

بررسی اثر استفاده از میراگر ویسکوز غیرخطی بر سازه‌های جداسازی شده‌ی پایه واقع در حوزه‌ی نزدیک گسل

حسین پزشکی^۱، منصور ضیایی فر^{۲*}

۱- کارشناس ارشد مهندسی زلزله، پژوهشگاه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

۲- دانشیار پژوهشگاه سازه، پژوهشگاه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

mansour@iiees.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۴/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۶/۲۰

چکیده - پالس‌های با زمان تناوب بلند موجود در زمین‌لرزه‌های حوزه‌ی نزدیک، عملکرد سازه‌های جداسازی شده‌ی پایه را دچار چالش می‌کند. در برخی سیستم‌های جداسازی، میرایی به‌وسیله‌ی میراگرهای ویسکوز تأمین می‌شود. کاربرد میراگرهای ویسکوز دارای تابع رفتاری خطی و غیرخطی در سازه‌های جداسازی شده، در حالت‌های قرار گرفته شده در حوزه‌های نزدیک و دور بررسی شده است. روسازه به صورت سیستم تک‌درجه‌ی آزاد واقع بر لایه‌ی جداساز مدل شده و پاسخ‌ها در خصوص دو سازه با زمان تناوب مختلف به دست آمده است. نتایج نشان‌دهنده‌ی آن است که در برخی پاسخ‌ها نظیر تغییر مکان پایه، میرایی غیرخطی باعث کاهش بیش از ده درصد می‌شود. برای مقایسه‌ی این دو نوع میرایی، یکسان بودن نیروی میراگرهای خطی و غیرخطی مبنا قرار گرفته است. نتایج هم‌چنین نشان‌دهنده‌ی مقدار بهینه‌ای برای میرایی میراگرهاست که پاسخ‌های مختلف در آن میرایی، مطلوب تلقی می‌گردند. به صورت کلی، وجود تغییر میرایی کم‌تر یا بیش‌تر از این مقدار، برخی از پاسخ‌ها را از حد مطلوب خارج می‌کند. تعیین مقدار دقیق میرایی بهینه برای هر سازه‌ی جداسازی شده مستلزم در نظر گرفتن عوامل مختلف، از جمله هزینه بکار رفته برای آن نیز می‌باشد.

واژگان کلیدی: جداسازی پایه، میرایی ویسکوز غیرخطی، زمین‌لرزه‌ی حوزه‌ی نزدیک

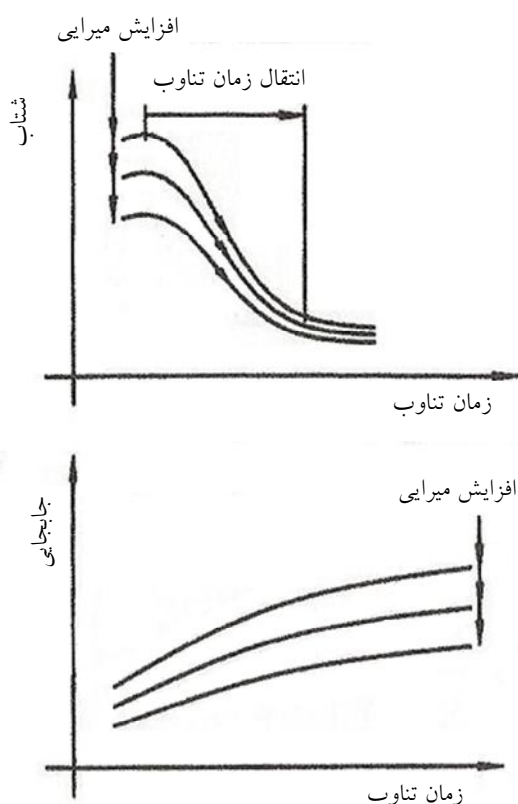
۱ - مقدمه

است که به‌وسیله‌ی انعطاف‌پذیر کردن سازه با استفاده از مکانیسمی در زیر سازه توأم با ایجاد میرایی مناسب حاصل می‌شود. یکی از مزایای اصلی سازه‌های جداسازی شده، رفتار الاستیک آن‌ها در زمین‌لرزه‌های متوسط و خفیف است [۱].

پس از زمین‌لرزه نورتریج ۱۹۹۴، نگرانی‌هایی در رابطه با عملکرد سازه‌های جداسازی شده، در برابر زمین‌لرزه‌های حوزه‌ی نزدیک ایجاد شد. شدت بیش‌تر در بازه‌های زمان تناوبی بالا، به دلیل وجود پالس در برخی زمین‌لرزه‌ها از جمله این دلایل است [۳، ۴]. این امر،

در روش‌های نوین طراحی لرزه‌ای، دو دیدگاه برای مقابله با انرژی زمین‌لرزه وجود دارد. دیدگاه اول، روش‌هایی که باعث کاهش نیروی وارد به سازه به‌وسیله‌ی جدا ساختن سازه از ارتعاش زمین می‌شوند؛ و سیستم‌های جداسازی پایه در این دسته قرار می‌گیرند. در دیدگاه دوم، جایگزین ساختن تجهیزات میرایی برای اتلاف انرژی لرزه‌ای مورد نظر است؛ این تجهیزات با اتلاف بخشی از انرژی زمین‌لرزه، باعث کاهش خسارات ناشی از رفتار غیرالاستیک آن‌ها می‌شوند [۱، ۲]. فلسفه‌ی جداسازی پایه، تفکیک سازه از لرزش زمین

آسیب پذیرتر هستند، چرا که ممکن است در آن‌ها پدیده تشدید رخ دهد. مهم‌ترین ویژگی جداسازی لرزه‌ای، ایجاد انعطاف پذیری است که باعث افزایش زمان تناوب طبیعی سازه می‌شود. افزایش زمان تناوب طبیعی احتمال رخ داد پدیده‌ی تشدید را کاهش می‌دهد، و همچنین باعث کاهش شتاب در سازه می‌شود و این امر روی جابه‌جایی‌های افقی نیز تأثیرگذار است [۱]. افزایش زمان تناوب و آثار آن در نمودار ۱ به صورت طرح کلی نمایش داده شده است.



نمودار (۱) اثر انعطاف‌پذیری بر سازه؛ الف- افزایش زمان تناوب و میرایی باعث کاهش شتاب سازه می‌شود، ب- افزایش میرایی در خصوص جابه‌جایی نیز اثر کاهنده دارد [۱]

مقادیر حداکثر جابه‌جایی در سازه‌ی جداسازی شده با میرایی کم ممکن است در زمین‌لرزه‌های قوی به حدود یک‌متر نیز برسد، و میرایی می‌تواند این مقدار را به حدود ۵۰ تا ۴۰۰ میلی‌متر برساند. این مقدار جابه‌جایی باید به‌وسیله‌ی درز لرزه‌ای تأمین شود. پاسخ‌های حقیقی سازه

باعث ایجاد تغییراتی در آیین‌نامه‌هایی نظیر UBC شده است. در ویرایش سال ۱۹۹۷ این آیین‌نامه، نسبت به سال ۱۹۹۴، ضوابط سخت‌گیرانه‌تری نسبت به مسأله‌ی حوزه‌ی نزدیک اعمال و باعث کاهش مزیت اصلی سازه‌ی جداسازی پایه گردید به‌گونه‌ای که در عمل، سازه‌ی جداسازی طراحی‌شده بر مبنای این ضوابط در برابر زمین‌لرزه‌های متوسط و خفیف، مشابه سازه‌ای با پایه‌ی گیردار عمل می‌نماید [۵،۶].

