



تحلیل غیر خطی پاسخ لرزه‌ای سازه‌های مستقر بر نهشته‌های سطحی و عمیق با در نظر گرفتن اثر خصوصیات ساختگاه و محتوای فرکانسی

اشکان خدابنده لو^{۱*}، وحید علیقلی زاد کردلری^۲

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه

۲- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه

* ارومیه، صندوق پستی ۹۶۹، a.khodabandehlou@iaurmia.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۱۳، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۱۴)

چکیده

ویژگی‌های ساختگاه از جمله نوع، ضخامت و مشخصات لایه‌های خاکی می‌تواند همه‌ی عامل‌های حرکت ورودی زمین مانند شتاب، محتوای فرکانسی و مدت زمان لرزه را دست خوش تغییر نماید. در این پژوهش، به بررسی اثر ساختگاه بر روی پاسخ لرزه‌ای زمین و همچنین پاسخ سازه‌های واقع بر روی این ساختگاه‌ها پرداخته شده است. برای این منظور، تعداد ۱۴ زلزله حوزه نزدیک و دور در نظر گرفته شده و تحلیل پاسخ زمین به روش‌های معادل خطی و روش غیرخطی در چهار ساختگاه مختلف صورت پذیرفته است. علاوه بر این، پاسخ‌های بدست آمده و مدل‌های سازه‌های یک تا چهار طبقه با استفاده از نرم افزار SAP2000 مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. در بیشتر موارد، تحلیل پاسخ زمین مربوط به زمین لرزه‌های حوزه دور و نزدیک به ازای حرکت ورودی لرزه‌ای با عبور از لایه‌های خاکی تقویت شده و شتاب بیشینه نسبت به حرکت لرزه‌ای افزایش می‌یابد. هم چنین، هرچه بیشینه مقدار شتاب ورودی حرکت لرزه‌ای از زلزله‌های حوزه دور کوچک‌تر باشد، تفاوت کمتری بین پاسخ لرزه‌ای به روش خطی و غیرخطی وجود دارد. در مواردی که زلزله حوزه نزدیک با بیشینه شتاب بزرگ برای تحلیل پاسخ استفاده شده است، نتیجه‌های به دست آمده از روش معادل خطی در برخی موارد نشان می‌دهد که صرف نظر از ضخامت لایه‌ی خاک، حرکت ورودی با عبور از خاک تقویت می‌شود. اگرچه با مقایسه نمودارهای شتاب بیشینه در برابر عمق برای زلزله‌های حوزه دور می‌توان نتیجه گرفت که این روند برای همه‌ی نتایج قابل تعمیم نمی‌باشد. در زلزله‌های حوزه دور، بیشینه مقدار جابجایی در عمق با افزایش ضخامت نهشت خاکی به سمت جابجایی‌های بیشتر انتقال می‌یابد. برای ساختمان با طبقه‌های ثابت بر روی نهشت‌های خاکی با عمق‌های سطحی تا عمیق، با افزایش عمق مقدار جابه جایی بیشینه کاهش می‌یابد.

واژگان کلیدی

روش تحلیل غیرخطی، زلزله حوزه دور و نزدیک، پاسخ لرزه‌ای، نهشت خاکی، مفصل پلاستیک

Nonlinear Analysis of Seismic Response Considering the Effects of Site Characteristics and Frequency Content for Shallow and Deep Deposits

A. KhodaBandehLou, V. Aligholizad Kordlari

Abstract

Studies have shown that site characteristics such as properties of soil layers and thickness of layers can affect the movement of ground input and may change the frequency content of acceleration and seismic duration. This paper aims to study the effects on the ground response of the site characteristics and the response of the constructed buildings. To study the site effects on the ground seismic response, 14 far and near-fault earthquake were considered and linear and nonlinear analyses were performed on four different sites. In addition, SAP 2000 software was used to model one to four story buildings and analyze the responses. In general, the ground response linked to the far and near earthquakes increases the seismic input movement, while the earth is transmitted and the maximum seismic movement increases in view of the acceleration. The lower the maximum input rate for the earthquake seismic input, the less the nonlinear and linear responses are. The analysis of the response and the reaction analysis using a linear equivalent approach show that for cases with a larger near-fault earthquake maximum ground acceleration the earthquake is amplified while passing through the soil layer. Comparison of the maximum acceleration charts with the depth of the earthquake of far fault, it may be concluded that the whole result of earthquakes of the far fault earthquakes cannot be generalized. With the increase of the soil deposits thickness, would cause an increase in maximum depth displacement. In shallow and depth cases, the maximum displacement is reduced with depth for the similar story buildings that are superimposed on the soil deposits.

Keywords

Nonlinear analysis, Far and near fault earthquake, Seismic response, Soil deposit, Plastic hinge

نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد ۵۹/



ارزیابی پراکندگی خسارت در زلزله‌های مختلف بیان‌گر اهمیت اثر ساختمان بر ویژگی‌های زمین لرزه می‌باشد [۴-۱]. تحلیل پاسخ زمین برای پیش‌بینی حرکت‌های زمین و ندوین طیف طرح پاسخ به‌منظور تعیین تنش‌ها و کرنش‌های دینامیکی برای ارزیابی خطرهای روان‌گرایی و محاسبه نیروهای ناشی از زلزله که می‌تواند سبب ناپایداری زمین و دیوارهای حایل شود، به‌کار می‌رود. در زلزله‌های پیشین، به‌طور معمول مشاهده شده است که پاسخ زمین در خاک‌های نرم بسته به شرایط خاک، بیش‌تر از پاسخ زمین در منطقه‌های سنگی بوده است [۷-۵].

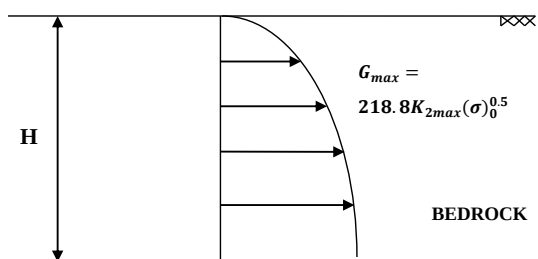
شرایط محلی ساختمان بر همه‌ی ویژگی‌های مهم حرکت زمین شامل دامنه، محتوای فرکانسی و مدت زمان آن اثر قابل ملاحظه‌ای می‌گذارند [۸]. میزان این اثرگذاری تابع هندسه، ویژگی‌های لایه‌های زیرسطحی، توپوگرافی ساختمان و ویژگی‌های حرکت ورودی می‌باشد. طبیعت اثرهای محلی ساختمان را می‌توان با بهره‌گیری از روش‌های مختلف مانند تحلیل تئوری پاسخ زمین، اندازه‌گیری حرکت‌های واقعی سطحی و زیرسطحی در همان ساختمان و اندازه‌گیری حرکت‌های سطح زمین در ساختمان‌هایی با شرایط متفاوت با ساختمان مورد نظر ارزیابی کرد [۹]. در حالت ایده‌آل در یک تحلیل کامل پاسخ زمین، ساز و کار گسیختگی در سرچشمه زلزله الگوسازی می‌شود، چگونگی انتشار تنش از میان زمین در بالای بستر سنگی در زیر یک ساختمان ویژه مشخص می‌شود و چگونگی اثر لایه‌ی خاک بالای بستر سنگی بر حرکت‌های سطح زمین مشخص می‌شود. در حقیقت، ساز و کار گسیختگی به حدی پیچیده است و طبیعت انتقال انرژی بین منبع و ساختمان به حدی نامعین می‌باشد که این روند برای کاربردهای معمول مهندسی عملی نیست. در عمل، روش‌های تجربی بر پایه‌ی ویژگی‌های زلزله‌ی ثبت‌شده جهت تعیین رابطه‌های تخمینی به‌کار می‌روند [۱۰ و ۱۱]. در بیشتر موردها، رابطه‌های تخمینی به‌همراه تحلیل خطر زلزله برای پیش‌بینی ویژگی‌های حرکت در بستر سنگی در ساختمان به‌کار می‌روند. از این رو، مساله‌ی تحلیل پاسخ زمین در حقیقت به تعیین پاسخ توده‌ی خاک در برابر حرکت بستر سنگی زیر آن تبدیل خواهد شد. با وجود این حقیقت که موج‌های زلزله از میان ده‌ها کیلومتر سنگ و در بیشتر موردها کم‌تر از ۱۰۰ متر خاک عبور می‌کند، لایه‌ی خاک نقش بسیار مهمی در تعیین ویژگی‌های حرکت سطح زمین ایفا می‌کند [۱۴-۱۲].

سال‌ها است که اثر شرایط محلی خاک بر طبیعت خرابی‌های زلزله شناخته شده است [۱۵]. از سال‌های ۱۹۲۰، زلزله‌شناسان و مهندسان ژئوتکنیک لرزه‌ای برای تدوین روش‌های کمی به‌منظور پیش‌بینی اثر شرایط محلی خاک بر حرکت زمین کار می‌کنند [۱۸-۱۶]. برای تحلیل پاسخ زمین، ساختمان را می‌توان به صورت‌های یک‌بعدی، دوبعدی و سه‌بعدی در نظر گرفت. تحلیل‌های یک‌بعدی پاسخ زمین بر پایه‌ی این فرض استوار است که سطح زمین و مرز همه‌ی لایه‌های زیر سطح زمین افقی بوده و در همه‌ی جهت‌ها نامحدود می‌باشد. اگرچه، این فرض همه‌ی شرایط را برقرار نمی‌کند ولی در کاربردهای مهندسی برای بسیاری از ساختمان‌ها مناسب است. در بسیاری از پژوهش‌ها [۱۷ و ۱۸]، روش‌های دوبعدی و سه‌بعدی نیز به‌طور معمول توسعه‌یافته‌ی روش‌های یک‌بعدی هستند. در واقع، مبنای کلی روش‌های دوبعدی و سه‌بعدی بهره‌جویی از روش‌های ساده‌تر یک‌بعدی و گسترش آن‌ها در ابعاد دیگر است. روش‌های تحلیل پاسخ زمین بر پایه‌ی ابعاد مساله به روش‌های خطی، خطی معادل و غیرخطی طبقه‌بندی می‌شوند.

در روش خطی، با محاسبه‌ی تابع تبدیل خاک ساختمان، عامل‌های مختلف پاسخ مانند جابجایی، سرعت، شتاب، تنش برشی و کرنش برشی بر حسب یکی از عامل‌های حرکت ورودی مانند شتاب بستر سنگی، تعیین می‌شوند [۱۹]. از آن‌جا که این روش بر پایه‌ی اصل برهم‌نهی استوار است، تنها به تحلیل سامانه‌های خطی محدود می‌شود. اگرچه، محاسبات بر اساس عملیات اعداد مختلط است، ولی خود روش بسیار ساده می‌باشد. به‌طور معمول، تاریخچه‌ی زمانی حرکت بستر سنگی (حرکت ورودی) با استفاده از تبدیل فوریه سریع به‌صورت سری فوریه در نظر گرفته می‌شود. سپس، هر جمله از سری فوریه حرکت بستر سنگی در تابع تبدیل ضرب می‌شود تا سری فوریه‌ی حرکت سطح زمین (حرکت خروجی) به‌دست آید. آن‌گاه، حرکت سطح زمین را می‌توان با بهره‌گیری از معکوس تبدیل فوریه در حوزه‌ی زمان بیان کرد [۲۰]. از این رو، تابع تبدیل چگونگی تشدید یا میرایی هر فرکانس در حرکت بستر سنگی (حرکت ورودی) را به کمک توده‌ی خاک تعیین می‌کند.

