  برابر با مقادیر انحراف معیار پاسخ سیستم‌های خطی معادل و  $\eta_{eff}$  نیز ضریب بزرگ‌نمایی محاسبه شده توسط پارامترهای معادل سیستم خطی مرتبه‌های

#### ۴. بیشینه‌ی پاسخ سیستم‌های غیرخطی تحت

#### تحریک‌های سازگار با طیف پاسخ

در نوشتار حاضر، از روش‌های خطی‌سازی معادل توضیح داده شده در بخش‌های قبل، جهت محاسبه‌ی بیشینه‌ی پاسخ سیستم‌های غیرخطی یک درجه آزادی با رفتار نیرو-جابجایی دوخطی تحت تحریک‌های تصادفی سازگار با طیف طرح آیین‌نامه‌ی لرزه‌ی ایران استفاده شده است. در مطالعه‌ی حاضر، ساختگاه از نوع خاک II و در منطقه‌ی لرزه‌خیزی خیلی زیاد در نظر گرفته شده است. به منظور تعریف تحریک ورودی سیستم‌های غیرخطی یک درجه آزادی، طیف هدف براساس طیف طرح کشسان بکنواخت با نسبت میرایی ۵٪ در آیین‌نامه‌ی طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله،<sup>[۶]</sup> برای دو حالت با و بدون لحاظ کردن آثار حوزه‌ی نزدیک گسل (ضریب اصلاحی N) استفاده شده است. در نوشتار حاضر، لحاظ کردن ضریب اصلاحی در طیف هدف منجر به تولید طیف هدف حوزه‌ی نزدیک و در نظر نگرفتن ضریب مذکور، بیانگر طیف هدف حوزه‌ی دور از گسل است. براساس طیف هدف تعیین شده و سایر فرضیات اشاره شده‌ی اخیر، طیف توان مربوط به تحریک ورودی مطابق روابط ۱۷ الی ۲۴ قابل محاسبه است. در شکل ۲، طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ برای مناطق حوزه‌های نزدیک و دور از گسل و همچنین طیف توان متناظر با طیف‌های مذکور با در نظر گرفتن مقادیر  $\Delta\omega = 0.1 \text{ rad/s}$  و  $T_s = 2 \text{ s}$  ثانیه مشاهده می‌شود.

طیف‌های توان به دست آمده در شکل اخیر، طی سه مرحله تکرار به همگرایی کامل رسیده‌اند. همان‌طور که در شکل (الف) مشاهده می‌شود، آثار حوزه‌ی نزدیک در استاندارد ۲۸۰۰ و برایش چهارم از دوره تناوب‌های میانی به بالا، با افزایش دوره‌ی تناوب سازه افزایش پیدا کرده است. این موضوع نیز برای طیف توان صدق می‌کند. در شکل (ب) نیز مشاهده می‌شود که در بسامدهای طبیعی پایین (دوره‌ی تناوب بالا)، آثار حوزه‌ی نزدیک قابل توجه است. بنابراین انتظار می‌رود این امر موجب افزایش پاسخ سازه‌ها در محدوده‌ی بسامدی طبیعی پایین شود. برای پی بردن به این موضوع، طیف پاسخ غیرخطی سیستم‌های یک درجه آزادی برای حالت‌های مختلف جابه‌جایی تسلیم، یعنی ۴، ۶ و ۸ سانتی‌متر و در دو نسبت صلبیت ۵٪ و ۲٪ محاسبه شده‌اند. پاسخ‌های غیرخطی براساس روش‌های خطی‌سازی معادل مرتبه‌های دوم و سوم به دست آمده‌اند. با

