اثر متقابل برکنش و اندرکنش خاک و سازه روی پاسخ دینامیکی غیرخطی سازه‌ها

سید محمد میرحسینی
دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
s.mohamad66@yahoo.com

فرهاد بهنام‌فر
دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
farhad@cc.iut.ac.ir

کلید واژه‌ها: *پاسخ دینامیکی غیرخطی، اندرکنش خاک و سازه*

چکیده

در تحقیق حاضر با در نظر گرفتن شرایط و حالات مختلف برای ساختمان‌ها و شبیه‌سازی آن‌ها در نرم‌افزار، برکنش فنداسیون مورد بررسی قرار گرفته و پارامترهای مختلف تأثیرگذار روی آن مورد مطالعه قرار داده می شود. در این تحقیق با درنظر گرفتن سه ساختمان ۳، ۶ و ۱۲ طبقه قاب خمشی بتنی و فولادی با یا بدون دیوار برشی و مهاربندی با رکوردهای زلزله‌ی مناسب به بررسی اثر برکنش و اندرکنش خاک و سازه پرداخته شده است. نیروها و تغییر شکل های ساختمان‌ها با در نظر گرفتن سه حالتِ تکیه‌گاه گیردار، تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر بدون برکنش و با برکنش محاسبه و مقایسه شده است. دو نوع خاک با سختی متوسط و کم در این مطالعات درنظر گرفته می شود. تغییرات زمان تناوب، جابجایی نسبی طبقات، مقدار برکنش، نسبت دریفت قائم و چرخش مفاصل خمیری مورد بررسی قرار داده می شود.

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که اندرکنش خاک و سازه موجب افزایش جابجایی نسبی طبقات پایینی ساختمان‌های قاب خمشی و کاهش جابجایی نسبی طبقات فوقانی آن می‌گردد. هنگامی که برکنش در نظر گرفته شود این اثر تشدید می‌گردد. در مدل‌های مهاربندی فولادی و دیوار برشی بتنی مقدار دریفت در تمام طبقات افزایش می‌یابد. هر چه خاک زیر سازه نرم‌تر باشد میزان اختلاف جابجایی نسبی در دو حالت پایه‌ی صلب و انعطاف‌پذیر در این ساختمان‌ها بیشتر می‌شود. در نظر گرفتن برکنش باعث افزایش این اختلاف می‌گردد. دریفت قائم در مقابل دریفت افقی مقدار کمتری دارد. در نظر گرفتن برکنش باعث افزایش مقدار دریفت قائم می‌گردد و هرچه خاک زیر سازه نرم‌تر باشد مقدار دریفت قائم نیز بیشتر خواهد شد. در ساختمان‌های قاب خمشی واقع بر خاک نوع III با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه و برکنش، میزان دوران مفاصل خمیری نسبت به حالت پایه‌ی صلب در طبقات پایین افزایش و در طبقات بالا کاهش می‌یابد. البته هنگامی‌که اندرکنش به‌تنهایی در نظر گرفته شود مقدار چرخش مفاصل نسبت به حالت اندرکنش با برکنش بیشتر خواهد شد.

۱– مقدمه

برکنش یا بلندشدگی معادل واژه Uplift در زبان انگلیسی است. در هنگام اعمال بارهای جانبی به سازه ممکن است قسمتی از سازه دچار برکنش شود. برای طراحی سازه‌ها لازم است مشخصات خاک، سازه و ارتباط بین این دو مشخص گردد؛ بدیهی است که اگر فنداسیون روی خاک باشد یا روی سنگ رفتار متفاوتی از خود نشان خواهد داد. بنابراین دانستن اینکه فنداسیون در موقعیت واقعی خود چه رفتاری را دارد برای طراح مهم خواهد بود. برکنش پی یک رفتار غیرخطی دینامیکی را در سازه حاکم می‌کند که نتایج آن در مقایسه باحالتی که از برکنش جلوگیری شده بسیار متفاوت خواهد بود. در هنگام اعمال بارهای جانبی به سازه ممکن است برای قسمتی از سازه برکنش اتفاق بیفتد بدین‌صورت که وقتی سازه در معرض بار جانبی مثل زلزله یا باد قرار می‌گیرد در پای سازه لنگر واژگونی ایجاد می‌شود. لنگر حاصله یک زوج نیرو تولید می‌کند که در بعضی ستون‌ها کشش و در بعضی دیگر فشار ایجاد می‌شود. تعدادی از ستون‌های موجود در سازه که تحت کشش قرارگرفته‌اند اگر تکیه‌گاهشان به خاک محکم نشده باشد و نیروی ناشی از بارهای ثقلی در این قسمت از نیروی کششی ایجادشده در ستون کمتر باشد، دچار برکنش شده و قسمتی از پی متصل به این ستون‌ها از خاک جدا خواهند شد. افزایش بیش‌ازحد نیروی جانبی می‌تواند باعث واژگونی سازه شود. پس می‌توان گفت واژگونی یکی

از اثرات برکنش است.

