

Seismic Response of Steel Frame by Considering Soil-Structure Interaction under Seismic Sequence

Alireza Karkabadi¹, Mohammad Iman Khodakarami^{2*}, Mostafa Farajian³

1- MSc Student in Earthquake Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

2- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

3- PhD Student of Earthquake Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

ABSTRACT

Seismic sequence as a result of occurrence of strong and moderate earthquake ground motion in a short time strongly affects the seismic response of structures. This kind of excitation causes, in many cases, more deteriorated effects compared to the corresponding single ground motion. The aim of this paper is to investigate the effect of seismic sequence of earthquake ground motion on the seismic responses of steel moment frame structures considering soil-structure interaction (SSI). To this end, four steel moment frames with 8 and 16 stories are considered each of which have three and six bays. Soil-structure-interaction is considered by employing dampers and springs having specified damping and stiffness through cone method. For modelling SSI effects, three types of soil based on standard 2800 are considered. The time history of responses show that the relative displacement of structure is increased when the structure is subjected to the seismic sequence. As a result, the damage induced to the structure. It is noteworthy to say that the effect of seismic sequence is more in soft soil. The obtained responses show that a special attention should be paid for designing of steel structures 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 evaluate accurate responses of steel shear frame.

ARTICLE INFO

Receive Date: 25 February 2019

Revise Date: 12 May 2019

Accept Date: 24 May 2019

Keywords:

Seismic sequence;
Soil-structure interaction;
Steel frame;
Frequency content

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.173144.1791

*Corresponding author: Mohammad Iman Khodakarami
Email address: khodakarami@semnan.ac.ir

بررسی رفتار لرزه‌ای قاب فولادی با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک-سازه تحت زلزله های متوالی

علیرضا کرک آبادی^۱، محمدایمان خداکریمی^{۲*}، مصطفی فرجیان^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- استادیار مهندسی زلزله، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۳- دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده

توالی لرزه ای به حالتی اطلاق می گردد که حرکات تکراری متوسط و قوی زمین (زلزله) در مدت زمان کوتاهی رخ دهد. در واقع ممکن است سازه تحت زلزله اصلی دچار آسیب و خسارت هایی شود ولی همچنان قابل بهره برداری باشد، اکنون می توان اثرات زلزله های بعدی را بدون آن که سازه مورد مقاوم سازی قرار گیرد مورد بررسی قرار داد. هدف از این مطالعه بررسی اثر زلزله های متوالی بر پاسخ لرزه‌ای سازه های فولادی، با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه می باشد. برای این منظور از ۴ قاب فولادی با مشخصات متفاوت استفاده شده و اندرکنش خاک و سازه با استفاده از روش زیرسازه در نظر گرفته شده است. در نهایت به منظور بررسی تاثیر توالی لرزه ای، نیاز لرزه‌ای جابه جایی طبقات و دریافت طبقات با حالت بدون توالی لرزه‌ای مقایسه شده است. نتایج عددی بدست آمده نشان می دهد، کاهش سرعت موج برشی در خاک باعث افزایش نیاز لرزه‌ای جابجایی سازه می شود. همچنین اثر گذاری زلزله‌های متوالی روی اندرکنش خاک و سازه وابسته به شرایط محتوای فرکانسی زلزله‌هاست. بنابراین نیازهای جابه جایی سازه‌ها در زلزله‌های متوالی نسبت به زلزله تکی با توجه به محتوای فرکانسی ممکن است افزایش یابد به گونه ای که این مقادیر تا ۲۰٪ نسبت به زلزله تکی افزایش داشته است. اما به طور کلی نیاز جابه جایی سازه در زلزله‌های متوالی با نرم تر شدن خاک افزایش می یابد.

کلمات کلیدی: زلزله متوالی، اندرکنش خاک و سازه، قاب خمشی فولادی، محتوای فرکانسی، آنالیز تاریخچه زمانی غیر خطی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/JSCE.2019.173144.1791	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.173144.1791	۱۴۰۰/۰۴/۳۰	۱۳۹۸/۰۳/۰۳	۱۳۹۸/۰۳/۰۳	۱۳۹۸/۰۲/۲۲	۱۳۹۷/۱۱/۰۶
محمد ایمان خداکریمی khodakarami@semnan.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

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 این که سازه در زلزله‌های قبلی دچار آسیب شده و امکان ترمیم آن نبوده، ممکن است طی زلزله‌های بعدی دچار خسارات بیشتری گردد. 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، نتواند پاسخگوی این نیازها باشد و دچار خسارات بیشتری گردد.

بررسی‌های انجام شده بر پاسخ‌های دینامیکی سازه‌های بتن‌آرمه تحت توالی‌لرزه‌ای 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 طراحی استفاده شده برای طراحی سازه بازنگری گردد [۱]. طبق تحقیقات انجام شده در زمینه اثر توالی‌لرزه‌ای بر سازه‌های بتن مسلح، مشخص شد که مقدار تغییر مکان ماندگار و تغییر مکان نسبی ماندگار سازه تحت اثر توالی‌لرزه‌ای نسبت به زلزله منفرد افزایش می‌یابد [۲]. همچنین، مطالعات صورت گرفته در زمینه سازه‌های بتن مسلح شکل‌پذیر حاکی از آنست که توالی‌لرزه‌ای می‌تواند خسارات قابل توجهی به سازه اعمال نماید، به‌گونه‌ای که شتاب طیفی زلزله اصلی و حداکثر شتاب طیفی پس‌لرزه و تعداد پس‌لرزه‌ها به طور چشمگیری بر نتایج تاثیرگذار است [۳].

طبق بررسی‌های انجام شده در خصوص سیستم‌های یک درجه آزاد فولادی تحت تحریک زلزله‌های متوالی مشخص شد که از تکرار لرزه‌ای متوالی در زمان‌های کوتاه انباشتگی انرژی رخ می‌دهد که در نتیجه این سازه‌ها در مقایسه با سازه‌هایی که تحت تحریک زلزله منفرد می‌باشند، آسیب‌پذیرتر می‌باشند [۴]. مطالعه عددی انجام شده در زمینه اثر زلزله‌های متوالی بر حداکثر نیاز شکل‌پذیری طبقات در قاب‌های بتنی نشان می‌دهد که این پارامتر به شکل قابل توجهی افزایش می‌یابد [۵]. تحقیقات انجام شده در سال ۲۰۱۴، بر روی دو زلزله ۱۹ و ۲۰ سپتامبر در مکزیکوسیتی، نسبت زمان تناوب سازه آسیب دیده به زمان تناوب غالب پس لرزه تاثیر قابل توجهی بر پاسخ لرزه‌ای سازه دارد [۶].

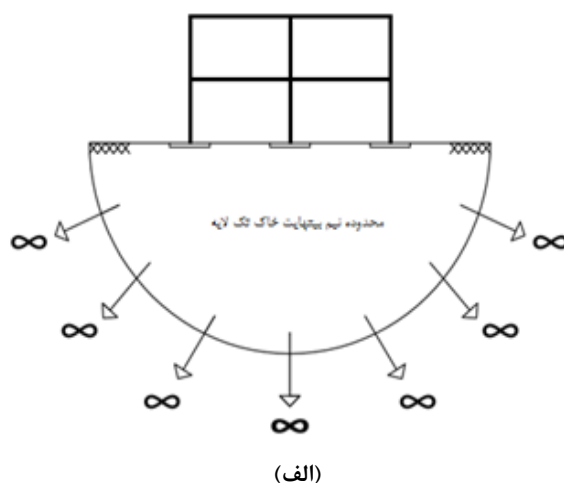
در اکثر روش‌های متداول تحلیل و طراحی سازه در مقابل زلزله، خاک زیر فونداسیون به صورت صلب فرض می‌شود، این در حالی است که در واقعیت خاک زیر فونداسیون صلب نمی‌باشد. تاکنون مطالعات زیادی بر روی تاثیر اندرکنش خاک و سازه بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها صورت گرفته است، اما تاثیر این پدیده بر خرابی سازه مورد مطالعه چندانی قرار نگرفته است. اندرکنش خاک و سازه عبارت است از اثر متقابل سازه و خاک زیر فونداسیون و اطراف آن. مطالعات صورت گرفته در زمینه اثرات لرزه‌ای اندرکنش خاک و سازه بر ساختمان چند طبقه 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 [۷]. مطالعات صورت گرفته در زمینه اثر اندرکنش خاک-سازه بر مخازن حاوی سیال نشان می‌دهد جابجایی جرم ضربانی با کاهش سختی خاک، کاهش یافته در نتیجه ممان واژگونی و برش پایه کاهش می‌یابد. از طرف دیگر جابجایی جرم نوسانی ممکن است افزایش پیدا کند [۸، ۹]. مرجع [۱۰] به بررسی شاخص خرابی غیر تجمعی کرزینگ که شاخص خرابی بر اساس انرژی می‌باشد با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه پرداخته شده است. صادق وزیری و همکاران نشان دادند در نظر گرفتن رفتار غیرخطی خاک نسبت به رفتار خطی منجر به افزایش یا کاهش نیروی برش پایه می‌گردد [۱۱].

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 تحت تاثیر قرار گیرد [۱۲]. به دلیل حساسیت خاصی که در طرح و اجرای سازه‌های بتنی وجود دارد و همچنین به دلیل تاثیرگذار 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 طراحی اقتصادی آن موثر خواهد بود [۱۳، ۱۴].