در روش خطی معادل، رفتار واقعی غیرخطی رفت و برگشتی تنش-کرنش خاک‌های بارگذاری‌شده را می‌توان با در نظر گرفتن ویژگی‌های معادل خاک تعیین کرد [۲۱]. مدول برشی معادل خاک به‌طور معمول به‌صورت برشی سکانت و





شکل ۱- شماتیکی از نهشت خاکی [۲۸]

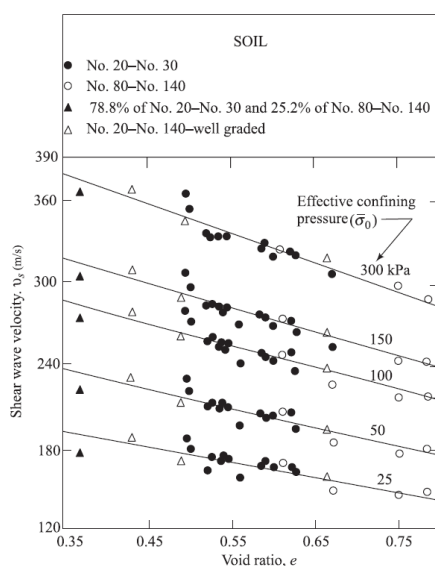
جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی خاک ماسه‌ای

نوع خاک	وزن مخصوص خشک خاک (kN/m ³)	تخلخل خاک e	چگالی نسبی خاک Gs
ماسه	۱۸/۵۶	۰/۴	۲/۶۵

نباشد، می‌بایست به روابط تجربی که برخی از پژوهش‌گران برای برآورد سرعت موج برشی و بیشینه مدول برشی ارایه کرده‌اند، بسنده کرد [۲۶ و ۲۷].

$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad (۱)$$

در این میان، از پژوهش‌گران پیشگام، می‌توان به Hardin و Richart اشاره نمود. آن‌ها نتیجه‌های آزمایش‌های ستون تشدید^۱ بر روی ماسه اتاوا^۲ را در حالت خشک ارایه کردند [۲۸]. مدول برشی محاسبه شده برای نمونه‌ها با ویژگی‌های مختلف در شکل (۲) آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سرعت موج برشی نسبت به چگونگی دانه‌بندی و همچنین چگالی نسبی خاک مستقل است ولی به نسبت تخلخل خاک و فشار محفظه موثر وابسته می‌باشد.



شکل ۲- تغییرات موج برشی با فشار محفظه‌ای موثر برای ماسه گرد

گوشه اتاوا [۲۸]

ضریب میرایی معادل خاک به صورت ضریب میرایی که اتلاف انرژی یکسانی با آن چه که منحنی رفت و برگشتی مربوط به یک چرخه واقعی ایجاد می‌کند، در نظر گرفته می‌شود.

تحلیل پاسخ غیرخطی واقعی توده‌ی خاک با بهره‌گیری از انتگرال‌گیری مستقیم در حوزه‌ی زمان انجام می‌شود [۲۱]. با انتگرال‌گیری از معادله‌ی حرکت در گام‌های کوتاه زمان، هر مدل تنش - کرنش خطی یا غیرخطی یا مدل رفتاری پیچیده‌ای را می‌توان ارزیابی کرد. در ابتدای هر گام زمانی به رابطه‌ی تنش-کرنش رجوع می‌شود تا ویژگی‌های مناسب خاک که بایستی در آن گام زمانی به کار روند، تعیین می‌شود [۲۲ و ۲۳]. با این روش، یک رابطه‌ی تنش - کرنش غیرخطی ناکشان را می‌توان در یک مجموعه گام‌های کوچک خطی به کار برد.

در این مقاله، به بررسی اثر ساختگاه بر روی پاسخ لرزه‌ای زمین و همچنین پاسخ سازه‌های واقع بر روی این ساختگاه‌ها پرداخته می‌شود. برای این منظور، تعداد ۱۴ زلزله حوزه نزدیک و دور در نظر گرفته شده و تحلیل پاسخ زمین به روش‌های معادل خطی و روش غیرخطی در چهار ساختگاه مختلف صورت می‌پذیرد. علاوه بر این، با استفاده از پاسخ‌های بدست آمده و مدل‌های سازه‌های یک تا چهار طبقه مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد.

۲- روش تحقیق

در این پژوهش، نهشت رسوبی یکنواختی (شکل (۱)) از جنس ماسه در نظر گرفته شده است. از طرف دیگر، کل ستون خاکی در حالت کاملاً خشک ارزیابی می‌شود. علت این امر، جلوگیری از اثر اضافه فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در حین زلزله و به دنبال آن، اثرهای ناشی از روانگرایی بر روی پاسخ لرزه‌ای زمین است که باعث پیچیده شدن تحلیل نتیجه‌های به دست آمده می‌شود [۲۴]. از دیگر علت‌های در نظر گرفتن ستون خاکی به صورت خشک، هماهنگی بیشتر با هدف این پژوهش که بررسی تاثیر روش تحلیل بوده است و نیز انتخاب روش تحلیل معادل خطی بر اساس فرضیات و مدل رفتاری است که توانایی محاسبه‌ی پاسخ زمین در حالت تنش موثر را ندارد. ویژگی‌های فیزیکی خاک ماسه‌ای که برای مدلسازی‌های نرم‌افزاری مورد استفاده قرار گرفته است در جدول (۱) آورده شده است.

برای تعیین ویژگی‌های دینامیکی خاک‌ها، به برخی از عامل‌ها مانند بیشینه مدول برشی خاک، G_{max} ، نیاز می‌باشد [۲۵]. اگر آزمایش‌های درجا برای تعیین سرعت موج برشی، V_s ، و به دنبال آن تعیین G_{max} به کمک رابطه‌ی (۱) در دسترس

رابطه‌های (۲) و (۳) بر اساس نتیجه‌های نمودار شکل (۲) به صورت زیر ارایه شده است [۲۸].

$$V_s = (19.76 - 9.06e)\sigma_0^{1/4}, \sigma_0 \geq 95.8 \text{ kPa} \quad (2)$$

$$V_s = (11.36 - 5.35e)\sigma_0^{1/4}, \sigma_0 < 95.8 \text{ kPa} \quad (3)$$

بعدها Hardin and black (۱۹۶۸) رابطه‌ای برای مدول برشی بیشینه‌ی ماسه تحت حرکت دینامیکی با دامنه کوچک به صورت زیر ارایه کردند:

$$G_{max} = \frac{6908(2.17 - e)^2}{1 + e} \sigma_0^{1/2} \quad (4) \quad \text{خاک گرد گوشه}$$

$$G_{max} = \frac{3230(2.97 - e)^2}{1 + e} \sigma_0^{1/2} \quad (5) \quad \text{گوشه‌دار}$$

جائیکه e تخلخل خاک، σ_0 فشار محفظه‌ای می‌باشد.

پژوهش‌گران فراوانی (به طور مثال Weissman و Hart (۱۹۶۱)، Richart و همکارانش (۱۹۶۲)، Silver و Seed (۱۹۶۹)، Hardin و Drnevich (۱۹۷۲)، Shibata و Soelarno (۱۹۷۵) و Iwasaki و همکارانش (۱۹۷۶)) نتیجه‌های به دست آمده از اندازه‌گیری مدول برشی و نسبت میرایی خاک‌ها را با استفاده از گونه‌های مختلف آزمون‌های ژئوتکنیکی ارایه داده‌اند [۴، ۱۶، ۲۱، ۲۴ و ۳۱-۲۹]. خلاصه‌ی نتیجه‌ها نشان می‌دهند که مدول برشی بیشینه می‌تواند به صورت رابطه‌ی (۶) توصیف شود:

$$G_{max} = 218.8 K_{2max} (\sigma)^{0.5} \quad (6)$$

در رابطه‌ی (۶)، مقدار K_{2max} از مقدار ۳۰ برای ماسه سست تا مقدار ۷۵ برای ماسه متراکم متغیر است. Seed و Idriss (۱۹۷۰) مقدارهای جدول (۲) را برای K_{2max} پیشنهاد می‌دهند.

جدول ۲- مقادیر پیشنهادی K_{2max} کرامر (۱۹۹۶)

K_{2max}	D_r (%)	K_{2max}	e
۳۴	۳۰	۷۰	۰/۴
۴۰	۴۰	۶۰	۰/۵
۴۳	۴۵	۵۱	۰/۶
۵۲	۶۰	۴۴	۰/۷
۵۹	۷۵	۳۹	۰/۸
۷۰	۹۰	۳۴	۰/۹

در این مقاله نیز، از رابطه‌ی (۶) برای محاسبه‌ی مدول برشی بیشینه استفاده شده است.

در این پژوهش، ۱۴ عدد شتاب‌نگاشت از سایت peer.berkeley [۳۲] استخراج گردیده است که از بین آن‌ها، ۶ عدد مربوط به زلزله‌های حوزه دور و ۸ عدد مربوط به زلزله‌های حوزه نزدیک است که کم‌تر از ۲۵ کیلومتر از محل گسیختگی گسل فاصله دارند. برخی از این زلزله‌ها، بر روی سایت نوع A ($v_s > 750 \text{ m/s}$) و برخی دیگر بر روی نوع B و C ثبت شده‌اند. در این مقاله، شتاب‌نگاشت‌هایی که بر روی سایت B و C قرار گرفته‌اند، ابتدا به کمک نرم افزار DEEPSOIL به شتاب‌نگاشت واقع بر روی سایت A تبدیل و سپس به عنوان حرکت ورودی به برنامه معرفی شدند. ویژگی‌های شتاب‌نگاشت‌های به کار رفته در جدول (۳) گزارش شده است.

جدول ۳- شتاب‌نگاشت‌های استخراج شده از وبسایت peer.berkeley

بزرگا (M)	PGA (g)	طبقه‌بندی سایت USGS پس از تبدیل	فاصله از محل گسیختگی گسل	رکورد شتاب‌نگاشت
۶/۱۹	۰/۰۳۴	A	۳۱/۱۹	Chalfant Valley-000
۶/۱۹	۰/۰۴۶	A	۳۰/۸	Chalfant Valley-090
۶/۳۶	۰/۰۲۵	A	۵۵/۷۷	Coalinga-270
۶/۳۶	۰/۰۲۸	A	۵۴/۷۷	Coalinga-360
۷/۳۶	۰/۰۹۲	A	۳۸/۸۹	Kern County-21
۷/۳۶	۰/۱۰۵	A	۳۸/۸۹	Kern County-11
۶/۷۶	۰/۹۲	A	۹/۶	Nahanni-1010
۶/۷۶	۱/۰	A	۹/۶	Nahanni-1280
۶/۶۹	۰/۲۵۹	A	۵/۹۲	Northridge-LDM064
۶/۶۹	۰/۳۵۱	A	۵/۹۲	Northridge-LDM334
۵/۶۱	۰/۰۶۶	A	۲۵/۶۹	Sierra madre-180
۵/۶۱	۰/۰۵۵	A	۲۵/۶۹	Sierra madre-90
۶/۶۱	۱/۲۱	A	۱/۸۱	San Fernando-164
۶/۶۱	۱/۲۳	A	۱/۸۱	San Fernando-254

به منظور بررسی تأثیرات عمق نهشت خاکی، ۴ حالت نهشت خاکی نسبتاً سطحی تا عمیق با ویژگی‌های فیزیکی یکنواخت در نظر گرفته شده است، که به شرح جدول (۴) می‌باشد.