این امر لزوم بررسی‌های بیش‌تری در خصوص سازه‌های جداسازی شده را ایجاد نمود. با توجه به این‌که اکثر شهرهای کشور، در نزدیکی ناحیه‌ی گسل‌های فعال قرار دارند و سازه‌های جداسازی شده در داخل کشور به مرور مورد توجه قرار داده می‌شود، مطالعه‌ی بر روی این سازه‌ها انجام گرفته شده و پاسخ‌های سازه در اثر نگاشت‌های حوزه‌ی نزدیک و دور بررسی شده‌اند. هم‌چنین با توجه به آن‌که در برخی سازه‌های جداسازی شده از میراگرهای ویسکوز برای تأمین اتلاف انرژی بهره گرفته می‌شود، تأثیر رفتار میرایی خطی و غیرخطی نیز روی این سازه‌ها، بررسی شده است.

مسئله‌ی اصلی تحقیق حاضر به مدل‌های بزرگ و پیچیده سازه‌ای نیازی نداشته و هدف آن، آگاهی از تأثیر میرایی خطی و غیرخطی در لایه‌ی ایزولاتور در زمین‌لرزه‌های حوزه‌ی دور و نزدیک بوده است. این تحقیق را می‌توان با مدل‌سازی ساده‌ی سازه‌ی جداسازی شده نیز انجام داد و نیازی به مدل‌سازی روسازه با درجات آزادی زیاد نیست. با توجه به آن‌که هدف بررسی مشخصه‌های لایه‌ی جداسازی است، روسازی را می‌توان تنها به عنوان مدل یک درجه آزاد که روی ایزولاتور قرار داده شده، مدل کرد.

۲- جداسازی پایه و زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک

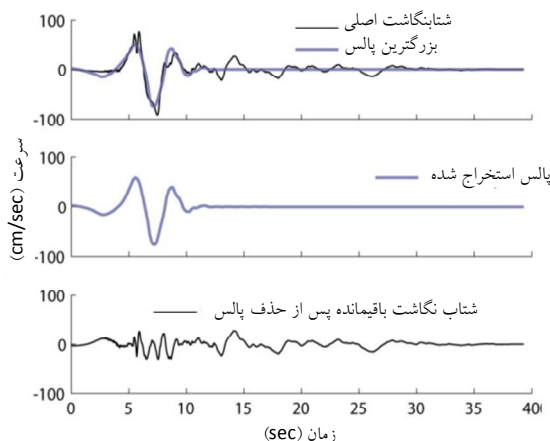
زمین‌لرزه‌های معمول اغلب دارای زمان تناوب‌هایی در محدوده‌ی ۰/۱ تا ۱ ثانیه می‌باشند. سازه‌های با زمان تناوب طبیعی بین ۰/۱ تا ۱ ثانیه در مقابل این زمین‌لرزه‌ها

نه در مؤلفه‌ی موازی با آن [۸-۱۰].

در مطالعات، تفکیک بین دو نوع پالس به جز در شرایط خاصی که جابه‌جایی ماندگار زمین اهمیت داشته باشد، صورت نمی‌گیرد و پالس موجود در نگاشت را ناشی از جهت‌گیری انتشار شکست در نظر می‌گیرند و این روند در این مطالعه نیز پیگیری شده است.

با توجه به آن که سازه‌های جداسازی شده زمان تناوب بالا و فرکانس پایینی دارند، محتوای فرکانسی بالای زمین‌لرزه‌های حوزه نزدیک بر آن‌ها چندان تأثیرگذار نیست و در بررسی این سازه‌ها در حوزه نزدیک از این اثر صرف‌نظر می‌شود [۶].

مؤلفه‌ی عمود بر گسل زمین‌لرزه‌ی حوزه‌ی نزدیک را می‌توان حاصل برهم‌نهی دو نگاشت دانست: نخست، تعدادی پالس با دامنه بزرگ و زمان تناوب بلند و نگاشتی شامل مجموعه‌ای از حرکت‌های با دامنه و فرکانس‌های مختلف، که نگاشت زمینه نامیده می‌شود. باید اشاره شود که مکانیسم تولید نگاشت زمینه و پالس متفاوت و از نظر آماری مستقل از یکدیگر هستند. پالس‌های سرعت در جهت انتشار گسل و به دلیل نزدیکی سرعت گسلش و سرعت انتشار موج ایجاد می‌شوند، درحالی‌که نگاشت زمینه‌ی ناشی از پاسخ خاک به تحریک لرزه‌ای اعمال شده در سنگ بستر است [۱۱].



نمودار (۲) نگاشت سرعت و پالس استخراج شده و نگاشت زمینه [۱۱]

روش‌های مختلفی برای استخراج پالس از نگاشت کلی

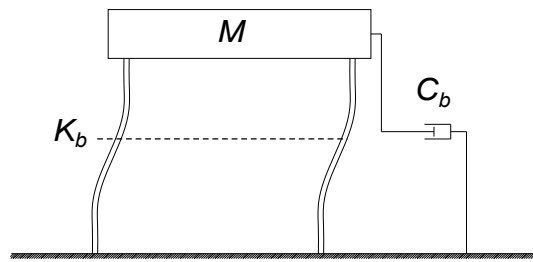
به عوامل مختلفی نظیر توزیع جرم، پارامترهای جداسازی لرزه‌ای و ... وابسته است.

برخی تجهیزات جداسازی نظیر نشیمن‌های با هسته‌ی سربی توانایی تأمین میرایی مطلوبی را دارند، اما برخی از آن‌ها نظیر نشیمن‌های لاستیک طبیعی و مصنوعی میرایی کمی دارند و در کنار آن‌ها برای تأمین میرایی از تجهیزات اتلاف انرژی نظیر میراگرهای اصطکاکی و یا ویسکوز بهره گرفته می‌شود. به میراگرهای ویسکوز در این میان با در نظر گرفتن اندازه و توان اتلاف انرژی بالا توجه بیشتری شده است [۲،۵].