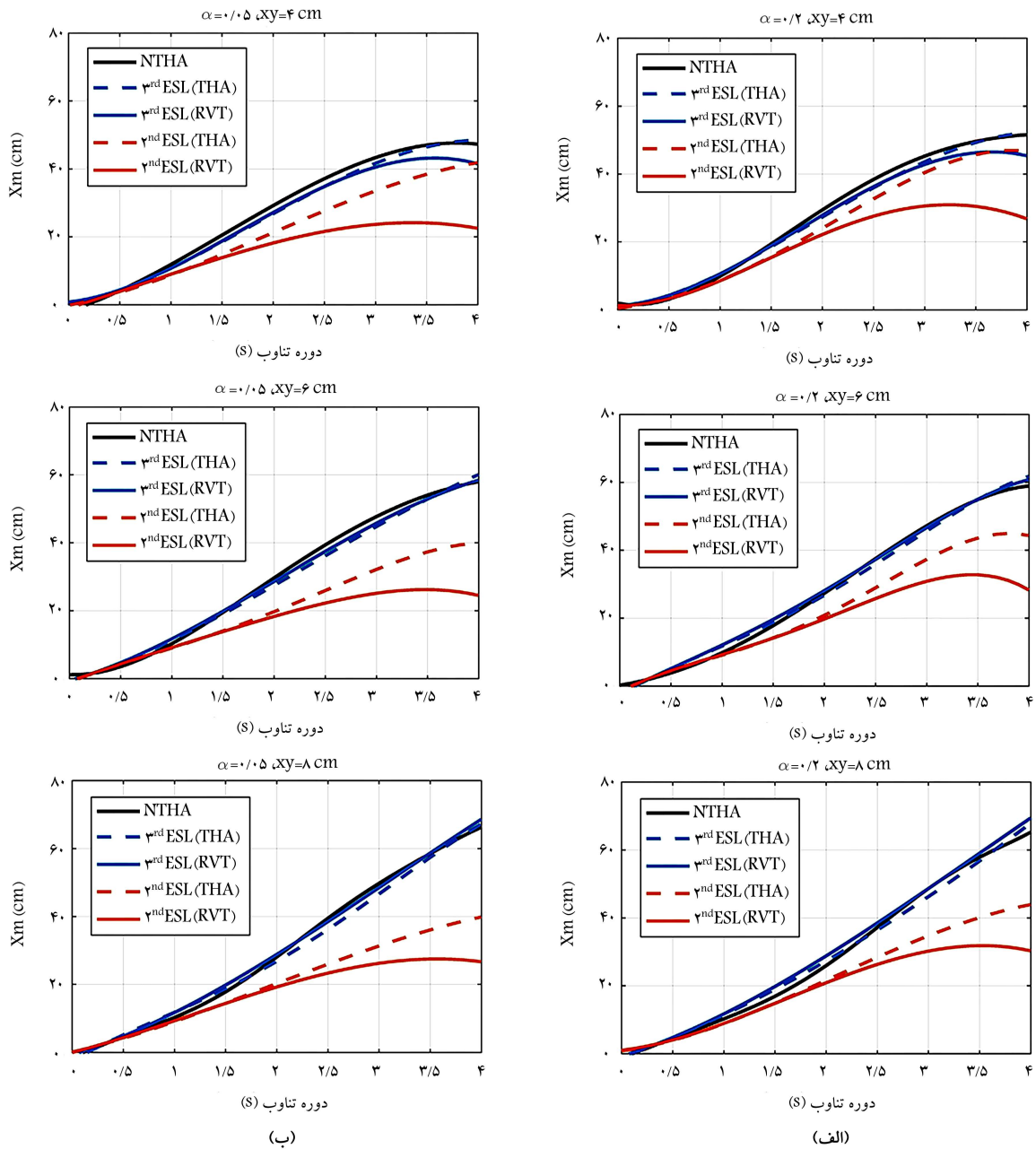


شکل ۴. طیف پاسخ غیرخطی سیستم‌های یک درجه آزادی تحت تحریک‌های سازگار با طیف هدف حوزه‌ی درازگسل. که در آن،  $2^{nd}ESL$  بیانگر روش خطی‌سازی آماری مرتبه‌ی دوم و  $3^{rd}ESL$  بیانگر روش خطی‌سازی آماری مرتبه‌ی سوم است. همچنین  $RVT$ ،  $THA$  و  $NTHA$  به ترتیب رویکردهای مبتنی بر تئوری ارتعاش‌های تصادفی و تحلیل‌های تاریخچه‌ی زمانی خطی و غیرخطی هستند.

