

## نوع مقاله: علمی - پژوهشی

## چکیده

هدف از این مقاله ارزیابی شاخص خرابی قاب‌های خمشی فولادی، با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک-سازه تحت زلزله‌های متوالی می‌باشد. سازه‌های انتخابی دارای نسبت‌های لاغری (H/B) متفاوتی هستند، تحت اثر زلزله‌های متوالی با محتوای فرکانسی متفاوت و با در نظر گرفتن اثرات خاک‌های مختلف با استفاده از روش زیرسازه مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته‌اند. در نهایت به منظور بررسی تأثیر توالی لرزه‌ای، جابه‌جایی طبقات و شاخص خرابی طبقات با حالت زلزله منفرد مقایسه شده است. نتایج نشان‌دهنده آن است که اثرگذاری زلزله‌های متوالی با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه وابسته به شرایط محتوای فرکانسی زلزله‌هاست. نیازهای جابه‌جایی سازه‌ها در زلزله‌های متوالی نسبت به زلزله تکی با توجه به محتوای فرکانسی ممکن است افزایش یابد، به گونه‌ای که این مقادیر تا ۲۰ درصد نسبت به زلزله تکی افزایش داشته و به‌طور کلی نیازهای جابه‌جایی سازه با نرم‌تر شدن خاک تا حدود ۱۰ درصد افزایش می‌یابد. با افزایش نیاز به جابه‌جایی در اثر نرم شدن خاک، افزایش میزان شاخص خرابی در سطوح مختلف خرابی اتفاق افتاده است؛ در زلزله تکی شاخص تا ۱۵ درصد و در توالی لرزه‌ای ۱۰ درصد تفاوت دیده می‌شود. با افزایش سطح آسیب‌پذیری سازه، میزان خرابی سازه از سطح خرابی محدود تا سطح خرابی کامل تا حدود ۱/۵ برابر افزایش می‌یابد.

**واژگان کلیدی:** زلزله متوالی، اندرکنش خاک و سازه، قاب خمشی فولادی، شاخص خرابی، محتوای فرکانسی، آنالیز تاریخیچه زمانی غیرخطی.

## ارزیابی شاخص خرابی قاب‌های خمشی فولادی با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک - سازه تحت زلزله‌های متوالی

علیرضا کرک‌آبادی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

محمد ایمان خداکریمی (نویسنده مسئول)

دانشیار مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، khodakarami@semnan.ac.ir

فرزانه نباتی

دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

## ۱- مقدمه

تواند پاسخگوی این نیازها باشد و دچار خسارات بیشتری شود. یکی از معیارهای مناسب به‌منظور تعیین عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها، شاخص خسارت لرزه‌ای می‌باشد. شاخص خسارت، یک معیار کمی برای بیان وضعیت آسیب و خسارات اعضای سازه است. وهدانی و همکاران [۱] به بررسی شاخص خرابی غیر تجمعی کوزینگ که شاخص خرابی بر اساس انرژی می‌باشد، با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه پرداختند. همچنین در تحقیق انجام شده توسط تسنیمی و پازوکی [۲] شاخص خسارت پارک و انگگ در سطوح عملکرد لرزه‌ای سازه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌های انجام شده بر پاسخ‌های دینامیکی سازه‌های بتن

به رخداد چندین زلزله به صورت متوالی در یک دوره‌ی زمانی نسبتاً کوتاه، توالی لرزه‌ای گفته می‌شود که ممکن است در یک دوره‌ی زمانی کوتاه چند روزه یا چند هفته‌ای رخ دهد، در این صورت با توجه به اینکه سازه در زلزله‌های قبلی دچار آسیب شده و امکان ترمیم آن نبوده، ممکن است طی زلزله‌های بعدی دچار خسارات بیشتری گردد؛ به بیانی دیگر می‌توان با مقایسه خسارات سازه در زلزله‌های متوالی نسبت به رخداد یک زلزله تنها، خسارات و آسیب‌های وارد بر سازه ناشی از توالی لرزه‌ای را تخمین زد. در برخی از این موارد این احتمال داده می‌شود که نیازهای جابه‌جایی سازه به حدی بالا رود که اگر سازه فقط بر اساس طیف طراحی آیین‌نامه‌ها طراحی گردد،

عبارت است از اثر متقابل سازه و خاک زیرین و اطراف آن در هنگام وقوع زلزله. بررسی‌های انجام شده در خصوص اثرات لرزه‌ای اندرکنش خاک و سازه برای ساختمان چندطبقه واقع بر فونداسیون گسترده را نشان می‌دهد که نیاز جابه‌جایی طبقات با افزایش سختی خاک کاهش می‌یابد. همچنین نسبت پاسخ جابه‌جایی طبقات با افزایش تعداد طبقات افزایش می‌یابد [۹]. طبق تحقیقات انجام شده روی اثرات اندرکنش خاک-سازه بر مخازن حاوی سیال اثرات اندرکنش خاک-سازه روی مؤلفه‌های تحریک کننده پاسخ ممکن است قابل توجه باشد و بایستی در طراحی‌ها لحاظ گردد [۱۰-۱۱]. مطالعات انجام شده روی اثرات غیرخطی خاک در اندرکنش خاک-سازه نشان می‌دهد که ممکن است غیرخطی بودن خاک منجر به افزایش یا کاهش نیروی برش پایه نسبت به مدل‌های خطی گردد [۱۲].

اثرات اندرکنش خاک و سازه ممکن است سبب افزایش یا کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه یا سایر پارامترهای لرزه‌ای آن تحت نیروی زلزله گردد که خود این اثرات هم به مشخصه‌های حرکت میدان آزاد، خواص دینامیکی سازه و انعطاف تکیه‌گاه بستگی دارد. به همین ترتیب این امکان وجود دارد که با وقوع این تغییرات نیرو در اعضای سازه نیز تغییر کرده و ایمنی یا حتی دوام و کارایی را تحت تأثیر قرار دهد [۱۳]. به دلیل حساسیت خاصی که در طرح و اجرای سازه‌های بتنی وجود دارد، همچنین به دلیل تأثیرگذار بودن ابعاد مقطع اعضا در میزان و ظرفیت باربری عضو و نهایتاً کل سیستم، اعمال اثرات اندرکنش خاک و سازه در تحلیل و طراحی سازه‌های بتنی و تغییر نیروی داخلی اعضا ناشی از این پدیده، هم در جهت ایمنی طرح و هم در جهت اقتصاد آن مؤثر خواهد بود [۱۴-۱۵].

بر اساس مطالب فوق غالب تحقیقات صورت گرفته، اثرات پدیده‌ی توالی لرزه‌ای را بدون در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه مورد مطالعه قرار داده‌اند. از سوی دیگر با توجه به امکان رخداد دو یا چند زمین لرزه متوالی با محتوای فرکانسی مختلف نیز در نظر گرفته نشده است. همچنین در مطالعات صورت گرفته تاکنون به بررسی شاخص خرابی سازه‌ها تحت اثر

آرمه تحت توالی لرزه‌ای بیانگر آن است که با توجه به نیاز بیشتر سازه به تغییر مکان، برای طراحی سازه‌ها باید شتاب بیشتری در نظر گرفت، بنابراین لازم است تا طیف تاریخچه زمانی استفاده شده برای طراحی سازه بازنگری گردد [۳]. طبق تحقیقات انجام شده توسط هاچیواسلیو و هاچیورجیو [۴] و هان و همکاران [۵] در زمینه‌ی اثر توالی لرزه‌ای بر سازه‌های بتن مسلح، مشخص شد که مقدار تغییر مکان ماندگار و تغییر مکان نسبی ماندگار سازه تحت اثر توالی لرزه‌ای نسبت به زلزله منفرد افزایش می‌یابد، همچنین، مطالعات صورت گرفته روی سازه‌های بتن مسلح شکل‌پذیر حاکی از آن است که توالی لرزه‌ای می‌تواند خسارات قابل توجهی به سازه اعمال نماید به گونه‌ای که شتاب طیفی زلزله اصلی و حداکثر شتاب طیفی پس‌لرزه و تعداد پس‌لرزه‌ها به شکل قابل توجهی بر نتایج تأثیرگذار است.

طبق بررسی‌های انجام شده در خصوص سیستم‌های یک درجه آزاد فولادی تحت اثر زلزله‌های متوالی مشخص شد که از تکرار لرزه‌های متوالی در زمان‌های کوتاه انباشتگی انرژی رخ می‌دهد، همچنین تجزیه و تحلیل این سیستم نشان می‌دهد آسیب‌پذیری این سیستم تحت توالی لرزه‌ای افزایش می‌یابد [۶]. مطالعات انجام شده در رابطه با تأثیر زلزله‌های متوالی بر حداکثر نرخ شکل‌پذیری طبقات در قاب‌های بتنی نشان می‌دهد که این مقدار به شکل قابل توجهی افزایش می‌یابد و در این حالت قاب‌های بتنی وارد ناحیه‌ی غیرخطی خود می‌شوند [۷]. تحقیق انجام شده در سال ۲۰۱۴ بر روی دو زلزله ۱۹ و ۲۰ سپتامبر در مکزیکوسیتی، نشان داد روابطی بین زمان تناوب سازه‌ی آسیب‌دیده و دوره‌ی غالب پس‌لرزه وجود دارد، همچنین فرکانس پس‌لرزه تأثیر قابل توجهی در پاسخ سازه دارد [۸].

در اکثر روش‌های متداول تحلیل و طراحی سازه در مقابل زلزله، خاک زیر پی به صورت صلب فرض شده، این در حالی است که در واقعیت خاک زیر پی صلب نیست. تاکنون مطالعات زیادی بر روی تأثیر اندرکنش خاک-سازه روی پاسخ لرزه‌ای سازه صورت گرفته است، اما تأثیر این پدیده بر خرابی سازه مورد توجه ویژه قرار نگرفته است. اندرکنش خاک و سازه

توالی لرزه‌ای پرداخته نشده است.

## ۲-۱- سازه

سازه‌های مورد بررسی در این مقاله، چهار قاب ساختمانی فولادی با سیستم قاب خمشی هستند. این سازه‌ها، با ملزومات استاندارد ۲۸۰۰، مباحث ششم [۱۷] و دهم [۱۸] مقررات ملی ساختمان ایران، برای پهنه‌های با خطر لرزه‌ای زیاد و خیلی زیاد طراحی شده‌اند. سازه‌ها به دو دسته‌ی کلی ۸ و ۱۶ طبقه که هر کدام دارای ۳ و ۶ دهانه با پلان مربعی و متقارن می‌باشند تقسیم می‌گردند. ارتفاع طبقات ۳ متر و طول دهانه‌ها ۵ متر می‌باشد. مقدار بار مرده ۶۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و بار زنده ۳۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع در نظر گرفته شده و فونداسیون سازه‌ها به صورت سطحی و صلب می‌باشد. فولاد مصرفی از نوع ST ۳۷ با تنش تسلیم ۲۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و تنش گسیختگی ۳۷۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌باشد و میرایی سازه‌ها ۵ درصد فرض شده است.

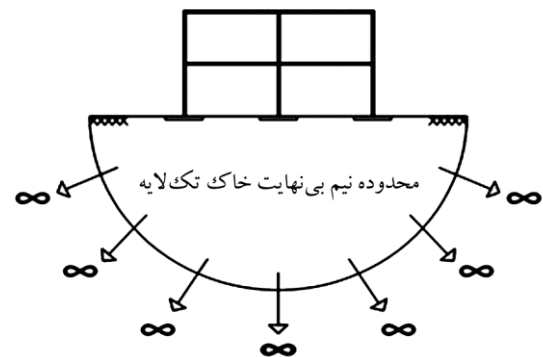
در این مقاله شاخص خرابی، قاب‌های خمشی فولادی تحت اثر زلزله‌های متوالی با در نظر گرفتن محتوای فرکانسی متفاوت برای زلزله اصلی و پس‌لرزه‌ها روی خاک‌های مختلف بر اساس طبقه‌بندی استاندارد ۲۸۰۰ [۱۶] به روش زیرسازه<sup>۱</sup> مورد مطالعه قرار گرفته است.

## ۲- بیان مسئله

همان‌طور که در مقدمه بیان شد، در نظر گرفتن توالی لرزه‌ای روی سازه‌ها یکی از مسائل مهم و حائز اهمیت است و همچنین در نظر گرفتن خاک و اثرات سیستم اندرکنش خاک و سازه (شکل ۱)، دارای پاسخ و نتایج مهمی است. حال مسئله‌ی مطرح شده آن است که اگر توالی لرزه‌ای بر روی سیستم خاک و سازه لحاظ شود نتایج حاصل به چه صورت است؟ در ادامه، به اجرای مختلف مسئله مورد بررسی و ویژگی‌های هر بخش اشاره خواهد شد.