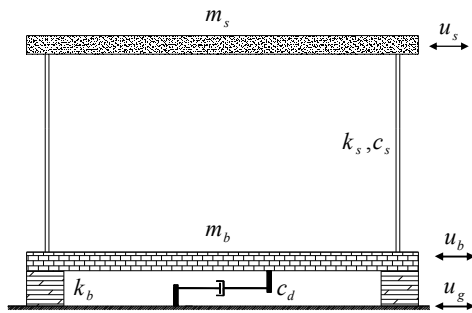
پس از وقوع زمین‌لرزه لندنز ۱۹۹۲، نورثریج ۱۹۹۴ و کوبه‌ی ۱۹۹۵، با توجه به خسارات و تلفات ایجاد شده در مناطق شهری که سازه‌های آن‌ها بر اساس آیین‌نامه‌های لرزه‌ای مدرن طراحی شده بودند، بار دیگر به مسأله زمین‌لرزه‌های نزدیک گسل توجه شد و مطالعات در این زمینه وسعت بیش تری یافت. تأثیر این روند در مدارکی نظیر FEMA-۲۷۳ و UBC-۱۹۹۷؛ UBC-۱۹۹۴؛ ATC40 قابل مشاهده است [۷].

در ناحیه‌ی نزدیک گسل، یا همان حوزه‌ی نزدیک زمین‌لرزه‌ها به گونه‌ای آشکار، در اثر مکانیزم شکست گسل در به وجود آوردن پالس لرزه‌ای تأثیرگذارند و در آن‌ها پالس ناشی از جهت‌گیری انتشار شکست و جابه‌جایی ماندگار زمین نیز مطرح است. هم‌چنین به دلیل فاصله‌ی کوتاه محل تا منبع لرزه‌ای، اثر میرایی خاک در مقایسه با زمین‌لرزه‌های حوزه‌ی دور بسیار کم‌تر است به گونه‌ای که عموم نگاشت‌های حوزه‌ی نزدیک محتوای فرکانسی بالایی خواهند داشت [۷].

نزدیک بودن سرعت انتشار شکست گسل به سرعت موج برشی، سبب می‌شود که انرژی موج برشی در مراحل اولیه گسلش و مکانیزم گسلش در حال پیشرفت، در برخی نقاط واقع در جهت انتشار شکست در مدت کوتاهی هم‌زمان واقع شوند و پالسی را به وجود آورند که پالس ناشی از جهت‌گیری نامیده می‌شود. الگوی تشعشعی موج برشی باعث می‌شود این پالس در مؤلفه عمود بر گسل دیده شود،



شکل (۱) سازه‌ی جداسازی شده با جرم M ، سختی جداساز K_b و میرایی ویسکوز C_b



شکل (۲) سازه‌ی دو درجه‌ی آزادی مدل‌سازی جداسازی پایه

در سیستم موردنظر فرض بر آن است که جداساز میرایی چندانی نداشته و میرایی به‌وسیله‌ی میراگر ویسکوز تأمین می‌شود. m_s ، جرم روسازه، m_b ، جرم پایه که روی سیستم جداساز خطی قرار گرفته است، k_s, c_s ، به ترتیب برابر میرایی و سختی روسازه، k_b ، سختی سیستم جداساز و c_d ، برابر ضریب میرایی حاصل از میراگر است. نیروی میرایی حاصل از میراگر برابر $c_d \dot{x}^\alpha$ است. α ، برابر سرعت نسبی دو سر میراگر، و α ، توان سرعت است. در صورتی که توان سرعت برابر یک باشد، رفتار میراگر خطی و در صورتی که مقدارش کم‌تر از یک باشد رفتار آن غیرخطی خواهد داشت.

فرض می‌شود فرکانس طبیعی سازه‌ی پایه‌ی گیردار، $\omega_s = \sqrt{k_s/m_s}$ ، و فرکانس طبیعی سازه‌ی جداسازی شده $\omega_b = \sqrt{k_b/(m_s + m_b)}$ ، تفاوت زیادی داشته باشند. در این رابطه، پارامتر $\varepsilon = \omega_b^2/\omega_s^2$ ، به‌وسیله‌ی کلی [۲] معرفی شده است و پیشنهاد گردیده که مقدار آن بین ۰/۱ و ۰/۰۱ باشد. پارامتر دیگری نیز به‌وسیله‌ی اسکینر و همکاران [۱]، معرفی شده است و برابر نسبت زمان تناوب سازه‌ی

وجود دارد، از جمله می‌توان به روش تحلیل موجک، روش تجربی تجزیه‌ی مودی و روش میانگین‌گیری متحرک اشاره کرد. نمونه‌ای از پالس استخراج شده، نگاشت زمینه و نگاشت اصلی با استفاده از تحلیل موجک در نمودار ۲ نمایش داده شده است.

به طور معمول پالس استخراج شده، زمان تناوب‌های بالا دارند و به همین دلیل از آن‌ها با عنوان پالس با زمان تناوب بلند یاد می‌شود.

۳- مدل سازه‌ی جداسازی شده

در سازه‌های جداسازی شده‌ی پایه با سیستم جداسازی خطی، می‌توان زمان تناوب مود اول سازه و یا همان زمان تناوب طبیعی سازه را با صلب فرض کردن روسازه به دست آورد. در این حالت، مشابه شکل ۱، سازه تبدیل به یک سازه‌ی تک‌درجه‌ی آزاد می‌شود که با سختی برابر سختی سیستم جداساز و با جرمی برابر با جرم کل سازه ارتعاش می‌کند. از طریق رابطه‌ی ساده‌ی زیر می‌توان زمان تناوب طبیعی سازه‌ی جدا شده را محاسبه نمود؛

$$T_1 \approx T_b = 2\pi(M/K_b)^{1/2} \quad (1)$$

T_b ، زمان تناوب طبیعی سازه‌ی جداسازی شده، M ، جرم کل سازه و K_b ، سختی سیستم جداساز است. با استفاده از این پریمود و زمان مثبت میرایی برای سازه‌ی جداسازی شده می‌توان با تقریب مناسب تغییرمکان حداکثر سازه را از طریق طیف زلزله به دست آورد [۱].

روش ساده‌ی دیگر برای مدل‌سازی، استخراج یک سیستم ساده‌ی دو درجه آزاد از درون رفتار سازه‌ی جداسازی شده، است. فرض بر این است که تمامی اجزای سازه‌ی و سیستم جداسازی به صورت الاستیک خطی رفتار می‌کنند و میرایی نیز ویسکوز باشد. با توجه به غیرخطی بودن عموم سیستم‌های جداساز، این روش در خصوص آن‌ها تقریب داشته و باید سختی و میرایی خطی معادل آن‌ها را محاسبه کرد. شکل ۲ نشانگر کدل سیستم دو درجه آزاد مورد بحث است [۲].

میرایی بحرانی سازه‌ی جداسازی شده، در میرایی خطی برابر 55300 کیلونیوتن.ثانیه بر میلی‌متر است. برای بررسی اثر میراگر، مقدار ضریب میرایی میراگر از عدد 1000 کیلونیوتن.ثانیه بر میلی‌متر (برابر 2% میرایی بحرانی) شروع می‌شود و به مرور افزایش پیدا می‌کند و در هر حالت پاسخ‌های سازه در نگاشت‌های مختلف ثبت می‌شود.

