



ارائه ضرایب بازتاب و بزرگنمایی تغییر مکان و مقایسه رفتار دینامیکی سازه‌های بلند با سیستم لوله‌ای و سیستم مهاربند بازویی روی خاک انعطاف پذیر

فرهاد بهنام‌فر^{۱*}، امیرهومان مهاجری^۲

^۱ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

^۲ دانشگاه یزد، یزد، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۸ دی ۱۳۹۴

بازنگری: ۲۷ دی ۱۳۹۵

پذیرش: ۱۰ بهمن ۱۳۹۵

ارائه آنلاین: ۱۸ بهمن ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

ساختمان‌های بلند
سیستم‌های لوله‌ای و مهار بند بازویی
خاک انعطاف پذیر
تحلیل دینامیکی
برش پایه و تغییر مکان جانبی

چکیده: امروزه در سرتاسر دنیا دو سیستم سازه‌ای لوله‌ای و مهاربند بازویی به عنوان سیستم‌های متعارف در ساختمان‌های بلند، جهت تامین پایداری و سختی لازم در برابر نیروهای جانبی، کنترل تغییر مکان نسبی و لرزش، زلزله یا طوفان‌های شدید شناخته شده است. از سوی دیگر با افزایش ارتفاع و تامین سختی جانبی مورد نیاز در اینگونه ساختمان‌ها، اهمیت انعطاف پذیری خاک تکیه گاهی ساختمان و تغییر مکان‌های ناشی از آن بیشتر می‌شود. هدف این مقاله مطالعه رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های بلند با سیستم‌های لوله‌ای و مهاربند بازویی با یک یا دو کمربند محیطی بر اساس کنترل تغییر مکان جانبی روی خاک‌های سخت و نرم است. برای این منظور طیف وسیعی از ساختمان‌های ۱۰ تا ۵۰ طبقه فلزی با این دو سیستم سازه‌ای مورد تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی قرار گرفته و حداکثر برش پایه و تغییر مکان جانبی بام آن‌ها محاسبه می‌گردد. همچنین برای مقایسه بیشتر وزن فولاد مصرفی در دو سیستم مورد مقایسه قرار می‌گیرد و از طرفی نتیجه گرفته می‌شود که طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ در ساختمان‌های بلند برای این دو سیستم دست بالا بوده و در مجموع سیستم لوله‌ای اقتصادی‌تر از سیستم مهاربند بازویی سختی و مقاومت مورد نیاز را تامین می‌کند.

۱- مقدمه

سازه‌های بلند دنیا بکار رفته است. بلندترین ساختمان فعلی در دنیا با ارتفاع ۸۲۸ متر به نام برج خلیفه می‌باشد. این ساختمان در دبی امارات بنا شده و در سال ۲۰۱۰ به بهره برداری رسید. سیستم سازه‌ای در این برج سیستم ترکیبی لوله‌ای با هسته مقاوم مرکزی شش ضلعی است که با استفاده از دیوارهای خطی تا رئوس پلان Y شکل و دیوارهای سر چکشی در انتهای آن‌ها مقاومت جانبی و پیچشی بسیار خوبی را برای سازه تامین کرده است. در سیستم مهار بازویی، از طریق اتصال هسته‌های صلب داخلی به ستون‌های پیرامونی توسط خرپاهای قوی و همچنین اتصال ستون‌های پیرامونی به یکدیگر توسط خرپاهای کمربندی در پیرامون پلان، سختی جانبی ساختمان بسیار افزایش داده شده و از تغییر مکان جانبی آن کاسته می‌شود. تحلیل استاتیکی و دینامیکی سیستم ترکیبی خرپای کمربندی با هسته برشی لوله‌ای و آنالیز ارتعاش آزاد سازه‌های بلند با سیستم خرپای کمربندی، از جمله تحقیقات دیگر در خصوص رفتار سیستم‌های سازه‌ای بلند مرتبه می‌باشد [۳ و ۴]. استفاده از سیستم توام (لوله-مهاربند) و (لوله-دیوار برشی فولادی) که هر دو توانایی تحمل بارهای جانبی را دارند سبب تامین مقاومت لازم در مقابل بارهای جانبی می‌گردد. نشان داده شده که استفاده از دیوار برشی فولادی به جای مهاربند منجر به طرح اقتصادی‌تری می‌گردد [۵]. استفاده از سیستم خرپای کمربندی به عنوان یکی از موثرترین روش‌ها در افزایش سختی سازه در ساختمان‌های بلند مطرح است. مقدار بازده حاصل از بستن هسته مرکزی به ستون‌های خارجی، تابعی از سختی کمربند محیطی

از ضوابط مهم طراحی ساختمان‌های بلند محدودیت‌های سختی و جابجایی است. جابجایی یکی از کمیت‌های اساسی پاسخ سازه در مقابل زلزله است و مقدار مجاز آن به عنوان یک هدف از پیش تعیین شده در طراحی عملکردی سازه‌های جدید محسوب می‌شود. ارزیابی ابعاد اولیه برای اجزای سازه‌ای مقاوم در برابر بارهای جانبی خود چالشی در یک طرح بهینه در سازه‌های بلند می‌باشد. در مرجع [۱] این مسئله در سازه‌های ۲۰ الی ۶۰ طبقه مورد بررسی قرار گرفته است. با افزایش ارتفاع ساختمان، انتخاب سیستم سازه‌ای مناسبی که اهداف طراح را در کنترل تغییر شکل‌های جانبی و بکارگیری کمترین مصالح مورد نیاز ارضاء کند، اهمیت خاصی خواهد داشت. معمولاً در سازه‌های بلند به خصوص سازه‌هایی که بر روی خاک نرم واقع هستند تغییر مکان جانبی عاملی بزرگ و تعیین کننده بوده و بایستی با افزایش سختی حرکت جانبی را کاهش داد. از اواخر قرن نوزدهم که بلند مرتبه سازی در جهان رونق گرفت، تاکنون سیستم‌های سازه‌ای گوناگونی برای ساختمان‌های بلند مورد استفاده قرار گرفته است. در این میان سیستم‌های سازه‌ای لوله‌ای و مهاربند بازویی بهترین فرم سازه‌ای شناخته شده برای استفاده در ساختمان‌های بلند مرتبه می‌باشند. ایده‌ی سازه‌ی لوله‌ای، ابتدا توسط فضلوخران ارائه گردید [۲] و در حال حاضر در بیشتر

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: farhad@cc.iut.ac.ir

از این مسئله است که ستون‌های وسط قاب‌های بال نسبت به ستون‌های گوشه‌ای این بال‌ها ناشی از تغییر شکل برشی تیرهای واسط تحت اثر تغییر شکل و تنش کمتری قرار می‌گیرند، بنابراین از تمام ظرفیت ستون‌ها در رفتار بال استفاده نمی‌شود. به منظور مقابله و نیز کاهش تاثیر پدیده لنگی برشی، سیستم‌های لوله‌ای پیشرفته که دارای ساختار اصلی لوله قابی و از نوع تکامل یافته هستند ابداع شد که آن را می‌توان قاب لوله‌ای مهار شده نامید. مهار کردن قاب می‌تواند با استفاده از المان‌های مورب بزرگی که کل قاب را فرا می‌گیرند، مهاربندی در دهانه‌های کوچک قاب و پانل‌های بتنی و لوله خرابایی انجام شود. در سیستم لوله‌ای با مهاربند داخلی با اضافه کردن دیوارهای برشی و هسته‌های داخلی لوله قابی را از داخل تقویت می‌کنند. این مهاربندی به یکی از روش‌های لوله با دیوارهای برشی موازی، لوله در لوله و بالاخره لوله‌های دسته بندی شده انجام می‌شود.