## ۲-۲- خاک

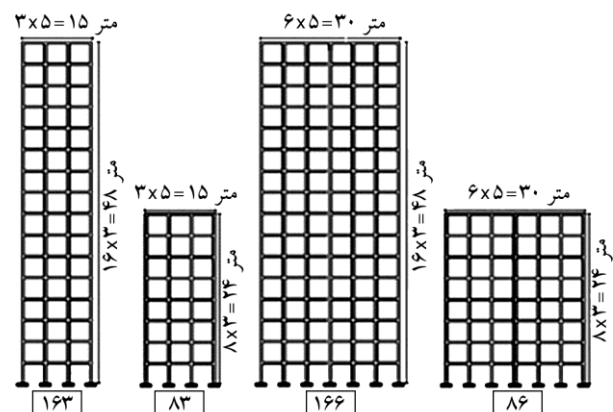
در این مطالعه خاک به صورت یک لایه و خشک در نظر گرفته شده است که مشخصات خاک‌های مورد استفاده در جدول (۱) نمایش داده شده است که در این جدول E مدول الاستیسیته، G مدول برشی،  $E_c$  مدول بالک،  $\nu$  ضریب پواسون،  $V_p$  و  $V_s$  به ترتیب سرعت موج برشی و سرعت موج طولی و  $\gamma$  وزن واحد حجم خاک می‌باشد. این خاک‌ها بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ به سه تیپ تقسیم‌بندی می‌شوند که خاک تیپ ۱ سخت‌ترین خاک و خاک تیپ ۳ نرم‌ترین خاک می‌باشند.



(الف) سیستم خاک-فونداسیون-سازه

## ۲-۳- رکوردهای زلزله

به منظور بررسی رفتار لرزه‌ای سازه‌های مورد مطالعه، از دو رکورد زلزله از مناطق مختلف دنیا استفاده شده است. لازم به ذکر است با در نظر گرفتن اثرات خاک و توالی لرزه‌ای که در بخش‌های ۳-۳ شرح داده خواهد شد، در مجموع ۱۲ رکورد زلزله مورد استفاده قرار گرفته که مشخصات آن در جدول (۲) آمده است. همچنین شتاب‌نگاشت مربوط به این دو زلزله در



(ب) هندسه سازه‌های مورد بررسی

شکل (۱): نمای شماتیک مسئله مورد بررسی.

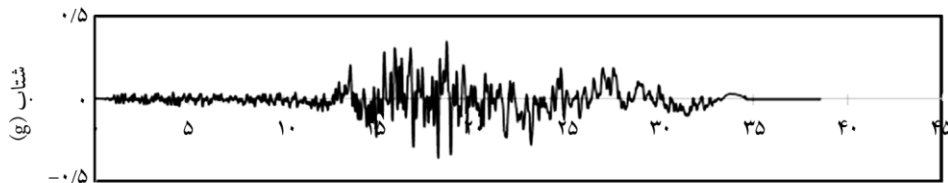
شکل (۲) قابل مشاهده است. هر دوی این رکوردها از سایت PEER [۲۰] دریافت شده است. هر دوی این رکوردها دارای شتاب بالایی هستند با این تفاوت که یکی از آنها با فرکانس غالب بالا و دیگری فرکانس غالب پایین است. زلزله ای که حداکثر پاسخ آن در محدوده ی فرکانس های بالا رخ دهد، در رده ی محتوای فرکانسی زیاد و زلزله ای که حداکثر پاسخ آن در محدوده فرکانس های پایین رخ دهد در رده ی محتوای فرکانسی متوسط و کم قرار می گیرد.

جدول (۱): مشخصات مکانیکی خاک های مورد مطالعه برگرفته شده از [۱۹].

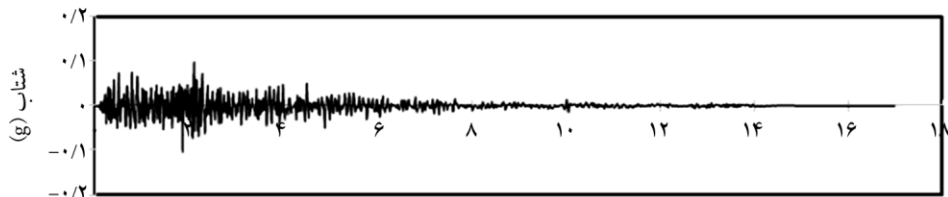
نوع خاک	E (کیلو نیوتن بر مترمربع)	G (کیلو نیوتن بر مترمربع)	$E_c$ (کیلو نیوتن بر مترمکعب)	$\gamma$ (کیلو نیوتن بر مترمربع)	$\rho$	$V_s$ (متر بر ثانیه)	$V_p$ (متر بر ثانیه)
تیپ ۱	۲۰۰۰۰۰	۲۶۹۲۳۱۰	۹۴۲۳۰۷۷	۲۰۰۰	۰/۳۰	۱۱۴۹/۱	۲۱۴۲/۸۹
تیپ ۲	۲۰۰۰۰۰	۷۶۹۲۳۰	۲۶۹۲۳۰۸	۲۰۰۰	۰/۳۰	۶۱۴/۲۵	۱۱۴۹/۱۶
تیپ ۳	۵۰۰۰۰۰	۱۹۲۳۱۰	۶۷۳۰۷۷	۱۹۰۰	۰/۳۵	۳۰۹/۲۲	۶۴۳/۶۸

جدول (۲): مشخصات رکوردهای زلزله مورد استفاده.

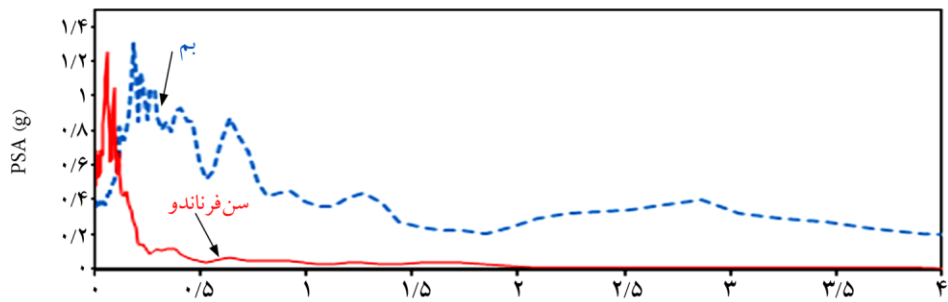
زلزله	سال	ایستگاه	بزرگی (ریشتر)	زمان مؤثر (ثانیه)	PGA/PGV	رده محتوای فرکانسی
بم	۲۰۰۳	Joshan	۶/۶	۱۵۹	۰/۳۵	زیاد
سان فرناندو	۱۹۷۱	Tehachapi Pump	۶/۶۱	۱۳/۲	۰/۹۹	متوسط



زمان (ثانیه)  
الف) زلزله بم



زمان (ثانیه)  
ب) زلزله سان فرناندو



پ) طیف پاسخ شتاب زلزله های مذکور بر روی سنگ بستر

شکل (۲): نمودار تاریخچه زمانی شتاب رکورد زلزله های مورد استفاده.

## ۲-۴- نام‌گذاری مدل‌ها

میرایی در تحقیق حاضر با توجه به مشخصات هر خاک و هر سازه با استفاده از روش مخروط<sup>۲</sup> [۲۲] و توسط روابط (۱) تا (۴)، با توجه به [۲۱] تعیین شده است. فونداسیون‌های سازه‌ها که به صورت نواری می‌باشد و به صورت صلب مدل‌سازی شده‌اند.

با توجه به اینکه متغیرهای زیادی در این مطالعه وجود دارد، به منظور شناسایی بهتر مدل‌های مورد مطالعه، این مدل‌ها به صورت  $I_j-X_y-N$  نام‌گذاری شده‌اند که در آن I نشان‌دهنده‌ی تعداد طبقات می‌باشد که می‌تواند ۸ و یا ۱۶ در نظر گرفته شود، زیرانگر تعداد دهانه‌های سازه بوده که عددی شامل ۳ و یا ۶ را به خود اختصاص می‌دهد، X معرف نام زلزله اول و Y معرف نام زلزله دوم می‌باشد که مقادیر S و B (برای زلزله سان‌فرناندو و B برای زلزله بم) و N نشان‌دهنده‌ی نوع خاک بوده و مقادیر I، II و III می‌باشد؛ به‌عنوان مثال 163\_BS\_III بیانگر سازه‌ای با ۱۶ طبقه و ۳ دهانه که بر روی خاک تپ سه تحت زلزله متوالی که زلزله اول آن بم و زلزله دوم آن سان‌فرناندو قرار می‌گیرد، می‌باشد.

جدول (۳): مشخصات مقاطع سازه‌های مورد مطالعه در طبقات مختلف.

طبقات سازه	شماره طبقه	تعداد دهانه‌های قاب: ۳		تعداد دهانه‌های قاب: ۶	
		ستون	تیر	ستون	تیر
۸ طبقه	۱	Box 350×15	W10×54	Box 350×15	W10×54
	۲	Box 350×15	W10×54	Box 350×15	W10×54
	۳	Box 350×10	W10×54	Box 300×10	W10×54
	۴	Box 300×10	W10×54	Box 300×10	W10×49
	۵	Box 300×10	W10×49	Box 300×10	W10×49
	۶	Box 250×8	W10×39	Box 250×8	W10×33
	۷	Box 250×8	W10×26	Box 250×7	W10×26
	۸	Box 200×6	W10×22	Box 250×6	W10×22
۱۶ طبقه	۱	Box 450×20	W10×68	Box 500×20	W10×88
	۲	Box 450×15	W10×68	Box 450×20	W10×88
	۳	Box 450×15	W10×68	Box 450×15	W10×88
	۴	Box 450×15	W10×68	Box 450×15	W10×88
	۵	Box 450×15	W10×68	Box 450×15	W10×88
	۶	Box 450×15	W10×68	Box 450×15	W10×88
	۷	Box 350×15	W10×68	Box 350×15	W10×88
	۸	Box 350×15	W10×60	Box 350×15	W10×88
	۹	Box 350×15	W10×60	Box 350×15	W10×77
	۱۰	Box 350×15	W10×54	Box 350×15	W10×77
	۱۱	Box 350×10	W10×54	Box 350×15	W10×77
	۱۲	Box 350×10	W10×54	Box 350×15	W10×68
	۱۳	Box 250×10	W10×45	Box 300×10	W10×60
	۱۴	Box 250×10	W10×30	Box 300×10	W10×39
	۱۵	Box 200×7	W10×26	Box 250×8	W10×26
	۱۶	Box 200×6	W10×22	Box 250×8	W10×19

## ۳- مدل‌سازی مسئله

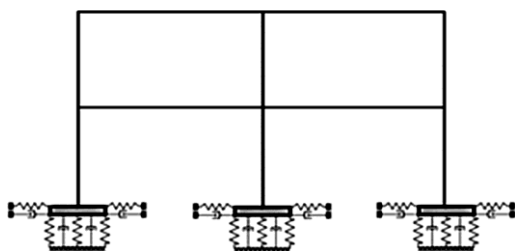
### ۳-۱- سازه

مدل‌های سازه‌ای مورد بررسی در این تحقیق چهار قاب ساختمانی دو بعدی فولادی با سیستم قاب خمشی می‌باشند. این قاب‌ها، قاب‌های میانی برداشت شده از پلان سه‌بعدی هستند. این قاب‌ها به دو دسته‌ی کلی ۸ و ۱۶ طبقه که هر کدام دارای ۳ و ۶ دهانه می‌باشند تقسیم می‌گردند. مشخصات مقاطع این سازه‌ها در جدول (۳) ارائه شده و سقف سازه‌ها صلب در نظر گرفته شده است. رفتار غیرخطی سازه‌ها با استفاده از تعریف مفاصل پلاستیک در تیرها و ستون‌ها (که مشخصات این مفاصل منطبق بر نشریه ۳۶۰ [۲۱] می‌باشد)، مدل‌سازی شده‌اند.

### ۳-۲- اندرکنش خاک و سازه

#### ۳-۲-۱- روش مدل‌سازی

همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده، سیستم خاک و سازه با استفاده از روش زیرسازه شبیه‌سازی شده است؛ طبق این روش تعدادی فنر و میراگر زیر فونداسیون سازه و به جای خاک قرار می‌گیرد، این فنر و میراگرها دارای سختی در دو راستای عمودی و افقی می‌باشند که مقادیر این مؤلفه‌های سختی و



شکل (۳): مدل‌سازی سیستم خاک-سازه به روش زیرسازه.

در تحقیق حاضر از روش زیرسازه با در نظر گرفتن فنر و میراگر خطی استفاده شده است، اما در مرجع [۲۲] مدل سازی اندرکنش خاک-سازه به صورت غیرخطی با روش زیرسازه صورت گرفته است.

### ۳-۳- توليد رکوردهای زلزله

با توجه به اینکه جنس خاک بر روی تاریخچه زمانی رکوردهای زلزله مؤثر است و همچنین اینکه اثر توالی لرزه‌ای در نظر گرفته شود؛ رکوردهای مورد استفاده در این تحقیق به شرح زیر تولید شده‌اند.

