



ارزیابی احتمالاتی-لرزه ای اثر اندرکنش خاک و سازه بر روی جداسازی شده بتنی

ابراهیم زمانی بیدختی^۱، امیرمحمد تقوی، حامد کوهستانیان

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۱۱

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۵/۲۵

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۲۷

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۶/۱۹

کلمات کلیدی:

ساختمان بتنی قاب خمشی

جداسازهای LRB

اندرکنش خاک و سازه

تحلیل دینامیکی افزایشی

منحنی های شکنندگی

خلاصه: در این پژوهش پاسخهای دینامیکی سازههای بتن آرمه جداسازی شده و پایه ثابت با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه مورد بررسی قرار گرفته است. برای دستیابی به این هدف سه نمونه ساختمان بتنی چهار، هشت و دوازده طبقه با جداساز لاستیکی با هسته سربی بر روی خاکهای نرم، متوسط، سخت و همچنین پی صلب در نرم افزار اپنسیس ۲،۵،۰ مدل گردید. برای طراحی لرزه ای سازه از آیین نامه ACI318-02 و سیستم قاب خمشی متوسط استفاده شده است. شش رکورد حوزه نزدیک و شش رکورد حوزه دور که دارای مؤلفه های یکسان اما ایستگاه های متفاوتی بودند انتخاب و بر هریک از سازه های مدل سازی شده اعمال شد و تحلیل دینامیکی افزایشی جهت دسته بندی و ارائه پاسخها مورد استفاده قرار گرفت. در ادامه با رسم منحنی های شکنندگی بر اساس بیشینه دررفت طبقات، تفسیرهای قابل قبولی ارائه گردید. همچنین دررفت متناظر و احتمال خرابی در هر یک از سطوح آسیب به کمک رسم میانه منحنی های شکنندگی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه سبب کاهش خسارت وارد بر سازه ها در یک شتاب یکسان می گردد و با نرم تر شدن خاک زیر سازه های جداسازی شده در تمامی سطوح خسارت، شتاب مربوط به میانه شکنندگی افزایش می یابد که این به معنای کاهش خطرپذیری سازه است. همچنین با توجه به نتایج میانه شکنندگی می توان نتیجه گرفت که در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه در سازه های جداسازی شده ۴ و ۸ طبقه اثر بیشتری بر روی شتاب بام نسبت به سازه های جداسازی شده ۱۲ طبقه داشته است؛ این در حالی است که این اثر در مورد برش پایه این سازه ها برعکس بوده و بر روی سازه جداسازی شده ۱۲ طبقه اثر بیشتری دارد.

۱- مقدمه

جداساز لرزه ای، یک روش طراحی لرزه ای مقاوم است که به جای افزایش ظرفیت لرزه ای سازه، بر مبنای مفهوم کاهش نیاز لرزه ای قرار دارد. استفاده صحیح از این فناوری سبب بهبود رفتار سازه ها شده و رفتار سازه در حین زمین لرزه های بزرگ، عمدتاً در محدوده ارتجاعی باقی می ماند [۱].

جداسازی لرزه ای پایه، که با بکار بردن وسایل جداساز با سختی افقی کم در بین سازه و پی انجام می شود، سازه را از مؤلفه های افقی حرکات لرزه ای زمین جدا می سازد و باعث کاهش قابل توجه نیروها و

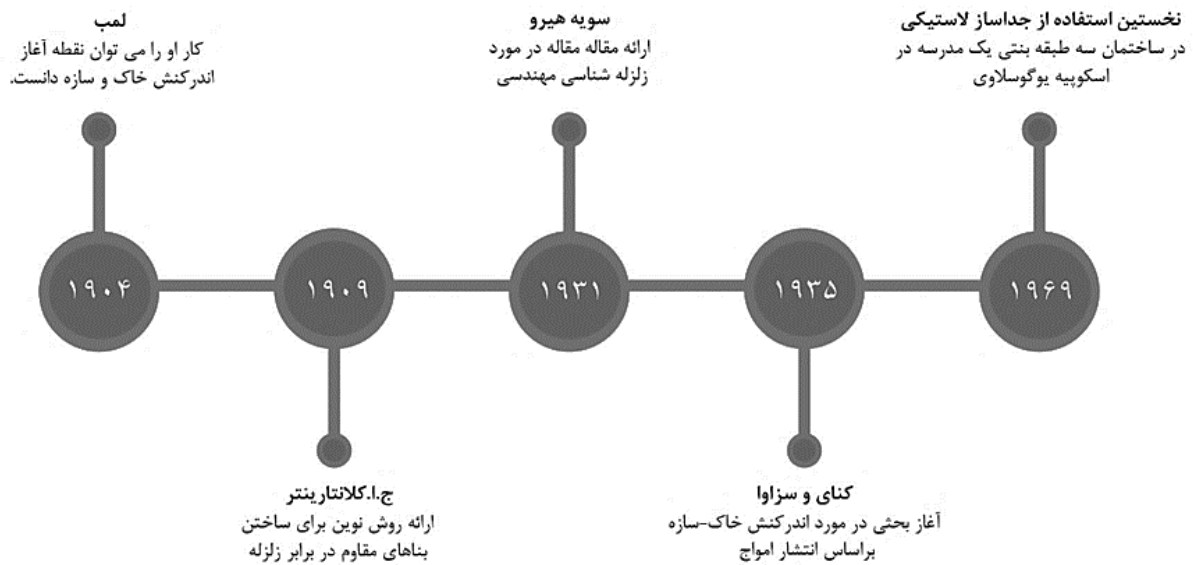
انرژی زلزله منتقل شده به سازه می گردد [۲، ۳].

عمل جداسازی پایه از نظر بهسازی در برابر زلزله، یک سیستم سازه ای انعطاف پذیر و مناسب را به وجود می آورد. سیستم های جداساز لرزه ای از گوناگونی زیادی برخوردارند که پایه و اساس بیشتر آنها بر دو نوع لغزشی و لاستیکی استوار است که هر کدام به منظور جداسازی از حرکت زمین در ساختمان ها و پل ها مورد استفاده قرار می گیرند [۴-۹].

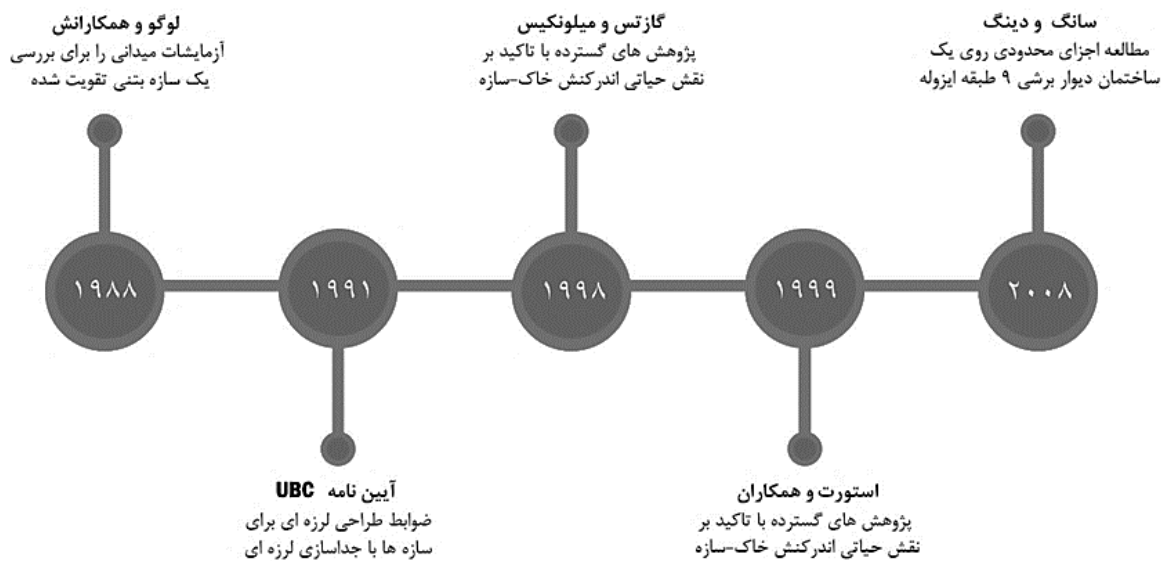
طراحی لرزه ای ساختمان هایی که در آنها از جداسازهای لرزه ای استفاده می شود اغلب با فرض یک پی صلب انجام می گیرد، در نتیجه اثر اندرکنش خاک-سازه نادیده گرفته می شود. این نادیده گرفتن توسط برخی محققان معقول به نظر می رسد که نشان می دهند

* نویسنده عهده دار مکاتبات: zamani.eb@shahroodut.ac.ir





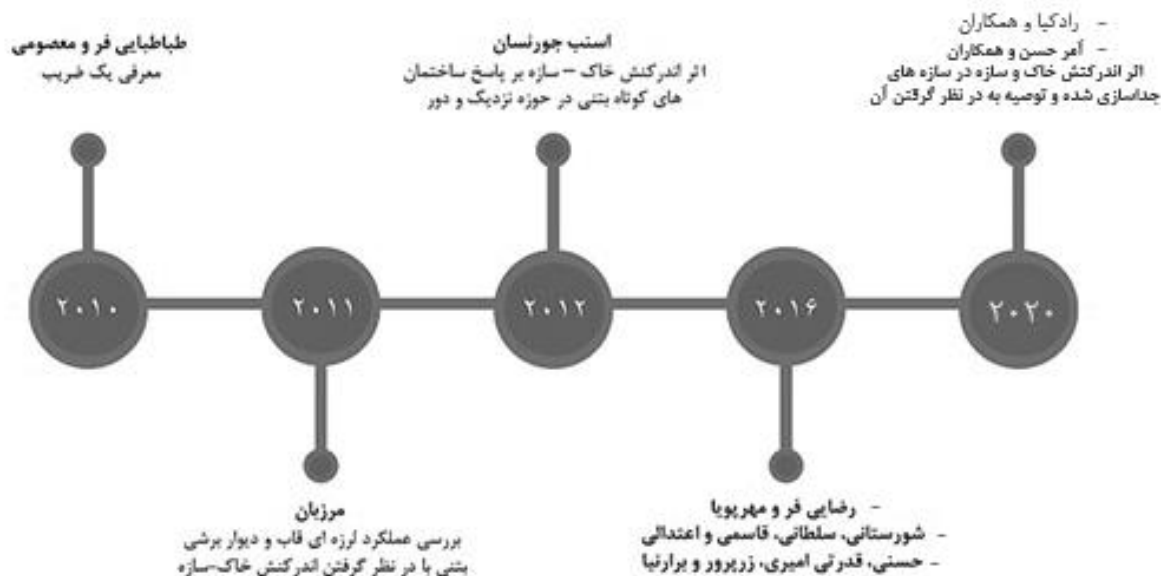
شکل ۱. تاریخچه برخی از کارهای انجام شده از سال ۱۹۰۴ تا ۱۹۶۹ [۱۴-۱۸]
Fig. 1. History of some research from 1904 to 1969



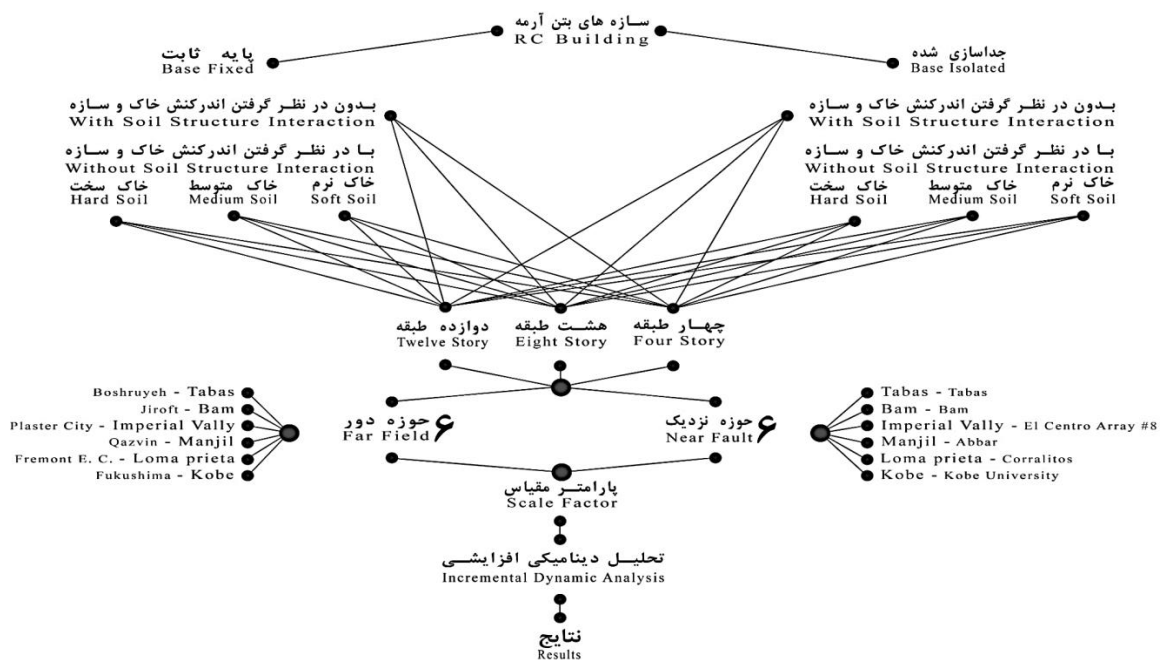
شکل ۲. تاریخچه برخی از کارهای انجام شده از سال ۱۹۸۸ تا ۲۰۰۸ [۱۹-۲۳]
Fig. 2. History of some research from 1988 to 2008

همیشه مطمئن نیست [۱۲، ۱۳]. متن‌های علمی موجود نقطه آغاز مسأله اندرکنش خاک سازه را سال ۱۹۰۴ می‌دانند، زمانی که لمب مطالعاتی بر روی ارتعاشات یک فضای نیمه بی‌نهایت الاستیک خطی انجام داد.

