

مقایسه پدیده تأخیر برشی سیستم‌های سازه‌های مختلف در ساختمان بلند تحت اثر نیروی باد

حمید بیرقی*^۱ و علی خیرالدین^۲

^۱ استادیار گروه مهندسی عمران، واحد مهدیشهر، دانشگاه آزاد اسلامی

^۲ استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

(دریافت: ۹۷/۹/۲۷، پذیرش: ۹۸/۴/۲۳، نشر آنلاین: ۹۸/۴/۲۳)

چکیده

در این مقاله، موضوع تأخیر برشی در ارتفاع سازه‌ها و همچنین توزیع نیرو برشی طبقه بین اجزای سازه‌ای موجود در هرکدام از طبقات مختلف ساختمان بلند بتن مسلح دارای سیستم‌های سازه‌ای متنوع تحت اثر نیروی جانبی باد مورد بررسی قرار می‌گیرد. سیستم سازه لوله قابی، سازه لوله در لوله، سازه لوله دسته‌بندی شده، سازه لوله با هسته بتن مسلح، سازه لوله با هسته با مهار بازویی و سازه لوله مهاربندی شده مورد تحقیق قرار می‌گیرد. پاسخ مدل‌های عددی نشان می‌دهد که کم‌ترین نسبت تأخیر برشی مربوط به سیستم لوله دسته‌بندی شده و سیستم لوله با هسته با مهار بازویی است که به ترتیب حدود ۱/۸ و ۲ است و بیشترین آن متعلق به سیستم لوله قابی و لوله در لوله با نسبت تأخیر برشی حدود ۴ و ۳/۸ است. در برخی طبقات در ترازهای بالاتر، اجزای سازه‌ای داخلی نیروی برش اضافی بر سازه لوله پیرامونی تحمیل می‌کنند. این موضوع به نوعی اندرکنش لوله پیرامونی را با اجزا یا لوله داخلی نشان می‌دهد، به گونه‌ای که در نزدیک بام سازه این برش اضافی وارد شده بر لوله پیرامونی، چندین برابر بیشتر از برش خارجی وارد بر طبقه است. به نظر می‌رسد که قطع یا تضعیف لوله داخلی در حدود ترازهای ۰/۸H منطقی باشد.

کلیدواژه‌ها: سازه بلند، بتن مسلح، سیستم سازه‌ای، تأخیر برشی.

۱- مقدمه

این مقاله از آن به عنوان سیستم لوله‌ای یاد می‌شود، به نوعی تکامل یافته سازه‌های قاب خمشی معمولی بوده و می‌تواند دارای اسکلت فولادی، بتن مسلح یا مختلط باشد. یکی از ایده‌های اصلی به کار رفته در این سیستم تجمع مصالح در دورترین فاصله از تار خنثی مقطع کل سازه می‌باشد. به عبارت دیگر عملکرد ساختمان با عملکرد یک پروفیل قوطی تو خالی (مثلاً با مقطع مربع) قابل تمثيل است. در این سیستم فاصله بین ستون‌های پیرامونی بسیار نزدیک به هم می‌باشد که تیرهای قوی و سخت با اتصالات صلب به این ستون‌ها متصل شده است. لذا کل ساختمان به صورت یک طره قائم بسیار بزرگ در برابر ممان واژگونی ناشی از بارهای جانبی مقاومت می‌کند. معمولاً فاصله ستون‌های خارجی برای ساختمان‌های لوله‌ای ۲ تا ۳ متر می‌باشد و عمق تیرهای محیطی بین ۰/۶ تا ۱/۳ متر متغیر است. توجه شود که ساختمان‌های با قاب خمشی متداول مورد بررسی‌های فراوان واقع شده‌اند اما ساختمان بلند دارای ناشناختگی بیشتری است (Siavash, ۲۰۰۱).

معمول‌ترین نوع سیستم لوله قابی (لوله قاب محیطی) شامل چهار

در سال ۱۹۶۹، Fazlure Khan برای اولین بار اقدام به گروه‌بندی سیستم‌های سازه‌ای برای ساختمان‌های بلند نمود. در آن زمان قاب خمشی بیشترین کاربرد را در طراحی ساختمان‌های نسبتاً بلند به خود اختصاص داده بود. سیستم لوله قابی یکی از سیستم‌هایی است که Fazlure Khan خود ابداع کننده آن بود. البته دسته‌بندی دیگری توسط Ali و Moon در سال ۲۰۰۷ نیز منتشر شد که در آن سیستم‌های سازه‌ای برای ارتفاع‌های مختلف طبقه‌بندی شده بودند (Ali و همکاران، ۲۰۰۷).

طراحان برای کنترل جابه‌جایی و تأمین معیارهای آسایش و ایمنی جانی در سازه‌های بلند تحت نیروهای جانبی همواره به دنبال راه حل‌های ابتکاری و خارق‌العاده بوده‌اند. سیستم لوله قابی یکی از این سیستم‌ها می‌باشد که نوع پیشرفته‌تری از آن تحت عنوان سیستم لوله دسته‌بندی شده در ساختمان برج سیزر آمریکا به ارتفاع ۱۰۸ طبقه به کار گرفته شد. سیستم لوله قابی که در

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۲۳۳۳۶۲۷۴۷۴

می‌بخشد. یکنواختی فرم این سیستم سازه‌ای امکان استفاده از روش‌های نوین در ساخت و ساز را فراهم آورده است. در سازه‌های فولادی، قاب‌های محیطی را می‌توان به صورت قطعات بزرگ در کارخانه به صورت پیش ساخته ساخت و پس از حمل به محل، به یکدیگر وصل نمود. در سازه‌ای بتن آرمه، استفاده از قالب‌های لغزنده سرعت اجرا را بسیار زیاد می‌نماید.