#### ۳-۳-۱- اثرات جنس خاک

ابتدا هر دو رکورد زلزله برای حداکثر شتاب زمین در سنگ بستر معادل  $PGA = 0.35g$  مقیاس شده و با توجه به اینکه رکوردهای مذکور مربوط به زلزله در محل سنگ بستر می‌باشند، باید اثرات لایه خاک نیز محاسبه شود تا بتوان از آن در مدل استفاده نمود؛ برای این کار خاک تک‌لایه‌ای به ضخامت ۳۰ متر در نظر گرفته شده و با توجه به مشخصات خاک‌ها توسط نرم‌افزار DEEPSOIL انجام شده رکورد زلزله بر روی تمام خاک‌های مورد بررسی، باز تولید شده است. شتاب‌نگاشت و طیف پاسخ هر رکورد در خاک‌های مختلف در شکل (۵) ترسیم شده است.

#### ۳-۳-۲- توالی لرزه‌ای

با توجه به رکوردهای ساخته شده در مرحله‌ی قبل روی هر خاک و با توجه به تعریف پدیده‌ی توالی لرزه‌ای، بر روی هر تیپ خاک چهار زلزله متوالی با ترکیب دو زلزله فوق و مجموعاً تعداد ۱۳ زلزله متوالی ساخته شده است به گونه‌ای که بین هر دو واقعه‌ی لرزه‌ای پشت سرهم، یک گام زمانی ۸۰ ثانیه‌ای قرار داده شده است که دلیل آن هم فراهم آمدن زمان مناسب جهت انجام ارتعاش آزاد سازه و توقف حرکت سازه به علت میرایی در زلزله اول است [۲۳].

$$K_v = \frac{GL}{1-\nu} \left[ 0.73 + 1.54 \left( \frac{B}{L} \right)^{0.75} \right] \quad (1)$$

$$K_h = \frac{GL}{2-\nu} \left[ 2 + 2.5 \left( \frac{B}{L} \right)^{0.85} \right] \quad (2)$$

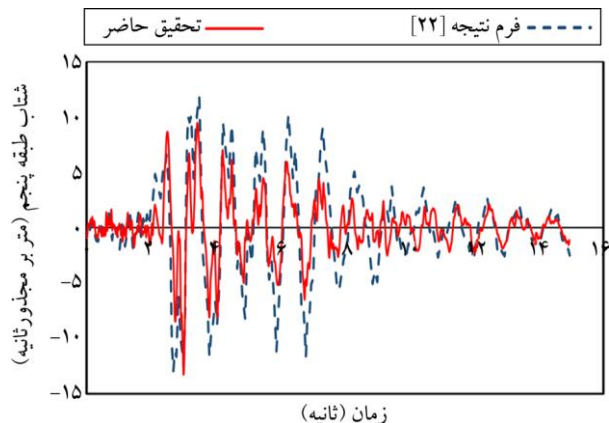
$$C_v = \rho V_p A \quad (3)$$

$$C_h = \rho V_s A \quad (4)$$

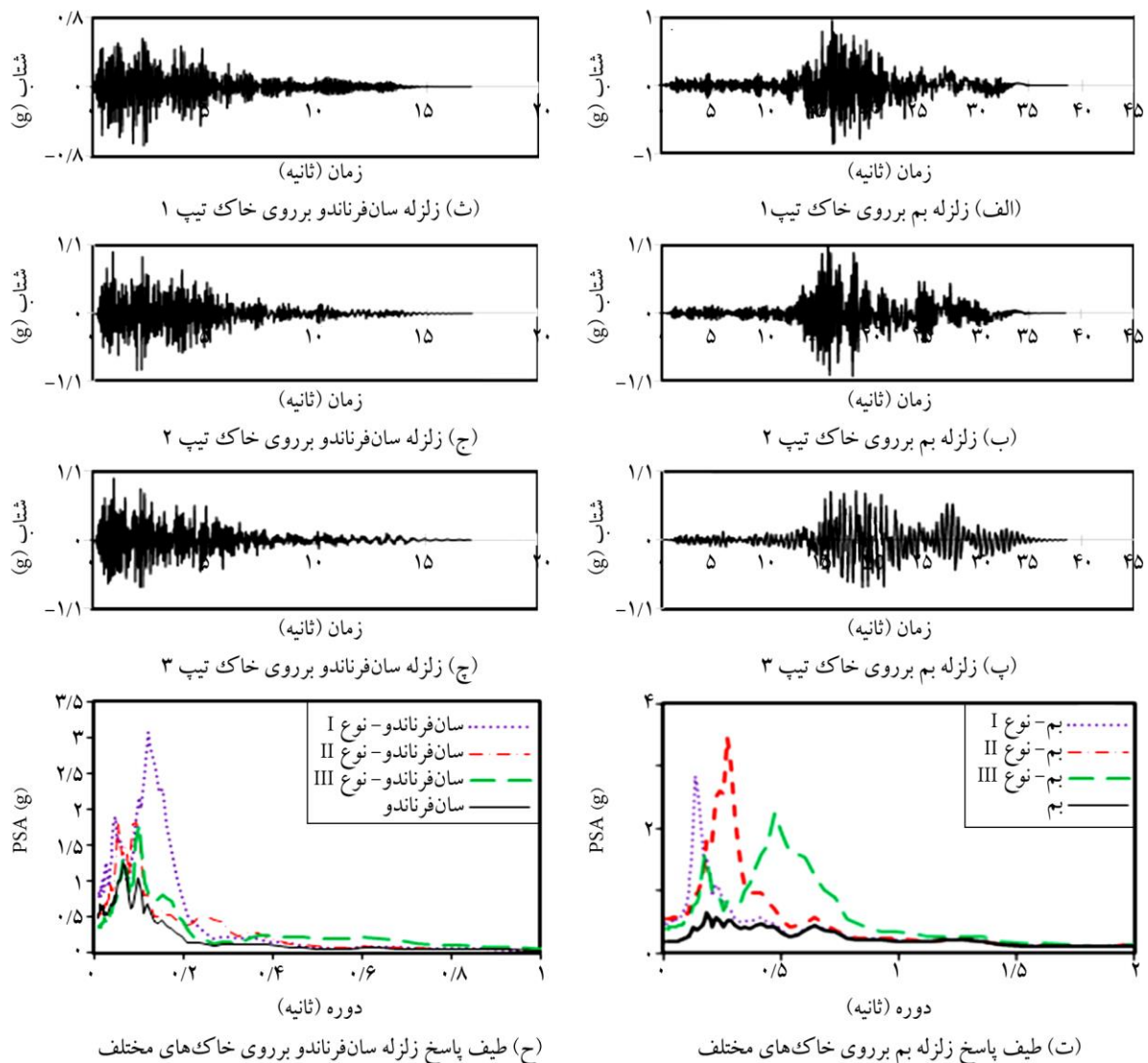
در این روابط،  $K_h$  سختی افقی،  $K_v$  سختی قائم، و  $C_h$  میرایی افقی و  $C_v$  میرایی قائم مورد استفاده بوده،  $G$  مدول برشی خاک،  $\nu$  ضریب پواسون خاک و  $\rho$  چگالی خاک و همچنین  $B$ ،  $L$  و  $A$  به ترتیب عرض، طول و مساحت فونداسیون می‌باشد.

#### ۳-۲-۲- صحت‌سنجی

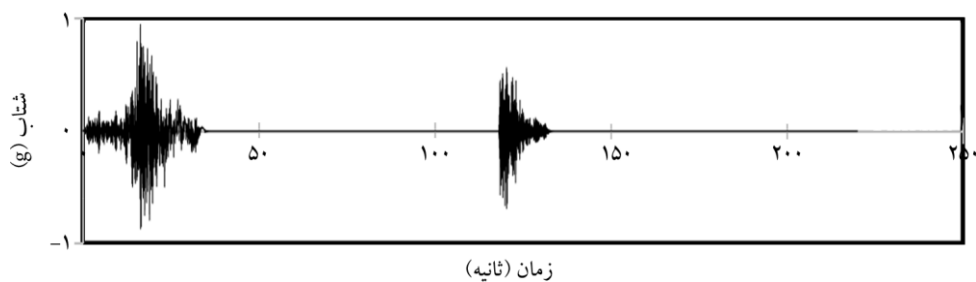
برای اطمینان از صحت مدل‌سازی اندرکنش خاک و سازه به روش زیرسازه، از مسئله مورد بررسی در مرجع [۲۲] استفاده شده است (به منظور اطلاع از مشخصات هندسی و مکانیکی اجزای مدل به [۲۲] مراجعه شود). نتایج حاصل از تحلیل سیستم خاک-سازه با نتایج ارائه شده در مرجع [۲۲] مقایسه گردید که این مقایسه در شکل (۴) ارائه شده است. این شکل حاکی از آن است که مدل‌سازی انجام شده از دقت خوبی برخوردار می‌باشد؛ در برخی نقاط اختلاف بین مدل‌سازی انجام شده در این مقاله با تحقیق انجام شده در [۲۲]، مشاهده می‌شود که اختلاف موجود در پاسخ‌ها به علت تفاوت روش مورد استفاده در مدل‌سازی می‌باشد.



شکل (۴): ارزیابی صحت مدل‌سازی؛ مقایسه نتایج مسئله مورد صحت‌سنجی با نتایج ارائه شده در [۲۲].



شکل (۵): تاریخچه زمانی زلزله‌های مورد استفاده بر روی خاک‌های مختلف.



شکل (۶): توالی لرزه‌ای ساخته شده از زلزله بم به عنوان لرزه نخست و زلزله سان‌فرناندو به عنوان لرزه ثانویه بر روی خاک تیپ ۱ (BS\_I).

از زلزله‌های متوالی ساخته شده را نشان می‌دهد.

### ۳-۴- شاخص‌های خرابی

در این تحقیق جهت ارزیابی رفتار قاب‌ها تحت اثر

با توجه به اینکه در این تحقیق اثرات محتوای فرکانسی در توالی لرزه‌ای در نظر گرفته شده، بنابراین چهار حالت مختلف برای توالی لرزه‌ای وجود دارد و چون سه تیپ خاک وجود دارد برای هر نوع خاک این عمل تکرار می‌شود. شکل (۶) نمونه‌ای

بزرگنمایی در خاک‌های مختلف (سه تیپ خاک) و چهار سازه جمعاً ۴۸ مدل اندرکنش خاک و سازه را برای توالی لرزه ای مدل شده است. حال برای مقایسه اثرات توالی لرزه ای در مقابل زلزله منفرد، مدل‌های اندرکنش خاک و سازه برای زلزله منفرد نیز ساخته شده است که در ادامه به بررسی نتایج پرداخته خواهد شد.

#### ۵- تفسیر نتایج

نتایج حاصل از آنالیز مدل‌ها حاکی از آن است که حداکثر تغییر مکان طبقات در سازه‌ها بدون توجه به زلزله وارده، با زیاد شدن تعداد دهانه‌ها و با ازدیاد ارتفاع سازه افزایش می‌یابد. این مقدار تغییر مکان در سازه‌های با خاک‌های نرم‌تر بیشتر است. ضمن آنکه با نرم‌تر شدن خاک تغییر مکان در قسمت‌های بالای سازه‌های ۱۶ طبقه به ثبات می‌رسد و این در حالی است که در سازه ۸ طبقه این تغییر مکان همواره در حال افزایش است و زلزله‌ی بم که دارای محتوای فرکانسی غالب است، تأثیر بسیار بیشتری روی پاسخ سازه‌ها گذاشته است.

همان‌طور که در شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شده است، عمده تفاوت در مقدار تغییر مکان سازه‌های ۱۶ طبقه با تعداد دهانه‌های مختلف در ۳ طبقه‌ی آخر رخ داده است، البته هرچه خاک نرم‌تر شده این مقدار به قسمت‌های میانی سازه متمایل گشته است.

هرگاه توالی لرزه‌ای با دو زلزله‌ی با پریود غالب بالا اتفاق بیفتد، آنگاه مقادیر پاسخ‌های تغییر مکان طبقات نسبت به زلزله تکی افزایش شدیدی می‌یابد و این در حالی است که اگر توالی لرزه‌ای ناشی از دو زلزله با پریود غالب کم باشد، مقادیر پاسخ‌ها نسبت به زلزله تکی با پریود غالب کم هیچ تفاوتی ندارد. همچنین در زلزله‌های متوالی، اگر زلزله اول با پریود غالب بالا و زلزله دوم با پریود غالب کم باشد، پاسخ سازه‌ها تفاوتی نسبت به حالت زلزله تکی با پریود غالب بالا ندارند و به عبارت دیگر، حداکثر پاسخ لرزه‌ای سازه ناشی از ارتعاشات زلزله اول اتفاق می‌افتد.

اندرکنش خاک-سازه و توالی لرزه‌ای از شاخص خرابی طبقات جابه‌جایی نسبی استفاده شده است. به منظور برآورد تغییر مکان تسلیم در هر سازه از HAZUS-MH MR2 [۲۵] استفاده شده است و مقادیر شاخص خرابی طبقات<sup>۳</sup> با استفاده از رابطه (۵) بر اساس [۱] محاسبه شده است:

$$\text{Damage Index} = \frac{\Delta_m - \Delta_y}{L} \quad (5)$$

که در این رابطه،  $\Delta_m$  و  $\Delta_y$  به ترتیب تغییر مکان طبقه و تغییر مکان تسلیم می‌باشد.