تاریخچه‌ی زمانی خطی با نتایج تحلیل‌های تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی اختلاف پیدا کرده‌اند. اختلاف بین نتایج، با افزایش دوره‌ی تناوب بیشتر نمایان شده است. با مقایسه‌ی نتایج برای دو نسبت صلبیت نشان داده شده در شکل ۴ (الف و ب) می‌توان دریافت که با افزایش نسبت صلبیت، اختلاف بین نتایج خطی‌سازی معادل و تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی کمتر شده است. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، نتایج روش خطی‌سازی مرتبه‌ی سوم به‌دست آمده از رویکردهای مبتنی بر تئوری ارتعاش‌های تصادفی و تحلیل تاریخچه‌ی زمانی خطی با نتایج تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی در مقادیر مختلف نسبت صلبیت و جابه‌جایی‌های تسلیم انطباق کامل دارند و این امر بیانگر دقت مناسب روش خطی‌سازی مرتبه‌ی سوم در برآورد پاسخ سیستم‌های غیرخطی است.

دوم و سوم و استفاده از روابط ۱۹ الی ۲۱ هستند. نتایج طیف پاسخ غیرخطی برای حوزه‌های دور و نزدیک از گسل و به‌کارگیری روش‌های مختلف تحلیلی در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود.

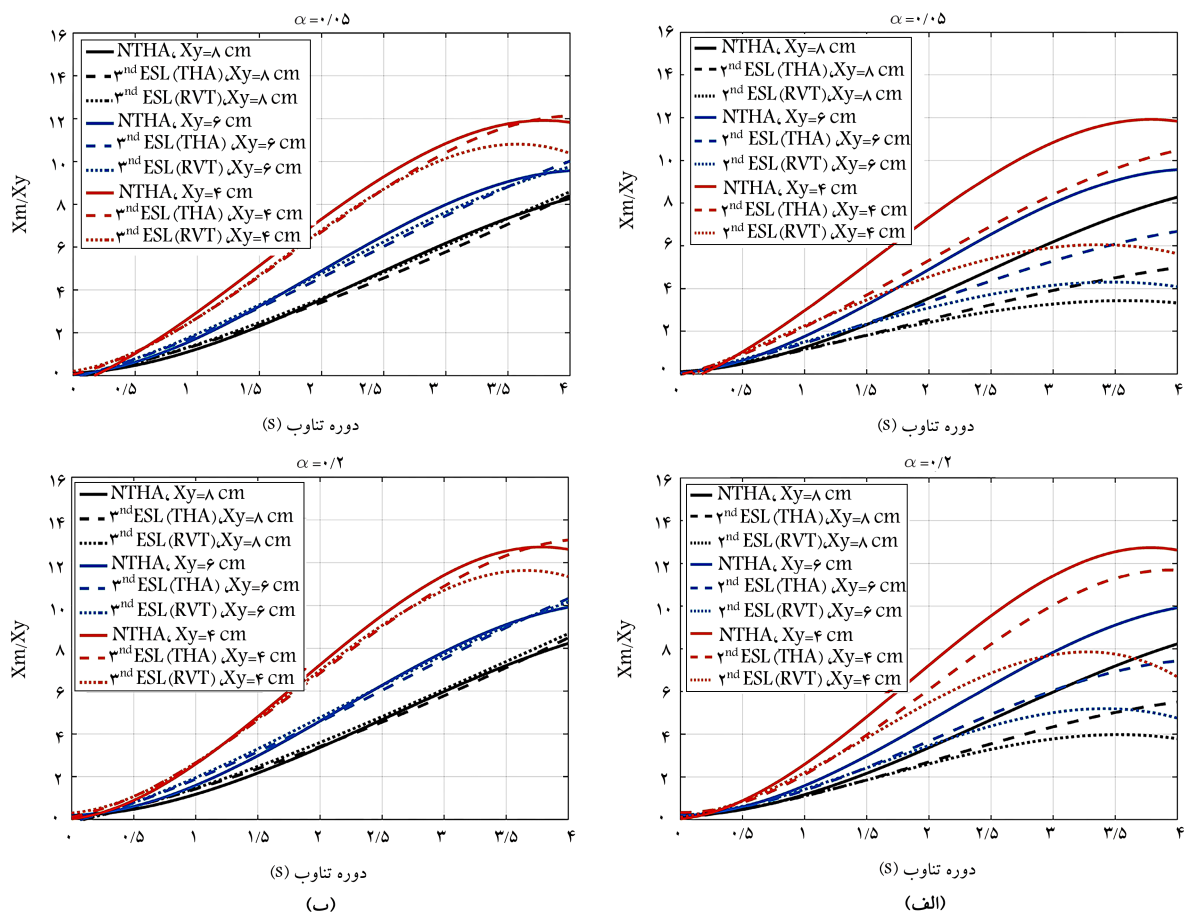
محور عمودی در شکل‌های مذکور ( $X_m$ )، بیانگر پاسخ پیشین‌ساز سیستم‌های غیرخطی است که برای تحلیل‌های تاریخچه‌ی زمانی، متغیر  $X_m$ ، بیانگر متوسط پاسخ پیشین‌ساز سیستم‌ها تحت رکوردهای مصنوعی است. در شکل ۴، نتایج پاسخ غیرخطی سیستم‌های یک درجه آزادی تحت تحریک‌های سازگار با طیف هدف حوزه‌ی دور برای مقادیر مختلف نسبت صلبیت و جابه‌جایی تسلیم مشاهده می‌شود که مطابق آن، با افزایش مقادیر جابه‌جایی تسلیم، نتایج طیف پاسخ به‌دست آمده از روش خطی‌سازی مرتبه‌ی دوم برای دو رویکرد تئوری ارتعاش‌های تصادفی و تحلیل