که اگرچه اندرکنش خاک-سازه تأثیر کمی روی پاسخ سازه دارد؛ با این حال این تأثیر در سازه‌های جداسازی شده بسیار کوچک‌تر از سازه‌های بدون جداساز است [۱۰، ۱۱]. اما مطالعات دیگری وجود دارد که استدلال می‌کند که طراحی لرزه‌ای بر مبنای پی صلب



شکل ۳. تاریخچه برخی از کارهای انجام شده از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ [۲۴-۳۰]
Fig. 3. History of some research from 2010 to 2020



شکل ۴. مسیر انجام تحقیق برای ساختمان های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه با و بدون در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه
Fig. 4. Research chart for 4, 8 and 12 story buildings with and without considering the interaction of soil and structures

اثرات نوع خاک بر عملکرد لرزه‌ای سازه تحت چند زلزله‌ی ثبت شده معروف دنیا را در نظر گرفتند و در نهایت به این نتیجه رسیدند که ضرورت در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه در ارزیابی لرزه‌ای سازه‌های جدا شده در پایه بسیار مهم است. شکل ۳ گزیده مطالعات انجام شده از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ را نشان می‌دهد.

در این پژوهش پاسخ‌های دینامیکی سازه‌های بتن آرمه جداسازی شده و پایه ثابت با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه تحت اثر رکوردهای حوزه نزدیک و دور مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۴). برای دستیابی به این هدف سه نمونه ساختمان بتنی چهار، هشت و دوازده طبقه با جداساز لاستیکی با هسته سربی بر روی خاک نرم، متوسط، سخت و صلب در نرم‌افزار OpenSees مدل گردید. شش رکورد حوزه نزدیک و شش رکورد حوزه دور که دارای مؤلفه‌های یکسان اما ایستگاه‌های متفاوت بودند انتخاب شده، در ۱۵ گام مقیاس و به هر یک از سازه‌های مدل‌سازی شده اعمال گردیدند. در نهایت با دریافت پاسخ‌های مربوطه و ارائه آنها بر روی منحنی‌های تحلیل دینامیکی افزایشی، شکنندگی و غیره، تحلیل و مقایسه‌های لازم انجام پذیرفت.

۲- مدل عددی سازه

در این پژوهش سازه‌های جداسازی شده و پایه ثابت مشابه در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. پس از راستی آزمایی مدل‌سازی انجام شده با آزمایش و همچنین با نتایج حاصل از تحلیل در نرم‌افزار Sap2000، حالت‌های مختلف سازه در محیط نرم‌افزار OpenSees 2.5.0 مورد تحلیل دینامیکی افزایشی قرار گرفتند. در نهایت پاسخ‌ها بر مبنای منحنی‌های شکنندگی مقایسه شده و اثرات اندرکنش خاک بر روی این گونه سازه‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

در این پژوهش ۱۵ نمونه قاب ساختمان بتنی ۴، ۸ و ۱۲ طبقه همانند شکل ۵ با در نظر گرفتن اندرکنش خاک نرم، متوسط و سخت زیر پی و حالت صلب، در نرم‌افزار OpenSees مدل گردید. قاب‌ها به سه حالت کلی پایه ثابت بدون اندرکنش، جداسازی شده بدون اندرکنش و جداسازی شده با اندرکنش تقسیم‌بندی شده‌اند که حالات مختلف در شکل ۵ قابل مشاهده است.

قاب های طراحی شده شامل ۵ دهانه ۵ متری با ارتفاع ۳/۲ متر

از آن پس بود که تحقیقات بسیاری بر روی مسأله اندرکنش خاک-سازه انجام پذیرفت [۱۴].

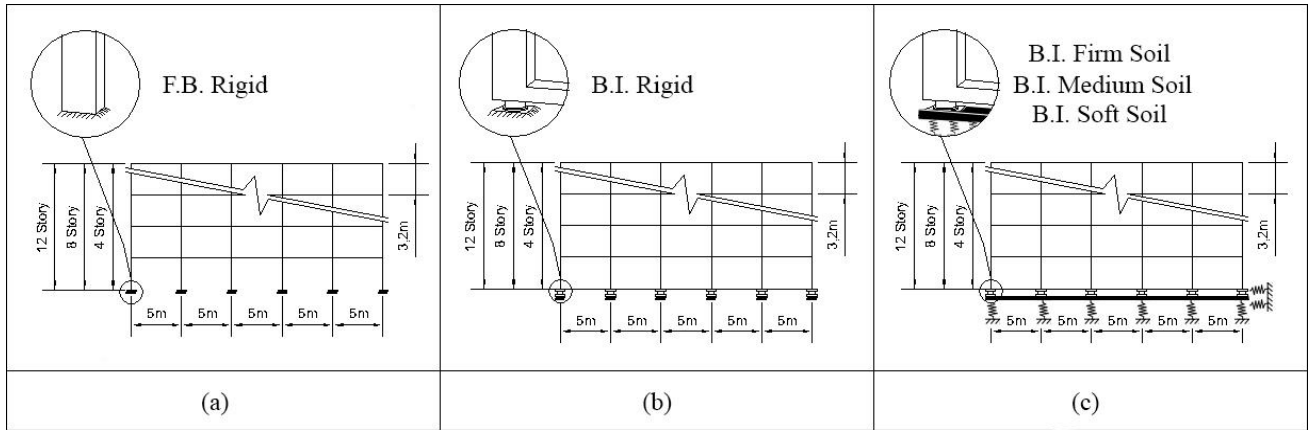
نخستین مورد استفاده از یک سیستم جداساز لاستیکی برای حفاظت از ساختمان‌ها در برابر زلزله، در سال ۱۹۶۹ در ساختمان سه طبقه بنتی یک مدرسه در اسکوپیه یوگوسلاوی می‌باشد. از جمله دیگر ساختمان‌های مهمی که این سیستم در آنها استفاده شده است می‌توان تقویت ساختمان‌های شهرداری اوکلند و شهرداری سانفرانسیسکو در سال ۱۹۹۵ در آمریکا اشاره نمود که هر دو ساختمان در زلزله سال ۱۹۸۹ لوماپریتا آسیب دیده بودند [۱۵]. شکل ۱ گزیده مطالعات انجام شده از سال ۱۹۰۴ تا ۱۹۸۸ را نشان می‌دهد.

در آمریکا آیین‌نامه مختلفی از سال ۱۹۸۶ مورد استفاده قرار می‌گرفت که به تدریج این آیین‌نامه‌ها روند تکاملی خود را طی کردند و سرانجام در سال ۱۹۹۱ آیین‌نامه 'UBC تحت عنوان "ضوابط طراحی لرزه‌ای برای سازه‌ها با جداسازی لرزه‌ای"^۲ ارائه شد. نگارش بعدی آیین‌نامه مانند نسخه سال ۱۹۹۴ و ۱۹۹۷ پیچیده‌تر از نسخه اولیه می‌باشد و عمده‌اً بر مبنای روش‌های دینامیکی طراحی قرار دارند. امروزه در آمریکا آیین‌نامه ASCE^۷-۱۶ و در ایران نشریه ۵۲۳ به طراحی و اجرای سیستم جداساز لرزه‌ای می‌پردازد.

شکل ۲ گزیده مطالعات انجام در سال ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۰ را نشان می‌دهد. در ایران نیز مطالعات زیادی جهت بررسی اثرات اندرکنش خاک - سازه بر پاسخ سیستم‌های سازه ای صورت گرفته است. به عنوان مثال رضایی فر و مهر پویا [۲۹] به شناسایی رفتار دینامیکی پل‌های جداسازی شده تحت زمین‌لرزه‌های حوزه نزدیک با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه پرداختند. نتایج تحلیل‌های آنها نشان داد که جداسازی‌های LRB افزایش نسبی جابه‌جایی روسازه و کاهش جابه‌جایی نسبی زیر سازه نسبت به جداساز الاستومری شده و تأثیر اندرکنش خاک و کوله را کم می‌کنند. از طرف دیگر جداسازی پل سبب کاهش نیرو و توزیع بهتر نیروی برشی بین کوله و پایه‌های میانی می‌گردد. شورشانی، سلطانی، قاسمی و اعتدالی [۳۰] به مطالعه پارامتریک سازه‌های جدا شده در پایه با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه پرداختند. آنها سه نوع خاک شامل خاک نرم، خاک با سختی متوسط (خاک متوسط) و خاک سخت برای ارزیابی

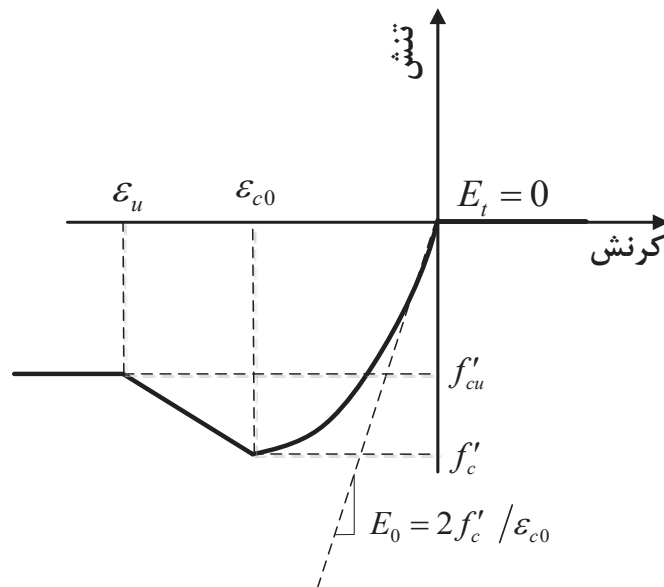
1 Uniform Building Code

2 Seismic design criteria for isolated structures



شکل ۵. سازه‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه (الف) پایه ثابت و بدون اندرکنش (ب) جداسازی شده و بدون اندرکنش (پ) جداسازی شده و با در نظر گرفتن اندرکنش خاک

Fig. 5. Frames modeled in software, a) fixed base without SSI, b) isolated base without SSI, and c) isolated base with SSI



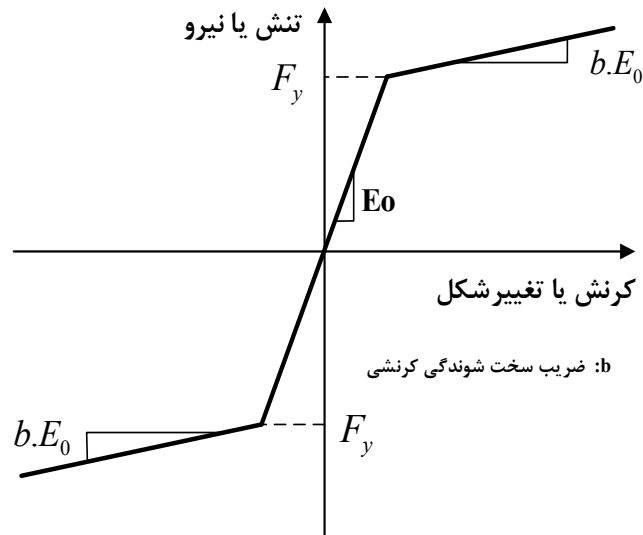
شکل ۶. نمودار تنش-کرنش مصالح بتن concrete01 [۳۱]

Fig. 6. Stress-strain diagram of concrete01

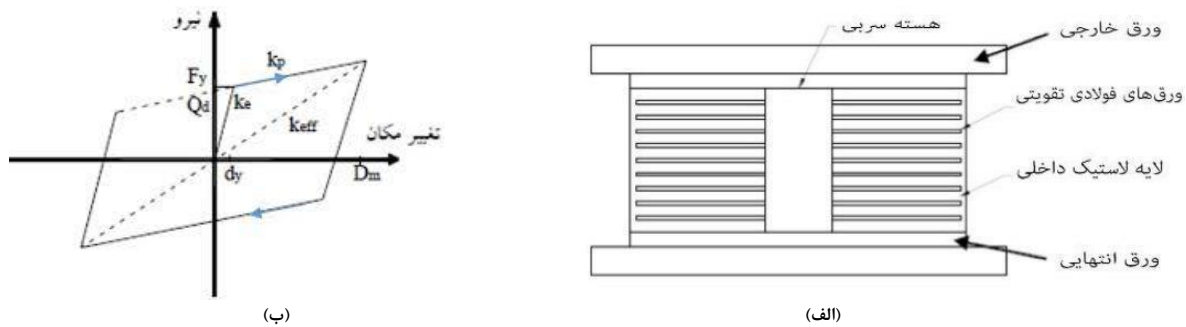
است. برای مصالح فولادی تنش جاری شدن 338 MPa ، نسبت پواسون 0.3 و مدول یانگ 200 GPa در تیرها و ستون‌ها در نظر گرفته شده است. مشخصات مقاطع بتنی مورد استفاده در سازه ۴، ۸ و ۱۲ طبقه در جدول ۱ ارائه شده است.

به تیرها و ستون‌های بتنی مصالح $\text{concrete}01$ با مقاومت کششی صفر اختصاص داده شد که نمودار تنش-کرنش آن مطابق

برای هر طبقه است. بار مرده و بار زنده مورد استفاده به ترتیب برابر $6/4$ و $1/96$ کیلونیوتن بر مترمربع برای طبقات و به ترتیب $5/9$ و $1/47$ کیلونیوتن بر مترمربع برای بام است. برای طراحی لرزه‌ای سازه از آیین‌نامه ACI 318(2002) و سیستم قاب خمشی متوسط استفاده شده است. برای مواد بتنی مقاومت فشاری $24/5 \text{ MPa}$ ، نسبت پواسون 0.2 و مدول یانگ برابر 23 GPa در نظر گرفته شده است. نسبت میلگردهای طولی در مقاطع تیر و ستون برابر ۳ درصد



شکل ۷. نمودار تنش-کرنش مصالح steel01 [۳۱]
Fig. 7. Stress-strain diagram of steel01



شکل ۸. الف) مقطع عرضی جداساز لاستیکی با هسته سربی، ب) نمودار نیرو-تغییر مکان ایده آل برای جداساز [۳۱]
Fig. 8. a) cross section of LRB, b) ideal Force-displacement diagram for isolator

برای ساخت مصالح فولادی بصورت رفتار تک‌محوره دوخطی با سخت‌شوندگی سینماتیک و سخت‌شوندگی ایزوتروپیک اختیاری توصیف می‌شود. لازم به ذکر است، ضریب سخت شونده گی کرنشی (b) در این پژوهش برای آرماتورها ۰/۰۱ در نظر گرفته شده است.