۳- عملکرد سازه‌ای در ساختمان‌های با مهاربازویی

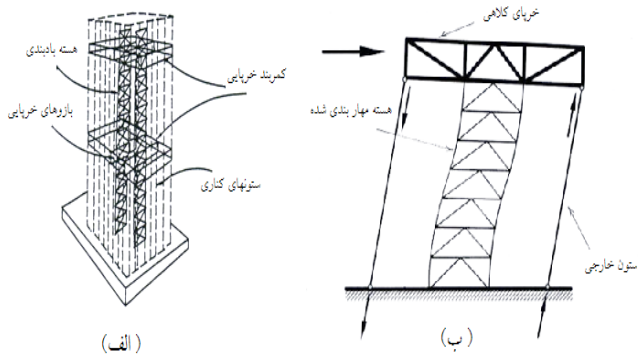
یک سازه‌ی بلند با مهار بازویی شامل یک هسته‌ی مرکزی بتن مسلح یا قاب فولادی مهاربندی شده است که به وسیله‌ی خرپاهای طره‌ای افقی به ستون‌های خارجی متصل می‌شود. در شکل ۱ نمونه‌ای از این سیستم نشان داده شده است. هنگامی که ساختمان تحت اثر بارهای افقی قرار می‌گیرد، مهارهای بازویی از دوران آزادانه هسته جلوگیری کرده، تغییر مکان‌های جانبی و لنگر واژگونی پای هسته را کاهش می‌دهند. با افزودن یک مهاربند محیطی به ارتفاع یک یا دو طبقه در تراز مهارهای بازویی، سختی جانبی افزایش یافته و ستون‌های محیطی نیز علاوه بر بارهای ثقلی در تحمل لنگرهای واژگونی مشارکت نموده و بازوی مقاوم در برابر معماری باشد متفاوت خواهد بود. به عنوان مثال به لحاظ کم کردن جابجایی بهترین موقعیت خرپای تکی در طبقه میانی ساختمان است. در مراجع [۱۵] و [۱۶] موقعیت بهینه خرپاهای کمربندی در حالت‌های دو خرپایی، سه خرپایی و چهار خرپایی نمایش داده شده است، در این سیستم مقاومت برشی عمدتاً توسط هسته تحمل می‌گردد. معمولاً اتصال بازوها به هسته صلب بوده و به ستون‌های خارجی به صورت ساده می‌باشد که ماحصل آن صرفاً ایجاد نیروهای محوری در آن ستون‌ها است. با افزایش ارتفاع و همچنین بازتاب سازه در روی خاک‌های نرم، پیروید ارتعاش سازه افزایش یافته و به جهت ارضای ضوابط طراحی در حد نهایی بهره برداری و کم کردن تغییر شکل جانبی، لاجرم سختی سازه بایستی افزایش داده شود و در نتیجه ضریب رفتار سازه برای رفتار شکل پذیر کاهش می‌یابد. با افزایش تقاضا برای محدود کردن تغییر شکل و یا سختی سازه تعداد کمربندهای خرپایی بایستی افزایش داده شود. در مرجع [۱۷] نتیجه گرفته شده است که با افزایش تعداد کمربندهای خرپایی جابجایی نسبی و کلی سازه کاهش یافته و با کاهش وزن فولاد مصرفی راندمان و شکل پذیری سیستم سازه‌ای افزایش می‌یابد. در این خصوص با مطالعه ظرفیت چند سیستم در یک آنالیز استاتیکی غیرخطی نتیجه گرفته شده است که به عنوان مثال در ساختمان ۲۵ طبقه برای مهاربند X ضریب رفتار سیستم با

می‌باشد. در این ارتباط، نشان داده شده که محل بهینه برای قرارگیری سیستم کمربندی حدوداً وسط ارتفاع سازه خواهد بود [۶ و ۷]. در پژوهش دیگر استفاده از ستون‌های محیطی با فاصله کم و با ابعاد بزرگ، افزایش سختی ستون‌ها و تیرهای حمال، متعادل سازی سختی بین تیرها و ستون‌ها و استفاده از تیرهای عمیق جهت افزایش سختی، به عنوان راه کارهایی برای به حداقل رساندن تاخیر یا لنگی برشی بیان شده است [۸]. با انجام مطالعات عددی بر روی سازه‌های متعدد، سازه قاب محیطی به صورت یک تیر قوطی شکل که عرض موثر بال کمترین دو مقدار نصف عرض قاب جان و یا ده درصد از ارتفاع سازه می‌باشد پیشنهاد شده است. همچنین روش‌های شبیه سازی متعددی ارائه گردیده است که رفتار الاستیک قاب‌های محیطی را به صورت پوسته‌های معادل در نظری می‌گیرد [۱۳-۱۱].

در سازه‌های بلند، به علت تأثیر مودهای بالاتر در پاسخ سازه، نیروهای ناشی از زلزله از روش‌های آنالیز دینامیکی مانند روش طیف پاسخ یا تحلیل تاریخچه زمانی محاسبه می‌گردند. همانگونه که مشاهده می‌شود، بیشتر تحقیقات انجام شده درباره سیستم‌های لوله‌ای و مهاربند بازویی، در مورد بهینه یابی محل کمربند محیطی در سیستم مهاربند بازویی و همچنین روش‌های کاهنده‌ی تأخیر برش در سیستم لوله‌ای می‌باشد و کمتر مقایسه مستقیمی بین این دو سیستم سازه‌ای به عمل آمده است. در این تحقیق جهت مقایسه رفتاری این دو سیستم در برابر بارهای جانبی دو سیستم سازه‌ای فوق را برای ۱ تا ۵۰ طبقه با لحاظ همه مودهای ارتعاش آنالیز دینامیکی تاریخچه زمانی کرده و سپس نتایج حاصله مورد ارزیابی قرار گرفته است. انعطاف پذیری خاک تکیه گاه ساختمان نیز در نظر گرفته شده و با استفاده از روش پارامترهای متمرکز تاثیر آن بر پاسخ سازه با فنرهای مناسب مدل شده است. برای این منظور، برای سازه‌های یک تا ۱۰ طبقه از سیستم قاب خمشی و برای سازه‌های بلندتر ۱۵ تا ۵۰ طبقه از سیستم‌های لوله‌ای و مهاربند بازویی همراه با کمربند محیطی استفاده شده است. جهت مقایسه کارایی این دو سیستم، نتایج به صورت نمودارهای حداکثر شتاب و تغییر مکان و وزن اسکلت فولادی ارائه می‌شود.

۲- عملکرد سازه‌ای در ساختمان‌های لوله‌ای

در سیستم قاب لوله‌ای با استقرار ستون‌های قوی‌تر در پیرامون پلان ساختمان، صلبیت خمشی و پیچشی سیستم به حداکثر خود رسیده و از ممان اینرسی کل ساختمان برای تحمل بارهای جانبی استفاده می‌گردد. رفتار سیستم لوله‌ای تحت اثر بارهای جانبی مانند خمش یک طره تو خالی است که در اثر آن تارهای سمت مخالف نیروهای جانبی کوتاه شده و تارهای سمت نیروهای جانبی طویل می‌گردد. علاوه بر این تغییر شکل‌های برشی ناشی از خمش موضعی تیرها و ستون‌ها نیز به این تغییر شکل‌ها اضافه می‌شوند [۱۴]. قاب‌های میانی عمدتاً وظیفه تحمل بارهای ثقلی را بر عهده دارند. در قاب‌های پیرامونی در جهت عمود بر نیروی جانبی که عمل بال را انجام می‌دهند مشکل لنگی برش وجود دارد. این مشکل ناشی



شکل ۱: سازه با مهار بازویی [۱۴]

Fig. 1. Structure with outrigger braces [14]

۴- سازه‌های مورد مطالعه

از آنجایی که در نظر است برش پایه و حداکثر تغییر مکان جانبی سیستم‌های مختلف برای محدوده‌ی وسیعی از زمان تناوب‌ها محاسبه گردد، تعداد طبقات ساختمان‌ها به صورت ۱، ۵، ۱۰، ۱۵، ...، ۵۰ طبقه در نظر گرفته می‌شود. به این منظور برای سازه‌های یک تا ۱۰ طبقه از سیستم قاب خمشی و برای سازه‌های ۱۵ تا ۵۰ طبقه یک بار از سیستم لوله‌ای و یک بار از سیستم مهار بازویی همراه با کمربند محیطی استفاده می‌شود. در شکل‌های ۲ و ۳ به ترتیب پلان و نمای قاب‌های سیستم‌های لوله‌ای و مهاربند بازویی نشان داده شده است. فرضیات در نظر گرفته شده به شرح ذیل می‌باشد.