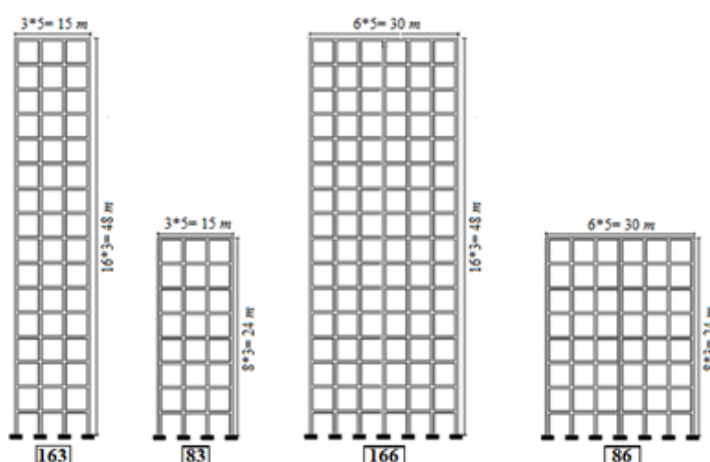
بر اساس مطالب فوق، غالب تحقیقات صورت گرفته، اثرات پدیده‌ی توالی لرزه‌ای را بدون در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه مورد مطالعه قرار داده‌اند. از سوی دیگر امکان رخداد دو یا چند زمین‌لرزه متوالی با محتوای فرکانسی مختلف، نیز در نظر گرفته نشده است. در این مقاله رفتار چهار قاب خمشی فولادی با تعداد طبقات و دهانه‌های متفاوت، تحت اثر زلزله‌های متوالی با در نظر گرفتن زلزله اصلی با محتوای فرکانسی متفاوت و پس لرزه‌ها بر خاک‌های مختلف بر اساس طبقه بندی استاندارد ۲۸۰۰ [۱۵] به روش زیرسازه^۱ به منظور مقایسه نیاز لرزه‌ای جابجایی طبقات و جابجایی نسبی طبقات بررسی شده‌است.

۲- بیان مسئله

همانطور که در مقدمه بیان شد، در نظر گرفتن توالی لرزه‌ای بر عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها یکی از مسائل مهم و حائز اهمیت است. همچنین در نظر گرفتن اثر سیستم اندرکنشی خاک و سازه که در شکل ۱ نشان داده شده، می‌تواند بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها اثر گذار باشد. حال مسئله‌ی مطرح شده آن است که اگر توالی لرزه‌ای بر روی سیستم خاک و سازه لحاظ شود نتایج حاصل به چه صورت تغییر خواهد نمود. در ادامه، به اجرای مختلف مسئله مورد بررسی و ویژگی‌های هر بخش اشاره خواهد شد.



(الف)



(ب)

شکل ۱. نمای شماتیک مسئله مورد بررسی؛ (الف) سیستم خاک-فونداسیون-سازه و (ب) هندسه سازه‌های مورد بررسی.

¹ Substructure method

۲-۱- سازه

سازه‌های مورد بررسی در این مقاله، ۴ قاب ساختمانی فولادی با سیستم قاب خمشی متوسط می‌باشند که در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. این سازه‌ها، با ملزومات استاندارد ۲۸۰۰، مباحث ششم [۱۶] و دهم [۱۷] 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. بار مرده kg/m^2 ۶۰۰ و بار زنده kg/m^2 ۳۰۰ در نظر گرفته شده و فونداسیون سازه‌ها به صورت سطحی و صلب می‌باشد. فولاد مصرفی از نوع ST۳۷ با تنش تسلیم kg/cm^2 ۲۴۰۰ و تنش گسیختگی kg/cm^2 ۳۷۰۰ می‌باشد.

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 آن E مدول الاستیسیته، G مدول برشی، E_c مدول بالک، ν ضریب پواسون، ν_s و ν_p به ترتیب سرعت موج برشی و سرعت موج طولی و γ وزن واحد حجم خاک می‌باشد. این خاک‌ها بر اساس سرعت موج برشی و استاندارد ۲۸۰۰ به سه دسته تقسیم بندی می‌شوند که خاک تیپ ۱ سخت‌ترین خاک و خاک تیپ ۳ نرم‌ترین خاک می‌باشند.

جدول ۱. مشخصات مکانیکی خاک‌های مورد مطالعه [۱۸]

Soil Type	E (kN/m ²)	G (kN/m ²)	E_c (kN/m ³)	γ (kg/m)	ν	ν_s (m/s)	ν_p (m/s)
Type 1	7,000,000	2,692,310	9,423,077	2000	0.30	1149.1	2142.88
Type 2	2,000,000	769,230	2,692,308	2000	0.30	614.25	1149.16
Type 3	500,000	192,310	673,077	1900	0.35	302.22	643.68

۲-۳- رکورد های زلزله

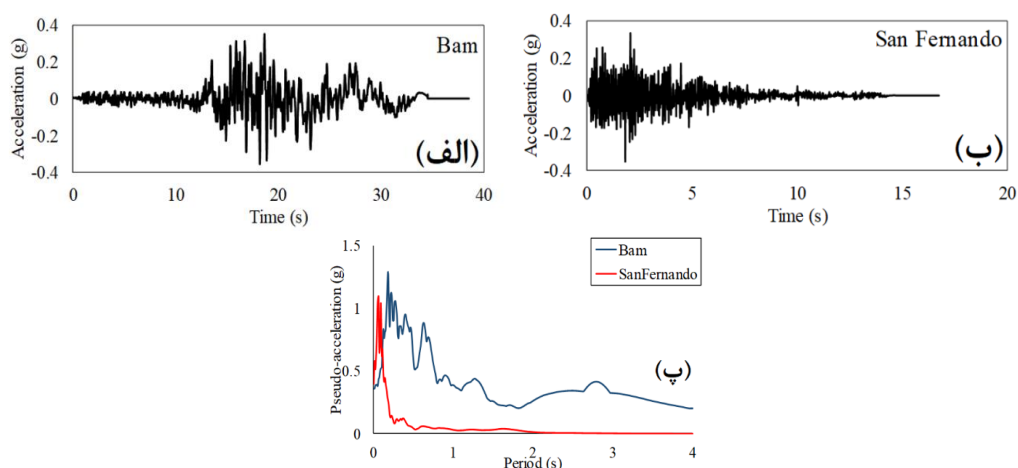
به منظور بررسی رفتار لرزه‌ای سازه‌های مورد مطالعه، از دو رکورد زلزله با مشخصات ذکر شده در جدول ۲ استفاده شده است. همچنین تاریخچه زمانی زلزله‌های مورد استفاده در شکل ۲-الف و ۲-ب قابل مشاهده است. هر دو این رکوردها از سایت PEER [۱۹]، دریافت شده است. رکوردهای در نظر گرفته شده دارای بیشینه شتاب متفاوت بوده که به شتاب بیشینه $0.35g$ مقیاس شده‌اند. زلزله‌های در نظر گرفته شده دارای محتوی فرکانسی متفاوت بوده که مشخصات آنها در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲. مشخصات رکوردهای زلزله مورد استفاده.

Earthquake	Year	Mw	Effective time	PGA/PGV
Bam	2003	6.6	15.9	0.35
San Fernando	1971	6.61	13.2	0.99

۲-۴- نام گذاری مدل‌ها

با توجه به اینکه متغیرهای زیادی در این مطالعه وجود دارد، به منظور شناسایی بهتر مدل‌های مورد مطالعه، این مدل‌ها به صورت Iz_Xy_N نامگذاری شده‌اند که در آن I نشان دهنده تعداد طبقات می‌باشد که می‌تواند ۸ و یا ۱۶ در نظر گرفته شود، Z بیانگر 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 نشان دهنده‌ی نوع خاک بوده و مقادیر I، II و III می‌باشد؛ به عنوان مثال 163_BS_III بیانگر سازه‌ای با ۱۶ طبقه و ۳ دهانه که بر روی خاک نوع سه تحت زلزله متوالی‌ای که زلزله اول آن بم و زلزله دوم آن سن فرناندو قرار می‌گیرد، می‌باشد.



شکل ۲. نمودار تاریخچه زمانی شتاب رکورد زلزله‌های مورد استفاده؛ (الف) زلزله بم، (ب) زلزله سن فرناندو و (ج) طیف شبه شتاب زلزله‌های مورد استفاده.

جدول ۳. مشخصات مقاطع سازه‌های مورد مطالعه در طبقات مختلف.

طبقات سازه	شماره طبقه	تعداد دهانه‌های قاب: ۳		تعداد دهانه‌های قاب: ۶	
		تیر	ستون	تیر	ستون
سازه ۸ طبقه	1	W10*54	Box 350*15	W10*54	Box 350*15
	2	W10*54	Box 350*15	W10*54	Box 350*15
	3	W10*54	Box 300*10	W10*54	Box 350*10
	4	W10*49	Box 300*10	W10*54	Box 300*10
	5	W10*49	Box 300*10	W10*49	Box 300*10
	6	W10*33	Box 250*8	W10*39	Box 250*8
	7	W10*26	Box 250*7	W10*26	Box 250*8
	8	W10*22	Box 250*6	W10*22	Box 200*6
سازه ۱۶ طبقه	1	W10*88	Box 500*20	W10*68	Box 450*20
	2	W10*88	Box 450*20	W10*68	Box 450*15
	3	W10*88	Box 450*15	W10*68	Box 450*15
	4	W10*88	Box 450*15	W10*68	Box 450*15
	5	W10*88	Box 450*15	W10*68	Box 450*15
	6	W10*88	Box 450*15	W10*68	Box 450*15
	7	W10*88	Box 350*15	W10*68	Box 350*15
	8	W10*88	Box 350*15	W10*60	Box 350*15
	9	W10*77	Box 350*15	W10*60	Box 350*15
	10	W10*77	Box 350*15	W10*54	Box 350*15
	11	W10*77	Box 350*15	W10*54	Box 350*10
	12	W10*68	Box 350*15	W10*54	Box 350*10
	13	W10*60	Box 300*10	W10*45	Box 250*10
	14	W10*39	Box 300*10	W10*30	Box 250*10
	15	W10*26	Box 250*8	W10*26	Box 200*7
	16	W10*19	Box 250*8	W10*22	Box 200*6

۳- مدلسازی مسئله

۳-۱- سازه

مدل‌های سازه‌های مورد بررسی در این مطالعه چهار قاب ساختمانی، دوبعدی فولادی با سیستم قاب خمشی متوسط می‌باشند. این قاب‌ها، قاب‌های میانی برداشت شده از پلان سه‌بعدی می‌باشند. 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 است و سقف سازه‌ها صلب در نظر گرفته شده است. درصد میرایی سازه‌ها ۵ درصد می‌باشد و جهت تحلیل مدل‌ها از نرم افزار SAP 2000 استفاده شده است. رفتار غیرخطی سازه‌ها با استفاده از تعریف مفاصل پلاستیک در تیرها و ستون‌ها (که مشخصات این مفاصل منطبق بر نشریه ۳۶۰ [۲۰] می‌باشد)، مدلسازی شده‌اند.