جدول ۴- حالت‌های مختلف تحلیلی

حالت	عمق (m)	نوع آنالیز
M1	۳۷	NL,EL
M2	۷۵	NL,EL
M3	۱۲۵	NL,EL
M4	۱۷۵	NL,EL

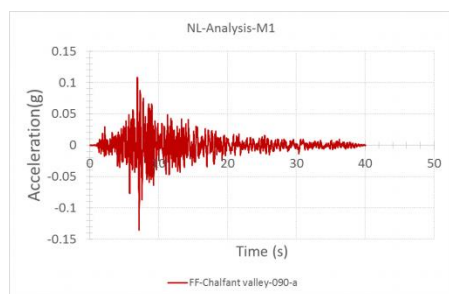
۳- تجزیه و تحلیل داده‌ها

۳-۱- تحلیل تاریخچه زمانی شتاب

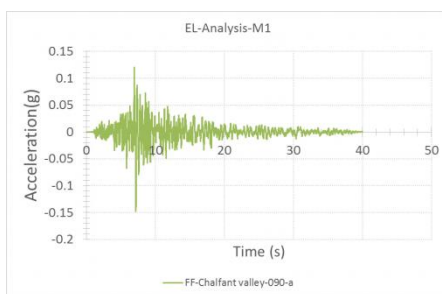
شکل‌های (۳) و (۴)، به ترتیب، تاریخچه‌ی زمانی شتاب حرکت ورودی و پاسخ لرزه‌ای زمین را برای دو مورد از رکوردهای

لرزه‌ای از موردهای ۱ تا ۴ تحلیلی تحت روش‌های معادل خطی و غیر خطی را نشان می‌دهد.

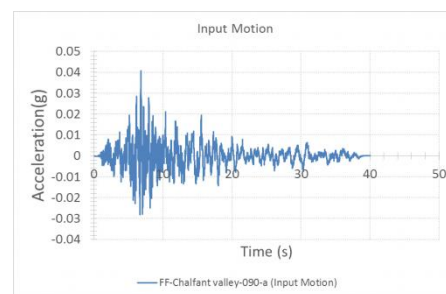
همان‌طور که در شکل‌های (۳) و (۴) مشاهده می‌شود، برای زلزله‌ی Chalfant Valley که یک زلزله‌ی حوزه دور و با بیشینه شتاب $0.4g$ می‌باشد، نتیجه‌های به دست آمده از تحلیل‌های خطی و معادل خطی پاسخ سطح زمین، شباهت بسیاری از لحاظ محتوای لرزه‌ای و بیشینه شتاب ورودی به هم دارد. با مقایسه‌ی نتیجه‌های پاسخ لرزه‌ای زلزله‌ی San Fernando که زلزله‌ی حوزه نزدیک با بیشینه شتاب $1.24g$ می‌باشد، می‌توان دریافت که علاوه بر اینکه تحلیل به روش معادل خطی باعث افزایش شتاب بیشینه حرکت ورودی می‌شود، قسمت‌هایی از زلزله با محتوای فرکانسی بالا هم در پاسخ لرزه‌ای زمین فیلتر می‌گردند.



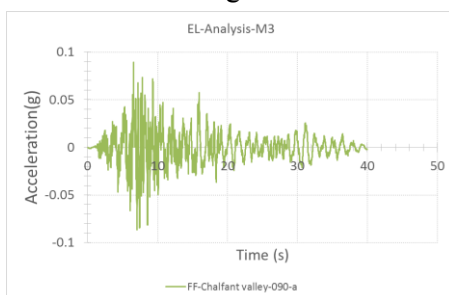
(ج)



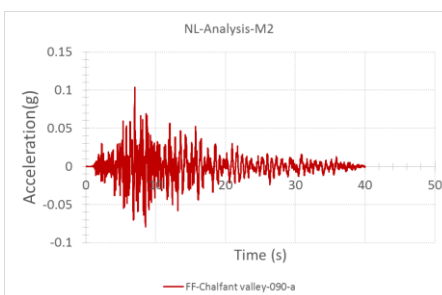
(ب)



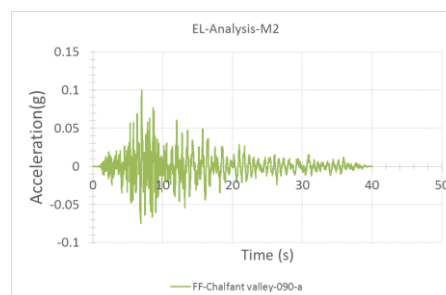
(الف)



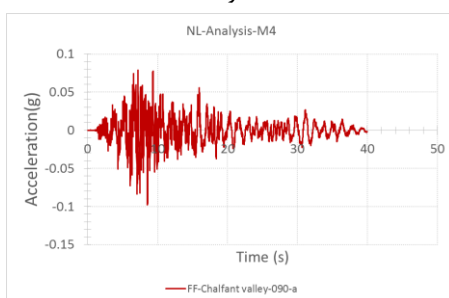
(و)



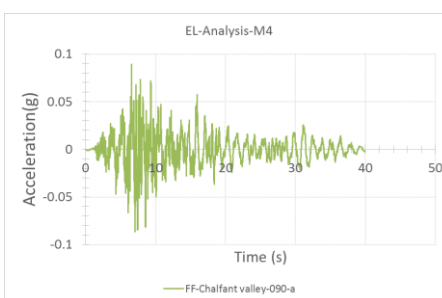
(ه)



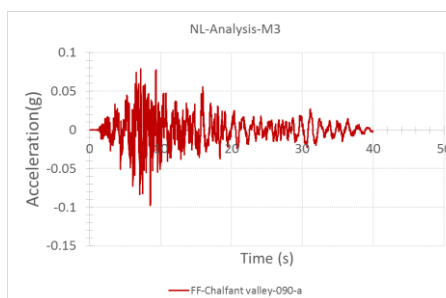
(د)



(ط)

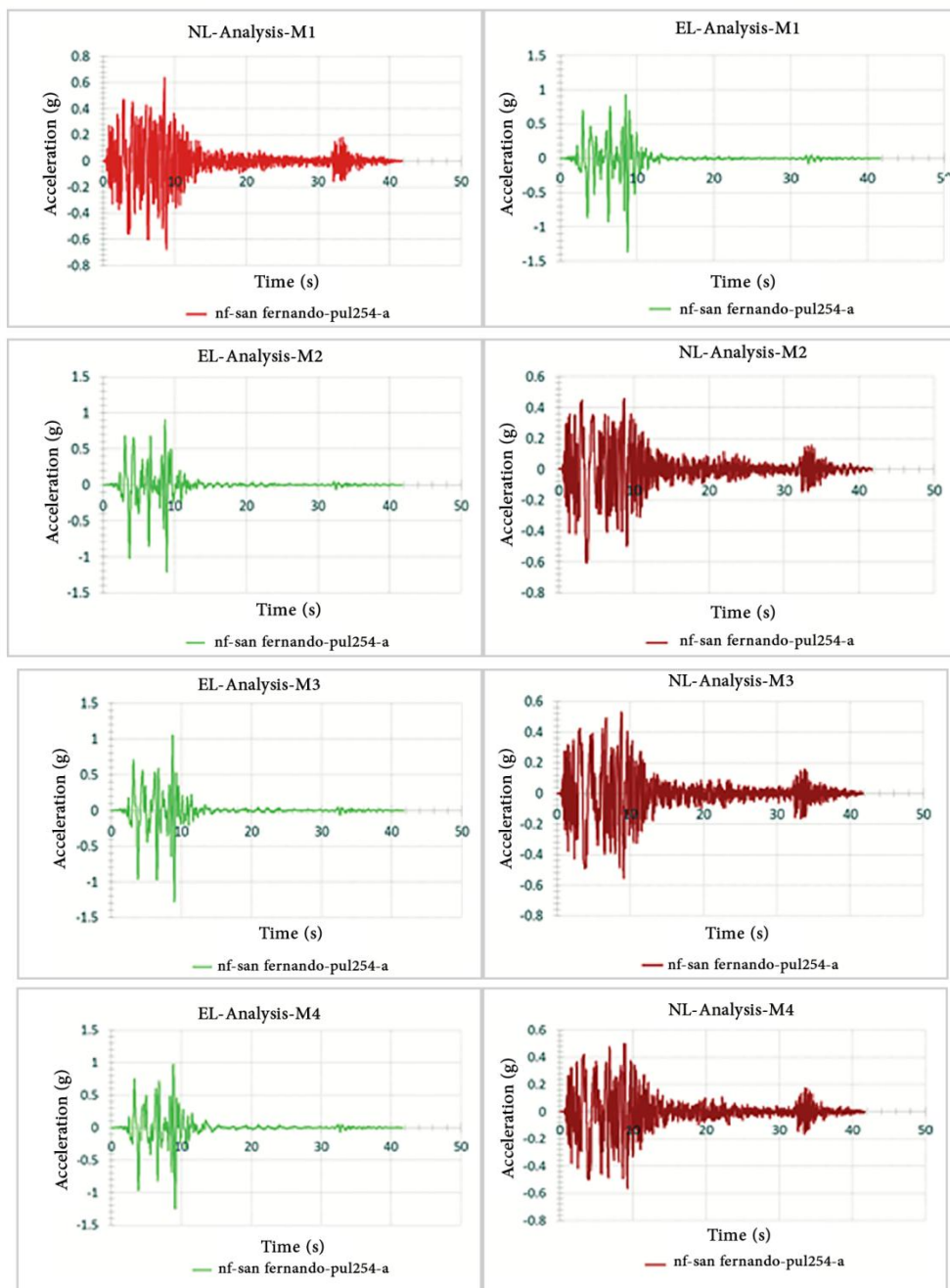
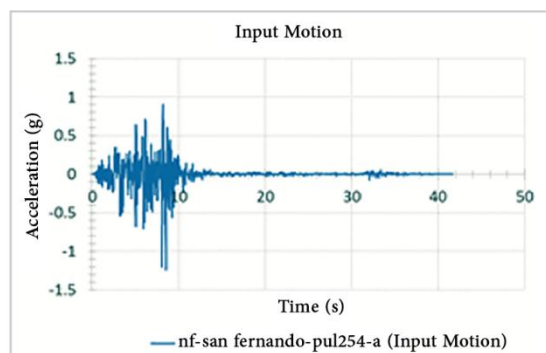


(ح)



(ز)

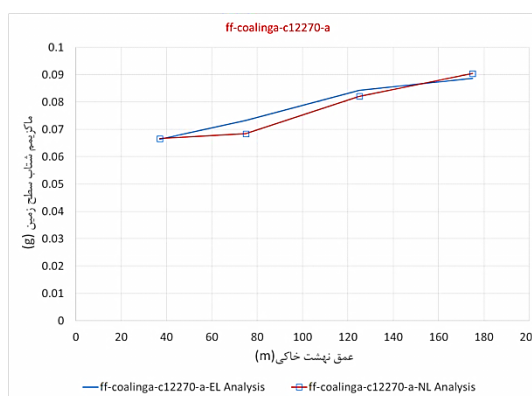
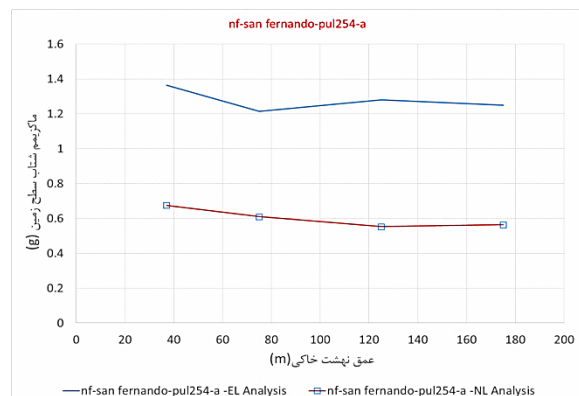
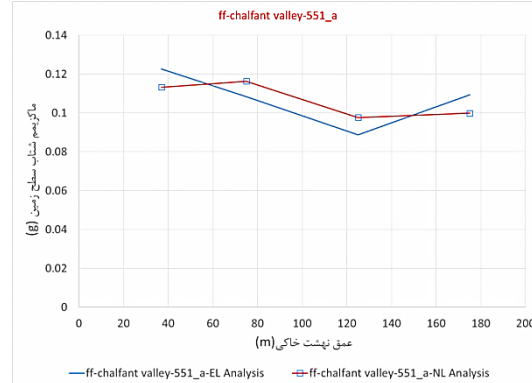
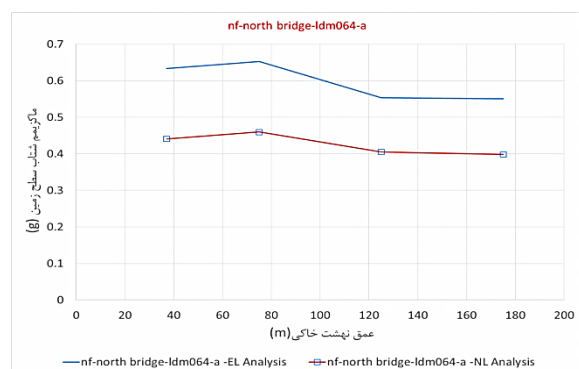
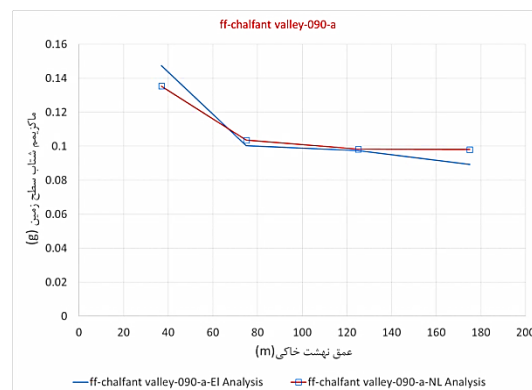
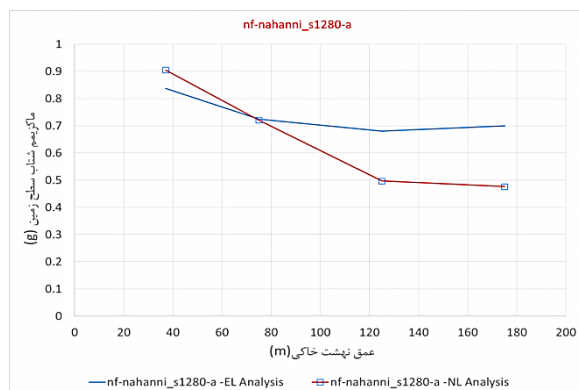
شکل ۳- تاریخچه زمانی شتاب ورودی و پاسخ لرزه‌ای سطح زمین به روش معادل خطی و غیرخطی - برای موردهای M1, M2, M3 و M4 زلزله Chalfant Valley-090