با توجه به تقارن، سازه به صورت دو بعدی مورد تحلیل قرار می‌گیرد. روش تحلیل لرزه‌ای برای طراحی سازه‌ها آنالیز دینامیکی تاریخچه زمانی بوده و نتایج حداکثر پاسخ سازه استخراج شده است. فرض می‌شود ساختمان‌های در نظر گرفته شده فلزی بوده و در همه آن‌ها از مصالح مشابه (فولاد St37) استفاده شود. با توجه به وجود ستون‌های مشترک، ۳۰٪ اثر مولفه متعامد زلزله به صورت همزمان در طراحی در نظر گرفته شده است. ارتفاع همه طبقات ۳/۲ متر فرض می‌گردد. بارهای مرده و زنده، در طبقات ۵۵۰ و ۲۵۰ و در بام ۶۵۰ و ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمربع فرض می‌شود. سازه‌ها به صورت قاب‌های ویژه روی خاک نوع B (خاک نرم) و پهنه با خطر نسبی خیلی زیاد طبق آیین نامه UBC طراحی شده‌اند. محاسبات با نرم افزار ETABS انجام شده است. دیافراگم طبقات صلب فرض شده و اثر $P-\Delta$ در نظر گرفته شده است [۱۵]. به طور نمونه نتیجه طراحی به صورت ابعاد اعضای سازه‌ای در جداول ۱ و ۲ برای سازه‌های ۵۰ طبقه در سیستم لوله‌ای و مهار بازویی ذکر شده است. مشخصات اعضای سازه برای سایر ساختمان‌ها در مرجع [۱۵] ذکر گردیده است. زمان تناوب مود اول ساختمان لوله‌ای ۵۰ طبقه روی خاک سخت، ۵/۰۳ ثانیه و روی خاک نرم، ۷/۹۲ ثانیه می‌باشد. این مقادیر برای ساختمان مهار بازویی ۵۰ طبقه به ترتیب ۵/۵۲ و ۸/۶۷ ثانیه می‌باشند.

و بدون کمربند محیطی به ترتیب ۳/۸ و ۳ می‌باشد. به دلیل تاثیر مودهای بالاتر در پاسخ دینامیکی سازه‌های بلند، آنالیز تاریخچه زمانی خیلی دقیق تر از آنالیز استاتیکی معادل، پاسخ سازه را در برابر نیروهای جانبی ارزیابی می‌کند [۱۸]. چنانچه نیروی محوری ناشی از لنگر وازگونی در ستونهای طرفین سازه باعث افزایش تنش و یا بلند شدن پی در آن وجه شود ناگزیر در طراحی پی از شمع در پیرامون سازه و یا زیر هسته استفاده می‌شود. در طراحی سیستم مهاربازویی در حد نهائی مقاومت، تغییر شکل‌های جانبی به میزانی محدود می‌گردد که اثرات ثانویه ناشی از بارگذاری قائم (اثرات $\Delta-P$) باعث شکست و انهدام سازه نشده و در حد بهره برداری، تغییرشکلها به مقادیری محدود می‌شوند که اعضای غیرسازه‌ای نظیر درها و آسانسورها به خوبی عمل کرده و برای جلوگیری از ترک خوردگی و افت سختی، از ازدیاد و تشدید تنش در سازه جلوگیری شود. برای این منظور جابجایی سقف بالای ساختمان به ارتفاع آن (DRIFT) جهت کنترل حد بهره برداری سازه و کاهش اثرات ثانویه بایستی به ۰/۰۲ محدود گردد. چنانچه جابجایی سازه بیش از حد باشد، می‌توان با اعمال تغییراتی در شکل هندسی سازه و در نتیجه تغییر مود مقاومت در برابر بارهای جانبی، افزایش سختی خمشی اعضای افقی، افزایش سختی با استفاده از دیوارهای ضخیم تر و یا اعضای هسته‌ای، سخت تر کردن گره‌ها و یا حتی با شیب دادن ستون‌های خارجی جابجائی را کاهش داد. در شرایط بحرانی گاهی از میراگرهای محرک و مقاوم نیز برای کاهش جابجائی به عنوان فیوزهای سازه‌ای در زلزله‌های شدید استفاده می‌کنند [۱۹ و ۲۰].

یکی دیگر از مسائل تاثیرگذار در طراحی بارگذاری حرارتی است. تغییر شکل‌های حرارتی، به لحاظ اینکه طبیعتی الاستیک دارند و دارای تغییرات پیوسته فصلی و روزانه در طول عمر سازه هستند، از تغییرشکل‌های غیرالاستیک ناشی از خزش و آبرفتگی متفاوت می‌باشند. حرارت عاملی برای کوتاه یا طویل شدن اعضای سازه‌ای می‌باشد. اعضای سمت تابش آفتاب ساختمان، دارای درجه حرارتی بیش از اعضای سمت سایه خواهند بود و لذا ساختمان متمایل به تغییرمکان در جهت خلاف تابش را دارد. طبق مشاهدات و محاسبات در بعضی شرایط، تغییرمکان تابشی بالای ساختمان می‌تواند تا ۲۰ درصد جابجایی‌های ناشی از نیروی باد باشد.

برای حداقل نمودن حرکات نسبی ناشی از خزش و آبرفتگی در ساختمان‌های بتنی بایستی طرح اختلاط مناسب برای بتن طراحی شده و نظارت مناسب در مراحل بتن ریزی و عمل آوردن اعضای مختلف وجود داشته باشد. در صورت امکان در طراحی ستون‌ها و دیوارهای برشی مجاور تا حد امکان درصد فولاد مورد نیاز مشابه و تنش‌ها نزدیک به هم باشند.

۵- ارزیابی رفتار لرزه‌ای سازه‌ها

برای هر سازه‌ی سه بعدی، با توجه به فرکانس‌های چند مود اول سازه که حداقل ۹۰٪ جرم را فعال می‌کنند و باند فرکانسی غالب نگاهت‌های موجود، حداکثر ۱۰ تحلیل دینامیکی خطی تاریخچه زمانی صورت گرفته است. پس از انجام آنالیز دینامیکی سیستم‌ها، مقادیر حداکثر تغییر مکان بام و برش پایه استخراج شده و به ترتیب به PGD (حداکثر تغییر مکان زمین) و W (وزن ساختمان) نرمال گشته‌اند. اعداد حاصل به ترتیب ضریب بزرگنمایی تغییر مکان و ضریب زلزله (C) نامیده می‌شوند. برای به دست آوردن ضریب بازتاب سازه (B) بایستی ضریب زلزله C در نسبت g/PGA ضرب شود که در آن g شتاب ثقل بوده و PGA حداکثر شتاب زمین می‌باشد. مقادیر به دست آمده از تحلیل دینامیکی سیستم‌های فوق در اثر شتاب نگاهت‌های مختلف بایستی برای ارائه مقادیر پاسخ حداکثر در هر نقطه پیرودی، به نحو مناسبی از نظر آماری مورد استفاده قرار گیرند تا عددی به دست آید که نماینده مقدار مورد انتظار شدت پاسخ سازه در زمان تناوب مورد نظر باشد. معمولاً توزیع‌های نرمال یا لاگ نرمال برای این منظور بکار برده می‌شوند. در این تحقیق از توزیع نرمال برای ترکیب آماری نتایج در هر نقطه پیرودی استفاده شده است. سپس نتایج پاسخ‌های سازه برای هر شتاب نگاهت به روش ترکیب مربعی کامل ترکیب شده و با یک تحلیل آماری پاسخ سازه برای شتاب نگاهت‌های مختلف برای ترازهای میانگین (۵۰٪ سطح منحنی گاوس) و فوق میانگین (متوسط به اضافه یک انحراف معیار (۸۴/۱٪ سطح منحنی گاوس)) بر حسب زمان تناوب اصلی سازه‌های تحلیل شده ترسیم گشته‌اند.