مطالعات زیادی در مورد برکنش سازه ها در زلزله در گذشته انجام شده است. پویان به مطالعه روش‌های مدل‌سازی و تحلیلی برکنش پرداخت. بر اساس تحقیق وی، پدیده برکنش نقش مهمی در خرابی‌های ناشی از زلزله دارد و می‌تواند باعث آسیب‌های موضعی و در بعضی موارد آسیب‌های کلی شود (پویان، ۱۳۸۱). دهقان منشادی با استفاده از نرم‌افزار Ansys و المان Contact به بررسی اثر برکنش روی دو نوع پی منفرد و یکسره پرداخت. این نتیجه حاصل شد که نیروی برشی پایه در قاب مهاربندی با پی یکسره از پی منفرد بیشتر است، ولی عموماً تغییر مکان جانبی بالای قاب و تنش‌های ایجادشده در اعضای قاب با پی یکسره از قاب با پی منفرد کمتر می‌باشد (دهقان منشادی، ۱۳۸۲). قائد امینی به بررسی پدیده‌ی برکنش لرزه‌ای در سازه با تکیه گاه صلب پرداخت (قائد امینی، ۱۳۸۶). در مطالعه وی، نمودارهای کاربردی جهت حدس اولیه رخداد برکنش استخراج شد. در مرحله بعد سازه‌های انتخاب‌شده و پی آن‌ها برای دو نوع سیستم قاب خمشی فولادی با شکل‌پذیری متوسط و مهاربندی هم‌محور فولادی مورد تحلیل برکنش قرار گرفتند. بختیار نصرآبادی به مطالعه اثر برکنش بر رفتار لرزه‌ای سازه‌های بتنی با تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر پرداخت. در تحقیق مربوطه با تحلیل غیرخطی توأم سازه، پی و خاک زیر آن برای چندین مدل بتنی با دو سیستم باربر جانبی قاب خمشی و دیوار برشی با شکل‌پذیری متوسط واقع بر دو نوع خاک III وIV مطابق استاندارد ۲۸۰۰ رفتار سازه ناشی از برکنش روی تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر بررسی گردید. وی نتیجه گرفت که پدیده برکنش روی تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر نقش مهم و غیرقابل‌اغماضی در مقاوم‌سازی و طراحی سازه‌ها در برابر زلزله دارد (بختیار نصرآبادی، ۱۳۸۶).

با بررسی ادبیات فنی نتیجه می‌شود که در ارتباط با برکنش لرزه‌ای سازه‌ها نیاز مبرمی به روشن‌تر شدن اثرات کلی و موضعی آن و ارائه‌ی ضوابط عملی برای در نظر گرفتن در حین طراحی سازه‌ها وجود دارد. در این مقاله با مطالعه بر روی سه ساختمان ۳، ۶ و ۱۲ طبقه و در نظر گرفتن دو نوع خاک III و IV آیین نامه و دو سیستم قاب خمشی متوسط و مهاربندی فولادی برای مدل‌های فولادی و قاب خمشی متوسط و دیوار برشی بتنی برای مدل‌های بتنی، تأثیر برکنش و اندرکنش خاک و سازه روی زمان تناوب، جابجایی نسبی طبقات، مقدار برکنش، نسبت دریفت قائم و چرخش مفاصل خمیری بررسی می‌شود.

۲- معرفی مدل‌ها

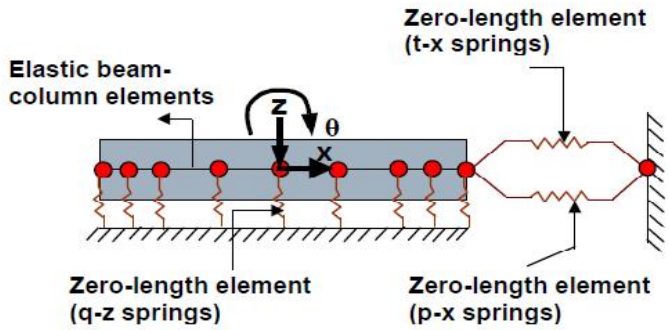
مدل‌های مورد مطالعه در گروه ساختمان‌های با اهمیت متوسط قرار دارند. این سازه ها ضوابط ساختمان‌های منظم را دارا می‌باشند و در گروه ساختمان‌های منظم در پلان و ارتفاع قرار دارند. همچنین شتاب مبنای طرح با توجه به لرزه‌خیزی منطقه طبق پیوست شماره ۱ استاندارد ۲۸۰۰ خیلی زیاد در نظر گرفته شده است؛ بنابراین با استفاده از جدول ۲ استاندارد ۲۸۰۰ شتاب مبنای طرح برای مدل‌ها برابر 0.35 انتخاب می‌گردد. همچنین دو سیستم مقاوم جانبی، قاب خمشی متوسط و مهاربندی هم‌محور متوسط برای مدل‌های فولادی و قاب خمشی متوسط و قاب خمشی با دیوار برشی برای مدل‌های بتنی به لحاظ استفاده بیشتر نسبت به سایر سیستم‌های سازه‌ای، انتخاب گردید تا تفاوت نوع سیستم مقاوم جانبی در رخداد برکنش مورد بررسی قرار گیرد. این مدل‌ها در نرم‌افزار SAP2000 و طبق آیین‌نامه طراحی سازه‌های فولادی AISC-ASD و آیین‌نامه‌ی طراحی سازه‌های بتنی ACI318-05 و مطابق استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش سوم) طراحی‌شده است. زمان تناوب اصلی سازه های طراحی شده در جدول (۱) ذکر گردیده است.