شکل ۴- تاریخچه زمانی شتاب ورودی و پاسخ لرزه‌ای سطح زمین به روش معادل خطی و غیرخطی - برای موردهای M1، M2، M3 و M4
زلزله San Fernando

این در حالی است که، علاوه بر این که در تحلیل غیرخطی، بیشینه شتاب ورودی کاهش می‌یابد، اختلاف فراوانی که محتوای فرکانسی با تحلیل معادل خطی دارد در فرکانس های بالاتر نیز حفظ می‌شود.

۳-۲- تحلیل بیشینه شتاب پاسخ لرزه‌ای سطح زمین
بیشینه شتاب سطح زمین برای ۳ زلزله حوزه دور با مقادیرهای شتاب بیشینه پایین و ۳ زلزله حوزه نزدیک با شتاب بیشینه به نسبت بالا در شکل (۵) نشان داده شده است.



(ب)

(الف)

شکل ۵- بیشینه شتاب سطح زمین برای (الف) زلزله‌های حوزه دور (ب) زلزله‌های حوزه نزدیک

همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، برای تمامی زلزله‌های حوزه دور، بیشینه شتاب سطح زمین در تمامی حالت‌ها با ضخامت نهشت خاکی متفاوت، بیشتر از شتاب حرکت ورودی می‌باشد. به عنوان نمونه، بیشینه شتاب حرکت ورودی برای زلزله Chalfant Valley-000، $0.034g$ است

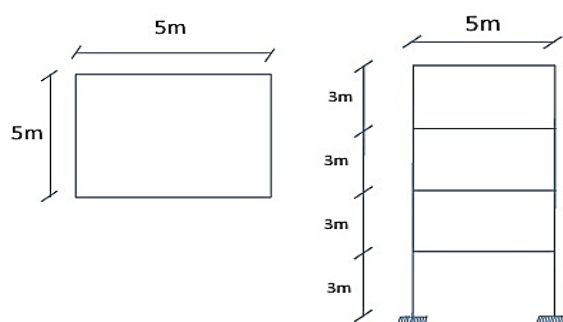
در حالی که بیشینه شتاب پاسخ لرزه‌ای در سطح زمین برای تمامی حالت‌ها، بزرگتر از $0.08g$ می‌باشد و با افزایش عمق تغییر چندانی نمی‌کند. اگرچه در ظاهر، نمودارها روند نزولی را در هر دو روش تحلیل معادل خطی و غیرخطی به خود گرفته‌اند. علاوه بر آن، نتیجه‌های به دست آمده از دو روش معادل خطی و



برای تمامی حالت‌ها، روندی افزایشی با شیب به نسبت تند تا سطح زمین مشاهده می‌شود. با مقایسه‌ی نتیجه‌های زلزله‌ی ff-Coalinga-c12270-a می‌توان دریافت که با افزایش ضخامت نهشت خاکی به ترتیب از M1 تا M4، نمودار شتاب بیشینه در برابر عمق به سمت راست نمودار یعنی شتاب‌های بزرگ‌تر جابجا شده است. اگرچه، این نتیجه را نمی‌توان به موردی دیگر تعمیم داد. با مقایسه‌ی نتیجه‌های پاسخ لرزه‌ای زلزله‌ی nf-San Fernando-pul254-a مشاهده می‌شود که بر خلاف تحلیل پاسخ زمین به روش معادل خطی، که در آن بیشینه شتاب روندی افزایشی را از عمق تا سطح زمین طی می‌کند، در روش تحلیل غیر خطی این روند به‌طور تقریبی نزولی است و مقدار آن در سطح نسبت به عمق کم‌تر می‌باشد.

۳-۴- تحلیل سیستم‌های سازه‌ای قاب خمشی

در این مقاله، سیستم‌های سازه‌ای قاب خمشی فولادی با شکل پذیری متوسط مورد بررسی قرار گرفته است. این سازه‌ها در حالت ۱ تا ۴ طبقه در نظر گرفته شده‌اند و بر اساس آیین‌نامه‌ی AISC [۳۳] و استاندارد ۲۸۰۰ [۳۴] و به کمک روش تنش مجاز با استفاده از نرم افزار SAP2000_v14.2.2 [۳۵] طراحی شده‌اند. فولاد مورد استفاده در سازه‌ها برای تیرها و ستون‌ها یکسان و از نوع St37 با تنش مجاز $(F_y = 2400 \text{ kg/cm}^2)$ می‌باشد. طراحی لرزه‌ای ساختمان‌ها بر مبنای منطقه‌ای با خطر نسبی خیلی زیاد و نوع خاک II انجام شده است. مطابق شکل (۷)، مدل ساختمان‌ها دارای پلان ۵×۵ متر و ارتفاع طبقه‌هایی به اندازه‌ی ۳ متر است. مقطع‌های تیر و ستون حالت‌های مختلف قاب‌های خمشی در شکل (۸) نشان داده شده است.



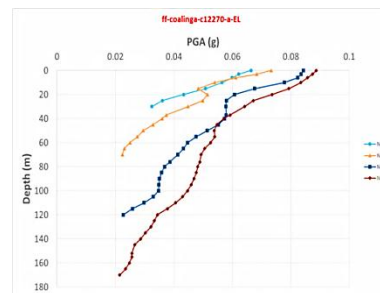
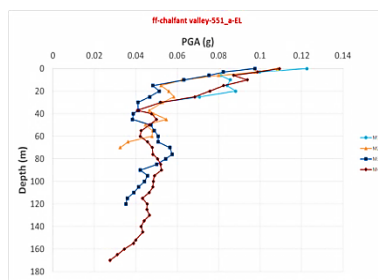
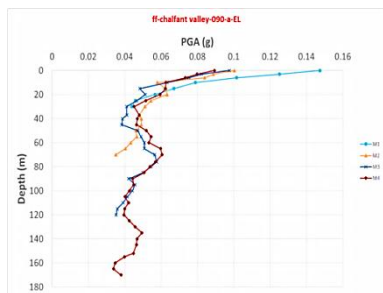
شکل ۷- پلان و نمای دو بعدی سازه

غیرخطی بسیار نزدیک به هم است و روند آن به‌طور تقریبی مشابهی را با افزایش ضخامت لایه‌ی خاکی طی می‌کنند. علت این امر را می‌توان در پایین بودن دامنه‌ی کرنش‌های ایجاد شده در خاک دانست. از این رو، با توجه به این مساله که در تحلیل معادل خطی، مقدارهای نسبت مدول برشی و نسبت میرایی ثابت می‌باشد، در صورت تغییر اندک کرنش در طول زلزله، مقدارهای به‌دست آمده بسیار نزدیک به مقدارهای به‌دست آمده از تحلیل غیرخطی خواهد بود. مقایسه‌ی نتیجه‌های به‌دست آمده از تحلیل پاسخ لرزه‌ای زلزله‌های حوزه نزدیک (شکل ۷-ب) نشان می‌دهد که در مورد زلزله‌هایی که شتاب بیشینه‌ی لرزه‌ای حرکت ورودی به نسبت کوچک می‌باشد (به طور مثال زلزله Northridge-LDM064 با بیشینه شتاب ۰/۲۵۹g) مقدارهای شتاب بزرگ‌تر از حرکت ورودی برای پاسخ لرزه‌ای سطح زمین برای تمامی حالت‌ها با ضخامت‌های مختلف مشاهده می‌شود. بر خلاف این، برای زلزله‌های با بیشینه شتاب ورودی بزرگ‌تر، مقدارهای بیشینه شتاب پاسخ در سطح زمین کوچک‌تر از مقدار متناظر آن در حرکت ورودی می‌باشند. علاوه بر نتیجه‌های پیشین، مقدارهای به‌دست آمده از تحلیل به روش غیرخطی به طور قابل ملاحظه‌ای کم‌تر از مقدارهای متناظر آن در روش معادل خطی می‌باشد. با مقایسه‌ی نتیجه‌های زلزله‌ی San Fernando-254 با بیشینه شتاب ۱/۲۳g به‌طور واضح مشاهده می‌شود که مقدارهای به‌دست آمده از روش تحلیل معادل خطی، بزرگ‌تر از شتاب ورودی است، در حالی که مقدارهای شتاب بیشینه پاسخ لرزه‌ای سطح زمین برای تمامی حالت‌ها از روش تحلیل غیرخطی کم‌تر از بیشینه شتاب ورودی می‌باشد و نزدیک به ۵۰ درصد با مقدارهای متناظر آن از روش معادل خطی اختلاف دارد.

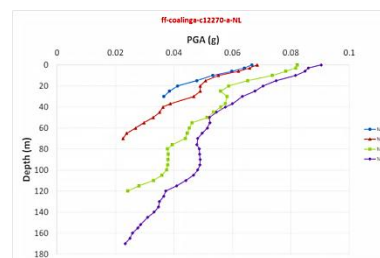
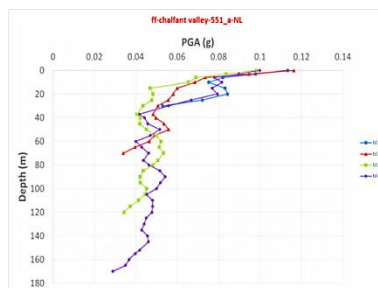
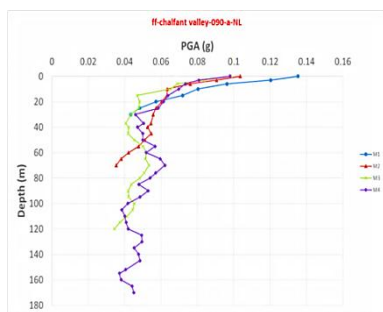
۳-۳- تحلیل حداکثر شتاب پاسخ لرزه‌ای در برابر عمق

مقدارهای شتاب بیشینه در برابر عمق برای هر یک از حالت‌های M1 تا M4 از چند مورد از زلزله‌های تحلیلی در شکل (۶) نشان داده شده است.

