

Effect of soil on the seismic response of concrete structures with steel X-bracing

Sara Alizadeh¹, Hadi Dashti^{2*}

1- M.Sc. of Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Bushehr branch, Islamic Azad University, Bushehr, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Bushehr branch, Islamic Azad University, Bushehr, Iran

ABSTRACT

In recent years, the use of steel bracing system in reinforced concrete structures has expanded. The bracing system can also be used effectively to improve existing concrete structures. Considering the soil -structure interaction in the analysis of the structure compared to the case where the soil of the substructure is considered rigid causes a change in the behavior of the structure during seismic excitation. The present study is the result of a realistic approach to the problem of soil effects on the seismic behavior of concrete structures with steel bracing. In this research, considering the 6-story concrete structure, improved with X-bracing on three types of soil C, D and E according to ASCE7-16 standard, under appropriate earthquake records, the effect of soil-structure interaction has been investigated. In modeling, nonlinear behavior is assumed for structure and linear and nonlinear behavior is assumed for soil and nonlinear dynamic analysis of soil -structure interaction is performed using direct method and two-dimensional geometric modeling in Opensees software and the response of structure by considering two The rigid base and the flexible base are compared. The results show that considering the soil -structure interaction in models improved by steel bracing according to the type of soil, increases the period in some cases up to about 72% and reduces the base shear to about 49% compared to the rigid bed in the structure.

ARTICLE INFO

Receive Date:

Revise Date:

Accept Date:

Keywords:

Concrete structure

Steel bracing

Soil-structure interaction

Seismic

Opensees

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.332533.2748>

*Corresponding author: Hadi Dashti

Email address: h.dashti@iaubushehr.ac.ir

اثر خاک بر پاسخ لرزه ای سازه های بتنی با مهاربند ضربدری فلزی

سارا علی زاده^۱، هادی دشتی^{۲*}

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران، گروه مهندسی عمران، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران

چکیده

در سال های اخیر، استفاده از سیستم مهاربند فولادی در سازه های بتن مسلح گسترش یافته است. سیستم مهاربندی می تواند به طور مؤثر جهت بهسازی سازه های بتنی موجود نیز استفاده شود. لحاظ نمودن اندرکنش خاک - سازه در آنالیز سازه نسبت به حالتی که خاک زیر سازه صلب در نظر گرفته شود موجب تغییر در رفتار سازه هنگام تحریک لرزه ای می شود. مطالعه حاضر حاصل نگرش واقع بینانه به مسأله اثرات خاک بر رفتار لرزه ای سازه های بتنی با مهاربند فولادی می باشد. در این تحقیق با در نظر گرفتن سازه بتنی ۶ طبقه، بهسازی شده با مهاربند ضربدری بر روی سه نوع خاک *C*، *D* و *E* مطابق آیین نامه *ASCE7-16*، تحت رکوردهای زلزله مناسب به بررسی اثر اندرکنش خاک - سازه پرداخته شده است. در مدل سازی، برای سازه رفتار غیرخطی و برای خاک رفتار خطی و غیرخطی فرض شده و تحلیل دینامیکی غیرخطی اندرکنش خاک - سازه با استفاده از روش مستقیم و مدلسازی هندسی دوبعدی در نرم افزار اپنسیس انجام شده و پاسخ سازه با در نظر گرفتن دو حالت پایه صلب و پایه انعطاف پذیر مقایسه گردیده است. نتایج نشان می دهد در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه در مدل های بهسازی شده به وسیله مهاربند فولادی بسته به نوع خاک باعث افزایش زمان تناوب در برخی موارد تا حدود ۷۲٪ و کاهش برش پایه تا حدود ۴۹٪ نسبت به حالت بستر صلب در سازه می گردد.

کلمات کلیدی: سازه بتنی، مهاربند فولادی، اندرکنش خاک - سازه، لرزه ای، اپنسیس.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.332533.2748	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.332533.2748	۱۴۰۲/۰۱/۳۱	۱۴۰۱/۰۴/۰۹	۱۴۰۱/۰۴/۰۹	۱۴۰۱/۰۲/۲۵	۱۴۰۰/۱۲/۲۱
			هادی دشتی		*نویسنده مسئول:	
			h.dashti@iaubushehr.ac.ir		پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

هنگامی که سازه‌ای دچار ضعف‌های کلی در تحمل بارهای وارده باشد، بطوری که در اغلب اعضای آن نسبت نیاز سازه‌ای به ظرفیت موجود و یا تغییر شکل‌های غیرخطی بزرگ باشد، لازم است به منظور تأمین ظرفیت و مقاومت کلی سازه، سیستم باربر جانبی اصلاح و یا ایجاد گردد. نگاهی به خسارت‌های ناشی از زلزله‌های گذشته نشان می‌دهد که درصد بالایی از ساختمانهای بتن مسلح که تاکنون در کشور ساخته شده‌اند، در برابر زلزله مقاوم نیستند و یا مقاومت کافی و قابل قبولی ندارند. زیرا سازه‌های بتن مسلح موجود غالباً بر اساس آیین-نامه‌های قدیمی طراحی شده و الزامات آیین‌نامه‌های جدید زلزله را ارضا نمی‌کنند. همچنین ضعف‌های اجرایی عمده مزید بر علت شده و ساختمان‌های بتنی را آسیب‌پذیرتر ساخته است. از این رو ضرورت تقویت این ساختمان‌ها به خصوص برای مقابله با نیروهای جانبی و با روش‌های مقاوم سازی قابل اعتماد، آسان و سریع، احساس می‌شود [۱].

یکی از راه‌های بهسازی سازه‌ها استفاده از مهاربند در سازه‌ها است. مهاربندهای فولادی، در شکل‌های هندسی مختلف به صورت وسیعی در سازه‌های فولادی و بتنی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در دهه‌های گذشته استفاده از مهاربندهای فولادی در سازه‌های بتنی نیز مورد توجه قرار گرفته است.

در این میان تلاش‌هایی جهت ساخت مدل‌های آزمایشگاهی این گونه سازه‌ها مورد توجه قرار گرفته است. حداد و همکاران [۲] در پژوهشی به مقایسه عملکرد سازه‌های بتن‌آرمه مهاربندی شده با سه حالت مهاربندی، پرداختند. بدین منظور آنها به مدلسازی ۴ مدل شامل سازه مقاوم سازی نشده، مقاوم سازی شده با مهاربند بتنی، مقاوم سازی شده با مهاربند فولادی و مقاوم سازی شده با میانقاب‌های بنایی تحت بارگذاری تناوبی در آزمایشگاه پرداختند. در قاب مهاربندی شده توسط مهاربند بتنی، ابتدا ترکها در امتداد مهاربند کششی و سپس در امتداد مهاربند فشاری شکل گرفتند. در قاب مهاربندی شده با مهاربند فولادی، رخداد ترک‌های طولی در پای ستون و خرابی موضعی در اتصال مهاربند کششی به قاب بتنی مود غالب گسیختگی تشخیص داده شد. نهایتاً در سازه مقاوم سازی با میانقاب بنایی، در ابتدا ترک‌های افقی و عمودی در قاب و میانقاب و پس از آن ترک‌های کششی در نزدیکی پای ستون و محل اتصال تیر به ستون شکل گرفت. ماهری و همکاران [۳]، پس از مرور و جمع‌بندی کارهای انجام شده در زمینه مقاوم سازی ساختمان‌های بتنی با استفاده از مهاربندهای فولادی، چندین نمونه مدل ساخته شده با مقیاس ۱:۳ را که به صورت قاب ساده، قاب مهاربندی شده با مهاربند ضربدری و قاب مهاربندی شده با مهاربند زانویی بودند، تحت بار جانبی تا مرحله شکست قرار دادند. نتایج حاکی از افزایش سختی قاب در دو حالت استفاده از مهاربند ضربدری و زانویی نسبت به حالت قاب ساده بود آنها نتیجه گرفتند که شکل‌پذیری قاب بتنی در صورت استفاده از مهاربند زانویی به مقدار قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند. تحملی رودسری و همکاران [۴]، به بررسی آزمایشگاهی تأثیر استفاده از مهاربندهای مختلف فولادی بر مقاوم سازی سازه‌های بتنی پرداختند. در این آزمایش ۸ قاب بتنی که شامل یک قاب بدون مهاربند و ۷ قاب با مهاربند فولادی از نوع ضربدری، شورون، زانویی و شورون با لینک قائم متفاوت مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که وجود مهاربند باعث افزایش سختی و مقاومت سازه می‌گردد ولی ممکن است باعث کاهش یا افزایش شکل‌پذیری، اتلاف انرژی در سازه شود. در مطالعه معصومی و تسنیمی [۵]، نتایج استفاده از مهاربند فولادی در قاب بتن‌آرمه به صورت آزمایشگاهی ارائه شده است. مجموعه‌ای از آزمایشات روی قاب بتن‌آرمه ۸ طبقه یک دهانه با مقیاس ۱:۲/۵ صورت گرفته است. هدف آزمایشات تعیین میزان تأثیر مهاربندهای ضربدری با جزئیات مختلف اتصال مهاربند به قاب جهت افزایش مقاومت برشی درون صفحه قاب بتن‌آرمه می‌باشد. مدل قاب‌ها تحت بار ثابت قائم و بار جانبی چرخه‌ای قرار گرفته است. نتایج آزمایشات نشان دهنده افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقاومت جانبی و شکل‌پذیری جانبی قاب بتن‌آرمه مهاربندی شده بسته به جزئیات استفاده شده می‌باشد. ماهری و صاحبی [۶]، در مطالعه‌ای استفاده از مهاربندهای فولادی در سازه‌های قابی بتن‌آرمه را مورد تحقیق قرار دادند. این تحقیقات حاصل نتایج آزمایشاتی است که روی چند قاب صورت گرفته است. هدف آزمایشات تعیین میزان تأثیر چیدمان‌های متفاوت استفاده از مهاربندهای قطری برای افزایش مقاومت برشی درون صفحه‌ای قاب بتن‌آرمه و مشاهده رفتار نسبی کششی و فشاری مهاربندها است. مسأله اساسی این است که اتصال مناسب بین مهاربند فولادی و قاب بتن‌آرمه نیز در نظر گرفته

می شود. نتایج، افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقاومت درون صفحه ای سیستم دوگانه را نشان می دهد. به عنوان نتیجه کلی خاطر نشان می‌گردد با اتصال مناسب مهاربند به قاب، مهاربندی فولادی می‌تواند جایگزین مناسب یا مکمل دیوار برشی در قاب بتن‌آرمه در مناطق لرزه‌خیز باشد. ضریب رفتار قاب‌های دوگانه در سازه‌های با ارتفاع متفاوت، و بادبندهای هم‌محور بزرگ مقیاس توسط عبدالله زاده و محمدی [۷] مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. آنها در تحقیق خود نتیجه گرفتند که با افزایش تعداد طبقات، ضریب رفتار کاهش می‌یابد و با برخی روش‌های طراحی مقدار آن را ۵ برآورد نمودند. جاوید و همکاران [۸] نیز مدل جدیدی را برای نحوه اتصال مهاربند فلزی به سازه بتنی با انجام تست های آزمایشگاهی ارائه دادند. مدل پیشنهادی با توجه به ویژگی های ارائه شده سبب افزایش مقاومت برش مستقیم در بالای قاب مهاربندی شده فلزی گردیده است.