جدول ۱: مقادیر زمان تناوب برای مدل‌های فولادی و بتنی با تکیه گاه صلب

تعداد طبقه	مدل فولادی			مدل بتنی		
	نوع سیستم مقاوم جانبی	نوع خاک	زمان تناوب (s)	نوع سیستم مقاوم جانبی	نوع خاک	زمان تناوب (s)
3	قاب خمشی	III	0.98	قاب خمشی	III	0.77
		IV	0.95		IV	0.77
	مهاربندی	III	0.49	دیوار برشی	III	0.25
		IV	0.49		IV	0.25
6	قاب خمشی	III	1.35	قاب خمشی	III	1.15
		IV	1.3		IV	1.11
	مهاربندی	III	0.66	دیوار برشی	III	0.38
		IV	0.62		IV	0.38
12	قاب خمشی	III	2.02	قاب خمشی	III	1.89
		IV	1.8		IV	1.86
	مهاربندی	III	1.18	دیوار برشی	III	0.86
		IV	0.98		IV	0.84

۳– مدل غیرخطی اندرکنش سازه و خاک

هاردن و همکاران بر مبنای روابط آیین‌نامه‌ای، پارامترهای سختی و میرایی فنداسیون را به‌صورت مدل تیر بر فنداسیون غیرخطی وینکلر ارائه نمودند (Harden et al., 2005). در این مدل از المان‌های گسترده‌ی فنر و میراگر برای شبیه‌سازی رفتار خاک استفاده می‌شود. مدل وینکلر شامل المان مش بندی شده‌ی الاستیک تیر انعطاف‌پذیر جهت مدل نمودن رفتار فنداسیون و المان‌های فنر غیرخطی وینکلر جهت مدل کردن رفتار خاک می‌باشد. در این مدل، فنرهای قائم به‌صورت گسترده به نسبت سطح سهمیه‌ی هر گره توزیع‌شده و فنر افقی به‌صورت متمرکز دریکی از گره‌های انتهایی پی اعمال می‌شود. شکل ۱مدل‌سازی اندرکنش سازه و خاک را نشان می‌دهد.



شکل ۱: مدل‌سازی تکیه گاه انعطاف پذیر با استفاده از مدل تیر بر بستر غیرارتجاعی (Harden and Hutchinson, 2009)

۴– بررسی پدیده برکنش همراه با اندرکنش بر روی رفتار سازه

هریک از سازه های مورد بررسی به صورت غیرخطی در نرم افزار OpenSees با اعضای با مفاصل متمرکز مدل سازی گردیدند (OpenSEES, 2014). برای انجام تحلیل های دینامیکی غیرخطی، ۱۰ رکورد مناسب برای هریک از سازه ها انتخاب و با استفاده از طیف طرح مقیاس گردید. این رکوردها از بانک اطلاعاتی PEER انتخاب شدند (PEER NGA, 2014). پس از انجام تحلیل‌های غیرخطی بر روی مدل‌ها، با در نظر گرفتن تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر با برکنش (جدایش پی از خاک) و مقایسه آن‌ها با مدل‌های مشابه ولی در حالت تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر بدون برکنش و تکیه گاه صلب، پارامترهای مختلف مورد بررسی قرار گرفتند. در حالتی که تکیه‌گاه انعطاف پذیر با برکنش در نظر گرفته می شود، بین پی و خاک عکس‌العمل کششی برابر صفر می‌باشد. در این حالت سازه می‌تواند از روی خاک بلند شود. هنگامی که اندرکنش به تنهایی منظور گردد، بین پی و خاک عکس‌العمل کششی وجود خواهد داشت. با مقایسه‌ی این دو حالت می‌توان به اثرات نسبی برکنش و اندرکنش به صورت مجزا روی سازه‌ها پی برد.

۴–۱– بررسی زمان تناوب

زمان تناوب ساختمان‌های بتنی و فولادی مورد مطالعه با تکیه گاه انعطاف پذیر روی دو نوع خاک III و IV آورده شده است. از مطالعه بر روی زمان تناوب سازه‌ها نتایج زیر حاصل می‌گردد.

۱- طبق جدول ۲، سازه‌ای که بر روی خاک IV قرار دارد نسبت به سازه‌ای که بر روی خاک III قرار دارد، دارای زمان تناوب بیشتری می‌باشد. بنابراین، مدل استفاده برای اندرکنش سازه و خاک سازگار با ادبیات فنی موجود عمل نموده و نشان می دهد که در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه باعث افزایش زمان تناوب می‌گردد. این افزایش در سیستم مهاربندی فولادی و دیوار برشی بتنی به‌مراتب بیشتر از سیستم قاب خمشی بتنی و فولادی می‌باشد.

۲ - با افزایش ارتفاع سازه، اندرکنش خاک و سازه موجب افزایش بیشتر زمان تناوب سازه نسبت به حالت پایه‌ی صلب می‌شود. این افزایش در سازه‌های مهاربندی فولادی و دیوار برشی بتنی به‌مراتب بیشتر از قاب خمشی فولادی و بتنی است.

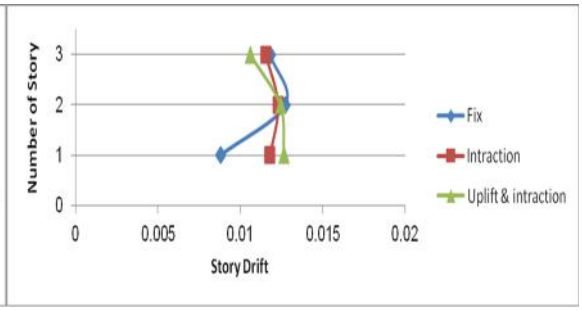
۳- هرچه خاک زیر سازه نرم‌تر باشد اختلاف بین زمان تناوب حالت با تکیه‌گاه گیردار نسبت به تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر بیشتر خواهد شد.