شکل ۵. طیف پاسخ غیرخطی سیستم‌های یک درجه آزادی تحت تحریک‌های سازگار با طیف هدف حوزه‌ی نزدیک به گسل. که در آن،  $2^{nd}$  ESL بیانگر روش خطی‌سازی آماری مرتبه‌ی دوم و  $3^{rd}$  ESL بیانگر روش خطی‌سازی آماری مرتبه‌ی سوم است. همچنین RVT، THA و NTHA به ترتیب رویکردهای مبتنی بر تئوری ارتعاش‌های تصادفی و تحلیل‌های تاریخچه‌ی زمانی خطی و غیرخطی هستند.

نتایج طیف پاسخ غیرخطی برای مقادیر مختلف نسبت صلبیت و جابه‌جایی تسلیم با در نظر گرفتن آثار حوزه‌ی نزدیک در شکل ۵ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، نتایج روش خطی‌سازی مرتبه‌ی سوم برای دو رویکرد تئوری ارتعاش‌های تصادفی و تحلیل تاریخچه‌ی زمانی خطی با نتایج تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی در مقادیر مختلف نسبت صلبیت و جابه‌جایی‌های تسلیم انطباق دارند، اما این موضوع برای روش خطی‌سازی مرتبه‌ی دوم صدق نمی‌کند. در شکل ۵ می‌توان مشاهده کرد که با افزایش مقادیر جابه‌جایی تسلیم، نتایج طیف پاسخ حاصل از روش خطی‌سازی مرتبه‌ی دوم برای دو رویکرد تئوری ارتعاش‌های تصادفی و تحلیل تاریخچه‌ی زمانی خطی با نتایج تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی اختلاف زیادی پیدا کرده‌اند.

اختلاف مذکور با افزایش دوره‌ی تناوب بیشتر خواهد شد. نکته‌ی قابل توجه در شکل اخیر، وجود اختلاف قابل توجه در نتایج رویکردهای مبتنی بر تئوری ارتعاش‌های تصادفی و تحلیل تاریخچه‌ی زمانی خطی در تخمین پاسخ سیستم خطی معادل مرتبه‌ی دوم از دوره‌های تناوب میانی به بالاست که این امر در حالت حوزه‌ی دور از گسل بسیار کمتر است. از سوی دیگر، با مقایسه‌ی نتایج برای دو نسبت صلبیت ۵/۰ و ۲/۰ در شکل‌های ۵ (الف و ب) می‌توان دریافت که با افزایش نسبت صلبیت، اختلاف بین نتایج خطی‌سازی معادل و تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی کمتر شده است، به طوری که در برخی موارد (جابه‌جایی‌های تسلیم کم) نتایج مربوط به رویکرد تحلیل تاریخچه‌ی زمانی خطی در روش خطی‌سازی مرتبه‌ی دوم با نتایج