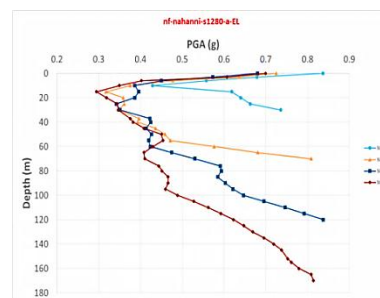
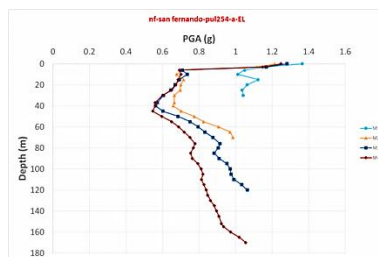
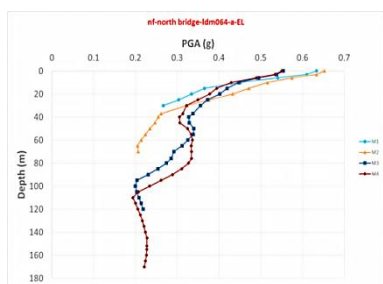
به‌طور نمونه، برای زلزله‌ی ff-Chalfant Valley-090-a نتیجه‌های به‌دست آمده از دو روش معادل خطی و غیرخطی مشابه یکدیگر می‌باشد. در مورد روند تغییرهای شتاب در عمق، برای تمامی حالت‌ها نمی‌توان قضاوت مشخصی را داشت، ولی، به نظر می‌رسد که شتاب بیشینه حرکت روند افزایشی را از عمق تا سطح زمین طی می‌کند. اگرچه، مقدارهای شتاب در نزدیکی عمق ۳۰ متری دچار یک کاهش نسبی می‌شود، پس از این عمق،



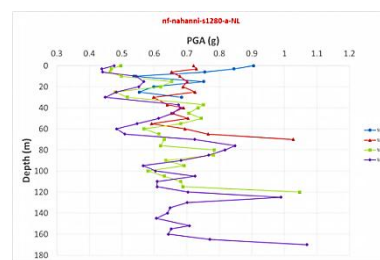
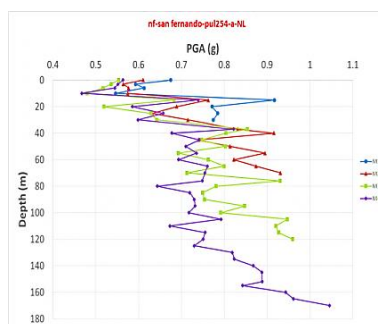
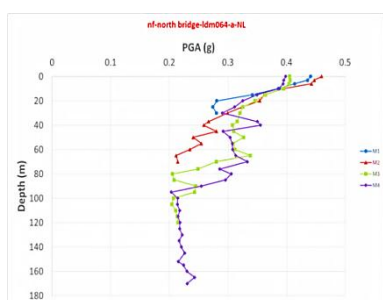
(الف)



(ب)

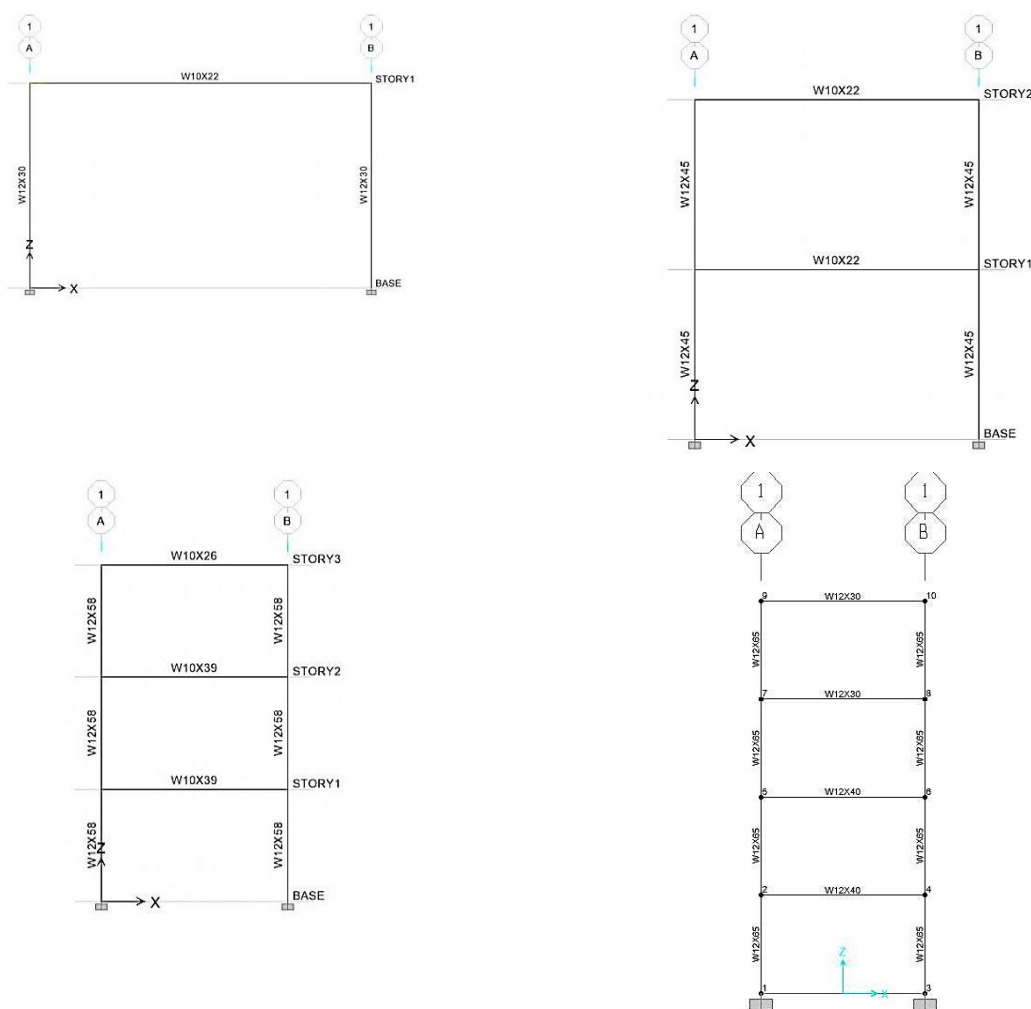


(ج)



(د)

شکل ۶- نمودارهای بیشینه شتاب در عمق زلزله‌های (الف) حوزه دور در حالت آنالیز معادل خطی، (ب) حوزه دور در حالت آنالیز غیر خطی، (ج) حوزه نزدیک در حالت آنالیز معادل خطی و (د) حوزه نزدیک در حالت آنالیز معادل خطی



شکل ۸- مقطع‌های تیر و ستون قاب‌های خمشی

جابجایی‌های افقی سازه دو طبقه به‌دست آمده از تحلیل تاریخیچه زمانی خطی در حالت‌های مختلف ساختگاه در برابر زلزله‌های متفاوت در شکل (۱۰) نشان داده شده است. در این شکل، node2 بیانگر جابجایی افقی طبقه‌ی نخست و node5 بیانگر جابجایی افقی طبقه‌ی دوم می‌باشد.

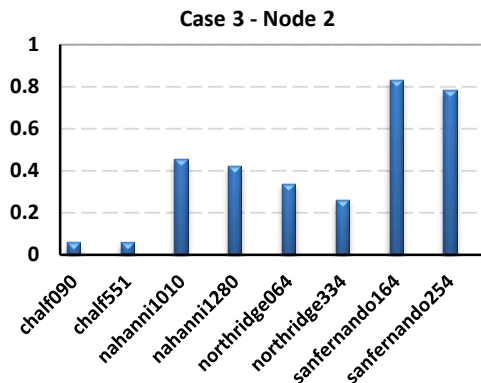
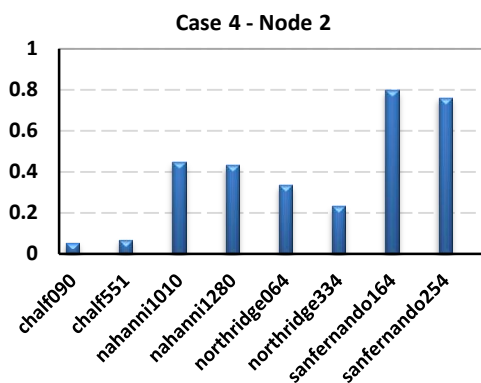
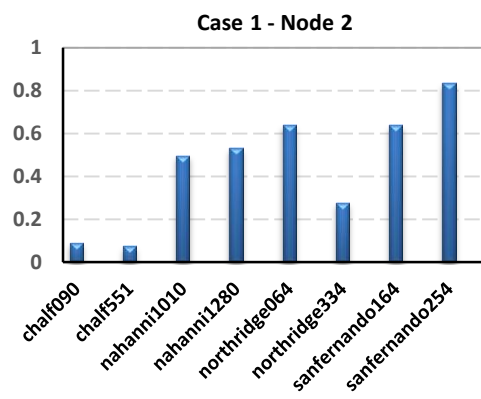
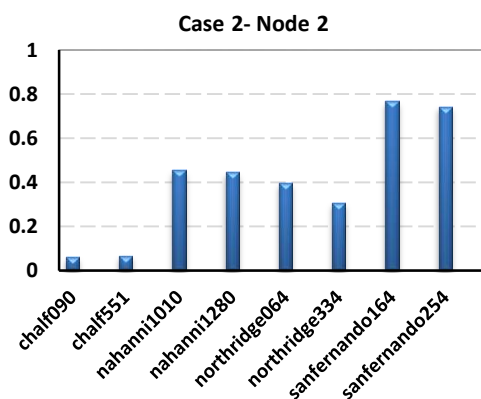
بررسی جابجایی‌های افقی طبقه‌ی دوم (node5) در شکل (۱۰) نشان می‌دهد که، بیشینه جابجایی افقی در این طبقه در زلزله‌ی San Fernando 164 و در ساختگاه شماره ۲ رخ داده است. کم‌ترین جابجایی افقی در شکل (۱۰) مربوط به طبقه‌ی نخست سازه (node2) در اثر زلزله‌ی Chalf 090 و در ساختگاه شماره ۴ می‌باشد. شکل (۱۱) جابجایی‌های افقی هر یک از طبقه‌های سازه سه طبقه (node2، node5 و node7) به‌دست آمده از تحلیل تاریخیچه زمانی خطی در حالت‌های مختلف ساختگاه در برابر زلزله‌های متفاوت را نشان می‌دهد.

پس از طراحی سازه‌ها در ۴ حالت، رفتار یکی از قاب‌های آن‌ها به روش‌های تحلیل تاریخیچه زمانی خطی و تحلیل تاریخیچه زمانی دینامیکی غیرخطی بررسی شده است. در ادامه نتیجه‌های به‌دست آمده از این تحلیل‌ها گزارش شده‌اند.

