

کاربرد شتابنگاشت‌های مصنوعی در برآورد تقاضای لرزه‌ای سیستم‌های یک درجه آزاد: از ارزیابی تا تصحیح روابط پیشنهادی آیین نامه‌های لرزه‌ای

فرشاد همائی^{۱*}، محسن بهرام‌جردی^۲

* ۱. ستادیار، گروه مهندسی زلزله و ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران و نقشه‌برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی زلزله و ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران و نقشه‌برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته

f.homaei@kgut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۸/۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۳/۲۲

چکیده

در این مقاله، به بررسی کاربرد شتابنگاشت‌های مصنوعی در برآورد تقاضای سیستم‌های تک درجه آزاد و ارزیابی دقت روابط تجربی ارائه شده در استاندارد ۲۸۰۰ ایران- ویرایش چهارم و نشریه ۳۶۰، به منظور تخمین بیشینه تقاضا در سازه، پرداخته شده است. در این راستا، سیستم‌های یک درجه آزاد با رفتار غیرخطی الاستیک- پلاستیک مطلق و با زمان تناوب ۰/۱ تا ۲/۰ ثانیه و ضریب کاهش مقاومت بین ۲ تا ۸، به عنوان سیستم سازه‌ای در نظر گرفته می‌شوند. سیستم‌های یک درجه آزاد تحت شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی که براساس توابع پوش مختلفی مانند: مرکب، نمایی و ساراگونی- هارت تولید شده، مورد تحلیل تاریخچه زمانی قرار می‌گیرند و نتایج حاصل از انجام تحلیل تاریخچه زمانی با روابط تخمینی ارائه شده در استاندارد ۲۸۰۰ ایران- ویرایش چهارم و نشریه ۳۶۰، مقایسه می‌شوند. بر اساس نتایج به دست آمده، مشاهده می‌شود که روابط هر دو آیین‌نامه در $R_{\mu}=2$ به درستی عمل نموده ولی برای R_{μ} های بالاتر دست پایین عمل می‌کند و دارای دقت کمتری است. به همین منظور در ادامه مقاله روشی برای اصلاح روابط آیین‌نامه برای برآورد بهتر سطح تقاضا لرزه‌ای سازه ارائه شده است.

واژگان کلیدی: شتاب‌نگاشت مصنوعی، تابع پوش، تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی، برآورد تقاضا، سیستم یک درجه آزاد

مقدمه

طراحی سازه‌های متداول طراحی سازه‌ها در برابر زلزله، بسیاری از سازه‌های مهم و حیاتی مانند سدها، پل‌های معلق، سازه‌های بلند و نیز ارزیابی آسیب‌پذیری و مقاوم‌سازی سازه‌های متداول، نیاز به استفاده از تحلیل‌های دقیق‌تر مانند تحلیل استاتیکی غیرخطی و یا تحلیل تاریخچه زمانی است.

به طور کلی، در روش‌های متداول طراحی سازه‌ها در برابر زلزله، آثار نیروی زلزله روی سازه با استفاده از روش‌های طیفی و یا استاتیکی معادل محاسبه می‌شود. روش‌های تحلیل طیفی و استاتیکی معادل به دلیل سادگی و توجه ویژه‌ای که آیین‌نامه‌ها در تهیه طیف طراحی داشته‌اند، در بیشتر تحلیل‌های خطی برای

زلزله را با استفاده از ترکیب امواج با دامنه‌های نایب‌سازه‌سازی نمودند. همچنین بایکرافت [5] شتاب زمین را با استفاده از الگوهای نویز سفید مدل‌سازی نمود. آنچه از مطالعات فوق می‌توان برداشت نمود این است که بیشتر روش‌ها سعی داشتند حرکات زلزله را به صورت یکسری از پالس‌های تصادفی که نسبت به زمان به‌طور تصادفی دریافت می‌شود، مدل‌سازی نمایند. چنینگزر و هاووزنر [6] در پژوهشی انواع مختلف زلزله‌ها را با ویژگی‌های متفاوت شبیه‌سازی نمودند. آن‌ها از یک فرآیند نایب‌سازه که در اثر ضرب نویز سفید فیلتر شده در یک تابع پوش حاصل شده، استفاده کردند. آن‌ها در نهایت فرآیند حاصل را از یک فیلتر و به منظور کم کردن فرکانس‌های پایین فرآیند، مطابق با رکوردهای مشاهده‌شده، عبور دادند.

تریگلو ماریو [7] اقدام به مقایسه پاسخ‌های دینامیکی خطی و غیرخطی دو مدل سه‌بعدی و پنج طبقه بتن آرمه، تحت دو نوع شتاب‌نگاشت طبیعی و مصنوعی پرداختند. طبق پاسخ‌های لرزه‌ای به‌دست‌آمده تحت تحلیل خطی مشاهده شد که در زلزله‌های با بیشترین و کمترین بزرگی، اختلاف در مقادیر پاسخ سازه‌ای بین دو نوع شتاب‌نگاشت به بیشترین حد می‌رسد و همچنین در تحلیل غیرخطی مشاهده شد که به دلیل اختلاف در محتوای فرکانسی دو نوع شتاب‌نگاشت، اختلاف زیادی در تعداد مفاصل پلاستیک تشکیل‌شده در سازه تحت دو نوع شتاب‌نگاشت وجود دارد. قدرتی و اشتري [8] از روش تبدیل موجک برای تولید شتاب‌نگاشت زلزله استفاده کردند. همچنین، قدرتی و باقری [9] با استفاده از الگوی تاجمی-کانای و تحلیل موجک، روشی را برای تولید شتاب‌نگاشت زلزله مصنوعی ارائه کردند. طبق بررسی‌های صورت گرفته، آن‌های دریافتند که طیف پاسخ شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی با این روش، نزدیک به زمین لرزه‌های واقعی است. هاشمی و همکاران [10] در مقاله‌ای به پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها تحت شتاب‌نگاشت‌های یکسان برطیف پاسخ (سه مدل ایستا، غیرایستا و غیرایستا) پرداختند. نتایج آن‌ها بیانگر این بود که مدل‌های مختلف حرکت زمینی با وجود ویژگی‌های مشترک، می‌تواند منجر به اختلافات قابل توجهی در پاسخ‌های سازه‌ای حتی برای سازه‌های متناسب با رفتار خطی

در تحلیل استاتیکی غیرخطی، مدل غیرخطی سازه تحت اثر الگوی بار مشخص تا رسیدن به تغییر مکان هدف پوش داده می‌شود و وضعیت عملکرد المان‌های سازه‌ای در نقطه جابه‌جایی هدف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در واقع تغییر مکان هدف، وضعیت تقاضای جابه‌جایی در سازه را تحت اثر نیروهای ناشی از زلزله محتمل در محل احداث سازه را به دست می‌دهد که بیشتر بر اساس نتایج حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی سازه برآورد می‌شود. در تحلیل تاریخچه زمانی، لازم است تا از شتاب‌نگاشت‌های زلزله‌ای که بیانگر ویژگی‌های لرزه‌خیزی منطقه موردنظر است، استفاده شود. در این راستا، برای نواحی خاصی که شتاب‌نگاشت‌های ثبت‌شده به تعداد کافی وجود ندارد، لازم است تا به طرق دیگر، رکوردهای مناسب برای انجام تحلیل تاریخچه زمانی تأمین شود. در این راستا می‌توان از شتاب‌نگاشت زلزله‌های مصنوعی استفاده کرد.

برای تولید شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی، مدل‌های بسیاری توسط پژوهشگران مختلف ارائه شده است. به طور کلی، دو گروه عمده این مدل‌ها شامل مدل‌های ژئوفیزیکی و مدل‌های تصادفی است [1]. مدل‌های ژئوفیزیکی بر اساس داده‌های لرزه‌خیزی برای هر منطقه مشخص، شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی ایجاد می‌نمایند که از بهترین مدل‌ها هستند، ولی اصول تئوریک آن‌ها توسعه لازم را نیافته است. امروزه مدل‌های تصادفی که بر اساس تئوری ارتعاشات تصادفی است کاربرد بیشتری پیدا کرده‌اند. مهم‌ترین این الگوها شامل الگوی نوفه سفید، الگوهای ایستا، الگوهای نایب‌سازه در دامنه، الگوهای نایب‌سازه در دامنه و فرکانس، همراه با الگوهای ایستای اصلاح شده است [2].

از پیشگامان اصلی در علم شبیه‌سازی زلزله می‌توان به هاووزنر [3] اشاره کرد که نشان داد بسیاری از شتاب‌نگاشت‌های زمین را می‌توان به صورت فرآیندهایی تصادفی گذرا و به صورت ترکیبی از موج‌های سینوسی که به فرم تصادفی نسبت به زمان دریافت می‌شوند، در نظر گرفت. وی ویژگی‌های تصادفی فرآیند را با مقایسه طیف میانگین محاسبه‌شده با طیف زلزله‌های طبیعی تخمین زد. بوگدانف و همکاران [4] پژوهشی تحت عنوان پاسخ سازه‌ها به حرکات تصادفی زلزله را ارائه دادند. در این مقاله آن‌ها

شود گرچه همه مدل‌ها از معیار یکسانی بر طیف پاسخ ارائه شده توسط آیین‌نامه‌های لرزه‌ای برای شبیه‌سازی برخوردار بودند، اما اختلاف به میزان زیادتر بود. جین تینگ وانگ و همکاران [11] پاسخ‌های دینامیکی و آسیب یک سد قوسی تحت شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی در جنوب غربی چین را بررسی نمودند. آن‌ها یافتند که پاسخ لرزه‌ای و آسیب به یک سد ممکن است به طور قابل توجهی تحت شتاب‌نگاشت‌های مختلف پراکنده شود، حتی اگر شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی دارای طیف پاسخ یکسان، شتاب حداکثر، سرعت و جابه‌جایی مشابه داشته باشند.