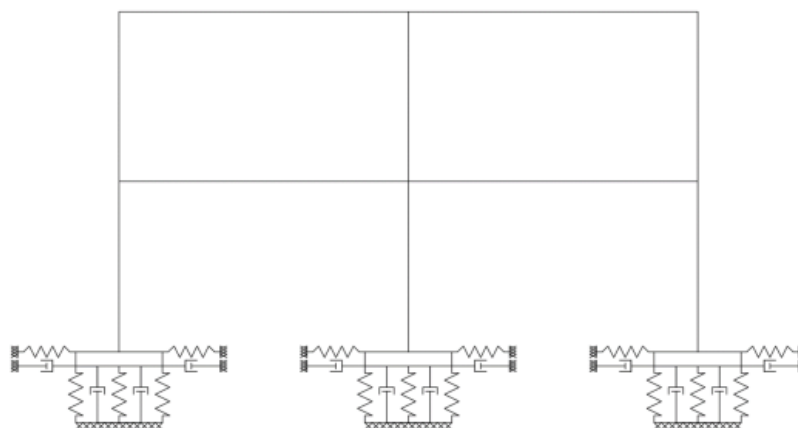
۳-۲- اندرکنش خاک و سازه

۳-۲-۲- روش مدل سازی

همانطور که در شکل (۳) نشان داده شده، سیستم خاک و سازه با استفاده از روش زیرسازه شبیه‌سازی گردیده است؛ طبق این روش تعدادی فنر و میراگر زیر فونداسیون سازه و به جای خاک قرار می‌گیرد، این فنرها و میراگرها دارای سختی در ۲ راستای عمودی و افقی می‌باشند که مقادیر این مولفه‌های سختی و میرایی در تحقیق حاضر با توجه به مشخصات هر خاک و هر سازه با استفاده از روش مخروط^۲ [۲۱] و توسط فرمول‌های (۱) و (۲)، با توجه به تحقیق [۲۱] تعیین شده است و فونداسیون‌های سازه‌ها نیز به صورت صلب مدلسازی شده‌اند.

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

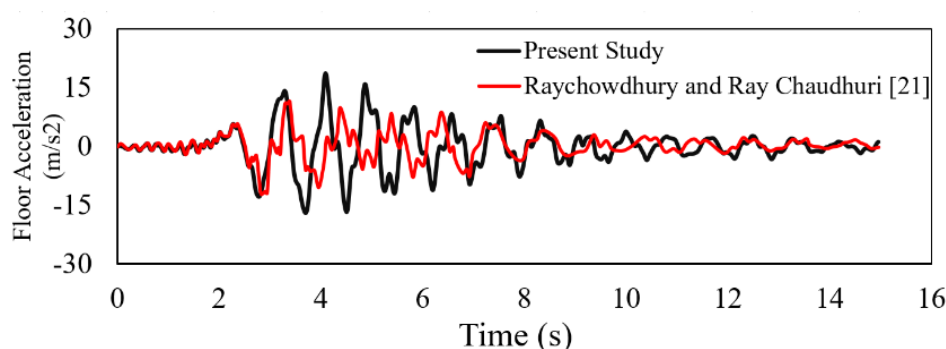
$$K_h = \frac{GL}{2 - \nu} \left[2 + 2.5 \left(\frac{B}{L} \right)^{0.85} \right] \quad (2)$$



شکل ۳. مدلسازی سیستم خاک-سازه به روش زیرسازه

۳-۲-۲- صحت سنجی

برای اطمینان از صحت مدل سازی اندرکنش خاک و سازه به روش زیرسازه، از مساله مورد بررسی در [۲۱] استفاده شده است (به منظور اطلاع از مشخصات هندسی و مکانیکی اجزای مدل به [۲۱] مراجعه شود). به منظور حصول اطمینان از مدلسازی انجام شده در این تحقیق، نتایج حاصل از تحلیل سیستم خاک-سازه با نتایج ارائه شده در [۲۱] 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 می باشد.



شکل ۴. ارزیابی صحت مدلسازی؛ مقایسه نتایج مسئله مورد صحت سنجی با نتایج ارائه شده در [۲۱].

۳-۳- تولید رکورد های زلزله

با توجه به اینکه جنس خاک بر روی تاریخچه زمانی رکوردهای زلزله موثر است و همچنین اینکه اثر توالی لرزه ای در نظر گرفته شود؛ رکوردهای مورد استفاده در این تحقیق به شرح ذیل تولید شده اند.

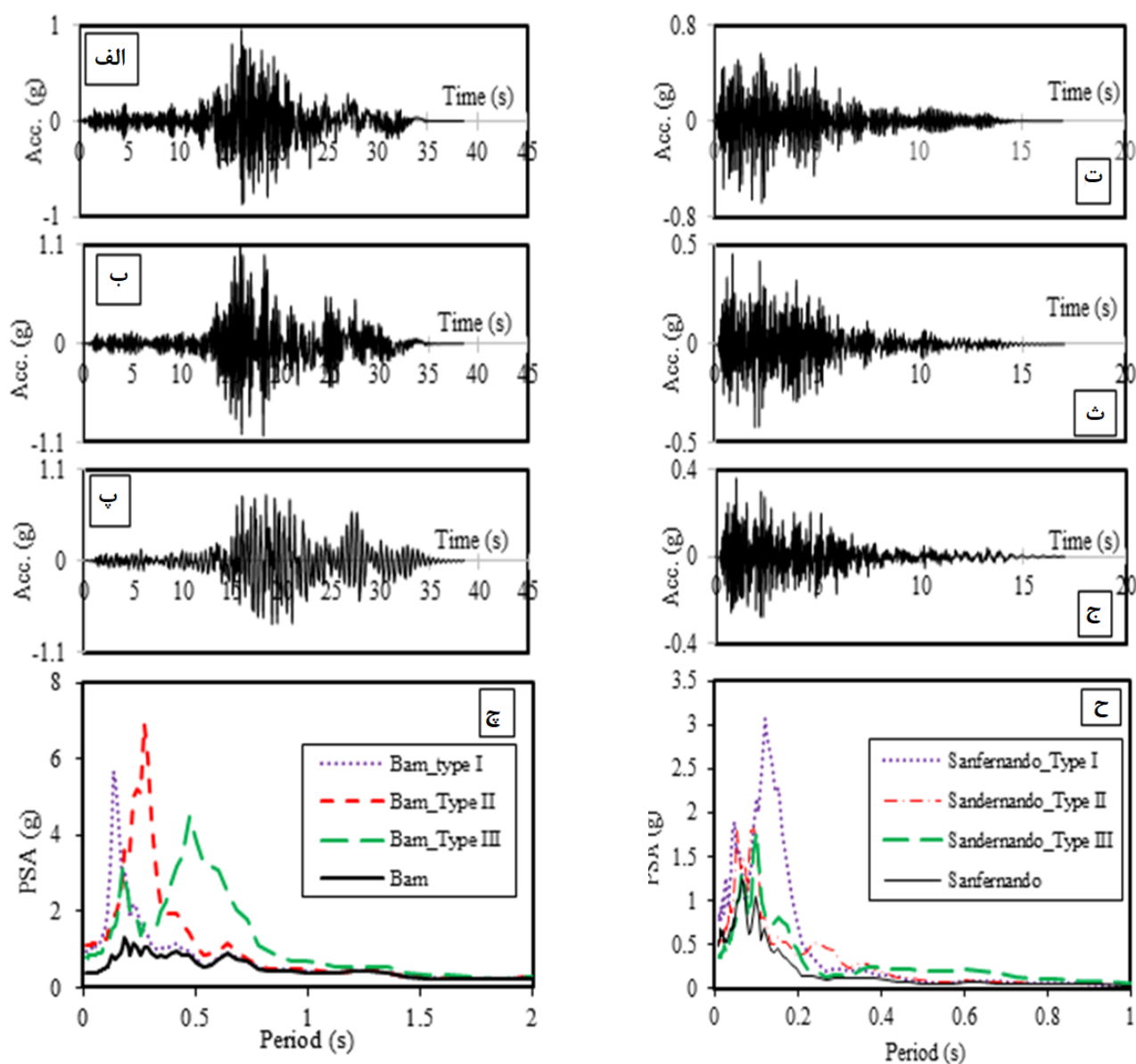
۳-۳-۱- اثرات جنس خاک

ابتدا هر دو رکورد زلزله برای حداکثر شتاب زمین در سنگ بستر معادل بیشینه شتاب $g/35$ مقیاس شده و با توجه به این که رکوردهای مذکور مربوط به زلزله در محل سنگ بستر می باشند، می بایست اثرات لایه خاک نیز محاسبه شود تا بتوان از آن در مدل استفاده نمود؛ برای این کار از یک لایه خاک به ضخامت 30 m در نظر گرفته شده و با توجه به مشخصات خاکها رکورد زلزله بر روی تمام خاک های مورد بررسی، با استفاده از نرم افزار Deepsoil بازتولید شده است. تاریخچه زمانی شتاب نگاشت های تولید شده و طیف پاسخ هر زلزله در خاک های مختلف در شکل ۵ ترسیم شده است.