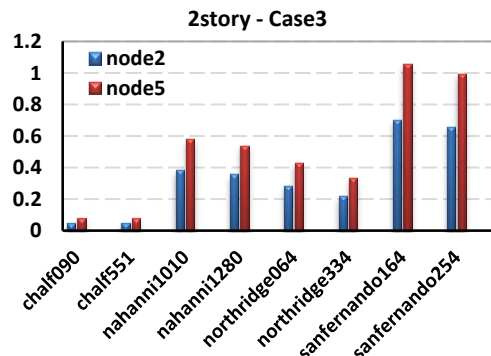
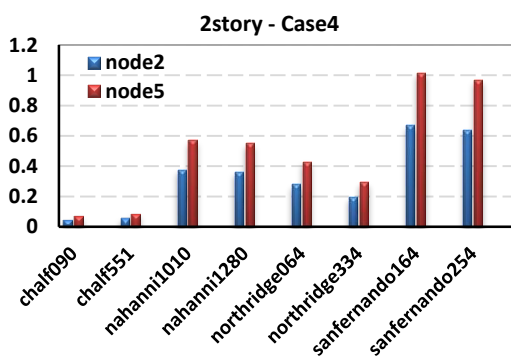
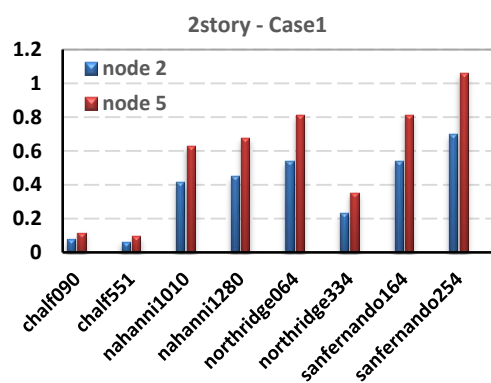
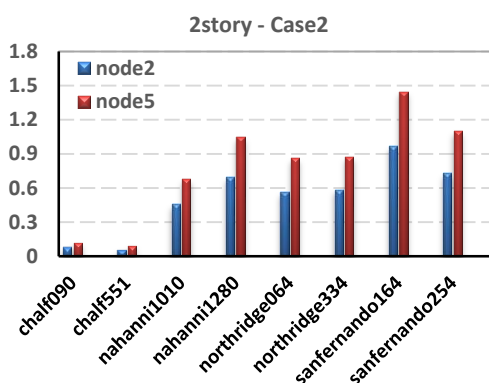
۳-۴-۱- تحلیل تاریخیچه زمانی خطی

در این بخش، نتیجه‌های تحلیل تاریخیچه زمانی خطی برای قاب‌ها با تعداد طبقه‌های مختلف و در چهار حالت مختلف ساختگاه ارایه می‌شود. شکل ۹ جابجایی‌های افقی سازه یک طبقه به‌دست آمده از تحلیل تاریخیچه زمانی خطی در حالت‌های مختلف ساختگاه در برابر زلزله‌های متفاوت را نشان می‌دهد.

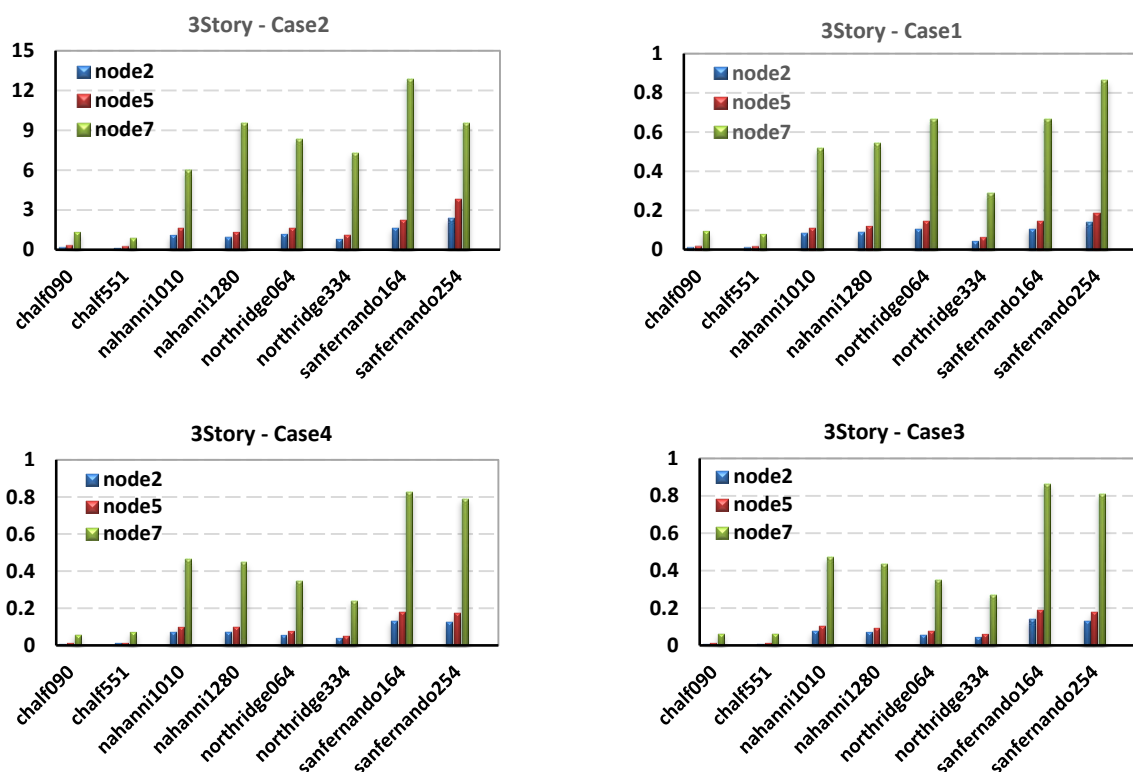
همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، از بین حالت‌های مختلف، بیشینه جابجایی در اثر زلزله‌ی San Fernando و در ساختگاه شماره ۱ و کم‌ترین جابجایی در اثر زلزله‌ی Chalf و ساختگاه شماره ۴ رخ داده است.



شکل ۹- جابجایی افقی در حالت تاریخچه زمانی خطی برای سازه یک طبقه



شکل ۱۰- جابجایی افقی در حالت تاریخچه زمانی خطی برای ساختمان ۲ طبقه



شکل ۱۱- جابجایی افقی در حالت تاریخیچه زمانی خطی برای سازه ۳ طبقه

برای قاب‌ها با تعداد طبقه‌های مختلف و در چهار حالت مختلف ساختگاه ارایه می‌شود. شکل (۱۳) جابجایی‌های افقی سازه یک طبقه به‌دست آمده از تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی در حالت‌های مختلف ساختگاه در برابر زلزله‌های متفاوت را نشان می‌دهد. اشاره به این نکته لازم است که در نتیجه‌های گزارش‌شده در این بخش، در صورت عبور مفصل پلاستیک از ناحیه پیش از خرابی، CP، بیشینه جابجایی افقی ارایه نشده است.

همان‌طور که در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود، از بین حالت‌های مختلف، بیشینه جابجایی در اثر زلزله‌ی در رکورد Nahanni1010 و در ساختگاه شماره ۲ و کم‌ترین جابجایی در اثر زلزله‌ی Chalf090 و در ساختگاه شماره ۴ رخ داده است. جابجایی‌های افقی سازه دو طبقه به‌دست آمده از تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی در حالت‌های مختلف ساختگاه در برابر زلزله‌های متفاوت در شکل (۱۴) نشان داده شده است. در این شکل، node2 بیان‌گر جابجایی افقی طبقه‌ی نخست و node5 بیان‌گر جابجایی افقی طبقه‌ی دوم می‌باشد.

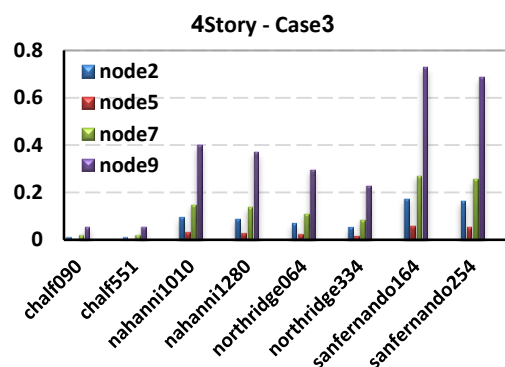
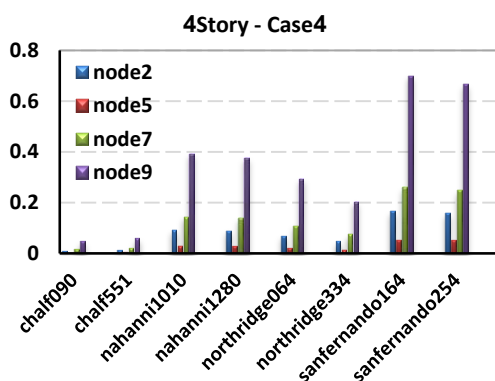
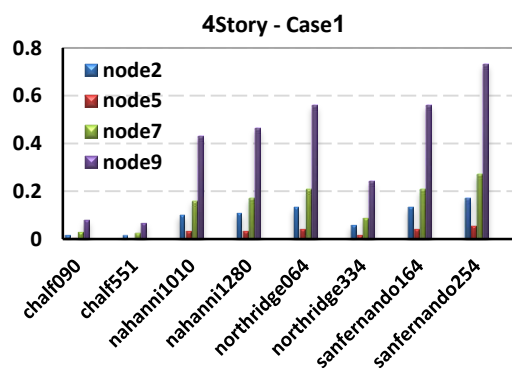
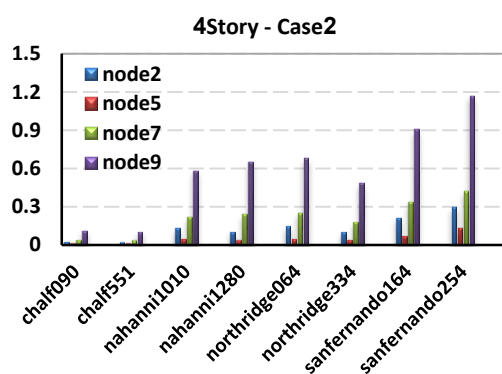
همان‌طور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، بیشینه جابجایی در سازه‌ی سه طبقه در اثر زلزله‌ی San Fernando164 و مربوط به ساختگاه شماره ۲ است که در node7 رخ می‌دهد و کم‌ترین جابجایی در اثر زلزله‌ی Chalf090 و مربوط به ساختگاه شماره ۳ است که بر طبق انتظار در node2 مشاهده می‌شود. جابجایی‌های افقی سازه چهار طبقه به‌دست آمده از تحلیل تاریخیچه زمانی خطی در حالت‌های مختلف ساختگاه در برابر زلزله‌های متفاوت در شکل (۱۲) نشان داده شده است. در این شکل، node2، node5، node7 و node9 به‌ترتیب بیان‌گر جابجایی افقی طبقه‌ی نخست، دوم، سوم و چهارم می‌باشند.

ارزیابی جابجایی‌های افقی در شکل (۱۲) نشان می‌دهد که بیشینه جابجایی ساختمان چهار طبقه در زلزله‌ی San Fernando164 مربوط به ساختگاه شماره ۲ و در node9 رخ می‌دهد و کم‌ترین جابجایی در اثر زلزله‌ی Chalf090 مربوط به ساختگاه شماره ۴ و در node2 اتفاق می‌افتد. در ادامه، نتیجه‌های تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی بررسی می‌شوند.