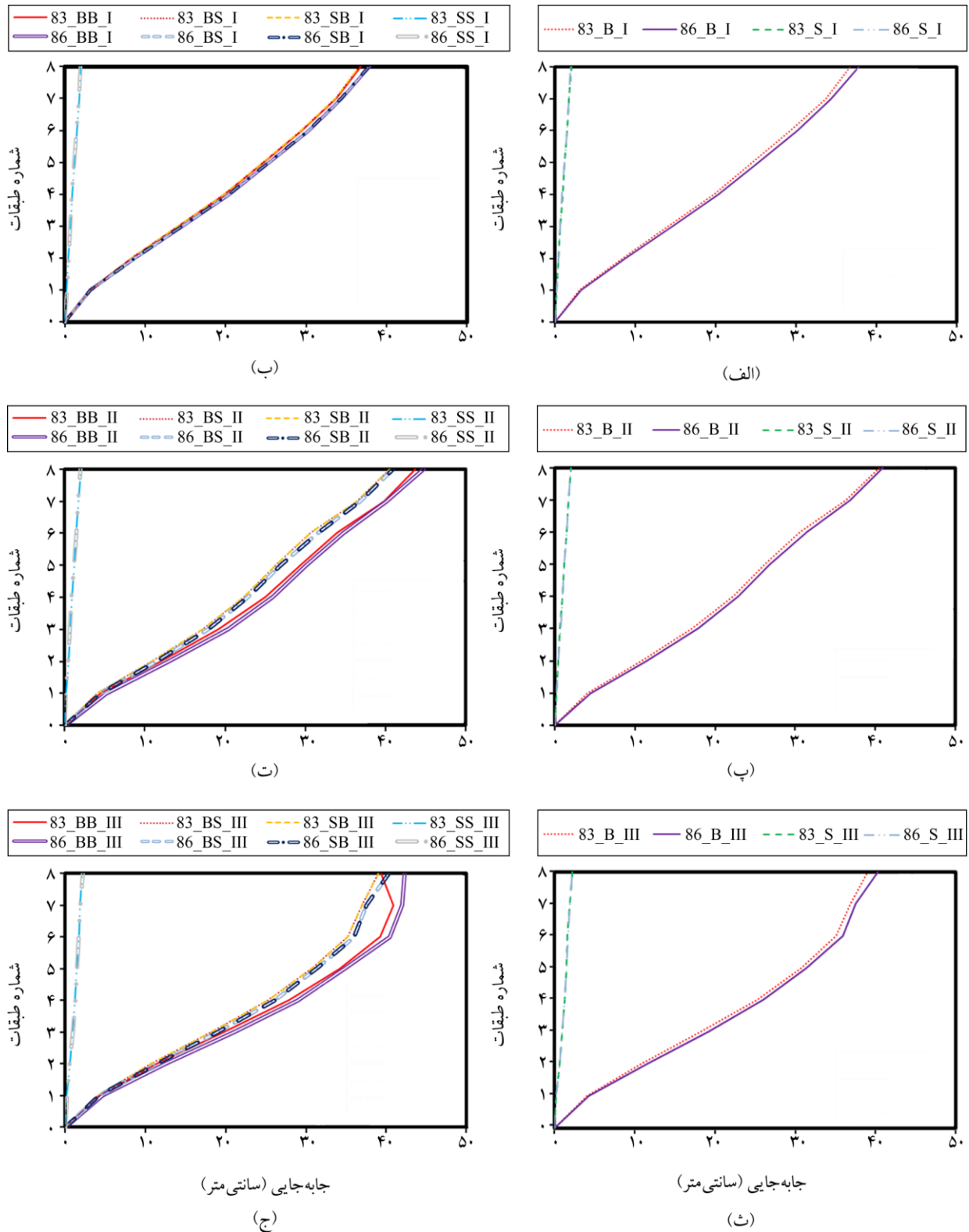
#### ۴- تحلیل مدل‌ها

تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی، بهترین و دقیق‌ترین روش‌ها، جهت تخمین پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌ها در برابر یک زلزله مشخص و معین می‌باشد. در حقیقت دینامیکی بودن و وابستگی این نوع تحلیل به زمان، باعث برتری آن نسبت به تحلیل‌های استاتیکی و همچنین تحلیل‌های خطی گشته است. از آنجا که در این تحقیق سعی در بررسی رفتار سازه تحت اثرات توالی لرزه‌ای بوده، لذا جهت تحلیل مدل‌های سازه‌ای، از روش تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی استفاده شده و از آنجا که احتمال ورود سازه به ناحیه پلاستیک تحت توالی لرزه‌ای زیاد است، لذا تحلیل از نوع غیرخطی انتخاب شده و مشخصات مفاصل پلاستیک بر اساس مرجع [۲۶] در مدل‌سازی‌ها وارد شده است.

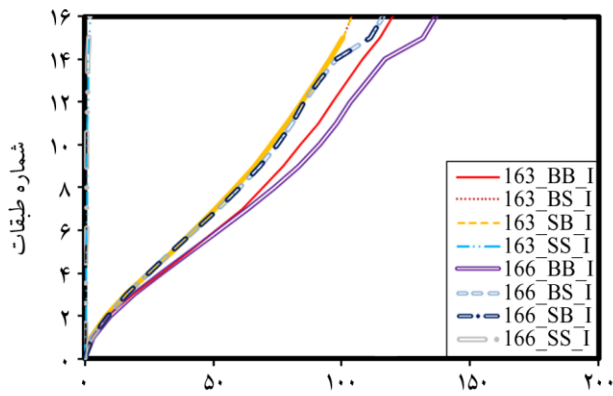
بر اساس نظرات چوپرا [۲۴] گام زمانی جهت انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی بهتر است از ۰/۱ دوره‌ی تناوب طبیعی سیستم تجاوز نکند، همچنین بایستی خیلی کوچک‌تر از کوچک‌ترین دوره‌ی تناوب نظیر چند فرکانس اصلی سازنده‌ی رکوردهای زلزله باشد که این مورد نیز در انجام محاسبات مدنظر قرار گرفته شده و گام زمانی انجام محاسبات، همان گام زمانی زلزله در نظر گرفته شده است.

در این تحقیق با ترکیب دو زلزله اصلی به چهار حالت برای بررسی اثرات محتوای فرکانسی در توالی لرزه‌ای، جمعاً چهار توالی لرزه‌ای کلی حاصل شد و با توجه به اثرات

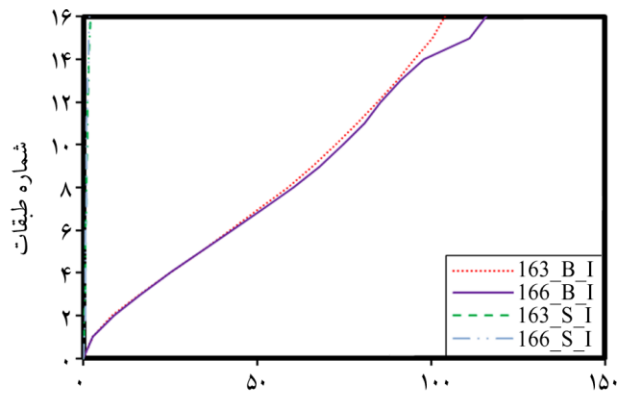




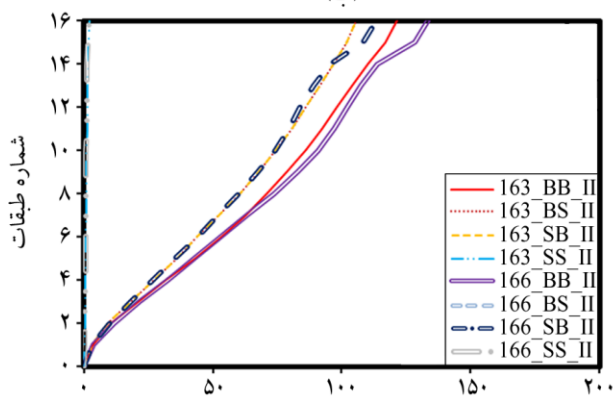
شکل (۷): تغییر مکان سازه‌های ۸ طبقه تحت زلزله منفرد ((الف)، (پ) و (ث)) و توالی لرزه‌ای ((ب)، (ت) و (ج)); (الف) و (ب) بر روی خاک تیپ ۱، (پ) و (ت) بر روی خاک تیپ ۲ و (ث) و (ج) بر روی خاک تیپ ۳.



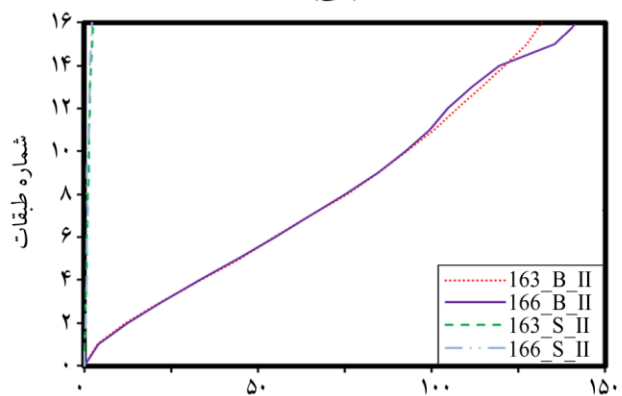
(ب)



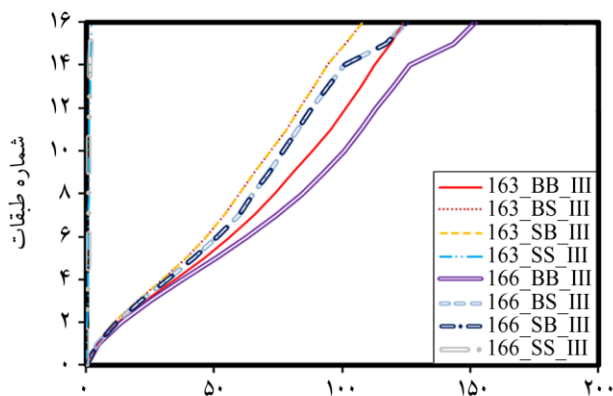
(الف)



(ت)

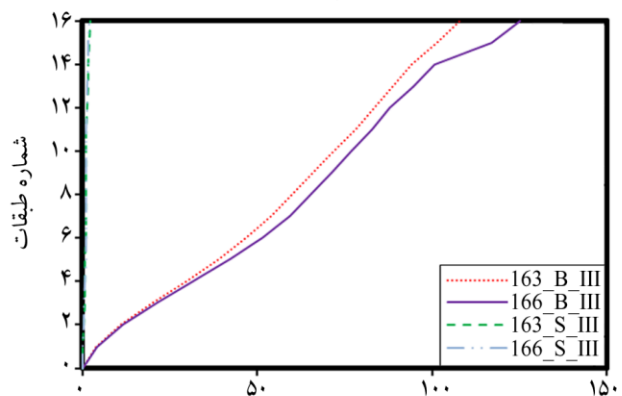


(پ)



جابه‌جایی (سانتی‌متر)

(ج)



جابه‌جایی (سانتی‌متر)

(ث)