همان‌گونه که در مطالعات فوق مشاهده می‌شود در بیشتر روش‌های تولید شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی، از طیف طرح ارتجاعی منطقه موردنظر برای تولید شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی استفاده شده است. اما بیشتر این طیف، نمی‌تواند بیانگر رفتار دقیق غیرخطی سازه باشد. از این رو لازم است تا به شکلی اثر این پارامترهای غیرخطی در تولید شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی اعمال نمود. این امر به کمک انواع مختلف تابع پوش مانند مرکب، نمایی و ساراگونی هارت برای یک سیستم یک درجه آزادی محقق می‌شود که در بخشی از این مقاله به ارزیابی دقت هر کدام پرداخته شده است.

از طرف دیگر، امروزه سعی شده است تا به جای انجام تحلیل‌های پرهزینه دینامیکی غیرخطی، با استفاده از روش‌های ساده‌تر و سریع‌تر، اقدام به ارزیابی و برآورد تقاضای لرزه‌ای سازه‌ها شود. به عنوان نمونه، در روش تحلیل استاتیکی غیرخطی، برآوردی از سطح تقاضای جابه‌جایی سازه توسط روابط تجربی ارائه شده و سپس اقدام به ارزیابی سازه می‌شود. با این حال، بر روی دقت روابط ارائه شده و بهبود آن‌ها، همچنان مطالعه می‌شود. قدرتی امیری و عمیدی [12] آثار ناشی از کاهش سختی و مقاومت در روش ضرایب تغییر مکان موجود در نشریه FEMA356 را مورد ارزیابی قرار دادند. با مطالعات انجام شده برای قاب‌های خمشی بتنی با دیوار برشی و مقایسه نتایج به دست آمده با تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی تاریخیچه زمانی مشخص شده که آثار کاهش سختی و مقاومت در روش FEMA356 محافظه‌کارانه بوده است که می‌توان با دقت مناسبی

مقادیر واقعی‌تر را برای شرایط مختلف ساختگاه و سازه پیشنهاد نمود. صدری و همکاران [13] به کاهش تقاضای لرزه‌ای قاب‌های فولادی بلندمرتبه با تغییر نوع مهاربندی همگرا در ارتفاع سازه پرداختند. آن‌ها از قاب‌های خمشی بلند مرتبه ۲۰ و ۲۵ طبقه برای انجام تحلیل تاریخیچه زمانی استفاده کردند. علاوه بر این در تغییرات مهاربندی‌ها، مهارهای هم‌محور ضربدری و شورون را مورد بررسی قرار دادند. در انتها مشخص شد که تغییر در نوع سیستم مهاربندی در تراز مشخصی از ارتفاع می‌تواند در بهبود رفتار لرزه‌ای سازه‌ها تحت زلزله مؤثر باشد. همچنین مشاهده شد که در قاب‌های مورد استفاده، حداکثر بیشینه نیاز تغییر مکان نسبی حدود ۷۵٪ کاهش را نشان می‌دهد. پارسائیان و همکاران [14] مطالعات آماری روی نسبت تغییر شکل غیرالاستیک به الاستیک در روش ضرایب تغییر مکان دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود (نشریه ۳۶۰) تحت سازه‌های با ساختگاه خاک سخت و زلزله‌های دور از گسل انجام داده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که این نسبت در نشریه ۳۶۰ نیازمند تجدیدنظر و اصلاح است. محسنیان و همکاران [15] به پیش‌بینی تقاضای لرزه‌ای چند سطحی برای اجزای غیر سازه‌ای حساس به شتاب پرداختند. آن‌ها یک روش چند سطحی جدید برای پیش‌بینی تقاضای لرزه‌ای اجزای غیر سازه‌ای حساس به شتاب با استفاده از دو پارامتر لرزه‌خیزی ساختگاه و ظرفیت لرزه‌ای سیستم باربر جانبی پیشنهاد نمودند. همچنین آن‌ها کارایی روش پیشنهادی را در مقایسه با روش‌های طراحی لرزه‌ای معمولی بررسی کردند. نتایج آن‌ها بیانگر این بود که استانداردهای فعلی ممکن است پیش‌بینی‌های نادرستی ارائه دهد و منجر به راه‌حل‌های طراحی نایمینی برای اجزای غیر سازه‌ای حساس به شتاب به ویژه در مورد شدت لرزه بیشتر شود.

در سال ۲۰۲۱ فرانسیسکو و همکاران [16] به بررسی تقاضای لرزه‌ای جابه‌جایی پسماند پل‌های تک ستونه بتنی با المان‌های فایبر پرداختند. آن‌ها تأثیر دو روش مدل‌سازی با تئوری پلاستیسیته گسترده و تئوری پلاستیسیته متمرکز در محل مفاصل در طول المان تیر-ستون برای پایه پل در تخمین جابه‌جایی پسماند تحت زلزله‌های نزدیک گسل را ارزیابی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که برای تخمین جابه‌جایی پسماند مدل تئوری

سازه‌هایی، می‌توان آن‌ها را با سیستم یک درجه آزاد، معادل سازی نمود.

برای یک سیستم تک درجه آزاد معادل با جرم مؤثر m ضریب سختی K و ضریب میرایی C ، مشخصه‌های دینامیکی سیستم شامل نسبت میرایی (ξ) و دوره تناوب مود ارتعاشی (T_n) در روابط زیر توصیف می‌شود:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\kappa}{m}} \quad (4)$$

$$I_n = \frac{1}{\omega_n} \quad (5)$$

$$\xi = \frac{C}{2m\omega_n} \quad (6)$$

در **Error! Reference source not found.** نمای یک

سیستم یک درجه آزاد تحت تأثیر یک نیروی خارجی ناشی از زلزله با شتاب $\ddot{u}_g$ نمایش داده شده است. در این مدل، معادله

$$m\ddot{u} + C\dot{u} + \kappa u = -m\ddot{u}_g \quad (7)$$

برای سازه تحت تحریکات شدید زلزله، انتظار رفتار غیرخطی وجود دارد. از این رو در معادله (۷) برای محاسبه نیروی مقاوم در

$$m\ddot{u} + C\dot{u} + F(u) = -m\ddot{u}_g \quad (8)$$

در این رابطه، $F(u)$ پارامتر مقاومت غیرخطی در برابر بار وارده است. برای این پارامتر، مدل‌های رفتار مختلفی پیشنهاد شده است که از بین آن‌ها، در این مقاله از مدل رفتاری الاستیک-پلاستیک مطلق استفاده شده است (

$$F_y = \frac{F_y}{R_\mu} \quad (9)$$

در این رابطه، S_a شتاب طیفی (با میرایی ۵٪) متناظر با مود غالب سیستم و R_μ ضریب کاهش مقاومت است که به صورت نسبت تقاضای مقاومت الاستیک (F_{el}) به مقاومت حد تسلیم (F_y) تعریف می‌شود:

$$K_\mu = \frac{F_y}{F_y} \quad (10)$$

پلاستیسیته گسترده دقت مناسبی دارد و همچنین مدل رفتاری بتن و پارامترهای مدل‌سازی المان فایبر تأثیر زیادی در تخمین جابه‌جایی پسماند دارد. با توجه به اینکه میزان دقت روابط پیش‌بینی تقاضا در سازه‌ها بر مبنای رکوردهای زلزله مصنوعی ارزیابی نشده است، در این مقاله سعی شده تا با استفاده از نتایج حاصل‌شده از تحلیل تاریخیچه زمانی تحت شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی که توسط انواع مختلف تابع پوش تولید شده‌اند، اقدام به ارزیابی روش‌های ارائه شده در استاندارد ۲۸۰۰-ویرایش چهارم [17] و نشریه ۳۶۰ [18] ایران شود و در صورت لزوم، روابط اصلاحی برای برآورد مناسب تقاضای لرزه‌ای سازه‌ها تحت این رکوردها پیشنهاد شود.