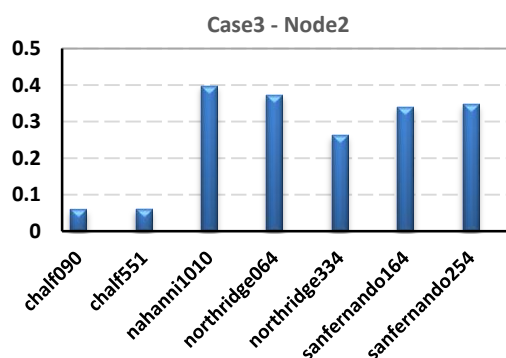
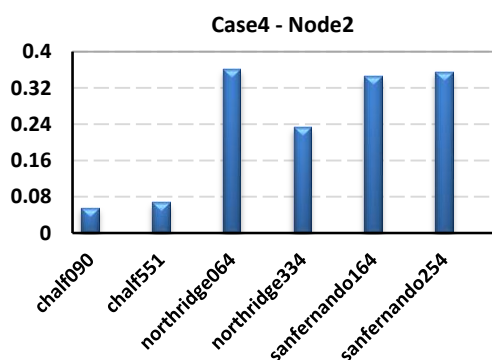
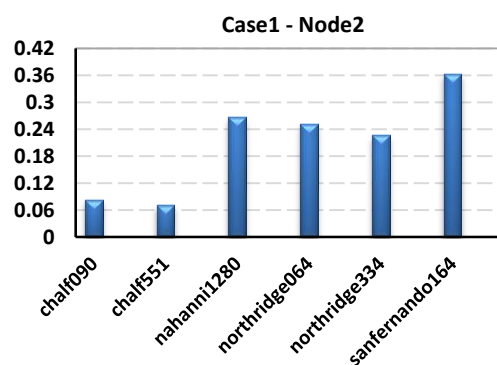
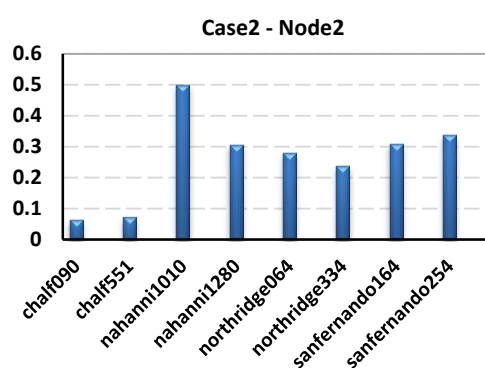
۳-۲- تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی

پس از ارزیابی نتیجه‌های تحلیل تاریخیچه زمانی خطی در بخش پیشین، در این بخش، نتیجه‌های تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی

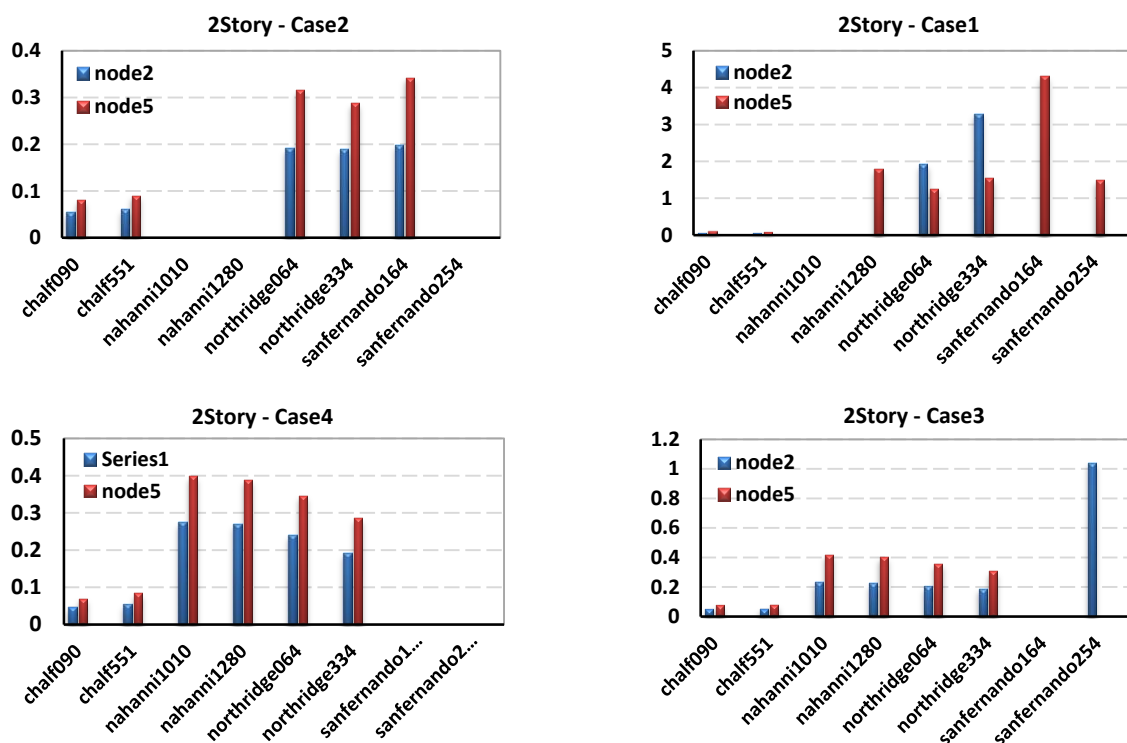




شکل ۱۲- جابجایی افقی در حالت تاریخیچه زمانی خطی برای سازه ۴ طبقه



شکل ۱۳- جابجایی افقی در حالت تاریخیچه زمانی غیرخطی برای سازه یک طبقه



شکل ۱۴- جابه جایی در جهت x در حالت تاریخچه زمانی غیرخطی برای سازه ۲ طبقه

رخ می‌دهد و کم‌ترین جابجایی در اثر زلزله‌ی Chalf551 مربوط به ساختگاه شماره ۱ و در node2 اتفاق می‌افتد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به منظور بررسی اثر ساختگاه بر روی پاسخ لرزه‌ای سطح زمین و هم چنین سازه مستقر بر روی آن، یک سری تحلیل‌های پاسخ لرزه‌ای یک بعدی زمین به روش‌های معادل خطی و غیرخطی انجام شد. هم چنین برای ارزیابی اثر ویژگی‌ها و محتوای فرکانسی حرکت لرزه‌ای بر روی پاسخ لرزه‌ای زمین، ۱۴ عدد زلزله حوزه نزدیک و دور در نظر گرفته شد. برای این منظور، تحلیل‌های پاسخ زمین به کمک نرم‌افزار خطی و غیرخطی DEEPSOIL 6.0 [۳۶] صورت پذیرفت و سپس نمودارهای تاریخچه‌ی شتاب، بیشینه شتاب سطحی در برابر عمق نهشت خاکی، تغییرهای شتاب بیشینه در عمق برای یک نهشت خاکی معین و تغییرهای کرنش و جابجایی در برابر عمق رسم شدند. نتیجه‌های به دست آمده از این تحلیل‌ها را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

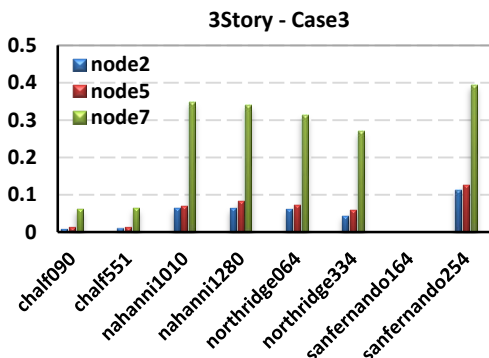
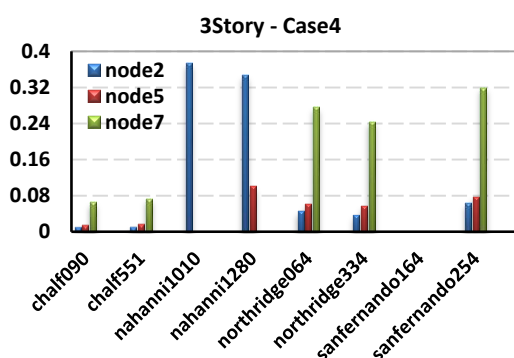
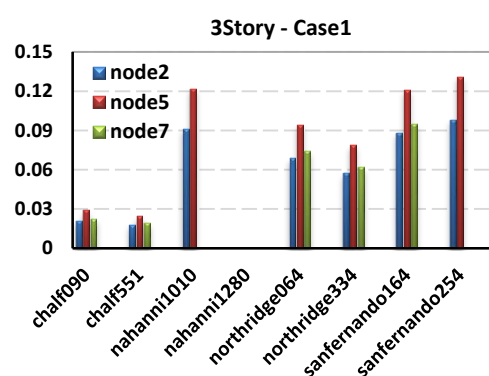
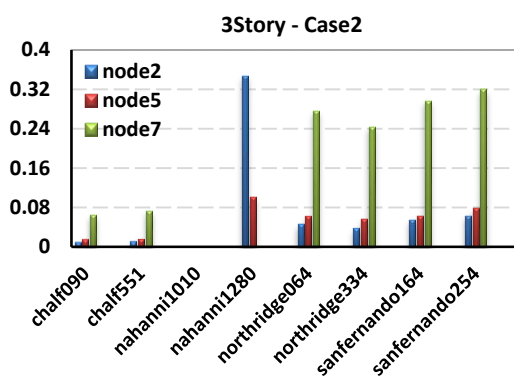
- در بیشتر موردها، تحلیل پاسخ زمین مربوط به زمین لرزه‌های حوزه دور و نزدیک نشان دادند که حرکت ورودی لرزه‌ای با عبور از لایه‌های خاکی تقویت شده و

بررسی جابجایی‌های افقی طبقه‌ی دوم (node5) در شکل (۱۴) نشان می‌دهد که، بیشینه جابجایی افقی در این طبقه در زلزله‌ی Chalf090 و در ساختگاه شماره ۱ رخ داده است. شکل (۱۵) جابجایی‌های افقی هر یک از طبقه‌های سازه سه طبقه (node2، node5، node7) به دست آمده از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی در حالت‌های مختلف ساختگاه در برابر زلزله‌های متفاوت را نشان می‌دهد.

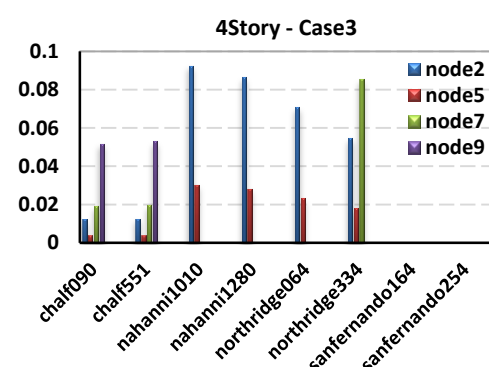
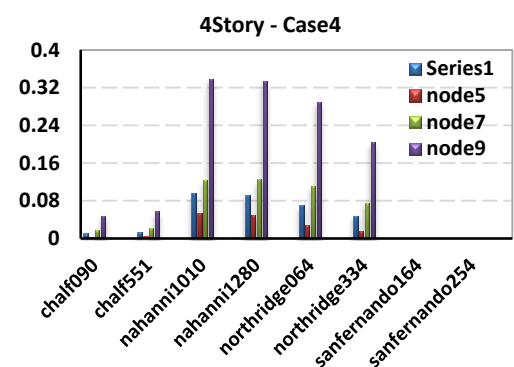
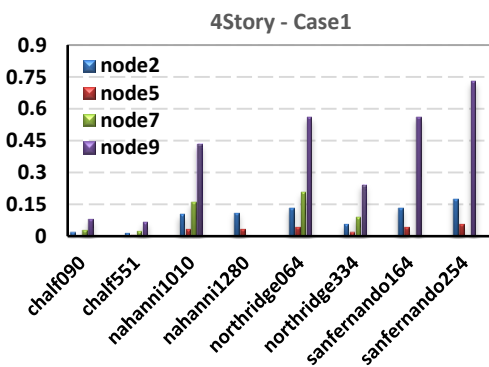
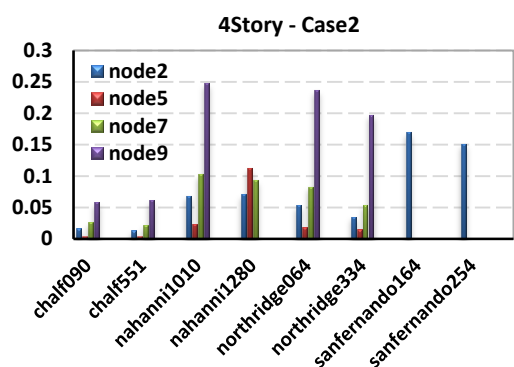
همان‌طور که در شکل (۱۵) مشاهده می‌شود، بیشینه جابجایی افقی در node7 در اثر زلزله‌ی San Fernando254 و در ساختگاه شماره ۳ و کم‌ترین جابجایی در اثر زلزله‌ی Chalf551 و مربوط به ساختگاه شماره ۳ است که بر طبق انتظار در node2 مشاهده می‌شود. جابجایی‌های افقی سازه چهار طبقه به دست آمده از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی در حالت‌های مختلف ساختگاه در برابر زلزله‌های متفاوت در شکل (۱۶) نشان داده شده است. در این شکل، node2، node5، node7 و node9 به ترتیب بیانگر جابجایی افقی طبقه‌ی نخست، دوم، سوم و چهارم می‌باشند.