۶- شتاب نگاهت‌های مورد استفاده

با توجه به اینکه استان خراسان یکی از استان‌های لرزه خیز مهم کشور می‌باشد، برای رعایت مشابهت چشمه‌های لرزه زا در این تحقیق از ۴۴ نگاهت اصلاح شده استان خراسان استفاده شده است که مورد تصحیح خطاهای فرکانس بالا و فرکانس پایین قرار گرفته است. جهت حذف نویزهای فرکانس بالا و پایین برای هر رکورد یک پنجره سیگنال (از بخش اصلی نگاهت) و یک پنجره نویز (معمولاً قسمت انتهایی نگاهت) انتخاب می‌شوند و طیف فوریه نرمال شده آنها محاسبه می‌شود. سپس نسبت سیگنال به نویز محاسبه می‌گردد و پس از عبور هر نگاهت از فیلتر میان گذر به دست آمده، نگاهت اصلاح شده به دست می‌آید [۲۱]. مشخصات تعدادی از این شتاب‌نگاشت‌ها در جدول ۳ ذکر گردیده است. شتاب نگاهت‌های انتخاب شده قبل از آنالیز بایستی مقیاس شوند. برای این منظور هر شتاب‌نگاشت به مقدار حداکثر خود (PGA) مقیاس می‌شود. چون هدف از محاسبات این تحقیق، تولید طیف‌هایی برای پارامترهای طرح لرزه ای در یک استان لرزه خیز است، لازم است از مخلوطی از زلزله‌های منطقه صرف‌نظر از شدت و فاصله استفاده شود.

جدول ۱: ابعاد اعضای سازه‌ای ساختمان لوله‌ای ۵۰ طبقه

Table 1. Structural members of the 50-story tubular structure

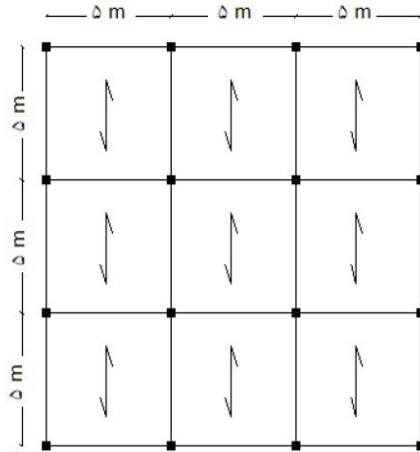
مشخصات سازه طبقات تیپ	مقطع ستونها (BOX)		مقطع تیرها (IPE)	
	کناری	میانی	کناری	میانی
۴۶-۵۰	۲۵*۲۵*۱	۴۰*۴۰*۱	۳۰	۳۰
۴۱-۴۵	۳۰*۳۰*۱/۵	۶۰*۶۰*۱	۳۰	۳۰
۳۶-۴۰	۳۵*۳۵*۱/۵	۸۰*۸۰*۱	۳۲	۳۲
۳۱-۳۵	۴۰*۴۰*۲	۹۵*۹۵*۱	۳۲	۳۲
۲۶-۳۰	۵۰*۵۰*۲	۱۰۵*۱۰۵*۱	۳۴	۳۴
۲۱-۲۵	۵۵*۵۵*۲	۱۱۵*۱۱۵*۱	۳۴	۳۴
۱۶-۲۰	۶۰*۶۰*۲	۱۳۰*۱۳۰*۱/۵	۴۰	۴۰
۱۱-۱۵	۶۵*۶۵*۲	۱۳۵*۱۳۵*۲	۴۰	۴۰
۶-۱۰	۷۰*۷۰*۲/۵	۱۴۵*۱۴۵*۲	۳۲	۳۴
۱-۵	۸۰*۸۰*۲/۵	۱۴۵*۱۴۵*۲	۳۲	۳۴

جدول ۲: ابعاد اعضای سازه‌ای ساختمان مهار بازویی ۵۰ طبقه

Table 2. Structural members of the 50-story outrigger-bracing structure

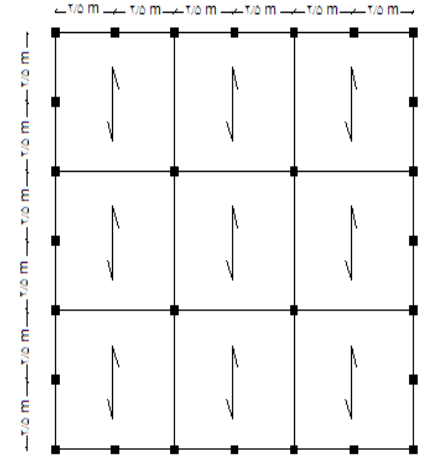
مشخصات سازه طبقات تیپ	مقطع ستونها (BOX)		مقطع تیرها (IPE)		شماره مقطع مهارها
	کناری	میانی	کناری	میانی	
۴۶-۵۰	۴۵*۴۵*۱	۹۵*۹۵*۱	۳۲	۳۲	IPE۱۶
۴۱-۴۵	۴۷*۴۷*۱	۹۵*۹۵*۱	۳۲	۳۲	IPE۱۶
۳۶-۴۰	۵۲*۵۲*۱	۱۱۰*۱۱۰*۲	۳۲	۳۲	IPE۲۴
۳۱-۳۵	۶۵*۶۵*۲	۱۱۰*۱۱۰*۲/۵	۳۲	۳۲	IPE۲۴
۲۶-۳۰	۷۰*۷۰*۲/۵	۱۱۵*۱۱۵*۳/۵	۳۰	۳۰	IPE۳۰
۲۱-۲۵	۷۲*۷۲*۲	۱۲۰*۱۲۰*۳/۵	۳۰	۳۰	IPE۳۰
۱۶-۲۰	۷۵*۷۵*۲	۱۳۷*۱۳۷*۳	۲۸	۲۸	IPE۴۰
۱۱-۱۵	۹۰*۹۰*۲	۱۳۷*۱۳۷*۳/۵	۲۸	۲۸	IPE۴۰
۶-۱۰	۱۰۰*۱۰۰*۲	۱۵۰*۱۵۰*۳/۵	۲۴	۲۴	IPE۴۵
۱-۵	۱۱۰*۱۱۰*۲/۵	۱۵۵*۱۵۵*۴	۲۴	۲۴	IPE۴۵

C1 ستونهای داخلی: تیپ
 C2 ستونهای محیطی: تیپ
 B1 تیرهای داخلی: تیپ
 B2 تیرهای محیطی: تیپ



الف- پلان

C1 ستونهای داخلی: تیپ
 C2 ستونهای محیطی: تیپ
 B1 تیرهای داخلی: تیپ
 B2 تیرهای محیطی: تیپ