جدول ۲: مقادیر زمان تناوب برای مدل‌های فولادی و بتنی با تکیه گاه انعطاف پذیر

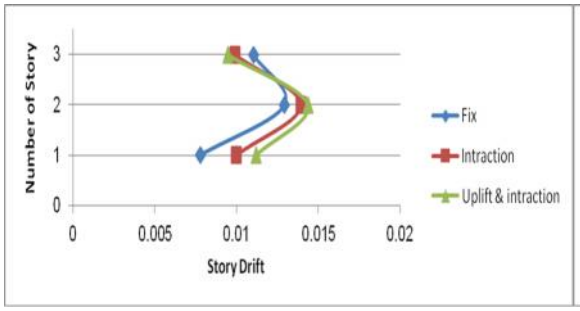
تعداد طبقه	مدل فولادی			مدل بتنی		
	نوع سیستم مقاوم جانبی	نوع خاک	زمان تناوب (s)	نوع سیستم مقاوم جانبی	نوع خاک	زمان تناوب (s)
3	قاب خمشی	III	1.02	قاب خمشی	III	0.79
		IV	1.1		IV	0.86
	مهاربندی	III	0.55	دیوار برشی	III	0.33
		IV	0.59		IV	0.45
6	قاب خمشی	III	1.39	قاب خمشی	III	1.18
		IV	1.45		IV	1.32
	مهاربندی	III	0.79	دیوار برشی	III	0.59
		IV	1.02		IV	0.75
12	قاب خمشی	III	2.05	قاب خمشی	III	1.94
		IV	1.93		IV	2.33
	مهاربندی	III	1.32	دیوار برشی	III	1.25
		IV	1.57		IV	1.72

۴-۲- بررسی جابجایی نسبی طبقات

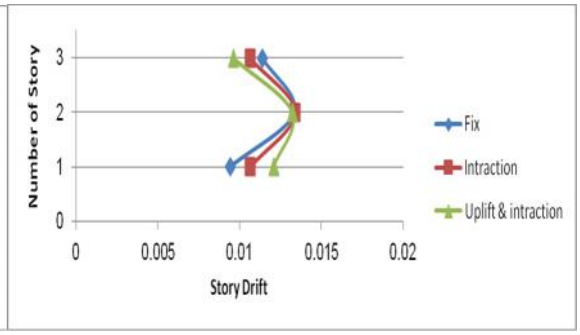
مقادیر جابجایی نسبی طبقات برای ساختمان سه طبقه واقع بر خاک های نوع III و IV آیین نامه که بین حداکثر واکنش زلزله ها میانگین گیری شده، در شکل ۲ تا ۹ نشان داده شده است. نتایج برای سه حالت تکیه گاه صلب، با اندرکنش و اندرکنش همراه برکنش ارائه گردیده است. محور افقی نشان‌دهنده‌ی مقدار جابجایی نسبی طبقات و محور قائم معرف شماره‌ی طبقه می‌باشد.



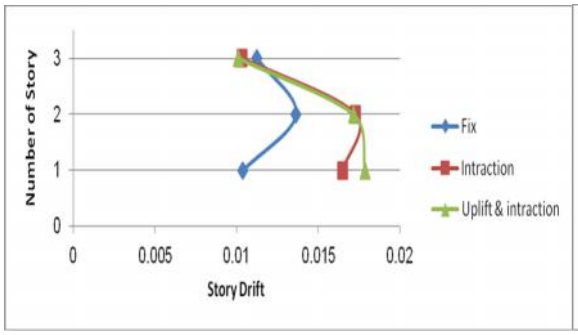
شکل ۲: جابجایی نسبی طبقات ساختمان
قاب خمشی فولادی روی خاک III



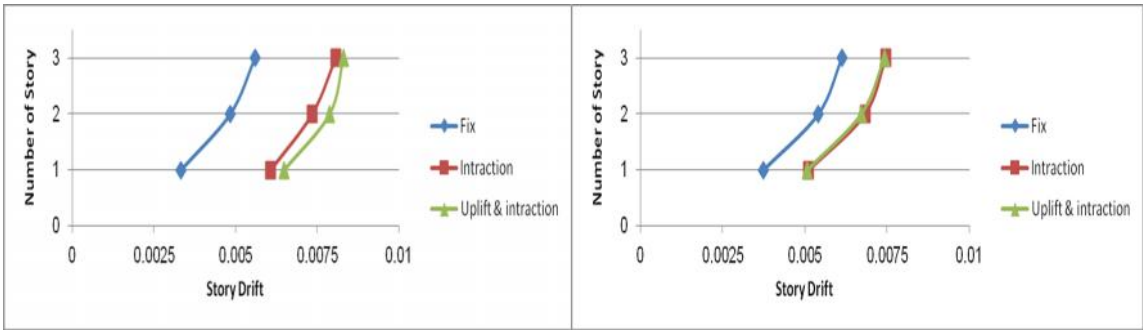
شکل ۳: جابجایی نسبی طبقات ساختمان
قاب خمشی فولادی روی خاک IV