پژوهشگران دیگری نیز تلاش نمودند مدلسازی عددی سازه‌های بتنی با مهاربند فلزی را ارزیابی نمایند. رحیمی و ماهری [۹]، به اثر مهاربند همگرای فولادی در سازه‌های بتنی بر روی سطوح عملکرد تیر و ستون پرداخته‌اند. برای این منظور تعداد زیادی تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی بر روی قاب های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه بتن مسلح دو بعدی بهسازی شده با مهاربندهای ضربداری انجام شده است که نتایج آن نشان می‌دهد بهسازی قاب های بتن مسلح با مهاربند فولادی عملکرد لرزه‌ای عمومی سازه را با کاهش جابجایی بام، جابجایی نسبی طبقات و افزایش ظرفیت باربری جانبی بهبود می‌بخشد، اگرچه میزان مؤثر بودن مهاربندهای فولادی در بهبود عملکرد سازه با افزایش ارتفاع سازه کاهش می‌یابد. بودیواتی و همکاران [۱۰]، رفتار سازه بتن مسلح به علت بار لرزه ای به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند که در آن ساختمان‌های بتن مسلح ۲، ۳ و ۴ طبقه برای نشان دادن رفتار لرزه‌ای مدل سازی شدند. برای تعیین عملکرد آن، تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش آور) نیز انجام شد. سازه با استفاده از قاب‌های فولادی، بادبندهای فولادی یا دیواره‌های پر با بازشو در مرکز تقویت می‌شدند. سازه با قاب باز بتن مسلح ابتدا طراحی شد. سپس مدل قاب خمشی در دهانه وسط با قاب فولادی روی تیر و ستون های اطراف با مهاربند فولادی هشتی و ضربداری مقاوم شد. قاب فولادی به مدل مهاربند اضافه شد. آنها با توجه به نتایج تحلیلی به این نتیجه رسیدند که افزودن مهاربند با و بدون قاب فولادی و دیوار توپر با بازشو متمرکز، سازه را سخت می‌کند که مدل مهاربند با قاب فولادی سخت تر است. چوهان و پاتل [۱۱]، تحلیل سازه‌ای و اقتصادی بر روی چهار قاب ۱۱ طبقه که دو قاب با مهاربند قطری و دو قاب بدون مهاربند است، مورد مطالعه قرار گرفت. مشاهده شد که زمان تناوب قاب با مهاربند و بدون مهاربند به ترتیب $1/2512$ و $1/8529$ می‌باشد. با توجه به خروجی های بدست آمده نتیجه می‌شود که ساختمان های با مهاربند سخت تر هستند و در طول زلزله بهتر عمل می‌کنند. ایزدی و همکاران [۱۲]، استفاده از بادبند کمانش‌ناپذیر و دیوار برشی را جهت مقاوم‌سازی سازه بتنی، مورد بررسی و ارزیابی قرار دادند. نتیجه حاصل از این پژوهش کاهش دریافت طبقات به میزان قابل قبول و قرارگیری سازه در سطح عملکرد جانی می‌باشد. هادیان فرد و علیشیر [۱۳]، به بررسی بهسازی و مقاوم سازی کلی سازه‌های بتنی با مهاربند فولادی پرداختند. نتایج آنالیزها و بررسی‌های انجام شده نشان دهنده این است که اضافه کردن مهاربند فلزی باعث افزایش مقاومت و سختی قاب گردیده و شکل‌پذیری و تغییرمکان جانبی سازه را کاهش می‌دهد و در کل رفتار سازه در مقابل زلزله بهبود می‌یابد. شرافتی و همکاران [۱۴]، به بررسی عددی تأثیر مهاربندهای همگرا و واگرا در مقاوم‌سازی قاب‌های بتن مسلح پرداختند. در این تحقیق رفتار قاب بتنی بدون مهاربندی و قاب بتنی با مهاربندهای همگرا و واگرا مورد بررسی قرار گرفته شده است. بدین منظور یک مدل سه بعدی از قاب بتنی یک طبقه و یک دهانه با مهاربندی فولادی همگرای ضربداری و هفتی و واگرای هفتی جهت آنالیز استاتیکی غیرخطی با چهار نوع اتصال به قاب بتنی مدل‌سازی شده است. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که در تمام قاب‌هایی که مهاربندی شده‌اند، بیشتر خرابی در مهاربند رخ داده است که به راحتی می‌توان بعد از وقوع زلزله مهاربندهای آسیب دیده را تعویض کرد و این مسأله از نظر اقتصادی بسیار اهمیت دارد. بیطرفان و نجفی [۱۵]، جهت ارزیابی لرزه‌ای تأثیر تعبیه مهاربند در ساختمان بتنی به خصوص بررسی رفتار لرزه‌ای آنها به مدل‌های مختلف با استفاده از نرم‌افزار سپ پرداختند. در پایان جهت مقایسه و رسیدن به بهترین حالت برای رفتار لرزه‌ای ساختمان، مدل‌ها همراه مهاربندهای متفاوت تحلیل و ارزیابی شد که نتایج حاصل نشان می‌دهد که مهاربندهای قطری تکی و ضربداری نسبت به حالت مهاربند هشتی، رفتار سازه را بیشتر بهبود بخشیده‌اند و به هنگام زلزله، انرژی را در

سازه بیشتر مستهلک می‌کنند. حمیدی و خیرالدین [۱۶]، در مقاله‌ای با عنوان مقایسه رفتار ساختمان‌های بتن‌آرمه تقویت‌شده با مهاربندی‌های فولادی خارج از قاب و داخل قاب بتنی، رفتار غیرخطی قاب‌های خمشی بتن‌آرمه ۴، ۸، ۱۲ و ۱۵ طبقه که توسط مهاربند داخلی و خارجی تقویت شده بودند را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد، ساختمان‌های بتنی که با مهاربند خارجی مقاوم سازی می‌شوند نسبت به ساختمان‌های بتنی که با مهاربند داخلی مقاوم سازی می‌شوند، جذب برش بیشتری دارند و نیروی زلزله بیشتری را تحمل می‌کنند و تغییرمکان نسبی کمتری نیز دارند. در مطالعه‌ای دیگر جراحی و کرامتی [۱۷]، به بررسی اثر مهاربند‌های فلزی در سازه‌های بتنی و تحلیل عملکردی این سازه‌ها پرداختند. نتایج حاصل حاکی از ارتقاء قابل توجه سطح عملکرد و ظرفیت لرزه‌ای سازه می‌باشد.

در سال‌های اخیر زمین لرزه‌های مخرب بسیاری در نقاط مختلف دنیا اتفاق افتاده است که در بسیاری از موارد آیین‌نامه‌های طراحی را به سمت ویرایش ضوابط تحلیل، طراحی، ساخت و بهره‌برداری سازه‌های مقاوم در برابر زلزله کشانده است. به جهت بررسی دقیق‌تر پدیده زمین لرزه و ساخت سازه‌هایی مقاوم، از اثرات لایه‌های خاکی به عنوان تکیه‌گاه سازه نمی‌توان گذشت و به نحوی باید تأثیرات مسأله خاک و سازه در پدیده زمین لرزه بررسی شود. این نوع نگاه به مسأله مبحث گسترده‌ای به عنوان اندرکنش خاک و سازه را مطرح می‌کند. مسأله اندرکنش خاک - سازه در چند دهه اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته و تحقیقات زیادی توسط محققین در این زمینه انجام شده است. بهنام فر و بانی زاده [۱۸]، اثر اندرکنش خاک - سازه بر روی آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌های قاب خمشی و قاب خمشی با دیوار برشی بتنی ۳، ۵، ۶، ۸ و ۹ طبقه بر روی خاک نوع سه و چهار آیین‌نامه ۲۸۰۰ را بررسی کردند. با مقایسه بین دو حالت با و بدون در نظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه نشان داده شد که در نظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه در ساختمان‌های قاب خمشی موجب افزایش آسیب‌پذیری در طبقه اول ساختمان و کاهش آسیب‌پذیری در طبقات فوقانی ساختمان می‌گردد و در ساختمان‌های قاب خمشی با دیوار برشی در نظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه موجب آسیب بیشتر به تیرهای متصل به دیوار می‌شود. شریعت یزدی و همکاران [۱۹]، به بررسی تأثیر اندرکنش خاک - سازه بر روی عملکرد سیستم قاب و دیوار برشی پرداختند. در این پژوهش ۸ نوع قاب بتنی به همراه دیوار برشی بتنی بر روی سه نوع خاک مطابق آیین‌نامه ۲۸۰۰ مدل شده است و فاکتورهای مختلفی نظیر تغییر مکان نسبی طبقات و میزان دوران مفاصل تیرهای متصل به دیوار برشی با هم مقایسه شده است نتایج به دست آمده نشان می‌دهد عدم در نظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه در خلاف جهت اطمینان است. اعتدادی علی‌آبادی و معمارپور [۲۰]، اثرات خاک را بر یک سازه بلند لوله-ای ۵۰ طبقه با و بدون در نظر گرفتن اثر خاک بررسی نمودند. آنها نشان دادند که اندرکنش خاک - سازه باعث کاهش اثر تأخیر برشی و افزایش تغییر شکل‌ها می‌شود. در پژوهش حسین زاده و همکاران [۲۱]، آثار اندرکنش دینامیکی خاک - سازه در پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های سطحی و مدفون در خاک به کمک آزمایش‌های میز لرزان روی مدل‌های مقیاس شده مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور چهار مدل سازه‌ای ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه به عنوان نماینده ساختمان‌های متداول در یک محیط شهری و دو مدل خاک نرم و نسبتاً نرم به عنوان نماینده زمین‌های نوع II و III مطابق طبقه‌بندی آیین‌نامه ۲۸۰۰ زلزله ایران مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که اندرکنش خاک - سازه باعث افزایش پیروید ارتعاشی مدل‌های سازه‌ای می‌شود. آربولدا-مونسالو و همکاران [۲۲] با برآورد اندازه گیری شدت، پارامترهای تقاضای مهندسی و تلفات ناشی از زلزله با استفاده از یک چارچوب عددی اندرکنش خاک - سازه، عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های بلند فرضی را مورد بررسی قرار دادند. در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک - سازه در رویکرد مدل سازی، تقاضاهای لرزه‌ای محاسبه شده در ساختمان‌های بلند را از نظر حداکثر جابجایی بین طبقات، حداکثر شتاب‌های افقی طبقه و نشست‌های ناشی از لرزه تغییر داد.

