

بررسی تأثیر صلبیت دیافراگم کف طبقات بر رفتار ساختمانهای بلند بتنی با دیوارهای برشی ناپیوسته تحت بارگذاری جانبی

داود مستوفی نژاد* و مهدی داوودنابی**

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۷۹/۱۲/۹ - دریافت نسخه نهایی: ۸۰/۱۱/۲)

چکیده - در بیشتر موارد مهندسان محاسب بدون آنکه تشخیص درستی از نحوه عملکرد دیافراگم کف داشته باشند، آن را صلب فرض می‌کنند. اگرچه این فرض در بیشتر موارد قابل قبول است، اما باید دانست که عواملی نیز وجود دارد که می‌توانند این فرضیه را تا حدودی مخدوش کنند. از جمله ساختمانهایی که باید در تحلیل آنها، نسبت به رفتار واقعی دیافراگم توجه خاص شود، ساختمانهای بتنی با دیوارهای برشی ناپیوسته اند. با توجه به اینکه در این سازه‌ها دیوارها بر روی یکدیگر قرار ندارند، لذا نیروی برشی ناشی از بارگذاری زلزله، توسط دیافراگم کف به دیوارهای تراز پایینتر انتقال داده می‌شود. بنابراین بررسی صلبیت دیافراگم کف در این سازه‌ها، به خصوص در طبقات پایین ساختمان، از اهمیت خاصی برخوردار است. در این مطالعه، به منظور بررسی اثر صلبیت دیافراگم کف در این سازه‌ها، پارامترهایی همچون، تعداد طبقات، نسبت طول به عرض ساختمان، ضخامت دیوارها و دیافراگم کف، در ساختمانهای بتنی با اشکال پلان مستطیلی و I شکل در نظر گرفته شده‌اند. کلیه تحلیلها به صورت دینامیکی طیفی، بر اساس طیف شتاب پیشنهادی استاندارد ۲۸۰۰ و با استفاده از نرم افزار ANSYS 5.4 صورت گرفته است. نحوه رفتار این سازه‌ها و مقایسه پاسخهای حالت دیافراگم صلب و انعطاف پذیر در مورد فرکانسها، حداکثر تغییر مکانها، برش دیوارها و ستونها، از جمله نتایج این تحقیق است.

واژگان کلیدی: بتن آرمه، دیوار برشی ناپیوسته، سیستم باربر، دیافراگم کف، صلبیت

Investigation of the Rigidity of Floor Diaphragms on the Behavior of Concrete Tall Buildings with Staggered Shear Walls under Lateral Loading

D. Mostofinejad and M. Davoodnabi

Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology

Abstract: *In most cases, structural engineers assume a concrete floor to be a rigid diaphragm. Although this simplification is in most cases acceptable, it should be noted that such an assumption may be distrusted due to certain problems. Concrete structures with staggered shear walls are among those whose analysis should be conducted with special concern for the*

** - کارشناسی ارشد

* - استادیار

behavior of their floor diaphragms. However, in the structures with staggered shear walls, the horizontal shear due to lateral loads is transmitted to the lower stories through the floor diaphragm since the walls are not usually located over each other in consecutive stories. Therefore, the rigidity of the floor diaphragm is of great importance. In the present study, a parametric analysis was performed to investigate the effect of the rigidity of the floor diaphragm on the load-carrying procedure of the structures with staggered shear walls. The investigated parameters were the number of stories, the ratio of length to width of the plan, and the thickness of walls and diaphragms. Furthermore, the study was carried out for both rectangular and I-shape plans. All analyses were dynamically performed by ANSYS 5.4 using acceleration spectrum recommended by Iranian Building Code Standard No. 2800. Finally, the behavior of these structures and comparison of the frequencies, the maximum lateral displacements and the shear in the walls and columns as the responses of rigid and flexible diaphragms were highlighted and outlined.

Keywords: Reinforced concrete, staggered shear wall, load carrying system, floor diaphragm, rigidity.

۱- مقدمه

واقعی دیافراگم نیز می‌تواند باعث ایجاد خطاهای عمده در تحلیل و طراحی اعضای VLLR شود. به منظور بررسی عوامل مؤثر در صلبیت دیافراگم کف، تحقیقات گسترده‌ای صورت گرفته است. در تمامی این تحقیقات، نتایج مدلسازی سازه به دو نوع مختلف بررسی شده است. روش اول با توجه به فرض صلب بودن دیافراگم‌ها و مدلسازی آن از طریق ایجاد گره مرجع^۱ و گره‌های وابسته^۲ در تراز سقفها، و روش دوم مبتنی بر مدلسازی سازه با استفاده از مفاهیم اجزای محدود و مدلسازی کامل دیافراگم کف با المان SHELL است.

در تحقیقی که توسط صفارینی و کودیمات در سال ۱۹۹۲ انجام گرفت، یک ساختمان مستطیل شکل با ابعاد ۱۶×۴ متر با پنج دیوار برشی پیوسته به فاصله ۴ متر از یکدیگر در نظر گرفته شد. نتایج تحلیلها نشان دهنده این مطلب است که با افزایش نسبت ارتفاع به طول ساختمان، رفتار دیافراگم‌ها به حالت صلب نزدیکتر می‌شود و توزیع برش بین دیوارها به نسبت سختی میان آنها صورت می‌گیرد. در ساختمان مورد مطالعه در حالت قبل، با افزایش تعداد طبقات ساختمان، مشاهده شد که دیافراگم‌ها رفتار صلب از خود نشان می‌دهند. همچنین ملاحظه شد که میزان خطا در نیروهای برشی و تغییرمکانها، حاصل از تحلیل ساختمان با کفهای صلب و تحلیل آن با روش اجزای محدود، در ساختمانهای بلندتر از چهار طبقه، بسیار اندک است [۱].

در این زمینه تحقیق دیگری نیز بر روی ساختمانهای بتنی بدون دیوار برشی و با اشکال U و T، توسط جو و لین در سال

یک سازه از اجزای مختلفی تشکیل شده است که در صورت ایجاد اتصالات صحیح میان آنها، می‌توان شاهد عملکرد یکپارچه سیستم در مقابل هرگونه بارگذاری بود. از اجزای اصلی یک سیستم باربر، می‌توان به کف طبقات و بام اشاره کرد. علاوه بر تحمل بار ثقلی، جمع آوری نیروهای جانبی در ترازهای مشخص و توزیع مناسب آنها بین اعضای دستگاہ قائم مقاوم در برابر بار جانبی (VLLR)^۲، از دیگر وظایف کفهای ساختمان است. اعضای VLLR که وظیفه انتقال نیروهای جانبی به زمین را عهده‌دارند، توسط کفهای طبقات، به منظور ایجاد رفتار یکپارچه در مقابل بارگذاری جانبی، به یکدیگر متصل می‌شوند؛ لذا کفهای طبقات که برای تحمل بار ثقلی طراحی شده‌اند، به عنوان یک دیافراگم افقی با سختی محوری در داخل صفحه دیافراگم^۳، برای انتقال نیروهای افقی به اعضای VLLR نیز به کار می‌روند. رفتار دیافراگم کف تحت بارگذاری جانبی، همانند رفتار یک تیر عمیق بر روی تکیه‌گاههایی با سختی مشخص است. برای تعیین نیروهای برشی و گشتاورهای خمشی داخل صفحه دیافراگم، می‌بایست از یک تحلیل سه بعدی، مبتنی بر مدلسازی اعضای VLLR استفاده کرد. علی‌رغم وجود چنین تحلیلهایی، با استفاده از فرضیات ساده‌ای که مبتنی بر علم مکانیک جامدات است، می‌توان نیروهای داخل صفحه دیافراگم و نحوه توزیع نیروهای جانبی بین اعضای VLLR را مشخص کرد. واضح است که دقت نتایج به دست آمده، بستگی به میزان صحت فرضیات انجام شده دارد. اگرچه این روشهای ساده شده تا حدودی محافظه‌کارانه‌اند، ولی صرف نظر کردن از رفتار

۱۹۹۹ صورت گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که خطایی کوچکتر از ده درصد در لنگر خمشی ستونها، بین تحلیل ساختمانها با فرض دیافراگم صلب و انعطاف‌پذیر ایجاد می‌شود. از عوامل مهم که در فرض صلبیت دیافراگم‌ها به صورت عمده تأثیرگذار است، ابعاد و موقعیت دیوارهای برشی است. در ساختمانهای مربع شکل ۵ طبقه همراه با دیوار برشی پیوسته در دو انتهای پلان که توسط جو و لین مورد مطالعه قرار گرفت، میزان خطای ناشی از تحلیل بر اساس مدل دیافراگم صلب با مدل اجزای محدود در لنگر خمشی ستونها، بزرگتر از سی درصد عنوان شده است [۲].

۲- معرفی سیستم دیوارهای برشی ناپیوسته

از عوامل مهم و مؤثر بر انتخاب سیستم باربر سازه‌ای، کاربری ساختمان است. در ساختمان‌های تجاری-اداری جدید، نیاز به فضاهای باز بزرگ است تا متناسب با نیازهای استفاده‌کنندگان، توسط پانلهای سبک تقسیم‌بندی و فضا سازی شوند. لذا می‌بایست اعضای قائم سازه‌ای تا حد امکان به دور از یکدیگر و در پیرامون ساختمان، کنار آسانسورها، پله‌ها، سرویسها و نورگیرها قرار گیرند. در مقابل، در ساختمانهای مسکونی و هتلها، معمولاً فضا سازی‌های داخلی به صورت دائم بوده و در طبقات ساختمان تکرار می‌شوند؛ لذا می‌توان ستونها را در کنار تیغه‌بندیهای داخلی قرار داد.

از دیگر عوامل مهم در انتخاب نوع سیستم باربر، امکان تحمل بارهای قائم زنده و مرده، بارهای جانبی و پیچش ناشی از خروج از مرکزیت مراکز جرم و سختی در تراز تمام طبقات، با مقاومت و سختی مناسب است. در بعضی از انواع سیستمهای باربر، می‌توان با جایگزینی اعضای قائم در نقاط مناسب، تنشهای فشاری ناشی از بارهای قائم را بر تنشهای کششی ناشی از بارهای جانبی حاکم، و از ایجاد کشش در اعضای قائم و پی‌ها جلوگیری کرد.

آنچه بیش از هر چیز لزوم به کارگیری سازه‌های با دیوارهای برشی ناپیوسته را ایجاب می‌کند، رفع محدودیت‌های

معماری و برخی مشکلات سازه‌ای است. از طرفی مسئله ایمن بودن این سازه‌ها در برابر بارگذاری جانبی، با ساخت سازه‌های مختلف از این نوع اثبات شده است [۳ و ۴].

در سیستم سازه‌ای دیوارهای برشی ناپیوسته، دیوارها بر روی یکدیگر قرار نداشته و در تراز هر طبقه قطع شده و به صورت منظم به قابهای مجاور (مطابق با شکل‌های (۱) و (۲)) انتقال می‌یابند. استفاده از این سیستم باربر در ساختمانهایی نظیر هتلها، مدارس و ادارات که دارای پلان طبقات تیب بوده و نسبت طول به عرض ساختمان در آنها قابل توجه است، مناسب است. اما از آنجایی که در این ساختمانها، دیوارهای برشی به صورت ناپیوسته‌اند، و برش طبقات ناشی از بارگذاری جانبی توسط دیافراگم کف به دیوارهای ترازهای پایینتر منتقل می‌شود، می‌بایست به تحلیل و طراحی دیافراگم کف طبقات، به خصوص در طبقات پایین ساختمانهای بلند، توجه خاصی شود. علی‌رغم اینکه استاندارد ۲۸۰۰ [۵] نسبت به طرح و کاربرد ساختمانهای با دیوار برشی ناپیوسته با دیده تردید نگاه کرده، با این حال با یک طرح درست و منطقی می‌توان از این نوع ساختمانها استفاده مناسب کرد.

۳- مشخصات ساختمانهای مورد مطالعه در این

تحقیق

مشخصات ساختمانهای مورد تحلیل در این تحقیق به صورت زیر است:

۳-۱- شکل و ابعاد پلانها

با توجه به اینکه استفاده از سیستم دیوار برشی ناپیوسته در ساختمانهای با پلان طبقات تیب، مانند: هتلها، مدارس و ادارات، مناسبتر است، لذا در این تحقیق، پلان ساختمانها به صورت مستطیل باریک در نظر گرفته شده‌اند. شکل (۱) پلانهای مفروض برای انجام تحلیلها را نشان می‌دهد. هر پلان با دو نسبت طول به عرض ۴ و ۶، با فرض ابعاد ۶۰×۱۵ متر و ۹۰×۱۵ متر مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۲- تعداد طبقات، ارتفاع طبقات و فاصله ستونها

از آنجا که فرکانس ارتعاش سازه، رابطه مستقیم با ارتفاع آن دارد، لذا به منظور در نظر گرفتن اثرات فرکانسهای مختلف در تحلیلها و پوشش دامنه فرکانسی طیف شتاب مورد استفاده برای تحلیل دینامیکی طیفی، تعداد طبقات ساختمانهای مورد مطالعه در این تحقیق، به ترتیب برابر با ۵، ۱۵ و ۲۵ فرض شده‌اند. همچنین به منظور ایجاد کاربری مناسب برای این ساختمانها، در کلیه تحلیلها ارتفاع طبقات به صورت ثابت برابر با ۳/۵ متر و فاصله ستونها برابر ۵ متر فرض شده است.