جدول (۱) مشخصه‌های سازه‌ی سیستم‌های جداسازی شده

مشخصه	سازه یک	سازه دو
$T_{fixed-base}$ (sec)	۴/۰	۷۵۴/۰
T_b (sec)	۵/۲	
z_s (%)	۲	
m_b (N.sec ² /mm)	۱۰۰۰	
k_b (N/mm)	۳/۶۹۴۸۲	
m_s (N.sec ² /mm)	۱۰۰۰۰	
k_s (N/mm)	۱/۲۴۶۷۴۰۱	۷/۶۹۴۴۱۱
e	۰۲۵۶/۰	۰۹۱۰/۰
I	۲۵/۶	۳۲/۳

پاسخ سازه‌ها در دو حالت محاسبه شده است، در یک حالت، میراگر رفتار خطی دارد و در حالت دیگر میراگر دارای رفتار غیرخطی است. در حالت غیرخطی، توان سرعت، برابر $0/5$ در نظر گرفته شده است.

۴- مدل دینامیکی سازه‌ی جداسازی شده

رفتار دینامیکی سازه‌ی جداسازی شده نشان داده شده در شکل ۲، را می‌توان با استفاده از روابط ۳ بررسی کرد.

$$m_b \ddot{u}_b + (c_d + c_s) \dot{u}_b^\alpha - c_s \dot{u}_s + (k_b + k_s) u_b - k_s u_s = -m_b \ddot{u}_g \quad (3)$$

$$m_s \ddot{u}_s - c_s \dot{u}_b^\alpha + c_s \dot{u}_s - k_s u_b + k_s u_s = -m_s \ddot{u}_g$$

برای به دست آوردن پاسخ دینامیکی، ابتدا مرتبه‌ی معادلات حاضر از درجه‌ی دو به درجه‌ی یک کاهش می‌یابد و سپس با استفاده از روش رانج-کوتا، معادلات حاصله حل می‌شوند.

جداسازی شده به زمان تناوب سازه گیردار است $(I = T_b / T_{fixed-base})$. مقدار صفر این نسبت، بیانگر عدم ایجاد جداسازی، و مقدار بی‌نهایت این نسبت بیانگر سازه‌ی برش آزاد است، به این معنی که سازه از پایه به‌طور کامل جدا شده است. از این تعریف چنین نتیجه‌گیری شده است که برای هر مقدار بزرگ‌تر از نسبت 2 ، اختلاف کافی بین موده‌های رفتاری سازه ایجاد می‌شود. نسبت جرمی $\gamma = m_s / (m_s + m_b)$ ، نیز باید همواره کم‌تر از یک باشد [۱۱].

برای بررسی دو سازه در نظر گرفته شده است به گونه‌ای که در حالت پایه‌ی گیردار، زمان تناوب طبیعی سازه‌ی اول $0/4$ ثانیه و سازه‌ی دوم $0/754$ ثانیه است. فرض می‌شود، هر دو سازه پس از جداسازی، دارای زمان تناوبی برابر $2/5$ ثانیه باشند و هم‌چنین روسازه‌ی آن‌ها جرمی ده برابر جرم پایه داشته باشد. مشخصات در نظر گرفته‌شده برای سازه‌ها با شرایط معمول ارائه‌شده در مراجع [۱۱، ۱۲] مطابقت دارند.

در تحلیل سازه‌های معمول، چنین فرض می‌شود که میرایی سازه برابر 5% میرایی بحرانی سازه باشد، این مقدار با فرض این است که سازه‌ی معمول در هنگام تجربه‌ی زمین‌لرزه، دچار برخی خسارات سازه‌ای و غیرسازه‌ای می‌شود. جداسازی پایه در این سازه، باعث می‌شود که نیروهایی که سیستم‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای تجربه می‌کنند، کاهش یابد و خسارت در آن‌ها کمتر گردد، بنابراین سطح میرایی پایین‌تری برای سازه در نظر گرفته می‌شود. به‌طور معمول میرایی سازه ζ_s ، در این حالت برابر 2% میرایی بحرانی سازه در نظر گرفته می‌شود [۲].

مقادیر سختی و میرایی سازه از طریق روابط ۲ محاسبه می‌شوند. جدول ۱ نشانگر مقادیر مشخصه‌ی رفتاری برای دو سازه و مقادیر I و ε است.

$$\begin{cases} k_b = 4\pi^2 (m_b + m_s) / T_b^2 \\ k_s = 4\pi^2 m_s / T_s^2 \\ c_s = m_s \pi \zeta_s / T_s \end{cases} \quad (2)$$

جدول (۲) نگاشت‌های دارای پالس

#	Event Name	Year	Station	Tp	PGV	PGA (g)
1	San Fernando	1971	Pacoima Dam	1.6	116.5	1.435
2	Coyote Lake	1979	Gilroy Array #6	1.2	51.5	0.448
3	Imperial Valley-06	1979	Aeropuerto Mexicali	2.4	44.3	0.357
4	Imperial Valley-06	1979	Agrarias	2.3	54.4	0.312
5	Imperial Valley-06	1979	Brawley Airport	4.0	36.1	0.158
6	Imperial Valley-06	1979	EC County Center	4.5	54.5	0.178
7	Imperial Valley-06	1979	EC Meloland	3.3	115.0	0.378
8	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #10	4.5	46.9	0.175
9	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #11	7.4	41.1	0.367
10	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #3	5.2	41.1	0.229
11	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #4	4.6	77.9	0.357
12	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #5	4.0	91.5	0.375
13	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #6	3.8	111.9	0.442
14	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #7	4.2	108.8	0.462
15	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #8	5.4	48.6	0.455

جدول (۳) نگاشت‌های فاقد پالس

#	Event Name	Year	Station	Magnitude	PGA (g)
1	Kocaeli, Turkey	1999	ERD - Duzce	7.5	0.312
2	Landers	1992	Joshua Tree	7.3	0.274
3	Manjil, Iran	1990	BHRC - Abbar	7.4	0.515
4	Victoria, Mexico	1980	Cerro Prieto	6.3	0.587
5	San Fernando	1971	Castaic - Old Ridge Route	6.6	0.324
6	Imperial Valley	1940	Terminal Building	7.1	0.319