برخی تحقیقات محدود به بررسی اثر سازه‌های بتنی با مهاربند فلزی مستقر بر خاک‌ها پرداخته‌اند. ترابی کانی باغی و کارگر [۲۳]، با مدل‌سازی سیستم قاب خمشی بتنی تقویت شده با مهاربند فلزی با در نظر گرفتن چهارتیب خاک به بررسی تأثیر نوع خاک و روشهای تقویت سیستم پرداختند، در هر مورد منحنی‌های رفتاری مربوطه ارائه گردیده است. سازه‌های ساختمانی بسته به نوع و عمق خاک زمین ساختگاه نسبت به سنگ بستر پاسخی متفاوت نسبت به وقتی که همین ساختمان‌ها روی سنگ بستر واقعند، خواهند داشت. دشتی و

همامی [۲۴]، به تعدادی قاب میان مرتبه و کوتاه مرتبه دارای انواع مختلف مهاربندی از قبیل ضربدری، شورون و زیپر پرداختند. در مرحله طراحی سازه، اثرات اندرکنش خاک - سازه بر روی خاکهای نرم و سخت با انجام تحلیل‌های غیرخطی هندسی (جهت حذف فنرهای کششی معادل خاک و همچنین در نظر گرفتن آثار پی-دلتا) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحلیل‌ها نشان داد هرچه خاک انعطاف پذیرتر و سازه نرم‌تر (با تعداد طبقات بیشتر) باشد در نظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه تأثیر محسوس‌تری بر پاسخ جابجایی بام خواهد گذاشت. برای بررسی یک سازه متکی بر شالوده انعطاف پذیر روش‌های مختلفی استفاده شده است که هر یک با محدودیتها و کاستی‌هایی همراه بوده‌اند. روش تحلیل مستقیم اندرکنش خاک و سازه به عنوان اصلی‌ترین روش تحلیل اندرکنش خاک و سازه شناخته می‌شود. در روش مستقیم کل سیستم خاک و سازه مدل می‌گردد و معادلات دینامیکی برای کل سیستم حل می‌شود. قابلیت اساسی روش تحلیل مستقیم، در نظر گرفتن انواع رفتار غیرخطی مادی و هندسی در مدل تحلیلی می‌باشد. با همه تحقیقات انجام گرفته بررسی اثر رفتار خاک در پاسخ لرزه ای سازه‌های بتنی با مهار بند فلزی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش جهت بررسی دقیق این موضوع پس از اثبات صحت عملکرد مدلسازی با استفاده از روش مستقیم، خصوصیات رفتاری خاک در شرایط با اندرکنش خاک - سازه و بدون آن بر رفتار اینگونه سازه‌ها مورد بررسی و ارزیابی قرار خواهد گرفت.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مقدمه

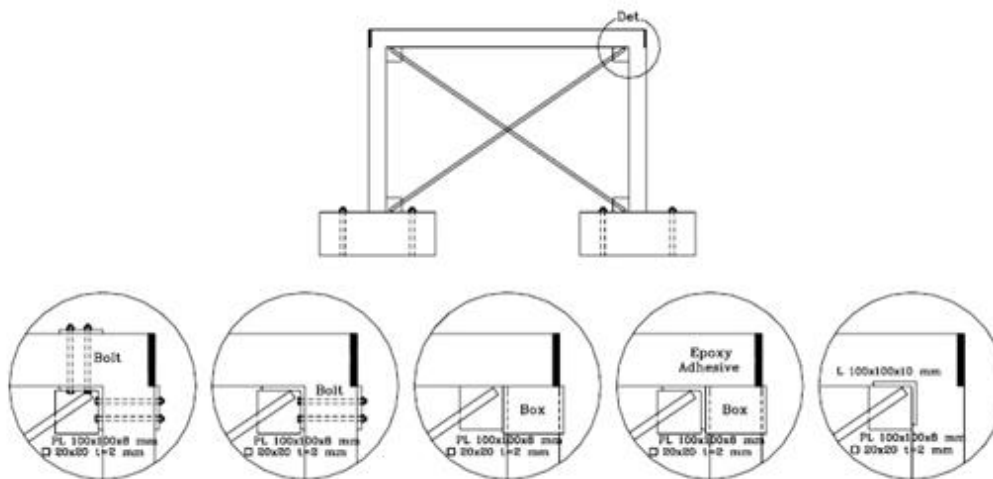
جهت مدل‌سازی سیستم اندرکنش خاک - سازه و انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی از برنامه رایانه‌ای متن باز اپنسیس^۱ استفاده شده است. اپنسیس یک چهارچوب نرم افزاری شی‌گرا برای انجام آنالیزهای المان محدود ماکرو می‌باشد. نرم افزار ذکر شده دارای یک آرشیو کامل از انواع رفتارهای خطی و غیرخطی در خصوص تعریف مصالح و تعریف المان‌های مختلف در خصوص مدل سازی می‌باشد. به جز عناصری که در آرشیو برنامه وجود دارد، کاربر می‌تواند به صورت اختیاری نیز نوعی از مواد و مصالح و المان‌ها را برای مدل سازی خود تعریف کند. این نرم افزار به کاربر اجازه ی آنالیز سیستم‌های سازه و خاک تحت اثر بارگذاری لرزه ای را می‌دهد. همچنین نرم افزار اپنسیس علاوه بر دارا بودن مدل‌های پیچیده ی سازه ای دارای توانایی مدل سازی خاک، از ساده ترین حالت تا پیچیده ترین حالت را می‌باشد. بدین منظور در این تحقیق از نرم افزار اپنسیس برای مدل سازی استفاده شده است. در این تحقیق از نسخه ۲/۵/۰ این نرم افزار استفاده شده است. در این بخش ابتدا، به نحوه ی صحت‌سنجی پرداخته شده است. در ادامه توضیحاتی در مورد نحوه مدل سازی، مشخصات خاک و رکوردهای انتخابی زلزله ارائه خواهد شد.

۲-۲- مهاربند همگرا

سیستم‌های مهاربندی همگرا از رایج‌ترین انواع سیستم‌های مهاربندی در ایران هستند که می‌توان از سیستم مهاربندی ضربدری، شورون و قطری نام برد. مهاربندهای ضربدری تغییر شکل‌های جانبی را به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهد. وجود اتصال در وسط دو مهاربند باعث کاهش طول کمانشی مهار نشده و باعث افزایش بار کمانشی این مهاربندها می‌شود. مطالعات تجربی و عددی صورت گرفته نشان می‌دهد که به دلیل کاهش مقاومت فشاری و انباشتگی تغییر مکان ماندگار در کشش، مهاربندهای همگرا رفتار هیستریزس نامتقارن و متفاوتی دارند. ظرفیت جذب انرژی توسط سازه در حقیقت به طور کامل وابسته به رفتار چرخه‌ای سازه تحت بارهای متناوب کششی و فشاری است. حلقه‌های هیستریزس سازه مهاربندی شده به وسیله مهاربندهای همگرا بسیار ناپایدار و نامنظم بوده که این موضوع باعث کاهش سطح زیر این نمودار شده و بیانگر شکل پذیری کم این سیستم‌ها می‌باشد [۲۵]. جهت اتصال مهاربندها به ستون بتنی روشهای مختلفی وجود دارد:

¹ Opensees (Open System for Earthquake Engineering Simulation)

استفاده از باکس فولادی دور ستونها در قسمتهای مورد نیاز جهت اتصال مهاربندها و محصور کردن ستون های بتن مسلح توسط پوشش- های فلزی از مؤثرترین روش های بهسازی ظرفیت مقاومت لرزه ای می باشند. در شکل ۱ نحوه اتصال مهاربند فولادی به سازه بتنی نشان داده شده است.



شکل ۱: جزئیات اتصال مهاربند فولادی به سازه بتنی [۵]

۲-۳- تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیر خطی

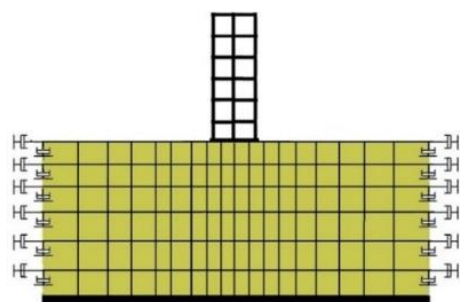
تحلیل دینامیکی خطی و غیر خطی سازه‌ها با استفاده از شتاب نگاشت‌های زلزله، روشی مرسوم در تحقیقات مهندسی زلزله و نیز در طراحی سازه‌های مهم می‌باشد. در هنگام بروز زلزله‌های بزرگ، سازه‌ها وارد ناحیه غیر خطی می‌گردند. در این شرایط، دقیق‌ترین روش تحلیلی موجود در شرایط حاضر، تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی با استفاده از شتابنگاشت‌های زلزله خواهد بود. در این روش تحلیل سازه به صورت دینامیکی و با اثر دادن شتاب زمین به صورت تابعی از زمان در تراز پایه انجام می‌شود که در آن رفتار فرا ارتجاعی اعضای سازه نیز در نظر گرفته شده است. استفاده از تحلیل‌هایی مانند استاتیکی معادل یا طیفی نمی‌تواند بیان‌کننده رفتار دقیق سازه‌ها باشد. تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی با استفاده از شتابنگاشت‌های زلزله در واقع شامل محاسبه لحظه به لحظه بازتاب‌های ساختمان تحت تأثیر شتاب نگاشت‌های واقعی یک زلزله است. شتابنگاشت‌هایی که در تعیین اثر حرکت زمین مورد استفاده قرار می‌گیرند باید تا حد امکان نمایانگر حرکت واقعی زمین در محل احداث بنا و در هنگام وقوع زلزله باشند. برای نیل به این هدف لازم است حداقل سه زوج شتابنگاشت متعلق به مولفه‌های افقی سه زلزله مختلف ثبت شده انتخاب گردند.

۲-۴- صحت‌سنجی

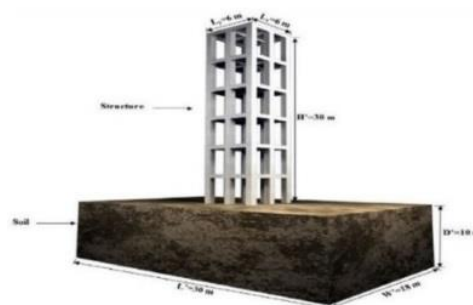
برای صحت‌سنجی از مقاله گوکتپ و همکاران [۲۶] استفاده شد. در این مقاله با استفاده از مدل‌های عددی و آزمایشگاهی، اندرکنش خاک و سازه را مورد بررسی قرار دادند. مدل عددی اندرکنش خاک - سازه با نرم افزار Plaxis 2D، و مدل آزمایشگاهی با استفاده از میز لرزه در دانشگاه ساکارا انجام شد. مشخصات هندسی مدل عددی اندرکنش خاک - سازه در شکل ۲ نشان داده شده است.

برای اطمینان از صحت تحلیل پژوهش حاضر برای سازه و خاک نتایج بدست آمده از نرم افزار اپنسیس [۲۷]، با نتایج حاصل از مدل عددی مقایسه شده است. در این صحت‌سنجی مقایسه‌ای بین نتایج آنالیز سازه تحت زلزله لوما-پریتا و نتایج حاصل از نرم افزار اپنسیس انجام شده است. به منظور به دست آوردن داده‌های اندازه‌گیری دقیق و نتایج واقعی از مطالعات تجربی با مدل‌های مقیاس کوچک، با در نظر گرفتن خصوصیات ابعادی و مشخصات ظرفیت میز لرزه، یک عامل مقیاس گذاری هندسی (λ) برای تبدیل مشخصات مدل آزمایشگاهی و عددی مقاله تعیین شده است. با توجه به امکانات موجود از جمله فضای آزمایشگاهی، ابعاد هندسی میز لرزه و حجم و جرم

مدل و غیره ضریب مقیاس های مختلف محاسبه می شود. ضریب مقیاس (λ) قابل استفاده برای این مدل و میز لرزه ۴۵ بدست آمده است. در این تحقیق جهت بررسی صحت عملکرد مدل سازی، سازه ۶ طبقه بتنی با پایه انعطاف پذیر با رفتار خطی خاک مورد بررسی قرار می گیرد. سازه ذکر شده بر روی خاک ماسه ای لای دار به ابعاد 10×30 متر با سرعت موج برشی ۵۳۶ متر بر ثانیه قرار گرفته است. نمایی از سازه ۶ طبقه بر روی خاک در نرم افزار اپنسیس در شکل ۳ نشان داده شده است. در زیر سازه از فونداسیون نواری استفاده شده است. مدل های سازه ای تیرها و ستون ها باید بتوانند رفتار آنها را در تحت بارهای عمودی و جانبی از رفتار الاستیک اولیه تا فروریزش تحت یک حرکت شدید زمین شبیه سازی کنند. برای مدل سازی تیرها و ستون ها از المان فایبر استفاده شده است. در مطالعه حاضر، برای مدل نمودن تیرها و ستون های سازه از المان disp Beam Column که یک المان غیرخطی با خاصیت غیرخطی گسترده در طول المان است استفاده شده است.