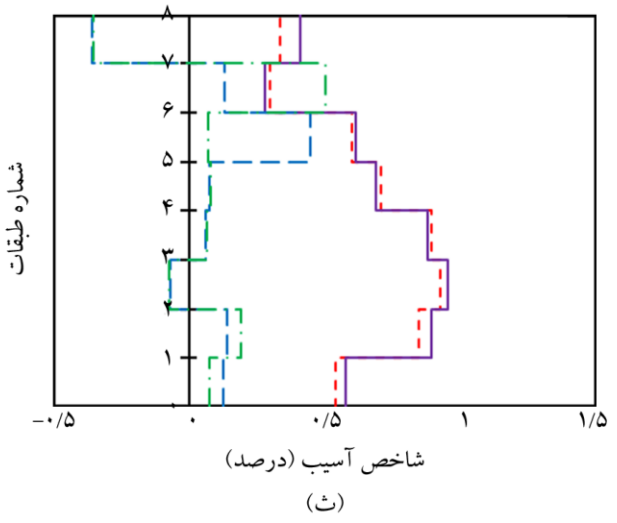
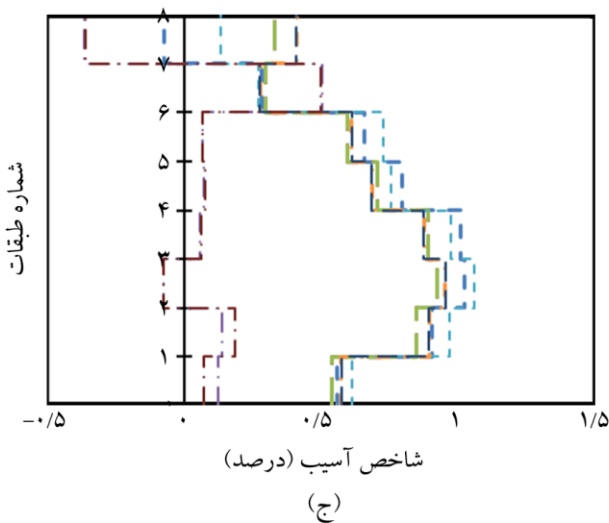
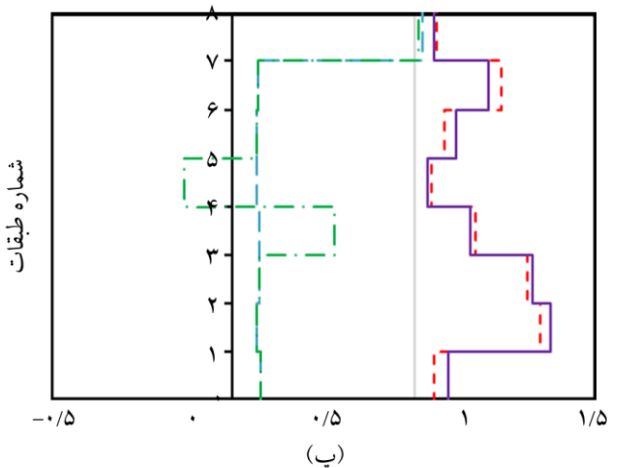
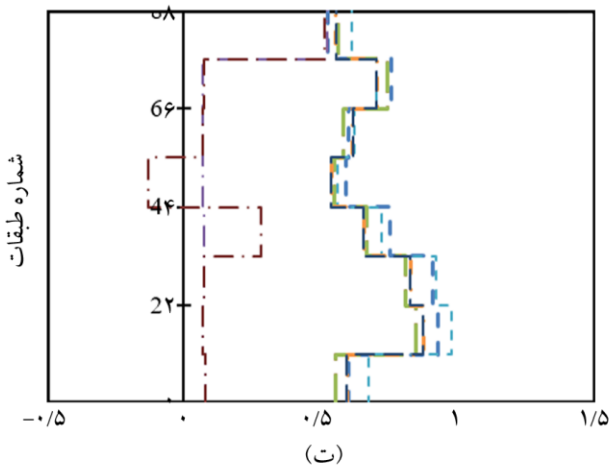
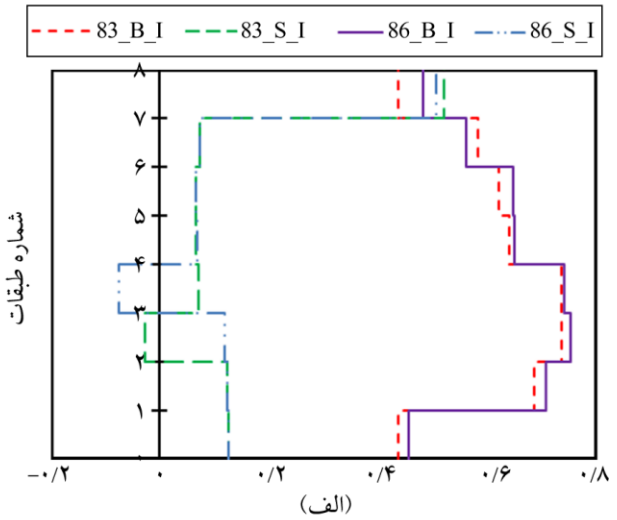
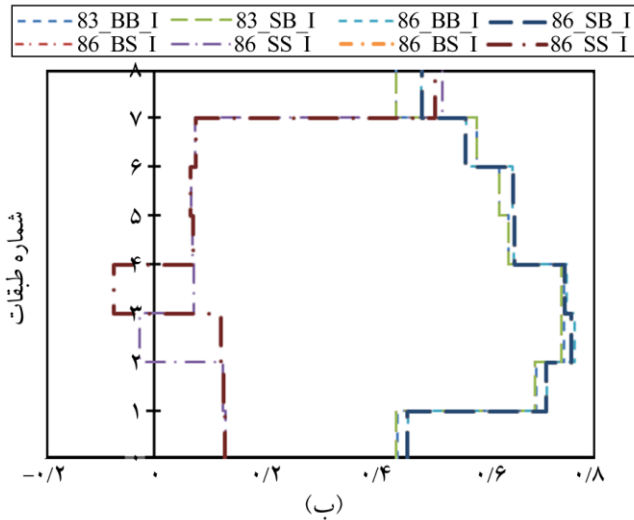
شکل (۸): تغییر مکان سازه‌های ۱۶ طبقه تحت زلزله منفرد (الف)، (پ) و (ث)) و توالی لرزه‌ای ((ب)، (ت) و (ج))؛ (الف) و (ب) بر روی خاک تیپ ۱، (پ) و (ت) بر روی خاک تیپ ۲ و (ث) و (ج) بر روی خاک تیپ ۳.

تعداد دهانه‌ها و تعداد طبقات نیز در افزایش درصد خرابی مؤثر است. در کنار این موارد در صورت اعمال یک زلزله با محتوای فرکانسی بالا، افزایش درصد خرابی چشمگیرتر خواهد بود. بررسی اثرات توالی لرزه‌ای بر میزان خرابی در یک سطح خرابی معین نشان می‌دهد، در صورتی که دو زلزله متوالی با

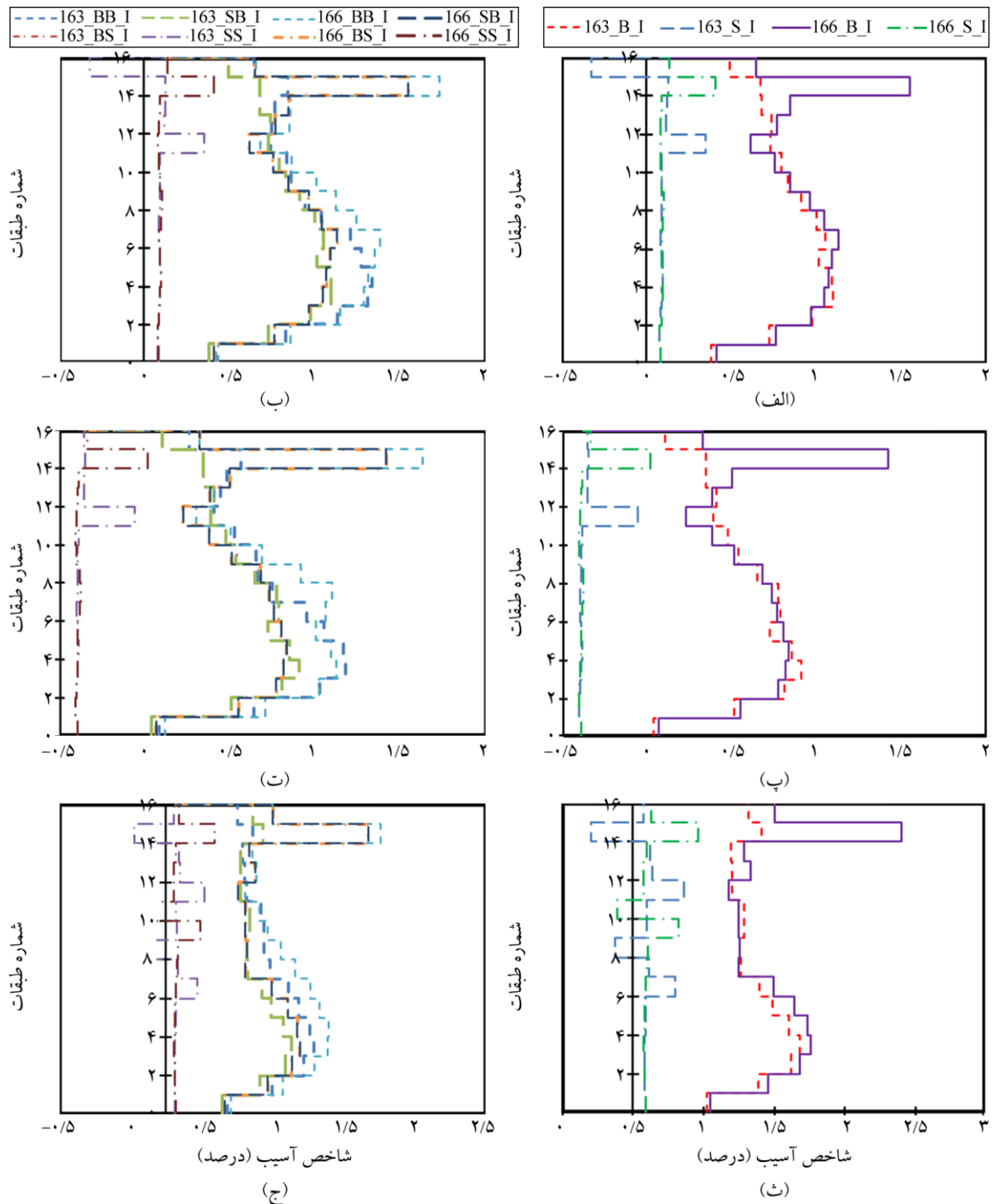
در شکل‌های (۹) و (۱۰) مقادیر شاخص خرابی در سطح خرابی محدود برای قاب‌های ۸ و ۱۶ طبقه برای سه نوع خاک ترسیم شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود در یک سطح خرابی یکسان، با نرم‌تر شدن خاک، درصد خرابی در سازه‌ها نیز افزایش یافته است. از طرف دیگر می‌توان بیان کرد که افزایش

یافت. این در صورتی است که سازه با تعداد دهانه‌های بیشتر در این شرایط آسیب بیشتری را تجربه خواهد کرد.

فرکانس بالا به صورت متوالی روی دهند و یا زلزله ثانویه اعمالی به سازه فرکانس بالا باشد، درصد خرابی سازه افزایش خواهد



شکل (۹): تغییرات شاخص خرابی طبقات تغییر مکان نسبی (سطح خرابی محدود) طبقات سازه‌های ۸ طبقه تحت زلزله منفرد ((الف)، (پ) و (ث)) و توالی لرزه‌ای ((ب)، (ت) و (ج)); (الف) و (ب) بر روی خاک تیپ ۱، (پ) و (ت) بر روی خاک تیپ ۲ و (ث) و (ج) بر روی خاک تیپ ۳.



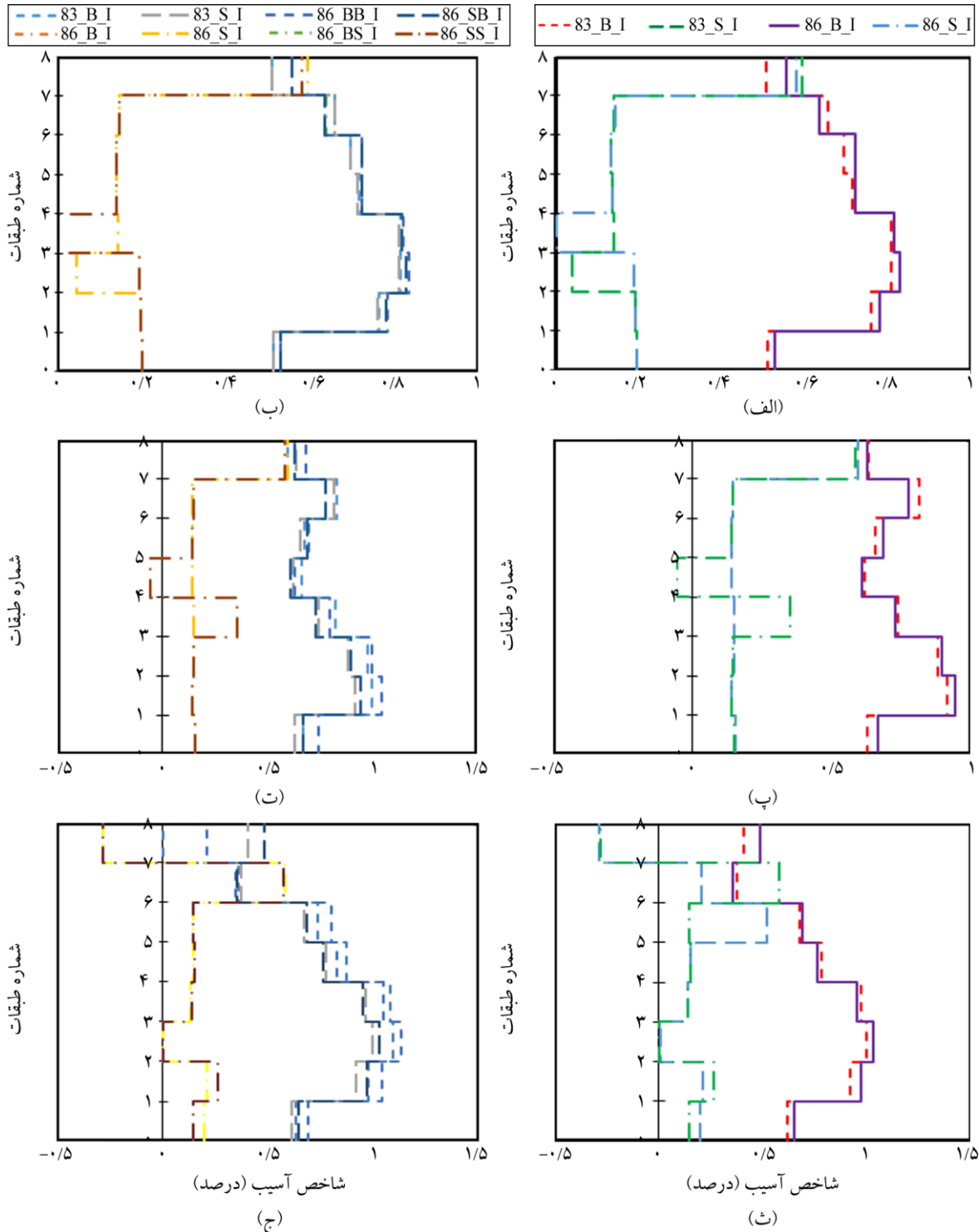
شکل (۱۰): تغییرات شاخص خرابی طبقات تغییر مکان نسبی (سطح خرابی محدود) طبقات سازه‌های ۱۶ طبقه تحت زلزله منفرد ((الف)، (ب) و (ت)) و توالی لرزه‌ای ((ب)، (ت) و (ج)); (الف) و (ب) بر روی خاک تپ ۱، (پ) و (ت) بر روی خاک تپ ۲ و (ث) و (ج) بر روی خاک تپ ۳.