۳- جداساز لاستیکی با هسته سربی (LRB)

مطابق شکل ۸-الف جداساز لاستیکی با هسته سربی شامل لایه‌های لاستیکی و فولادی به همراه هسته استوانه‌ای شکل سربی است که در آن لایه‌های لاستیکی و فولادی انعطاف‌پذیری جانبی و سختی قائم را فراهم می‌کند و هسته سربی با هدف افزایش ظرفیت

شکل ۶ می‌باشد. این مدل برای ساخت مصالح بتنی تک‌محوره کنت، اسکات و پارک با سختی باربری/ بارگذاری که به صورت خطی کاهش یافته به کار می‌رود. برای تعریف مقاطع از مقطع فایبر^۱ استفاده شده است. این مقطع یک شکل هندسی عمومی دارد که از نواحی با اشکال ساده‌تر و منظم‌تر مانند نواحی مستطیلی، دایره‌ای و مثلثی تشکیل می‌شود. علاوه بر این آرماتورهای مسلح کننده را نیز می‌توان با این مقطع تعریف کرد.

از مصالح steel01 برای مدل کردن مصالح فولادی استفاده شد که دارای نمودار تنش-کرنش مطابق شکل ۷ است. مصالح steel01

1 Fiber Section

جدول ۱. مقاطع بتنی مورد استفاده در سازه (الف) ۴ طبقه، (ب) ۸ طبقه و (پ) ۱۲ طبقه

Table 1. Designed sections used in the structure of (a) 4 floors, (with) 8 floors and (c) 12 floors

آرمانتور ستون	ابعاد ستون (cm)	آرمانتور تیر	ابعاد تیر (cm)	طبقه	آرمانتور ستون	ابعاد ستون (cm)	آرمانتور تیر	ابعاد تیر (cm)	طبقه
۳۲۰۲۸	۸۵×۸۵	۲۸۰۴ بالا	۵۰×۵۰	طبقه اول	۲۶۰۲۰	۶۰×۶۰	۲۸۰۴ بالا	۴۰×۴۰	طبقه اول
		۲۸۰۴ پایین					۲۸۰۴ پایین		
۲۸۰۲۴	۷۰×۷۰	۳۲۰۵ بالا	۵۰×۵۰	طبقه دوم	۲۵۰۱۲	۴۵×۴۵	۲۸۰۴ بالا	۴۰×۴۰	طبقه دوم
		۳۲۰۵ پایین					۲۸۰۴ پایین		
۲۶۰۲۰	۶۰×۶۰	۳۲۰۵ بالا	۵۰×۵۰	طبقه سوم	۲۲۰۱۲	۴۰×۴۰	۲۸۰۴ بالا	۴۰×۴۰	طبقه سوم
		۳۲۰۵ پایین					۲۸۰۴ پایین		
۲۶۰۲۰	۶۰×۶۰	۳۲۰۵ بالا	۵۰×۵۰	طبقه چهارم	۲۵۰۸	۳۰×۳۰	۲۵۰۳ بالا	۳۰×۳۰	طبقه چهارم
		۳۲۰۵ پایین					۲۵۰۳ پایین		
۲۶۰۲۰	۶۰×۶۰	۳۲۰۵ بالا	۵۰×۵۰	طبقه پنجم					
		۳۲۰۵ پایین							
۲۶۰۱۶	۵۵×۵۵	۳۲۰۵ بالا	۵۰×۵۰	طبقه ششم					
		۳۲۰۵ پایین							
۲۶۰۱۶	۵۵×۵۵	۳۲۰۵ بالا	۵۰×۵۰	طبقه هفتم	۳۰۰۲۴	۷۵×۷۵	۳۲۰۴ بالا	۴۵×۴۵	طبقه اول
		۳۲۰۵ پایین					۳۲۰۴ پایین		
۲۶۰۱۶	۵۵×۵۵	۳۲۰۵ بالا	۵۰×۵۰	طبقه هشتم	۲۸۰۲۰	۶۵×۶۵	۳۲۰۴ بالا	۴۵×۴۵	طبقه دوم
		۳۲۰۵ پایین					۳۲۰۴ پایین		
۲۵۰۱۶	۵۰×۵۰	۲۸۰۴ بالا	۴۰×۴۰	طبقه نهم	۲۶۰۲۰	۶۰×۶۰	۳۲۰۴ بالا	۴۵×۴۵	طبقه سوم
		۲۸۰۴ پایین					۳۲۰۴ پایین		
۲۵۰۱۶	۵۰×۵۰	۲۸۰۴ بالا	۴۰×۴۰	طبقه دهم	۲۶۰۱۶	۵۵×۵۵	۳۲۰۴ بالا	۴۵×۴۵	طبقه چهارم
		۲۸۰۴ پایین					۳۲۰۴ پایین		
۲۵۰۱۲	۴۵×۴۵	۲۸۰۴ بالا	۴۰×۴۰	طبقه یازدهم	۲۵۰۱۶	۵۰×۵۰	۳۲۰۴ بالا	۴۵×۴۵	طبقه پنجم
		۲۸۰۴ پایین					۳۲۰۴ پایین		
۲۲۰۱۲	۴۰×۴۰	۲۸۰۴ بالا	۴۰×۴۰	طبقه دوازدهم	۲۵۰۱۲	۴۵×۴۵	۲۵۰۳ بالا	۴۰×۴۰	طبقه ششم
		۲۸۰۴ پایین					۲۵۰۳ پایین		
					۲۲۰۱۲	۴۰×۴۰	۲۸۰۴ بالا	۴۰×۴۰	طبقه هفتم
							۲۸۰۴ پایین		
					۲۲۰۸	۴۰×۴۰	۲۸۰۴ بالا	۴۰×۴۰	طبقه هشتم
							۲۸۰۴ پایین		

(پ)

(ب)

بطوری که S_{1D} ضریب طیفی و B_{1D} ضریب میرایی است که با فرض نسبت میرایی ۲۵٪ برابر ۱/۶ محاسبه می‌گردد.

$$Q_D = \frac{W_D}{4D_D} \quad (3)$$

W_D انرژی مستهلک شده در هر سیکل می‌باشد. حال با به دست آمدن Q_D سختی پس کمانشی جداساز (K_P) می‌تواند با استفاده از رابطه (۴) تخمین زده شود:

$$K_P = K_{eff} - \frac{Q_D}{D_D} \quad (4)$$

Q_D دوباره و با استفاده از تنش تسلیم و سطح هسته سربی رابطه (۵) به دست می‌آید:

$$Q_D = A_{pb} \times F_{ypb} \quad (5)$$

سپس با فرض کردن $K_e = 10K_d$ و $D_y = \frac{Q_D}{K_e - K_p}$ با استفاده از رابطه (۶) به دست می‌آید:

$$F_y = Q_D + K_p \times D_y \quad (6)$$

در نهایت سختی الاستیک جداساز از رابطه (۷) محاسبه می‌شود:

$$K_e = \frac{F_y}{D_y} \quad (7)$$

جدول ۲ خصوصیات مکانیکی جداسازهای لاستیکی با هسته سربی با توجه طراحی انجام برای سازه ۴، ۸ و ۱۲ طبقه را نشان می‌دهد. در نرم‌افزارهای اپنسیس و Sap2000 برای معرفی مصالح جداساز لاستیکی با هسته سربی با توجه به دستور معرفی این مصالح از مقادیر K_1 برای معرفی سختی الاستیک ابتدایی، F_y برای معرفی مقدار تنش تسلیم هسته سربی، از مقدار α برای معرفی مقدار نسبت سختی الاستیک به سختی پس از تسلیم و مقدار K_{eff} برای معرفی سختی موثر جداساز استفاده شده است.

جذب انرژی، سختی قائم و میرا کردن لرزش‌ها به آن اضافه گردیده است. به‌طورکلی طرز کار این‌گونه جداسازها شبیه جداسازهای لاستیکی می‌باشد، با این تفاوت که هسته استوانه‌ای سربی در میان آن قرار گرفته تا یک صلبیت اضافی را بر سیستم اعمال نماید.

برای مدل‌سازی جداساز لاستیکی با هسته سربی (LRB) در OpenSees در این مقاله از المان Elastomeric Bearing استفاده شده است. این المان بر اساس پاسخ دوخطی نیرو-تغییر مکان مطابق شکل ۸-ب توسعه یافته است [۳۱] تعریف جداسازها توسط پارامترهای غیرخطی ارائه شده توسط سازنده انجام گرفته است.

۳-۱- طراحی جداسازها

در این بخش ابتدا روش طراحی جداساز بر اساس تحقیقات توکلی و همکاران [۳۲] نگاشته شده و سپس در ادامه، مشخصات هندسی جداسازهای طراحی شده ارائه می‌گردد. مراحل طراحی جداسازها به این صورت است که در ابتدا پیوند هدف برای سازه مورد نظر فرض می‌گردد. سپس سختی مؤثر با استفاده از رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$K_{eff} = \frac{W_{DL} + 0/2LL}{g} \left(\frac{2\pi}{T_D}\right)^2 \quad (1)$$

به طوری که W جمع بار مرده به‌اضافه ۲۰ درصد باره زنده، g شتاب گرانش زمین، T_D همان پیوند هدفی است که در ابتدا فرض شد.

تغییرمکان طرح در مرکز سختی سیستم جداساز در طول زلزله طرح با استفاده از رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$D_D = \left[\frac{g}{4\pi^2}\right] \cdot \frac{S_{1D}T_D}{B_{1D}} \quad (2)$$

جدول ۲. خصوصیات مکانیکی سیستم جداسازهای لاستیکی با هسته سربی [۳۲]

Table 2. Mechanical properties of LRB isolators

D_D (m)	T_D (s)	α	F_y (KN)	Q_D (KN)	K_P (KN/m)	K_1 (KN/m)	K_{eff} (KN/m)	سازه
۰/۲۹۵	۲/۵	۰/۰۸۶	۶۴/۷۵	۵۴/۵۵	۲۶۵/۶	۳۰۸۳/۲۲	۴۳۷/۴	۴ طبقه
۰/۳۲	۲/۷	۰/۱	۱۰۳/۶	۹۲/۴۶	۴۸۴/۵۹	۴۵۰۴/۵۹	۷۹۷/۹۳	۸ طبقه
۰/۳۵۴	۳	۰/۰۹۵	۱۴۷/۱۶	۱۳۳/۱۴	۵۶۰/۷۵	۵۸۸۶/۴	۹۲۳/۳۲	۱۲ طبقه

جدول ۳. پارامترهای سه نوع خاک نرم، متوسط و سخت [۳۳]
Table 3. Parameters of three types of soft, medium and hard soils

نوع خاک	ضریب پواسون ν	سرعت موج برشی $V_s, m/s$	چگالی $\rho, kg/m^3$	مدول الاستیسیته $E_s, 10^6 N/m^2$	چسبندگی $c, N/m^2$
نرم (Soft)	۰/۴	۱۰۰	۱۷۵۰	۲۵	۲۵۰۰۰
متوسط (Medium)	۰/۳۲۵	۲۰۰	۱۹۵۰	۵۰	۷۵۰۰۰
سخت (Hard)	۰/۲	۳۰۰	۲۲۵۰	۱۰۰	۱۵۰۰۰۰

۴- اندرکنش خاک و سازه

برای انجام تحلیل سازه با اندرکنش خاک و سازه سه نوع خاک نرم، متوسط و سخت با خصوصیات زیر (جدول ۳) در نظر گرفته شد. هریک از سازه‌های جداسازی شده و پایه ثابت با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه یعنی این سه نوع خاک معرفی شده و همچنین بدون در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه یعنی حالت صلب مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

مطالعات زیادی برای معرفی مدل‌های تحلیلی اندرکنش خاک پی سازه انجام شده است که به‌طور کلی به سه دسته با نام‌های روش المان محدود، فرمولاسیون ماکرومدل و روش‌های مبتنی بر وینکلر تقسیم می‌شوند. با توجه به سادگی ذاتی در کاربرد و راندمان محاسباتی، روش‌های مبتنی بر وینکلر مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. در این مطالعه برای در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه از روش تیر اصلاح شده برای پی غیرخطی وینکلر (BNWF^۱) بر اساس کارهای ریچودهار^۲ استفاده شده است.