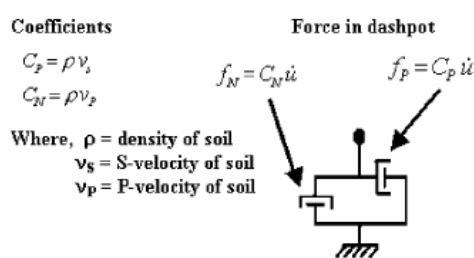


شکل ۳: نمایی از مدل پژوهش حاضر اندرکنش خاک - سازه (نرم افزار اپنسیس)



شکل ۴: مشخصات هندسی مدل عددی اندرکنش خاک - سازه [۲۶]

مرزها نقش مهمی در دقت تحلیل دینامیکی دارند. در واقع مرزها نظیر یک بارگذاری بر مدل وارد می شوند و ممکن است برخی از امواج، تنش ها و یا تغییر شکل ها را مستهلک کرده و یا تشدید نمایند. در تحلیل دینامیکی اندرکنش دینامیکی خاک - سازه در این تحقیق از مرز جاذب انرژی استفاده می گردد. در این مدل، میرایی خاک با استفاده از میرایی رایلی تعریف می گردد [۲۸]. همچنین جهت مدلسازی ناحیه دور (بینهایت) از روش مرز انتقالی لایسمر و کوهلمیر و قرار دادن میراگر در مرزها مطابق شکل ۴ استفاده گردیده است.



شکل ۴: المان جاذب انرژی در مرزها

خواص مکانیکی خاک طبق گوکنپ و همکاران [۲۶] بدست می آید. جهت مدل رفتاری خاک از یکی از مدل های معرفی شده در اپنسیس (PressureDependMultiYield) استفاده گردیده است. ابعاد المان ها باید آنگونه انتخاب شوند که امواج زلزله بتوانند از المان ها عبور کنند و در اصطلاح فیلتر نشوند. در این راستا فرکانس امواج ورودی و ویژگی های سرعت امواج در محیط نقش تعیین کننده ای خواهند داشت. به طور کلی برای انتقال مناسب امواج دینامیکی در شبکه المان های مدل، ابعاد تمامی المان ها باید حداقل بین یک هشتم تا یک دهم طول موج زلزله باشد [۲۸]:

$$\lambda_{min} = VT = \frac{V}{f_{max}}$$

$$\Delta l = \frac{\lambda_{min}}{8} \sim \frac{\lambda_{min}}{10}$$

در این پژوهش حداکثر ابعاد المان خاک ۵ متر محاسبه شده است. برای دقت بیشتر ابعاد المان خاک یک متر در نظر گرفته شده است.

مقایسه جابجایی طبقات سازه بر روی خاک خطی مدل سازی شده پژوهش حاضر با نرم افزار اپنسیس و مدل عددی مقاله [۲۶] در جدول ۱ ارائه شده است. همانگونه که ملاحظه می گردد، میزان اختلاف جابجایی مدل پژوهش حاضر با جابجایی مدل عددی [۲۶]، مقادیر قابل قبولی بدست آمده است.

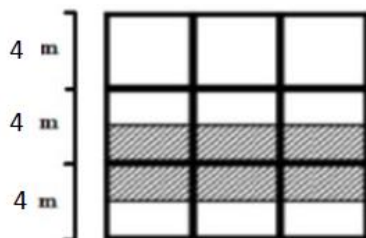
جدول ۱: مقایسه حداکثر جابجایی طبقات سازه بر روی خاک خطی

طبقات	جابجایی مدل عددی مقاله (متر) [۲۶]	جابجایی مدل پژوهش حاضر با نرم افزار اپنسیس (متر)
۶	۰/۳۴۰	۰/۳۴۲
۵	۰/۳۲۷	۰/۳۳۱
۴	۰/۳۰۰	۰/۳۱۷
۳	۰/۲۸۲	۰/۲۹۸
۲	۰/۲۵۳	۰/۲۷۶
۱	۰/۲۲۲	۰/۲۵۴
۰	۰/۱۹۷	۰/۲۴۱

۲-۵- بررسی نحوه مدل سازی تحقیق

قاسمی صوفیانسر [۲۹] به بررسی رفتار سازه بتن مسلح با مهاربند فولادی پرداخته است. ابتدا اطلاعات مدل های بدون مهاربند با استفاده از نقشه های موجود استحصال گردیده و با استفاده از آیین نامه طراحی ساختمان در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم) [۳۰] و FEMA350 [۳۱]، تحت نرم افزار SAP2000 مورد تحلیل و طراحی قرار گرفته و پس از بررسی آسیب پذیری آنها بوسیله تحلیل های استاتیکی غیرخطی و دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی، نسبت به بهسازی مدل ها با استفاده از سیستم مهاربند فولادی پرداخته شده است. با توجه به اینکه در پژوهش قاسمی صوفیانسر [۲۹]، سازه با پایه صلب فرض شده است و در تحقیق حاضر اثر خاک بر سازه های بتنی با مهاربند فولادی بررسی می شود. جهت شبیه سازی و داشتن طرح اولیه سازه برای تحلیل اندرکنش خاک - سازه، از سازه های قاسمی صوفیانسر [۲۹]، با ابعاد مشابه استفاده می گردد و نکات مدنظر در مدلسازی سازه و اتصال سازه به خاک مطابق صحت سنجی مورد استفاده قرار می گیرد. برای تأثیر خاک، جهت کاهش خطاهای مدل سازی، از ابعاد و مشخصات خاک مقاله گوکتپ و همکاران [۲۶] استفاده گردیده است.

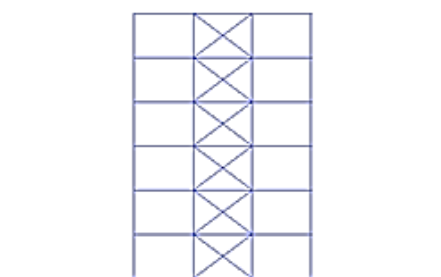
مطابق شکل ۵، سازه بتنی ۶ طبقه دارای پلان آکس بندی یکسان ۴ متری و ارتفاع طبقات ۳ متر در منطقه با خطر نسبی زیاد در نظر گرفته شده است. در مطالعه حاضر، در دهانه میانی سازه، مهاربند فولادی همگرا از نوع ضربدری قرار داده شده است. سپس سازه با مهاربند ضربدری بر روی سه نوع خاک C، D و E قرار داده شده و اثر رفتار خطی و غیرخطی خاک بر سازه ها بررسی شده است.



شکل ۵: پلان ساختمان مورد بررسی [۲۹]

در این تحقیق ابتدا تحلیل مودال جهت به دست آوردن زمان تناوب و سپس تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی برای بدست آوردن پاسخ سازه تحت ۳ رکورد زلزله (با توجه به نوع خاک) با نرم افزار اپنسیس بدست آمده است. جابجایی مام، برش پایه، جابجایی نسبی طبقات، از جمله پاسخ‌هایی است که در سازه با مهاربند پایه صلب و انعطاف پذیر بر روی سه خاک در حالت رفتار خطی و غیرخطی با هم مقایسه می‌شود.

نمایی از سازه با مهاربند ضربدری در شکل ۶ نشان داده شده است. مقطع مهاربند 2UNP12 در نظر گرفته شده است. اتصال مهاربندها به سازه به صورت مفصلی می‌باشد. پارامترها و فرضیات در نظر گرفته شده در طراحی آیین نامه‌ای سازه‌ها مطابق قاسمی صوفیانسر [۲۹] انجام گرفته است. برای شرایط با اندرکنش خاک - سازه ابعاد خاک ۱۰*۳۰ متر و عرض واحد در نظر گرفته شده است. ابعاد و مشخصات خاک C طبق مقاله گوکتپ و همکاران [۲۶] می‌باشد. برای در نظر گرفتن اثر خاکهای نرم تر از همان مشخصات خاک با سرعت موج برشی در رده خاک D و E مطابق با آیین نامه ASCE7-16 [۳۱] استفاده گردیده است.



شکل ۶: سازه بتنی ۶ طبقه با مهاربند فولادی ضربدری

۲-۶- دسته‌بندی تحلیل‌های مورد بررسی

در این بخش روش‌های انتخاب شده برای محاسبات این تحقیق معرفی شده‌اند. در این تحقیق دو نوع مدل ساخته شده است: (۱) سازه با پایه صلب (بدون در نظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه)، (۲) سازه با پایه انعطاف پذیر (با در نظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه) به روش مستقیم. روش مستقیم یکی از روش‌های پیشرفته جهت در نظر گرفتن دقیق تر اثرات رفتار خاک می‌باشد. همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود سازه با رفتار غیرخطی و خاک با رفتار خطی و غیرخطی تحلیل شده است.

جدول ۲: دسته بندی تحلیل‌های مورد بررسی

نوع سازه	رفتار	موضوع تحلیل	رفتار خاک
		پایه صلب (بدون در نظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه)	-
سازه بتنی با مهاربند ضربدری	غیرخطی	پایه انعطاف پذیر (با در نظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه)	خاک C
			خاک D
			خاک E
			رفتار خطی
			رفتار غیرخطی

با توجه به دسته‌بندی تحلیل در جدول ۲، برای هر حالت تحلیل، ۳ زلزله متناسب با نوع خاک در نظر گرفته شده است، که پاسخ نهایی از مقدار حداکثر پاسخ سازه تحت ۳ رکورد زلزله بدست می‌آید.

۲-۷- تعیین نوع خاک

در مسائل اندرکنش خاک - سازه تعیین نوع خاک و پارامترهای خاک از اهمیت زیادی برخوردار است. نوع خاک مورد مطالعه در این تحقیق خاک نوع C, D و E آیین نامه ASCE7-16 [۳۲] (به ترتیب مشابه خاک نوع II, III و IV در آیین نامه ۲۸۰۰ [۳۰] می-باشد. دلیل استفاده از این خاکها این است که هر چه خاک زیر سازه نرم تر باشد اثر اندرکنش خاک - سازه بر رفتار سازه اهمیت بیشتری پیدا می کند. انواع خاک در آیین نامه ASCE7-16 [۳۲] در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳: انواع خاک [۳۲]

نوع خاک	سرعت موج برشی (m/s)
A	≥ 1500
B	۱۵۰۰-۷۶۰
C	۷۶۰-۳۶۰
D	۳۶۰-۱۸۰
E	≤ 180

۲-۸- مشخصات خاک

پارامترهای مورد نیاز برای مدل سازی اندرکنش خاک - سازه با روش مستقیم شامل اصطکاک داخلی خاک (ϕ)، ضریب چسبندگی خاک (c)، وزن مخصوص خاک (γ) و ضریب پواسون خاک (U) می باشد. در جدول ۴ مشخصات خاک زیر ساختمان ارائه شده است.