سیستم یک درجه آزاد مورد مطالعه

مدل‌های مورد مطالعه در این مقاله، سیستم‌های یک درجه آزاد معادلی هستند که به عنوان مدل معادلی برای سازه‌های چند درجه آزاد در نظر گرفته شده‌اند. اگرچه سازه‌های چند درجه آزاد مانند سیستم‌های تک درجه آزاد رفتار نمی‌کنند، اما می‌توان برای سیستم‌هایی که در آن‌ها ارتفاع به ۵۰ متر محدود شده و مود غالب بیشتر در مود اول است، معادل سازی فوق را برای برآورد تقاضا صورت داد [17, 19]. لازم به ذکر است که در استاندارد ۲۸۰۰ ایران- ویرایش چهارم [17]، روابط تجربی برای برآورد زمان تناوب مود غالب سیستم‌های چند درجه آزاد ارائه شده است:

$$T_n = 0.05H^{0.7} \quad (1) \text{ قاب خمشی بتن آرمه}$$

$$T_n = 0.08H^{0.75} \quad (2) \text{ قاب خمشی فولادی}$$

$$T_n = 0.05H^{0.75} \quad (3) \text{ سایر سیستم‌ها}$$

که در این روابط، H ارتفاع کل سازه از تراز پایه است. بر اساس روابط فوق مشاهده می‌شود که برای سیستم‌های باربر جانبی ذکر شده با تعداد طبقات بین ۵ تا ۱۵ طبقه (ارتفاع کل ۱۵ الی ۵۰ متر)، زمان تناوب اصلی سازه بین ۰/۴ ثانیه (حداقل) تا ۱/۶ ثانیه (حداکثر) متغیر است که با توجه به ضوابط استاندارد ۲۸۰۰- ویرایش چهارم (در صورت عدم وجود نامنظمی شدید در سازه)، برای برآورد پارامترهای مورد نیاز برای طراحی لرزه‌ای چنین

مصنوعی از طریق فرآیند تصادفی و با استفاده از یک شکل پوش که از ویژگی‌ها و مشخصات ظاهری شتابنگاشت پیروی می‌کند، تولید می‌شود. در واقع برای اینکه شدت حرکت تولید شده متناسب با شدت حرکت واقعی شود نیاز به اصلاح است که در این مورد، تابع پوش نقش اصلاح کننده را برعهده دارد. در این رویکرد، تطبیق محتوای فرکانسی رکوردهای زلزله با استفاده از تبدیل فوریه تعریف می‌شود، به این صورت که در هر تکرار، یک تبدیل فوریه برای حرکت از حوزه زمان به حوزه فرکانس اعمال شده و در این مرحله، اصلاح شتابنگاشت انجام می‌شود. سپس برای بازگشت به حوزه زمان، یک تبدیل فوریه معکوس اعمال می‌شود و طیف مربوطه محاسبه و در نهایت همگرایی بررسی می‌شود که آیا اصلاح بیشتری لازم است یا خیر. فرآیند اصلاح مجدد در صورت همگرا نبودن طیف پاسخ شتابنگاشت‌ها با طیف هدف به صورت اصلاح حداکثر شتاب و اصلاح خط مبنا است. این مراحل تا رسیدن به یک همگرایی مناسب ادامه پیدا می‌کند. لازم به ذکر است که برای هر مدل خاک، طیف‌های هدف مورد استفاده براساس ضوابط استاندارد ۲۸۰۰-ویرایش چهارم ارائه شده است.

در این مقاله، به تعداد ۲۴ شتابنگاشت مصنوعی متناسب با تیپ بندی خاک (جدول ۱) ارائه شده در استاندارد ۲۸۰۰ ایران-ویرایش چهارم [17] تولید شد. لازم به ذکر است که از تولید شتابنگاشت مصنوعی متناسب با خاک نوع IV به دلیل "مسئله دار بودن" و نیازمند تقویت، صرف نظر شده است. علاوه بر این، در تولید شتابنگاشت‌های مصنوعی، از توابع پوش مرکب، نمایی و ساراگونی هارت استفاده شد و مشخصات شتابنگاشت‌های تولید شده در هر تیپ خاک بدست آورد شد

Soil grouping according to standard 2800 Table 1.)
- 4th edition

جدول (۲).

جدول ۱. گروه‌بندی انواع خاک بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ ایران-ویرایش چهارم [۱۷]

در این پژوهش، مقادیر ۲، ۴، ۶ و ۸ برای R_μ در نظر گرفته شده است که نماینده دامنه وسیعی از سیستم‌های باربر جانبی در آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای است [17, 19].

شکل ۱. شمای مدل یک درجه آزاد

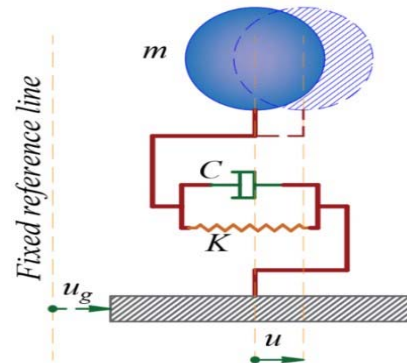


Fig. 1. Schematic of the SDOF system

شکل ۲. مدل رفتاری الاستیک-پلاستیک مطلق

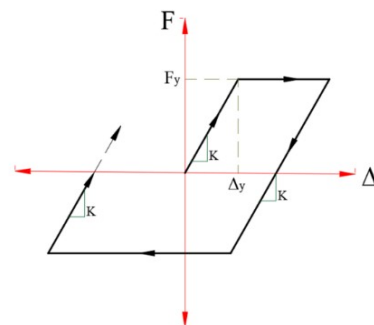


Fig. 2. Elastic-Perfectly Plastic model

تولید شتابنگاشت مصنوعی

برای تولید شتابنگاشت‌های مصنوعی، روش‌های بسیار متفاوتی توسط پژوهشگران مختلف ارائه شده است، [20-25]. در میان این روش‌ها، روش گاسپارینی و ونمارک [20] در پژوهش‌های امروزه مورد توجه قرار گرفته شده است؛ زیرا این روش بسیار کارآمد بوده و در بسیاری از نرم افزارهای مربوطه از جمله SeismoArtif قابل استفاده است. در این روش، هر شتابنگاشت

آزاد است، C_1 ضریب تصحیح برای اعمال تغییر مکان‌های غیر ارتجاعی سیستم، ضریب C_2 نیز ضریب تصحیح به منظور اعمال آثار کاهش سختی و مقاومت اعضای سازه‌ای بر تغییر مکان‌ها به دلیل رفتار غیرارتجاعی آن‌ها است. همچنین، S_a ضریب شتاب طیفی می‌باشد که برابر است با:

$$S_a = A.B \quad (13)$$

که در آن، A نسبت شتاب مبنای طرح در منطقه با خطر نسبی خیلی زیاد ($A=0.35g$) و B ضریب بازتاب سازه بوده که متناسب با نوع خاک و زمان تناوب سازه از روابط ارائه شده در استاندارد ۲۸۰۰-ویرایش چهارم بدست می‌آید. همچنین T_e زمان تناوب اصلی مؤثر ساختمان است. با توجه به اینکه در این مقاله، مدل‌های سازه‌ای مورد استفاده از نوع تک درجه آزادی با رفتار الاستیک-پلاستیک مطلق است، ضرایب C_0 و C_2 هر دو برابر $1/0$ لحاظ می‌شوند. از طرف دیگر، برای ضریب C_1 در هریک از کدهای لرزه‌ای ذکر شده، مقادیر متفاوتی ارائه شده است. در

نشریه ۳۶۰ ایران، ضریب C_1 به صورت زیر معرفی شده است:

$$\begin{cases} C_1 = 1 + \frac{0.45}{aT_e^2} & 0.2s < T_e \leq 1.0s \\ C_1 = 1 & 1.0s < T_e \end{cases} \quad (14)$$

که در آن، a ضریبی وابسته به نوع خاک است و R_u تعریفی مشابه R_u دارد. از طرف دیگر، ضریب C_1 در استاندارد ۲۸۰۰-

ویرایش چهارم به صورت زیر معرفی شده است:

$$\begin{cases} C_1 = \frac{R_u}{T_e} & T_e < T_s \\ C_1 = 1 & T_e \geq T_s \end{cases} \quad (15)$$

در این رابطه، T_s پارامتری است وابسته به نوع خاک و سطح خطر لرزه‌ای منطقه. در نتیجه، برای یک سیستم یک درجه آزاد، فرم کلی رابطه تغییر مکان هدف (بر اساس روابط (۱۱) و (۱۲) به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\delta_i = C_1 S_a \frac{\gamma}{4\pi^2} g \quad (16)$$

Type	Description	V_{s30} (m/s)
I	Rock or rock	>750
II	Very dense sand or gravel or very stiff clay	375-750
III	Dense or medium dense sand, gravel or stiff clay	175-375
IV	Loose to medium cohesionless soil or soft to firm cohesive soil	<175

Table 1. Soil grouping according to standard 2800 – 4th edition

جدول ۲. مشخصات شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی تولید شده

Type	Envelope Function	PGA (cm/s^2)	Arias Intensity (cm/s^2)	Duration (s)
I	Exponential	0.357	1.98	22.334
	Compound	0.357	2.02	13.821
	Saragoni-Hart	0.342	2.969	23.879
II	Exponential	0.367	2.29	22.778
	Compound	0.387	2.48	18.383
	Saragoni-Hart	0.366	3.669	25.943
III	Exponential	0.438	3.585	29.738
	Compound	0.451	3.689	20.733
	Saragoni-Hart	0.425	5.02	27.638

Table 2. Specifications of the artificially generated accelerograms

روش تحلیل و ارزیابی

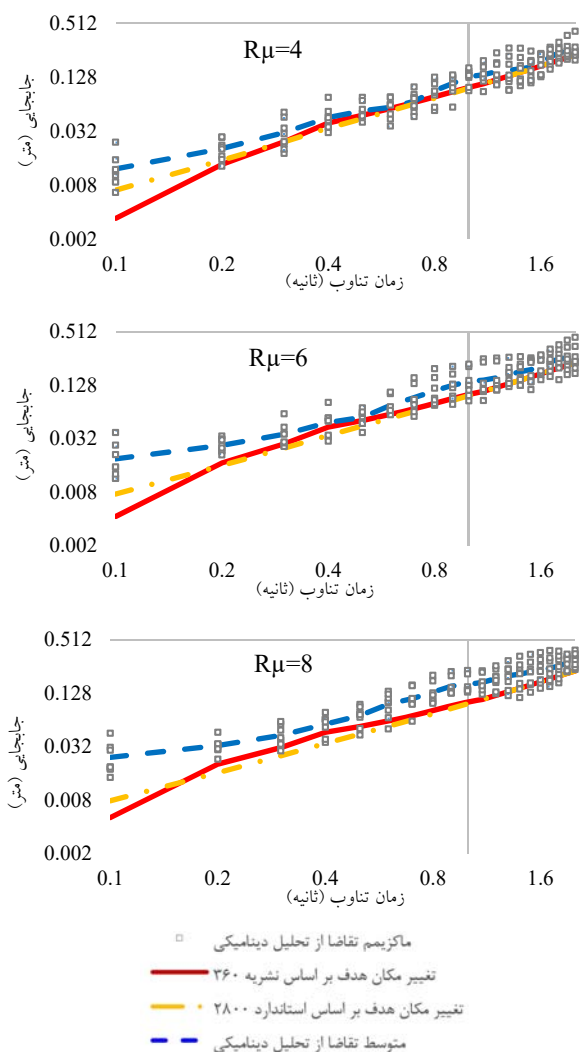
در این مقاله، تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه زمانی با استفاده از رکوردهای مصنوعی تولید شده روی سیستم‌های تک درجه آزاد و در محیط نرم افزار Open Sees صورت پذیرفت. سپس میانگین حداکثر تقاضای جابه‌جایی سیستم استخراج و با مقادیر به دست آمده از روابط پیشنهاد شده در نشریه ۳۶۰ و استاندارد