شکل ۶. نمودارهای شکل‌پذیری - دوره‌ی تناوب سیستم‌های غیرخطی یک درجه آزادی تحت تحریک‌های سازگار با طیف هدف حوزه‌ی نزدیک گسل: الف) نتایج روش خطی‌سازی مرتبه‌ی دوم، ب) نتایج روش خطی‌سازی آماری مرتبه سوم، در این شکل 2<sup>nd</sup> ESL بیانگر روش خطی‌سازی مرتبه دوم و 3<sup>rd</sup> ESL بیانگر روش خطی‌سازی مرتبه سوم می‌باشد. همچنین RVT، THA و NTHA به ترتیب رویکردهای مبتنی بر تئوری ارتعاشات تصادفی و تحلیل‌های تاریخچه زمانی خطی و غیرخطی هستند.

تحریک‌های شدید است. از سوی دیگر، تطابق کامل نتایج روش خطی‌سازی مرتبه‌ی سوم با نتایج تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی در مقادیر مختلف جابه‌جایی تسلیم و نسبت صلبیت‌های مختلف (شکل ۶ ب)، گویای دقت و کارآمدی روش مذکور در تخمین پاسخ سیستم‌های غیرخطی تحت تحریک‌های شدید است.

## ۵. نتیجه‌گیری

برآورد دقیق آماره‌های پاسخ سیستم‌های غیرخطی تحت تحریک‌های شدید، یکی از موضوعات اساسی در مهندسی زلزله براساس عملکرد است. در پژوهش حاضر، آثار حوزه‌ی نزدیک مندرج در آیین‌نامه‌ی طراحی لرزه‌ی ایران (استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم) با عنوان ضریب اصلاح طیفی (N)، در پاسخ سیستم‌های غیرخطی یک درجه آزادی با رفتار هیستریزس دوخطی بررسی شده است. در پژوهش حاضر، جهت تخمین پاسخ سیستم‌های غیرخطی از روش‌های خطی‌سازی مرتبه‌های دوم و سوم استفاده شده است. از رویکردهای اشاره شده می‌توان برای محاسبه‌ی طیف پاسخ غیرخطی متناظر با یک طیف پاسخ/طرح مشخص بدون نیاز به انتگرال‌گیری عددی معادلات غیرخطی حرکت سیستم‌ها تحت رکوردهای زمین‌لرزه

تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی انطباق خوبی پیدا کرده‌اند. با مقایسه‌ی نتایج ارائه شده در شکل‌های ۴ و ۵ برای یک مقدار جابه‌جایی تسلیم و نسبت صلبیت مشخص می‌توان پی برد که پاسخ سیستم‌های غیرخطی متأثر از آثار حوزه‌ی نزدیک است، به طوری که آثار مذکور باعث افزایش پاسخ‌های غیرخطی مخصوصاً در نواحی دوره‌های تناوب متوسط به بالا می‌شود.

جهت درک بهتر کارآمدی روش‌های خطی‌سازی معادل تحت آثار حوزه‌ی نزدیک، مقایسه‌ی بین نتایج روش‌های خطی‌سازی معادل با روش تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی در قالب نمودارهای شکل‌پذیری - دوره‌ی تناوب (شکل ۶) برای مقادیر جابه‌جایی تسلیم ۴، ۶ و ۸ سانتی‌متر در دو نسبت صلبیت ۰/۵ و ۰/۲ ارائه شده است. در شکل (الف) نتایج شکل‌پذیری در مقابل دوره‌ی تناوب سیستم‌های یک درجه آزادی غیرخطی با استفاده از روش خطی‌سازی مرتبه‌ی دوم مشاهده می‌شود. مطابق شکل مذکور، بین نتایج روش خطی‌سازی مرتبه‌ی دوم با نتایج تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی در محدوده‌ی دوره‌های تناوب متوسط به بالا برای تمام مقادیر مختلف جابه‌جایی تسلیم اختلاف زیادی مشاهده می‌شود.