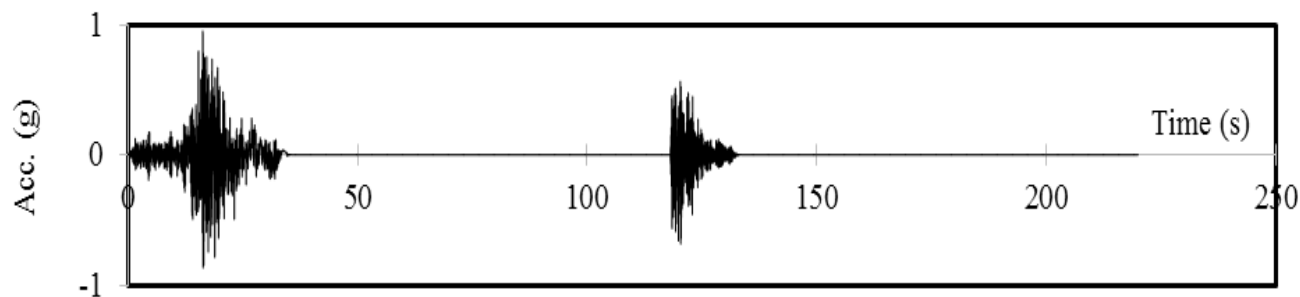
۳-۳-۲- توالی لرزه ای

با توجه به زلزله های ساخته شده در مرحله ی قبل بر هر خاک و با توجه به تعریف پدیده ی توالی لرزه ای، بر روی هر تیپ خاک چهار زلزله متوالی با ترکیب دو زلزله فوق و مجموعاً تعداد ۱۲ زلزله متوالی ساخته شده است به گونه ای که بین هر دو واقعه ی لرزه ای پشت سرهم، یک گام زمانی ۸۰ ثانیه ای 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 [۲۲].

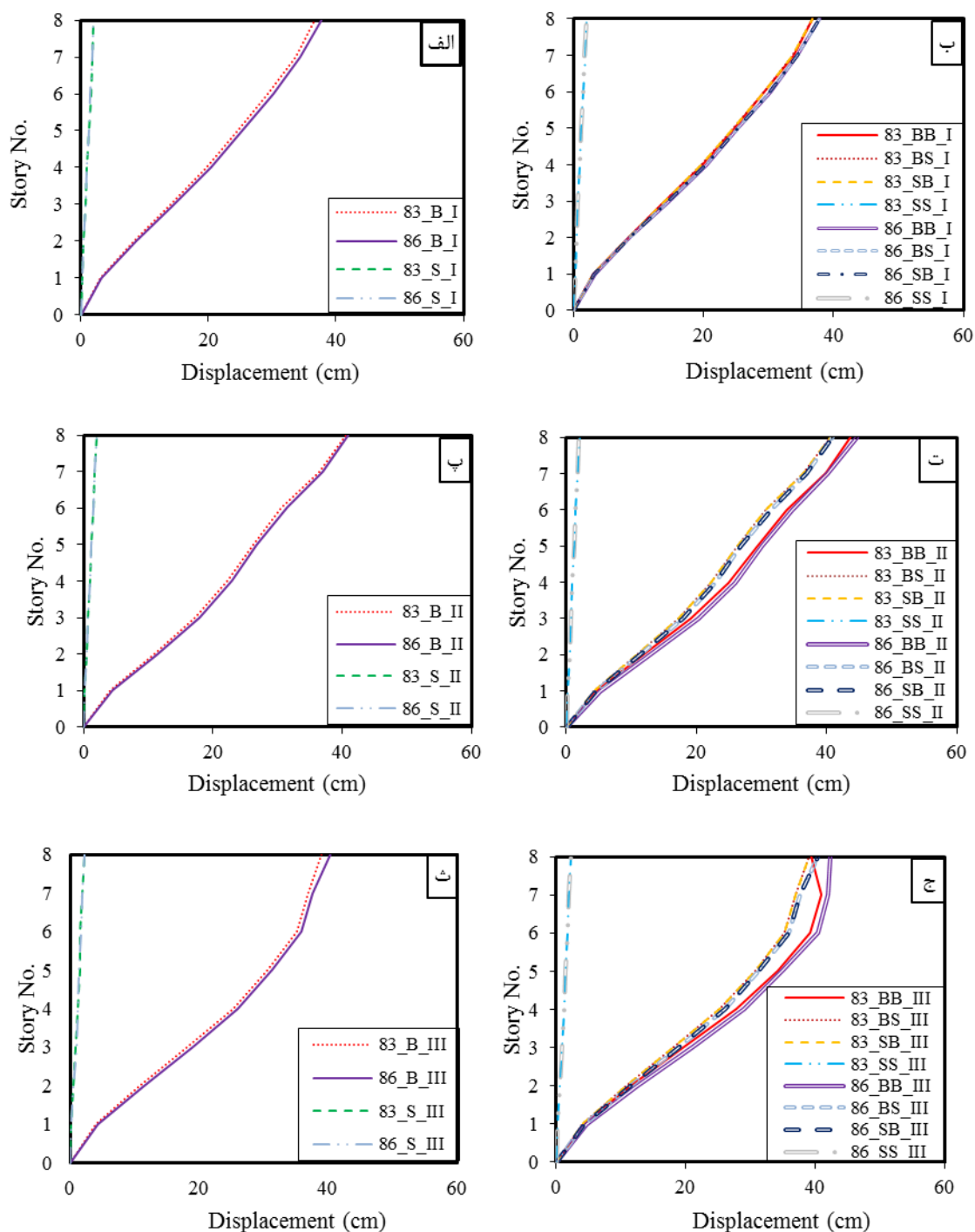
با توجه به اینکه در این مطالعه اثر محتوای فرکانسی در توالی لرزه ای در نظر گرفته شده، بنابراین ۴ حالت مختلف برای توالی لرزه ای وجود دارد و چون ۳ تیپ خاک در نظر گرفته شده است، برای هر نوع خاک این عمل تکرار می شود. شکل ۶ نمونه ای از زلزله های متوالی ساخته شده را نشان می دهد.



شکل ۵. تاریخچه زمانی زلزله‌های مورد استفاده بر روی خاک‌های مختلف؛ (الف) زلزله بم بر روی خاک تیپ ۱، (ب) زلزله بم بر روی خاک تیپ ۲، (پ) زلزله بم بر روی خاک تیپ ۳، (ت) زلزله سان‌فرناندو بر روی خاک تیپ ۱، (ث) زلزله سان‌فرناندو بر روی خاک تیپ ۲، (ج) زلزله سان‌فرناندو بر روی خاک تیپ ۳، (چ) طیف شبه شتاب پاسخ زلزله بم بر روی خاک‌های مختلف و (ح) طیف شبه شتاب پاسخ زلزله سان‌فرناندو بر روی خاک‌های مختلف.



شکل ۶. توالی لرزه ای ساخته شده از زلزله بم به عنوان لرزه نخست و زلزله سان‌فرناندو به عنوان لرزه ثانویه بر روی خاک تیپ ۱ (BS_I).