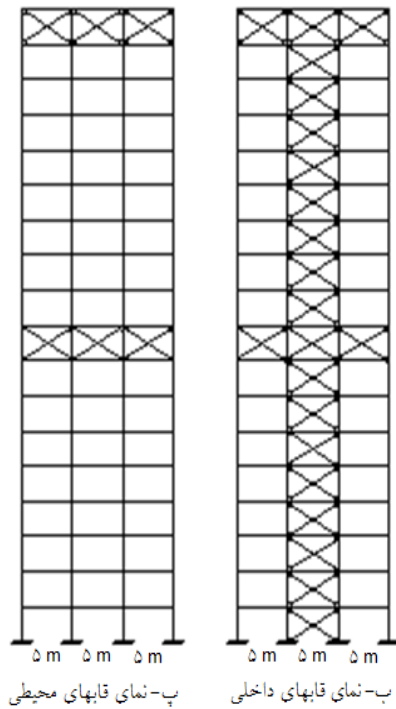


الف- پلان

شکل ۲: پلان تیپ و نمای سازه لوله‌ای

Fig. 2. Typical plan and elevation of the tubular structures

BR1 بادبندهای داخلی: تیپ
 BR2 بادبندهای محیطی: تیپ

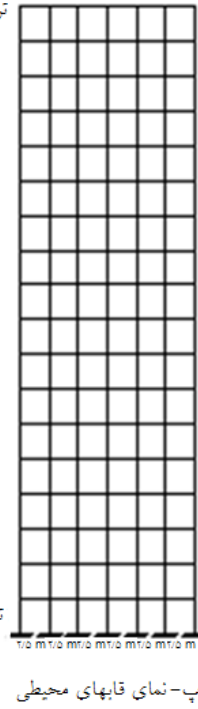


پ- نمای قابهای محیطی

ب- نمای قابهای داخلی

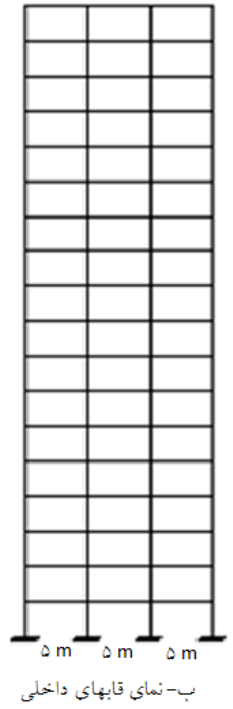
تراز بام

تراز مبنا (فونداسیون)



پ- نمای قابهای محیطی

ارتفاع تمام طبقات ۳.۲ متر



ب- نمای قابهای داخلی

شکل ۳: پلان تیپ و نمای سازه مهار بازویی

Fig. 3. Typical plan and elevation of the outrigger structures

جدول ۳: مشخصات تعدادی از شتاب نگاشت‌های مورد استفاده

Table 3. Characteristics of the ground motions

Spec. Int. (cm) ***	DURATION sec**	PGD cm	PGV cm/sec	PGA cm/sec ²	شماره نگاشت
۳۷/۴۰	۴/۳۲	۰/۰۴	۱/۵۳	۶۹/۷۲	۱
۶۳/۳۸	۱۰/۷	۰/۰۷۵	۲/۲۹	۸۳/۳۶	۲
۶۳/۲۷	۵/۷۴	۰/۰۸	۲/۴۱	۸۱/۹۰	۳
۱۲۴/۸۷	۱۷/۲	۲/۲۶	۹/۲۴	۶۳/۲۹	۴
۱۲۳/۰۶	۱۵/۶	۲/۳۱	۱۰/۰۸	۸۹/۳۱	۵
۷۷/۳۰	۹/۴۲	۰/۲۴	۴/۱۵	۱۰۰/۶	۶
۱۰۹/۱۴	۸/۵۹	۰/۱۶	۳/۱۰	۹۱/۰۸	۷
۴۰/۹۲	۵/۰۸	۰/۲۲	۵/۲۴	۱۵۷/۵	۸
۴۲/۷۰	۷/۲۰	۰/۲۶	۷/۲۵	۲۶۱/۵	۹
۳۰/۲۵	۹/۴۲	۱/۳۸	۸/۷۵	۲۱۷/۱	۱۰
۱۴۶/۶۶	۹/۴۲	۱/۹۸	۷/۳۸	۸۶/۷۵	۱۱
۱۵۵/۷۶	۶/۶۸	۲/۴۸	۹/۹۶	۷۹/۹۲	۱۲
۸۹/۸۴	۱۸/۸	۰/۰۴۴	۱/۶۰	۶۳/۹۸	۱۳
۱۱۶/۸۷	۱۳/۶۰	۰/۰۴۳	۱/۷۲	۷۲/۷۱	۱۴
۱۰۸/۴۹	۸/۵۲	۰/۱۲	۲/۵۳	۷۶/۷۶	۱۵
۳۳/۶۳	۳۴/۵	۰/۴	۲/۴۱	۱۰۵/۳۴	۱۶
۵۸/۹۰	۳۴/۹	۰/۵	۳/۵۸	۱۰۴/۸	۱۷

جدول ۴: سختی فنرهای پی

Table 4. Stiffness coefficients of the foundation springs

درجه آزادی	رابطه سختی
Horizontal	$(9.2Ga)/(2-v)$
Rocking	$(4.0Ga^3)/(1-v)$

۸- بررسی نتایج

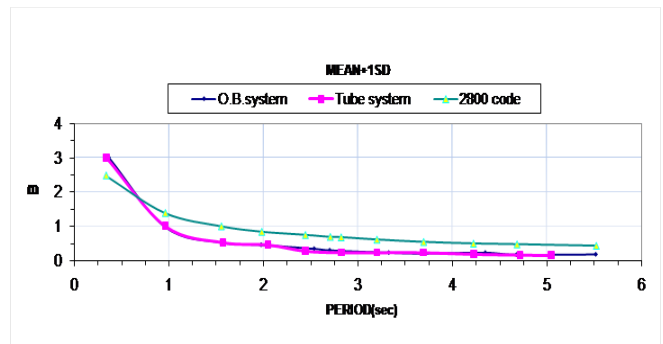
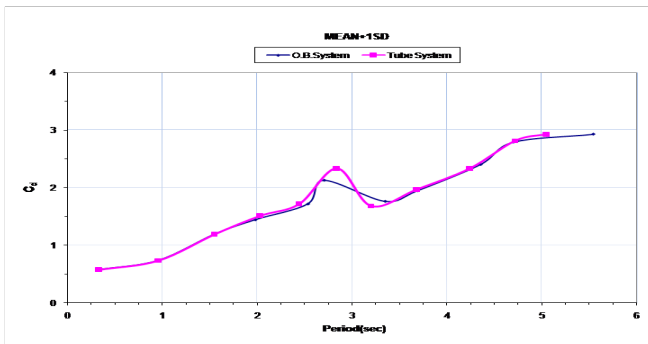
در شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب برای فرض تکیه گاه صلب و تکیه گاه انعطاف پذیر، مقادیر حداکثر واکنش در تراز فوق میانگین در نمودارهای ضریب بازتاب و ضریب بزرگنمایی تغییر مکان بر حسب پریود مود اول سازه‌های آنالیز شده به همراه طیف ضریب بازتاب استاندارد ۲۸۰۰ ارائه شده است. همچنین برای مقایسه اقتصادی بین دو سیستم، نمودار وزن کل فولاد لازم در طراحی هر یک از سیستم‌ها نیز محاسبه و در شکل ۶ نمایش داده شده است. به طور کلی، طیف حاصله برای ضریب بازتاب (شکل ۴) ضمن هم خوانی با آیین نامه زلزله ایران از نظر مقادیر طیف در زمان تناوبهای مختلف، از نظر شکلی هم تغییراتی مشابه آیین نامه داشته و روند نزولی در

۷- اعمال انعطاف پذیری تکیه‌گاه

با توجه به تعداد طبقات ساختمان‌های طراحی شده، سیستم پی همه ساختمان‌ها برای سهولت به صورت پی گسترده در نظر گرفته شده است. این فرض برای ساختمان‌های ۵ طبقه ممکن است با واقعیت منطبق نباشد ولی برای سایر ساختمان‌های این مطالعه منطقی است. پی گسترده صلب فرض شده و در حالت تکیه‌گاه انعطاف پذیر همراه با سازه مدل شده و روی فنرهای متمرکز در مرکز سطح آن قرار داده شده است. سختی این فنرها در راستای افقی و چرخشی (گهواره‌ای) از نشریه ASCE41-06 استخراج و در جدول ۴ ارائه شده است. برای محاسبه مقادیر این جداول، ضریب ارتجاعی برشی خاک طبق ضوابط ASCE41-06 به صورت دینامیکی و برای هر نوع خاک به دست آمده است. خاک‌ها به دو گروه A و B تقسیم بندی شده‌اند. گروه A شامل خاک‌های نوع I و II طبق گروه بندی استاندارد ۲۸۰۰ ایران و گروه B شامل خاک‌های نوع III و IV می‌باشد. همچنین از میرایی معادل برای سیستم فوق استفاده گردیده است.