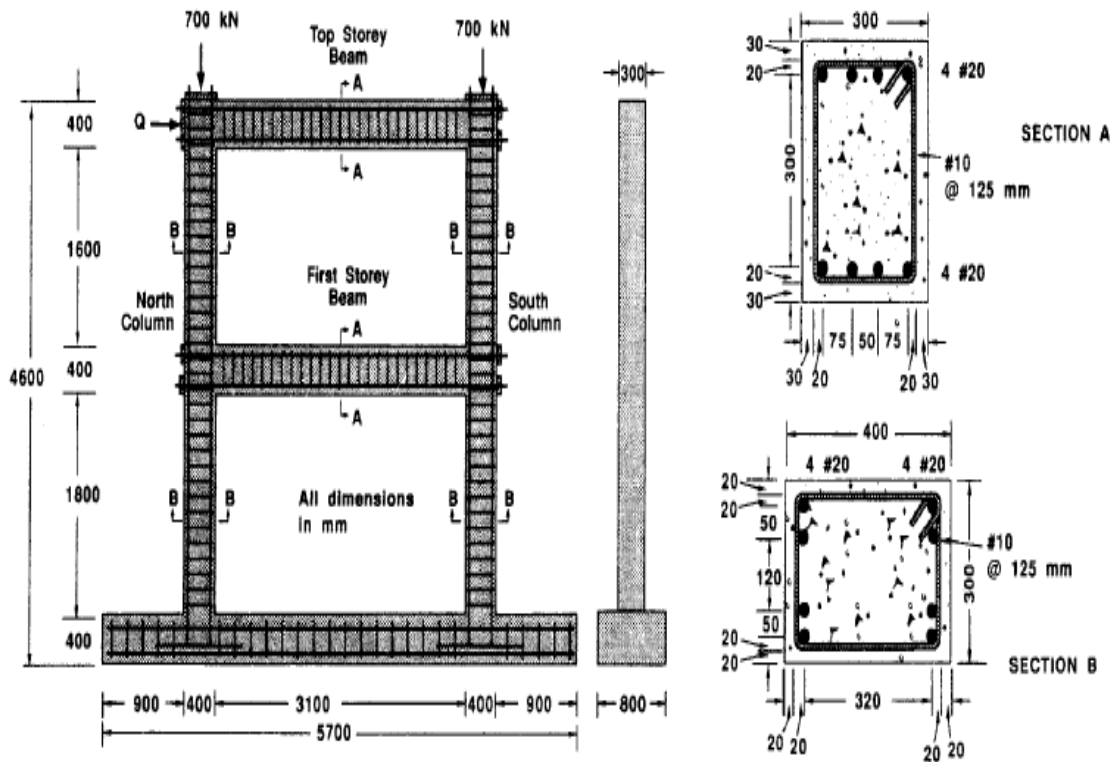
این مدل می‌تواند اثرات اندرکنش خاک و سازه را در مسائل دوبعدی با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی کند که این شبیه‌سازی بر روی نرم‌افزار اپنسیس اجرا می‌شود. مطابق این روش، می‌توان خاک را به صورت فنرهای قائم و افقی مدل کرد. در نرم‌افزار اپنسیس سه مدل فیزیکی جهت تعریف مدل وینکلر وجود دارد؛ ترکیب ماده الاستوپلاستیک کامل و المان گپ، ماده هیسترتیک و استفاده از مصالح QzSimple, PySimple و TzSimple که تمرکز در این

پژوهش در مدل‌سازی خاک بر روی قسمت سوم می‌باشد. هر یک از این مواد را می‌توان جهت معرفی خاک استفاده نمود؛ اما چون مصالح QzSimple, PySimple و TzSimple همه این خصوصیات را در خود دارند، کامل‌ترین نوع آن‌ها هستند [۳۱].

پی سطحی دوبعدی ساخته شده در این مطالعه بصورت یک تیر الاستیک انعطاف‌پذیر که توسط تعدادی فنرهای غیرخطی و مجزای وینکلر مورد حمایت قرار گرفته، مدل‌سازی شده است. تیر الاستیک با استفاده از المان‌های یک‌بعدی beam-column با سه درجه آزادی در هر گره برای اعمال بارها و تغییرشکل‌ها در جهت قائم، افقی و چرخشی مدل‌سازی شده است. المان با طول صفر^۳ برای ساخت المان با طول صفر که کاربرد زیادی در مدل‌سازی‌ها دارد. این المان با دو گره در مختصات یکسان تعریف می‌شود که این گره‌ها برای ایجاد رابطه نیرو-جابه‌جایی با مصالح تک‌محوری به یکدیگر متصل می‌شوند. فنرهای غیرخطی وینکلر نسبت به یکدیگر مستقل هستند و به صورت المان zeroLength یک‌بعدی در نرم‌افزار اپنسیس در نظر گرفته می‌شوند؛ به‌گونه‌ای که این غیرخطی بودن با استفاده از ویرایش‌های مدل‌های اصلاح شده مواد QzSimple, PySimple و TzSimple توسط بولانگر اعمال شده است. این مواد براساس نتایج آزمایشگاهی پی سطحی انجام شده اصلاح شده‌اند. این المان‌ها رفتار بار قائم-جابه‌جایی و رفتار بار فعال جانبی-جابه‌جایی در مقابل وجه یک پی و رفتار برش افقی-لغزش در پایه پی را شبیه‌سازی می‌کنند. به‌طور ضمنی، به وسیله توزیع فنرهای قائم قرار داده شده در امتداد طول پی رفتار ممان-چرخش در نظر گرفته شده است.

1 Beam on Nonlinear Winkler Foundation
2 Prishati Raychowdhury

3 Zero-Length Element



شکل ۹. جزئیات ابعاد و فولادگذاری قاب دوبعدی به منظور صحت‌سنجی [۲۷]
 Fig. 9. Dimensions and Rebars of two-dimensional frame for verification

مقایسه گردیده است. در شکل ۹ مدل آزمایشگاهی حاصل پژوهش وسچیو و امارا [۳۴] ارائه شده است. مقاطع استفاده شده در مدل آزمایشگاهی برای تمام المان‌ها با عرض $0/3$ و عمق $0/4$ متر بوده است، در تمامی مقاطع تیر و ستون‌ها از دولایه آرماتور به تعداد چهار میلگرد با نمره ۲۰ برای میلگردهای طولی و از میلگردهای نمره ۱۰ به فاصله ۱۲۵ میلی‌متر به عنوان خاموت استفاده شده است. این مدل آزمایشگاهی تحت بار ثقیلی 700 kN در هر ستون و در تراز بام و تحت الگوی بارگذاری جانبی مثلثی واقع شده است [۳۴]. با رسم نمودار نیرو-جابجایی برای دو حالت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری در شکل ۱۰ به مقایسه نتایج حاصل از نرم‌افزار و نتایج آزمایشگاهی پرداخته شده است. مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از مدل‌سازی در نرم‌افزار OpenSees کمتر از ۵ درصد با نتایج آزمایش تفاوت دارند. بنابراین، از نتایج حاصل از دو مرحله صحت‌سنجی می‌توان استنباط کرد که خروجی حاصل از نرم‌افزار OpenSees با مصالح استفاده شده دارای درستی در خروجی نرم‌افزار بوده است.

منحنی استقامت^۱ مدل‌های مواد اصلی به‌وسیله همانندسازی نتایج آزمایش‌های بارگذاری شمع درجا کالیبره شده است.

۵- صحت‌سنجی

راستی آزمایشی در این مقاله در دو مرحله انجام گرفته است. ابتدا با مقایسه دوره تناوب تحلیلی مود اول قاب‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه حاصل از نرم‌افزار Sap۲۰۰۰ با دوره تناوب حاصل شده از نرم‌افزار OpenSees (جدول ۴)، درستی مدل‌سازی عضو جداساز در نرم‌افزار OpenSsse مورد بررسی قرار گرفت. با بررسی اختلاف دوره تناوب حاصل شده از دو نرم‌افزار می‌توان به این نتیجه دست یافت که مدل‌سازی به درستی انجام شده است.

در بخش دوم صحت‌سنجی به مقایسه نتایج حاصل از نرم‌افزار OpenSees با نمونه آزمایشگاهی پرداخته شده است و نتایج حاصل از تحلیل پوش‌آور در نرم‌افزار و نمونه آزمایشگاهی با یکدیگر

1 backbone curves

جدول ۴. مقایسه دوره ی تناوب مود اول مدل های سازه ای در نرم افزار های OpenSees و Sap2000

Table 4. Comparison of the 1st modal period of modeled Frames

تعداد طبقات	زمان تناوب سازه (ثانیه)		
	OpenSees	Sap2000	درصد اختلاف
۴ طبقه	۰/۶۹۹	۰/۷۹۲	٪۱۱
۸ طبقه	۱/۲۶	۱/۳۳۸	٪۶
۱۲ طبقه	۱/۷۷	۱/۹۴	٪۸

جدول ۵. مشخصات رکوردهای حوزه نزدیک

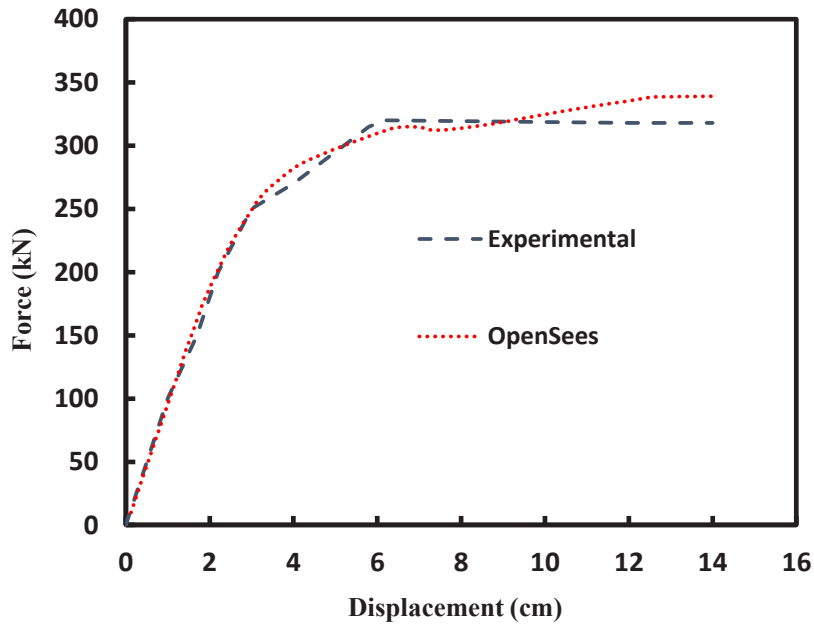
Table 5. Characteristics of near field records

نام رکورد	Tabas (Q1)	Bam (Q2)	Imperial Valley (Q3)	Manjil (Q4)	Loma prieta (Q5)	Kobe (Q6)
بزرگا (ریشتر)	۷/۶۲	۶/۶	۶/۵۳	۷/۳۷	۶/۹۳	۶/۹
ایستگاه	Tabas	Bam	El Centro Array ۸#	Abbar	Corralitos	Kobe University
مسافت (Km)	۱/۷۹	۱/۷	۰/۵۶	۱۲/۵۵	۰/۱۶	۰/۹
شتاب بیشینه زمین (g)	۰/۸۵۴	۰/۸۰۷	۰/۵۷۷	۰/۵۱۵	۰/۴۵۸	۰/۴۵۱

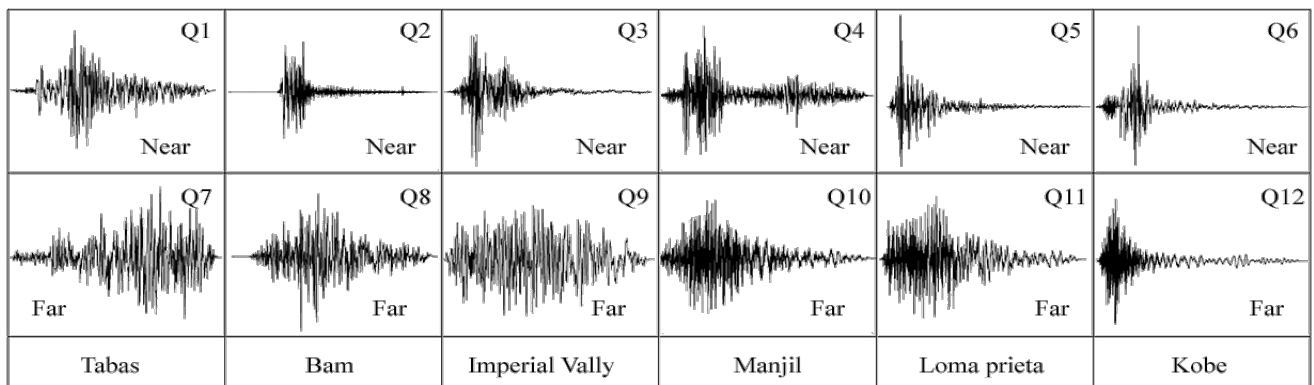
جدول ۶. مشخصات رکوردهای حوزه دور

Table 6. Characteristics of far field records

نام رکورد	Tabas (Q7)	Bam (Q8)	Imperial Valley (Q9)	Manjil (Q10)	Loma prieta (Q11)	Kobe (Q12)
بزرگا (ریشتر)	۷/۶۲	۶/۶	۶/۵۳	۷/۳۷	۶/۹۳	۶/۹
ایستگاه	Boshruyeh	Jiroft	Plaster City	Qazvin	Fremont E. C.	Fukushima
مسافت (Km)	۲۸/۷۹	۶۹/۲۹	۳۰/۳۳	۴۹/۹۷	۳۹/۸۵	۱۷/۸۵
شتاب بیشینه زمین (g)	۰/۱۰۵	۰/۴	۰/۲۶	۰/۹۵	۰/۶۸	۰/۱۹۸



شکل ۱۰. مقایسه نتایج پوش آور نمونه آزمایشگاهی و نمونه مدل سازی شده در نرم افزار OpenSees
Fig. 10. Comparison of experimental concrete frame results and frame modeled in OpenSees software



شکل ۱۱. نمودارهای شش رکورد حوزه نزدیک (Q6-Q1) و شش رکورد حوزه دور (Q7-Q12) انتخابی با مؤلفه های یکسان و ایستگاه های متفاوت

Fig. 11. Diagrams of six near-field records (Q1-Q6) and six selected far-field records (Q7-Q12) with the same components and different stations

به طور دقیق نمی توان فاصله مشخصی برای زلزله های نزدیک گسل تعریف نمود، اما به طور قراردادی به جنبش های ثبت شده در فاصله کمتر از ۱۵ کیلومتر از محل گسیختگی و کانون زلزله، نگاشت های نزدیک گسل گفته می شود.

شکل ۱۱ نمودارهای دوازده شتاب نگاشت حوزه نزدیک و دور انتخاب شده از شش زلزله مورد نظر نشان می دهد. در این شکل

۶- رکوردهای زلزله

همان طور که در جدول ۵ و ۶ مشاهده می گردد در این مقاله ۶ رکورد حوزه نزدیک و ۶ رکورد حوزه دور که دارای مؤلفه های یکسان اما ایستگاه های متفاوتی بودند، انتخاب گردید سپس هر یک از آنها در ۱۵ گام مقیاس و به صورت جداگانه به هریک از قاب های ۴، ۸ و ۱۲ جداسازی شده در ترازهای ارتفاعی مختلف اعمال گردید. اگرچه

نمودارهای قرار گرفته در بالا مربوط به رکوردهای حوزه نزدیک و نمودارهای قرار گرفته در پایین مربوط به رکوردهای حوزه دور می‌باشد.