اگرچه اختلاف بین نتایج با افزایش نسبت صلبیت سیستم‌ها کاهش پیدا می‌کند، اما این اختلاف همچنان قابل ملاحظه است. اختلاف زیاد نتایج، بیانگر دقت پایین روش خطی‌سازی مرتبه‌ی دوم در برآورد پاسخ سیستم‌های غیرخطی تحت



زمانی غیرخطی  $25^\circ$  رکورد سازگار شده با طیف هدف آیین نامه در مقادیر مختلف جابه جایی تسلیم و نسبت صلبیت سیستم مقایسه شده اند. نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر نشان داد که آثار حوزه ی نزدیک باعث افزایش چشمگیر پاسخ سیستم های غیرخطی شده است. همچنین نتایج نشان می دهد که روش خطی سازی مرتبه ی دوم در تخمین پاسخ سیستم های غیرخطی تحت تحریک های شدید، دقت خوبی ندارد؛ به طوری که با افزایش دوره ی تناوب، اختلاف پاسخ سیستم خطی معادل استنتاج شده از روش خطی سازی آماری مرتبه ی دوم با تحلیل های تاریخچه ی زمانی غیرخطی بیشتر می شود.

از سوی دیگر، انطباق خوب نتایج خطی سازی مرتبه ی سوم با نتایج تحلیل تاریخچه ی زمانی غیرخطی بیانگر کارآمد بودن و دقت مناسب روش مذکور در تخمین پاسخ سیستم های غیرخطی تحت آثار حوزه ی نزدیک است. نکته ی قابل توجهی که براساس نتایج می توان به آن اشاره کرد، انطباق کامل نتایج رویکردهای مبتنی بر تئوری ارتعاش های تصادفی و تحلیل تاریخچه ی زمانی خطی در روش خطی سازی مرتبه ی سوم است، به طوری که این انطباق در روش خطی سازی مرتبه ی دوم مشاهده نمی شود.

استفاده کرد. در این راستا، به منظور بررسی آثار حوزه ی نزدیک ارائه شده در آیین نامه ی لرزه یی ایران، از تحریک های لرزه یی که طیف پاسخ آن ها سازگار با طیف هدف (طیف طرح آیین نامه) است، استفاده شده است. به منظور استخراج طیف پاسخ سیستم خطی معادل متناظر به طیف های هدف تعیین شده، طیف توان تحریک ورودی متناظر با طیف های هدف بر مبنای رویکردی در حوزه ی ارتعاش های تصادفی محاسبه و در نهایت با تخمین پارامترهای معادل سیستم های خطی معادل، طیف پاسخ سیستم خطی معادل از رویکردهای حوزه ی بسامدی و زمانی در محدوده ی کشسان محاسبه شده اند. در رویکرد استفاده شده در نوشتار حاضر، پارامترهای معادل سیستم خطی به طور صریح با طیف پاسخ از پیش تعیین شده و سیستم هیستریزیس دوخطی در نظر گرفته شده مرتبط بوده اند. از این رو می توان با استفاده از پارامترهای معادل سیستم خطی، تخمین های قابل اعتمادی از بیشینه ی پاسخ غیرخطی متناظر با یک طیف هدف مشخص به دست آورد.