فرکانسی بالا، در سازه با تعداد دهانه‌های کمتر در ناحیه یک چهارم پایینی سازه روی می‌دهد ولی در سازه با تعداد دهانه بیشتر این محل به یک چهارم بالایی سازه انتقال یافته است.

همان گونه که از شکل‌های (۹) تا (۱۶) مشخص است، محل ایجاد حداکثر خرابی ارتباطی با نوع خاکی که سازه بر روی آن قرار گرفته است، ندارد. در سازه‌های ۱۶ طبقه حداکثر خرابی در صورت اعمال حداقل یک زلزله با محتوای

می‌باشد؛ همچنین رخداد توالی لرزه‌ای که در مقدار حداکثر خرابی تأثیرگذار بود، تأثیر چندانی در محل رخداد حداکثر خرابی ندارد.

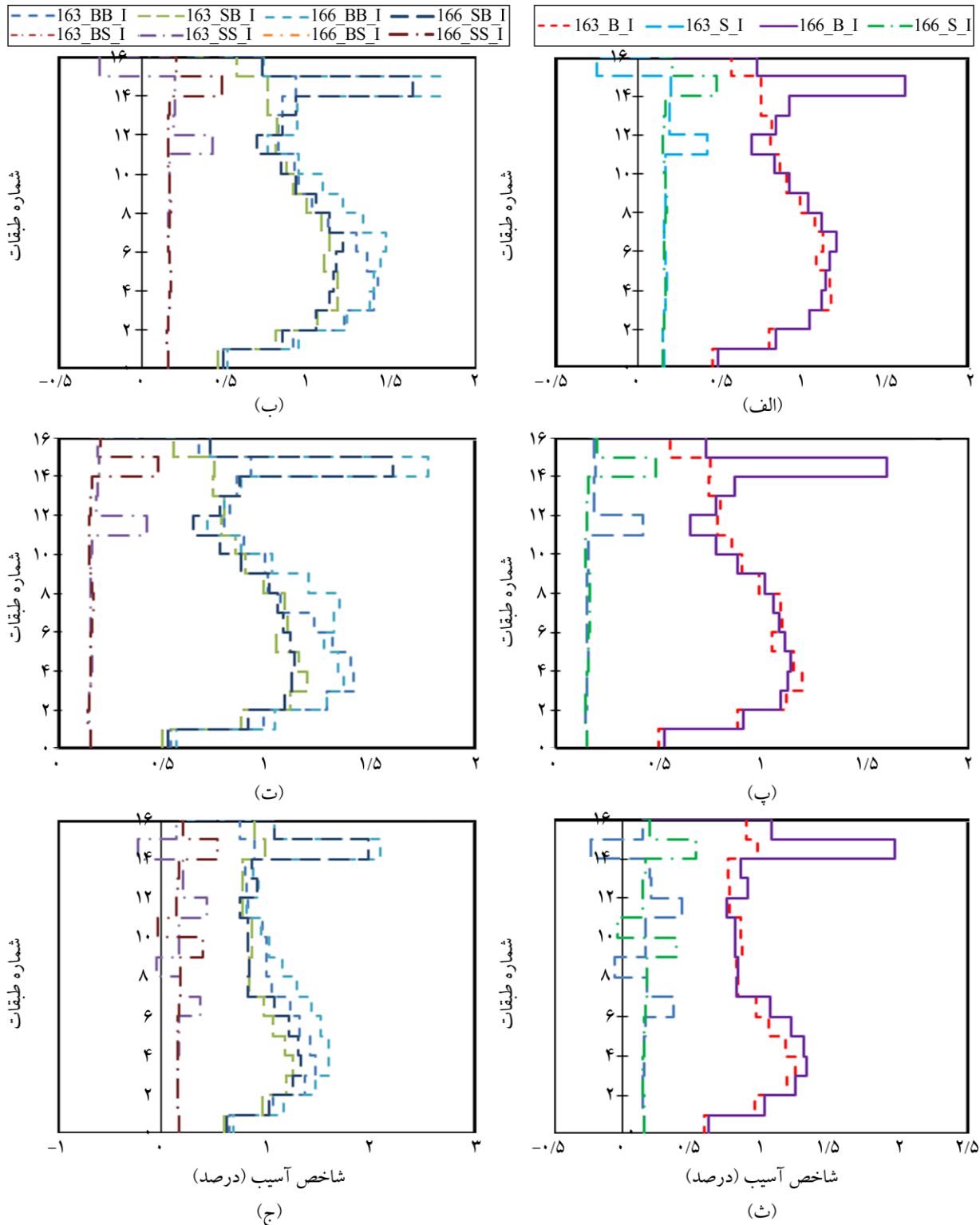
در صورت رخداد زلزله منفرد با فرکانس پایین یا توالی لرزه‌ای که در آن هر دو زلزله دارای محتوای فرکانسی پایین باشد، محل رخداد حداکثر خرابی عموماً در بالاترین طبقات



شکل (۱۱): تغییرات شاخص خرابی طبقات تغییر مکان نسبی (سطح خرابی متوسط) طبقات سازه‌های ۸ طبقه تحت زلزله منفرد ((الف)، (پ) و (ث)) و توالی لرزه‌ای ((ب)، (ت) و (ج))؛ ((الف) و (ب) بر روی خاک تیپ ۱، (پ) و (ت) بر روی خاک تیپ ۲ و (ث) و (ج) بر روی خاک تیپ ۳.

خرابی در حدود  $0/8$  تا  $1/5$  برابر افزایش یافته است. این افزایش در سازه‌های تحت زلزله با محتوای فرکانسی بالا بیشتر است.

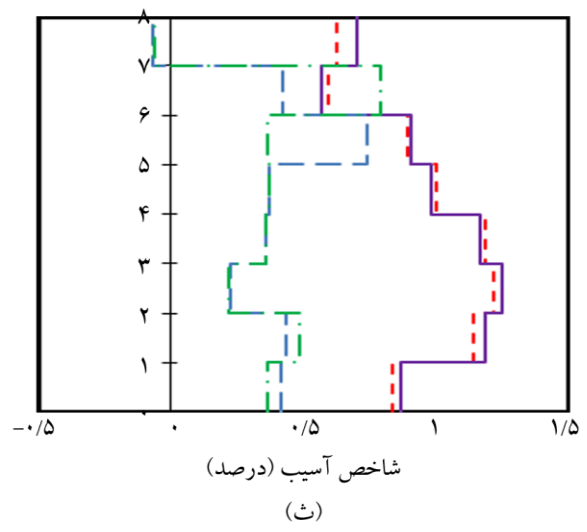
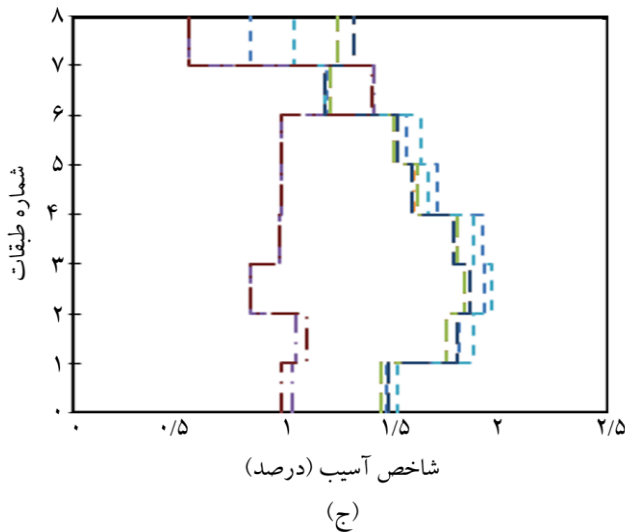
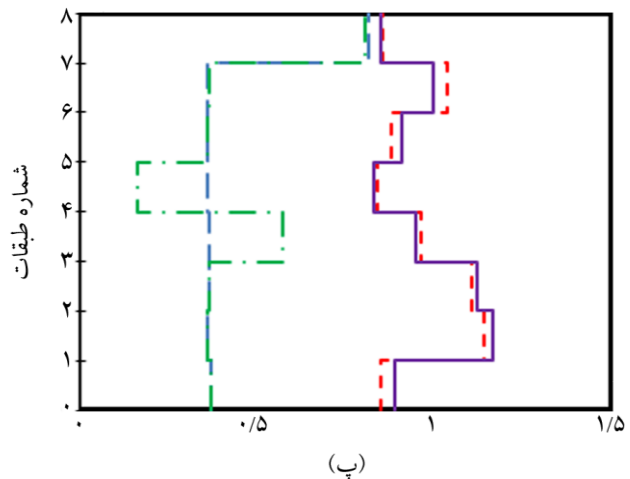
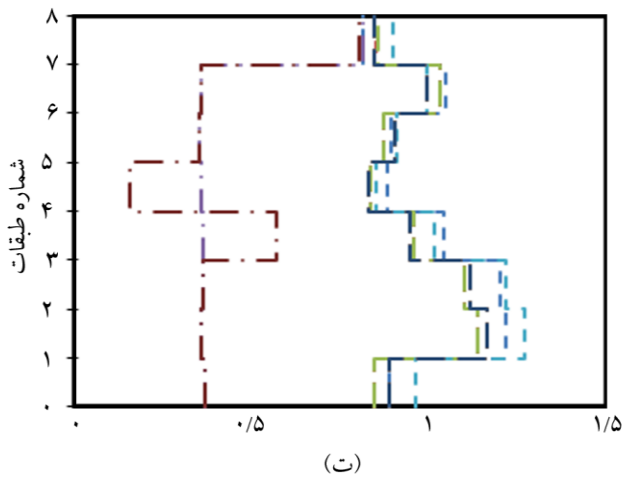
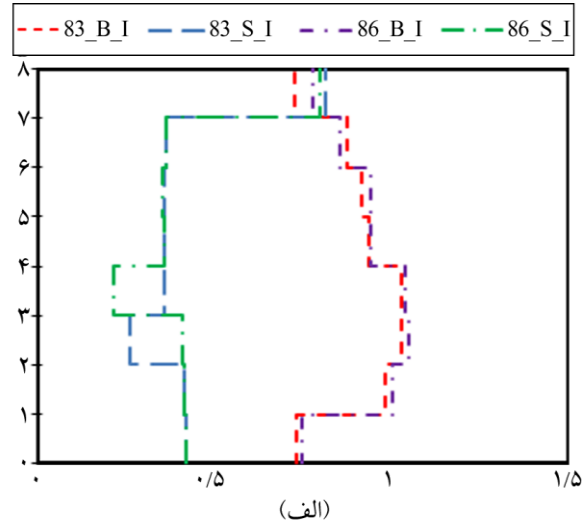
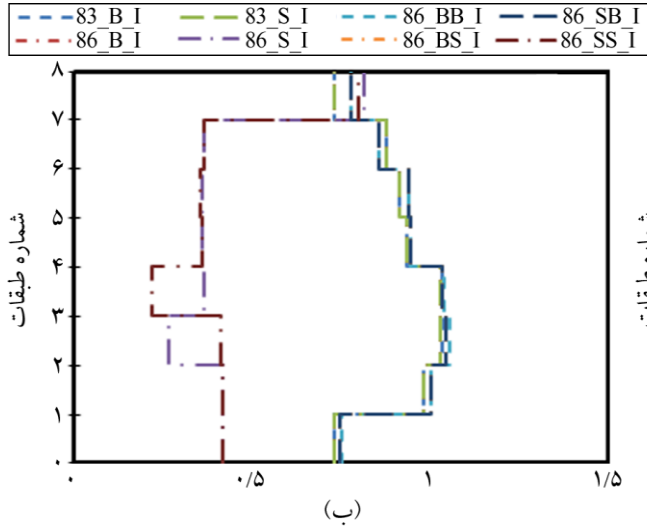
برحسب شکل‌های (۹) تا (۱۶) در صورتی که به سازه اجازه داده شود که وارد سطوح بالاتری از آسیب‌پذیری گردد، میزان



شکل (۱۲): تغییرات شاخص خرابی طبقات تغییر مکان نسبی (سطح خرابی متوسط) طبقات سازه‌های ۱۶ طبقه تحت زلزله منفرد ((الف)، (پ) و (ث)) و توالی لرزه‌ای ((ب)، (ت) و (ج)); (الف) و (ب) بر روی خاک تیپ ۱، (پ) و (ت) بر روی خاک تیپ ۲ و (ث) و (ج) بر روی خاک تیپ ۳.