۲۸۰۰ ایران-ویرایش چهارم، مورد مقایسه قرار گرفت:

$$\delta_i = C_0 C_1 C_2 S_a \frac{\gamma}{4\pi^2} g \quad (11) \text{ نشریه ۳۶۰}$$

$$\delta_i = C_1 S_a \frac{\gamma}{4\pi^2} g \quad (12) \text{ استاندارد ۲۸۰۰-ویرایش چهارم}$$

در این روابط، C_0 ضریب اصلاح برای ارتباط تغییر مکان طیفی سیستم یک درجه آزادی به تغییر مکان بام سیستم چند درجه



The comparison between the displacement demand from **Fig. 4**. dynamic analysis under artificial records those obtained from the code 360 and Standard 2800 - soil type I, Compound envelope function

به این صورت که در کلیه تیپ‌های خاک، برای $R_\mu=2$ ، کمترین اختلاف بین نتایج حاصل از تحلیل و آیین‌نامه‌ها وجود دارد و با افزایش R_μ ، این اختلاف افزایش می‌یابد. به عنوان نمونه، برای خاک نوع I در بازه زمان تناوب ۰/۱ تا ۲ ثانیه، بطور متوسط روابط نشریه ۳۶۰ بین ۱ تا ۵٪ دست پایین و روابط استاندارد ۲۸۰۰-ویرایش چهارم بین ۱ تا ۳٪ دست بالا عمل نموده‌اند، که در این میان تابع پوش نمایی کمترین و تابع پوش ساراگونی-هارت بیشترین اختلاف را به خود اختصاص داده است.

شکل ۴. مقایسه تقاضای جابه‌جایی حاصل از تحلیل دینامیکی تحت رکوردهای مصنوعی با روابط ارائه شده در نشریه ۳۶۰ و استاندارد ۲۸۰۰-ویرایش چهارم - خاک نوع I، تابع پوش نمایی

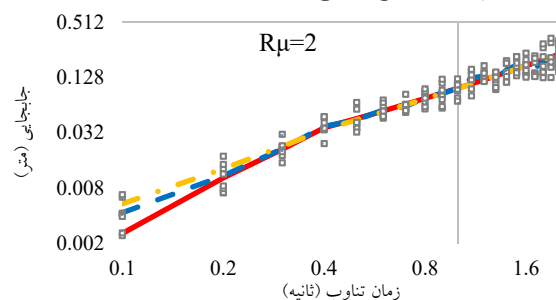
لازم به ذکر است که، عمده اختلاف بین تغییر مکان هدف بر اساس نشریه ۳۶۰ و استاندارد ۲۸۰۰-ویرایش چهارم (با در نظر گرفتن خطر نسبی خیلی زیاد و شتاب طرح ۰/۳۵g)، برای زمان تناوب‌های کمتر از ۱/۰ ثانیه است که در آن، بسته به میزان R_μ ، سطح تقاضای برآورد شده از رابطه استاندارد ۲۸۰۰-ویرایش چهارم به بیش از ۳ برابر مقدار به دست آمده از رابطه نشریه ۳۶۰ می‌رسد.

نتایج

در این بخش مقادیر میانگین جابه‌جایی سیستم‌های یک درجه آزاد با مقادیر تغییر مکان هدف موجود در نشریه ۳۶۰ و استاندارد ۲۸۰۰-ویرایش چهارم، تحت شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی تولیدشده، به ازای ضرایب کاهش مقاومت مختلف، مورد مقایسه قرار گرفتند که نتایج به دست آمده، در شکل ۳ تا شکل ۵) برای خاک نوع I و در شکل ۶ تا ۹) برای خاک نوع II و در شکل ۹ تا ۱۲) برای خاک نوع III برای هر نوع تابع پوش مورد استفاده در تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی، نشان داده شده است.

با توجه به نتایج بدست آمده، مشاهده می‌شود که روابط ارائه شده در نشریه ۳۶۰ و استاندارد ۲۸۰۰-ویرایش چهارم برای تخمین تغییر مکان هدف در سیستم‌های یک درجه آزاد، در مقایسه با نتایج حاصله از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی بر اساس رکوردهای مصنوعی، دارای اختلاف هستند. این میزان اختلافات با افزایش ضریب مقاومت از ۲ تا ۸ افزایش پیدا می‌کند.

شکل ۳. مقایسه تقاضای جابه‌جایی حاصل از تحلیل دینامیکی تحت رکوردهای مصنوعی با روابط ارائه شده در نشریه ۳۶۰ و استاندارد ۲۸۰۰-ویرایش چهارم - خاک نوع I، تابع پوش مرکب



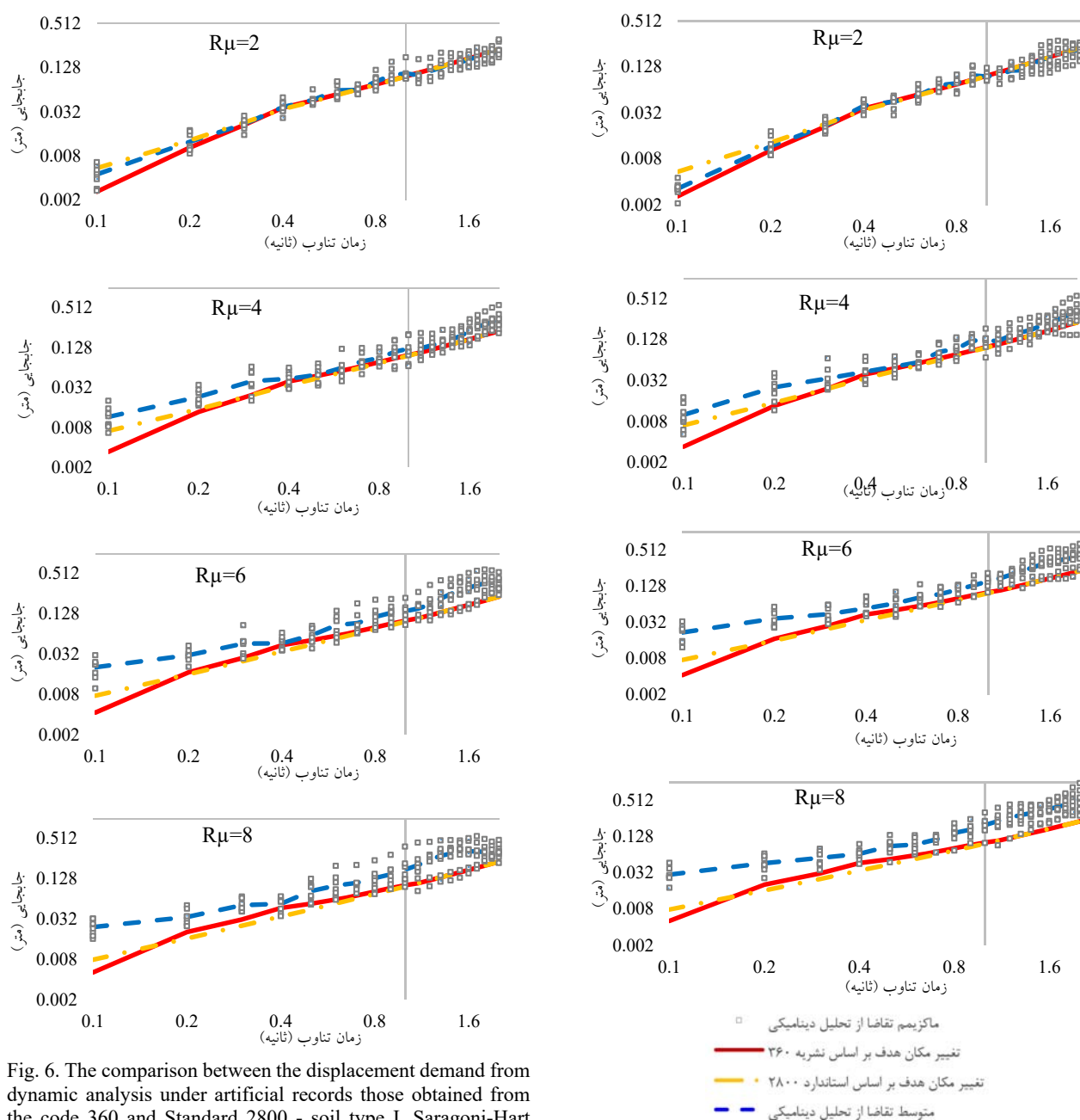


Fig. 6. The comparison between the displacement demand from dynamic analysis under artificial records those obtained from the code 360 and Standard 2800 - soil type I, Saragoni-Hart envelope function