۳-۳- نحوه قرارگیری دیوارها به صورت ناپیوسته

اگرچه حالت‌های گوناگونی را می‌توان برای قرارگیری دیوارها در این گونه از ساختمانها متصور شد، با این حال سعی شده است تا حالت‌هایی مورد بررسی قرار گیرند که توجیه معماری مناسب داشته و از طرفی بتوانند به عنوان یک سیستم ساختمانی مورد قبول، قابلیت تحمل بار قائم و جانبی را نیز داشته باشند. فاصله دیوارها در این تحقیق برابر با ۱۰ متر، مطابق شکل (۲) در نظر گرفته شده است.

۳-۴- ابعاد مقاطع

جدول (۱)، ابعاد مقاطع تیر و ستونهای مورد استفاده در ساختمانهای ۵، ۱۵ و ۲۵ طبقه را که بر اساس یک تحلیل تقریبی به دست آمده‌اند، نشان می‌دهد.

۴- بارگذاری

اعمال بارهای قائم و سربارها براساس استاندارد ۵۱۹ [۶] و به شرح زیر صورت گرفته است:
الف) وزن مخصوص بتن مصرفی در دالها، دیوارها، تیرها و ستونها برابر 2400 kg/m^3 در نظر گرفته شده است.
ب) سربار طبقات برابر 215 kg/m^2 می‌باشد که تنها ۲۰ درصد از آن در محاسبات دینامیکی لحاظ شده است.

ج) بار تیغه‌بندی و جداسازهای داخلی طبقات، با فرض تیغه‌بندی از نوع متوسط برابر 130 kg/m^2 است.
د) بار دیوارهای خارجی ساختمان با فرض استفاده از آجر مجوف برابر 850 kg/m^3 فرض شده است.
ه) مدول الاستیسیته بتن برابر $2 \times 10^9 \text{ kg/m}^2$ و ضریب پواسون برابر ۰/۱۷ در نظر گرفته شده است.

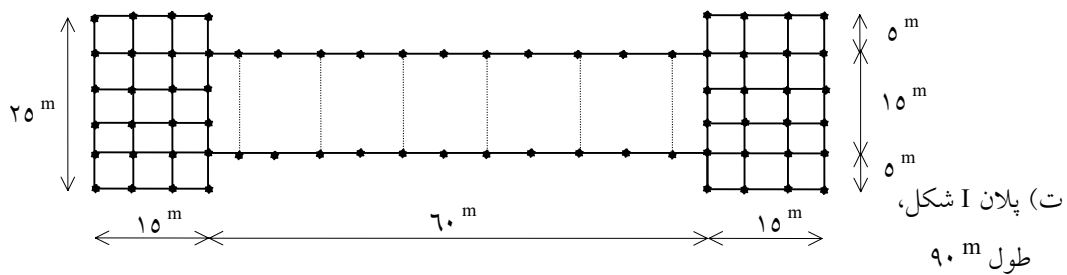
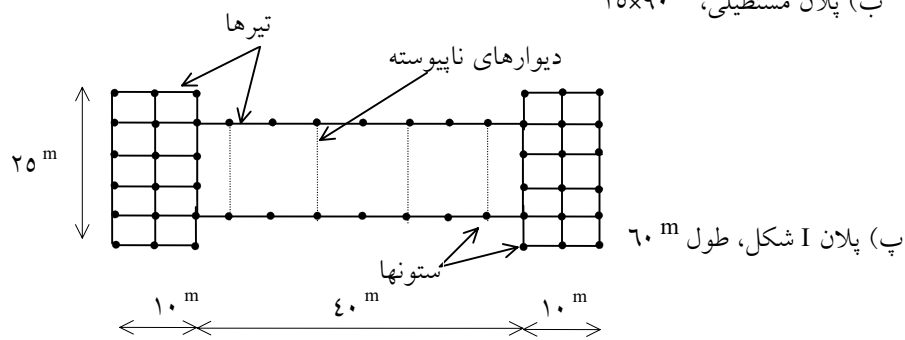
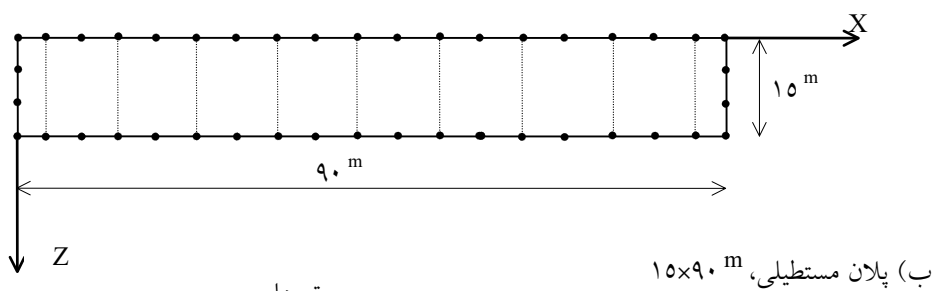
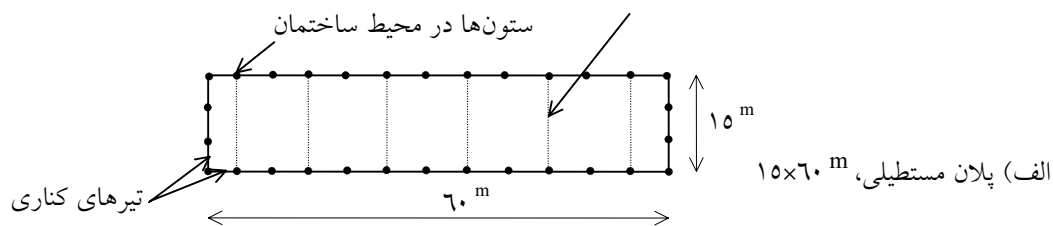
۵- نحوه انجام تحلیل

از آنجایی که ساختمانهای مفروض در این تحقیق، جزو ساختمانهای نامنظم در پلان هستند، لذا از تحلیل دینامیکی طیفی به همراه استفاده از طیف شتاب مندرج در پیوست شماره ۳ استاندارد ۲۸۰۰، برای یافتن پاسخ سازه‌ها استفاده شده است. به منظور ترکیب حداکثر پاسخ مودهای مختلف نیز از روش CQC^2 استفاده شده است. همچنین نیروی زلزله مطابق شکل (۱)، در جهت Z بر سازه‌ها اثر می‌کند. کلیه تحلیل‌های انجام شده در این مطالعه، توسط نرم‌افزار ANSYS 5.4 صورت گرفته است. برای مدلسازی تیرها و ستونها در این نرم‌افزار، از المان BEAM4، و برای مدلسازی دیوارهای برشی ناپیوسته و دیافراگم کف، از المان SHELL63 استفاده شده است. همچنین برای منظور کردن جرم و ممان اینرسی جرمی در حالت تحلیل ساختمان با دیافراگم کف صلب، از المان MASS21 [۷] استفاده شده است.

ذکر این نکته ضروری است که رفتار غیر خطی اجزای بتن آرمه و لحاظ کردن ترک خوردگی بتن، تاثیر بسزایی در نتایج تحلیل خواهد گذاشت. از طرفی تحلیل‌های غیر خطی در مورد اجزای بتن آرمه هم نیاز به تجربه فراوان، و هم نیاز به صرف وقت بسیار زیاد دارد؛ به صورتی که شاید تحلیل غیر خطی کامل فقط یکی از ساختمانهای مورد بحث در این تحقیق با وجود هزاران درجه آزادی، از نظر امکان همگرایی و نیز زمان لازم بر اساس قدرت رایانه‌های در دسترس، عملاً بسیار دشوار بنظر برسد. در این تحقیق، کلیه تحلیلها بصورت خطی انجام گرفته است. در این ارتباط متذکر می‌شود که اگر چه مقادیر

جدول ۱- ابعاد مقاطع تیر و ستون فرض شده برای تحلیل ساختمانهای مورد بررسی

تعداد طبقه	طبقات	ابعاد ستون (cm)	ابعاد تیر (cm)
۵	۱ تا ۵	۴۰×۴۰	۳۰×۵۰
	۶ تا ۱۰	۷۰×۷۰	۴۰×۷۰
	۱۱ تا ۱۵	۵۰×۵۰	۳۰×۶۰
۲۵	۱ تا ۵	۹۰×۹۰	۵۰×۸۰
	۶ تا ۱۰	۸۰×۸۰	۴۰×۸۰
	۱۱ تا ۱۵	۷۰×۷۰	۴۰×۷۰
	۱۶ تا ۲۰	۵۰×۵۰	۴۰×۶۰
	۲۱ تا ۲۵	۴۰×۴۰	۳۰×۶۰



شکل ۱- پلان ساختمانهای مستطیلی و I شکل با دو نسبت طول به عرض متفاوت

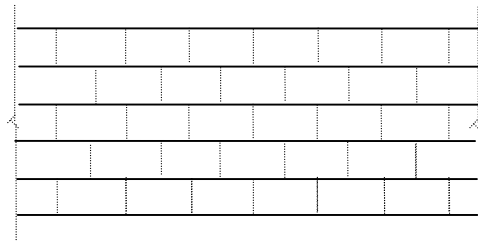
متر است. همچنین فاصله ستونها از یکدیگر برابر ۶ متر فرض شده است.

(ب) ابعاد ستونها و تیرها به ترتیب برابر 80×80 و 80×50 سانتیمتر است. ضخامت دال بتنی کف نیز برابر ۱۲ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. (در این نمونه، دیافراگم کف توسط المان SHELL63 مدل شده است.)

در شکل (۴)، مقایسه بین پاسخ مرجع فوق‌الذکر و پاسخ نرم‌افزار برای نیروی برشی ستون C در مختصات $X=24$ و $Z=12$ متر انجام شده است. این مقایسه تطابق خوب بین نتایج دو تحلیل را نشان می‌دهد.

۷- بررسی صلبیت دیافراگم کف

با توجه به اینکه در ساختمانهای با دیوارهای برشی ناپیوسته، انتقال نیروهای برشی ناشی از بارگذاری جانبی از پای یک دیوار به سوی دیوارهای مجاور در ترازهای پایینتر، از طریق دیافراگم کف صورت می‌گیرد، لذا مسئله صلبیت دیافراگم، به خصوص در طبقات پایین ساختمان، از اهمیت خاصی برخوردار است. به منظور بررسی اثر صلبیت دیافراگم کف در این سازه‌ها، اثر پارامترهایی همچون، تعداد طبقات، نسبت طول به عرض ساختمان، و ضخامت دیوارها و دیافراگم کف مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین برای شکل پلان این ساختمانها، دو حالت مستطیلی و I شکل، در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که مدلسازی ساختمانها در دو حالت، الف) دیافراگم کف انعطاف‌پذیر و مدلسازی آن با المانهای SHELL و ب) دیافراگم کف صلب و مدلسازی آن از طریق تعریف گره مرجع و گره‌های وابسته در کف هر طبقه و وابسته کردن درجات آزادی گره‌های وابسته به گره مرجع (مطابق شکل (۱)، درجات آزادی انتقالی در جهت X و Z، و درجه آزادی دورانی حول محور Y) صورت گرفته است. به منظور انجام این بررسی، ضخامت دال کف در چهار حالت (۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتیمتر) و ضخامت دیوارها نیز در چهار حالت (۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ سانتیمتر) بصورت متغیر فرض شده‌اند. لذا برای یک



شکل ۲- نمای کلی نحوه قرارگیری دیوارهای برشی به صورت ناپیوسته، با فاصله ۱۰ متر در تراز هر طبقه

عددی جوابها با رفتار واقعی سازه تطابق کامل ندارد، با این وجود روند کلی جوابها از نظر مقایسه با یکدیگر به صورتی که در این تحقیق مورد استفاده قرار می‌گیرد، قابل اعتماد خواهد بود.