در نوشتار حاضر، جهت بررسی کارآمدی روش های خطی سازی معادل، نتایج حاصل از روش های مذکور با متوسط طیف پاسخ حاصل از تحلیل های تاریخچه ی

## پانویس ها

1. Fokker-Planck-Kolmogorov equation
2. stochastic averaging
3. perturbation method
4. moment closure
5. dissipation energy balancing method
6. equivalent non-linearization method
7. equivalent linearization method (ELM)
8. Gaussian distribution
9. Zhao & Huang
10. Spanos & Giaralis
11. Caughey
12. Asano & Iwan
13. Spanos
14. trust region dogleg

## منابع (References)

5. JSCE (Japan Society of Civil Engineers), "Earthquake resistant design codes in Japan" (2000).
6. BHRC, "Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings", Standard No. 2800, Road, Housing, and Urban Development Research Center, Tehran, Iran (2014).
7. Somerville, P.G. "Engineering characterization of near fault ground motions", Proc. NZSEE 2005 Conf. (2005).
8. Alavi, B. and Krawinkler, H. "Effects of near-fault ground motions on frame structures", John A. Blume Earthquake Engineering Center Stanford (2001).
9. Luco, N. "Probabilistic seismic demand analysis, SMRF connection fractures and near-source effects", PhD. Thesis, Stanford University (2003).
10. Chioccarelli, E. and Iervolino, I. "Near-source seismic demand and pulse-like records: A discussion for L'Aquila earthquake", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **39**(9), pp. 1039-1062 (2010).
11. Zamora, M. and Riddell, R. "Elastic and inelastic response spectra considering near-fault effects", *J. Earthq. Eng.*, **15**(5), pp. 775-808 (2011).
12. Mazza, F. and Vulcano, A. "Effects of near-fault ground motions on the nonlinear dynamic response of base-isolated rc framed buildings", *Earthq. Eng. & Struct. Dyn.*, **41**(2), pp. 211-232 (2012).
13. Yazdani, A. and Yazdannejad, K. "Estimation of the seismic demand model for different damage levels", *Earthquakes Struct.*, **194**, pp. 183-195 (2019).
14. Baghaei Lake, E., Homami, P. and MeshkatDini, A. "Evaluation of robustness component of seismic resilience in low-and mid-rise braced frame structures in
1. Kalkan, E. and Kunnath, S.K. "Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings", *Wellington, New Zeal. Stand. New Zeal.*, **22**(2), pp. 367-390 (2006).
2. Standard, N.Z. "NZS 1170.5: 2004, Structural design actions part 5: Earthquake actions-New Zealand", Wellington, New Zeal. Stand. New Zeal (2004).
3. Code, U.B. "Structural engineering design provisions", Int. Conf. Build. Off (1997).
4. Construction, R.O.C. "Planning agency (2005) seismic design code for buildings in Taiwan", ROC Minist. Inter. (n.d.).