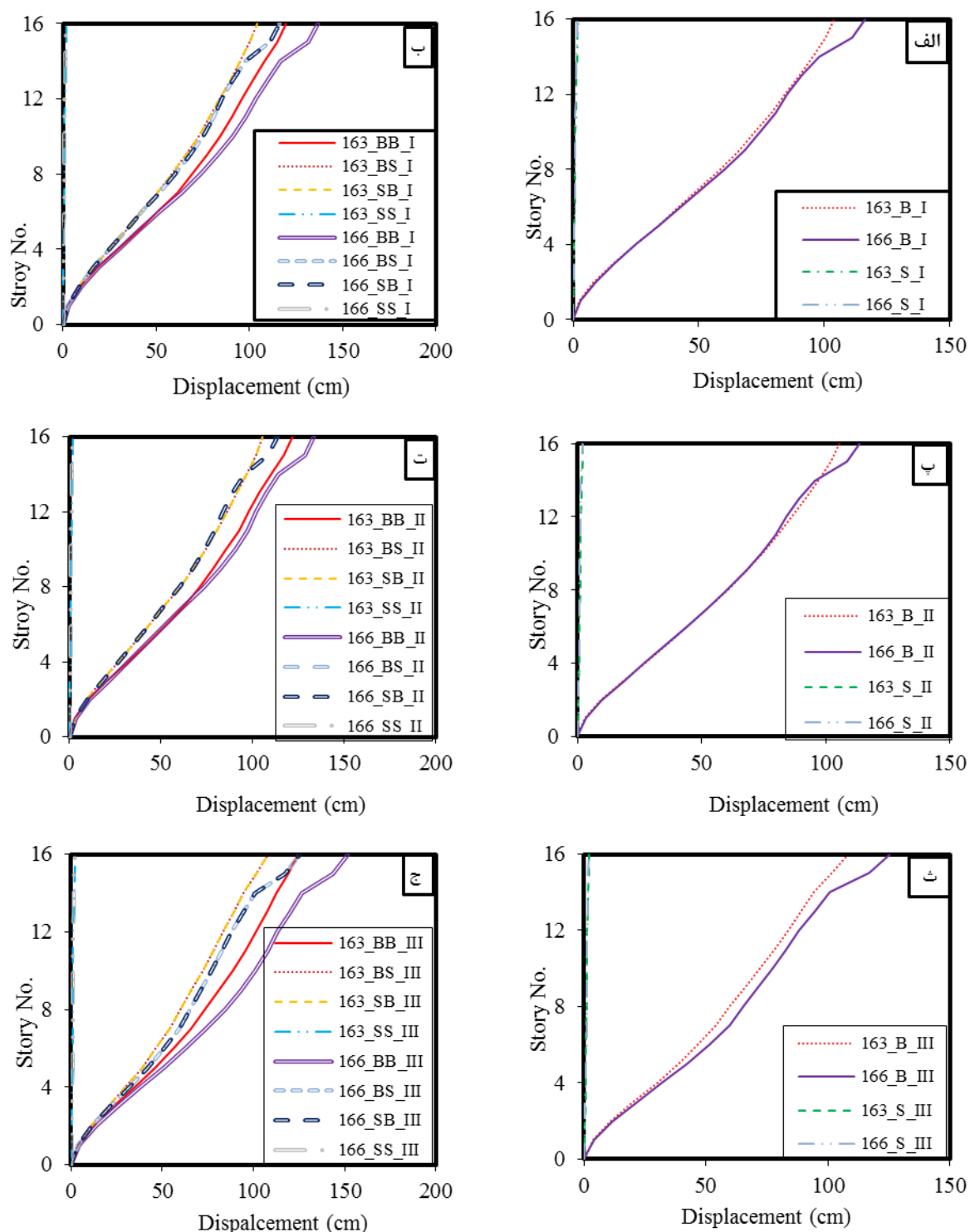


شکل ۷. تغییر مکان سازه‌های ۸ طبقه تحت زلزله منفرد (الف)، (پ) و (ث) و توالی لرزه‌ای ((ب)، (ت) و (ج))؛ ((الف) و (ب)) خاک تیپ ۱، ((پ) و (ت)) خاک تیپ ۲ و ((ث) و (ج)) خاک تیپ ۳.

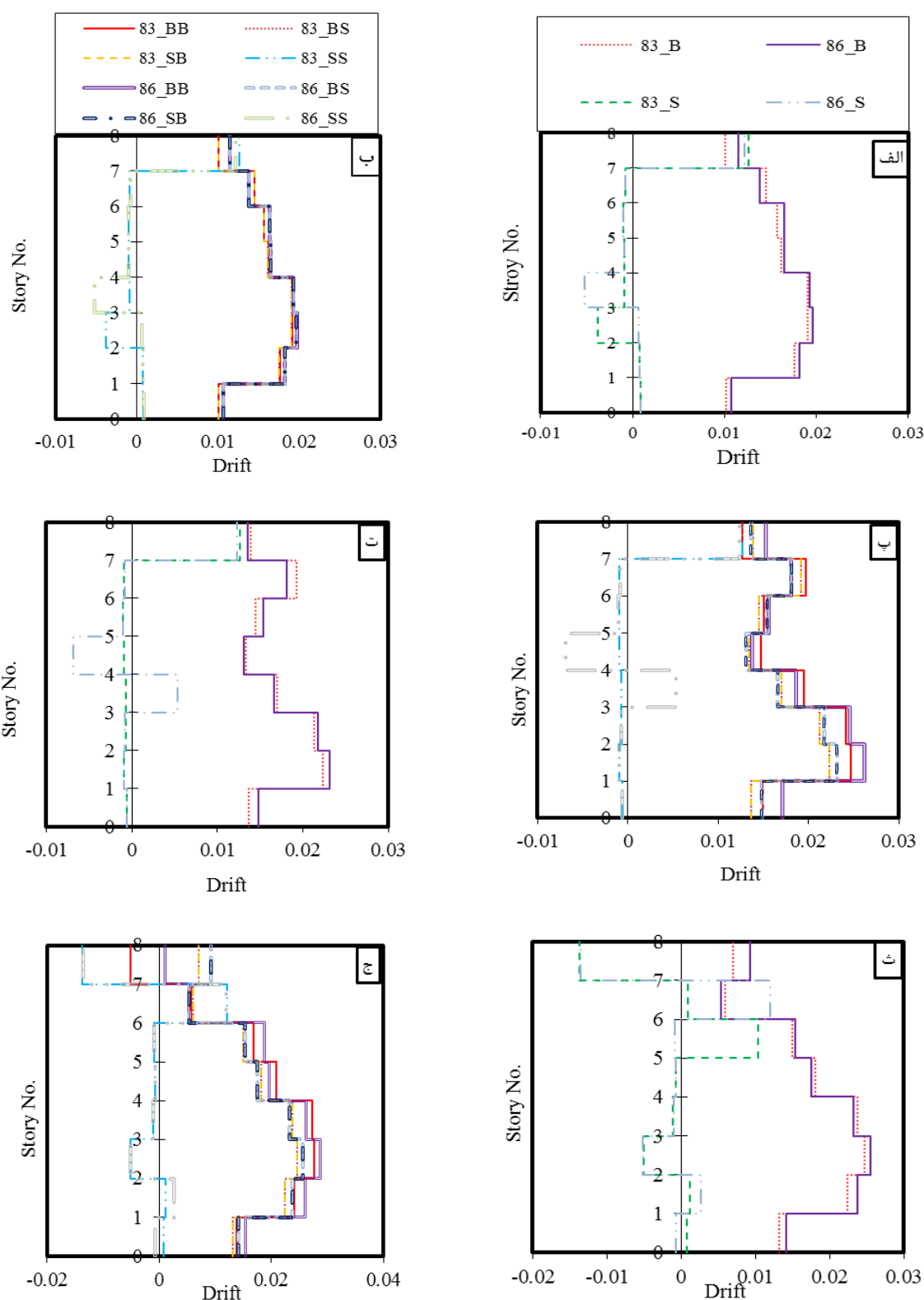
۴- تحلیل مدل‌ها

تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی، بهترین و دقیق‌ترین روش، 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 گشته‌است. از آن‌جا که در این مطالعه سعی در بررسی رفتار سازه تحت اثرات توالی لرزه‌ای بوده، لذا

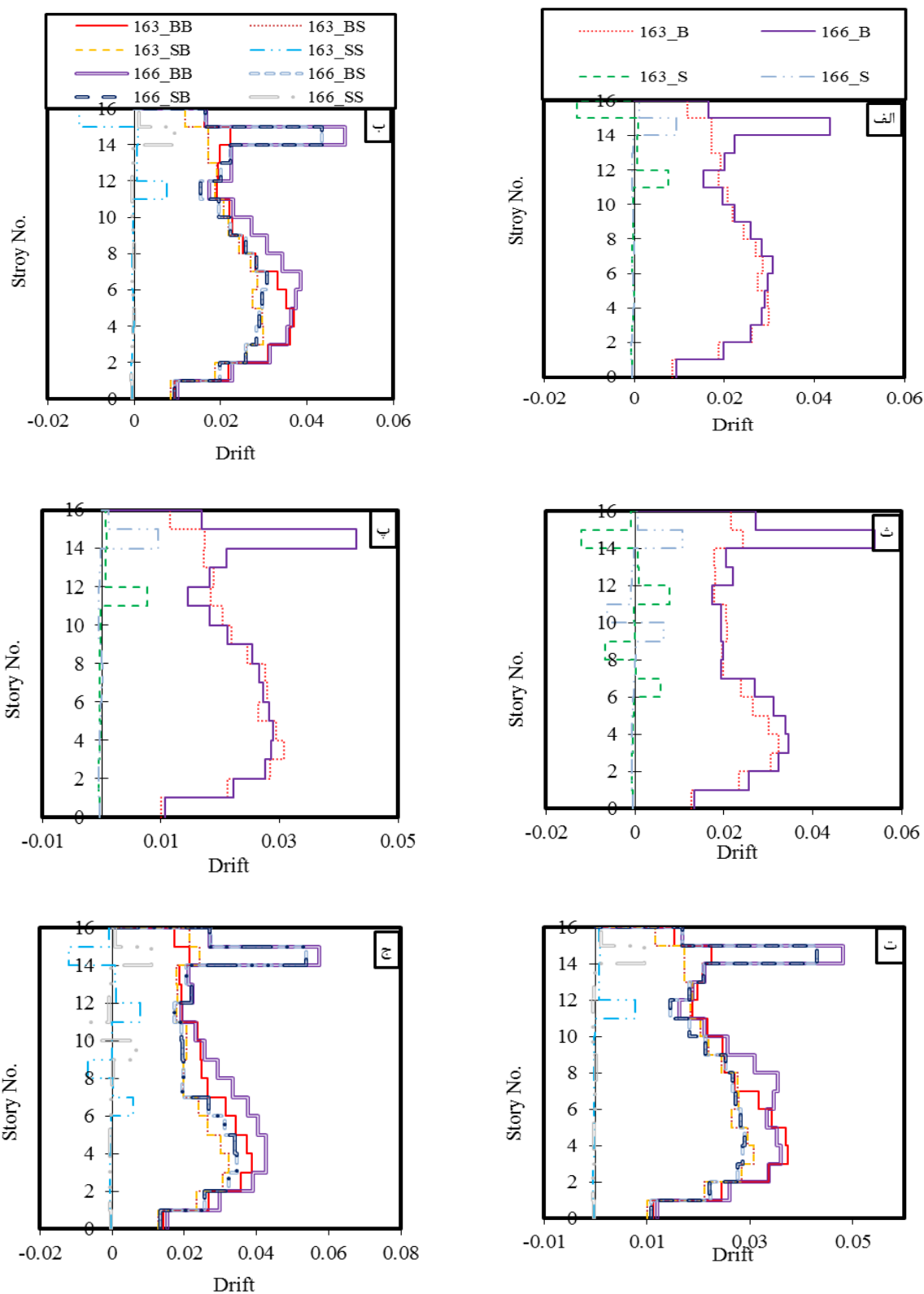
جهت تحلیل مدل‌های سازه‌ای، از روش تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی استفاده شده و از آنجا که احتمال ورود سازه به ناحیه غیرخطی تحت توالی لرزه‌ای زیاد است، لذا تحلیل از نوع غیرخطی انتخاب شده است.