۲-۹- انتخاب رکورد زلزله

با توجه به پارامترهای فرض شده جدول ۵، از سایت پییر [۳۳]، سه رکورد زلزله برای هر نوع خاک (متناسب با نوع خاک)، در مجموع ۹ رکورد به عنوان زلزله های انتخابی در نظر گرفته شده است. در این تحقیق بزرگای زلزله (M)، فاصله از گسل (R) و نوع خاک مطابق جدول ۵ می باشد. اطلاعات مربوط به رکورد زلزله های انتخابی در جداول ۶ تا ۸ نشان داده شده است.

جدول ۴: مشخصات خاک های مورد مطالعه

نوع خاک	سرعت موج برشی (m/s)	γ (KN/m ³)	G (KPa)	E (KPa)	ν	ϕ	c
C	۵۳۶	۱۲/۹	۳/ * ۱۰ ^۵ ۷	۹/ * ۱۰ ^۵ ۶	۰/۳	۳۵	.
D	۲۵۰	۱۹	۱/ * ۱۰ ^۵ ۱۵	۳/ * ۱۰ ^۵ ۵	۰/۳	۳۳	.
E	۱۵۰	۱۹	۱/ * ۱۰ ^۵ ۴۳	۱/ * ۱۰ ^۵ ۵	۰/۳	۳۳	.

جدول ۵: پارامترهای فرض شده رکورد زلزله (در این تحقیق)

۶/۷-۶/۷	M
۵۰-۱۶ کیلومتر	R
C,D,E	نوع خاک

جدول ۶: رکوردهای انتخابی زلزله - خاک C [۳۳]

شماره	زلزله	سال	ایستگاه	بزرگا	فاصله (km)	VS (m/s)
۱	Loma Prieta	۱۹۸۹	Gilroy Array #6	۶/۹۳	۱۸	۶۶۲/۳۱
۲	Northridge-01	۱۹۹۴	Big Tujunga, Angeles Nat F	۶/۶۹	۱۹	۵۵۰/۱۱
۳	Northridge-01	۱۹۹۴	Burbank-Howard Rd	۶/۶۹	۱۶	۵۸۱/۹۳

جدول ۷: رکوردهای انتخابی زلزله - خاک D [۳۳]

شماره	زلزله	سال	ایستگاه	بزرگا	فاصله (km)	VS (m/s)
۱	Loma Prieta	۱۹۸۹	Hollister Differential Array	۶/۹۳	۲۴	۲۱۵/۵۴
۲	Northridge-01	۱۹۹۴	LA - Centinela St	۶/۶۹	۲۸	۳۲۱/۹۱
۳	Northridge-01	۱۹۹۴	LA - Saturn St	۶/۶۹	۲۷	۳۰۸/۷۱

جدول ۸: رکوردهای انتخابی زلزله - خاک E [۳۳]

شماره	زلزله	سال	ایستگاه	بزرگا	فاصله (km)	VS (m/s)
۱	Loma Prieta	۱۹۸۹	APEEL 2 - Redwood City	۶/۹۳	۴۳	۱۳۳/۱۱
۲	Loma Prieta	۱۹۸۹	Foster City - Menhade Court	۶/۹۳	۴۶	۱۲۶/۹۴
۳	Northridge-01	۱۹۹۴	Carson - Water St	۶/۶۹	۴۹	۱۶۰/۵۸

به دلیل اینکه زمین لرزه های ارائه شده در سایت پیپر [۳۳] در سطح خاک ثبت شده اند و برای تحلیل اندرکنش خاک - سازه رکوردها باید در سطح سنگ بستر ثبت شده باشند. رکوردهای دریافتی از سایت پیپر [۳۳] با آنالیز برگشتی توسط نرم افزار Deepsoil [۳۴] به سنگ بستر برگردانده شده است. بنابراین با ضرایب زلزله جدول ۹، رکوردهای حاصله برای آنالیز مدل های خاک - سازه اصلاح گردیده است.

جدول ۹: ضرایب آنالیز برگشتی زلزله

نوع خاک	ضریب زلزله		
	زلزله ۱	زلزله ۲	زلزله ۳
خاک C	۰/۵	۰/۴۶	۰/۳۸
خاک D	۰/۷	۰/۵۳	۰/۵۸
خاک E	۰/۸۸	۰/۷۸	۰/۶۹

۲-۱۰- مقیاس کردن شتاب نگاشت‌ها

برای آنکه بتوان از شتاب نگاشت در تحلیل دینامیکی غیرخطی استفاده نمود، باید طیف این شتاب نگاشت تا حد امکان با طیف طرح ساختگاه سازه هم‌خوانی داشته باشد. تغییرات لازم بر روی شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده، برای رسیدن به سطح مشخصی از سازگاری با طیف استاندارد طرح، مقیاس کردن نامیده می‌شود. بنابراین قبل از استفاده از شتاب نگاشت‌ها، باید آن را مقیاس نمود که بدین منظور روش‌های متفاوتی وجود دارد. آیین نامه ASCE7-16 [۳۲] با مرتبط نمودن روش مقیاس‌سازی یک شتاب‌نگاشت زلزله به زمان تناوب سازه، مشخصات سازه را در آن مطرح می‌نماید. در مقیاس‌سازی با این روش، از طیف شتاب طرح آیین‌نامه ASCE7-16 [۳۲] استفاده می‌گردد. در جدول ۱۰ ضرایب مقیاس نشان داده شده است.

جدول ۱۰: ضرایب مقیاس زلزله

نوع خاک	ضریب زلزله		
	زلزله ۱	زلزله ۲	زلزله ۳
خاک C	۱/۱	۱/۲	۱/۳۶
خاک D	۰/۷۶	۱/۵	۰/۵۲
خاک E	۰/۹۳	۱/۹	۱/۸۵

۳- نتایج و بحث

در این بخش نتایج حاصل از آنالیز دینامیکی غیرخطی سازه بتنی با مهاربند ضربدری در دو حالت پایه صلب و انعطاف پذیر بر روی سه نوع خاک مختلف با رفتار خطی و غیرخطی خاک مقایسه می‌گردد. در ابتدا با استفاده از تحلیل مودال، زمان تناوب سازه با مهاربند ضربدری در دو حالت پایه صلب و پایه انعطاف پذیر بدست آمده و با هم مقایسه می‌گردد. سپس با تحلیل غیرخطی تاریخیچه زمانی تحت سه زلزله انتخابی برای هر نوع خاک، پاسخهای سازه بدست می‌آید. جایجایی کل سازه‌ها در حالت با اندرکنش خاک - سازه و بدون اندرکنش خاک - سازه با هم مقایسه می‌شود. در ادامه برش پایه سازه‌ها در این دو حالت بررسی می‌گردد. در آخر جایجایی نسبی طبقات در هر دو سازه با مهاربند ضربدری در دو حالت پایه صلب و پایه انعطاف پذیر مقایسه می‌شود. نتایج ارائه شده در این بخش حاصل حداکثر پاسخهای سازه تحت ۳ رکورد زلزله انتخابی می‌باشد (طبق آیین‌نامه ASCE7-16 [۳۲]).

۳-۱- زمان تناوب در دو حالت پایه صلب و پایه انعطاف پذیر

زمان تناوب یکی از مهمترین مشخصه های دینامیکی سازه می‌باشد. از این رو اولین گام برای مشاهده تأثیر اندرکنش خاک - سازه بررسی زمان تناوب در دو حالت پایه صلب و پایه انعطاف پذیر می‌باشد. در جدول ۱۱ زمان تناوب اصلی سازه با مهاربند ضربدری در حالت پایه صلب و انعطاف پذیر ارائه شده است.

جدول ۱۱: زمان تناوب اصلی سازه (مود اول) در دو حالت پایه صلب و پایه انعطاف پذیر

مدل	زمان تناوب اصلی پایه صلب (ثانیه)	زمان تناوب اصلی پایه انعطاف پذیر (ثانیه)		
سازه بتنی با مهاربند ضربدری	۰/۳۸۹	خاک C	خاک D	خاک E
		۰/۴۴۸	۰/۵۲۳	۰/۶۶۸

در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک - سازه باعث افزایش زمان تناوب شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، افزایش زمان تناوب سازه با مهاربند ضربدری پایه انعطاف پذیر نسبت به پایه صلب برای حالتی که سازه بر روی خاک C، D، E قرار دارد به ترتیب ۱۵٪، ۳۴٪ و ۷۲٪ می‌باشد.

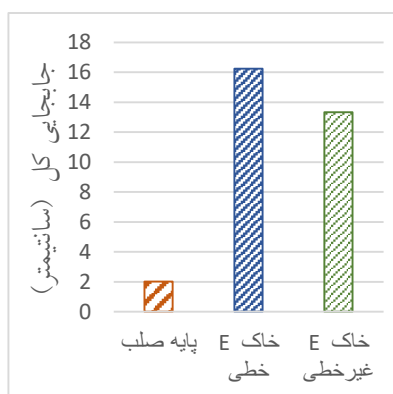
۳-۲- جایجایی کل سازه بتنی با مهاربند ضربدری

در این قسمت جایجایی کل تراز بام سازه بتنی با مهاربند ضربدری در دو حالت پایه صلب و پایه انعطاف پذیر با رفتار خطی و غیرخطی خاک بررسی شده است. مقادیر جایجایی کل تراز بام سازه با مهاربند ضربدری از حداکثر جایجایی سازه تحت ۳ رکورد زلزله بدست آمده است و در جدول ۱۲ به مقایسه جایجایی کل در حالات مختلف پرداخته شده است.

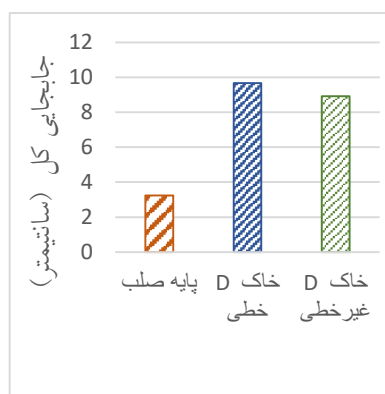
جدول ۱۲: حداکثر جابجایی کل تراز بام سازه با مهاربند ضربدری تحت ۳ رکورد زلزله

حداکثر جابجایی طبقه بام (سانتیمتر)				مدل	نوع خاک
زلزله ۱	زلزله ۲	زلزله ۳	حداکثر		
۲/۳	۲/۸	۲/۶	۲/۸	پایه صلب	خاک C
۳/۰۳	۱/۸	۲/۲	۳/۰۳	خاک خطی	
۲/۹	۱/۷	۲/۰۳	۲/۹	خاک غیرخطی	
۳/۲	۳/۱	۳/۱	۳/۲	پایه صلب	خاک D
۹/۷	۵/۴	۳/۵	۹/۷	خاک خطی	
۸/۹	۴/۵	۲/۹	۸/۹	خاک غیرخطی	
۲/۰۱	۱/۷	۱/۷	۲/۰۱	پایه صلب	خاک E
۱۶/۲	۱۴	۷/۵	۱۶/۲	خاک خطی	
۱۳/۳	۹/۵	۶/۶	۱۳/۳	خاک غیرخطی	

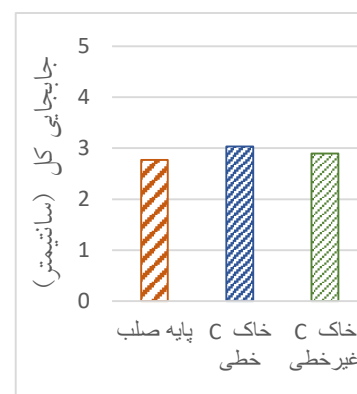
در ادامه حداکثر جابجایی تراز بام سازه با مهاربند ضربدری پایه انعطاف پذیر بر روی سه نوع خاک C، D و E با رفتار خطی، غیرخطی خاک و رفتار غیرخطی سازه بدست آمده و در شکل های ۷ تا ۹ به تفکیک مقادیر جابجایی سازه با پایه انعطاف پذیر برای هر خاک با سازه پایه صلب مقایسه گردیده است.