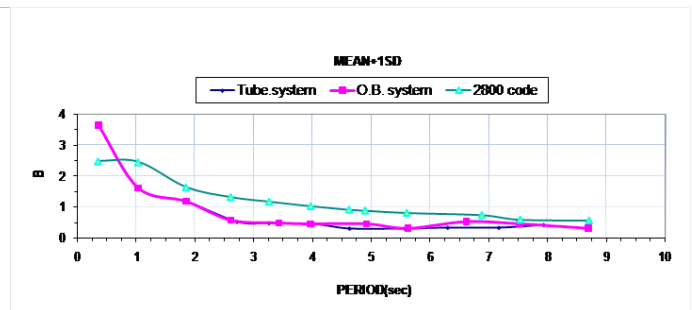
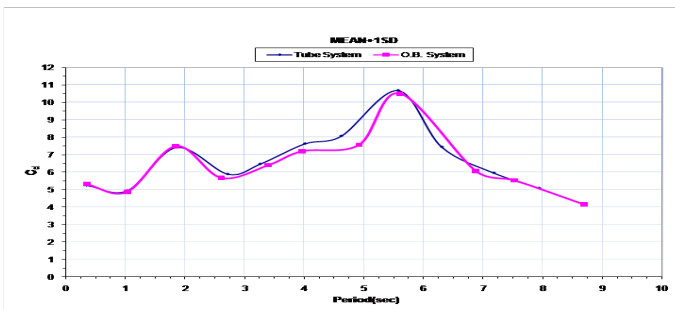
است ولی برای بیشترین اختلاف که در مورد ساختمان ۲۵ طبقه در شکل ۴ مشاهده می‌شود، سیستم مهاربند بازویی تنها به اندازه ۹٪ کمتر از سیستم لوله‌ای تغییر مکان دارد. در همین نقطه از شکل ۶ دیده می‌شود که سیستم لوله‌ای ۳۳٪ فولاد کمتری مصرف نموده پس نهایتاً سیستم لوله‌ای برای ساختمان ۲۵ طبقه از نظر وزن فولاد مصرفی اقتصادی‌تر از سیستم مهاربند بازویی عمل کرده است. نتایج مشابهی برای سایر ساختمان‌ها با تعداد طبقات دیگر نیز به دست می‌آید. بر این اساس در ساختمان‌های ۱۵ طبقه به بالا طبق شکل ۶، وزن فولاد مصرف شده در سیستم مهاربند بازویی بیشتر از سیستم لوله‌ای است. حداکثر اختلاف مربوط به ساختمان ۴۵ طبقه است، به طوری که در اینجا وزن فولاد به کار رفته در سیستم مهاربند بازویی ۱۱۴۰ تن و در سیستم لوله‌ای ۹۴۰ تن می‌باشد، یعنی در سیستم مهاربند بازویی ۲۱٪ بیشتر فولاد مصرف شده است. با مقایسه‌ی شیب منحنی‌ها در انتها پیش بینی می‌شود که احتمالاً میزان فولاد مورد نیاز در سیستم لوله‌ای در ساختمان‌های بلندتر از ۵۰ طبقه بیشتر از سیستم مهاربند بازویی باشد.

پریودهای بالاتر دارد. همین موضوع در مورد ضریب بزرگنمایی تغییر مکان هم دیده می‌شود یعنی اولاً مقادیر آن قابل مقایسه با سیستم‌های دیگر در آیین نامه است و ثانیاً روند تغییرات آن با پریود افزایشی است. در شکل ۴ مشاهده می‌شود که در اکثر نقاط پریودی، طیف‌های بازتاب نیرو و تغییر مکان دو سیستم هم پوشانی دارند و در بعضی نقاط طیف بازتاب نیروی سیستم مهاربند بازویی کمی از سیستم لوله‌ای بیشتر است (پریودهای ۲ تا ۳ و ۴ تا ۵، ۴ تا ۵، ۴ تا ۵ ثانیه معادل ساختمان‌های ۱۵ تا ۳۰ طبقه، کمتر از ۲۰٪). همچنین همانگونه که در این شکل‌ها دیده می‌شود، ضریب بازتاب نیرو در ساختمان‌های ۱۰ طبقه به بالا (برای خاک نرم، ۱۵ طبقه به بالا) در هر دو سیستم مهاربند بازویی و لوله‌ای کمتر از ۱ می‌باشد. حتی در تراز فوق میانگین در شکل ۴، استاندارد ۲۸۰۰ ضریب بازتاب نیرو را برای ساختمان‌های ۵ طبقه یا کوتاه‌تر که بر روی سنگ یا خاک سخت واقع هستند (خاک‌های تیپ I و II در این استاندارد) حدوداً ۱۸٪ دست پایین برآورد می‌کند ولی برای ساختمان‌های بلندتر دست بالا می‌باشد. اگر چه ضریب بازتاب تغییر مکان در سیستم لوله‌ای عمدتاً بزرگتر یا مساوی سیستم مهاربند بازویی



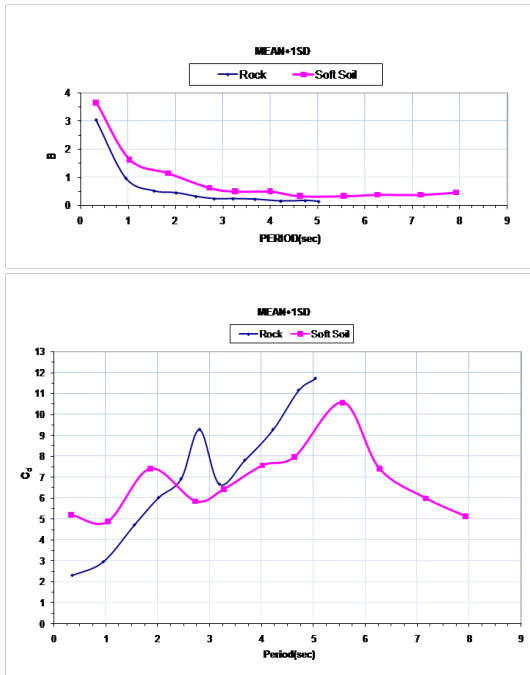
شکل ۴: ضریب بزرگنمایی نیرو (B) و تغییر مکان (C_d) برای سیستم‌های با تکیه گاه صلب در تراز فوق میانگین

Fig. 4. The force (B) and displacement (C_d) amplification factors for the rigid-base systems at the average plus one Sigma level



شکل ۵: ضریب بزرگنمایی نیرو (B) و تغییر مکان (C_d) برای سیستم‌های با تکیه گاه انعطاف پذیر در تراز فوق میانگین