همچنین، میزان اختلافات با تغییر نوع خاک نیز دچار تغییرات نسبی می‌شود. به عنوان نمونه، برای تابع پوش مرکب در $R_\mu=8$ بطور متوسط، روابط نشریه ۳۶۰ در خاک نوع I، ۶۲٪، در خاک نوع II، ۷۷٪ و خاک نوع III، ۱۲۵٪ اختلاف بین نتایج حاصله از تحلیل دینامیکی تاریخیچه زمانی و مقادیر آیین‌نامه‌ای وجود داشته است. همچنین با مقایسه مقادیر حاصل از تحلیل تاریخیچه زمانی و روابط استاندارد ۲۸۰۰-ویرایش چهارم مشاهده می‌شود که در خاک نوع I، ۶۴٪، خاک نوع II، ۸۲٪ و خاک نوع III،

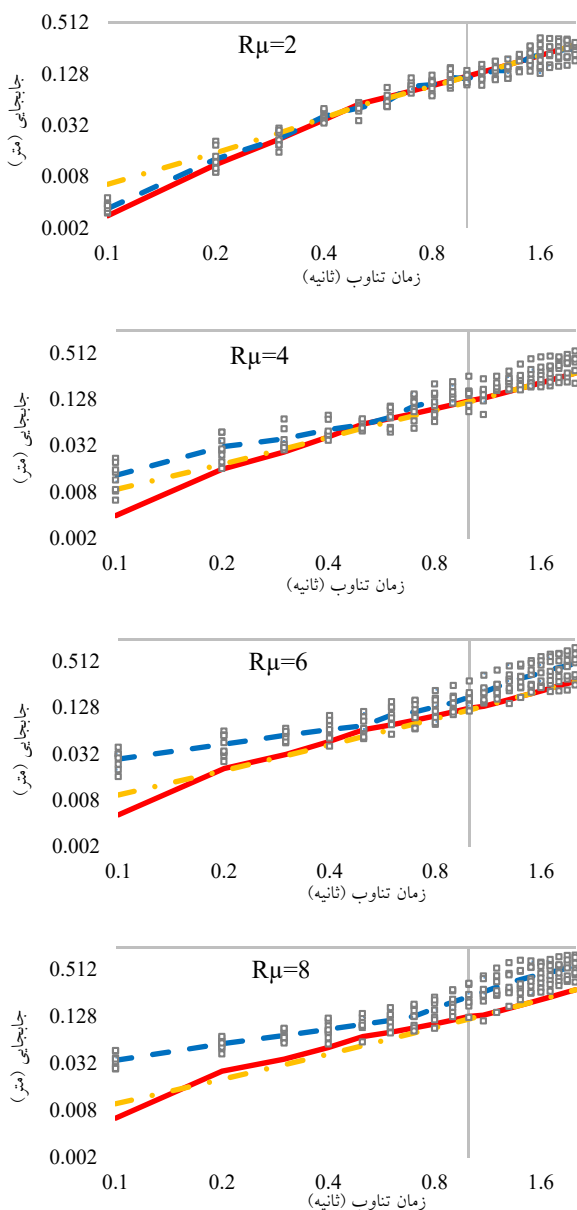
The comparison between the displacement demand from Fig. 5. dynamic analysis under artificial records those obtained from the code 360 and Standard 2800 - soil type I, Exponential envelope function

شکل ۵. مقایسه تقاضای جابه‌جایی حاصل از تحلیل دینامیکی تحت رکوردهای مصنوعی با روابط ارائه شده در نشریه ۳۶۰ و استاندارد ۲۸۰۰-ویرایش چهارم - خاک نوع I، تابع پوش ساراگونی و هارت

the code 360 and Standard 2800 - soil type II, Compound envelope function

۱۱۷٪ دست پایین عمل نموده‌اند. با این حال، نتایج به دست آمده از روابط روابط استاندارد ۲۸۰۰-ویرایش چهارم در مقایسه با روابط نشریه ۳۶۰، نتایج مطلوب‌تری را به ویژه در بازه زمان تناوب ۰/۱ تا ۰/۸ نشان می‌دهد.

شکل ۷. مقایسه تقاضای جابه‌جایی حاصل از تحلیل دینامیکی تحت رکوردهای مصنوعی با روابط ارائه شده در نشریه ۳۶۰ و استاندارد ۲۸۰۰-ویرایش چهارم - خاک نوع II، تابع پوش نمایی



The comparison between the displacement demand from Fig. 8. dynamic analysis under artificial records those obtained from

شکل ۶. مقایسه تقاضای جابه‌جایی حاصل از تحلیل دینامیکی تحت رکوردهای مصنوعی با روابط ارائه شده در نشریه ۳۶۰ و استاندارد ۲۸۰۰-ویرایش چهارم - خاک نوع II، تابع پوش مرکب

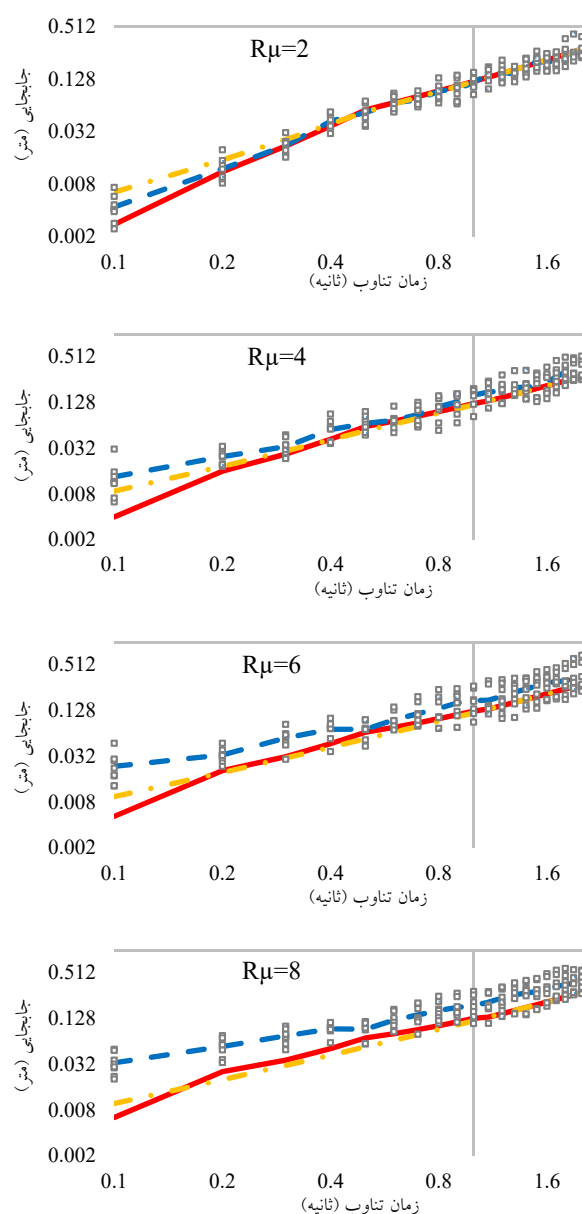
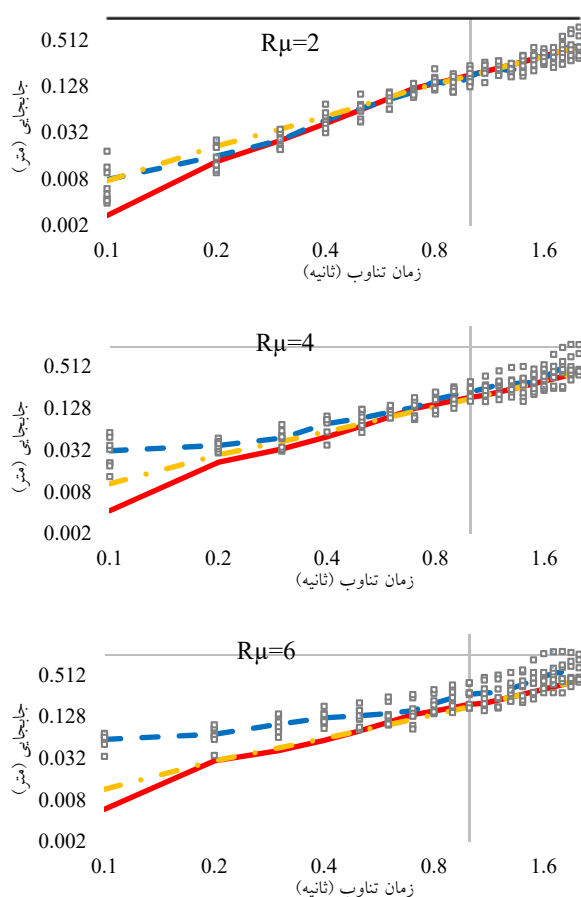


Fig. 7. The comparison between the displacement demand from dynamic analysis under artificial records those obtained from

the code 360 and Standard 2800 - soil type II, Saragoni-Hart envelope function

به طور کلی، با افزایش ضرایب R_μ در بازه زمان تناوب ۰/۱ تا ۰/۸ ثانیه، بین نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی و روابط نشریه ۳۶۰ و روابط استاندارد ۲۸۰۰-ویرایش چهارم، اختلاف بیشتری در مقایسه با بازه زمانی ۰/۸ تا ۲ ثانیه وجود دارد. به عنوان نمونه در خاک نوع I، اختلاف بین نتایج نشریه ۳۶۰ و تحلیل دینامیکی بطور میانگین در بازه ۰/۱ تا ۰/۸ ثانیه بین ۰/۵۳ تا ۰/۶۸٪ و در بازه ۰/۸ تا ۲ ثانیه بین ۰/۲۳ تا ۰/۵۲٪ بوده است. همچنین برای استاندارد ۲۸۰۰-ویرایش چهارم، این اختلاف بطور متوسط در بازه ۰/۱ تا ۰/۸ ثانیه بین ۰/۴۵ تا ۰/۶۱٪ و در بازه ۰/۸ تا ۲ ثانیه بین ۰/۲۴ تا ۰/۵۴٪ مشاهده شده است. لازم به ذکر است که در این میان، تابع پوش مرکب پایین ترین و تابع پوش نمایی بیشترین اختلاف را دارند.