شکل ۹: جابجایی کل تراز بام سازه بتنی با مهاربند ضربدری پایه صلب و انعطاف پذیر (خاک E)

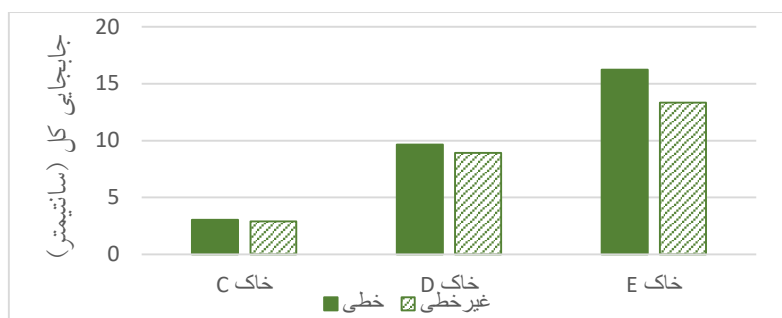


شکل ۸: جابجایی کل تراز بام سازه بتنی با مهاربند ضربدری پایه صلب و انعطاف پذیر (خاک D)



شکل ۷: جابجایی کل تراز بام سازه بتنی با مهاربند ضربدری پایه صلب و انعطاف پذیر (خاک C)

مقادیر جابجایی تراز بام سازه با مهاربند ضربدری بر روی خاک C، D و E بدست آمده از حداکثر جابجایی ۳ رکورد زلزله (متناسب با نوع خاک) تحت تحلیل تاریخچه زمانی در حالت رفتار خطی و غیرخطی خاک در شکل ۱۰ نشان داده شده و اثر انواع خاکها بر جابجایی سازه با مهاربند ضربدری مقایسه گردیده است.



شکل ۱۰: جابجایی کل تراز بام سازه بتنی با مهاربند ضربداری پایه انعطاف پذیر بر روی انواع خاک‌ها

۳-۲-۱- بحث بر روی نتایج جابجایی تراز بام سازه با مهاربند ضربداری در حالات مختلف:

مشاهده می‌شود که مقادیر جابجایی تراز بام سازه با مهاربند ضربداری پایه انعطاف پذیر (خاک خطی و غیرخطی) به دلیل جابجایی خاک، نسبت به پایه صلب بیشتر است که مقدار این افزایش در خاک‌های مختلف متفاوت می‌باشد. نسبت جابجایی سازه پایه انعطاف پذیر به سازه پایه صلب در خاک‌های نوع C، D و E در حالت رفتار خطی خاک به ترتیب ۱، ۳ و ۸ و در حالت رفتار غیرخطی خاک به ترتیب ۱، ۳ و ۷ می‌باشد. این موضوع با توجه به اینکه خاک E نرم‌تر است اثر اهمیت اندرکنش در خاک‌های نرم را نشان می‌دهد. همچنین اندرکنش خاک - سازه باعث افزایش جابجایی کل سازه با مهاربند ضربداری می‌شود.

در مقایسه اثر انواع خاک‌ها بر جابجایی سازه با مهاربند ضربداری، نتایج حاکی از آن است که هر چه خاک نرم‌تر باشد، جابجایی خاک بیشتر می‌شود و این امر باعث افزایش مقدار جابجایی تراز بام سازه می‌گردد. در نتیجه سازه با مهاربند ضربداری بر روی خاک E بیشترین جابجایی کل را داراست.

با توجه به نتایج درصد اختلاف جابجایی در حالت خطی و غیرخطی خاک، برای سازه بر روی خاک C، ۵٪ و خاک D، ۹٪ خاک E، ۲۲٪ است. این اختلاف جابجایی در خاک نرم بیشتر قابل مشاهده می‌باشد. بنابراین رفتار خطی خاک منجر به نتایج محافظه‌کارانه خواهد شد و استفاده از مدل غیرخطی در بررسی اثر اندرکنش خاک - سازه حائز اهمیت بوده و منجر به نتایج واقعی‌تر خواهد گردید.

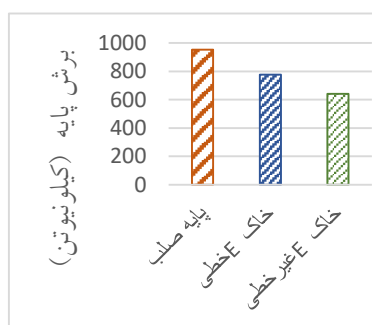
۳-۳- برش پایه

در این قسمت برش پایه سازه بتنی با مهاربند ضربداری در دو حالت پایه صلب و پایه انعطاف پذیر بر روی سه نوع خاک با رفتار خطی و غیرخطی بررسی شده است. مقادیر برش پایه از حداکثر برش پایه سازه تحت ۳ زلزله با تحلیل تاریخچه زمانی بدست آمده و در جدول ۱۳ به مقایسه برش پایه در حالت‌های مختلف پرداخته شده است.

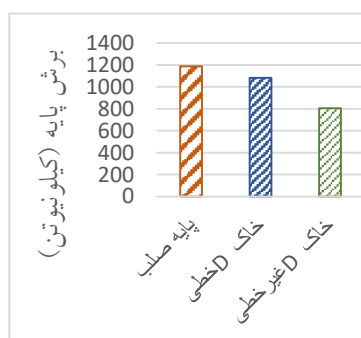
در ادامه برش پایه سازه با مهاربند ضربداری بر روی سه نوع خاک C، D و E با رفتار خطی و غیرخطی خاک - سازه پایه صلب در شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ مقایسه می‌شود.

جدول ۱۳: حداکثر برش پایه سازه با مهاربند ضربدری تحت ۳ رکورد زلزله

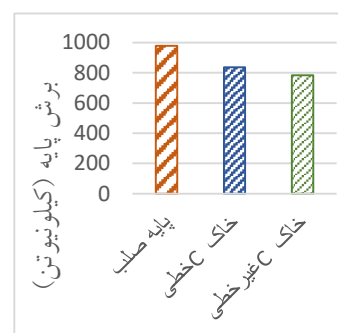
مدل	حداکثر برش پایه (کیلو نیوتن)			
	زلزله ۱	زلزله ۲	زلزله ۳	حداکثر
خاک C	پایه صلب	۷۸۴/۸	۹۷۵/۹	۹۷۸/۱
	پایه انعطاف پذیر	۷۲۵/۰۱	۷۶۱/۱	۸۲۷/۳
	خاک خطی / خاک غیر خطی	۶۹۷/۹	۷۲۸/۲	۷۸۲/۹
خاک D	پایه صلب	۱۰۶۶/۷	۱۱۸۷/۰۱	۱۱۸۷/۰۱
	پایه انعطاف پذیر	۱۰۲۹/۲	۱۰۸۰/۹	۱۰۸۰/۹
	خاک خطی / خاک غیر خطی	۶۹۲/۵	۸۰۴/۱	۴۴۱/۱
خاک E	پایه صلب	۷۷۶/۹	۵۶۴	۷۷۶/۹
	پایه انعطاف پذیر	۶۴۱/۵	۵۳۱/۸	۴۰۱/۸
	خاک خطی / خاک غیر خطی	۶۴۱/۵	۵۳۱/۸	۴۰۱/۸



شکل ۱۱: برش پایه سازه بتنی با مهاربند ضربدری پایه صلب و انعطاف پذیر (خاک E)



شکل ۱۲: برش پایه سازه بتنی با مهاربند ضربدری پایه صلب و انعطاف پذیر (خاک D)



شکل ۱۳: برش پایه سازه بتنی با مهاربند ضربدری پایه صلب و انعطاف پذیر (خاک C)

در شکل ۱۴ قسمت برش پایه سازه با مهاربند ضربدری پایه انعطاف پذیر بر روی سه نوع خاک C، D و E با رفتار خطی و غیر خطی خاک بررسی می‌گردد.



شکل ۱۴: برش پایه سازه بتنی با مهاربند ضربدری پایه انعطاف پذیر برای انواع خاکها

۳-۳-۱- بحث بر روی نتایج برش پایه سازه با مهاربند ضربدری در حالات مختلف:

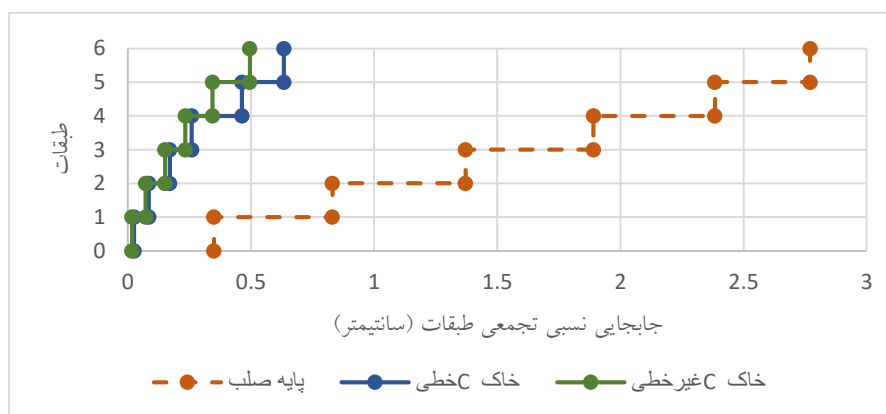
با توجه به مقایسه انجام شده بین مقادیر برش پایه سازه با پایه صلب و پایه انعطاف پذیر با رفتار خطی و غیرخطی خاک می توان چنین نتیجه گیری کرد، که به طور کلی مقادیر برش پایه در سازه با پایه صلب بیشتر از سازه با پایه انعطاف پذیر می باشد، زیرا وجود خاک باعث افزایش زمان تناوب سازه با پایه انعطاف پذیر نسبت به سازه با پایه صلب می شود و با مشاهده شکل طیف پاسخ شتاب در زلزله ها، می توان چنین استنباط کرد که با افزایش زمان تناوب، شتاب کمتری به سازه با پایه انعطاف پذیر وارد می شود و به همین دلیل تنش برشی در سازه کمتر می شود. در نتیجه نیروی برش پایه در مدل سازه بر روی خاک کمتر از سازه با پایه صلب می باشد.

همچنین می توان بیان نمود، به دلیل وجود خاک در زیر سازه و اثرات اینرسی ناشی از جرم سازه، مقداری از انرژی ناشی از زلزله می تواند مستهلک شود. این موضوع نشان دهنده وجود نوعی از میرایی در سیستم است که می تواند باعث کاهش نیروهای جانبی وارد بر سازه و در نتیجه کاهش برش پایه شود.