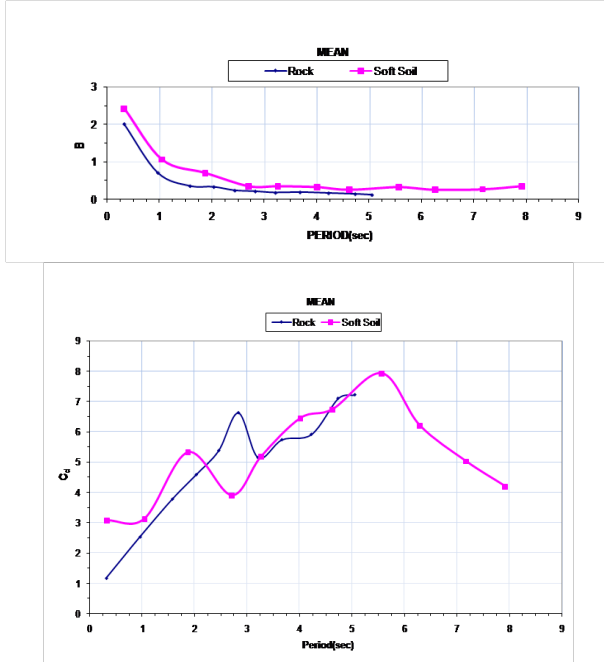
Fig. 5. The force (B) and displacement (C_d) amplification factors for the flexible-base systems at the average plus one Sigma level



شکل ۷: ضرایب بزرگنمایی نیرو و تغییر مکان سیستم‌های لوله‌ای

در تراز فوق میانگین برای تکیه گاه‌های صلب و انعطاف پذیر

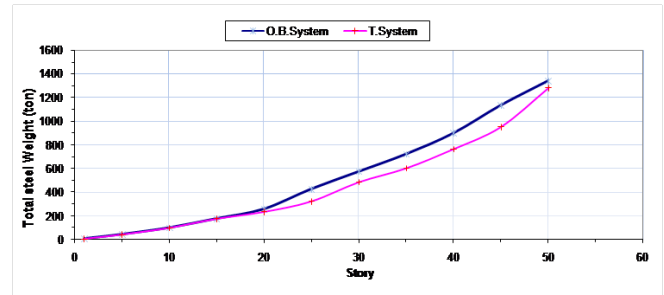
Fig. 7. The force and displacement amplification factors for the tubular systems at the average plus one Sigma level for rigid and flexible bases



شکل ۸: ضرایب بزرگنمایی نیرو و تغییر مکان سیستم‌های لوله‌ای

در تراز میانگین برای تکیه گاه‌های صلب و انعطاف پذیر

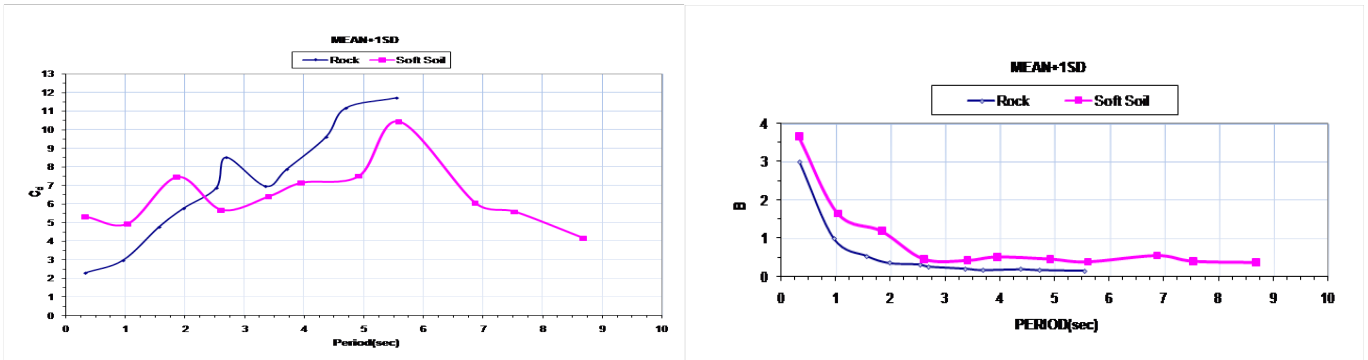
Fig. 8. The force and displacement amplification factors for the tubular systems at the average level for rigid and flexible bases



شکل ۶: مقایسه‌ی وزن فولاد به کار رفته در سیستم‌های لوله‌ای و مهار بازوئی با تکیه گاه صلب

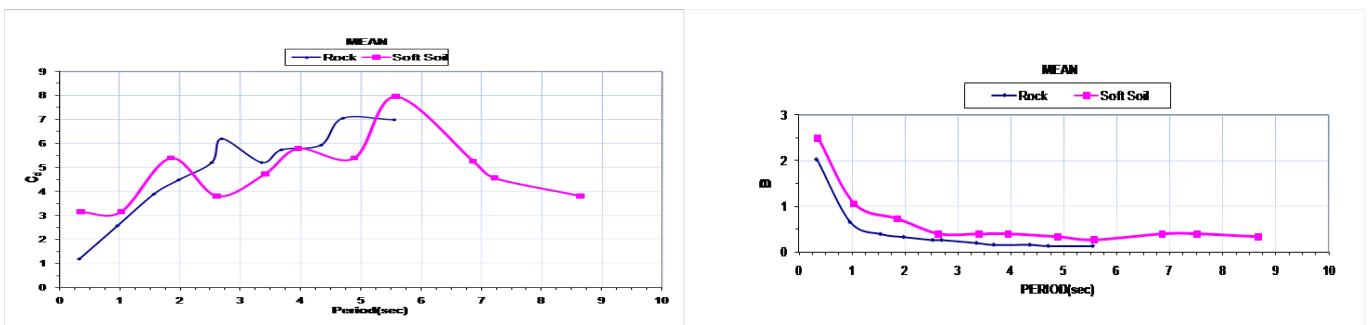
Fig. 6. Comparison of the utilized steel in the systems on rigid base

برای سهولت مقایسه، نمودارهای واکنش مربوط به سیستم‌های واقع بر تکیه گاه صلب و انعطاف پذیر به صورت توأم در شکل‌های ۷ الی ۱۰ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در هر دو سیستم سازه‌ای، ضریب بازتاب تغییر مکان در محدوده پربودهای کوچک (ساختمان‌های کوتاه) برای تکیه گاه صلب کوچک‌تر از ضریب بازتاب نیرو است، ولی در مورد تکیه گاه انعطاف پذیر در تمام نقاط پربودی ضریب بازتاب تغییر مکان بزرگتر از ضریب بازتاب نیرو می‌باشد. در ساختمان‌های ۱۵ طبقه به بالا ضریب بازتاب تغییر مکان بر روی تکیه گاه صلب بزرگتر از تکیه گاه انعطاف پذیر است و با افزایش ارتفاع ساختمان این اختلاف بیشتر می‌شود (به استثنای ساختمان‌های ۳۰ و ۳۵ طبقه که برای تکیه گاه انعطاف پذیر قدری بیشتر است). همچنین ضریب بازتاب نیرو برای تکیه گاه انعطاف پذیر در همه نقاط طیف بزرگتر از تکیه گاه صلب می‌باشد. در ساختمان‌های ۱ تا ۱۰ طبقه اختلاف بین مقادیر طیف بازتاب نیرو در دو حالت تکیه گاه صلب و انعطاف پذیر زیاد است ولی در ساختمان‌های بین ۱۵ تا ۳۵ طبقه این اختلاف کوچک می‌باشد. اختلاف مزبور در ساختمان‌های مربوط به محدوده پربودی ۳۵ طبقه به بالا مجدداً افزایش می‌یابد. طیف بازتاب نیرو برای تکیه گاه انعطاف پذیر در تراز فوق میانگین از تراز میانگین بسیار بالاتر است در حالی که در تکیه گاه صلب این اختلاف کمتر می‌باشد. حداکثر مقدار طیف بازتاب تغییر مکان در مورد خاک نرم، در تراز فوق میانگین ۱۰،۵ و در تراز میانگین حدود ۷،۹ است. همچنین بیشینه طیف بازتاب نیرو در مورد خاک نرم، در تراز فوق میانگین ۳،۷ و در تراز میانگین ۲،۵ می‌باشد. از حدود ساختمان ۱۵ طبقه به بالا، ضریب بازتاب در تراز فوق میانگین بیشتر از ۵ برابر ضریب بازتاب نیرو بوده و برای تراز میانگین اندکی کمتر می‌باشد. بنابراین به نظر می‌رسد که برای ساختمان‌هایی که پربود آنها در چنین محدوده‌ای قرار دارند، طراحی بر اساس تغییر مکان معقول‌تر باشد.