پلاستیک در سازه می‌شود که این خود دلیل دیگری برافزایش خرابی در سازه است.

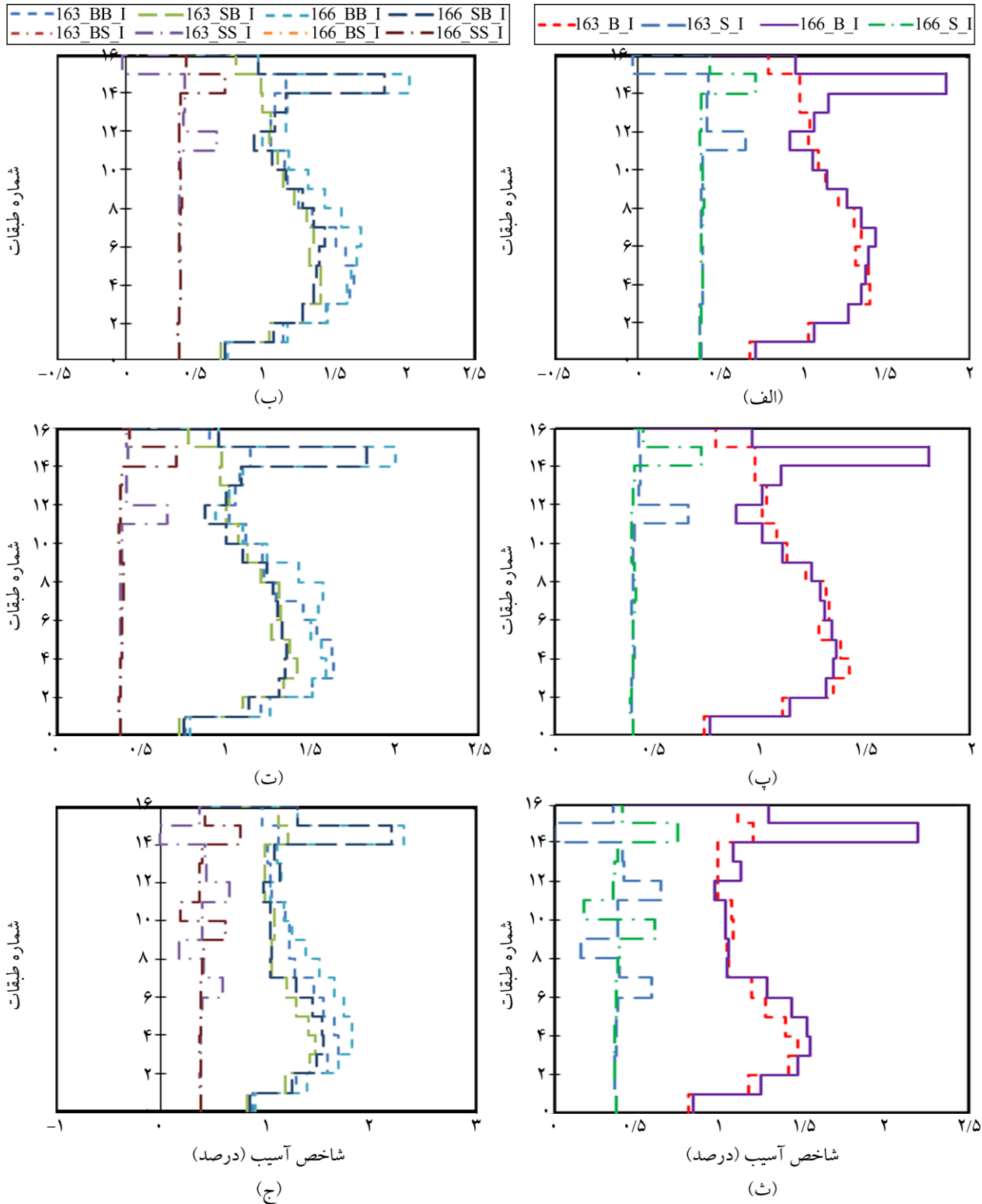
با نرم‌تر شدن خاک، ورود سازه به رفتار غیرخطی نیز افزایش یافته است، این امر موجب افزایش تشکیل مفاصل



شکل (۱۳): تغییرات شاخص خرابی طبقات تغییر مکان نسبی (سطح خرابی شدید) طبقات سازه‌های ۸ طبقه تحت زلزله منفرد ((الف)، (پ) و (ث)) و توالی لرزه‌ای ((ب)، (ت) و (ج)); (الف) و (ب) بر روی خاک تپ ۱، (پ) و (ت) بر روی خاک تپ ۲ و (ث) و (ج) بر روی خاک تپ ۳.

دچار آسیب شده‌اند که این امر ناشی از تشکیل تعداد مفاصل پلاستیک کمتر و عدم ورود سازه به فاز پلاستیک خود بوده است.

برحسب شکل‌های (۹) تا (۱۶) می‌توان بیان کرد که سازه‌هایی که تحت زلزله‌های با محتوای فرکانسی پایین قرار می‌گیرند، کمتر

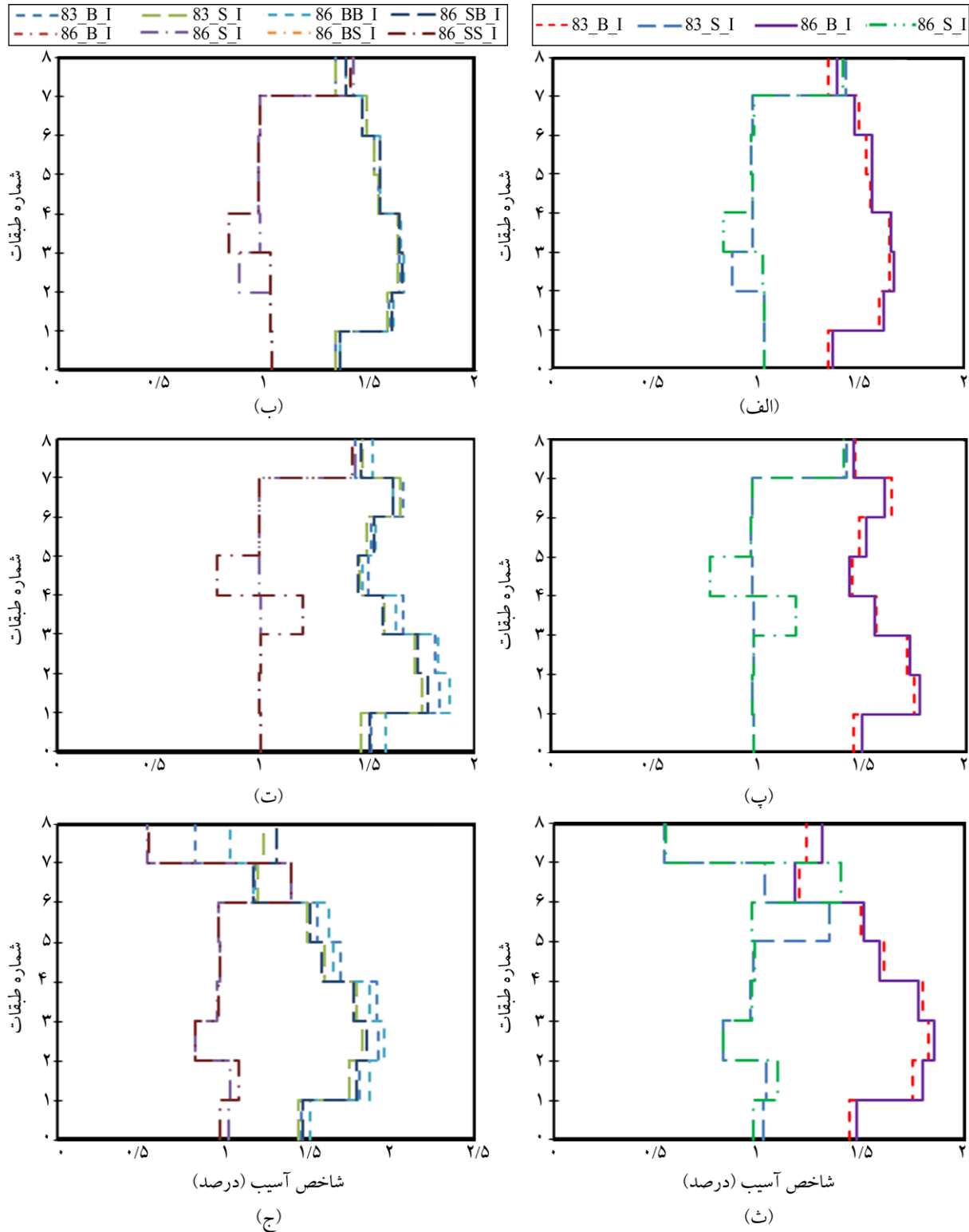


شکل (۱۴): تغییرات شاخص خرابی طبقات تغییر مکان نسبی (سطح خرابی شدید) طبقات سازه‌های ۱۶ طبقه تحت زلزله منفرد ((الف)، (پ) و (ت)) و توالی لرزه‌ای ((ب)، (ت) و (ج))؛ ((الف) و (ب) بر روی خاک تپ ۱، (پ) و (ت) بر روی خاک تپ ۲ و (ت) و (ج) بر روی خاک تپ ۳.

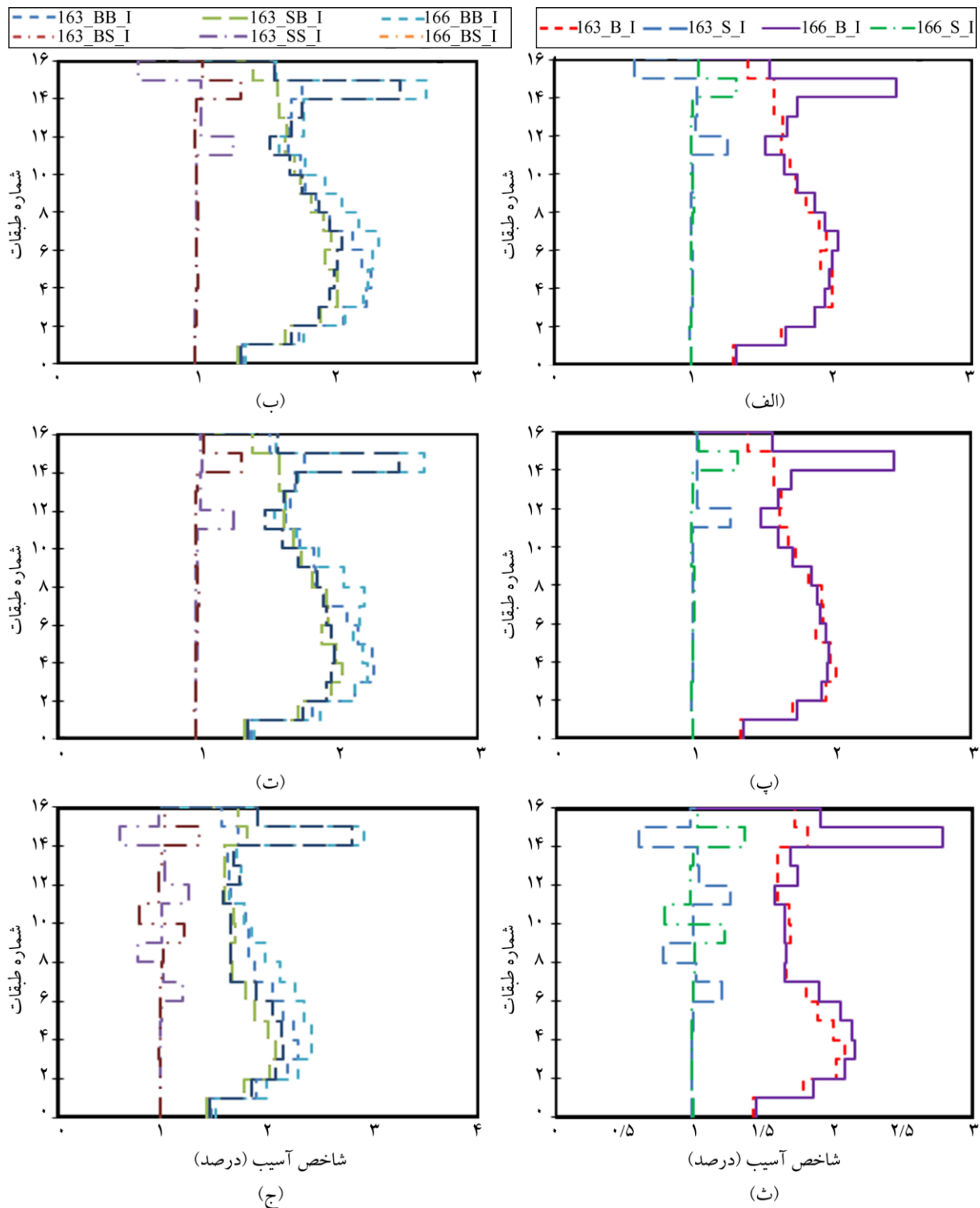


پلاستیک بیشتر در سازه است. اعمال زلزله با فرکانس بالا نیز موجب افزایش تعداد مفاصل و خرابی بیشتر در سازه‌ها می‌شود.