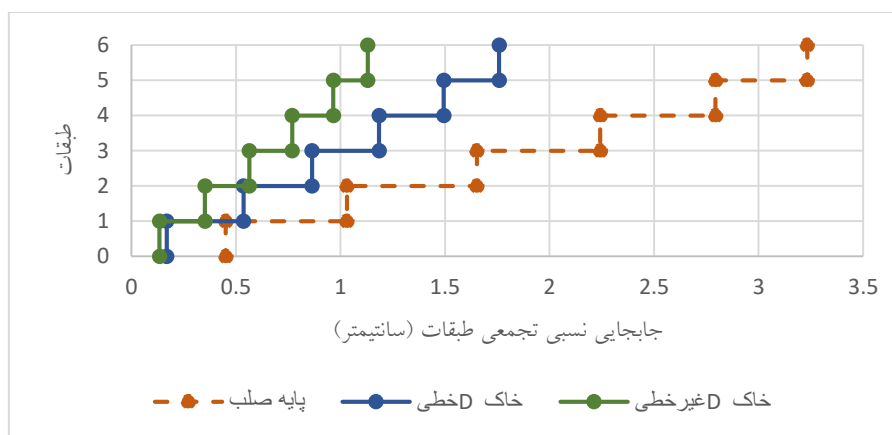
با توجه به نوع خاک میزان اختلاف برش پایه سازه در حالت پایه انعطاف پذیر به پایه صلب متفاوت می باشد. درصد اختلاف سازه پایه صلب و پایه انعطاف پذیر در خاک های نوع C، D و E در حالت رفتار خطی خاک به ترتیب ۱۷، ۱۰ و ۲۳ درصد و در حالت رفتار غیرخطی خاک به ترتیب ۲۵، ۴۸ و ۴۹ درصد می باشد. در نتیجه اندرکنش خاک - سازه باعث کاهش برش پایه سازه با مهاربند ضربدری می شود. بیشترین اختلا برش پایه سازه با پایه انعطاف پذیر نسبت به پایه صلب در حالتی که سازه بر روی خاک E با رفتار غیرخطی است، اتفاق افتاده است. در نتیجه اثر اندرکنش خاک - سازه برای حالتی که سازه بر روی خاک نرم قرار دارد، بسیار حائز اهمیت می باشد.

۳-۴- جابجایی نسبی سازه با مهاربند ضربدری پایه صلب و پایه انعطاف پذیر

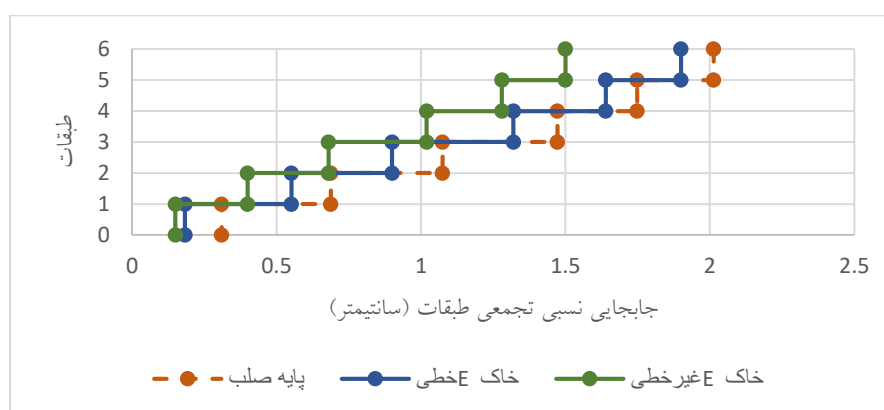
در این بخش مقادیر جابجایی نسبی طبقات سازه به صورت تجمعی در حالت پایه صلب و سازه با مهاربند ضربدری بر روی سه نوع خاک C، D و E با رفتار خطی و غیرخطی خاک در شکل های ۱۵ تا ۱۷ مقایسه شده است.



شکل ۱۵: جابجایی نسبی تجمعی طبقات سازه بتنی با مهاربند ضربدری پایه صلب و انعطاف پذیر (خاک C)

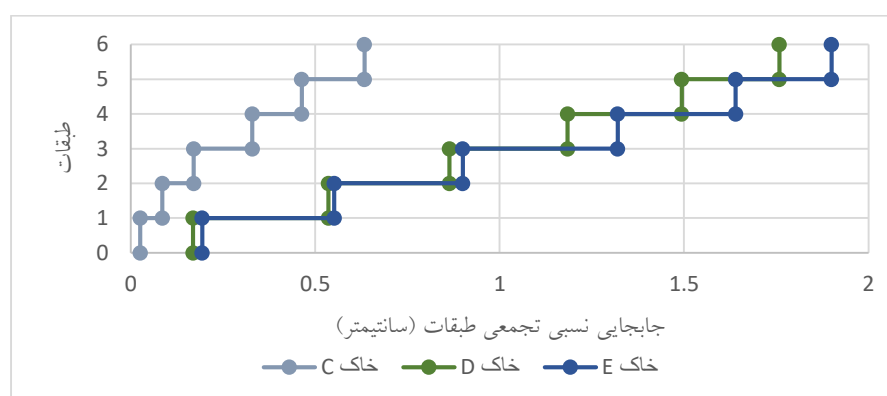


شکل ۱۶: جابجایی نسبی تجمعی طبقات سازه بتنی با مهاربند ضربدری پایه صلب و انعطاف پذیر (خاک D)

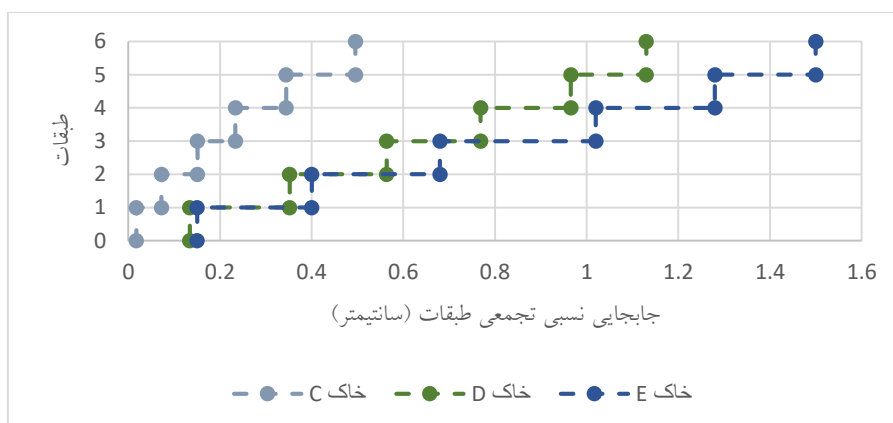


شکل ۱۷: جابجایی نسبی تجمعی طبقات سازه بتنی با مهاربند ضربدری پایه صلب و انعطاف پذیر (خاک E)

جابجایی نسبی تجمعی طبقات سازه با مهاربند ضربدری بر روی خاک C، D و E بدست آمده از تحلیل تاریخچه زمانی در حالت رفتار خطی و غیرخطی خاکها با هم در شکل های ۱۸ و ۱۹ مقایسه گردیده است.



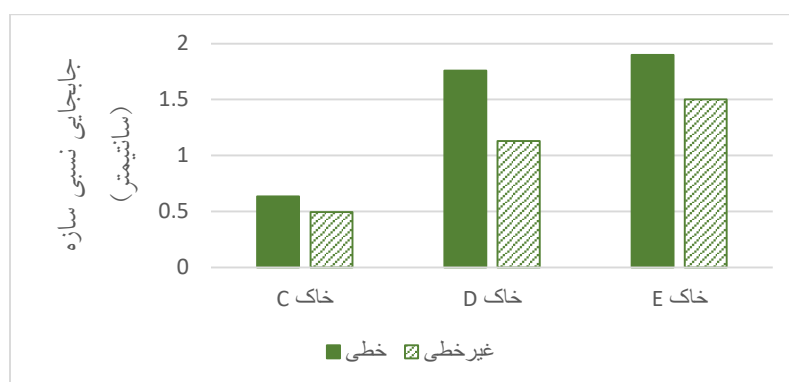
شکل ۱۸: جابجایی نسبی تجمعی طبقات سازه بتنی با مهاربند ضربدری پایه انعطاف پذیر برای انواع خاک ها (حالت خطی)



شکل ۱۹: جایجایی نسبی تجمعی طبقات سازه بتنی با مهاربند ضربدری پایه انعطاف پذیر برای انواع خاک‌ها (حالت غیرخطی)

۳-۴-۱- بحث بر روی نتایج جایجایی نسبی طبقات در سازه با مهاربند ضربدری:

از مقایسه مقادیر جایجایی نسبی طبقات سازه در دو حالت پایه انعطاف پذیر و پایه صلب مشاهده می‌شود که جایجایی نسبی طبقات سازه با پایه انعطاف پذیر (خاک خطی و غیرخطی) به دلیل وجود خاک، نسبت به جایجایی نسبی طبقات سازه با پایه انعطاف پذیر کمتر است و مقدار این کاهش در خاک‌های مختلف متفاوت می‌باشد. بیشترین مقدار اختلاف جایجایی نسبی در طبقات میانی رخ داده است. همچنین اثر انواع خاک‌ها مشاهده گردیده است که جایجایی نسبی طبقات سازه بر روی خاک C، به دلیل استهلاک بیشتر نیروی زلزله کمترین مقدار و بر روی خاک E بیشترین مقدار دارد. مقایسه رفتار خطی و غیرخطی خاک نشان می‌دهد تغییر مکان نسبی طبقات سازه بر روی خاک با رفتار خطی بیشتر از حالت رفتار غیرخطی است. دلیل آن ناشی از افزایش استهلاک انرژی در اثر رفتار غیرخطی است. بنابراین اندرکنش خاک - سازه باعث کاهش جایجایی نسبی طبقات سازه با مهاربند ضربدری می‌شود. جایجایی نسبی سازه که جایجایی تراز بام نسبت به پای سازه است، برای خاک‌های مختلف در حالت خاک خطی و غیرخطی در شکل ۲۰ مقایسه شده است.



شکل ۲۰: جایجایی نسبی تراز بام نسبت به پای سازه بتنی با مهاربند ضربدری بر روی انواع خاک‌ها

نتایج عددی جایجایی نسبی سازه که از اختلاف جایجایی تراز بام و پای سازه در حالت پایه انعطاف پذیر بر روی سه نوع خاک (با رفتار خطی و غیرخطی) بدست آمده در جدول ۱۴ نشان داده شده است.