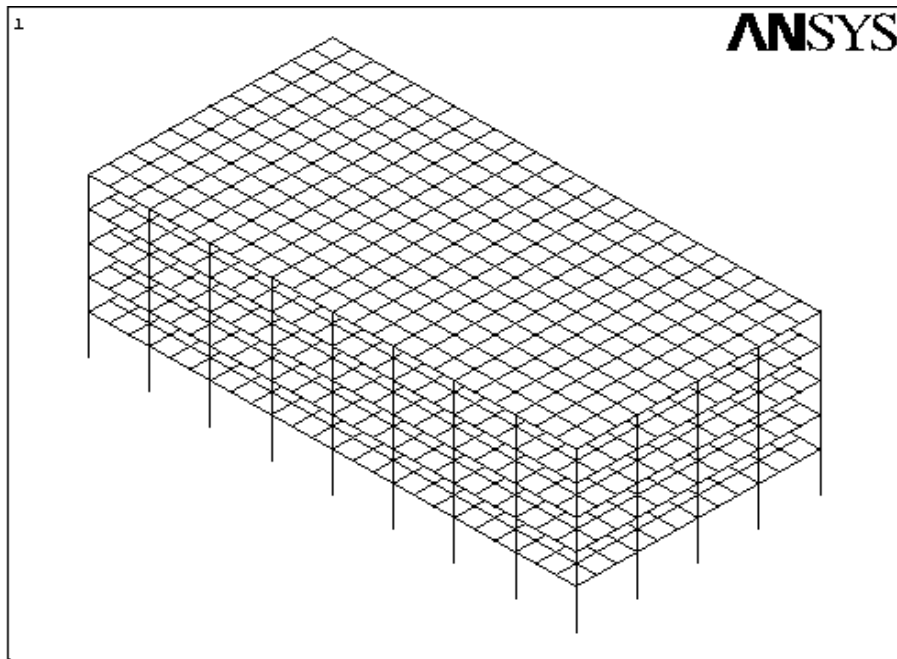
۶- کنترل درستی نحوه مدلسازی و بررسی صحت

تحلیل با نرم افزار

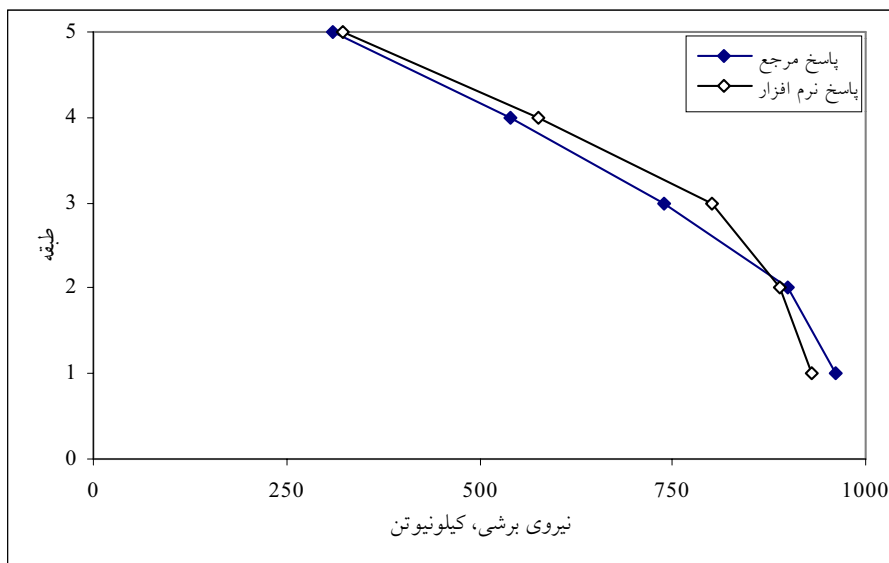
با توجه به اینکه استفاده از نرم‌افزار ANSYS 5.4 در مرحله مدلسازی و تحلیل، ویژه‌گیهای خود را داراست، لذا به منظور نشان دادن درستی مدلسازی در نرم‌افزار، و اطمینان از صحت پاسخهای به دست آمده در این تحقیق، یک نمونه از مسائل حل شده در مرجع [۳]، توسط این نرم‌افزار مورد تحلیل مجدد قرار گرفته است که در ادامه به آن اشاره خواهد شد. همچنین از آنجایی که در حل یک مسئله اجزای محدود باید با کوچکتر کردن ابعاد المانها تا یک حد قابل قبول، همگرایی پاسخها نظیر فرکانسها، تغییر مکانها، نیروها، ... حاصل شود، لذا پس از یک بررسی کامل که از ذکر آن خودداری می‌شود، شبکه المان با ابعاد مناسب برای انجام تحلیلهای انتخاب شده است.

برای بررسی درستی مدلسازی در نرم‌افزار، یک ساختمان ۵ طبقه بتنی که در مرجع [۳] به صورت شبه دینامیکی تحلیل شده، مورد بررسی قرار گرفته است. این ساختمان سه بعدی مطابق با شکل (۳) و با مشخصات زیر، تحت اثر طیف شتاب ناشی از زلزله El Centro قرار گرفته است.

الف) ارتفاع طبقه اول برابر ۴ متر و ارتفاع سایر طبقات برابر ۳



شکل ۳- ساختمان ۵ طبقه بتنی مورد تحلیل در مرجع [۳] همراه با مدلسازی دیافراگم کف توسط المان SHELL63



شکل ۴- مقایسه نیروی برشی ستون C بر اساس پاسخ مرجع [۳] و پاسخ نرم افزار ANSYS 5.4

زیاد بودن نتایج تحلیلها، در این مقاله تنها به ذکر چند نمونه از پاسخهای به دست آمده اکتفا می کنیم. در این مقاله برای اختصار، ۱۱ نمونه از کل ساختمانهای تحلیل شده مطابق جدول (۲) انتخاب شده و نتایج تحلیل آنها ارائه شده است. مقایسه پاسخهای ناشی از دو حالت مدلسازی،

ساختمان با ابعاد و شکل پلان مشخص، ۱۶ عدد تحلیل صورت گرفته است. لازم به ذکر است که در این تحقیق بر اساس دو نسبت طول به عرض متفاوت پلان (۴ و ۶)، ۳ تعداد طبقات (۵، ۱۰ و ۱۵)، و نیز ۲ شکل پلان (مستطیلی و I شکل)، تعداد کل تحلیلهای انجام شده برابر ۳۲۰ عدد است که با توجه به

جدول ۲- مشخصات نمونه‌های انتخاب شده از ساختمانهای مورد تحلیل با دیوارهای برشی ناپیوسته

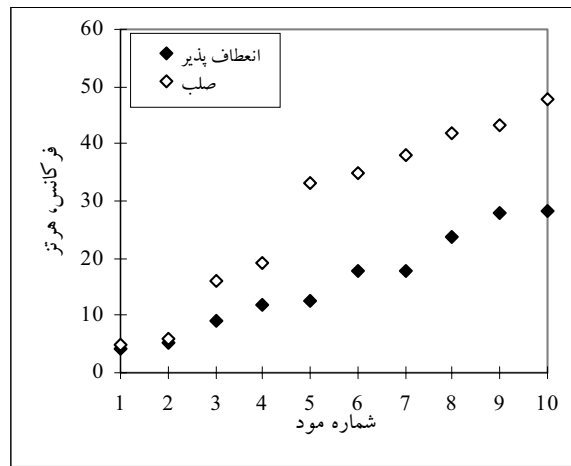
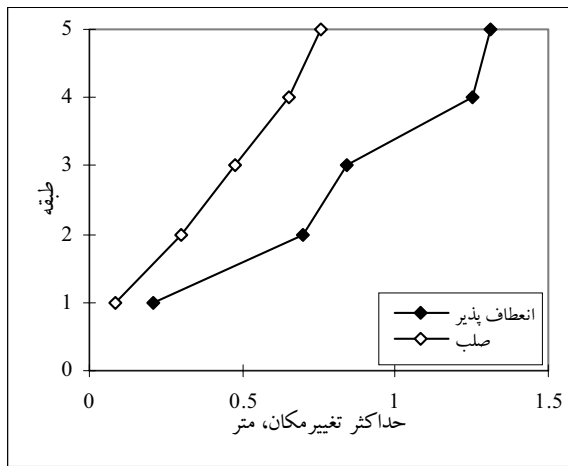
شماره نمونه	شکل پلان	نسبت ابعاد پلان	تعداد طبقات	ضخامت دال کف (cm)	ضخامت دیوار برشی ناپیوسته (cm)	شماره منحنیهای مربوطه
۱	مستطیلی	۴	۵	۵	۱۰	(۵) و (۶)
۲	مستطیلی	۴	۵	۱۵	۱۰	(۷) و (۸)
۳	مستطیلی	۴	۵	۲۰	۱۰	(۹) و (۱۰)
۴	مستطیلی	۴	۲۵	۵	۱۵	(۱۱) و (۱۲)
۵	مستطیلی	۴	۲۵	۲۰	۱۵	(۱۳) و (۱۴)
۶	مستطیلی	۴	۱۵	۲۰	۱۰	(۱۵) و (۱۶)
۷	مستطیلی	۴	۱۵	۲۰	۲۵	(۱۷) و (۱۸)
۸	I شکل	۴	۲۵	۱۵	۱۰	(۱۹) و (۲۰)
۹	I شکل	۴	۲۵	۱۵	۲۵	(۲۱) و (۲۲)
۱۰	مستطیلی	۶	۵	۱۰	۱۰	(۲۳) و (۲۴)
۱۱	I شکل	۶	۱۵	۱۵	۲۵	(۲۵) و (۲۶)

در مورد حداکثر تغییر مکان طبقات، فرکانسها، و برش دیوارها، ستونها و طبقه، بررسی و در حالت‌های مختلف ارائه شده است.

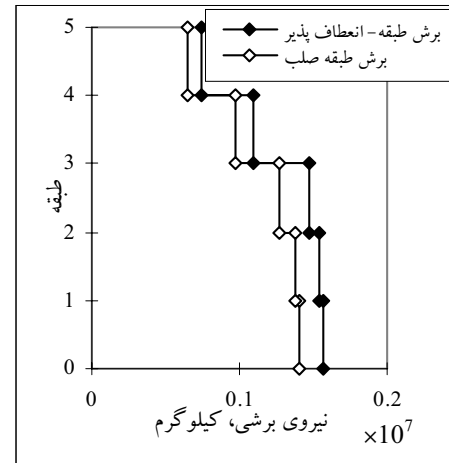
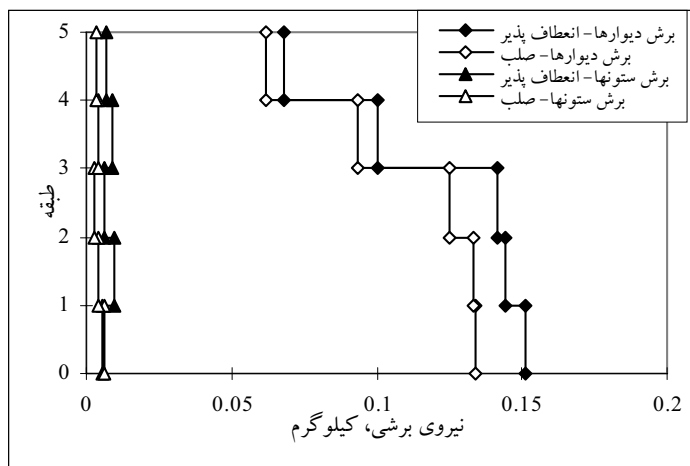
۷-۱- بررسی تأثیر ضخامت دیافراگم کف

برای بررسی تأثیر ضخامت دیافراگم کف بر روی نتایج تحلیل دینامیکی ساختمانهای با دیوارهای برشی ناپیوسته، ۵ نمونه پاسخ از ساختمانهای با پلان مستطیلی انتخاب شده است. همان گونه که در جدول (۲) ملاحظه می شود، نمونه های ۱ تا ۳ مربوط به ساختمانهای ۵ طبقه با ضخامت دیوار برشی ناپیوسته ثابت (برابر با ۵ cm) است، که ضخامت دیافراگم کف در آنها به ترتیب برابر با ۵، ۱۵ و ۲۵ cm در نظر گرفته شده است. همچنین نمونه های ۴ و ۵ مربوط به ساختمانهای ۲۵ طبقه با ضخامت دیوار برشی ناپیوسته ثابت (برابر با ۱۵ cm) است، که ضخامت دیافراگم کف در آنها به ترتیب برابر با ۵ و ۲۰ cm در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از تحلیل این ۵ نمونه ساختمان، به صورت مقایسه حداکثر تغییر مکان طبقات و فرکانسها، و نیز برش دیوارها، ستونها و برش کل طبقه، در