شکل ۹. مقایسه تقاضای جابه‌جایی حاصل از تحلیل دینامیکی تحت رکوردهای مصنوعی با روابط ارائه شده در نشریه ۳۶۰ و استاندارد ۲۸۰۰-ویرایش چهارم - خاک نوع III، تابع پوش مرکب



the code 360 and Standard 2800 - soil type II, Exponential envelope function

شکل ۸. مقایسه تقاضای جابه‌جایی حاصل از تحلیل دینامیکی تحت رکوردهای مصنوعی با روابط ارائه شده در نشریه ۳۶۰ و استاندارد ۲۸۰۰-ویرایش چهارم - خاک نوع II، تابع پوش ساراگونی و هارت

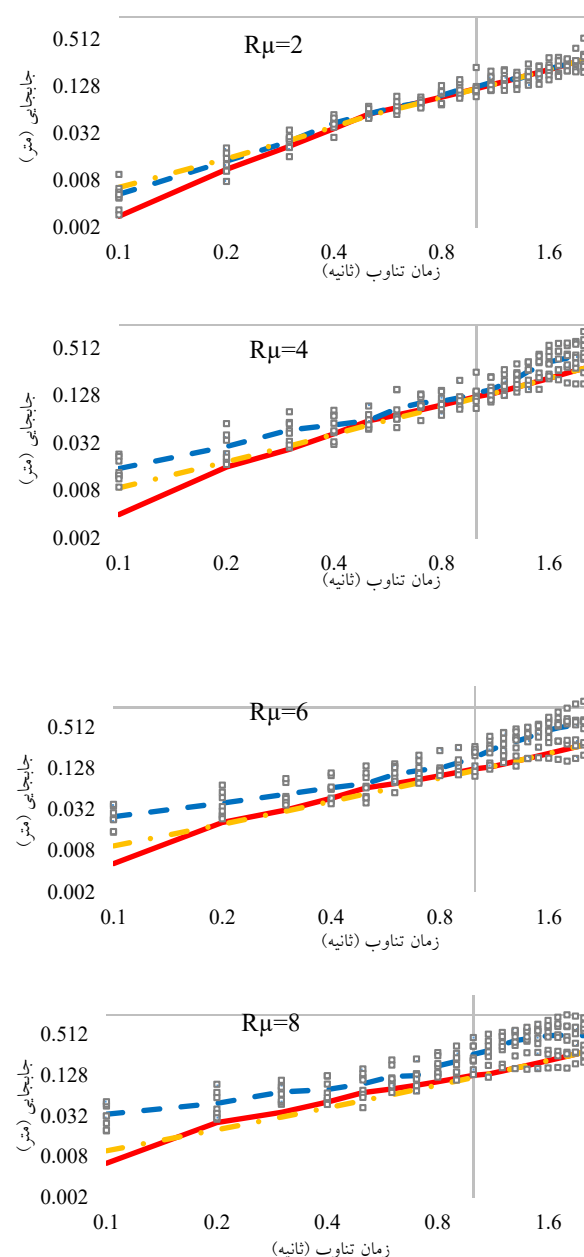
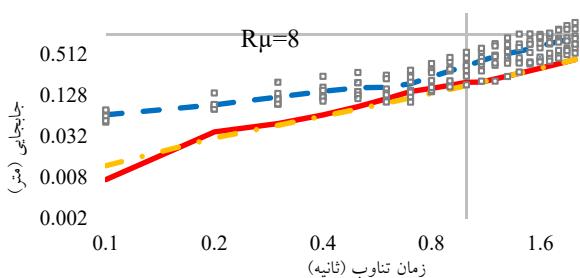
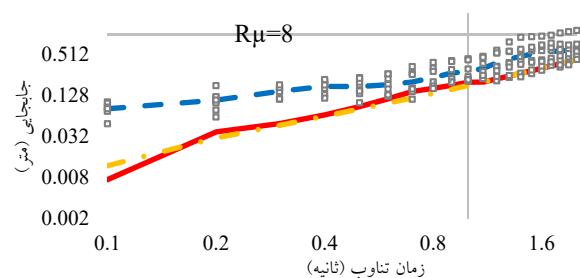


Fig. 9. The comparison between the displacement demand from dynamic analysis under artificial records those obtained from



The comparison between the displacement demand **Fig. 11**, from dynamic analysis under artificial records those obtained from the code 360 and Standard 2800 - soil type III, Exponential envelope function.



The comparison between the displacement demand **Fig. 10**, from dynamic analysis under artificial records those obtained from the code 360 and Standard 2800 - soil type III, Compound envelope function.

شکل ۱۰. مقایسه تقاضای جابه‌جایی حاصل از تحلیل دینامیکی تحت رکوردهای مصنوعی با روابط ارائه شده در نشریه ۳۶۰ و استاندارد ۲۸۰۰ - ویرایش چهارم - خاک نوع III، تابع پوش نمایی.

شکل ۱۱. مقایسه تقاضای جابه‌جایی حاصل از تحلیل دینامیکی تحت رکوردهای مصنوعی با روابط ارائه شده در نشریه ۳۶۰ و استاندارد ۲۸۰۰ - ویرایش چهارم - خاک نوع III، تابع پوش ساراگونی و هارت

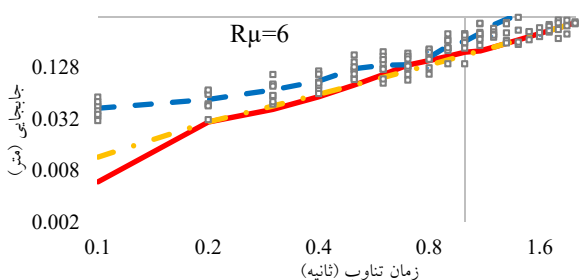
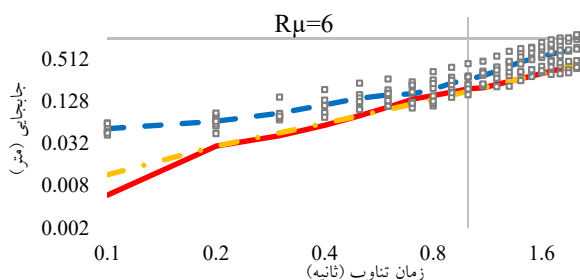
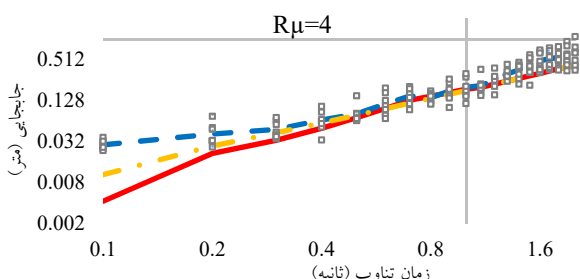
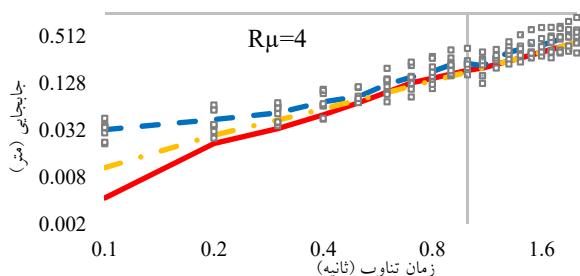
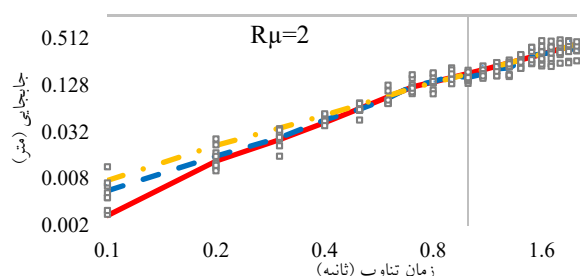
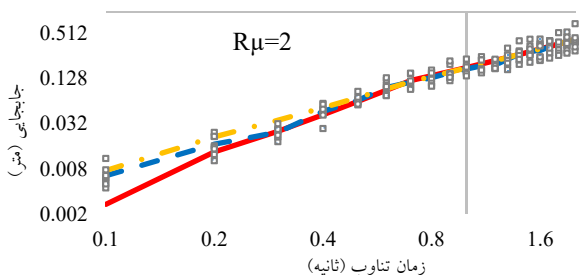


Table 4. Regression coefficients based on the Compound envelope function and for δt from Standard 2800

Table 5. Regression coefficients based on the Exponential envelope function and for δt from the code 360

Table 6. Regression coefficients based on the Exponential envelope function and for δt from Standard 2800

جدول ۷ و ۸) رای تابع پوش ساراگونی هارت مطابق با نشریه ۳۶۰ و استاندارد ۲۸۰۰-ویرایش چهارم در نظر گرفته شده است. در

شکل ۱۲، نمونه‌ای از مقایسه صورت گرفته بین نتایج تحلیلی و مقدار به دست آمده از روابط اصلاحی ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، روابط پیشنهادی از دقت مطلوبی برخوردار هستند و میانگین خطا بین مقادیر حاصل از تحلیل و رابطه اصلاحی، در حالت کلی بین ۱ تا ۸٪ متغیر است.