جدول ۱۴: جابجایی نسبی سازه با مهاربند ضربردری پایه انعطاف پذیر (خاک خطی و غیرخطی)

جابجایی نسبی بام نسبت به پای سازه (سانتیمتر)		مدل	پایه انعطاف پذیر
خاک غیرخطی	خاک خطی		
۰/۵	۰/۶۳	خاک C	
۱/۱۳	۱/۷۶	خاک D	
۱/۵	۱/۹	خاک E	

به دلیل انعطاف پذیری خاک، سختی جانبی سازه و همچنین نیروهای جانبی وارد بر آن کاهش یافته و در نتیجه باعث کاهش جابجایی نسبی سازه با پایه انعطاف پذیر می گردد. مقایسه اثر انواع خاک نشان می دهد که خاک C با مستهلک کردن بالای امواج زلزله باعث کاهش نیروهای وارد بر سازه شده و مقادیر جابجایی نسبی بام نسبت به پای سازه کاهش پیدا می کند. با ضعیف تر شدن نوع خاک (خاک E) مقادیر جابجایی نسبی بام نسبت به پای سازه به شدت افزایش می یابد.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، رفتار لرزه ای سازه بتنی ۶ طبقه بهسازی شده با مهاربند فولادی ضربردری مورد بررسی قرار گرفته است. سازه با مهاربند فولادی بر روی طیفی از خاک های نرم تا سخت قرار داده شد و خاکها با رفتار خطی و غیرخطی با استفاده از روش مستقیم مدل سازی و تحلیل شدند. در انتها مقادیر پاسخ در حالت های پایه انعطاف پذیر و پایه صلب مقایسه گردید. خلاصه ای از نتایج به دست آمده از این تحقیق به اختصار بیان می گردد:

- لحاظ نمودن اندرکنش خاک - سازه موجب افزایش زمان تناوب سازهها نسبت به پایه صلب خواهد شد و با نرم تر شدن خاک، زمان تناوب سازه افزایش می یابد. افزایش زمان تناوب سازه با مهاربند ضربردری پایه انعطاف پذیر نسبت به پایه صلب برای حالتی که سازه بر روی خاک C، D و E قرار دارد به ترتیب ۱۵٪، ۳۴٪ و ۷۲٪ می باشد.
- تأثیر خاک باعث افزایش جابجایی کل سازه با مهاربند ضربردری نسبت به حالت پایه صلب می شود. نسبت جابجایی کل سازه با مهاربند ضربردری پایه انعطاف پذیر به سازه پایه صلب در خاکهای نوع C، D و E در حالت رفتار خطی خاک به ترتیب ۱، ۳ و ۸ در حالت رفتار غیرخطی خاک به ترتیب ۱، ۳ و ۷ می باشد. بنابراین بیشترین مقدار جابجایی برای سازه با مهاربند ضربردری بر روی خاک E رخ داده است.
- جابجایی سازه با مهاربند ضربردری در حالت رفتار خطی خاک بیشتر از رفتار غیرخطی می باشد. درصد اختلاف رفتار خطی و غیرخطی برای سازه با مهاربند ضربردری بر روی خاک C، ۵٪، خاک D، ۹٪ و خاک E، ۲۲٪ محاسبه گردیده است. بنابراین رفتار خطی خاک منجر به نتایج محافظه کارانه خواهد شد و استفاده از مدل غیرخطی در بررسی اثر اندرکنش خاک - سازه حائز اهمیت بوده و منجر به نتایج واقعی تر خواهد گردید.
- به دلیل وجود خاک در زیر سازه و اثرات اینرسی ناشی از جرم سازه، مقداری از انرژی ناشی از زلزله می تواند مستهلک شود. این موضوع نشان دهنده وجود نوعی از میرایی در سیستم است که می تواند باعث کاهش نیروهای جانبی وارد بر سازه و در نتیجه کاهش برش پایه شود. همچنین با توجه به طیف پاسخ شتاب در زلزلهها، نتیجه می گیریم که با افزایش زمان تناوب، شتاب کمتری به سازه با پایه انعطاف پذیر وارد می شود و این موضوع می تواند باعث کاهش تنش برش پایه گردد. بنابراین اندرکنش خاک - سازه باعث کاهش نیروی برش پایه و در نتیجه کاهش هزینه های اقتصادی در سازه با مهاربند ضربردری می گردد. درصد

اختلاف برش پایه سازه با مهاربند ضربدری پایه انعطاف پذیر به سازه پایه صلب در خاک‌های نوع C، D و E در حالت رفتار خطی خاک به ترتیب ۱۷، ۱۰ و ۲۳ درصد و در حالت رفتار غیرخطی خاک به ترتیب ۲۵، ۴۸ و ۴۹ درصد می‌باشد. به طور کلی مقایسه پاسخ لرزه‌ای سازه با مهاربند ضربدری بر روی انواع خاک‌ها، نشان می‌دهد که دامنه تغییرات پاسخ لرزه‌ای سازه‌ای در خاک نوع E بیشتر است. در این صورت اثر اندرکنش در خاک نرم بسیار حائز اهمیت می‌باشد. لزوم تأثیر ارتفاع بر پاسخ اینگونه سازه‌ها با در نظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه در تحقیقات آتی می‌تواند مورد توجه قرار گیرد.

منابع

- [1] Saljoughian, M. (2017). Experimental Rehabilitation of the RC Frame with Steel X-Brace and Curb Connection. Master thesis. Semnan University, Semnan.
- [2] Hadad, H. S. and Metwally, I.M. and EL-Betar, S. (2017). Cyclic behavior of braced concrete frames: Experimental investigation and numerical simulation. *HB RC Journal*, 13(3), pp.262-270.
- [3] Maheri, M. R. and Kousari, R. and Razazan, M. (2003). Pushover tests on steel X-braced and knee-braced RC frames, *Engineering Structures*. 25(13), pp.1697-1705.
- [4] Tahamouli Roudsari, M. and Entezari, A. and Hadidi, M. H. and Gandomian, O. (2017). Experimental Assessment of Retrofitted RC Frames with Different Steel Braces. *structure*, 11, pp.206-217.
- [5] Massumi, A. and Tasnimi, A. A. (2008). Strengthening of low ductile reinforced concrete frames using steel x-bracings with details. 14th world conference on earthquake engineering. Beijing, China.
- [6] Maheri, M. R. and Sahebi, A. (1997). Use of steel bracing in reinforced concrete frames. *Engineering Structures*, 19(12), pp.1018-1024.
- [7] Abdollahzadeh, Gh. and Mohammadi, Sh. (2013). BEHAVIOR FACTOR OF STEEL DUAL FRAMES WITH LARGE-SCALED CONCENTRICALLY BRACING SYSTEMS. *Journal of Modeling in Engineering*, 10(31), pp. 1-13.
- [8] Javadi, P. and Tizchang, A. and GhafourianHesami, A. H. and Askari, M.J. (2020). A friction-based connection for retrofitting RC frames by steel braced frames. *Structures*, 24, pp.627-639.
- [9] Rahimi, A. and Maheri, M.R. (2020). The effects of steel X-brace retrofitting of RC frames on the seismic performance of frames and their elements. *Engineering Structures*, 206, pp.1-17.
- [10] Budiwati, I.A.M. and Sukarawa, M. and Wahyuni, I. (2018). Numerical Study on Seismic Behavior of Reinforced Concrete Structures with Steel Brace and Infill Wall. *AIP Conference Proceedings*, 1977,040027.
- [11] Chouhan, D.S. and Patel, S.L. (2018). Structural and Economic analysis of RC Frame building with and without bracing. *European Journal and Advances in Engineering and Technology*, 5(6), 386-390.
- [12] Izadi, M. and Mohammad Izadi, M. and Akbar Pour, A. (2015). The Application of Buckling Reinforced Bracing and Shear Wall in Retrofitting of Existing Concrete Building. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 2(1), pp. 67-81.
- [13] Hadianfard, M. A. and Alishir, M. (2007). Earthquake Reinforcement of Concrete Structures Using Steel Braces. 2th Conference Disaster Management Conference, Tehran, Iran.
- [14] Sharafati, M. A. and Sharafati, M. S. and Mohebpour, S.R. and Vaqefi, M. (2016). Numerical study of the effect of convergent and divergent steel braces on the reinforcement of reinforced concrete frames. 1th Competition of the Comprehensive International Conference on Engineering Sciences in Iran, Bandar Anzali, Iran.
- [15] Bitarfan, H. and Najafi, M. H. (2015). Improvement of Seismic Behavior of Concrete Buildings by Metal Braces. 1th International Conference on Applied Research in Civil Engineering, Architecture and Urban Planing, Tehran, Iran.
- [16] Hamidi, j. and Kheiroddin, A. (2013). Study of the behavior of reinforced concrete structures reinforced with foreign steel braces. 7th National Congress of Civil Engineering, Zahedan, Iran.
- [17] jarrahi feriz, H. and keramati, A. (2017). Performance Levels of Tall and Irregular RC Structures, before and after Reinforcing by Steel Bracing under Nonlinear Static and Dynamic Analysis. *Ferdowsi Civil Engineering*, 29(2), pp. 75-92.
- [18] Behnamfar, F. and Banizadeh, M. (2016). Effects of soil-structure interaction on distribution of seismic vulnerability in RC structures. *Journal Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 80, pp.73-86.

- [19] Shariat Yazdi, S. and Pourhosseini, R. and Mirjalili, A. R. (2014). Study of the effect of structural soil interaction on the performance of concrete frame and wall shear system. 5th National Conference on Earthquake and Structure, Kerman, Iran.
- [20] Etedadi Aliabadi, F. and Memarpour, M. (2019). 'Investigation of the Seismic Behavior of Framed Tube Buildings Considering Soil Structure Interaction', *Journal of Structural and Construction Engineering*, 6(2), pp. 119-140.
- [21] Hosseinzadeh, N. A. and Davoodi, M. and Raeyat Roknabadi, E. (2010). Experimental-analytical study of the effects of soil-structure interaction on the nonlinear response of conventional structures with surface and buried foundations. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 13(1-2), pp. 1-9.
- [22] Arboleda-Monsalve, Luis G. and Mercado, Jaime A. and Terzic, Vesna. and Mackie, Kevin R. (2020). Soil-Structure Interaction Effects on Seismic Performance and Earthquake-Induced Losses in Tall Buildings. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 146(5).
- [23] Torabi Kani Baghi, M. and Kargar, S. H. R. (2017). The Impact of Soil Interaction on Reinforced Concrete Buildings Using Metal Braces. 2th Annual National Conference on Modern Solutions in Civil Engineering Architecture and Urbanism, Mashhad, Iran.
- [24] Dashti, P. and Homami, P. (2014). Behavior of braced reinforced concrete frames taking into account the interaction of soil and structure. 2th International Congress of Structure, Architecture and Urban Development, Tabriz, Iran.
- [25] Naseroleslami, R. (2016). Evaluation of the Behavior of Retrofitted Moment Resistant Reinforced Concrete frames by Knee Bracing System and Incremental Dynamic Analysis. Master thesis. Tafresh University, Tafresh.
- [26] Goktepe, F. and Celebi, E. and Omid, A. J. (2019). Numerical and experimental study on scaled soil-structure model for small shaking table tests. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 119, pp.308-319.
- [27] <https://opensees.berkeley.edu/>
- [28] Ghanbari, A. and Hosseini, Sh. S. (2016). Introduction to Soil-Structure Interaction. Tehran, First Edition, Kharazmi University, pp.1-507.
- [29] Ghasemi Sofyansar, T. (2018). Comparing the use of X and knee bracing in seismic rehabilitation reinforced concrete Moment frames. Master thesis. Aryan Institute of Science and Technology, Babol.
- [30] Road, Housing and Urban Development Research Center.,(2014). Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, Standard No. 2800, 4rd edition, Tehran, Iran.
- [31] FEMA350. (2000). *Recommended seismic design criteria for new steel moment-frame buildings*, Washington (DC).
- [32] ASCE, Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, (2016). ASCE Standard ASCE/SEI 7-16, including Supplement No. 1, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.
- [33] *PEER ground motion database*. Available: <http://ngawest2.berkeley.edu/>
- [34] DEEPSOIL. Version 6.1.