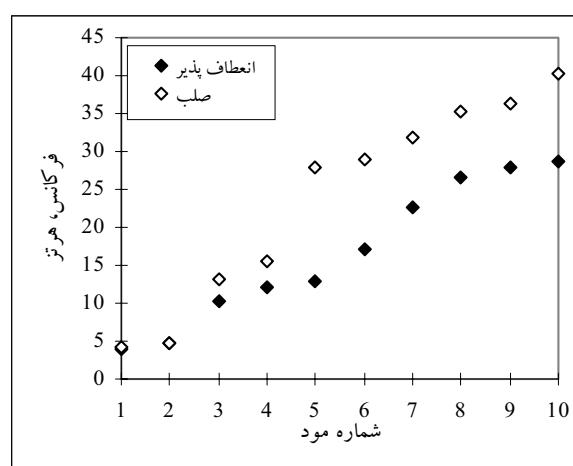
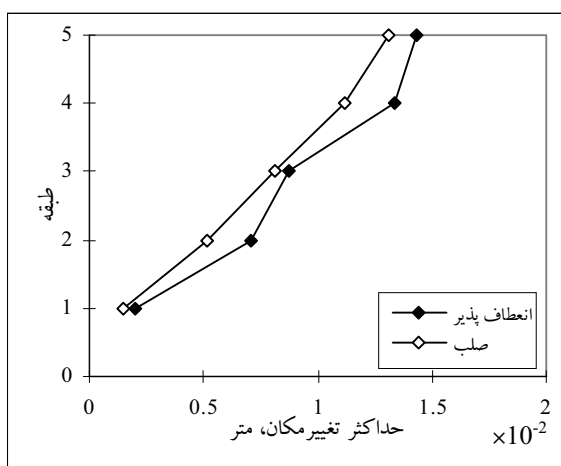
شکلهای ۵ تا ۱۴ ارائه شده است. لازم به ذکر است که منظور از برش دیوارها و ستونها در کلیه نمودارها، به ترتیب مجموع نیروی برشی پای دیوارها و ستونها در تراز طبقات، و منظور از برش طبقه نیز مجموع برش دیوارها و ستونها در هر طبقه است. از بررسی کلیه منحنیهای فوق مشخص می شود که افزایش ضخامت دال، باعث افزایش صلبیت دیافراگم کف، کاهش فرکانسهای ارتعاشی و افزایش تغییر مکانها می شود. همچنین ملاحظه می شود که در اثر افزایش جرم سازه، که ناشی از افزایش ضخامت دال کف است، نیروی برش طبقات علی‌رغم کاهش فرکانسهای ارتعاشی، افزایش یافته است. با توجه به اینکه مشخصات دینامیکی سازه نظیر جرم و سختی در هر دو حالت مدلسازی سازه با دیافراگم‌های صلب و انعطاف پذیر یکسان است، لذا در ساختمانهای بلند مشاهده می شود که علی‌رغم وجود اختلاف بین نیروی برشی ستونها و دیوارها در هر دو حالت مدلسازی، نیروی برش طبقه در هر دو مدل تقریباً یکسان است. همچنین مقدار خطای بین نیروی برشی ستونها و دیوارها ناشی از تحلیل سازه با دیافراگم‌های صلب و انعطاف پذیر



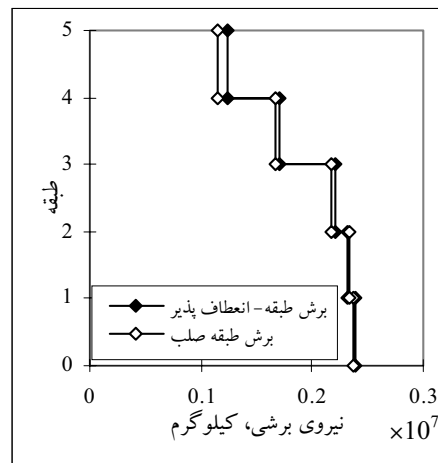
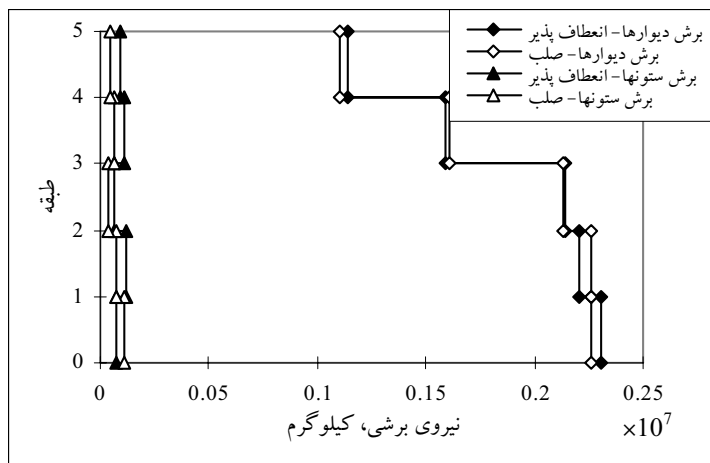
شکل ۵- مقایسه حداکثر تغییر مکانها و فرکانسها در تحلیل سازه با فرض دیافراگم‌های صلب و انعطاف‌پذیر، نمونه ۱



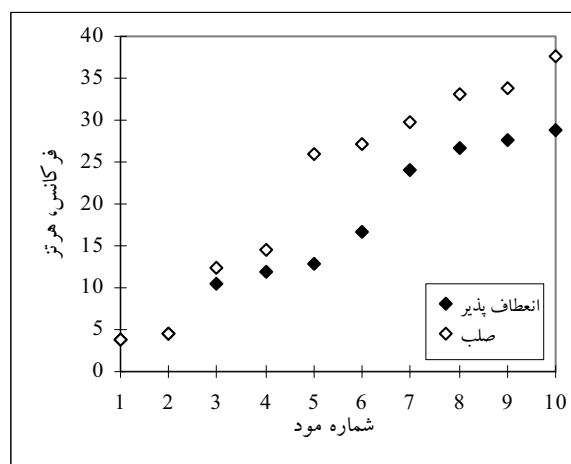
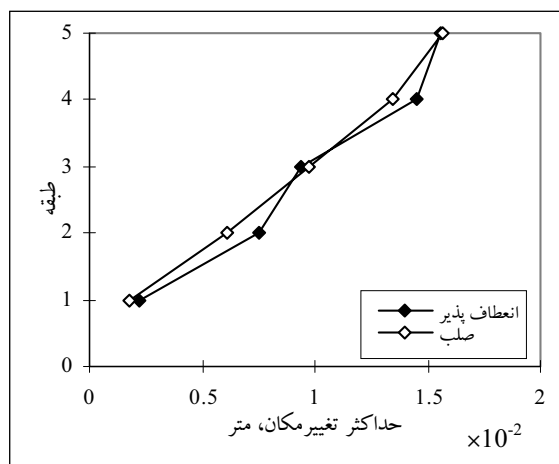
شکل ۶- مقایسه نیروی برشی دیوارها، ستونها و طبقه در تحلیل سازه با فرض دیافراگم‌های صلب و انعطاف‌پذیر، نمونه ۱



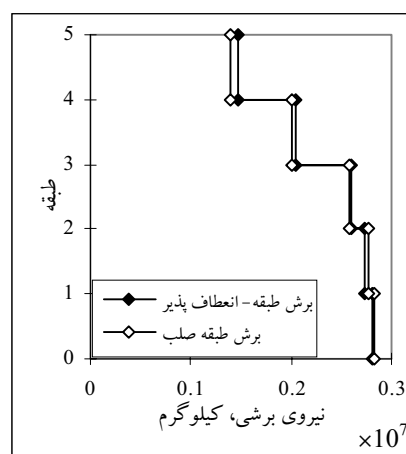
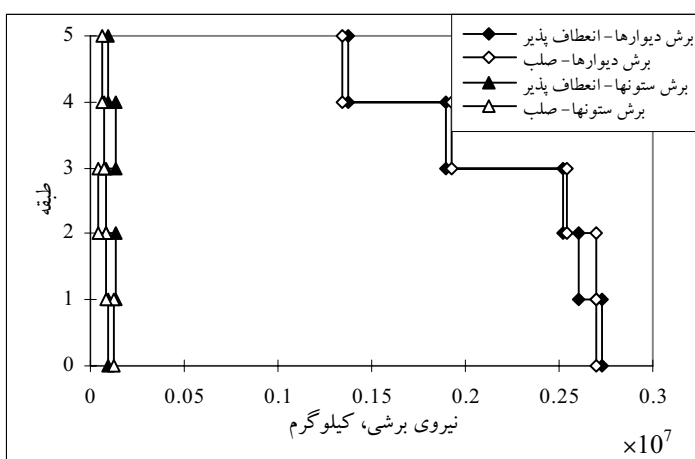
شکل ۷- مقایسه حداکثر تغییر مکانها و فرکانسها در تحلیل سازه با فرض دیافراگم‌های صلب و انعطاف‌پذیر، نمونه ۲



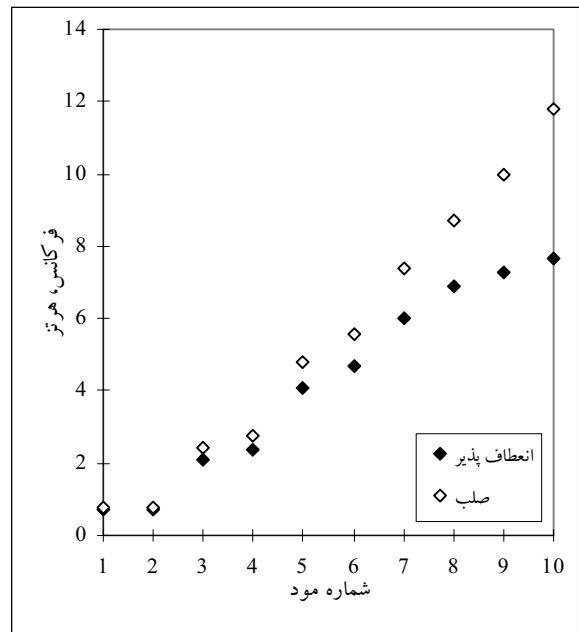
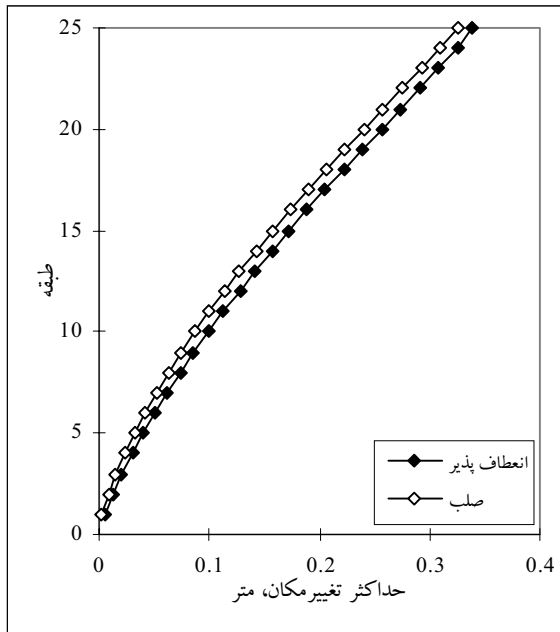
شکل ۸- مقایسه نیروی برشی دیوارها، ستونها و طبقه در تحلیل سازه با فرض دیافراگم‌های صلب و انعطاف‌پذیر، نمونه ۲