شکل ۸. تغییر مکان سازه‌های ۱۶ طبقه تحت زلزله منفرد (الف)، (ج) و (ه) تحت توالی لرزه‌ای (ب)، (د) و (و)؛ (الف) و (ب) خاک تیپ ۱، (ج) و (د) خاک تیپ ۲ و (ه) و (و) خاک تیپ ۳.



شکل ۹. تغییرات دریفت طبقات سازه‌های ۸ طبقه تحت زلزله منفرد ((الف)، (ب) و (ث)) و توالی لرزه‌ای ((ب)، (ت) و (ث))؛ ((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 دریفت طبقات سازه‌های ۱۶ طبقه تحت زلزله منفرد ((الف)، (پ) و (ت)) و توالی لرزه‌ای ((ب)، (ت) و (ج))؛ ((الف) و (ب)) بروی خاک تیپ ۱، ((پ) و (ت)) بروی خاک تیپ ۲ و ((ث) و (ج)) بروی خاک تیپ ۳.

بر اساس نظرات چوپرا گام زمانی جهت انجام تحلیل های دینامیکی، غیر خطی بهتر است از ۰/۱ دوره ی تناوب طبیعی سیستم تجاوز نکند، همچنین بایستی خیلی کوچک تر از کوچکترین دوره ی تناوب نظیر چند فرکانس اصلی سازنده ی رکورد های زلزله باشد [۲۳] 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 ۲ زلزله اصلی به ۴ حالت برای بررسی اثرات محتوای فرکانسی در توالی لرزه ای، جمعا ۴ توالی لرزه ای کلی حاصل شد و با توجه به اثرات بزرگنمایی در خاک های مختلف (۳ تیپ خاک) و ۴ سازه جمعا ۴۸ مدل اندرکنش خاک و سازه بررسی جهت توالی لرزه ای مدل شده است. حال برای مقایسه اثرات توالی لرزه ای در مقابل زلزله منفرد، مدل های اندرکنش خاک و سازه برای زلزله منفرد نیز ساخته شده است که در ادامه به بررسی نتایج پرداخته خواهد شد.

۵- نتایج و بحث

نتایج حاصل از آنالیز مدل ها حاکی از آن است که حداکثر تغییر مکان طبقات در سازه ها بدون توجه به زلزله وارده، با زیاد شدن تعداد دهانه ها و هم چنین با افزایش ارتفاع سازه افزایش می یابد. این افزایش تغییر مکان در سازه های با خاک های نرم تر بیشتر است. ضمن آن که با نرم تر شدن خاک تغییر مکان در قسمت های بالای سازه های ۱۶ طبقه به ثبات می رسد و این در حالی است که در سازه ۸ طبقه این تغییر مکان همواره در حال افزایش است و زلزله ی بم که دارای محتوای فرکانسی غالب است، تاثیر بسیار بیشتری روی پاسخ سازه ها گذاشته است.

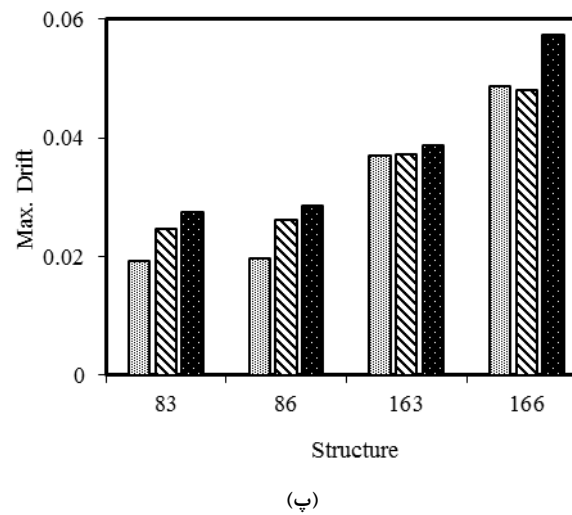
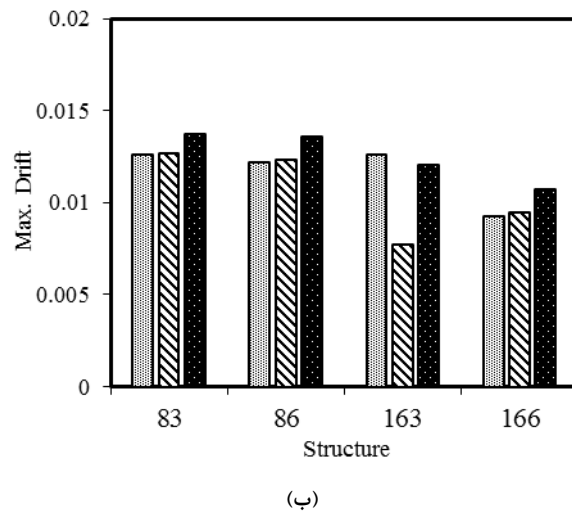
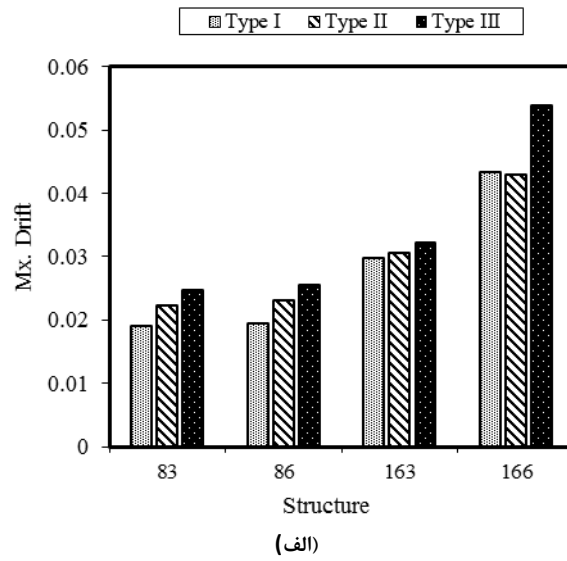
همانطور که در شکل های (۷) و (۸) نشان داده شده است، عمده تفاوت در مقدار تغییر مکان سازه های ۱۶ طبقه با تعداد دهانه های مختلف در ۳ طبقه ی آخر رخ داده است البته هر چه خاک نرم تر شده این مقدار به قسمت های میانی سازه متمایل گشته است. همچنین، هرگاه توالی لرزه ای با دو زلزله ی با پریود غالب بالا اتفاق بیافتد، آنگاه مقادیر پاسخ های تغییر مکان طبقات نسبت به زلزله تکی افزایش شدیدی می یابد و این در حالی است که اگر توالی لرزه ای ناشی از دو زلزله با پریود غالب کم باشد، مقادیر پاسخ ها نسبت به زلزله تکی با پریود غالب کم هیچ تفاوتی ندارد. همچنین اگر در زلزله های متوالی، اگر زلزله اول با پریود غالب بالا و زلزله دوم با پریود غالب کم باشد، پاسخ سازه ها تفاوتی نسبت به حالت زلزله تکی با پریود غالب بالا ندارند و به عبارت دیگر، حداکثر پاسخ لرزه ای سازه ناشی از ارتعاشات زلزله اول اتفاق می افتد.

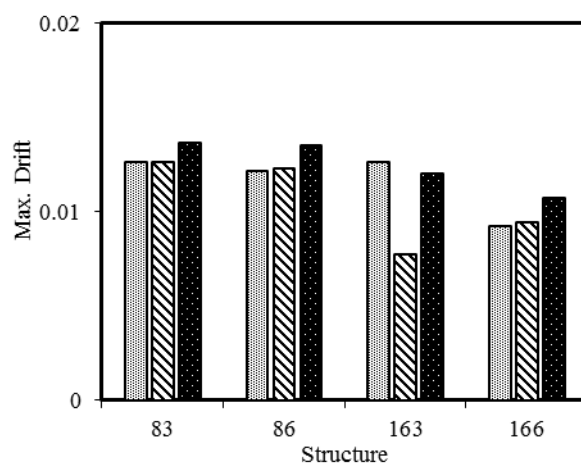
همانطور که در شکل (۱۱) نشان داده شده است، مقدار حداکثر دریفت سازه ها با نرم تر شدن خاک افزایش می یابد، به طوری که اثرگذاری نرمی خاک در زلزله های با فرکانس بالا، همچنین سازه های با تعداد طبقات و دهانه های بیشتر، چشمگیرتر است.

با توجه به شکل های (۹) و (۱۰)، در صورت رخداد یک زلزله با فرکانس بالا، با افزایش تعداد دهانه های سازه، مقدار دریفت ایجاد شده در سازه نیز افزایش می یابد، این در حالی است که در زلزله های با فرکانس پایین، مقدار دریفت با افزایش تعداد دهانه ها کاهش می یابد و بیشترین مقدار دریفت رخ داده مربوط به حالتی است که توالی لرزه ای با ۲ فرکانس بالا رخ دهد.