با افزایش تعداد دهانه‌ها و افزایش تعداد طبقات، سازه خرابی بیشتری را تجربه کرده است که این به مفهوم تشکیل تعداد مفاصل



شکل (۱۵): تغییرات شاخص خرابی طبقات تغییر مکان نسبی (سطح خرابی کامل) طبقات سازه‌های ۸ طبقه تحت زلزله منفرد ((الف)، (ب) و (ت)) و توالی لرزه‌ای ((ب)، (ت) و (ج))؛ ((الف) و (ب)) بر روی خاک تپ ۱، (پ) و (ت) بر روی خاک تپ ۲ و (ج) و (ث) بر روی خاک تپ ۳.



شکل (۱۶): تغییرات شاخص خرابی طبقات تغییر مکان نسبی (سطح خرابی کامل) طبقات سازه‌های ۱۶ طبقه تحت زلزله منفرد ((الف)، (ب) و (ث)) و توالی لرزه‌ای ((ب)، (ت) و (ج))؛ ((الف) و (ب) بر روی خاک تیپ ۱، (پ) و (ت) بر روی خاک تیپ ۲ و (ث) و (ج) بر روی خاک تیپ ۳.

### ۶- نتیجه‌گیری

زلزله‌های منفرد، با محتوای فرکانسی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. دو قاب ۸ و ۱۶ طبقه که هریک دارای تعداد ۳ و ۶ دهانه می‌باشند بر روی سه تیپ خاک مدل‌سازی شده و مورد

در مقاله حاضر، رفتار لرزه‌ای اندرکنش خاک و قاب‌های خمشی فولادی (به روش زیرسازه)، تحت اثر زلزله‌های متوالی و

- performance assessment of the energy-based cumulative damage index in concrete reinforced frames. *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*, **3**(3), 16-29 (in Persian).
2. Tasnimi, A. and Pazoki, M. (2017) Assessment of the park- ang damage index for performance levels of RC moment resisting frames. *Modares Civil Engineering Journal*, **17**(1), 43-53 (in Persian).
  3. Zhai, C.H., Zheng, Z., Li, S., and Xie, L.L. (2015) Seismic analyses of a RCC building under mainshock-aftershock seismic sequences. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **74**, 46-55.
  4. Hatzivassiliou, M. and Hatzigeorgiou, G.D. (2015) Seismic sequence effects on three-dimensional reinforced concrete buildings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **72**, 77-88.
  5. Han, R., Li, Y., and van de Lindt, J. (2015) Impact of aftershocks and uncertainties on the seismic evaluation of non-ductile reinforced concrete frame buildings. *Engineering Structures*, **100**, 149-163.
  6. Fragiaco, M., Amadio, C., and Macorini, L. (2004) Seismic response of steel frames under repeated earthquake ground motions. *Engineering Structures*, **26**(13), 2021-2035.
  7. Faisal, A., Majid, T.A., and Hatzigeorgiou, G.D. (2013) Investigation of story ductility demands of inelastic concrete frames subjected to repeated earthquakes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **44**, 42-53.
  8. Ruiz-García, J., Marín, M.V., and Terán-Gilmore, A. (2014) Effect of seismic sequences in reinforced concrete frame buildings located in soft-soil sites. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **63**, 56-68.
  9. Raheem, S.E.A., Ahmed, M.M., and Alazrak, T.M. (2015) Evaluation of soil-foundation-structure interaction effects on seismic response demands of multi-story MRF buildings on raft foundations. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, **7**(1), 11-30.
  10. Veletsos, A.S. and Tang, Y. (1990) Soil-structure interaction effects for laterally excited liquid storage tanks. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **19**(4), 473-496.

بررسی قرار گرفته‌اند و به منظور مطالعه اثرات توالی لرزه‌ای از دو زلزله با محتوای فرکانسی متفاوت استفاده شده است.

نتایج حاصله حاکی از آن است که به طور کلی توالی لرزه‌ای منجر به افزایش تغییر مکان نسبی طبقات و به تبع آن افزایش خسارات وارد بر سازه می‌شود و در نظر گرفتن اثرات توالی لرزه‌ای در خاک‌های نرم، با توجه به افزایش نیاز تغییر مکان در سازه‌ها بیشتر حائز اهمیت است؛ به علاوه آنکه، توالی لرزه‌ای متشکل از زلزله‌های متوالی دارای پیوند غالب بالاتر، منجر به خسارات شدیدتری به سازه می‌گردد. نتایج تحلیل‌های صورت گرفته مشخص کرده است که تغییر مکان در سازه‌ها تحت تحریک توالی لرزه‌ای ۲۰ درصد بیشتر از پاسخ تغییر مکانی سازه‌های تحت زلزله تکی است. تغییرات به وجود آمده در پاسخی تغییر مکان منجر به تغییرات شاخص خرابی سازه‌ها نیز به میزان ۲۰ درصد در سازه‌های تحت بارگذاری لرزه‌ای متوالی نسبت به بارگذاری لرزه‌ای تکی شده است.

با افزایش اثرات اندرکنش خاک-سازه در اثر نرم شدن خاک تغییر مکان در سازه‌ها ۱۰ درصد افزایش یافته است، این امر موجب افزایش ۱۵ درصدی خرابی مشاهده شده در سازه‌های تحت زلزله تک و ۱۰ درصدی در خرابی در سازه‌های تحت بارگذاری متوالی گردیده است. اثر توالی لرزه‌ای به اثرات اندرکنش خاک-سازه اضافه می‌شود و موجب خرابی بیشتر سازه‌ها شده است.

مطالب فوق نشان می‌دهند که قاب‌های خمشی فولادی طراحی شده بر اساس آیین نامه ۲۸۰۰ برای مناطق با لرزه‌خیزی زیاد و خیلی زیاد، نیاز به کنترل و بررسی بیشتری به هنگام وقوع زلزله‌های متوالی دارد به‌ویژه زمانی که اثرات خاک نیز لحاظ گردد؛ لذا پیشنهاد می‌شود، جهت طراحی سازه‌های فولادی تأثیرات توالی لرزه‌ای و همچنین اثرات خاک به صورت دقیق‌تر بر روی پاسخ لرزه‌ای آنها در نظر گرفته شوند.

## مراجع

1. Vahdani, R., Bitarafan, M., and Khodakarami, M.I. (2016) Effect of the soil-structure interaction on

- supported by a 4-story SMRF: Effect of nonlinear soil-structure interaction. *Structures*, **3**, 200-210.
23. Hatzigeorgiou, G.D. and Liolios, A.A. (2010) Nonlinear behaviour of RC frames under repeated strong ground motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **30**(10), 1010-1025.
  24. Chopra, A.K. (2005) *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Tsinghua University Press.
  25. Federal Emergency Management Agency and National Institute of Building Sciences (2006b) *Multi-Hazard Loss Estimation Methodology, HAZUS-MH MR2 Technical Manual*. Prepared for the Federal Emergency Management Agency, Washington DC, United States, 727 p.
  26. ASCE/SEI 41-06 (2007) *Seismic Rehabilitation of Existing Buildings*. American Society of Civil Engineers.
  11. Farajian, M., Khodakarami, M.I., and Kontoni, D.P.N. (2017) Evaluation of soil-structure interaction on the seismic response of liquid storage tanks under earthquake ground motions. *Computation*, **5**(1), 17.
  12. Saadeghvaziri, M.A., Yazdani-Motlagh, A.R., and Rashidi, S. (2000) Effects of soil-structure interaction on longitudinal seismic response of MSSS bridges. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **20**(1-4), 231-242.
  13. Mylonakis, G. and Gazetas, G. (2000) Seismic soil-structure interaction: beneficial or detrimental? *Journal of Earthquake Engineering*, **4**(3), 277-301.
  14. Shakib, H. and Atefatdoost, G.R. (2011) Effect of soil-structure interaction on torsional response of asymmetric wall type systems. *Procedia Engineering*, **14**, 1729-1736.
  15. Eser, M., Aydemir, C., and Ekiz, I. (2011) Effects of soil structure interaction on strength reduction factors. *Procedia Engineering*, **14**, 1696-1704.
  16. Building and Housing Research Center (BHRC) (2014) *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, Standard No. 2800*, 4<sup>th</sup> Edition (in Persian).
  17. Building and Housing Research Center (BHRC) (2013) *Iranian National Building Code, Part 6: Minimum Design Loads for Buildings* (in Persian).
  18. Building and Housing Research Center (BHRC) (2013) *Iranian National Building Code, Part 6: Design of Steel Structures* (in Persian).
  19. Livaoglu, R. (2008) Investigation of seismic behavior of fluid-rectangular tank-soil/foundation systems in frequency domain. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **28**(2), 132-146.
  20. PEER Ground Motions Database (2012) ([http://peer.berkeley.edu/peer\\_ground\\_motion\\_database](http://peer.berkeley.edu/peer_ground_motion_database)).
  21. Management and Planning Organization (MPO) of Iran (2007) *Instruction for Rehabilitation of Existing Buildings, Monograph No. 360*. Office of Deputy for Technical Affairs, MPO (in Persian).
  22. Raychowdhury, P. and Ray-Chaudhuri, S. (2015) Seismic response of nonstructural components

## Evaluation Damage Index of Steel Moment frames by Considering the Effects of Soil-Structure Interaction under Seismic Sequence

Alireza Karkabadi<sup>1</sup>, Mohammad Iman Khodakarami<sup>2\*</sup>, and Farzaneh Nabati<sup>3</sup>

1. M.Sc. Student in Earthquake Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran
2. Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran,  
\*Corresponding Author, email: khodakarami@semnan.ac.ir
3. Ph.D. Student of Earthquake Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

### 1. Abstract

One of the main targets in designing structures is achieving adequate level of inter-story drift and ductility for controlling damage level. When a structure is subjected to sequential earthquakes, damage control becomes more critical. This seismic sequence as a result of the occurrence of strong and moderate earthquake ground motion in a short time strongly affects the seismic response of structures. Studies revealed that variation in the seismic responses such as displacement, ductility, absorbed energy etc. cause modifications in structural damage states. A damage index can numerically quantify the structural damage of buildings. Several damage indices have been developed for evaluating the seismic performance of structures.

The aim of this paper is to investigate the effect of seismic sequence of earthquake ground motion on the damage indexes variation and the seismic performance of steel moment frame structures considering soil-structure interaction (SSI). For the present work, the drift damage index is selected for measuring the story damage due to the inter-story drift. This index has been calculated by performing the nonlinear time-history analysis on a set of selected group of steel frames subjected to selected seismic excitations and sequential earthquakes.

### 2. Methodology

To this end, four steel moment frames with 8 and 16 stories are considered each of which three and six bays have. Soil-structure-interaction is considered by employing dampers and springs having specified damping and stiffness through cone method. For modeling SSI effects, three types of soil based on Standard 2800 are considered. For each soil-structure model, different responses are measured under different scenarios of sequential earthquakes.

### 3. Results and Discussion

The results of time-history analysis show that the relative displacement of the structure and inter-story drift are increased when the structure is subjected to the seismic sequence. As a result, the drift damage index induced to the structure. The study findings demonstrate as soil becomes softer, the structural demands increases and consequently the damage index rises and SSI amplified the structural damage level. Therefore, frames built on soft soil subjected to sequential earthquakes experienced more damages.

### 4. Conclusions

The obtained responses show that a special attention should be paid for designing of steel structures due to the preventing extensive structural damage in high seismic zone when they are subjected to seismic sequence excitation. Furthermore, soil-structure-interaction is an important parameter that should be considered for such conditions. Therefore, it is recommended that the effects of seismic sequence and soil-structure-interaction should be accounted for better estimation and evaluated accurate responses of steel shear frame.

**Keywords:** Seismic Sequence, Soil-Structure Interaction, Steel Frame, Frequency Content, Damage Index, Nonlinear Time History Analysis.