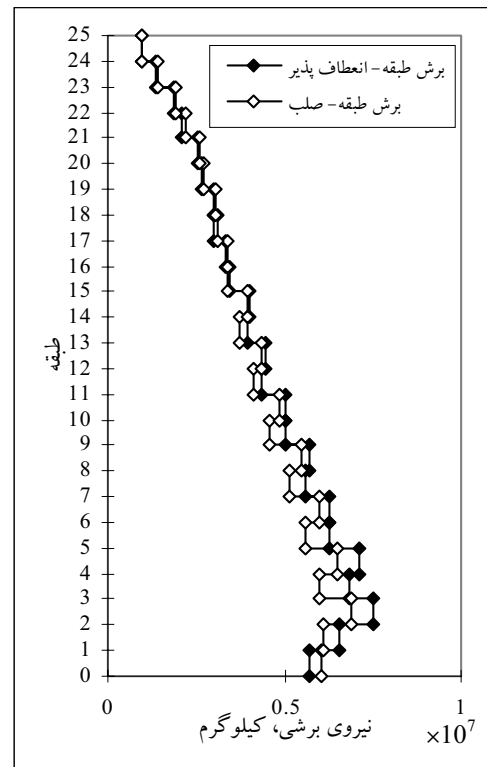
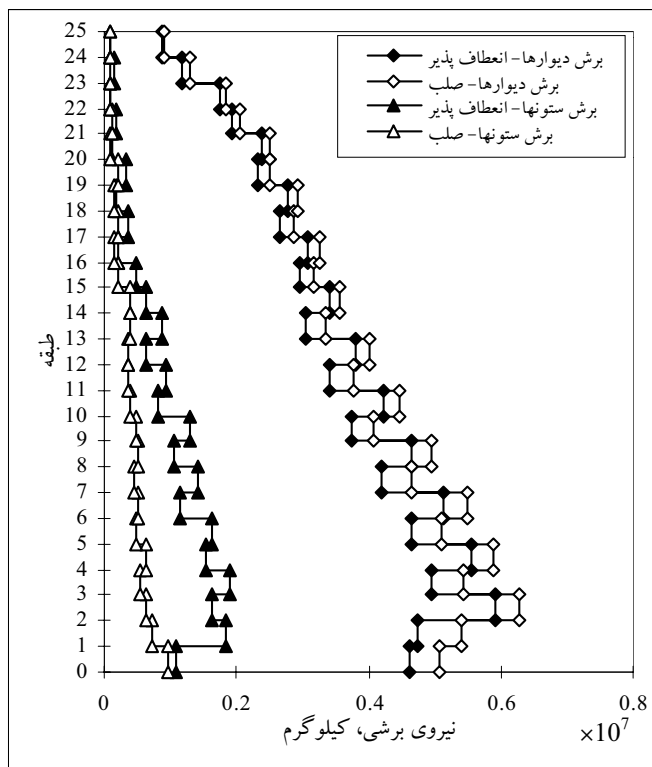
شکل ۹- مقایسه حداکثر تغییر مکانها و فرکانسها در تحلیل سازه با فرض دیافراگم‌های صلب و انعطاف‌پذیر، نمونه ۳



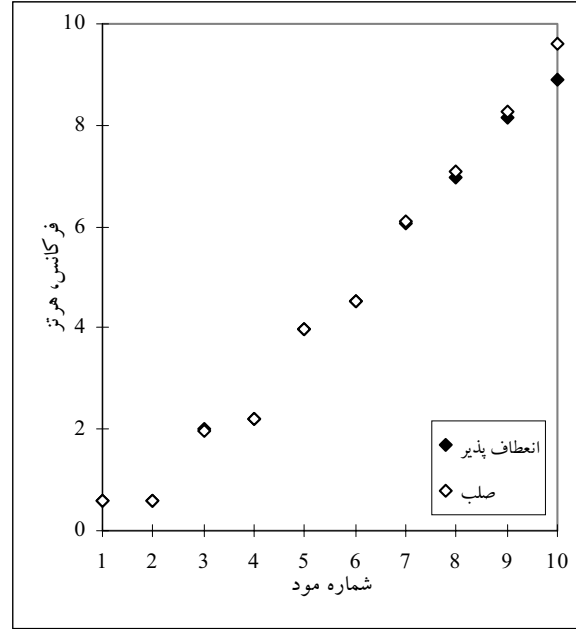
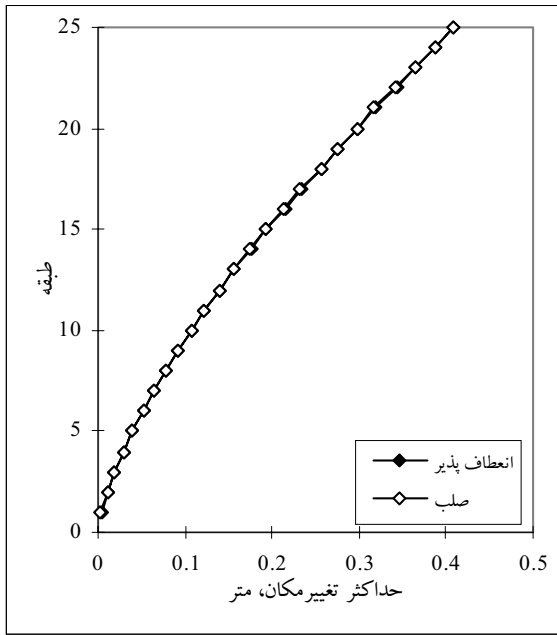
شکل ۱۰- مقایسه نیروی برشی دیوارها، ستونها و طبقه در تحلیل سازه با فرض دیافراگم‌های صلب و انعطاف‌پذیر، نمونه ۳



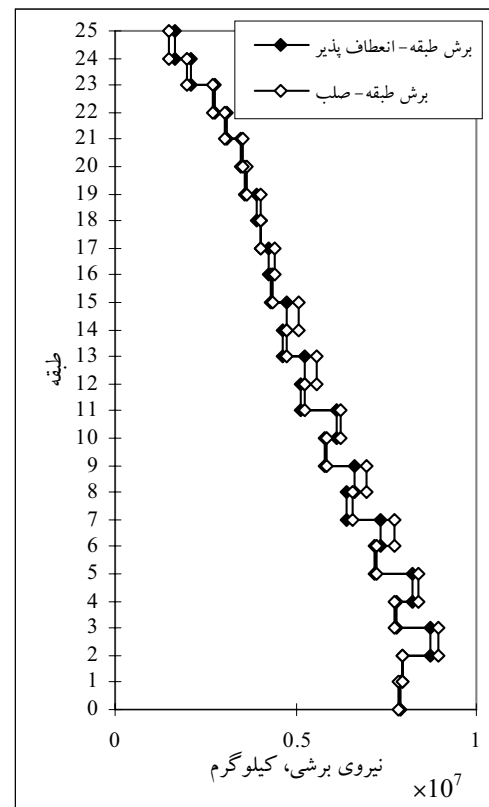
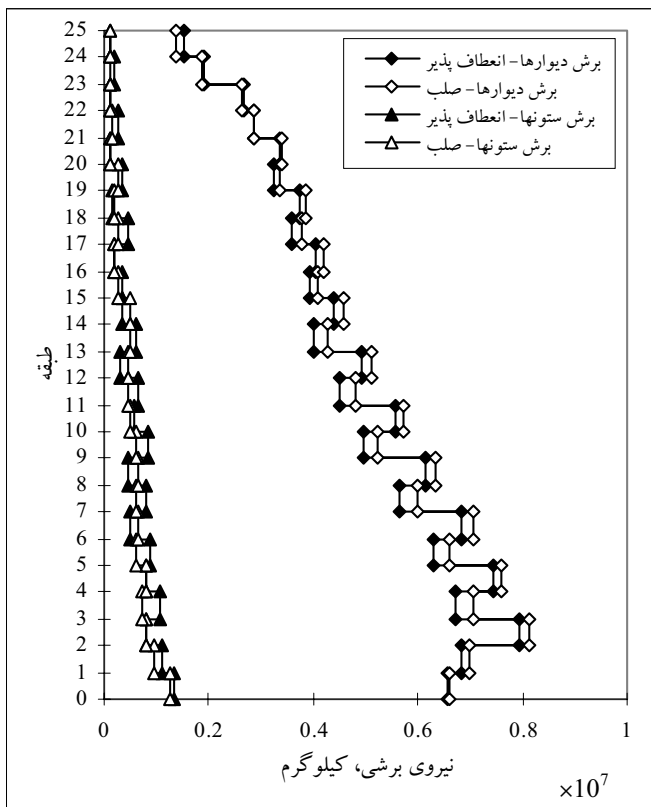
شکل ۱۱- مقایسه حداکثر تغییر مکانها و فرکانسها در تحلیل سازه با فرض دیافراگم‌های صلب و انعطاف‌پذیر، نمونه ۴



شکل ۱۲- مقایسه نیروی برشی دیوارها، ستونها و طبقه در تحلیل سازه با فرض دیافراگم‌های صلب و انعطاف‌پذیر، نمونه ۴



شکل ۱۳- مقایسه حداکثر تغییر مکانها و فرکانسها در تحلیل سازه با فرض دیافراگم‌های صلب و انعطاف پذیر، نمونه ۵



شکل ۱۴- مقایسه نیروی برشی دیوارها، ستونها و طبقه در تحلیل سازه با فرض دیافراگم‌های صلب و انعطاف پذیر، نمونه ۵

در طبقات فوقانی ساختمان کمتر است. ذکر این نکته نیز ضروری است که در ساختمانهای بلند، علیرغم وجود اختلاف در نیروی برشی ستونها ناشی از تحلیل سازه با دیافراگم‌های صلب و انعطاف‌پذیر، مقدار این نیرو برای یک ستون اندک بوده و توسط مقاومت برشی بتن تحمل می‌شود.

با توجه به شکل‌های (۵) الی (۱۴)، مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت دیافراگم کف، خطای ناشی از تحلیل سازه با دیافراگم‌های صلب و انعطاف‌پذیر کاهش می‌یابد. مقدار متوسط این خطا در نیروی برشی طبقه ساختمان ۵ طبقه با حداقل ضخامت دیافراگم کف (۵ سانتیمتر)، برابر ۱۲ درصد و در حالتی که ضخامت دیافراگم کف، به حداکثر مقدار خود (۲۰ سانتیمتر) می‌رسد، برابر ۳ درصد است. همچنین در ساختمان ۲۵ طبقه و با حداقل ضخامت برای دیافراگم کف (۵ سانتیمتر)، حداکثر مقدار خطای ناشی از تحلیل سازه با دیافراگم‌های صلب و انعطاف‌پذیر در نیروی برشی دیوارها و ستونها که در طبقات پایین ساختمان ایجاد می‌شود، به ترتیب برابر ۱۲ و ۶۱ درصد است؛ در حالی که مقدار این خطا برای حداکثر ضخامت دیافراگم کف (۲۰ سانتیمتر) برای دیوارها برابر ۲ درصد و برای ستونها در حدود ۲۵ درصد بوده است.

۷-۲- بررسی تأثیر ضخامت دیوارها

برای بررسی تأثیر ضخامت دیوارها بر روی نتایج تحلیل دینامیکی ساختمانهای با دیوارهای برشی ناپیوسته، ۲ نمونه پاسخ از ساختمانهای با پلان مستطیلی و ۲ نمونه پاسخ از ساختمانهای با پلان I شکل انتخاب شده است. همان گونه که در جدول (۲) ملاحظه می‌شود، نمونه‌های ۶ و ۷ مربوط به ساختمانهای ۱۵ طبقه با پلان مستطیلی و با ضخامت دال کف ثابت (برابر با ۲۰ cm) است، که ضخامت دیوار برشی ناپیوسته در آنها به ترتیب برابر با ۱۰ و ۲۵ cm در نظر گرفته شده است. همچنین نمونه‌های ۸ و ۹ مربوط به ساختمانهای ۲۵ طبقه با پلان I شکل و با ضخامت دیافراگم کف ثابت (برابر با ۱۵ cm) است، که ضخامت دیوار برشی ناپیوسته در آنها به ترتیب برابر

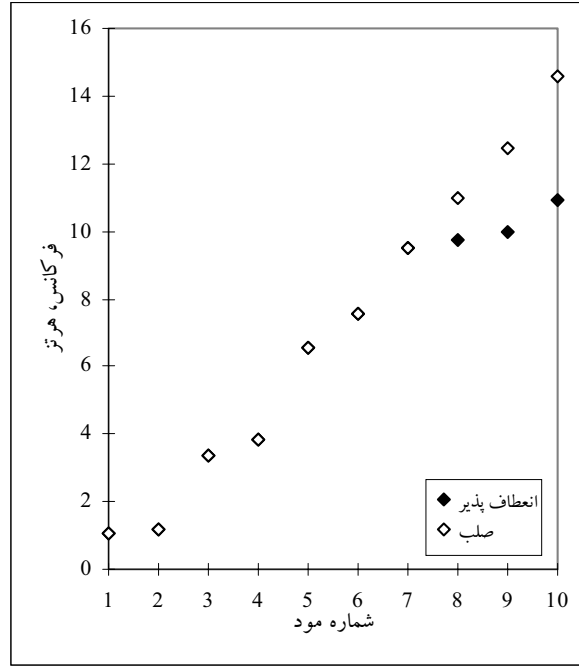
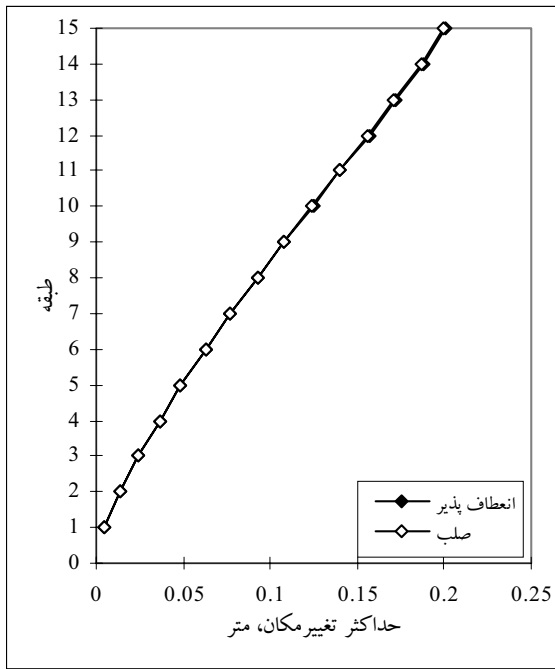
با ۱۰ و ۲۵ cm در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از تحلیل این ۴ نمونه ساختمان نیز بصورت مقایسه حداکثر تغییرمکان طبقات و فرکانسها، و نیز برش دیوارها، ستونها و برش کل طبقه، در شکل‌های (۱۵) تا (۲۲) ارائه شده است.