شکل ۴: جابجایی نسبی طبقات ساختمان
قاب خمشی بتنی روی خاک III

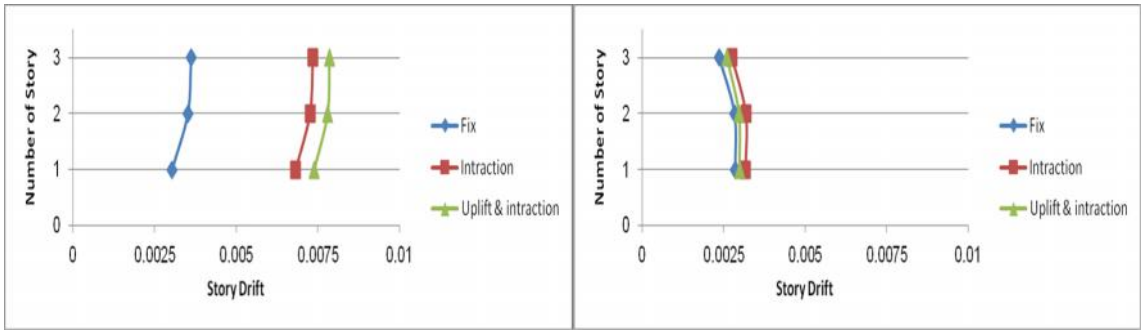


شکل ۵: جابجایی نسبی طبقات ساختمان
قاب خمشی بتنی روی خاک IV



شکل ۶: جابجایی نسبی طبقات ساختمان مهاربندی فولادی روی خاک III

شکل ۷: جابجایی نسبی طبقات ساختمان مهاربندی فولادی روی خاک IV



شکل ۸: جابجایی نسبی طبقات ساختمان قاب خمشی با دیوار برشی بتنی روی خاک III

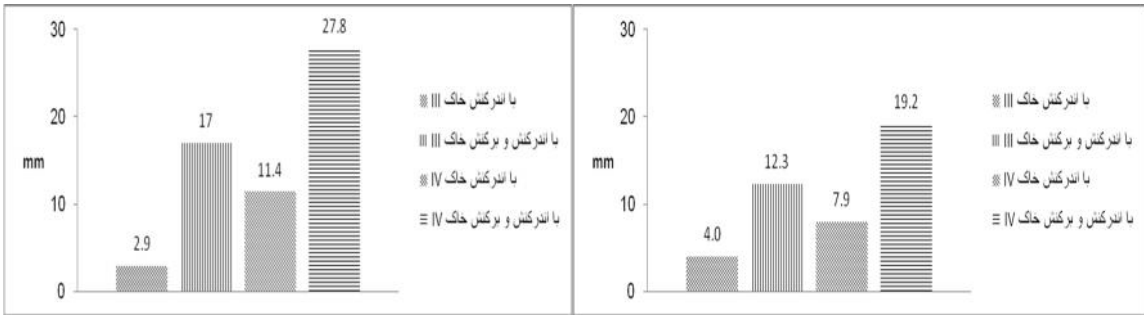
شکل ۹: جابجایی نسبی طبقات ساختمان قاب خمشی با دیوار برشی بتنی روی خاک IV

همانطور که دیده می شود، در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه موجب افزایش جابجایی نسبی طبقات پایینی ساختمان‌های قاب خمشی و کاهش جابجایی نسبی طبقات فوقانی آن می‌گردد. هنگامی که برکنش در نظر گرفته شود این اثر تشدید می‌گردد. حداکثر مقدار افزایش مربوط به ساختمان سه طبقه با ۴۲ درصد و حداکثر کاهش مربوط به ساختمان دوازده طبقه با ۸۶ درصد می‌باشد. برای حالت بدون برکنش حداکثر مقدار افزایش مربوط به ساختمان سه طبقه با ۱۸ درصد و حداکثر کاهش مربوط به ساختمان دوازده طبقه با ۲۵ درصد است.

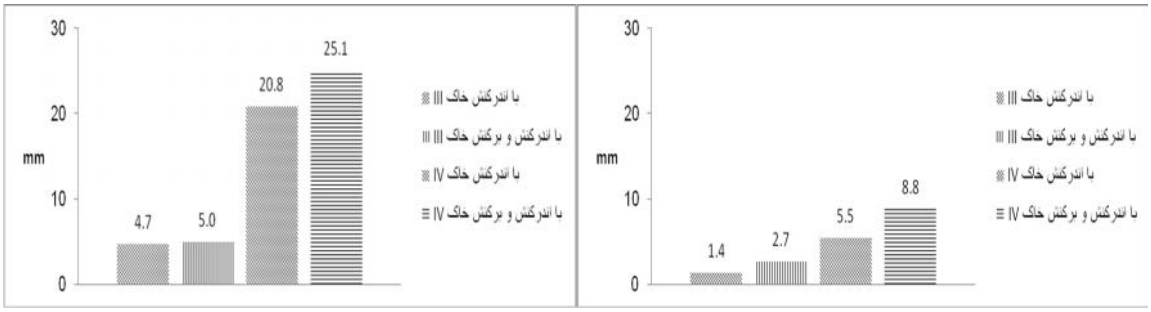
در مدل‌های مهاربندی فولادی و دیوار برشی بتنی مقدار دریفت در تمام طبقات افزایش می‌یابد. هر چه خاک زیر سازه نرم‌تر باشد میـزان اختلاف جابجایی نسبی در دو حالت پایه‌ی صلب و انعطاف‌پذیر در این ساختمان‌ها بیشتر می‌شود. در نظر گرفتن برکنش باعث افزایش این اختلاف می‌گردد. کمترین و بیشترین درصد افزایش به ترتیب ۱۰ و ۷۶ درصد می‌باشد. اگر برکنش در نظر گرفته نشود این مقادیر به ۹ و ۶۰ درصد محدود می‌گردد.