مبنای قرارگیری شتاب‌نگاشت‌ها در این دسته‌ها، مطالعه‌ی بیکر [۱۲] است. او برای نگاشت‌های بانک داده‌ی پروژه‌ی NGA، بر مبنای تحلیل موجک، مطالعه‌ی انجام داده است و در مؤلفه‌ی عمود بر گسل این نگاشت‌ها، ۹۱ نگاشت دارای پالس را جدا کرده است. ۱۵ نگاشت از میان ۹۱ نگاشتی که به عنوان دارای پالس معرفی نموده است، در این مطالعه به کار رفته‌اند. برای انتخاب نگاشت‌های فاقد پالس، ۶ نگاشت انتخاب شده است، که در دسته‌ی نگاشت‌های دارای پالس ارائه شده به وسیله‌ی بیکر قرار ندارند. در جدول ۲، مشخصات شتاب‌نگاشت‌های دارای پالس و در جدول ۳، مشخصات نگاشت‌های فاقد پالس ارائه شده‌اند. در جدول ۲، زمان تناوب پالس بزرگ‌تر که توسط تحلیل موجک استخراج شده است، بر حسب ثانیه است. برای تحلیل سازه‌ها، تمامی شتاب‌نگاشت‌ها به بیشینه‌ی شتاب زمین‌لرزه‌ی السنترو، یعنی به مقدار ۰/۳۱۹ برابر شتاب

تغییر متغیر زیر را برای تبدیل معادله به معادله‌ی درجه‌ی اول به کار می‌بریم؛

$$\dot{u}_i = \dot{g}_{2i-1} \quad (۴)$$

بر مبنای تغییر متغیر رابطه‌ی ۴، دو رابطه‌ی بیان شده در ۳ به‌طور کلی در دو حالت میرایی خطی و غیرخطی به چهار معادله‌ی درجه‌ی اول بیان شده در ۵ تبدیل می‌شوند.

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{g}_1 &= g_2 \\ \dot{g}_2 &= -\ddot{u}_g - \frac{(k_b + k_s)}{m_b} g_1 - \frac{(c_d + c_s)}{m_b} \cdot \text{sgn}(g_2) |g_2|^\alpha + \frac{k_s}{m_b} g_3 + \frac{c_s}{m_b} g_4 \\ \dot{g}_3 &= g_4 \\ \dot{g}_4 &= -\ddot{u}_g + \frac{k_s}{m_s} g_1 + \frac{c_s}{m_s} \cdot \text{sgn}(g_2) |g_2|^\alpha - \frac{k_s}{m_s} g_3 - \frac{c_s}{m_s} g_4 \end{aligned} \right. \quad (۵)$$

۵- نگاشت‌های حوزه دور و نزدیک

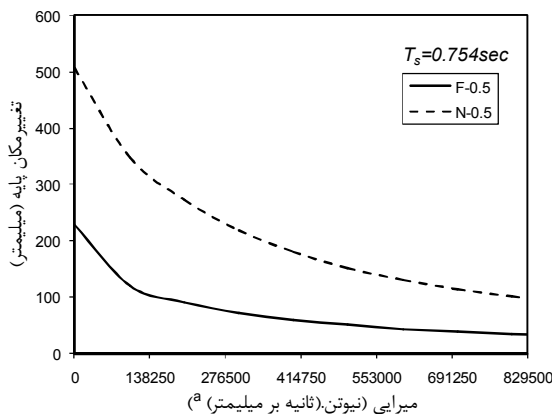
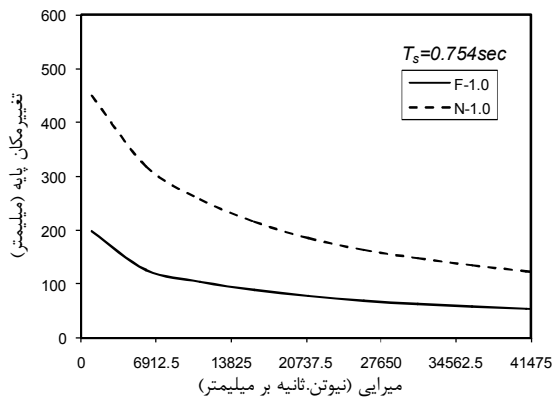
هدف بررسی تأثیر میرایی غیرخطی و خطی در برابر زمین‌لرزه‌های حوزه‌ی نزدیک و حوزه‌ی دور است. همان‌گونه که بیان شده است، پاسخ‌های سازه‌ی جداسازی شده چندان در اثر فرکانس بالای نگاشت‌های حوزه‌ی نزدیک که برای گسیختگی پس رونده قرار دارند، قرار نمی‌گیرند. بنابراین دو دسته‌ی شتاب‌نگاشت استفاده شده‌اند، که دسته‌ی اول، نگاشت‌هایی هستند که دارای پالس ناشی از جهت‌گیری، به عنوان مشخصه‌ی اصلی زمین‌لرزه‌های حوزه‌ی نزدیک، هستند و دسته‌ی دوم، نگاشت‌هایی فاقد پالس هستند. در ادامه نیز این دو دسته، به ترتیب با عنوان شتاب‌نگاشت‌های دارای پالس و فاقد پالس خطاب می‌شوند. در این مطالعه از اثر جابه‌جایی ماندگار زمین، صرف‌نظر و فرض شده است که تمامی پالس‌ها در اثر جهت‌پذیری رخ داده‌اند.

زمین مقیاس شده‌اند.

۶- تحلیل پاسخ‌ها

برای انجام تحلیل، مقدار میرایی میراگر، در هر دو حالت خطی و غیرخطی، گام به گام افزایش پیدا می‌کند. گام‌های میرایی غیرخطی بزرگ‌تر از گام‌های میرایی خطی در نظر گرفته شده است. سازه، در اثر تمامی شتاب‌نگاشت‌ها، به ازای تمامی مقادیر میرایی تحلیل می‌شود و سپس مقدار بیشینه‌ی پاسخ‌های سازه، شامل نیروی میراگر، تغییر مکان نسبی روسازه، تغییر مکان، سرعت و شتاب روسازه و پایه، در هر گام ثبت می‌شود، سپس در دو دسته نگاشت‌های دارای پالس، و نگاشت‌های فاقد پالس، میانگین این مقادیر محاسبه می‌شود. در این بخش، واحد زمان؛ ثانیه، تغییر مکان؛ میلی‌متر، و واحد نیرو؛ نیوتن است. از این پس، در تمامی نمودارها و جدول‌های آتی، زمین لرزه‌های دارای پالس، با مخفف N و زمین لرزه‌های فاقد پالس با مخفف F، نشان داده خواهند شد. هم‌چنین در عنوان نمودارهای رسم شده، عدد ۱/۰ بیانگر میرایی خطی و عدد ۰/۵ بیانگر میرایی غیرخطی با توان سرعت ۰/۵ است. به عنوان نمونه، تغییر مکان پایه‌ی محاسبه شده در دو حالت میرایی خطی و غیرخطی در نمودار ۳ برای سازه با زمان تناوب گیرداری ۰/۷۵۴ ثانیه به نمایش گذارده شده است.