از آنجایی که صلبیت یک مسئله نسبی است، لذا افزایش ضخامت دیوارها باعث افزایش صلبیت دیوارها و در نتیجه باعث افزایش انعطاف‌پذیری دیافراگم کف می‌شود. بنابراین با توجه به اشکال (۱۵) الی (۲۲)، ملاحظه می‌شود که افزایش ضخامت دیوارها، باعث افزایش سختی جانبی آنها و کاهش صلبیت دیافراگم کف شده است. افزایش فرکانسها و نیروی برش طبقات و کاهش تغییرمکان طبقات، از اثرات افزایش ضخامت دیوارهاست. همچنین با توجه به اینکه فرکانس سازه‌های ۵ طبقه با پلان مستطیلی، بزرگتر از فرکانس متناظر با حداکثر مقدار طیف شتاب است، لذا در سازه‌های ۵ طبقه با پلان مستطیل شکل و با کفهای انعطاف‌پذیر، برش طبقات نسبت به سازه با کفهای صلب افزایش می‌یابد.

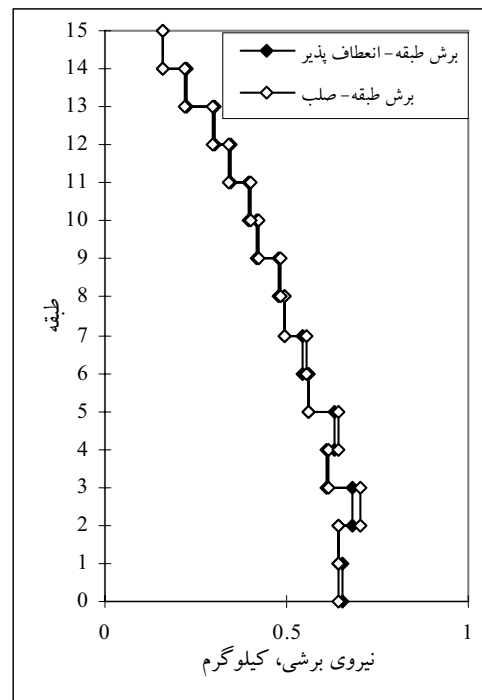
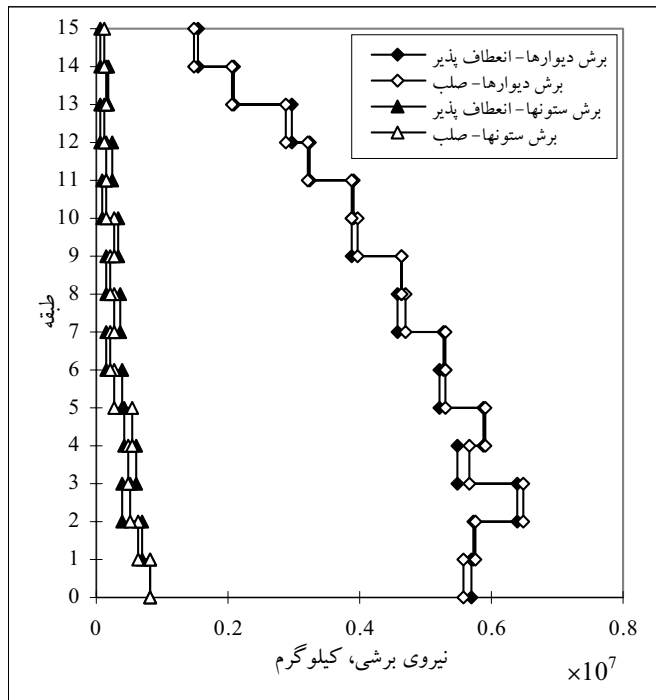
با توجه به اشکال (۱۵) الی (۲۲)، مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت دیوارها، خطای ناشی از تحلیل سازه با دیافراگم صلب نسبت به دیافراگم انعطاف‌پذیر افزایش می‌یابد. مقدار این خطا در نیروی برش طبقه ساختمان ۱۵ طبقه با حداقل ضخامت دیوار (۱۰ سانتیمتر)، برابر ۳ درصد، و در حالتی که ضخامت دیوار، به حداکثر مقدار (۲۰ سانتیمتر) خود می‌رسد، حداکثر مقدار خطا در نیروی برشی ستونها و دیوارها به ترتیب برابر ۵ و ۳۲ است. همچنین در ساختمان ۲۵ طبقه و با حداقل ضخامت برای دیوار (۱۰ سانتیمتر)، مقدار خطای نیروی برشی طبقه که در طبقات پایین ساختمان ایجاد می‌شود، برابر ۵ درصد است. لازم به ذکر است که مقدار این خطا برای حداکثر ضخامت دیافراگم کف (۲۰ سانتیمتر) در نیروی برشی ستونها و دیوارها به ترتیب، حداکثر برابر ۱۴ و ۱۷ درصد است.

۷-۳- بررسی تأثیر افزایش نسبت طول به عرض پلان

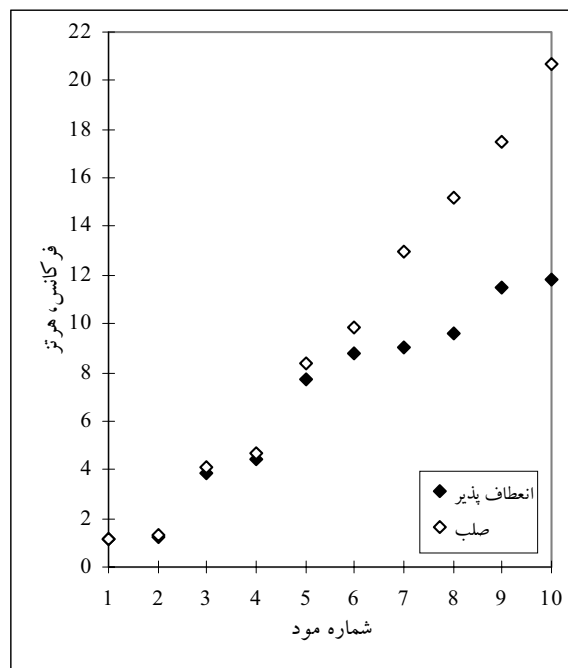
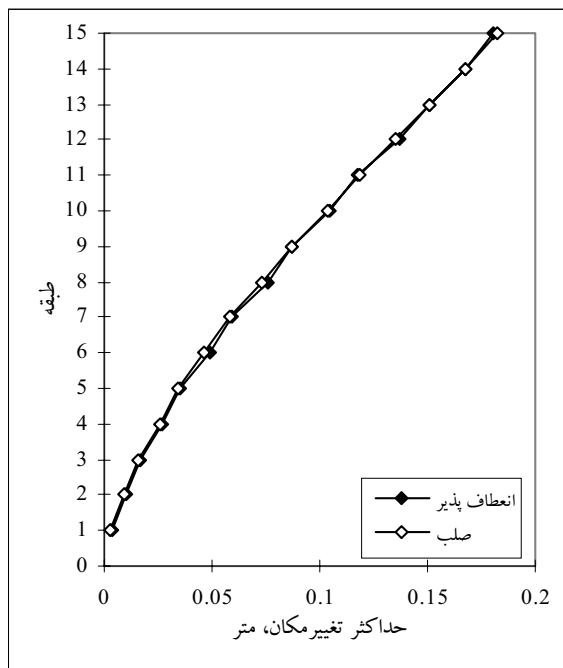
به منظور بررسی اثرات افزایش نسبت طول به عرض در



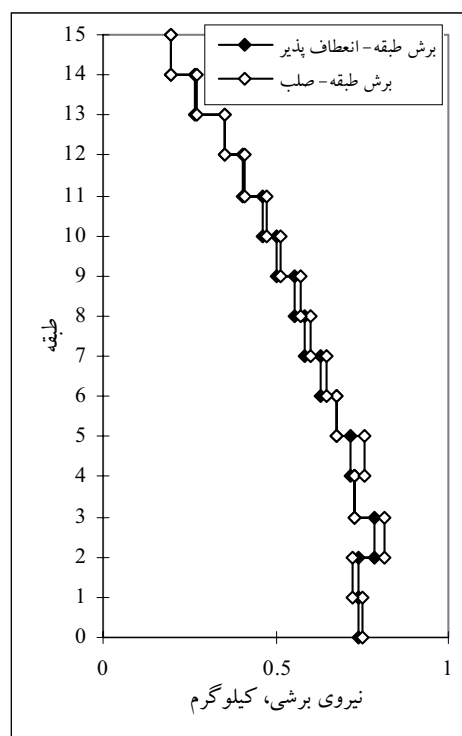
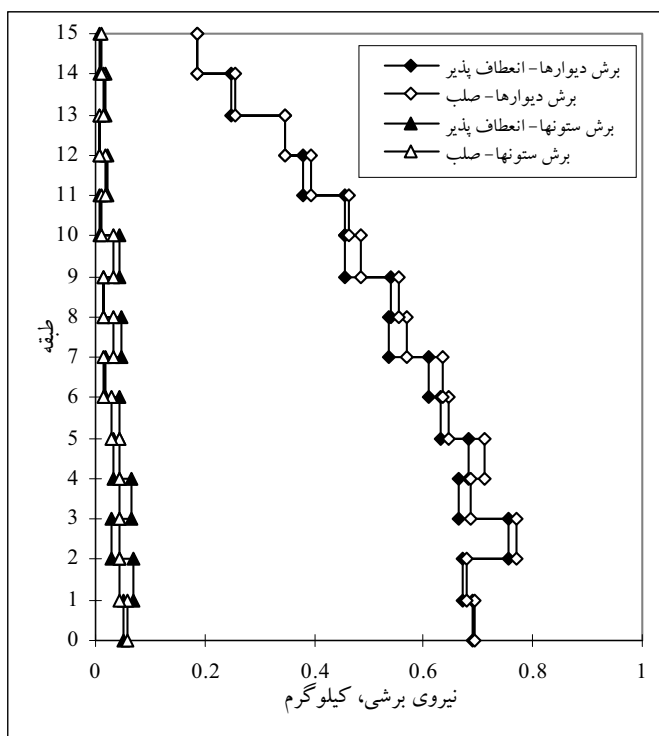
شکل ۱۵- مقایسه حداکثر تغییر مکانها و فرکانسها در تحلیل سازه با فرض دیافراگم‌های صلب و انعطاف‌پذیر، نمونه ۶



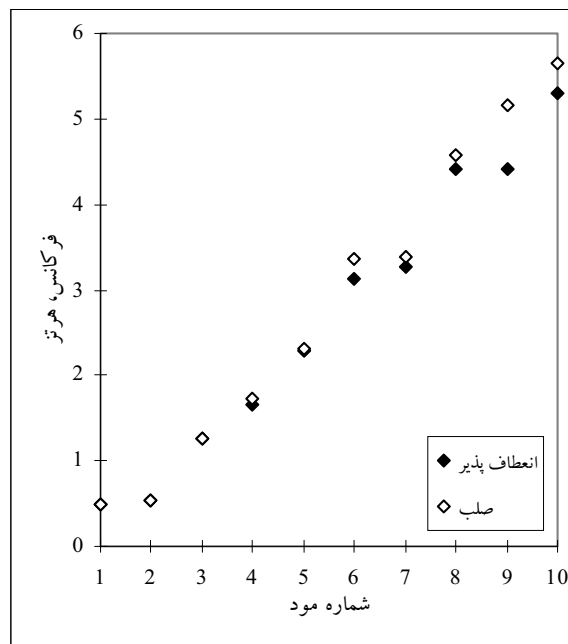
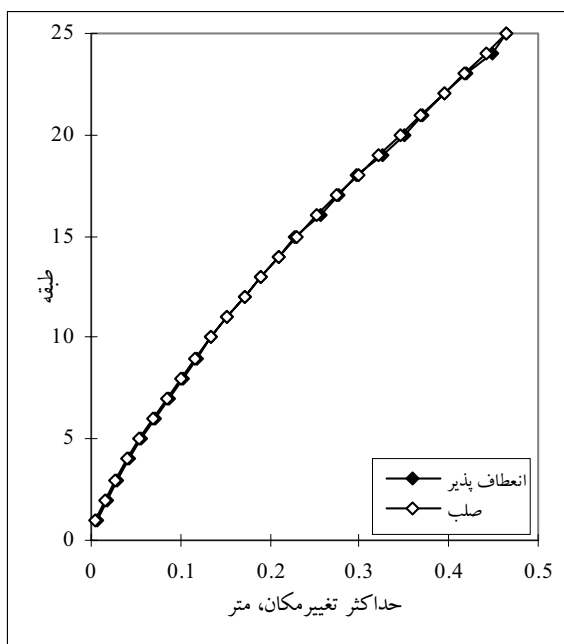
شکل ۱۶- مقایسه نیروی برشی دیوارها، ستونها و طبقه در تحلیل سازه با فرض دیافراگم‌های صلب و انعطاف‌پذیر، نمونه ۶