۴-۳- بررسی برکنش

مقادیر بیشینه‌ی برکنش به صورت میانگین زلزله ها برای مدل‌های سه طبقه در شـکل هـای ۱۰ تـا ۱۳ بـرای دو حالـت بـا انـدرکنش و اندرکنش همراه برکنش ارائه شده است.



شکل ۱۰: بیشینه برکنش ساختمان سه‌طبقه قاب خمشی فولادی *شکل ۱۱: بیشینه برکنش ساختمان سه‌طبقه مهاربندی فولادی*

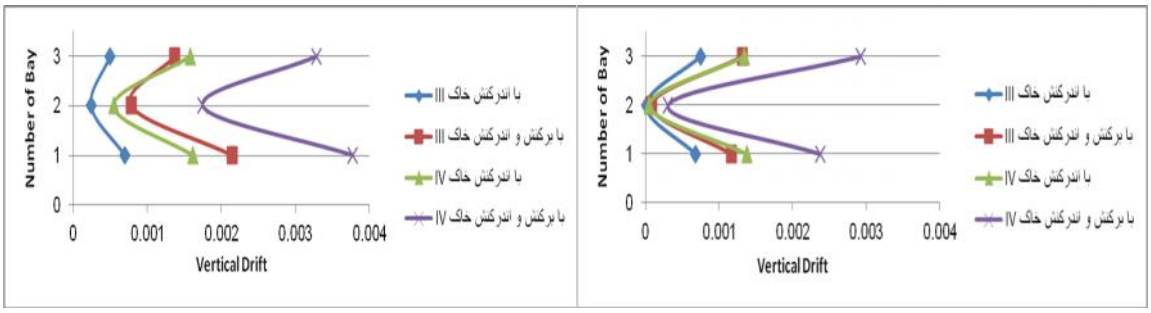


شکل ۱۲: بیشینه برکنش ساختمان قاب خمشی بتنی سه‌طبقه *شکل ۱۳: بیشینه برکنش ساختمان دیوار برشی بتنی سه‌طبقه*

با توجه به شکل‌های فوق می‌توان گفت با افزایش ارتفاع و به طور کلی با افزایش نسبت ارتفاع به عرض ساختمان‌ها، مقدار برکنش افزایش می‌یابد.

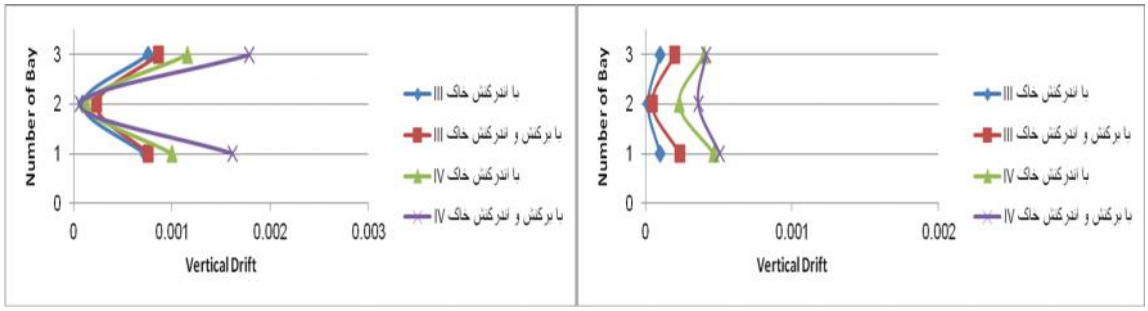
۴-۴- نسبت دریفت قائم

نسبت دریفت قائم ساختمان‌های سه طبقه مورد مطالعه در شکل ۱۴ تا ۱۷ ارائه شده است. مقدار نسبت دریفت قائم از نسبت بیشینه‌ی اختلاف تغییرمکان قائم پای دو ستون مجاور به فاصله بین آنها (طول دهانه) به دست می‌آید. محور افقی نشان‌دهنده‌ی نسبت دریفت هر دهانه‌ی قاب و محور قائم معرف شماره‌ی دهانه (۱، ۲ یا ۳) می‌باشد. تمامی سازه‌ها در دو حالت تکیه‌گاه انعطاف پذیر، با برکنش و بدون برکنش روی دو نوع خاک III و IV آیین نامه به صورت جداگانه نشان داده شده اند.