شکل ۹: ضرایب بزرگنمایی نیرو و تغییر مکان سیستم‌های مهاربند بازویی در تراز فوق میانگین برای تکیه گاه‌های صلب و انعطاف پذیر

Fig. 9. The force and displacement amplification factors for the outrigger systems at the average plus one Sigma level for rigid and flexible bases



شکل ۱۰: ضرایب بزرگنمایی نیرو و تغییر مکان سیستم‌های مهاربند بازویی در تراز میانگین برای تکیه گاه‌های صلب و انعطاف پذیر

Fig. 10. The force and displacement amplification factors for the outrigger systems at the average level for rigid and flexible bases

در استاندارد ۲۸۰۰ در محدوده ساختمان‌های کمتر از ۵ طبقه برای هر دو نوع تکیه گاه صلب و انعطاف پذیر دست پایین می‌باشد و در ساختمان‌های بلندتر، طیف مزبور تا میزان ۴۸ درصد دست بالاست که این اختلاف برای خاک نرم بیشتر می‌باشد. از نقطه نظر شرایط تکیه گاه، ضریب بازتاب تغییر مکان در سیستم‌های مهار بازویی در تکیه گاه صلب با افزایش دوره تناوب سازه افزایش می‌یابد، در حالی که در تکیه گاه انعطاف پذیر این ضرایب با افزایش دوره تناوب پس از افزایش تا پیروید خاصی، روند کاهشی دارند. این موضوع به دلیل افزایش زمان تناوب اصلی سازه با پای انعطاف پذیر است به گونه‌ای که همانگونه که به خوبی شناخته شده است، پس از عبور از زمان تناوب مشخصی، ضریب بزرگنمایی تغییر مکان به سمت واحد میل خواهد نمود. همچنین ضریب بازتاب نیرو در این دو نوع سیستم در تکیه گاه انعطاف پذیر اندکی بیشتر از تکیه گاه صلب می‌باشد که می‌تواند به دلیل اثر $P-\Delta$ باشد.

مراجع

- [1] K.-S. Moon, J.J. Connor, J. E.Fernandez, Diagrid Structural Systems For Tall Buildings; Characteristics and Methodology for Preliminary design, Struct. Design Tall Spec. Buildings, 16 (2007) 205-230.

۹- نتیجه گیری

در این مقاله مقایسه‌ای بین دو سیستم سازه‌ای مورد کاربرد در سازه‌های بلند یعنی سیستم لوله‌ای و سیستم مهار بازویی از نقطه نظر رفتار دینامیکی به عمل آمد. برای این منظور ضریب بازتاب نیرو و ضریب بزرگنمایی تغییر مکان جانبی برای ساختمان‌های تا ۵۰ طبقه در هر یک از دو سیستم فوق با لحاظ انعطاف پذیری تکیه گاه یا اندرکنش خاک و سازه در آنالیز دینامیکی خطی محاسبه شد. در این محاسبه از نگاهت‌های اصلاح شده استان خراسان استفاده گردید و نتایج با استفاده از روش‌های آماری و بر حسب پیروید مود اول سازه‌ها به صورت طیف ارائه شدند. از بررسی طیف‌های حاصل نتیجه گرفته شد که در محدوده مورد مطالعه، این دو سیستم از نظر مقاومت تقریباً یکسان بوده ولی از نظر سختی، سیستم مهار بازویی با توجه به استفاده از مولفه سختی محوری ستون‌های خارجی، اندکی بهتر عمل می‌نماید. اما از نقطه نظر وزن فولاد مصرفی، سیستم لوله‌ای از ساختمان ۱۵ طبقه به بالا با توجه به تعداد بسیار کمتر اعضا در آن، به طرز قابل توجهی بر سیستم مهار بازویی برتری داشته است. این موضوع با توجه به این نکته که تعداد اتصالات در سیستم لوله‌ای که یک سیستم خمشی است از سیستم خرابایی مهار بازویی بسیار کمتر است نیز برجسته‌تر می‌گردد. ضریب بازتاب نیروی زلزله

- [13] A. Kheiroddin, H. Jamshidi, Study of tubular resisting structural systems in tall buildings, in: National Conference on Structural Strengthening, Yazd, 2009.
- [14] S.S. B., A. Cool, Analysis and Design of Tall Buildings, University of Mashhad Publications, 1997.
- [15] A.H. Mohajeri, Base shear and roof displacement variation of tubular and outrigger-brace tall buildings on flexible base, University of Yazd, 2000.
- [16] S.a.C.C.C.P. B. Taranath, , Group, 2012, Structural Analysis and Design of Tall Buildings, Taylor & Francis, 2012.
- [17] R. Razani, M. Keivani, Effect of outrigger bracing on the behavior factor of steel structures, in: Fourth International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, Tehran, 2004.
- [18] D. Nimmy, R. Renjith, Analytical Investigation on the Performance of Tube-in-Tube Structures Subjected to Lateral Loads, International Journal of Technical Research and Applications, July-August 2016 284-288.
- [19] G.W.M. HO, The Evolution of Outrigger System in Tall Buildings, International Journal of High-Rise Buildings, 5(1) (2016) 21-30.
- [20] J.M.W. Brownjohn, T.C. Pan, Response of a tall building to long distance earthquakes, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 30 (2001) 709–729
- [21] M. Jami, Calculation of the design spectrum based on the seismic records of Khorasan province using the Newmark-Hall method, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, 1998.
- [22] Standard 2800, Seismic Design Regulations for Buildings, in: Building and Housing Research Center, 2009.
- [2] F.R. Khan, N.R. Amin, Analysis and Design of Framed Tube Structures for Concrete Buildings, ACI, Pub, (1973) 39-60.
- [3] R. Rahgozar, A. Ahmadi, O. Hosseini, M. Malekinejad, A simple mathematical model for static analysis of tall buildings with two outrigger-belt truss systems, International Journal of Structural Engineering and Mechanics, 40(1) (2011) 65-84.
- [4] M. Malekinejad, R. Rahgozar, Free vibration analysis of tall buildings with outrigger-belt truss system, An International Journal of Earthquakes and Structures, 2(1) (2011) 89-107.
- [5] M. Tajasem, Seismic performance of tubular tall structures., Islamic Azad University Yazd branch 2012.
- [6] B.S. Taranath, Optimum belt truss locations for high-rise structures AISC Engineering Journal, 11(First Quarter) (1974) 18-21.
- [7] B.S. Taranath, Structural analysis and design of tall buildings in, McGraw-Hil, 1988, pp. 257-278.
- [8] H. Kazemi Niakarani, F. Khoshnoudian, Seismic behavior of tall buildings and a solution for the shear lag phenomenon, in: National Congress of Civil Engineering, Mashhad University, 2011.
- [9] P. Uniform Building Code, CA., in: International Conference of Building Officials, 1994.
- [10] J.M.W. Brownjohn, T.-C. Pan, X.Y. Deng, Correlating dynamic characteristics from field measurements and numerical analysis of a high-rise building, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 29(4) (2000) 523-543.
- [11] F.R. Khan, N.R. Amin, Optimal Design of Frame Tube Structures for Tall Concrete Buildings, Structural Engineering, 51(3) (1973) 85-92.
- [12] A. Coull, B. Bose, Simplified Analysis of Frame – Tube Structures, J. struct. Div. , ASCE, , 101(11) (1975) 2223-2240.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

F. Behnamfar, A.H. Mohajeri, Base Shear Coefficients and Displacement Amplification Factors of Tall Buildings with Tubular and Outrigger Bracing Systems on Flexible Soil. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 49(4) (2018) 723-732.

DOI: 10.22060/ceej.2017.11307.5004