۷- منحنی‌های شکنندگی

۷-۱- تعیین شاخص و محدوده شکست

منحنی‌های شکنندگی از ابزارهای مفید برای ارزیابی احتمالاتی خرابی سازه‌ها می‌باشد. به کمک منحنی‌های شکنندگی احتمال فراگذشت از یک سطح خرابی مشخص را در مقابل پارامترهای لرزه خیزی ساختمان تعیین می‌گردد. برای تولید منحنی شکنندگی یک توزیع احتمال برای پارامترهای تقاضای مهندسی که از تحلیل IDA به دست می‌آید استفاده می‌گردد. در این پژوهش از توزیع لوگ نرمال استفاده شده است. هر مدل سازه‌ای تحت رکورد های لرزه‌ای از 0.1g تا 1.5g با گام های 0.1g مورد تحلیل قرار گرفته اند و سپس به کمک نرم‌افزار OpenSees احتمال شکست سازه بررسی گردید. در این مطالعه از دستورالعمل HAZUS-MH MR-5-منشتر شده توسط FEMA^۱ استفاده شده است و برای رسم منحنی‌های شکنندگی از بیشینه دریافت طبقات به عنوان شاخص شکست استفاده گردیده است. در دستورالعمل HAZUS-MH MR-5- برای سازه‌های بتن آرمه چهار سطح خرابی تعریف شده که در این پژوهش سه سطح خرابی کم (ناچیز)، متوسط و زیاد مورد مطالعه و مقایسه قرار گرفته است و سازه‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه به ترتیب به عنوان سازه‌های کوتاه مرتبه، متوسط و بلندمرتبه در نظر گرفته شده است. برای سازه‌های کوتاه مرتبه حالت حدی خرابی مجاز ناچیز، متوسط و زیاد به ترتیب ۰/۰۰۵، ۰/۰۰۸۷ و ۰/۰۲۳۳ انتخاب گردید است. این مقادیر برای سازه متوسط و بلندمرتبه به ترتیب ۰/۰۰۳۳، ۰/۰۰۵۸، ۰/۰۱۵۶ و ۰/۰۲۵، ۰/۰۰۴۳، ۰/۰۱۱۷ می‌باشد [۳۵].

۷-۲- تولید منحنی شکنندگی

در پژوهش از توزیع لوگ نرمال به عنوان توزیع احتمالاتی برای تولید منحنی‌های شکنندگی استفاده شده است. برای دستیابی به این هدف، از رابطه (۸) پیشنهاد شده توسط نیلسن [۳۶] و رابطه (۹) پیشنهاد شده توسط کرنل [۳۷] استفاده شده است:

$$p(\cdot \leq D) = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{sd}} \ln \left(\frac{S_d}{S_c} \right) \right] \quad (۸)$$

$$p(\cdot \leq D) = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{sd}} \ln \left(\frac{S_d}{S_c} \right) \right]$$

$$\beta_{sd} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (x_i - \mu)^2} \quad (۹)$$

$$\ln(S_d) = a \ln(PGA) + b$$

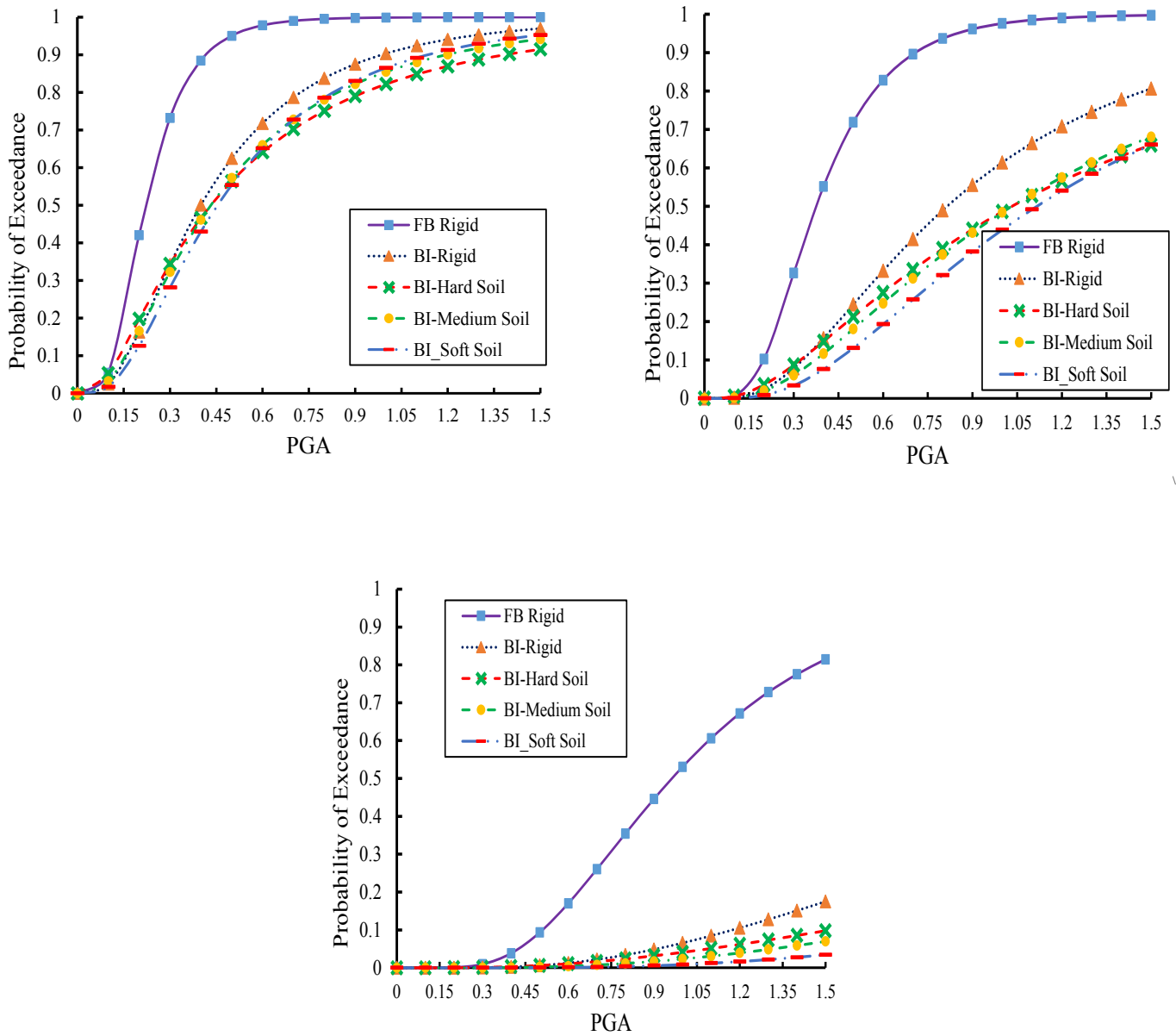
$$\ln(S_d) = a \ln(PGA) + b \quad (۱۰)$$

بطوری که p احتمال فراگذشت از حالت خرابی D ، β_{sd} انحراف معیار لگاریتم نرمال، S_c مقدار متوسط حالت حدی مجاز، S_d مقدار متوسط مقدار نیاز لرزه‌ای، N تعداد کل تحلیل‌ها، x مقدار بیشینه دریافت در هر بار تحلیل و μ متوسط مقدار نیاز لرزه‌ای است. a و b ضرایب رگرسیونی هستند که با استفاده از آنها در تحلیل رگرسیون خطی حداکثر دریافت طبقات در بیشینه شتاب‌های زمین مختلف به دست می‌آید. مقادیر مربوط به ضرایب رگرسیونی، انحراف معیار، مقدار متوسط حد مجاز و متوسط مقدار نیاز لرزه‌ای در جدول ۱ پیوست (الف) ارائه شده است.

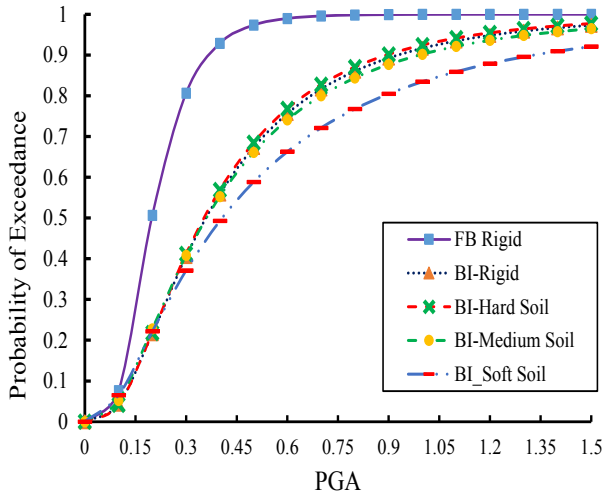
پس از تعیین روش و پارامترهای مربوط به توزیع لاگ نرمال، به ترسیم منحنی‌های شکست در سه سطح آسیب ناچیز، متوسط و زیاد برای مدل‌های دوبعدی ۴، ۸ و ۱۲ طبقه پرداخته شده است. با بررسی شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ مشاهده می‌گردد احتمال خرابی در سازه‌های جداسازی شده نسبت به پایه ثابت در بیشینه شتاب‌های بیشتری رخ داده است. با این وجود، با افزایش میزان خسارت و تغییر خاک از حالت سخت به حالت نرم، این افزایش بیشینه شتاب همچنان ادامه می‌یابد. به بیان دیگر، در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه سبب کاهش خسارت وارد بر سازه‌ها در یک شتاب یکسان گردیده است. همچنین بر اساس شکل ۱۴، تأثیر اندرکنش خاک و سازه در سازه‌های بلند (۱۲ طبقه) بدلیل زیاد بودن دوره تناوب ذاتی آنها کاهش یافته است.

۷-۳- میانه شکنندگی

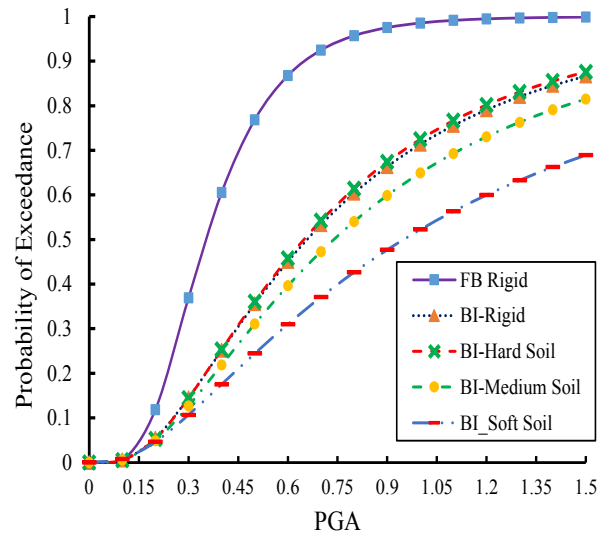
برای تحلیل کمی منحنی‌های شکنندگی با محاسبه میانه شکنندگی یا همان ۵۰ درصد احتمال شکست در سطوح مختلف



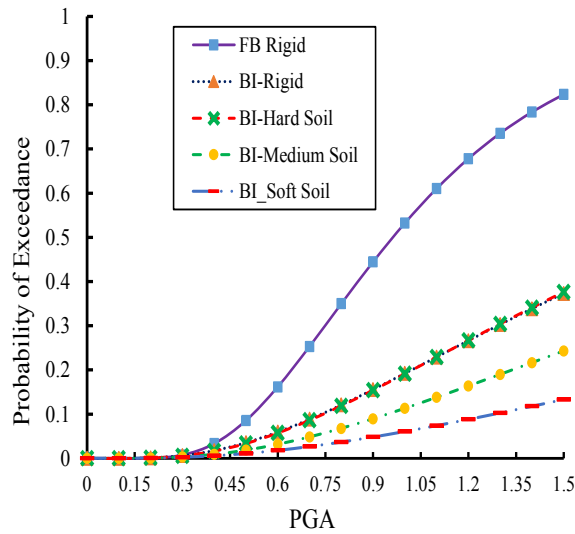
شکل ۱۲. منحنی‌های شکنندگی برای سازه‌های ۴ طبقه با و بدون در نظر گرفتن اندرکشن خاک و در حالت‌های خرابی الف) ناچیز، ب) متوسط، پ) زیاد
Fig. 12. Fragility curves for 4-story structures with and without SSI in failure states a) low, b) medium, c) high



(ب)

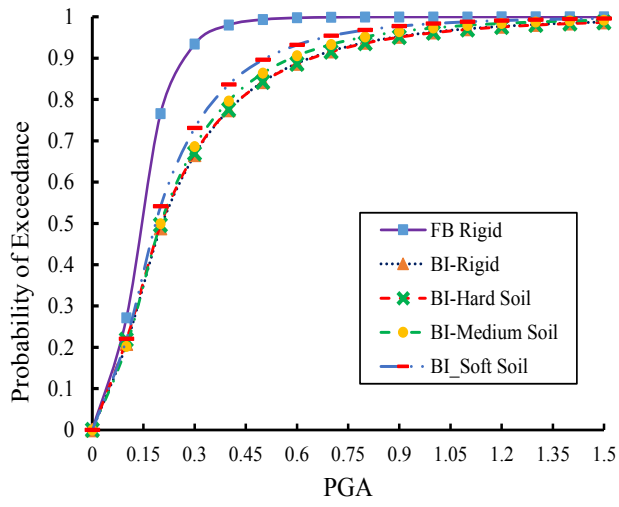


(ف)

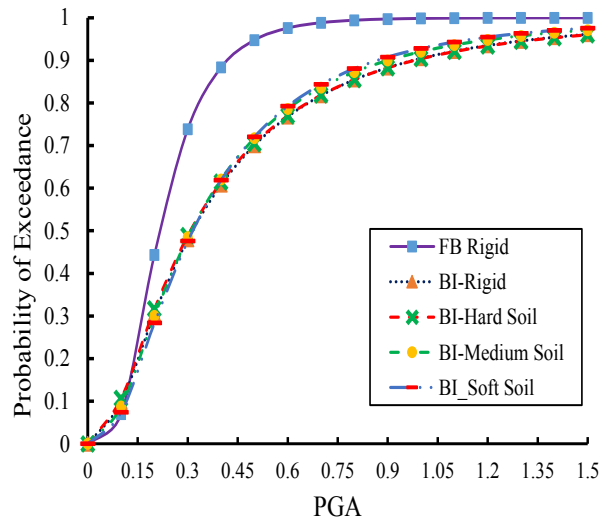


(ج)