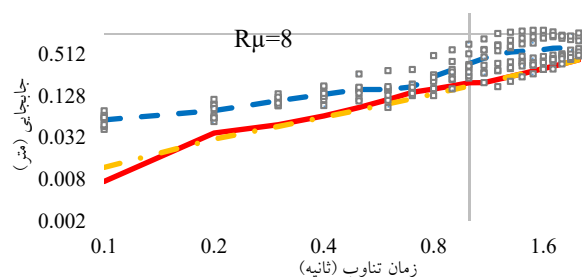


Fig. 12. The comparison between the displacement demand from dynamic analysis under artificial records those obtained from the code 360 and Standard 2800 - soil type III, Saragoni-Hart envelope function

ارائه روابط اصلاحی

همان‌گونه که در بخش قبل مشاهده شد، اختلاف بین نتایج تحلیلی با مقادیر حاصل از روابط موجود در آیین نامه باعث می‌شود تا روابط تخمینی از دقت لازم برخوردار نباشند. پس، در این بخش، روشی برای اصلاح معادلات برآورد تقاضا در روش استاتیکی غیرخطی پیشنهاد شده است بطوریکه نتایج نزدیک به مقادیر به دست آمده از تحلیل دینامیکی غیرخطی شود.

به طور کلی، فرم معادله پیشنهادی برای برآورد تقاضای جابه‌جایی به صورت زیر توصیه می‌شود:

$$\ln\left(\frac{\delta_t}{\delta_t^2}\right) = \begin{cases} a_2 T_n + b_2 & T_n \geq 0.7s \end{cases} \quad (17)$$

در این معادله، δ_{Dyn} نشان دهنده تقاضای جابه‌جایی واقعی براساس نتایج تحلیل دینامیکی است و δ_t تقاضای جابه‌جایی هدف به دست آمده را با استفاده روش استاتیکی غیرخطی نشان می‌دهد. همچنین، T_n زمان تناوب اصلی نوسان سیستم تک درجه آزاد است و ضرایب a_i و b_i ($i=1,2$)، ثابت‌های رگرسیون گیری هستند که به صورت تابعی از R_μ برآورد می‌شوند:

$$a_1 = C_1 K_\mu^- + D_1 K_\mu + E_1 \quad (18)$$

$$b_1 = C_2 K_\mu^- + D_2 K_\mu + E_2 \quad (19)$$

$$a_2 = C_3 K_\mu^- + D_3 K_\mu + E_3 \quad (20)$$

$$b_2 = C_4 K_\mu^- + D_4 K_\mu + E_4 \quad (21)$$

خلاصه ضرایب رگرسیون C_i ، D_i و E_i ($i=1,2,3,4$) در جدول

Table 3. Regression coefficients based on the Compound envelope function and for δt from the code 360

Table 4. Regression coefficients based on the Compound envelope function and for δt from Standard 2800

جدول ۵. ضرایب رگرسیون بر اساس تابع پوش نمایی و برای δt از نشریه ۳۶۰

Soil Type	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄
I	0.0096	0.0044	-0.0138	0.0154	-0.0654	-0.0437	0.1831	-0.0912	2.4328	-0.3517	-1.2724	3.4025
II	0.007	0.0045	-0.0116	-0.011	-0.0468	-0.0436	0.1694	-0.0703	2.1969	-0.3995	-1.276	3.1949
III	-0.0024	0.0026	-0.0071	0.0069	0.0504	-0.0202	0.1377	-0.0445	1.7158	-0.5447	1.2169	2.7133

Table 5. Regression coefficients based on the Exponential envelope function and for δt from the code 360

جدول ۶- ضرایب رگرسیون بر اساس تابع پوش نمایی و برای δt از استاندارد ۲۸۰۰-
ویرایش چهارم

Soil Type	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄
I	0.0089	0.0036	-0.0137	0.0153	-0.0281	-0.0452	0.1664	-0.0633	2.6438	-0.195	-1.2557	3.3747
II	0.0079	0.0045	-0.0114	0.0108	-0.0192	-0.0554	0.1453	-0.03	2.4205	-0.189	-1.2522	3.1549
III	0.0017	0.0041	-0.0067	0.0063	0.0549	-0.0482	0.1014	0.0161	1.8027	-0.3005	-1.181	2.6537

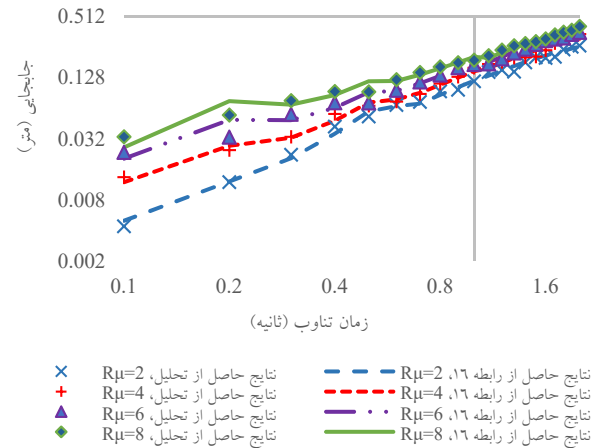
Table 6. Regression coefficients based on the Exponential envelope function and for δt from Standard 2800

جدول ۷. ضرایب رگرسیون بر اساس تابع پوش ساراگونی-هارت و برای δt از نشریه ۳۶۰

Soil Type	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄
I	0.0083	0.0042	-0.0384	0.044	-0.047	-0.0339	0.3964	-0.3618	2.3583	-0.3975	-1.6549	3.925
II	0.0002	0.001	-0.0513	0.0062	0.022	-0.0016	0.5332	-0.5325	2.0639	-0.503	-1.8181	3.9228
III	0.0064	0.0035	-0.0421	0.0506	-0.0496	-0.0292	0.4119	-0.3854	1.8916	-0.5335	-1.5232	3.0882

Table 7. Regression coefficients based on the Saragani-Hart envelope function and for δt from the code 360

شکل ۱۲. مقایسه تقاضای جابه‌جایی حاصل از تحلیل دینامیکی تحت رکوردهای مصنوعی (تابع پوش مرکب و خاک نوع II) با مقادیر به دست آمده از رابطه اصلاحی

**Fig. 13.** Comparison of displacement demand obtained from dynamic analysis under artificial records (Compound envelope function, soil site class I) With the values obtained from the correction relation**جدول ۳.** ضرایب رگرسیون بر اساس تابع پوش مرکب و برای δt از نشریه ۳۶۰

Soil Type	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄
I	0.0102	0.0044	-0.0053	0.0055	-0.0661	-0.0353	0.0375	0.0245	2.35	-0.3997	-1.0306	3.2734
II	0.0073	0.0027	-0.0049	0.0007	-0.0331	-0.019	0.049	0.0608	2.1053	-0.4685	-1.0072	2.9102
III	0.0037	0.0026	-0.0064	0.0028	0.0087	-0.0162	-0.0764	0.0308	1.7154	-0.5832	-0.9926	2.4665

Table 3. Regression coefficients based on the Compound envelope function and for δt from the code 360

جدول ۴- ضرایب رگرسیون بر اساس تابع پوش مرکب و برای δt از استاندارد ۲۸۰۰-
ویرایش چهارم

Soil Type	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄
I	0.0063	0.0017	0.00007	-0.0025	0.0152	-0.0117	-0.0453	0.1504	2.4135	-0.3188	-0.8221	2.9609
II	0.0073	0.0021	-0.0048	0.0005	0.011	-0.0228	0.0249	0.1011	2.2833	-0.2782	-0.9833	2.8702
III	0.0087	0.0037	-0.0061	0.0022	0.0112	-0.0388	0.0402	0.0914	1.8298	-0.343	-0.9569	2.4067

- با دقت در نمودارهای به دست آمده برای انواع خاک‌های مختلف می‌توان به‌خوبی مشاهده نمود که اکثر اختلافات بین مقادیر ذکر شده (بخش ۳)، در زمان تناوب‌های پایین بوده و در زمان تناوب‌های بالا تقریباً روابط نشریه ۳۶۰ با روابط استاندارد ۲۸۰۰- ویرایش چهارم منطبق می‌باشد. اما به‌صورت کلی براساس نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل، هر دو روابط آیین‌نامه به علت عدم تأمین نیازهای لرزه‌ای نیازمند اصلاحات و تغییراتی در این زمینه است.
- بررسی‌ها نشان داد که عملکرد استفاده از شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی از نظر دقت در تخمین پاسخ سیستم‌های یک درجه آزاد نسبت به روابط ارائه‌شده در آیین‌نامه‌ها برای تخمین حداکثر پاسخ سازه، مناسب است.
- در ارزیابی‌های صورت گرفته مشاهده شد که توابع پوش مرکب در مقایسه با دیگر توابع از عملکرد بالا و خطای کمتری برخوردار هستند، ازاین‌رو می‌توان برای انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی با استفاده از شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی از این نوع توابع پوش استفاده نمود.
- روابط اصلاحی پیشنهاد شده، مقادیر تغییرمکان هدف یک سیستم یک درجه آزاد را زمانی که تحت اثر شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی قرار بگیرد را بر اساس نتایج تحلیل دینامیکی، معقول و دقیق‌تر نموده است.