در ابتدا، اثر نگاشت‌های دارای پالس در قیاس با نگاشت‌های فاقد پالس بررسی می‌شوند. برای آن که تأثیر وجود پالس را بتوان بررسی نمود، نسبت پاسخ‌های در اثر نگاشت دارای پالس به مقادیر مشابه در اثر نگاشت‌های فاقد پالس بررسی می‌شوند. متوسط این نسبت برای مقادیر میرایی پایه برابر ۵۰ درصد میرایی بحرانی سازه در دو حالت خطی و غیرخطی در جدول ۴ ارائه شده‌اند. همان‌گونه که قابل مشاهده است، اثر نگاشت دارای پالس روی پاسخ‌ها فزاینده است و آنها را تا دو برابر پاسخ‌ها را افزایش می‌دهند.



نمودار (۳) تغییر مکان پایه در دو حالت میرایی خطی و غیرخطی در اثر نگاشت‌های دارای پالس و فاقد پالس

جدول (۴) نسبت پاسخ در اثر نگاشت دارای پالس به پاسخ در اثر نگاشت فاقد پالس

دریافت روسازه	تغییر مکان پایه	نیروی میراگر	پاسخ
۳/۲	۴/۲	۱/۲	خطی
۴/۲	۹/۲	۵/۱	غیرخطی

برای بررسی کامل اثر میرایی غیرخطی باید بین نتایج حالت غیرخطی و خطی مقایسه‌ای انجام شود. با توجه به این که در خصوص سیستم‌های دینامیکی با میرایی خطی، نسبت میرایی که مطرح است و این در حالی است که در خصوص سیستم‌های با رفتار میرایی غیرخطی، تعریف میرایی بحرانی و در نتیجه تعریف نسبت میرایی مفهومی ندارد. بنابراین باید برای مقایسه بین میرایی خطی و میرایی غیرخطی، پارامتر دیگری را نظر گرفت [۱۳]. در برخی مطالعات نظیر مرجع [۱۴] از روش‌های دیگری برای مقایسه میان میرایی خطی و غیرخطی استفاده شده است. در این مطالعه مبنای مقایسه،

جدول (۶) اختلاف پاسخ‌های ناشی از زمین‌لرزه‌های فاقد پالس

(بر حسب درصد)

مبنا	ξ (%)	تغییر مکان پایه	دریفت روسازه	شتاب روسازه
نگاشت فاقد پالس	۵/۱۲	۱۱-	۸-	۱
	۲۵	۱۲-	۸-	۲-
	۵۰	۱۵-	۱۰-	۵-

جدول (۷) میانگین اختلاف پاسخ سازه‌ها (بر حسب درصد)

مبنا	تغییر مکان پایه	دریفت روسازه	شتاب روسازه
نگاشت دارای پالس	۱۷-	۸-	۳-
نگاشت فاقد پالس	۱۳-	۹-	۲-

در این جدول اثر میرایی غیرخطی در کاهش شتاب روسازه چندان قابل توجه نیست.

در نمودار ۳ نیز مقادیر پاسخ تغییر مکان پایه ترسیم شده است. در خصوص تغییر مکان پایه، با افزایش مقدار میرایی، تغییر مکان حداکثر کاهش پیدا می‌کند؛ گرچه میزان کاهش به مرور کم‌تر می‌شود، این حالت در هر دو میرایی خطی و غیرخطی رخ می‌دهد. با توجه به تشابه پاسخ تغییر مکان دو سازه در روند کلی، فقط نمودارهای مرتبط با سازه با زمان تناوب گیرداری ۰/۷۵۴ ثانیه رسم شده‌اند.

در پاسخ تغییر مکان نسبی روسازه، با افزایش میرایی، حتی در سازه با زمان تناوب گیرداری ۰/۷۵۴ ثانیه، روند عکس شده و پاسخ افزایش پیدا می‌کند. در خصوص شتاب روسازه نیز، مشابه همین روند مشاهده می‌شود، بدین معنی که در حالات مختلف در هنگام افزایش مقدار میرایی، تأثیر آن عکس شده و باعث افزایش پاسخ‌ها می‌شوند. مقدار میرایی که بعد از آن پاسخ‌ها افزایش می‌یابد باید با توجه به پاسخ‌های مختلف متفاوت است و می‌توان آن را مقدار میرایی بهینه نامید.

با توجه به نمودارهای ۳ تا ۷، مقدار میرایی بهینه برای دو سازه طرح شده نزدیک به هم است. این مسئله با توجه به آن که مقادیر زمان تناوب جداسازی و سایر مشخصات این سازه‌ها مشابه یکدیگر است چندان دور از ذهن نیست. مقدار میرایی ۱۳۸۲۵ نیوتن-ثانیه بر میلی‌متر که ۲۵ درصد میرایی بحرانی سازه بوده را می‌توان برای سازه‌ها با میراگر ویسکوز خطی به عنوان مقدار میرایی بهینه در نظر گرفت.

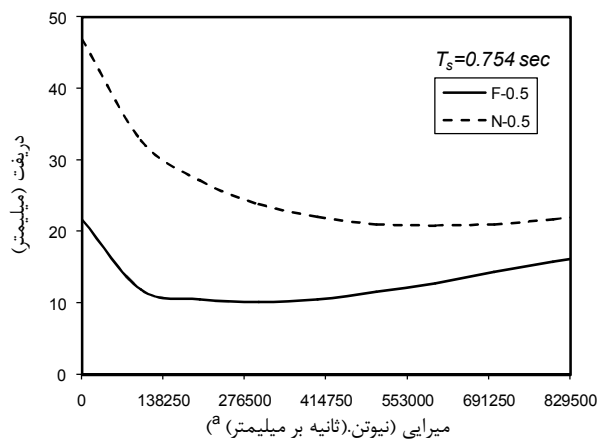
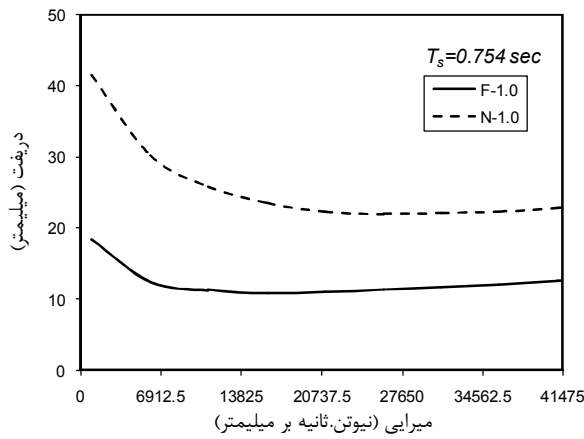
نیروی میراگر در نظر گرفته شده است و مقایسه در سه مقدار میرایی ۱۲/۵، ۲۵ و ۵۰ درصد میرایی بحرانی سازه انجام شده است. روش مقایسه به این صورت است که به عنوان نمونه برای مقایسه در مقدار میرایی ۲۵ درصد، نیروی میراگر در حالت خطی در اثر یک دسته از نگاشت‌ها تعیین و مقدار میرایی غیرخطی دارای مقدار نیروی مشابه نیز مشخص شده و بین این دو حالت مقایسه‌ای انجام می‌شود. نیروی میراگر در دو حالت یکسان است و پاسخ‌های تغییر مکان پایه، تغییر مکان نسبی و شتاب روسازه مقایسه می‌شوند. اختلاف مقدار پاسخ بین حالت خطی و غیرخطی تقسیم بر مقدار پاسخ در حالت خطی، بر حسب درصد برای تمامی پاسخ‌ها محاسبه می‌شود. علامت منفی در کنار این مقادیر نشان‌دهنده‌ی اثر کاهنده‌ی میرایی غیرخطی در برابر میرایی خطی است. مقدار میانگین مقادیر مورد محاسبه برای دو سازه، بر مبنای دو دسته‌ی شتاب‌نگاشت و در سه حالت میرایی در جداول ۵ و ۶ ارائه شده‌اند.