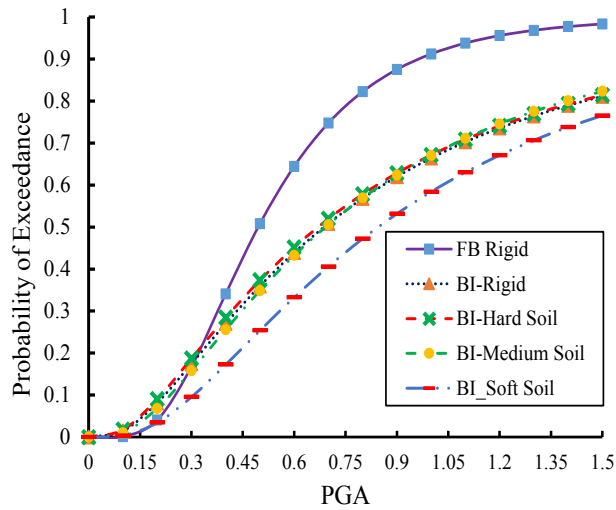
شکل ۱۳. منحنی‌های شکنندگی برای سازه‌های ۸ طبقه با و بدون در نظر گرفتن اندرکشن خاک و در حالت‌های خرابی الف) ناچیز، ب) متوسط، پ) زیاد
Fig. 13. Fragility curves for 8-story structures with and without SSI in failure states a) low, b) medium, c) high



(ب)



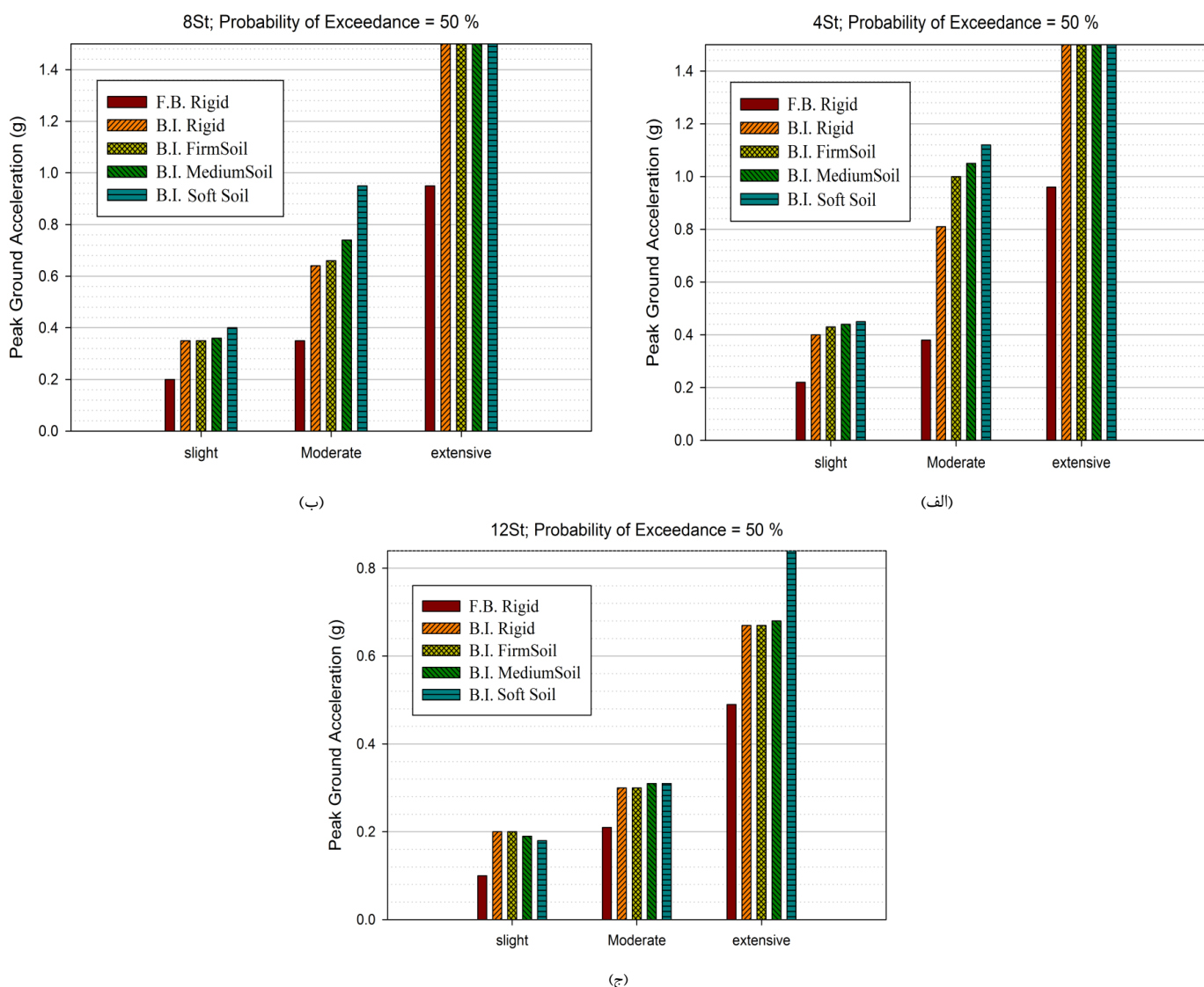
(الف)



(ج)

شکل ۱۴. منحنی‌های شکنندگی برای سازه‌های ۱۲ طبقه با و بدون در نظر گرفتن اندرکشن خاک و در حالت‌های خرابی الف) ناچیز، ب) متوسط، پ) زیاد

Fig. 14. Fragility curves for 12-story structures with and without SSI in failure states a) low, b) medium, c) high



شکل ۱۵. نمودار میانه شکنندگی برای سازه های الف) ۴ طبقه ب) ۸ طبقه ج) ۱۲ طبقه
Fig. 15. Median fragility diagram for structures a) 4 floors b) 8 floors c) 12 floors

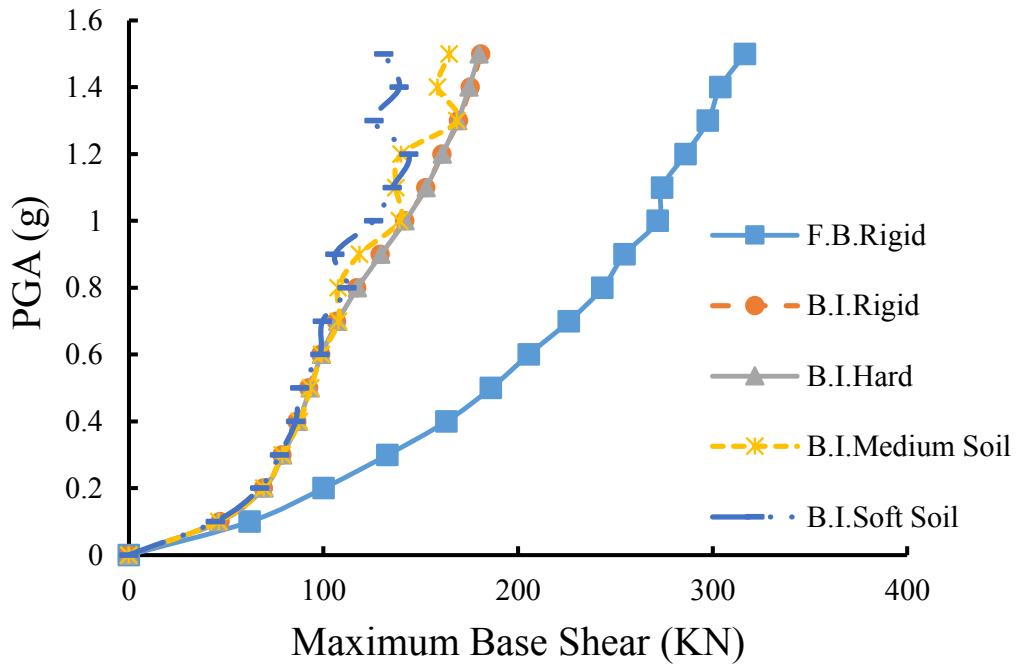
جداسازی شده نسبت به سازه های پایه ثابت است. با نرم شدن خاک زیر سازه های جداسازی شده در تمامی سطوح خسارت، شتاب مربوط به میانه شکنندگی افزایش یافته است (به جز حالت خفیف در سازه ۱۲ طبقه که دارای اهمیت کمی می باشد).

با توجه به نتایج میانه شکنندگی در نمودارهای بالا به نظر می رسد در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه در سازه های جداسازی شده ۴ و ۸ طبقه اثر بیشتری بر روی پاسخ های سازه ای نسبت به سازه های جداسازی شده ۱۲ طبقه داشته است.

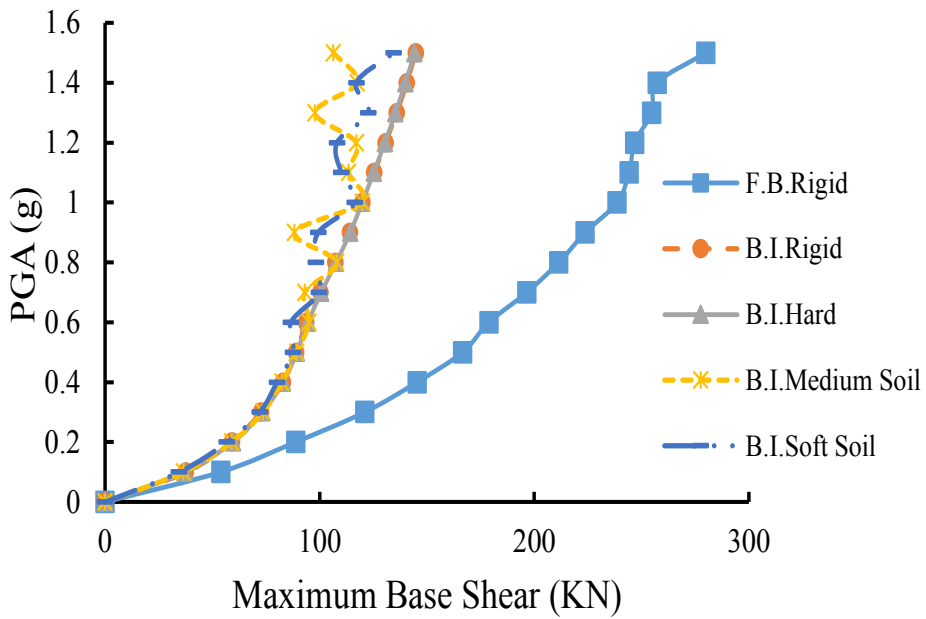
خرابی استفاده شده است. از این رو، میانه شکنندگی برای حدود مختلف خرابی سازه ها، در نمودار میله ای شکل ۱۵ به همراه مقادیر مربوطه ارائه گردیده است.

به کمک نمودارهای میانه شکنندگی شکل ۱۵ مشاهده می گردد برای سازه های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه در تمام سطوح خفیف، متوسط و شدید، میانه شکنندگی در سازه های جداسازی شده نسبت به سازه های پایه ثابت مشابه، بیشینه شتاب زمین بیشتری را نشان می دهد که این بیانگر عملکرد بهتر و خطرپذیری کمتر سازه های

4 Story - Far Field

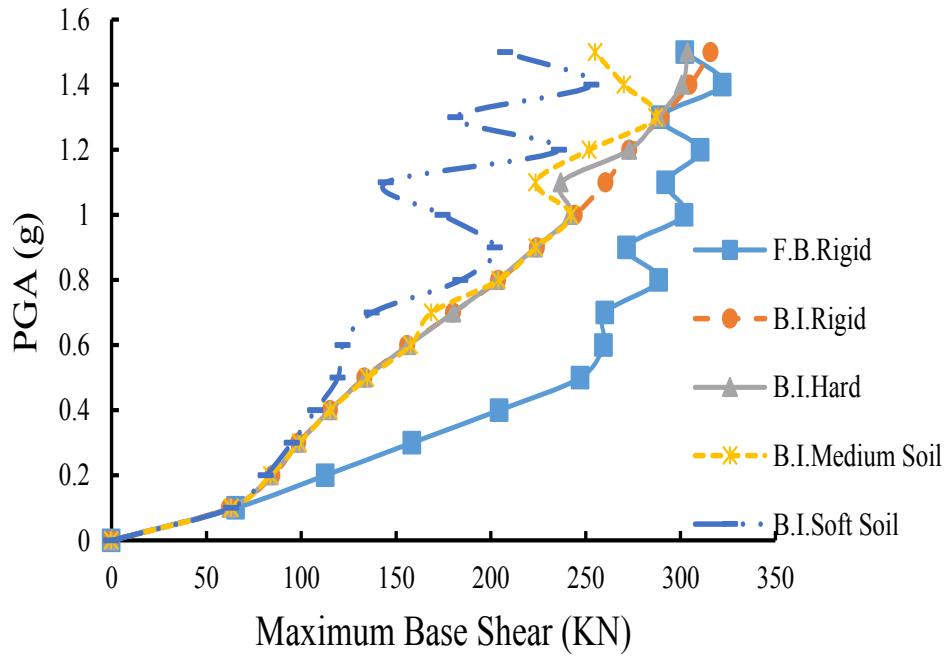


4 Story - Near Field

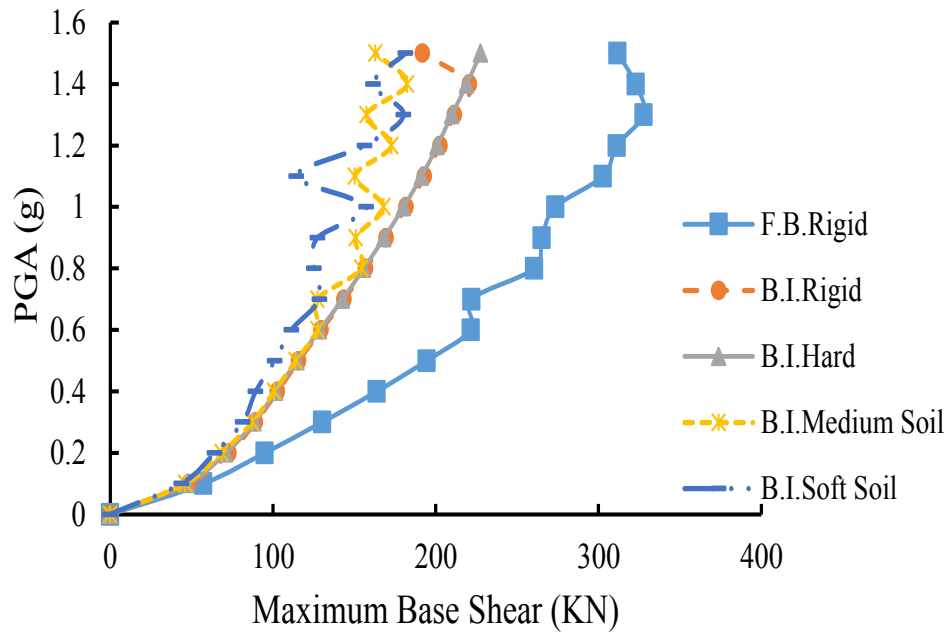


(الف)