شکل ۱۴: نسبت دریفت قائم به طول دهانه ساختمان سه طبقه قاب خمشی فولادی

شکل ۱۵: نسبت دریفت قائم به طول دهانه ساختمان سه طبقه مهاربندی فولادی



شکل ۱۶: نسبت دریفت قائم به طول دهانه ساختمان سه طبقه قاب خمشی بتنی

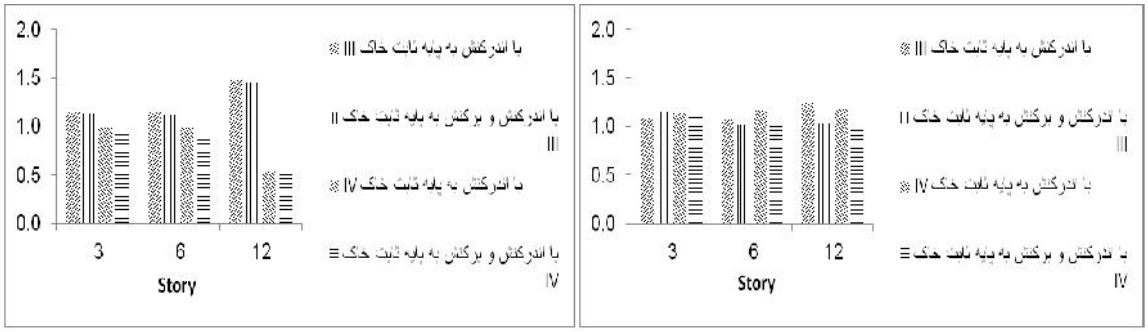
شکل ۱۷: نسبت دریفت قائم به طول دهانه ساختمان سه طبقه قاب خمشی با دیوار برشی بتنی

با توجه به شکل‌های فوق می‌توان گفت نسبت دریفت قائم در مقابل دریفت افقی مقدار کمتری دارد. این اختلاف در ساختمان‌های قاب خمشی فولادی و بتنی بیشتر از ساختمان‌های مهاربندی فولادی و قاب خمشی با دیوار برشی بتنی می باشد. در نظر گرفتن برکنش باعث افزایش بیشتر مقدار دریفت قائم می‌گردد. با توجه به شکل‌های ارائه شده می‌توان گفت هرچه خاک زیر سازه نرم‌تر باشد مقدار دریفت قائم نیز بیشتر خواهد شد. بیشترین مقدار نسبت دریفت قائم برابر 0.009 مربوط به ساختمان دوازده طبقه روی خاک IV می‌باشد. در صورتی که برکنش در نظر گرفته نشود این مقدار به 0.008 کاهش می‌یابد.

۴-۵- چرخش مفاصل خمیری

نتایج مربوط به بیشترین مقدار چرخش مفاصل خمیری ساختمان‌های مورد مطالعه با در نظر گرفتن اندرکنش و اندرکنش همراه برکنش روی دو نوع خاک نسبت به سازه مشابه ولی با پای صلب، در شکل های ۱۸ تا ۲۱ ارائه شده است.

شکل ۱۸: چرخش نسبی مفاصل خمیری قاب خمشی فولادی. *شکل ۱۹: چرخش نسبی مفاصل خمیری ساختمان قاب خمشی بتنی.*



شکل ۲۰: چرخش نسبی مفاصل خمیری مهاربندی فولادی. *شکل ۲۱: چرخش نسبی مفاصل خمیری ساختمان دیوار برشی بتنی.*

در ساختمان‌های واقع روی خاک نوع III با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه و برکنش میزان دوران مفاصل خمیری نسبت به حالت پایه‌ی صلب در طبقات پایین افزایش و در طبقات بالا کاهش می‌یابد. البته هنگامی‌که اندرکنش به‌تنهایی در نظر گرفته شود عملکرد غیرخطی خفیف تری نسبت به حالتی که برکنش نیز برای ساختمان منظور گردد، مشاهده می شود.

در ساختمان‌های مهاربندی فولادی و قاب خمشی با دیوار برشی بتنی مشاهده می‌شود که در ساختمان‌های روی خاک III درنظر گرفتن برکنش و اندرکنش خاک و سازه موجب افزایش دوران مفاصل خمیری هر طبقه در ساختمان‌های ۳ طبقه می‌گردد. این افزایش برای طبقات بالاتر کمتر از طبقات پایین می‌باشد. برای ساختمان‌های ۶ و ۱۲ طبقه این موضوع موجب افزایش مجموع دوران مفاصل خمیری در طبقات پایین (اول و دوم) و کاهش مجموع دوران مفاصل خمیری در طبقات بالایی می‌شود. دلیل این پدیده افزایش تغییر مکان هر طبقه در حالت پایه‌ی انعطاف پذیر نسبت به پایه‌ی صلب می‌باشد. در ساختمان‌های مهاربندی و قاب خمشی با دیوار برشی با خاک IV در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه معمولاً موجب کاهش دوران مفاصل خمیری هر طبقه می‌شود.

در ساختمان‌های واقع بر خاک IV میزان چرخش مفاصل خمیری در ساختمانهای بدون برکنش کاهش پیدا می‌کند. این درحالی‌است که اگر برکنش نیز به همراه اندرکنش منظور گردد مقدار چرخش باز هم کمتر خواهد شد. این امر به دلیل انعطاف‌پذیری بیشتر خاک نوع IV نسبت به خاک نوع III و همچنین نسبت سختی ساختمان‌های با مهاربند و دیوار برشی به‌سختی خاک زیر آن می‌باشد. به همین دلیل در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه و برکنش موجب کاهش دوران مفصل خمیری این سازه‌ها می‌شود.