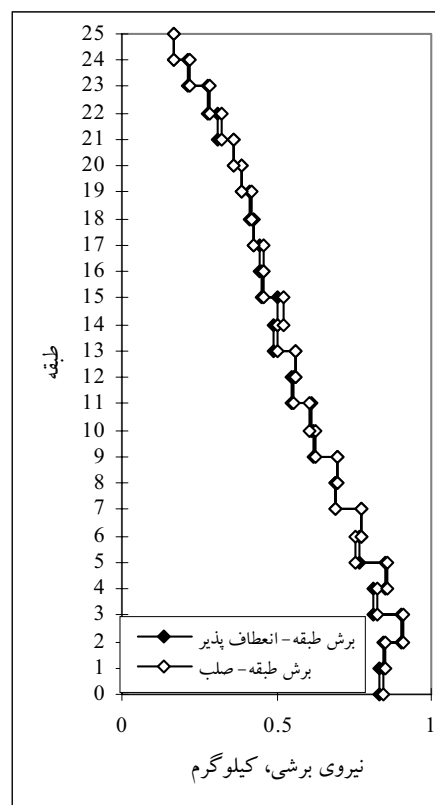
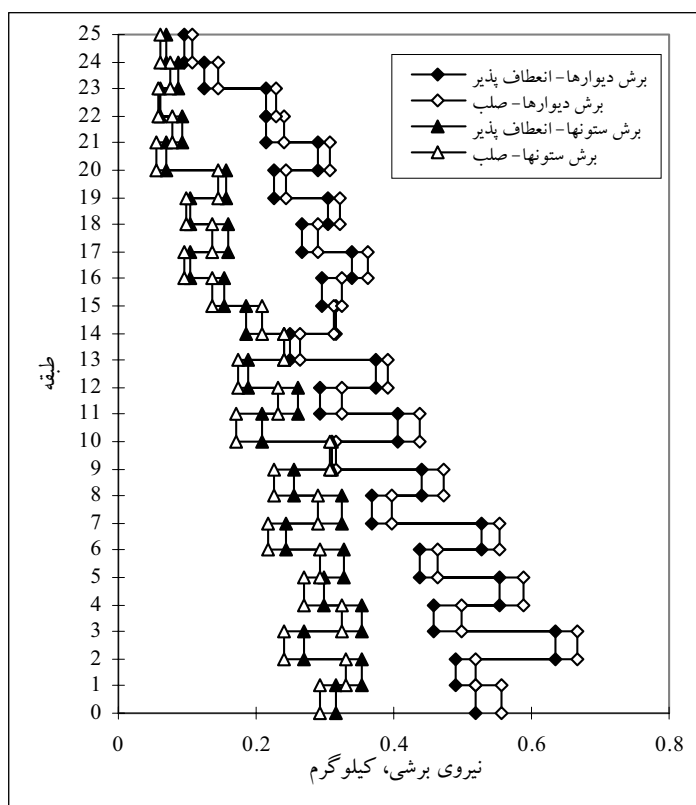
شکل ۱۷- مقایسه حداکثر تغییر مکانها و فرکانسها در تحلیل سازه با فرض دیافراگم‌های صلب و انعطاف پذیر، نمونه ۷



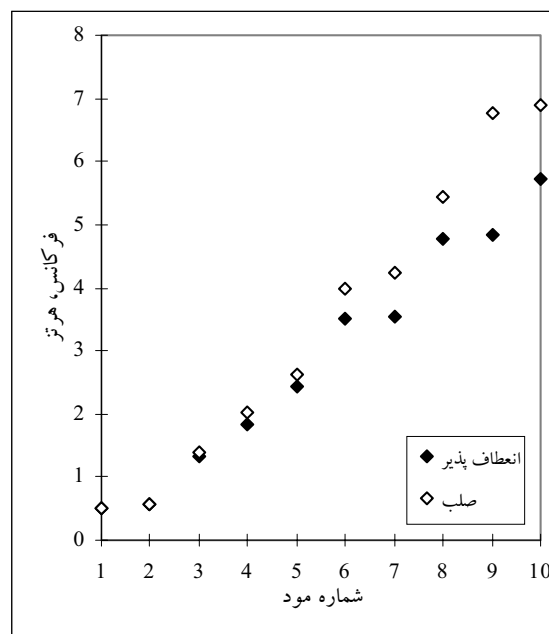
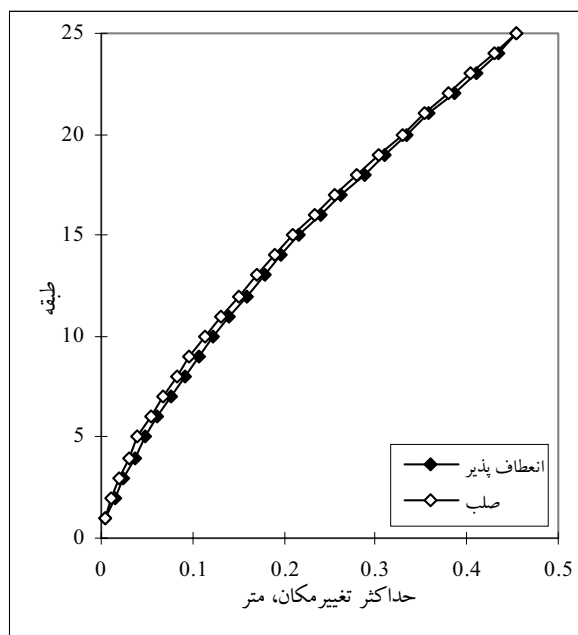
شکل ۱۸- مقایسه نیروی برشی دیوارها، ستونها و طبقه در تحلیل سازه با فرض دیافراگم‌های صلب و انعطاف پذیر، نمونه ۷



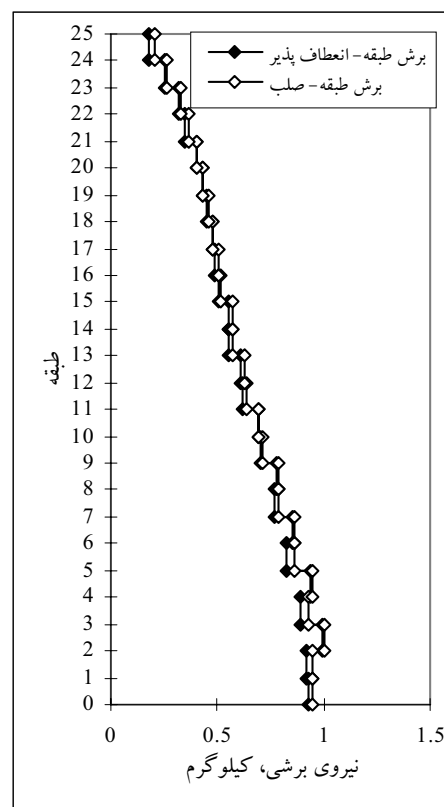
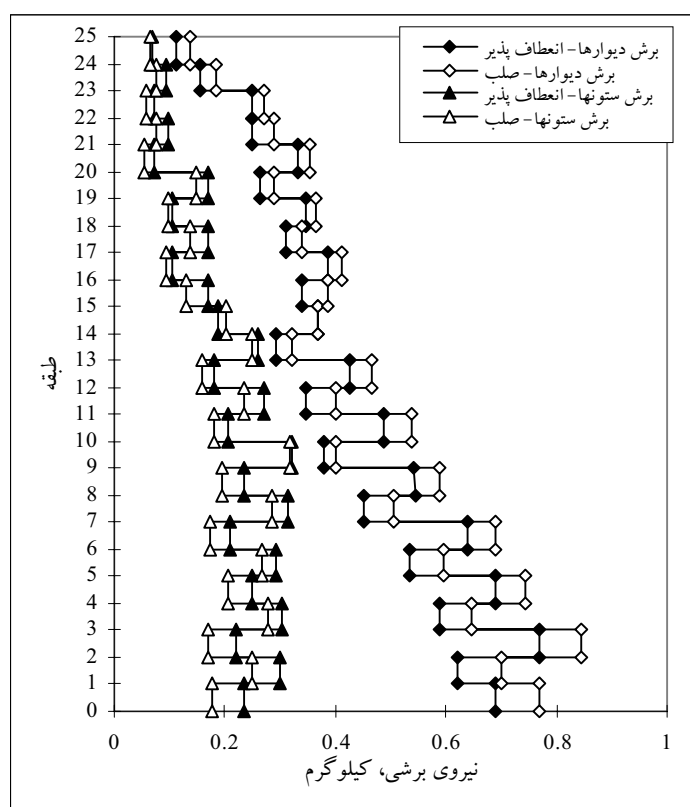
شکل ۱۹- مقایسه حداکثر تغییر مکانها و فرکانسها در تحلیل سازه با فرض دیافراگم‌های صلب و انعطاف پذیر، نمونه ۸



شکل ۲۰- مقایسه نیروی برشی دیوارها، ستونها و طبقه در تحلیل سازه با فرض دیافراگم‌های صلب و انعطاف پذیر، نمونه ۸



شکل ۲۱- مقایسه حداکثر تغییر مکانها و فرکانسها در تحلیل سازه با فرض دیافراگم‌های صلب و انعطاف‌پذیر، نمونه ۹



شکل ۲۲- مقایسه نیروی برشی دیوارها، ستونها و طبقه در تحلیل سازه با فرض دیافراگم‌های صلب و انعطاف‌پذیر، نمونه ۹

دیافراگم کف، تعداد طبقات ساختمانهای مورد مطالعه در این تحقیق، به ترتیب برابر با ۵، ۱۵ و ۲۵ فرض شده است. بدین ترتیب با توجه به جدول (۲)، مقایسه رفتار نمونه های ۱ تا ۳ با نمونه های ۴ تا ۵، و نیز با نمونه های ۶ تا ۷، می تواند تاثیر عامل ارتفاع ساختمان را مشخص کند. با دقت در شکل های (۵) الی (۲۲) ملاحظه می شود که با افزایش طبقات، فرکانسهای ارتعاشی کم شده و میزان اختلاف بین پاسخهای مدل دیافراگم صلب و انعطاف پذیر کاهش می یابد؛ به بیان دیگر با افزایش تعداد طبقات، رفتار دیافراگم انعطاف پذیر به رفتار دیافراگم صلب نزدیکتر می شود.