منابع و مراجع

- [1] MacCann WMaS, H.C. Determining strong-motion duration of earthquake. Bulletin of the Seismological Society of America. 1979;Vol. 69:1253-65.
- [2] Fereydouni H. Review and Production of Artificial Accelerograms and its Associated Parameters. University of Tehran, Faculty of Engineering. 1999;MSc Thesis.
- [3] G.W.Housner. Simulation of strong ground motion records by transient stochastic processes. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 1947;vol.90:113-52.
- [4] J.L.Bohdanoff JEG, M.C.Bernard. Response of structures to random earthquake movements. 1961;vol.46:PP.143-5.

جدول ۸ ضرائب رگرسیون بر اساس تابع پوش ساراگونی-هارت و برای δt از استاندارد ۲۸۰۰- ویرایش چهارم

Soil Type	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄
I	0.0072	0.0033	-0.0383	0.0439	-0.0014	-0.0328	0.3798	-0.3339	2.5358	-0.251	-1.6384	3.8973
II	-0.0003	0.0009	-0.0511	0.0624	0.0698	-0.0107	0.5092	-0.4928	2.231	-0.3102	-1.7943	3.8847
III	0.0108	0.0046	-0.0417	0.05	-0.0477	-0.0511	0.3756	-0.3247	1.9789	-0.3057	-1.4874	3.0284

Table 8. Regression coefficients based on the Saragoni-Hart envelope function and for δt from standard 2800

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله، به بررسی دقت روابط تجربی ارائه شده در نشریه ۳۶۰ و استاندارد ۲۸۰۰- ویرایش چهارم، به‌منظور تخمین حداکثر پاسخ جابه‌جایی سیستم‌های تک درجه آزاد بر مبنای رکوردهای مصنوعی تولید شده از توابع پوش مختلف، پرداخته شد. سیستم‌های یک درجه آزاد معادل با رفتار غیرخطی الاستیک-پلاستیک مطلق و با ضرائب کاهش مقاومت بین ۲ تا ۸ در نظر گرفته شدند. بر اساس مقایسه نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی و مقادیر به دست آمده از روابط تخمینی ارائه شده در نشریه ۳۶۰ و استاندارد ۲۸۰۰- ویرایش چهارم، موارد زیر به عنوان جمع‌بندی نهایی، گزارش می‌شوند:

- ارزیابی دقت روابط ارائه‌شده برای تخمین تغییر مکان هدف موجود در نشریه ۳۶۰ و استاندارد ۲۸۰۰- ویرایش چهارم در مقایسه با نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل تاریخچه زمانی با استفاده از شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی نشان می‌دهد که روابط تخمینی، دقت لازم در برآورد نیازهای لرزه‌ای برای سیستم‌های یک درجه آزاد را ندارند و بنابراین دارای ضعف بوده و نیازمند اصلاح و تجدید نظر است.

- Modeling of earthquake chronology from paleoseismic data: Insights for regional earthquake recurrence and earthquake storms in the Central Apennines. *Tectonophysics*, Vol 816. 2021.
- [17] Road HaUDRC. Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings, Standard 2800 (4th edition). Tehran, Iran: BHRC; 2014.
- [18] Office of Deputy for Strategic Supervision DoTA. Instruction for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings No. 360 .2014.
- [19] Engineers ASOC. Minimum Design Loads For Buildings and Other Structures. ASCE/SEI 7. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers; 2017.
- [20] Gasparini DA VE. Simulated earthquake motions compatible with prescribed response spectra .Research Report R76-4 Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA. 1976.
- [21] MK K. Stochastic characterization of earthquakes through their response spectrum. *Earthquake Engineering and Structure Dynamic*. 1978. ۵۰۹-۹۷
- [22] Iyengar RN RP. Generation of spectrum compatible accelerograms. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 1979:253-63.
- [23] Cacciola P CP, Muscolino G. Combination of modal responses consistent with seismic input representation. *Journal Structure Engineering*. 2004:47.
- [24] Rezaeian S DKA. Simulation of synthetic ground motions for specified earthquake and site characteristics. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2010:1155-80.
- [25] Zentner I PF. Enrichment of seismic ground motion databases using Karhunen-Loeve expansion. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2018:1945-57.
- [5] Bircraft.F. Displays the white noise of earthquakes. *Earthquake Spectra*. 1960;vol.5.
- [6] P.C.Jennings GWH. Simulated earthquake movements. 1968;vol.57:PP.287-303.
- [7] Maria T. Comparison of linear and nonlinear dynamic responses of structures under natural and artificial accelerograms. 2007;Vol. 8:pp. 281-98.
- [8] G.Ghodrati Amiri AA. Generation of earthquake acceleration by wavelet transform. Center of Excellence for Fundamental Studies in Structures Engineering. 2006;Cllege of Civil Engineering, Iran University of Science & Tecnology.
- [9] G.Ghodrati Amiri AB. Generation of earthquake acceleration mapping using coronary canopy model and wavelet analysis. Cllege of Civil Engineering ,Iran University of Science & Tecnology. 2010.
- [10] S. Hashemi and A. Habibi. Evaluation and comparison of real, artificial near-fault earthquakes. Faculty of Civil Engineering, Amir Kabir University .Tehran, Iran. 10. 2019.
- [11] Jin-Ting Wang, Ai-Yun Jin, Xiu-Li Du, Ming-Xin Wu. Scatter of dynamic response and damage of an arch dam subjected to artificial earthquake accelerograms. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2020 ;Vol 87. p.p 93-100. ISSN 0267-7261.
- [12] Ghodrati Amiri.G, Amidi.R. Effects of reduction in stiffness and strength in the displacement coefficient method, FEMA 356 (FEMA, 2000). Faculty of Civil Engineering, Tehran University of Science and Technology , Iran. 2010.
- [13] R. Sadri, H. Fakharian, R. Dehghan. Reduce the seismic need of high-rise steel frames by changing the convergent bracing at the height of the structure. *New Technologies in Structures Research Group*. 2020.
- [14] Parsaiyan.H, Moslemi.S. Statistical studies on the ratio of inelastic to elastic deformation in the method of displacement coefficients Instructions for seismic improvement of existing buildings (Journal 360). *Journal of International Scholarly Research Network, Civil Engineering*. 2008.
- [15] V. Mohseniana, N.Gharaei-Moghaddamb, I. Hajirasouliha. Multilevel seismic demand prediction for acceleration-sensitive nonstructural components. *Engineering Structures*. 2021.
- [16] Francesca R. Cinti and Daniela Pantosti and Anna Maria Lombardi and Riccardo Civico.

Artificial earthquakes in seismic demand estimation of SDOF systems: From evaluation to the correction of the proposed equations in the seismic codes

Farshad Homaei^{*1}, Mohsen Bahramjerdi²

1- Assistant professor, Department of Earthquake and Geotechnical Engineering, Faculty of Civil and Surveying Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran,

2- M.Sc. student, Department of Earthquake and Geotechnical Engineering, Faculty of Civil and Surveying Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran,

f.homaei@kgut.ac.ir

Abstract

Seismic design codes provide different equations for estimating displacement demands in various buildings and structures. Such equations were usually obtained by performing regression analysis over the obtained data from numerical models under different nonlinear analyzes. On the other hand, the application of artificial earthquakes is allowed to be considered for design and demand assessment in structures when there is a lack of suitable ground motions for a specific region and site. Since the accuracy of such relations affects the reliability of demand estimating in structures, it is required to assess the efficiency of such predictive relations.

Moreover, it is essential to assess the efficiency of those relations for artificially generated earthquakes. Hence, in this study, the estimated demands from the design and assessment codes relations are evaluated for artificially generated ground motions. In this regard, regulations in the fourth edition of the Iranian seismic design code (also known as Standard 2800) and the last revision of the Iranian seismic evaluation code of practice (also known as Code-360) are considered. Estimated demands from these codes are compared to the results from the nonlinear time-history analysis of a group of single degree of freedom (SDOF) systems. Although an SDOF system can not represent the complete behavior of a complex building, for the low to medium-rise buildings with a fundamental vibration first mode, such an idealization is acceptable. In this regard, a group of SDOF systems with the elastic-perfectly-plastic (EPP) nonlinear behavior was considered. SDOF systems have vibration periods between 0.1s to 2.0s (as low to medium-rise buildings) with strength reduction factors (R_μ) of 2 to 8 to cover most of the common lateral resisting systems. These systems were analyzed under the action of 24 artificially generated ground motion records. Earthquake records were generated based on three different envelop shapes including compound shape, exponential shape, and Saragoni and Hart shape. These envelop shapes are representing the general form of an earthquake accelerogram and try to impose the real characteristics of an earthquake on the generated record. After employing the time-history analysis on each SDOF system, the mean of the maximum displacement demands of SDOF systems was obtained and compared to those from the estimating equations in Standard 2800 and Code-360. It is observed that estimated demands from Standard 2800 are closer to those from time-history analysis when compared with the obtained results from Code-360. Among the considered strength reduction factors, it was observed that SDOF systems with larger R_μ lead to a higher difference between the time-history results and those from codes. This is more predominant over the period range of 0.1s to 0.8s. So, relations in both codes are required to be modified for better demand estimating. In this regard, a method is proposed for modifying the available equations in the prementioned codes to accurately predict the displacement demands in systems under the action of artificially generated ground motions. A comparison between the results from the modified equations and those from the nonlinear time-history analysis shows the efficiency of the proposed method.

Keywords: Artificial ground motion, Envelop function, Time-history analysis, Demand estimation, Single degree of freedom system