ارزیابی جابجایی‌های افقی در شکل (۱۲) نشان می‌دهد که بیشینه جابجایی ساختمان چهار طبقه در زلزله‌ی San Fernando254 مربوط به ساختگاه شماره ۱ و در node9





شکل ۱۵- جابه جایی در جهت x در حالت تاریخچه زمانی غیرخطی برای سازه ۳ طبقه



شکل ۱۶- جابه جایی در جهت x در حالت تاریخچه زمانی غیرخطی برای سازه ۴ طبقه

- [2] Lizarraga, H.S. and Lai, C.G. (2014), "Effects of Spatial Variability of Soil Properties on the Seismic Response of an Embankment Dam", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 64, pp. 113–128.
- [3] Sun, C.G. and Kim, H.S. (2016), "Geostatistical Assessment for the Regional Zonation of Seismic Site Effects in a Coastal Urban Area Using a GIS Framework", *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 14, No. 8, pp. 2161–2183.
- [4] Albarello, D., Francescone, M., Lunedei, E., Paolucci, E., Papasidero, M. P., Peruzzi, G. and Pieruccini, P. (2017), "Seismic Characterization and Reconstruction of Reference Ground Motion at Accelerometric Sites of the Italian National Accelerometric Network (RAN)", *Natural Hazards*, Vol. 86, No. 2, pp. 401–416.
- [5] Afacan, K.B., Brandenberg, S.J. and Stewart, J.P. (2013), "Centrifuge Modeling Studies of Site Response in Soft Clay over Wide Strain Range", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 140, No. 2, 04013003.
- [6] Aboye, S.A., Andrus, R.D., Ravichandran, N., Bhuiyan, A.H. and Harman, N. (2015), "Seismic Site Factors and Design Response Spectra Based on Conditions in Charleston, South Carolina", *Earthquake Spectra*, Vol. 31, No. 2, pp. 723–744.
- [7] Anbazhagan, P., SivakumarBabu, G.L., Lakshmikanthan, P. and Vivekanand, K.S. (2016), "Seismic Characterization and Dynamic Site Response of a Municipal Solid Waste Landfill in Bangalore, India", *Waste Management & Research*, Vol. 34, No. 3, pp. 205–213.
- [8] Kohrangi, M., Vamvatsikos, D. and Bazzurro, P. (2017), "Site Dependence and Record Selection Schemes for Building Fragility and Regional Loss Assessment", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 46, No. 10, pp. 1625–1643.
- [9] Kar, D. and Roy, R. (2018), "Seismic Behavior of RC Bridge Piers under Bidirectional Excitations: Implications of Site Effects", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 22, No. 2, pp. 303–331.
- [10] Pegah, E. and Liu, H. (2016), "Application of Near-Surface Seismic Refraction Tomography and Multichannel Analysis of Surface Waves for Geotechnical Site Characterizations: A Case Study", *Engineering geology*, Vol. 208, pp. 100–113.
- [11] Huang, D., Wang, G., Wang, C. and Jin, F. (2018), "A Modified Frequency-Dependent Equivalent Linear Method for Seismic Site Response Analyses and Model Validation using KiK-Net Borehole Arrays", *Journal of Earthquake Engineering*, pp. 1–18.
- [12] Yee, E., Stewart, J.P. and Tokimatsu, K. (2013), "Elastic and Large-Strain Nonlinear Seismic Site Response from Analysis of Vertical Array Recordings", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 139, No. 10, pp. 1789–1801.
- [13] Zalachoris, G. and Rathje, E.M. (2015), "Evaluation of One-Dimensional Site Response Techniques Using Borehole Arrays", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 141, No. 12, 04015053.
- [14] Felicetta, C., D'Amico, M., Lanzano, G., Puglia, R., Russo, E. and Luzi, L. (2017), "Site Characterization of Italian Accelerometric Stations", *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 15, No. 6, pp. 2329–2348.
- [15] Kaiser, A., Holden, C. and Massey, C. (2013), "Determination of Site Amplification, Polarization and Topographic Effects in the Seismic Response of the Port Hills Following the 2011 Christchurch Earthquake", In *NZSEE Conference*, Wellington, New Zealand, pp. 1–8.
- [16] Pitilakis, K., Riga, E. and Anastasiadis, A. (2013), "New Code Site Classification, Amplification Factors and Normalized Response Spectra Based on a Worldwide Ground-motion Database", *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 11, No. 4, pp. 925–966.

شتاب بیشینه نسبت به حرکت لرزه‌ای افزایش می‌یابد.

- هر چه بیشینه شتاب ورودی حرکت لرزه‌ای از زلزله‌های حوزه دور کوچک‌تر باشد، با مقایسه‌ی نتیجه‌های تاریخچه زمانی شتاب سطح زمین در روش‌های معادل خطی و غیرخطی می‌توان دریافت که تفاوت کم‌تری بین پاسخ لرزه‌ای به روش خطی و غیرخطی وجود دارد.
- در موردی که زلزله حوزه نزدیک با بیشینه شتاب بزرگ برای تحلیل پاسخ استفاده می‌شود، نتیجه‌های به دست آمده از پاسخ به روش معادل خطی در برخی موارد نشان دهنده‌ی آن است که صرف نظر از ضخامت لایه خاک، حرکت ورودی با عبور از خاک تقویت می‌شود. هر چند، با افزایش ضخامت نهشت خاکی نیز در برخی موارد، بیشینه شتاب کاهش می‌یابد. ولی، با مقایسه نتیجه‌های تحلیل غیرخطی می‌توان دریافت که حرکت ورودی با عبور از لایه خاکی تضعیف می‌شود و شتاب بیشینه کاهش می‌یابد.
- با مقایسه نموداری‌های شتاب بیشینه در برابر عمق برای زلزله‌های حوزه دور، به نظر می‌رسد که شتاب بیشینه حرکت روند افزایشی را در عمق تا سطح زمین طی می‌کند. اگرچه، مقدارهای شتاب در نزدیکی عمق ۳۰ متری دچار یک کاهش نسبی می‌شود، ولی در کل نمی‌توان این روند را به همه‌ی نتیجه‌ها تعمیم داد.
- با مقایسه نمودارهای جابجایی بیشینه در برابر عمق نتیجه می‌شود که برای زلزله‌های حوزه دور، نمودار بیشینه جابجایی در عمق با افزایش ضخامت نهشت خاکی به سمت جابجایی‌های بیشتر انتقال می‌یابد.
- با توجه به بررسی نتیجه‌های تحلیل تاریخچه زمانی خطی برای ساختمان با طبقات ثابت با نهشت‌های خاکی با عمق‌های سطحی تا عمیق، با افزایش عمق میزان جابجایی بیشینه کم‌تر می‌شود.
- بررسی تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی نشان می‌دهد که بیشینه تغییر شکل در مقایسه با حالت خطی کم‌تر بوده است. این امر نشان دهنده‌ی ماهیت دقیق‌تر تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی است.

۵- مراجع

- [1] Barani, S., De Ferrari, R. and Ferretti, G. (2013), "Influence of Soil Modeling Uncertainties on Site Response", *Earthquake Spectra*, Vol. 29, No. 3, pp. 705–732.



- [26] Srilatha, N., Latha, G.M. and Puttappa, C.G. (2013), "Effect of Frequency on Seismic Response of Reinforced Soil Slopes in Shaking Table Tests", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 36, pp. 27–32.
- [27] Bowden, D.C. and Tsai, V.C. (2017), "Earthquake Ground Motion Amplification for Surface Waves", *Geophysical Research Letters*, Vol. 44, No. 1, pp. 121–127.
- [28] Choudhury, D., Phanikant, V.S., Mhaske, S.Y., Phule, R.R. and Chatterjee, K. (2015), "Seismic Liquefaction Hazard and Site Response for Design of Piles in Mumbai City", *Indian Geotechnical Journal*, Vol. 45, No. 1, pp. 62–78.
- [29] Ghayoomi, M. and Mirshekari, M. (2014), "Equivalent Linear Site Response Analysis of Partially Saturated Sand Layers", In *UNSAT 2014 conference*, Sydney, Australia, pp. 1–6.
- [30] Benedettini, F., De Sortis, A. and Milana, G. (2017), "In Field Data to Correctly Characterize the Seismic Response of Buildings and Bridges", *Bulletin of earthquake engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 643–666.
- [31] Zhu, J., Chen, G. and Zhao, D. (2018), "The Influence of Bedrock Surface Depth on Seismic Site Response in Deep Sediment Layers", In *GeoShanghai International Conference*, Singapore, pp. 224–232.
- [32] PEER-NGA Strong Motion Database website: <http://peer.berkeley.edu/ngawest2> (Visited on 2019).
- [33] ANSI, A. (2005), "AISC 341-05: Seismic Provisions for Structural Steel Buildings", American Institute of Steel Construction Inc, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.
- [34] No, 2800 Standard, (2005), Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, Third Revision, Building and Housing Research Center, Tehran.
- [35] SAP2000, C.S.I. (2005), Structural Analysis Program, Berkeley, California.
- [36] Hashash, Y. (2003), DEEPSOIL Seismic Response Analysis Software, University of Illinois, Urbana-Champaign, IL.
- [17] Kumar, A., Baro, O. and Harinarayan, N. H. (2016), "Obtaining the Surface PGA from Site Response Analyses Based on Globally Recorded Ground Motions and Matching with the Coda Values", *Natural Hazards*, Vol. 81, No. 1, pp. 543–572.
- [18] Mondal, J. K. and Kumar, A. (2017), "Impact of Higher Frequency Content of Input Motion upon Equivalent Linear Site Response Analysis for the Study Area of Delhi", *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 35, No. 3, pp. 959–981.
- [19] Eskandarinejad, A., Zafarani, H. and Jahanandish, M. (2018), "Local Site Effect of a Clay Site in Shiraz Based on Seismic Hazard of Shiraz Plain", *Natural Hazards*, Vol. 90, No. 3, pp. 1115–1135.
- [20] Stewart, J.P., Afshari, K. and Goulet, C.A. (2017), "Non-Ergodic Site Response in Seismic Hazard Analysis", *Earthquake Spectra*, Vol. 33, No. 4, pp. 1385–1414.
- [21] Desai, S.S. and Choudhury, D. (2015), "Site-Specific Seismic Ground Response Study for Nuclear Power Plants and Ports in Mumbai", *Natural Hazards Review*, Vol. 16, No. 4, 04015002.
- [22] Hokmabadi, A.S., Fatahi, B. and Samali, B. (2014), "Assessment of Soil-Pile-Structure Interaction Influencing Seismic Response of Mid-Rise Buildings Sitting on Floating Pile Foundations", *Computers and Geotechnics*, Vol. 55, pp. 172–186.
- [23] Wei, W., Zhao, Q., Jiang, Q. and Grasselli, G. (2018), "Three New Boundary Conditions for the Seismic Response Analysis of Geomechanics Problems Using the Numerical Manifold Method", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 105, pp. 110–122.
- [24] Régnier, J., Cadet, H. and Bard, P.Y. (2016), "Empirical Quantification of the Impact of Nonlinear Soil Behavior on Site Response", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 106, No. 4, pp. 1710–1719.
- [25] Panzera, F., Lombardo, G., Monaco, C. and Di Stefano, A. (2015), "Seismic Site Effects Observed on Sediments and Basaltic Lavas Outcropping in a Test Site of Catania, Italy", *Natural Hazards*, Vol. 79, No. 1, pp. 1–27.

پی نوشت

¹ Resonant column

² Ottawa sand