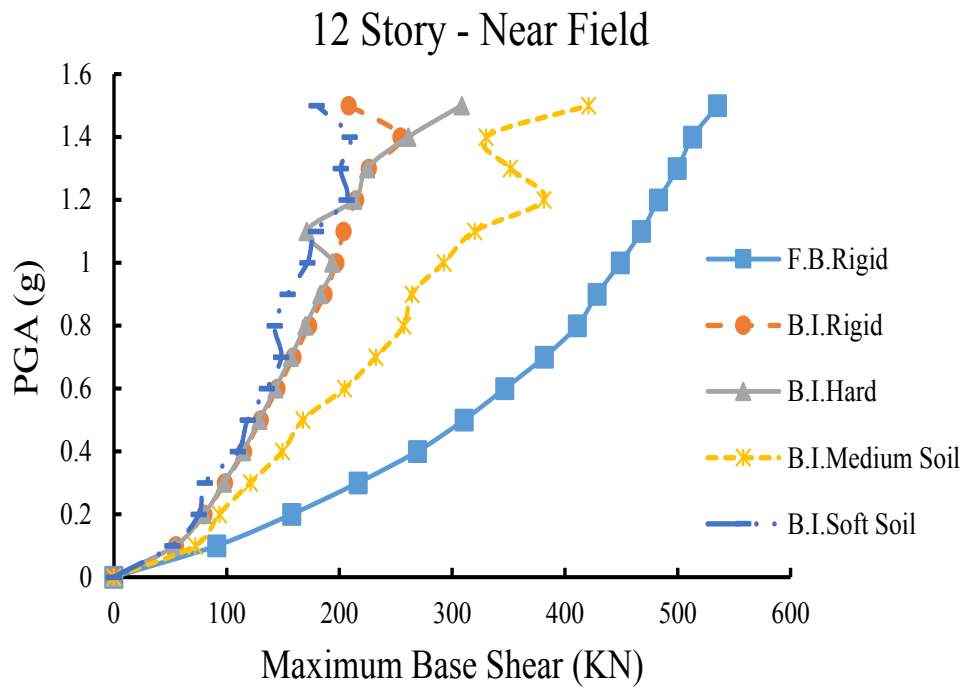
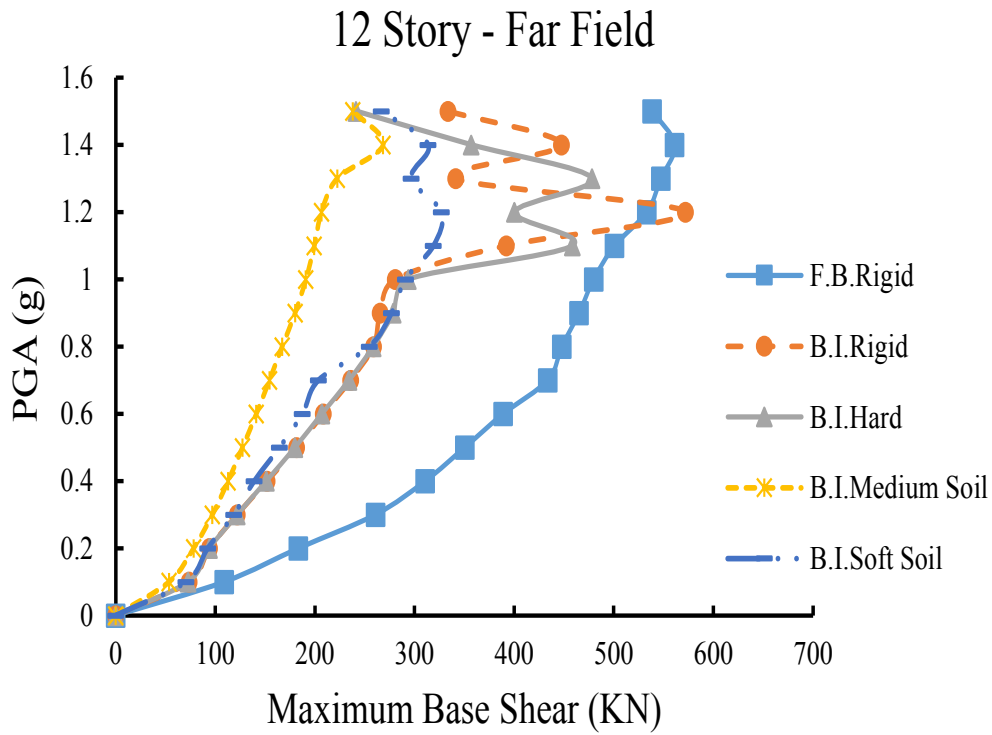
8 Story - Far Field



8 Story - Near Field



(ب)



(ج)

شکل ۱۶. منحنی‌های IDA بیشینه برش پایه تحت اثر رکوردهای حوزه نزدیک و دور در سازه‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه مدل سازی شده
 Fig. 16. Maximum base shear IDA curves under near and far field records in 4, 8 and 12 story structures

تحت اثر رکوردهای حوزه دور بوده است.

۷-۴- بیشینه برش پایه

بیشینه برش پایه در سازه‌های جداسازی شده ۸ طبقه دستخوش کاهش ۸/۴ و ۳/۲ درصدی به ترتیب در خاک نرم و متوسط نسبت به حالت پی صلب مشابه تحت اثر رکوردهای حوزه نزدیک شده است. در مقادیر پایین شتاب بیشینه زمین در مورد زلزله‌های میدان دور تفاوت چندانی در برش پایه سازه‌های جداسازی بر روی خاک‌های مختلف و پی صلب مشاهده نگردید.

در سازه‌ی ۱۲ طبقه جداسازی شده در خاک نرم و متوسط نسبت به حالت پی صلب مشابه کاهش ۶/۷ و ۱/۲ درصدی بیشینه برش پایه تحت اثر رکوردهای حوزه نزدیک و کاهش ۴/۵ و ۲ درصد تحت اثر رکوردهای حوزه دور اتفاق افتاده است.

بیشینه برش پایه در سازه‌های جداسازی شده نسبت به پایه ثابت

در شکل ۱۶ منحنی‌های IDA چندگانه برای میانگین بیشینه‌ی برش پایه ترسیم گردیده است.

به طور میانگین، بیشینه برش پایه برای سازه‌های پایه ثابت چهار طبقه در خاک نرم، متوسط و سخت نسبت به حالت پی صلب به ترتیب کاهش ۲۸/۸، ۱۷/۲ و ۱۰ درصدی تحت اثر رکوردهای حوزه نزدیک و به ترتیب کاهش ۳۱/۲، ۱۹/۳ و ۱۳/۲ درصدی تحت اثر رکوردهای حوزه دور داشته است.

این کاهش برای سازه‌های جداسازی شده چهار طبقه در خاک نرم و متوسط نسبت به حالت پی صلب مشابه به ترتیب ۳/۲ و ۳ درصد تحت اثر رکوردهای حوزه نزدیک و به ترتیب ۵ و ۱/۴ درصدی

جدول ۷. مقادیر دررفت متناظر با میانه شکنندگی در سطح خرابی متوسط برای سازه ۴ طبقه تحت زلزله‌های حوزه نزدیک و دور

Table 7. Drift values corresponding to the intermediate fragility at the medium failure level for a 4-story structure under near and far field earthquakes

دررفت (میدان دور)	دررفت (میدان نزدیک)	شتاب (g)		
0.009383	0.0107	0.38	FB-Rigid	4 Story
0.007683	0.007717	0.81	BI-Rigid	
0.0103	0.010667	1.04	BI-Hard Soil	
0.0103	0.010667	1.04	BI-Medium Soil	
0.010883	0.011017	1.12	BI-Soft Soil	

جدول ۸. مقادیر دررفت متناظر با میانه شکنندگی در سطح خرابی متوسط برای سازه ۸ طبقه تحت زلزله‌های حوزه نزدیک و دور

Table 8. Drift values corresponding to the intermediate fragility at the medium failure level for an 8-story structure under near and far field earthquakes

دررفت (میدان دور)	دررفت (میدان نزدیک)	شتاب (g)		
0.006233	0.007383	0.35	FB-Rigid	8 Story
0.00435	0.00565	0.66	BI-Rigid	
0.00435	0.00565	0.66	BI-Hard Soil	
0.00485	0.006567	0.75	BI-Medium Soil	
0.005383	0.008217	0.95	BI-Soft Soil	

جدول ۹. مقادیر دریفت متناظر با میانه شکنندگی در سطح خرابی متوسط برای سازه ۱۲ طبقه تحت زلزله های حوزه نزدیک

Table 9. Drift values corresponding to the intermediate fragility at the medium failure level for a 12-story structure under near and far field earthquakes

دریفت	دریفت	شتاب		
(میدان دور)	(میدان نزدیک)	(g)		
0.004183	0.0053	0.22	FB-Rigid	12 Story
0.003533	0.004167	0.3	BI-Rigid	
0.0036	0.004217	0.3	BI-Hard Soil	
0.00425	0.00365	0.31	BI-Medium Soil	
0.003017	0.004417	0.31	BI-Soft Soil	

شکنندگی محاسبه گردیده و سپس با استفاده از نمودارهای IDA دریافت متناظر طبقه بام برای زلزله های حوزه دور و نزدیک استخراج شده است. نتایج حاصل شده از جداول ۷ تا ۹ بدین شرح می باشد:

۱- شتاب متناظر با میانه شکنندگی و دریفت ناشی از آن با افزایش تعداد طبقات کمتر می شود. این امر نشان می دهد که در تمامی سازه های جداسازی شده و پایه ثابت، افزایش ارتفاع سبب افزایش خطرپذیری لرزه ای می گردد.

۲- شتاب متناظر با میانه شکنندگی در سازه های جداسازی شده بسیار بیشتر از سازه های با پایه ثابت می باشد که این امر بیانگر کاهش خطر پذیری لرزه ای سازه های جداسازی شده می باشد. این در حالی است که دریفت متناظر با میانه شکنندگی تفاوت چندانی در دو حالت جداسازی شده و پایه ثابت نداشته است.

۳- دریفت متناظر با میانه شکنندگی در تمام حالات برای زلزله های میدان نزدیک مقادیر بیشتری نسبت به زلزله های میدان دور داشته است. این امر می تواند به ایجاد شوک در سازه تحت اثر زلزله های میدان نزدیک مربوط باشد.

۸- نتیجه گیری

در این مطالعه ۱۵ نمونه سازه بتنی ۴، ۸ و ۱۲ طبقه جداسازی شده و پایه ثابت در نرم افزار OpenSees مدل سازی شد و تحت اثر رکوردهای مختلف زمین لرزه با ماهیت نزدیک به گسل و دور از گسل قرار گرفت. سپس با استفاده از تحلیل دینامیکی افزایشی و رسم نمودارهای شکنندگی برای حالات مختلف، بطور خلاصه نتایج زیر حاصل شد:

در سازه های ۴ طبقه به طور میانگین به نصف کاهش یافته و در خاک نرم پاسخ های سازه جداسازی شده نسبت به پایه ثابت مشابه ۳۵ درصد کاهش یافته است. در سازه های ۸ طبقه کاهش پاسخ در سازه های جداسازی شده نسبت به پایه ثابت در حالت صلب ۵۴/۸ درصد و نسبت به پایه ثابت در خاک های نرم، متوسط و سخت به ترتیب ۴۷/۲، ۵۳/۲ و ۵۷/۸ درصد می باشد.

در سازه های ۱۲ طبقه به طور میانگین پاسخ های سازه جداسازی شده نسبت به پایه ثابت در حالت پی صلب، خاک نرم، متوسط و سخت کاهش ۶۶/۵، ۶۱/۵، ۶۲/۸ و ۶۷/۵ درصدی تحت اثر رکوردهای حوزه نزدیک و کاهش ۵۴/۸، ۵۱/۹، ۵۷/۷ و ۶۱/۳ تحت اثر رکوردهای حوزه دور تجربه کرده است. یعنی در سازه های جداسازی شده در خاک نرم، متوسط و سخت تغییرات بیشینه برش پایه نسبت به حالت پی صلب کمتر از ۵ درصد بوده است.

بطور کلی، با بررسی نتایج فوق می توان نتیجه گرفت که تغییرات بیشینه برش پایه به گونه ای است که با افزایش سختی خاک، تفاوت بیشتری بین سازه جداسازی شده و حالت پایه ثابت مشاهده می شود. همچنین بطور کلی، زلزله های حوزه نزدیک و حوزه دور تفاوت معناداری در کاهش برش پایه در هیچ کدام از حالات نداشته اند.

۵-۷- دریفت متناظر شتاب در میانه شکنندگی

مقادیر میانگین دریفت برای زلزله های مختلف، متناظر با شتاب میانه شکنندگی برای سازه های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه تحت اثر زلزله های حوزه دور و نزدیک مطابق با جدول ۷ تا ۹ می باشد.