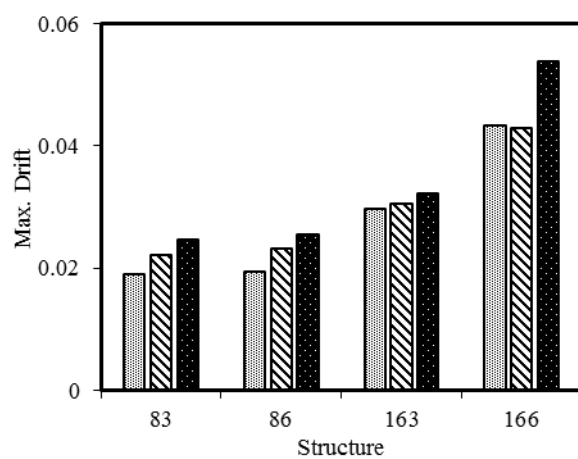
در شکل (۱۲) محل رخداد حداکثر دریفت سازه ها ترسیم شده است؛ همانطور که ملاحظه می گردد، این نتایج با نوع خاک رابطه خاصی ندارد و عمدتا در تمامی خاک ها یکسان است. در سازه های ۱۶ طبقه، در صورت رخداد حداکثر یک زلزله با فرکانس بالا محل رخداد حداکثر دریفت در سازه با تعداد دهانه های کمتر، در ناحیه ۲۵ درصد پایین ارتفاع سازه است، در حالی که در سازه با تعداد دهانه های بیشتر، این محل در یک چهارم بالایی ارتفاع سازه واقع شده است.

Soil type:

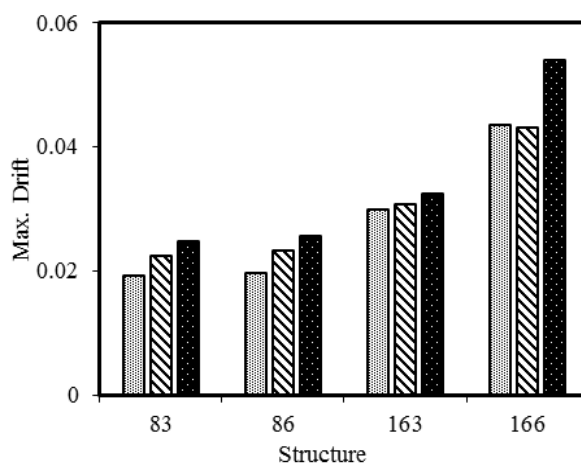




(ت)

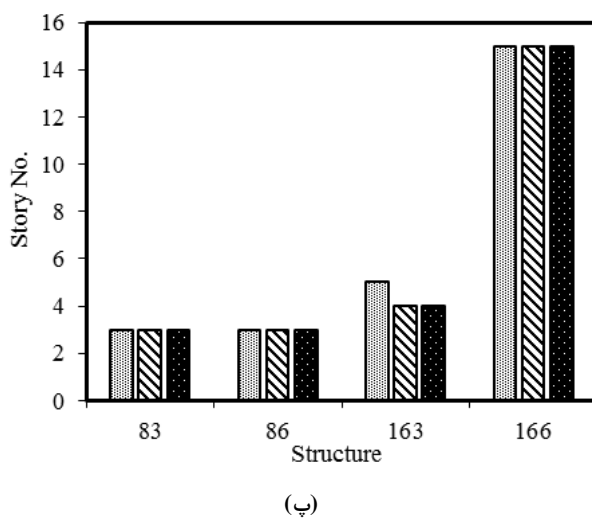
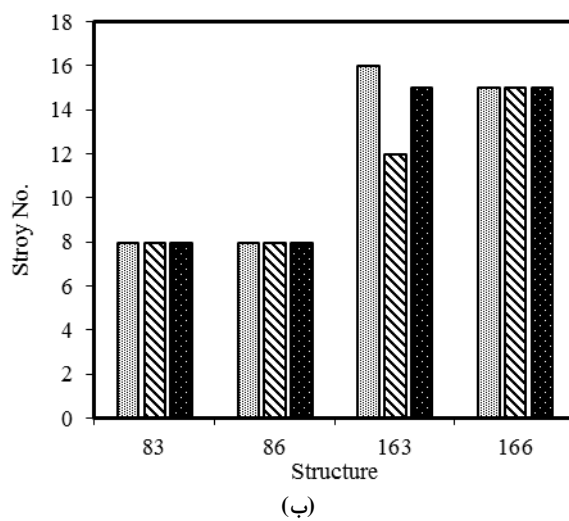
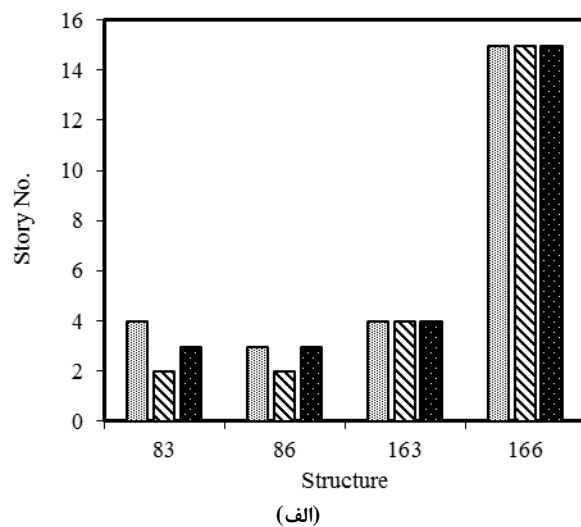


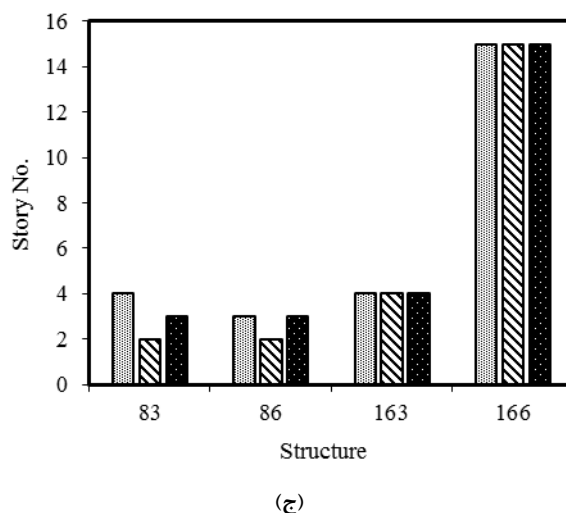
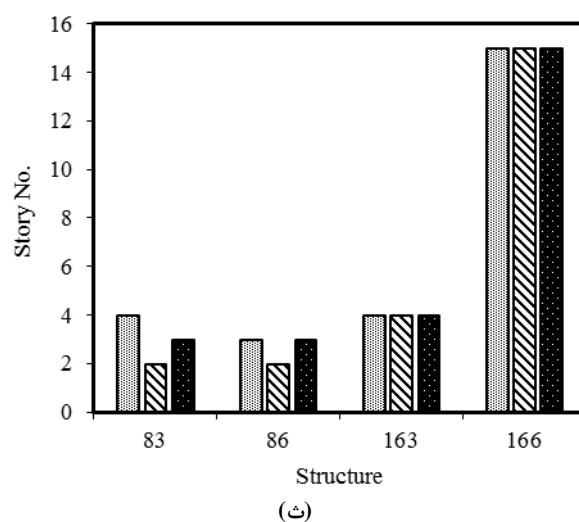
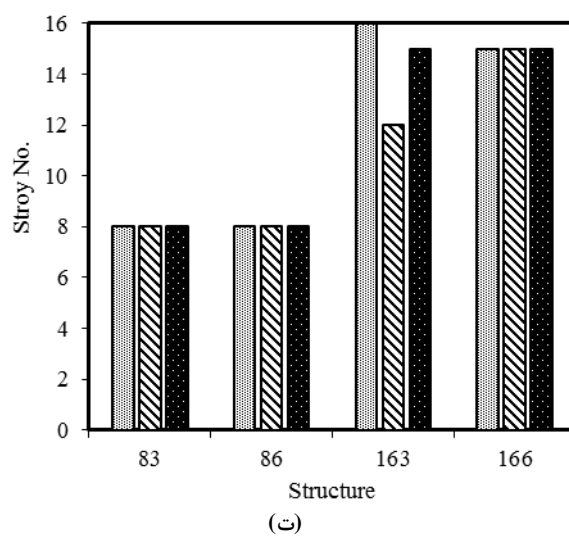
(ث)



(ج)