۵- خلاصه و نتیجه گیری

در این تحقیق با درنظر گرفتن سه ساختمان ۳، ۶ و ۱۲ طبقه قاب خمشی بتنی و فولادی با یا بدون دیوار برشی و مهاربندی تحت زلزله های مناسب روی دو نوع خاک با سختی متوسط و کم به بررسی اثر برکنش و اندرکنش خاک و سازه پرداخته شد. نیروها و تغییر شکل های ساختمان‌ها با در نظر گرفتن سه حالتِ تکیه‌گاه صلب، تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر بدون برکنش و تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر با برکنش محاسبه و مقایسه گردید. موارد زیر به عنوان مهم ترین نتایج این مطالعات ارائه می گردد:

- از مقایسه زمان تناوب سازه‌های با تکیه گاه انعطاف پذیر روی خاک III وIV می‌توان به این نتیجه رسید که سازه‌ای که بر روی خاک IV قرار دارد نسبت به سازه واقع بر خاک III، دارای زمان تناوب بیشتری می‌باشد. به‌طورکلی می‌توان گفت در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه باعث افزایش زمان تناوب می‌گردد که این افزایش در سیستم مهاربندی فولادی و دیوار برشی بتنی به‌مراتب بیشتر از سیستم قاب خمشی بتنی و فولادی می‌باشد.
- در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه موجب افزایش جابجایی نسبی طبقات پایینی ساختمان‌های قاب خمشی و کاهش جابجایی نسبی طبقات فوقانی آن می‌گردد. هنگامی که برکنش در نظر گرفته شود این اثر تشدید می‌گردد. حداکثر مقدار افزایش مربوط به ساختمان سه طبقه با ۴۲ درصد و حداکثر کاهش مربوط به ساختمان دوازده طبقه با ۸۶ درصد می‌باشد. برای حالت بدون برکنش حداکثر مقدار افزایش مربوط به ساختمان سه طبقه با ۱۸ درصد و حداکثر کاهش مربوط به ساختمان دوازده طبقه با ۲۵ درصد است.
- در مدل‌های مهاربندی فولادی و دیوار برشی بتنی مقدار دریفت در تمام طبقات افزایش می‌یابد. هر چه خاک زیر سازه نرم‌تر باشد میزان اختلاف جابجایی نسبی در دو حالت پایه‌ی صلب و انعطاف‌پذیر در این ساختمان‌ها بیشتر می‌شود. در نظر گرفتن برکنش باعث افزایش این اختلاف می‌گردد. کمترین و بیشترین درصد افزایش به ترتیب ۱۰ و ۷۶ درصد می‌باشد. اگر برکنش در نظر گرفته نشود این مقادیر به ۹ و ۶۰ درصد محدود می‌گردد.
- دریفت قائم در مقابل دریفت افقی مقدار کمتری دارد. این اختلاف در ساختمان‌های قاب خمشی فولادی و بتنی بیشتر از ساختمان‌های مهاربندی فولادی و قاب خمشی با دیوار برشی بتنی مشاهده گردید. در نظر گرفتن برکنش باعث افزایش مقدار دریفت قائم می‌گردد. با توجه به شکل‌های ارائه شده می‌توان گفت هرچه خاک زیر سازه نرم‌تر باشد مقدار دریفت قائم نیز بیشتر خواهد شد. بیشترین مقدار نسبت دریفت قائم برابر 0.009 مربوط به ساختمان دوازده طبقه روی خاک IV می‌باشد. در صورتی که برکنش در نظر گرفته نشود این مقدار به 0.008 کاهش می‌یابد.
- در ساختمان‌های قاب خمشی واقع بر خاک نوع III با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه و برکنش، میزان دوران مفاصل خمیری نسبت به حالت پایه‌ی صلب در طبقات پایین افزایش و در طبقات بالا کاهش می‌یابد. البته هنگامی‌که اندرکنش به‌تنهایی در نظر گرفته شود مقدار چرخش مفاصل نسبت به حالت اندرکنش با برکنش بیشتر خواهد شد.

مراجع

"آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله (۱۳۸۴) استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش ۳)، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن

بختیار نصرآبادی ا (۱۳۸۶) برکنش در سازه های بتنی با تکیه گاه انعطاف پذیر، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، پایان نامه کارشناسی ارشد

پویان ف (۱۳۸۱) اثرات پدیده برکنش بر سازه ها، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، پایان نامه کارشناسی ارشد

دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود (۱۳۹۲) نشریه شماره ۳۶۰، دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله

دهقان منشادی (۱۳۸۲) بررسی پدیده برکنش (Uplift) در سازه ها، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

قائد امینی س (۱۳۸۶) بررسی پدیده ی برکنش (Uplift) لرزه ای در شالوده ساختمان فولادی با پای صلب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، پایان نامه کارشناسی ارشد

Harden CW and Hutchinson TC (2009) Beam-on-nonlinear-Winkler-foundation modeling of shallow, rocking-dominated footings, *Earthquake Spectra*, pp. 277–300

Harden CW, Hutchinson T, Martin GR and Kutter BL (2005) Numerical modelling of the nonlinear cyclic response of shallow foundations, *PEER, Report No. 2005/04, Pacific Earthquake Engineering Research Center*

OpenSees (2014) Open system for earthquake engineering simulation, *Pacific Earthquake Engineering Research Center*, PEER, Richmond, CA, USA, http://opensees.berkeley.edu/

Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) Internet website: http://peer.berkeley.edu, Accessed July 2014