در جداول ۷ تا ۹ ابتدا شتاب زلزله مطابق با میانه شکنندگی سطح خرابی متوسط برای سازه های مورد تحقیق به کمک نمودارهای

جدول ۱. ضرایب رگرسیونی و ضرایب مورد استفاده در تابع توزیع لوگ نرمال

Table 1-Appendix. Regression coefficients and coefficients used in the log-normal distribution function

ردیف	مدل	a	b	خفیف		متوسط		شدید	
				β_{sd}	S_C	β_{sd}	S_C	β_{sd}	S_C
1	4St - F.B. Rigid	1.0455	-3.7193	0.51812	0.22	0.51812	0.38	0.51812	0.96
2	4St - B.I. Rigid	0.7766	-4.5858	0.54780	0.40	0.54780	0.81	0.54780	>1.5
3	4St - B.I. Firm Soil	0.6372	-4.7655	0.57790	0.43	0.57790	1.00	0.57790	>1.5
4	4St - B.I. Medium Soil	0.6362	-4.7647	0.50535	0.44	0.50535	1.05	0.50535	>1.5
5	4St - B.I. Soft Soil	0.6156	-4.8123	0.44044	0.45	0.44044	1.12	0.44044	>1.5
6	8St - F.B. Rigid	0.9840	-4.1224	0.47046	0.20	0.47046	0.35	0.47046	0.95
7	8St - B.I. Rigid	0.9292	-4.7606	0.68974	0.35	0.68974	0.64	0.68974	>1.5
8	8St - B.I. Firm Soil	0.9265	-4.7481	0.67297	0.35	0.67297	0.66	0.67297	>1.5
9	8St - B.I. Medium Soil	0.7858	-4.9119	0.62057	0.36	0.62057	0.74	0.62057	>1.5
10	8St - B.I. Soft Soil	0.6656	-5.1157	0.61613	0.40	0.61611	0.95	0.61611	>1.5
11	12St - F.B. Rigid	1.2030	-3.6020	0.62462	0.10	0.62462	0.21	0.62462	0.49
12	12St - B.I. Rigid	1.2767	-3.9689	1.13018	0.20	1.13018	0.3	1.13018	0.67
13	12St - B.I. Firm Soil	1.2870	-3.9315	1.16286	0.20	1.16286	0.3	1.16286	0.67
14	12St - B.I. Medium Soil	1.2462	-3.9880	1.03915	0.19	1.03915	0.31	1.03915	0.68
15	12St - B.I. Soft Soil	1.0134	-4.2776	0.80269	0.18	0.80269	0.31	0.80269	0.84

به حوزه دور داشتند. همچنین، دریافت متناظر با میانه شکنندگی در تمام حالات برای زلزله‌های میدان نزدیک مقادیر بیشتری نسبت به زلزله‌های میدان دور داشت. این امر می‌تواند به ایجاد شوک در سازه تحت اثر زلزله‌های میدان نزدیک مربوط باشد.

- با افزایش تعداد طبقات اگرچه برش پایه سازه‌های جداسازی شده در خاک‌های مختلف نسبت به حالت پی صلب کاهش بیشتری داشته است؛ با این حال، تغییرات بیشینه برش پایه به گونه‌ای بود که با افزایش سختی خاک، تفاوت بیشتری بین سازه جداسازی شده و حالت پایه ثابت مشاهده شد.

- شتاب متناظر با میانه شکنندگی و دریافت ناشی از آن با افزایش تعداد طبقات کمتر می‌شود. این در حالی است که سازه‌های جداسازی شده نسبت به سازه‌های با پایه ثابت، شتاب بسیار بیشتری در میانه شکنندگی دارند که این امر بیانگر کاهش خطرپذیری سازه‌های جداسازی شده می‌باشد. نکته قابل توجه آنکه دریافت متناظر با میانه شکنندگی تفاوت چندانی در دو حالت جداسازی شده و پایه ثابت نداشته است.

در نهایت به عنوان یک جمع‌بندی کلی با توجه به نتایج بدست آمده و مقایسه‌های انجام شده می‌توان گفت در نظر گرفتن اثر

- خرابی در سازه‌های جداسازی شده نسبت به پایه ثابت در بیشینه شتاب‌های زمین بیشتری رخ داده است. با این وجود، با افزایش میزان خسارت و تغییر خاک از حالت سخت به حالت نرم این افزایش بیشینه شتاب همچنان ادامه می‌یابد. به بیان دیگر، در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه سبب کاهش خسارت وارد بر سازه‌ها در یک شتاب یکسان گردیده است.

- با نرم‌تر شدن خاک زیر سازه‌های جداسازی شده در تمامی سطوح خسارت، شتاب مربوط به میانه شکنندگی افزایش یافته است (به جز حالت خفیف در سازه ۱۲ طبقه که دارای اهمیت کمی می‌باشد).

- با توجه به نتایج میانه شکنندگی به نظر می‌رسد، در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه در سازه‌های جداسازی شده ۴ و ۸ طبقه اثر بیشتری بر روی پاسخ‌های سازه‌ای نسبت به سازه‌های جداسازی شده ۱۲ طبقه داشته است.

- تاثیر در نظر گیری اثر اندرکنش خاک-سازه در سازه‌های جداسازی شده بسیار کمتر از سازه‌های پایه ثابت بوده و در همه موارد، با افزایش سختی خاک این اثر کاهش می‌یابد.

- بطور کلی، زلزله‌های حوزه نزدیک کاهش برش پایه کمتری نسبت

bearings, Tokyo, Japan.

- [6] Guide to the design and implementation of seismic isolation systems in buildings publication 523 (in Persian), Vice President for Planning and Supervision, Tehran, 2011.
- [7] Guide to methods and methods of seismic improvement of existing buildings and executive details, publication 524 (in Persian), Vice President for Strategic Planning and Oversight, Tehran, 2010.
- [8] H.P. Mohammadd, M.G. Ashtiani, Theoretical, numerical and laboratory study of elastomer separators armed with metal rings (in Persian), Journal of Seismology and Earthquake Engineering, 8 (2006) 135-144.
- [9] J.v. Amiri, S. Esmaeelzadeh, Evaluation of performance of steel structures isolated with frictional pendulum base separators under nonlinear static analysis (in Persian), Sixth National Congress of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, 2011.
- [10] M.C. Constantinou, M.C. Kneifati, Dynamics of soil-base-isolated-structure systems, Journal of Structural Engineering, 114(1) (1988) 211-221.
- [11] L. Zou, R. Zhao, J. Zhao, Analysis of the response to earthquake of the pile-soil-isolated structure interaction, Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 26(6) (2004) 782.
- [12] Spyrakos, C.C., Koutromanos, I.A. and Maniatakis, C.A., (2009). Seismic response of base-isolated buildings including soil-structure interaction. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 29(4), pp.658-668.
- [13] A. Islam, M. Jameel, M.Z. Jumaat, Seismic isolation in buildings to be a practical reality: behavior of structure and installation technique, Journal of Engineering and Technology Research, 3(4) (2011) 99-117.
- [14] Venanzi, I., Salciarini, D. and Tamagnini, C., (2014). "The effect of soil-foundation-structure interaction on the wind-induced response of tall buildings". Engineering structures, 79, pp.117-130.
- [15] Li, M., Lu, X., Lu, X. and Ye, L., (2014). "Influence of soil-structure interaction on seismic collapse resistance of super-tall buildings". Journal of Rock Mechanics and

اندرکنش خاک و سازه بر روی سازه‌های جداسازی شده ضروری است و خاک‌های سخت و متوسط به عنوان بهترین نوع خاک برای جداسازها معرفی می‌گردد.

فهرست علائم

W	جمع بار مرده به‌اضافه ۲۰ درصد باره زنده	T_D	دوره تناوب
S_{1D}	ضریب طیفی	B_{1D}	ضریب میرایی
W_D	انرژی مستهلک شده در هر سیکل	Q_D	سختی پس کماتشی جداساز
K_1	معرفی سختی الاستیک ابتدایی	F_y	تنش تسلیم هسته سربی
K_{eff}	سختی موثر جداساز	a	ضرایب رگرسیونی
V_g	سرعت موج‌برشی	b	ضرایب رگرسیونی
E_g	مدول الاستیسیته	c	چسبندگی
p	احتمال فرا گذشت مقدار متوسط حالت حدی مجاز	D	حالت خرابی متوسط مقدار نیاز لرزه‌ای
S_c	مجاز	S_d	مقدار بیشینه دریفت در هر بار تحلیل
N	تعداد کل تحلیل‌ها	x	ضریب پواسون
μ	متوسط مقدار نیاز لرزه‌ای	v	چگالی
β_{sd}	انحراف معیار لگاریتم نرمال	ρ	

مراجع

- [1] M.G. Ashtiani, F.H. Shad, Design of buildings with seismic isolators from theory to practice (in Persian), International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Tehran, 2002.
- [2] G. Dehghani, A.K.A. Koochak, M. Kokabi, Laboratory evaluation of the performance of fiber reinforced elastomeric isolators, Journal of the Faculty of Engineering, University of Tehran, 6 (2007) 739-752.
- [3] MCEER, (2014), "Advanced Earthquake Resistant Design Techniques [Online]," Available: http://mceer.buffalo.edu/info-service/reference_services/adveqdesign.asp
- [4] A.M. Taghavi, E.Z. Beydokhti, H. kohestanian, Analytical study of the effect of LRB isolators positioning at the base and inter-story levels on seismic response of RC buildings, Journal of Structural and Construction Engineer (JSCE), 3 (2018) 1-19.
- [5] Catalogues of Bridgestone Corporation, (2013), Characteristics data of Bridgestone's seismic isolation

- Findings in Civil Engineering, Architecture and Urban Management, Tehran, International Confederation of World Inventors (IFIA), University of Applied Sciences, Tehran, 2016.
- [26] A. Masoomi, H.R.T. Far, Investigation of the effect of soil-structure interaction on the seismic behavior of reinforced concrete buildings with flexural frame system (using direct method) (in Persian), fifth International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Tehran, 2016.
- [27] F.J. Vecchio, M.B. Emar, Shear Deformation in Reinforced Concrete Frames, *ACI Structural*, 89 (1992) 1.
- [28] A. Hassan, S. Pal, Effect of soil condition on seismic response of isolated base buildings, *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 10 (2020) 249–261.
- [29] Sayed, M., Kim, D. and Cho, S., (2013), August. “Seismic analysis of base isolated nuclear power plant considering nonlinear pile-soil interaction”. In Proceedings of the 22th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology.
- [30] S. Radkia, R. Rahnavard, H. Tuwair, F. Abbas, G. kardRebecca, Investigating the effects of seismic isolators on steel asymmetric structures considering soil-structure interaction, *Structures*, 27 (2020) 1029-1040.
- [31] S. Mazzoni, F. McKenna, M.H. Scott, G.L. Fenves, *OpenSees command language manual*, Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center, 264. (2006)
- [32] H. Tavakoli, F. Naghavi, A. Goltabar, Dynamic responses of the base-fixed and isolated building frames under far- and near-fault earthquakes, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(4) (2014) 2573-2585.
- [33] L. Bowles, *Foundation analysis and design*, McGraw-Hill, 1996.
- [34] F.J. Vecchio, M.B. Emar, Shear deformations in reinforced concrete frames, *ACI Structural journal*, 89(1) (1992) 46-56.
- [35] H. FEMA, *Multi-hazard loss estimation methodology, earthquake model*, Washington, DC, USA: Federal Emergency Management Agency. (2003)
- Geotechnical Engineering*, 6(5), pp.477-485.
- [16] Harte, M., Basu, B. and Nielsen, S.R., (2012). “Dynamic analysis of wind turbines including soil-structure interaction”. *Engineering Structures*, 45, pp.509-518.
- [17] Suyehiro, K., (1932). *Engineering seismology: “Notes on American lectures”*. Proc. Amer. Soc. Civil Engin. 58(4), pp.1-110.
- [18] Sezawa, K. and Kanai, K., (1936). “Improved theory of energy dissipation in seismic vibrations on a structure”. *Bull. Earth. Res. Inst*, 14(Part 2), pp.164-168.
- [19] S.A. Kazeroonian, Investigating the effect of isolation system characteristics on the seismic response of structures isolated from the foundation (in persian), Fifth National Congress of Civil Engineering, Ferdowsi University, 2010.
- [20] M.T. zadeh, F.H. far, *Seismic isolation against earthquakes (in Persian)*, International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Tehran, 2000.
- [21] M.T. zadeh, T.T. Khani, A.A. poor, Performance of Semi-Active Control Systems in Seismic Protection of Sensitive Equipment Using Negative Hardness Algorithm (in Persian), Fourth Conference of the National Congress of Civil Engineering, Tehran university, Tehran, 2008.
- [22] J. M. Kelly, “Analysis of Fiber -Reinforced Eastomeric Isolators,” (1999), *J. Seismol. Earthq. Eng.*, vol. Vol. 2(1), pp. 19–34.
- [23] Z. Song, H. Ding, The analysis of seismic response for base isolated structure by LS-DYNA, 14th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE’08). In of the 14th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE’08). 2008.
- [24] A. Rezaeefar, M. mehrpoya, Identification of dynamic behavior of isolated bridges under near-field earthquakes by considering the effects of soil-structure interaction, Fifth International Conference on Seismology and Earthquake Engineering Tehran, 2016.
- [25] S. Shorestani, S. Soltani, M. ghasemi, S. Edalati, Parametric studies of isolated structures at the base considering the interactions of soil and structure (in Persian), 2nd International Conference on New Research

Probabilistic basis for 2000 SAC federal emergency management agency steel moment frame guidelines, Journal of structural engineering, 128(4) (2002) 526-533.

[36] B.G. Nielson, Analytical fragility curves for highway bridges in moderate seismic zones, Georgia Institute of Technology, 2005

[37] C.A. Cornell, F. Jalayer, R.O. Hamburger, D.A. Foutch,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

E. Zamani Beydokhti, A. M. Taghavi, H. Kouhestanian, (2021). Probabilistic Seismic Assessment of RC Buildings with Considering the Effect of Soil-Structure Interaction. Amirkabir J. Civil Eng., 53(5): 2091-2116.

DOI: [10.22060/ceej.2020.17302.6520](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17302.6520)