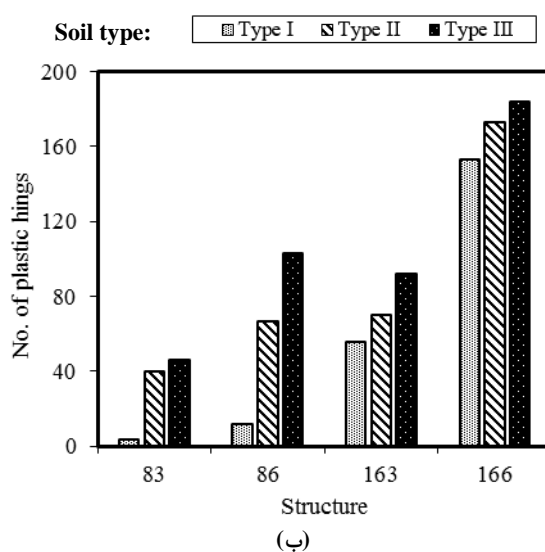
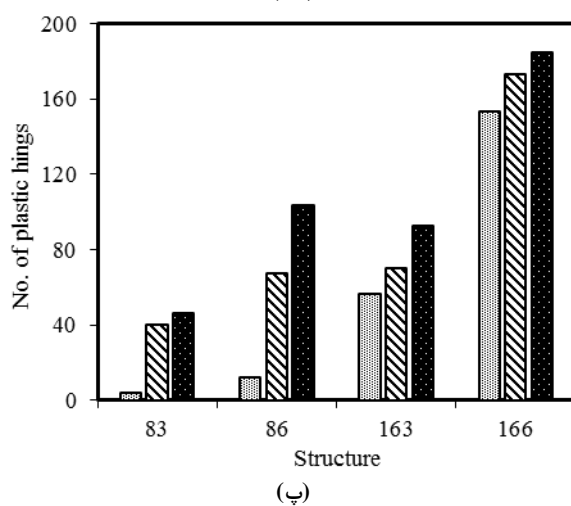
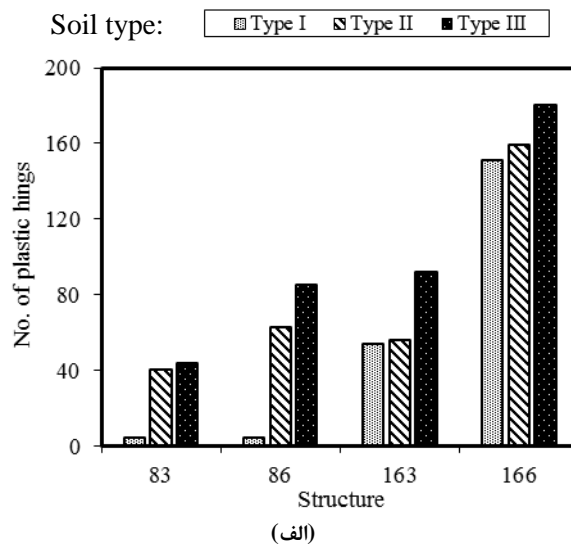
شکل ۱۱. میزان حداکثر دریفت طبقات سازه‌ها بر روی خاک‌های مختلف: (الف) تحت اثر زلزله بم (B)، (ب) تحت اثر زلزله سان فرناندو (S)، (پ) تحت اثر زلزله متوالی بم-بم (BB)، (ت) تحت اثر زلزله متوالی سان فرناندو-سان فرناندو (SS)، (ث) تحت اثر توالی لرزه‌ای بم-سان فرناندو (BS) و (ج) تحت اثر توالی لرزه‌ای سان فرناندو-بم (SB).

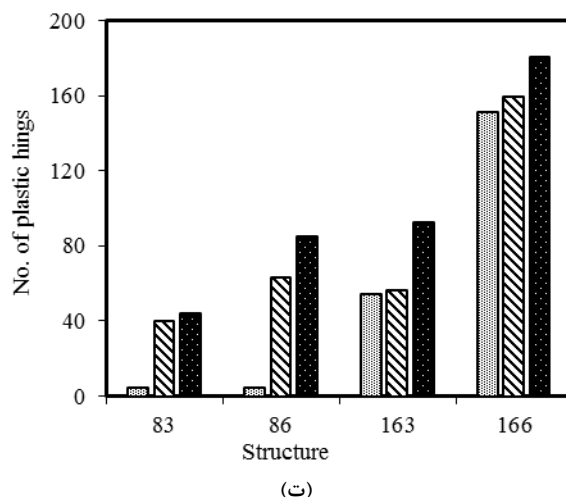




شکل ۱۲. محل رخداد حداکثر دریافت طبقات سازه‌ها بر روی خاک‌های مختلف؛ (الف) تحت اثر زلزله بم (B)، (ب) تحت اثر زلزله سان‌فرناندو (S)، (پ) تحت اثر زلزله متوالی بم-بم (BB)، (ت) تحت اثر زلزله متوالی سان‌فرناندو-سان‌فرناندو (SS)، (ث) تحت اثر توالی لرزه‌ای بم-سان‌فرناندو (BS) و (ج) تحت اثر توالی لرزه‌ای سان‌فرناندو-بم (SB).

در صورت رخداد زلزله منفرد با فرکانس پایین یا توالی لرزه‌ای که در آن هر دو زلزله دارای محتوای فرکانسی پایین باشد (شکل ۱۲ (ب) و (ت))، محل رخداد حداکثر دررفت عموماً در بالاترین طبقات می‌باشد، همچنین رخداد توالی لرزه‌ای که در مقدار حداکثر دررفت تاثیرگذار بود، تاثیر چندانی در محل رخداد حداکثر دررفت ندارد.





شکل ۱۳. تعداد مفاصل پلاستیک تشکیل شده در سازه‌ها بر روی خاک‌های مختلف؛ (الف) تحت اثر زلزله بم (B)، (ب) تحت اثر زلزله متوالی بم-بم (BB)، (پ) تحت اثر توالی لرزه‌ای بم-سان فرناندو (BS) و (ت) تحت اثر توالی لرزه‌ای سان فرناندو-بم (SB)

تعداد مفاصل پلاستیک تشکیل شده در هر یک از مدل‌ها در شکل (۱۳) نشان داده شده است؛ این نمودارها حاکی از آن است که در صورت رخداد توالی لرزه‌ای متشکل از دو زلزله با فرکانس محتوای فرکانسی پایین، یا زلزله منفرد با فرکانس غالب پایین، سازه وارد ناحیه پلاستیک خود نمی‌شود و هیچ گونه مفصل پلاستیکی تشکیل نمی‌گردد. با نرم تر شدن خاک تعداد مفاصل پلاستیک تشکیل شده در سازه افزایش می‌یابد، این مقدار افزایش در سازه‌های کوتاه‌تر بیشتر است و با افزایش تعداد دهانه‌ها و تعداد طبقات سازه، تعداد مفاصل پلاستیک ایجاد شده افزایش می‌یابد.

۶- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، رفتار لرزه‌ای اندرکنش خاک و قاب‌های خمشی فولادی (به روش زیرسازه)، تحت اثر زلزله‌های متوالی و زلزله-های منفرد، با محتوای فرکانسی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. دو قاب ۸ و ۱۶ طبقه گه هر یک دارای تعداد ۳ و ۶ دهانه می‌باشند بر روی سه تیپ خاک مدلسازی شده و مورد بررسی قرار گرفته‌اند و به منظور مطالعه اثرات توالی لرزه‌ای از دو زلزله با محتوای فرکانسی متفاوت استفاده شده است.

نتایج حاصله حاکی از آنست 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 بیشتر حائز اهمیت است؛ به علاوه آن که، توالی لرزه‌ای متشکل از زلزله‌های متوال دارای پیروید غالب بالاتر، منجر به خسارات شدیدتری به سازه می‌گردد.

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 بویژه زمانی که اثرات خاک نیز لحاظ گردد.

لذا پیشنهاد می‌شود، جهت طراحی سازه‌های فولادی تاثیرات توالی لرزه‌ای و همچنین اثرات خاک به صورت دقیق‌تر بر روی پاسخ لرزه‌ای آن‌ها در نظر گرفته شوند.

مراجع

- 1- 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.
- 2- Hatzivassiliou, M. and Hatzigeorgiou, G. D., (2015), Seismic sequence effects on three-dimensional reinforced concrete buildings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 72, 77-88.

- 3- 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.
- 4- Fragiaco, M., Amadio, C. and Macorini, L., (2004), Seismic response of steel frames under repeated earthquake ground motions. *Engineering structures*, 26(13), 2021-2035.
- 5- 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.
- 6- 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.
- 7- 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 (IJASE)*, 7(1), 11-30.
- 8- Veletsos, A. S. and Tang, Y., (1990), Soil- structure interaction effects for laterally excited liquid storage tanks. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 19(4), 473-496.
- 9- 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.
- ۱۰- وهدانی، ر.، بیطرفان، م. و خداکرمی، م.ا. (۱۳۹۵)، اثر اندرکنش خاک و سازه بر ارزیابی عملکرد شاخص خرابی تجمعی انرژی در قاب های بتن مسلح. نشریه علمی و پژوهشی مهندسی سازه و ساخت، ۳(۳)، ۱۶-۲۹.
- 11- 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.
- 12- Mylonakis, G. and Gazetas, G., (2000), Seismic soil-structure interaction: beneficial or detrimental?. *Journal of Earthquake Engineering*, 4(3), 277-301.
- 13- 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.
- 14- Eser, M., Aydemir, C. and Ekiz, I., (2011), Effects of soil structure interaction on strength reduction factors. *Procedia Engineering*, 14, 1696-1704.
- ۱۵- آیین نامه‌ی طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰)، ویرایش چهارم، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن (۱۳۹۲).
- ۱۶- مبحث ششم، بارهای وارد بر ساختمان، مقررات ملی ساختمان، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان (۱۳۹۲).
- ۱۷- مبحث دهم، طرح و اجرای ساختمان‌های فولادی، مقررات ملی ساختمان، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان (۱۳۹۲).
- 18- Livaoglu, R., (2008), Investigation of seismic behavior of fluid–rectangular tank–soil/foundation systems in frequency domain. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28(2), pp.132-146.
- 19- PEER. Ground Motions Database; 2012. (http://peer.berkeley.edu/peer_ground_motion_database).
- ۲۰- دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمانهای موجود (نشریه ۳۶۰)، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، معاونت امور فنی، دفتر امور فنی و تدوین معیارها (۱۳۸۵).
- 21- Raychowdhury, P. and Ray-Chaudhuri, S., (2015), Seismic response of nonstructural components supported by a 4-story SMRF: Effect of nonlinear soil–structure interaction. In *Structures (Vol. 3, pp. 200-210)*.
- 22- 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.
- 23- Chopra, A.K., (2005), *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Tsinghua University Press.