- the near-field site”, *Sharif J. Civ. Eng.*, **37**(2.2), pp. 159-171 (2021).
15. Cuesta, I. and Aschheim, M.A. “Inelastic response spectra using conventional and pulse R-factors”, *J. Struct. Eng.*, **127**(9), pp. 1013-1020 (2001).
  16. Elnashai, A.S. and Mwafy, A.M. “Overstrength and force reduction factors of multistorey reinforced-concrete buildings”, *Struct. Des. tall Build.*, **11**(5), pp. 329-351 (2002).
  17. Chopra, A.K. and Chintanapakdee, C. “Inelastic deformation ratios for design and evaluation of structures: single-degree-of-freedom bilinear systems”, *J. Struct. Eng.*, **130**(9), pp. 1309-1319 (2004).
  18. Giaralis, A. and Spanos, P.D. “Wavelet-based response spectrum compatible synthesis of accelerograms? Eurocode application (EC8)”, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, **29**(1), pp. 219-235 (2009).
  19. Fujimura, K. and Der Kiureghian, A. “Tail-equivalent linearization method for nonlinear random vibration”, *Probabilistic Eng. Mech.*, **22**(1), pp. 63-76 (2007).
  20. Yazdani, A. and Salimi, M.R. “Earthquake response spectra estimation of bilinear hysteretic systems using random-vibration theory method”, *Earthquakes Struct.*, **8**(5), pp. 1055-1067 (2015).
  21. Roberts, J.B. and Spanos, P.D. “Random vibration and statistical linearization”, Courier Corporation (2003).
  22. Crandall, S.H. “On using non-Gaussian distributions to perform statistical linearization”, *Int. J. Non. Linear. Mech.*, **39**(9), pp. 1395-1406 (2004).
  23. Anh, N.D., Hieu, N.N. and Linh, N.N. “A dual criterion of equivalent linearization method for nonlinear systems subjected to random excitation”, *Acta Mech.*, **223**(3), pp. 645-654 (2012).
  24. Weiqiu, Z. and Guoqiang, C. “Nonlinear stochastic dynamics: A survey of recent developments”, *Acta Mech. Sin.*, **18**(6), pp. 551-566 (2002).
  25. Salimi, M.-R. and Yazdani, A. “Reliability-based fragility analysis of nonlinear structures under the actions of random earthquake loads”, *Struct. Eng. Mech.*, **66**(1), pp. 75-84 (2018).
  26. Su, C., Huang, H. and Ma, H. “Fast equivalent linearization method for nonlinear structures under non-stationary random excitations”, *J. Eng. Mech.*, **142**(8), pp. 4016049 (2016).
  27. Zhao, N. and Huang, G. “Efficient nonstationary stochastic response analysis for linear and nonlinear structures by FFT”, *J. Eng. Mech.*, **145**(5), pp. 4019023 (2019).
  28. Spanos, P.D. and Giaralis, A. “Statistical linearization based estimation of the peak response of nonlinear systems subject to the EC8 design spectrum”, *AIP Conf. Proc.*, pp. 1236-1244 (2008).
  29. Giaralis, A. and Spanos, P.D. “Effective linear damping and stiffness coefficients of nonlinear systems for design spectrum based analysis”, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, **30**(9), pp. 798-810 (2010).
  30. Spanos, P.D. and Giaralis, A. “Third-order statistical linearization-based approach to derive equivalent linear properties of bilinear hysteretic systems for seismic response spectrum analysis”, *Struct. Saf.*, **44**, pp. 59-69 (2013).
  31. Giaralis, A. and Spanos, P.D. “Derivation of equivalent linear properties of Bouc-Wen hysteretic systems for seismic response spectrum analysis via statistical linearization”, 10<sup>th</sup> HSTAM International Congress on Mechanics, Chania, Greece (2013).
  32. Mitseas, I.P., Kougioumtzoglou, I.A., Giaralis, A. and et al. “A novel stochastic linearization framework for seismic demand estimation of hysteretic MDOF systems subject to linear response spectra”, *Struct. Saf.*, **72**, pp. 84-98 (2018).
  33. Caughey, T. K., “Random excitation of a system with bilinear hysteresis”, *J. Appl. Mech. Dec.*, **27**(4), pp. 649-652 (1960).
  34. Asano, K. and Iwan, W.D. “An alternative approach to the random response of bilinear hysteretic systems”, *Earthq. Eng & Struct. Dyn.*, **12**(2), pp. 229-236 (1984).
  35. Nocedal, J. and Wright, S. “Numerical Optimization”, Springer Science & Business Media (2006).
  36. Vanmarcke, E.H. “Chapter 8: Structural response to earthquakes”, *Developments in Geotechnical Engineering*, **15**, pp. 287-335 (1976).
  37. Michaelov, G., Lutes, L.D. and Sarkani, S. “Extreme value of response to nonstationary excitation”, *J. Eng. Mech.*, **127**(4), pp. 352-363 (2001).
  38. Corotis, R.B., Vanmarcke, E.H. and Cornell, A.C. “First passage of nonstationary random processes”, *J. Eng. Mech. Div.*, **98**(2), pp. 401-414 (1972).
  39. Giaralis, A. and Spanos, P.D. “Derivation of response spectrum compatible non-stationary stochastic processes relying on Monte Carlo-based peak factor estimation”, *Earthquakes Struct.*, **3**(3), pp. 581-609 (2012).
  40. Cacciola, P., Colajanni, P. and Muscolino, G. “Combination of modal responses consistent with seismic input representation”, *J. Struct. Eng.*, **130**(1), pp. 47-55 (2004).
  41. Gasparini, D.A. “Simulated earthquake motions compatible with prescribed response spectra”, *MIT Dep. Civ. Eng. Res. Rep.*, (1976).
  42. Seismo Artif, [https:// seismosoft.com/ products/ seismoartif/](https://seismosoft.com/products/seismoartif/). (2021)