لازم به ذکر است که از عواملی که باعث کاهش فرکانسهای ارتعاشی به میزان قابل توجه می شود، افزایش ارتفاع سازه می باشد. در این رابطه استاندارد ۲۸۰۰، به منظور محاسبه زمان تناوب ارتعاش ساختمانهای متعارف، معادله (۱) را پیشنهاد می کند.

$$T = KH^{3/4} \quad (1)$$

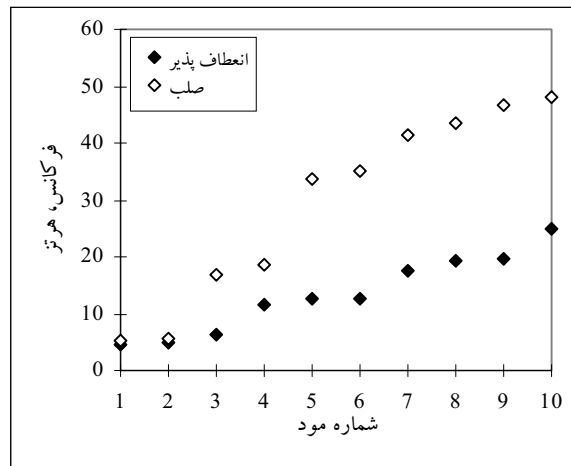
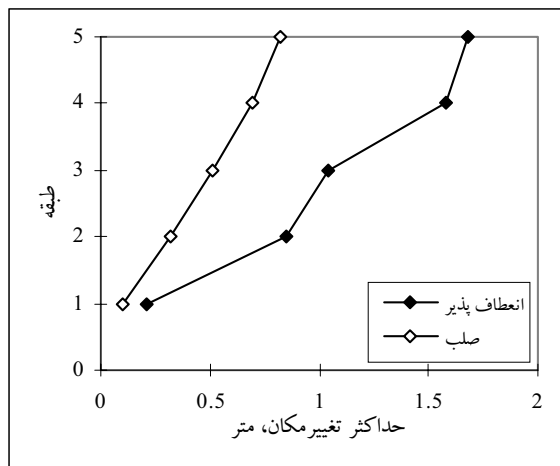
در این معادله، T زمان تناوب ارتعاش سازه، H ارتفاع ساختمان و K ضریبی است که برای ساختمانهای فولادی و بتنی به ترتیب برابر 0.08 و 0.07 پیشنهاد شده است. با توجه به معادله فوق، تأثیر افزایش ارتفاع بر کاهش فرکانسها، و متعاقباً افزایش صلبیت کفها، به خصوص در طبقات فوقانی سازه مشخص می شود. البته باید توجه داشت که با افزایش ارتفاع ساختمان و به دلیل انتقال برشها توسط دیافراگم کف در سازه های با دیوارهای برشی ناپیوسته، از صلبیت کفهای طبقات تحتانی سازه کاسته می شود. به عنوان نمونه با توجه به منحنیهای ارائه شده در شکل (۲۰) مشاهده می شود که اختلاف نیروی برشی ستونها ناشی از تحلیل سازه با کف صلب و انعطاف پذیر در طبقات پایتتر بیشتر شده است؛ اما از آنجایی که هیچ گونه طراحی سازه ای برای نیروی برشی ستونها انجام نمی شود و مقاومت برشی بتن ستون برای تحمل این مقدار برش کافی است، لذا این اختلاف نیز چندان مهم به نظر نمی رسد. بدین ترتیب استفاده از سیستم ساختمانی دیوار برشی ناپیوسته در

صلبیت دیافراگم کف ساختمانهای مفروض در این تحقیق، دو نمونه پاسخ از ساختمانهای با پلان مستطیلی و I شکل، با نسبت طول به عرض ۶ انتخاب شده است. نمونه ۱۰، ساختمانی ۵ طبقه با پلان مستطیلی شکل است که در آن ضخامت دیوارها و کفها برابر ۱۰ سانتیمتر فرض شده است. در نمونه ۱۱، ساختمانی ۱۵ طبقه با پلان I شکل در نظر گرفته شده است. در این نمونه نیز ضخامت دیوارها و کفها به ترتیب برابر با ۱۵ و ۲۰ سانتیمتر است. نتایج حاصل برای نمونه های ۱۰ و ۱۱ در شکل های (۲۳) الی (۲۶) نمایش داده شده است. از آنجا که نسبت طول به عرض در کلیه نمونه های قبلی برابر ۴ بوده است، برای بررسی تأثیر افزایش نسبت طول به عرض بر رفتار ساختمانهای با دیوارهای برشی ناپیوسته، شکل های (۲۳) الی (۲۶) را می توان با کلیه شکل های (۵) الی (۲۲) مقایسه کرد. به صورت دقیقتر می توان رفتار نمونه ۱۰ را با نمونه ۱ و رفتار نمونه ۱۱ را حدوداً با نمونه ۹ مقایسه کرد؛ به بیان دیگر می توان شکل های (۲۳) و (۲۴) را با شکل های (۵) و (۶)، و شکل های (۲۵) و (۲۶) را با شکل های (۲۱) و (۲۲) مقایسه کرد.

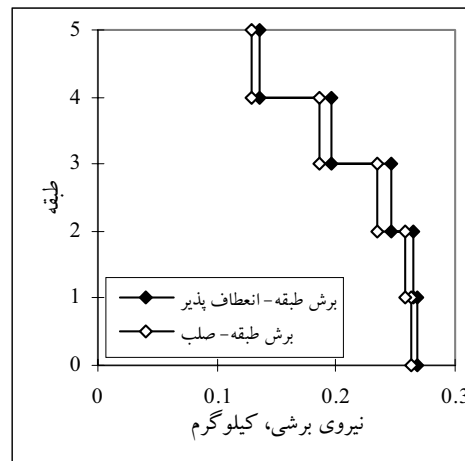
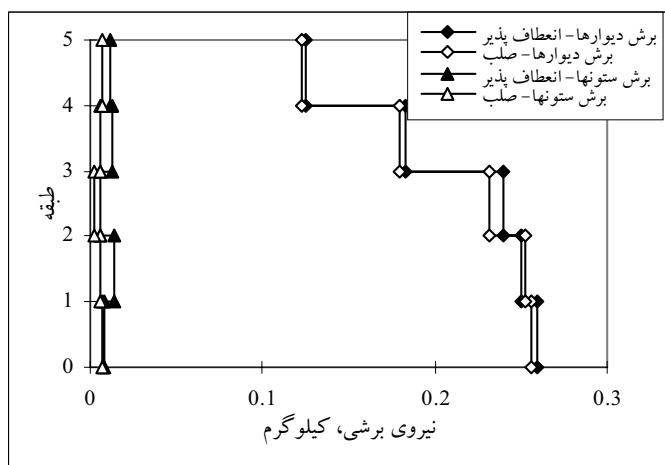
در ساختمانهای با دیوارهای برشی پیوسته، که دیوارها در دو انتهای پلان قرار گرفته اند، با افزایش نسبت طول به عرض ساختمان، به مقدار قابل توجهی از صلبیت دیافراگم کف کاسته می شود. در این حالت دیافراگم کف همانند یک تیر عمیق بر روی تکیه گاههایی که همان دیوارها هستند، عمل می کند. لذا بدیهی است که با افزایش نسبت طول به عرض، از صلبیت دیافراگم کف کاسته شود. در مقابل در ساختمانهای با دیوارهای برشی ناپیوسته با نسبت طول به عرض ۶، و به خصوص در سازه های با پلان مستطیل، افزایش جرم، سختی و توزیع آن، تقریباً به یک اندازه صورت می گیرد، لذا تغییرات قابل ملاحظه ای در رفتار دینامیکی سازه، نسبت به سازه های با نسبت طول به عرض ۴ روی نمی دهد. مقایسه بین منحنیهای شکل های فوق الذکر، دقیقاً چنین رفتاری را نشان می دهد.

۷-۴- بررسی تأثیر افزایش ارتفاع ساختمان

به منظور بررسی اثر افزایش ارتفاع ساختمان در صلبیت



شکل ۲۳- مقایسه حداکثر تغییر مکانها و فرکانسها در تحلیل سازه با فرض دیافراگم های صلب و انعطاف پذیر، نمونه ۱۰



شکل ۲۴- مقایسه نیروی برشی دیوارها، ستونها و طبقه در تحلیل سازه با فرض دیافراگم های صلب و انعطاف پذیر، نمونه ۱۰

بیشتری نسبت به نقاط ناحیه مرکزی پلان می یابند؛ لذا مقدار خطای ناشی از تحلیل با دیافراگم صلب و انعطاف پذیر در این سازه ها نسبت به سازه های با پلان مستطیل بیشتر است. این مسئله با افزایش نسبت طول به عرض در ساختمان با پلان I شکل، افزایش می یابد.

۸- نتیجه گیری

با توجه به مطالب عنوان شده، نتایج قابل استنتاج از این تحقیق به صورت خلاصه عبارت اند از:

سازه های بلند توصیه می شود.

۷-۵- بررسی تأثیر شکل پلان ساختمان

برای بررسی تأثیر شکل پلان ساختمان بر صلبیت دیافراگم کف در ساختمانهای با دیوار برشی ناپیوسته، می توان رفتار نمونه های ۸، ۹ و ۱۱ را با رفتار سایر نمونه ها مقایسه کرد. با دقت در منحنیهای مربوطه ملاحظه می شود که در ساختمانهای با پلان I شکل، از آنجایی که دیوارهای برشی در ناحیه مرکزی پلان متمرکز شده اند، به هنگام بارگذاری جانبی در سازه با دیافراگم کف انعطاف پذیر، بالهای مقطع I شکل، تغییر مکان

۵- در ساختمانهای بلند، علی‌رغم وجود اختلاف در نیروی برشی ستونها ناشی از تحلیل سازه با دیافراگم‌های صلب و انعطاف‌پذیر، مقدار این نیرو برای یک ستون اندک بوده و توسط مقاومت برشی بتن تحمل می‌شود. لذا اختلاف در نیروی برشی ستونها با فرض تحلیل سازه با دیافراگم‌های صلب و انعطاف‌پذیر حائز اهمیت نیست.

۶- با توجه به اینکه فرکانس سازه‌های ۵ طبقه با پلان مستطیلی مورد مطالعه در این تحقیق، بزرگتر از فرکانس متناظر با حداکثر مقدار طیف شتاب است، لذا در سازه‌های ۵ طبقه با پلان مستطیل شکل و با کفهای انعطاف‌پذیر، برش طبقات نسبت به سازه با کفهای صلب افزایش می‌یابد.

۷- استفاده از سیستم ساختمانی دیوارهای برشی ناپیوسته، در سازه‌های بلند با استفاده از حداقل ضخامت کف ۱۵ سانتیمتر در طبقات تحتانی سازه و با توجه به نیروهای طراحی توصیه می‌شود.

۸- از آنجایی که با افزایش نسبت طول به عرض در ساختمانها، جرم و سختی نیز تقریباً به یک نسبت اضافه می‌شوند، لذا تغییرات قابل ملاحظه‌ای در فرکانسها و رفتار کلی سازه با افزایش نسبت طول به عرض رخ نمی‌دهد.

۱- در ساختمانهای بلند، امکان اینکه حداکثر برش طبقه در پایتترین تراز سازه رخ ندهد، وجود دارد. در این تحقیق مشخص شد که مقدار این نیرو در طبقه سوم ساختمانهای ۱۵ و ۲۵ طبقه، به حداکثر مقدار خود می‌رسد. لازم به ذکر است که این مسئله در مطالعات بعضی دیگر از محققان نیز ملاحظه شده است [۷].

۲- با افزایش ضخامت دیافراگم کف، فرکانسهای ارتعاشی سازه‌ها کاهش یافته، تغییر مکانها و نیروی برش طبقات افزایش می‌یابد.

۳- با افزایش ارتفاع ساختمان و کاهش برش طبقه، کفهای طبقات فوقانی ساختمان رفتار صلب از خود نشان می‌دهند. لذا استفاده از این سیستم در سازه‌های بلند توصیه می‌شود.

۴- حداکثر مقدار خطای، ناشی از مدلسازی سازه با دیافراگم‌های صلب و انعطاف‌پذیر، در طبقات تحتانی ساختمان رخ داده و مقدار این خطا در ساختمانهای مورد مطالعه در این تحقیق، از ۲ تا ۲۱ درصد در دیوارها و ۱۳ تا ۵۰ درصد در ستونها بر حسب کاهش ضخامت کفها بوده است.

واژه نامه

- | | | |
|-------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| 1. staggered shear wall | 3. in-plane stiffness | 5. slave nodes |
| 2. vertical lateral load resistance | 4. master node | 6. complete quadratic combination |

مراجع

- Saffarini, H. S., and Qudaimat, M. M., "In-Plane Floor Deformations in RC Structures," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 118, No. 11, pp. 3098-3102, November 1992.
- Ju, S. H., and Lin, M. C., "Comparison of Buildings Analysis Assuming Rigid or Flexible Floors," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 125, No. 1, pp. 25-31, January 1999.
- Ionnides, S. A., and Lindsey, S. D., "Staggered Truss Adopted to High Rise," *Journal of Civil Engineering*, pp. 44-47, June 1985.
- Gupta, R. P., and Goel, S. C., "Dynamic Analysis of Staggered Truss Framing System," *Journal of Structural Division*, Vol. 98, No. ST7, pp. 1475-1491, 1972.
- آیین‌نامه طرح ساختمانها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰)، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ویرایش دوم، ۱۳۷۸.
- حداقل بار وارده بر ساختمانها و ابنیه فنی، سازمان برنامه و بودجه، نشریه شماره ۵۱۹، ویرایش نهم.
- ANSYS 5.4 Software, ANSYS Element Reference, SAS IP, Inc., Ninth Edition, pp. 469-477, 1997.
- Korista, D. Stanton, Sarkisian, Mark P., and Abdelrazaq, Ahmad, "Jin Mao Tower-Shanghai Response of an Ultra-Tall Building to Moderate Seismic Forces", Skidmore, Owings & Merrill LLP Co., Los Angeles, 1997.