در جداول ۵ و ۶ در هر دو حالت نگاشت‌های دارای پالس و فاقد پالس، پاسخ‌های تغییر مکان پایه و تغییر مکان نسبی روسازه، اثر کاهنده میرایی غیرخطی نسبت میرایی خطی مشهود است. در خصوص شتاب روسازه اثر میرایی غیرخطی چندان قابل توجه نیست و در حالتی نیز اثر آن فزاینده است. برای آن که بتوان دید کلی‌تری نسبت به تأثیر میرایی غیرخطی در مقایسه با میرایی خطی به دست آورد، میانگین نتایج سه حالت میرایی در اثر دو دسته‌ی شتاب‌نگاشت در جدول ۷ ارائه شده است اثر میرایی غیرخطی در کاهش تغییر مکان پایه و تغییر مکان نسبی روسازه در این نتایج تجربی مشهود است.

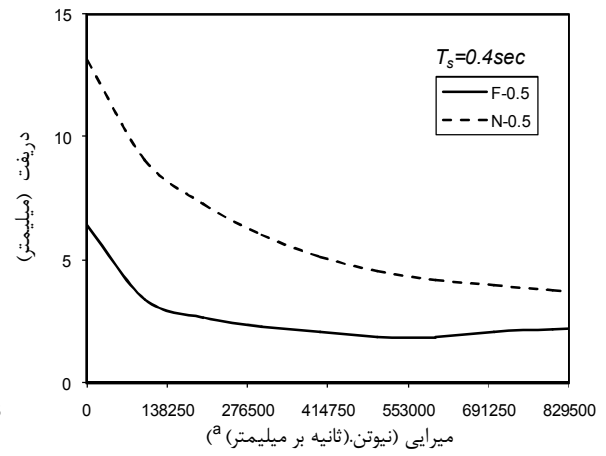
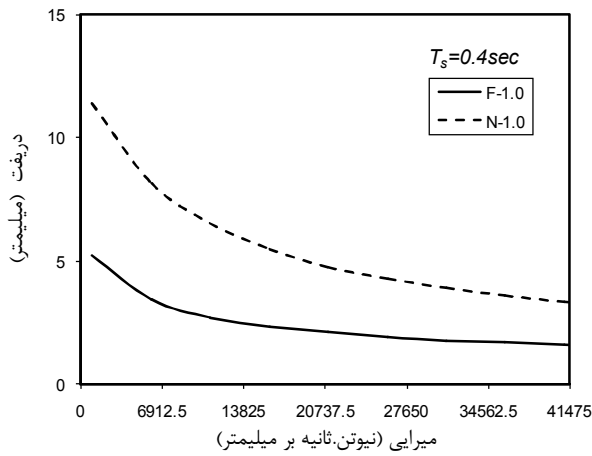
جدول (۵) اختلاف پاسخ‌های ناشی از زمین‌لرزه‌های دارای پالس

(بر حسب درصد)

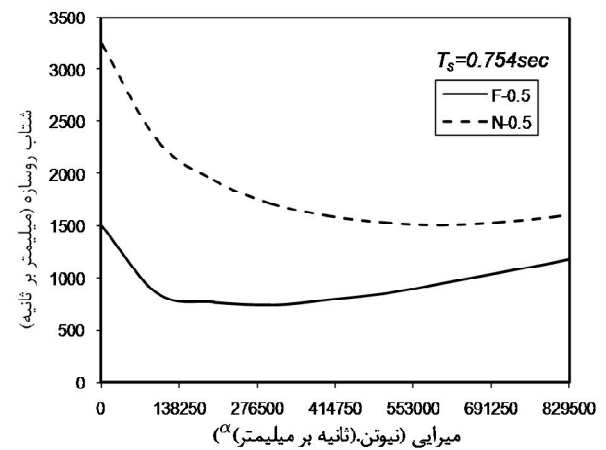
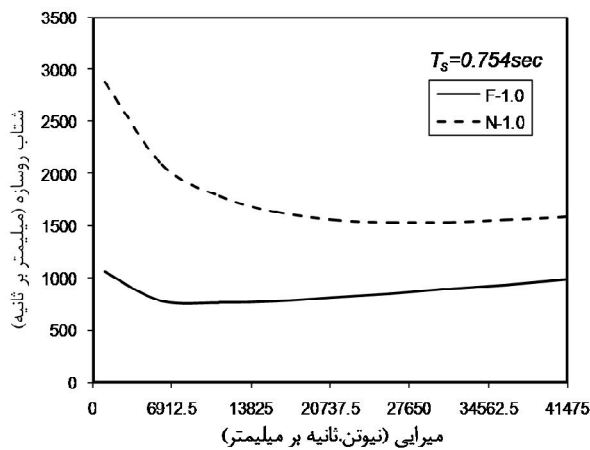
مبنا	ξ (%)	تغییر مکان پایه	دریفت روسازه	شتاب روسازه
نگاشت دارای پالس	۵/۱۲	۱۲-	۸-	۵-
	۲۵	۱۷-	۸-	۴-
	۵۰	۲۲-	۷-	۱-



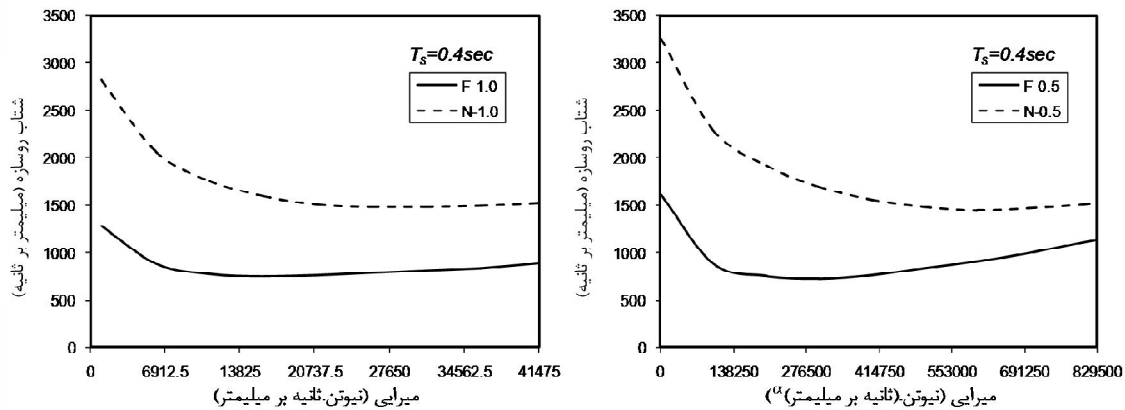
نمودار (۴) دریفت روسازه در اثر نگاشت‌های دارای پالس و فاقد پالس برای سازه با زمان تناوب گیرداری ۰/۷۵۴ ثانیه



نمودار (۵) دریفت روسازه در اثر نگاشت‌های دارای پالس و فاقد پالس برای سازه با زمان تناوب گیرداری ۰/۴ ثانیه



نمودار (۶) شتاب روسازه در اثر نگاشت‌های دارای پالس و فاقد پالس برای سازه با زمان تناوب گیرداری ۰/۷۵۴ ثانیه



نمودار (۷) شتاب روسازه در اثر نگاشت‌های دارای پالس و فاقد پالس برای سازه با زمان تناوب گیرداری ۰/۴ ثانیه

تغییر مکان نسبی و شتاب روسازه نمایانگر وجود مقدار خاصی از میرایی، در هر دو حالت میرایی خطی و غیرخطی، برای هر سازه‌ی جداسازی شده است که میرایی بهینه نامیده می‌شود و در آن، پاسخ‌های مختلف سازه مقادیر مطلوبی دارند.

با افزایش میرایی تغییر مکان پایه کاهش یافته ولی این امر تا حدودی تغییر مکان نسبی و به خصوص شتاب روسازه را افزایش می‌دهد. بنابراین، برای هر سازه‌ی خاصی باید مقدار میرایی بهینه مشخص شود.

برای تأمین میرایی مورد نیاز می‌توان از میراگر خطی و یا غیر خطی بهره گرفت، ولی برای انتخاب میان این دو باید غیر از اثر کاهنده میرایی غیرخطی در پاسخ‌ها، هزینه مربوطه نیز در نظر گرفته شود.

۸- مراجع

- [1]. Skinner, R.I.; Robinson, W.H., McVerry, G.H. "An Introduction to Seismic Isolation", J.Wiley & Sons, London, 1993.
- [2]. Kelly, J.M.; "Seismic Isolation", in Earthquake Engineering: From Engineering Seismology to Performance-Based Engineering, Edited by Bozorgnia, Y, Bertero, V.V., CRC Press, 2004.
- [3]. Hall, J.F., Heaton, T.H., Halling, M.W., Wald, D.J., "Near-source Ground Motion and its Effects on Flexible Buildings", Earthquake Spectra, 1995, 11(4), pp. 560-605.

۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

زمین‌لرزه‌های حوزه‌ی نزدیک دارای پالس با زمان تناوب بالا روی پاسخ‌های مختلف سازه اثر فزاینده دارد و این امر نشانگر لزوم در نظر گرفتن زمین‌لرزه‌ی حوزه‌ی نزدیک در نقاطی است که احتمال رخداد آن وجود دارد. به عنوان نمونه زمین‌لرزه‌ی حوزه‌ی نزدیک باعث افزایش تغییر مکان پایه شده که به منزله‌ی نیاز به استفاده از جداسازهای بزرگ‌تر است.

نتایج مبنا قراردادن نیروی میراگر برای مقایسه‌ی میراگر خطی و غیرخطی با نتایج مطالعات در تغییر مکان [۱۴، ۱۱، ۵] مطابقت دارد.

بررسی‌ها روی میزان اثر میرایی غیرخطی در مقایسه با خطی، نشانگر اثر کاهنده‌ی قابل توجه میرایی غیرخطی بر تغییر مکان پایه است. این اثر در زمین‌لرزه‌های حوزه‌ی نزدیک ۱۷ درصد کاهش و در زمین‌لرزه‌های حوزه‌ی دور نیز برابر ۱۳ درصد کاهش می‌باشد. تغییر مکان نسبی روسازه نیز در حالت میرایی غیرخطی نسبت به میرایی خطی، در زمین‌لرزه‌های حوزه‌ی نزدیک به میزان ۸ درصد و در زمین‌لرزه‌های حوزه‌ی دور نیز ۹ درصد کاهش یافته است. تأثیر میرایی غیرخطی در مقایسه با میرایی خطی بر شتاب روسازه برابر ۳ و ۲ درصد کاهش، به ترتیب در زمین‌لرزه‌های حوزه‌ی نزدیک و حوزه‌ی دور بوده و چندان قابل توجه نیست.

نمودارهای رسم شده برای پاسخ‌های تغییر مکان پایه،

- [10]. Bray, J.D., Rodriguez-Marek, A., "Near-fault Seismic Site Effects", in: U.S.-Japan Workshop on Effects of Near-field Earthquake Shaking, Edited by Whittaker, A.S., Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER Report 2000/02, 2000. pp.39-46.
- [11]. Weitzmann, R., Ohsaki, M., Nakashima, M., "Simplified Methods for Design of Base-isolated Structures in the Long-period High-damping Range", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2006, 35, pp. 497-515.
- [12]. Baker J.W., "Quantitative Classification of Near-fault Ground Motions Using Wavelet Analysis", Bulletin of the Seismological Society of America, 2007, 97(5), pp. 1486-1501.
- [13]. Terenzi, G., "Dynamics of SDOF Systems with Nonlinear Viscous Damping", Journal of Engineering Mechanics, 1999, 125(8), pp. 956-963.
- [14]. Du, Y., Li, H., Spencer Jr., B.F., "Effect of Non-proportional Damping on Seismic Isolation", Journal of Structural Control, 2002, 9(3), pp. 205-236.
- [4]. Heaton, T.H., Hall, J.F., Wald, D.J., Halling, M.W., "Response of High-rise and Base-isolated Buildings in a hypothetical MW 7.0 Blind Thrust Earthquake", Science, 1995, 267, pp. 206-211.
- [5]. Kelly, J.M., "The Role of Damping in Seismic Isolation", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1999, 28(1), pp. 3-20.
- [6]. Jangid, R.S., Kelly, J.M., "Base Isolation for Near-fault Motions", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2001, 30(5), pp. 691-707.
- [۷]. پزشکی، ح.، "مطالعات آزمایشگاهی بر روی یک میراگر ویسکوز غیرخطی کنترل پذیر برای سازه‌های جداسازی شده پایه در حوزه نزدیک"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، پژوهشگاه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۸۸.
- [8]. Somerville, P., 'Characterization of Near-fault Ground Motions', in: U.S.-Japan Workshop on Effects of Near-field Earthquake Shaking, Edited by Whittaker, A.S., Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER Report 2000/02, 2000, pp.22-29.
- [9]. Cox, K.E., Ashford, S.A., "Characterization of Large Velocity Pulses for Laboratory Testing", Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER Report 2002/22, 2002.