می‌توان گفت که هر چند تکنیک‌های افزایش بعد ستون و نیز افزایش سختی تیرهای پیرامونی تا حدودی میزان تأخیر برش را کاهش می‌دهند اما چنانچه راهکار مؤثرتری مدنظر باشد، می‌بایست از روش‌های دیگر سازه‌ای نظیر استفاده از سازه لوله‌ای بادبندی شده بهره گرفت (Mark, ۲۰۱۱). ارتقای سیستم لوله‌ای به سیستم لوله در لوله و لوله دسته‌بندی شده برای کنترل پدیده تأخیر برشی ممکن است مفید باشد.

هسته‌های بتنی به علت مقاومت در برابر نیروهای جانبی و سختی مناسب به طور وسیع به عنوان سیستم مقاوم در برابر نیروهای جانبی در سازه‌های بلند مورد استفاده هستند (Beiraghi و همکاران، ۲۰۱۶).

یکی از راهکارهای مؤثر برای کنترل جابه‌جایی سازه بلند، به کارگیری هسته با یا بدون مهار بازویی است. مهار بازویی از دو طرف هسته در یک، دو یا سه طبقه ادامه می‌یابد و به سایر ستون‌های خارج هسته متصل می‌شود. Smith و Coull با نوشتن معادلات سازگاری یک تیر کنسولی با یک فنر پیچشی در میانه آن (که یک درجه نامعین استاتیکی است) با فرض رفتار الاستیک خطی و سطح مقطع یکنواخت، محل بهینه فنر برای کمینه شدن جابه‌جایی نوک تیر حاصل می‌شود. ایشان در یک قانون سر انگشتی برای محل بهینه دو مهار بازویی در فواصل حدود ۱/۳ و ۲/۳ در ارتفاع سازه اعلام نمودند. البته یکی از معایب به کارگیری مهار بازویی اتلاف فضای طبقه دارای مهار بازویی است، فضای طبقه مذکور معمولاً به عنوان فضای غیر مسکونی و به صورت طبقه تأسیسات مورد استفاده قرار می‌گیرد (Smith و Coull, ۱۹۹۱).

عملکرد کلی سیستم مرکب هسته با لوله قاب پیرامونی تا حدی مشابه سیستم دوگانه دیوار برشی با قاب خمشی است. لوله قاب و هسته بتن مسلح به صورت سیستم دوگانه در برابر نیروی جانبی با یکدیگر دارای تعامل هستند. لذا مطالعه رفتار چنین سازه‌هایی تحت نیروی جانبی اهمیت دارد.

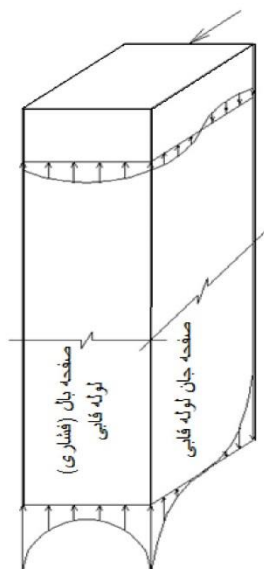
با نظر به عدم فراوانی تحقیقات در مورد پدیده تأخیر برشی، شناسایی و جستار در موضوعیت پدیده تأخیر برشی یکی از زمینه‌های مساعد برای پژوهش است و این موضوع یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در طرح سازه‌های لوله‌ای به شمار می‌آید. در این خصوص مراجع چندان زیادی یافت نمی‌شود. از آنجا که در سیستم‌های سازه‌ای بسیار بلند، در برخی موارد استفاده از سیستم ترکیبی

صفحه قابی عمود بر هم است که تشکیل یک محیط بسته را می‌دهند. قاب‌های هر وجه شامل ستون‌های محیطی نزدیک به هم می‌باشند که توسط تیرهای عمیق در تراز سقف‌ها به هم متصل می‌شوند. بنابراین برای افزایش اینرسی مقطع کل ساختمان، بیشترین اعضای باربر در محیط سازه متمرکز می‌شوند. با این توصیف، در بسیاری از سازه‌های لوله قابی، ممکن است تمامی بارهای جانبی تنها به قاب‌های خارجی داده می‌شوند. صفحه قاب‌های موازی با جهت نیروی جانبی، عمل جان طره محیطی عظیم‌الجثه و صفحه قاب عمود بر آن، نقش بال‌ها را در سیستم مذکور انجام می‌دهند. بازدهی مطلوب این سیستم، ناشی از گره‌های صلب زیادی است که در پیرامون سازه (محل تقاطع تیر و ستون‌ها) وجود دارد و موجب پیدایش یک لوله بزرگ می‌گردد. نیروهای ثقلی بین لوله خارجی و ستون‌های داخلی یا دیوارهای داخلی در صورت وجود تقسیم می‌گردد. همچنین کف‌های صلب طبقات همچون دیافراگم‌هایی، نیروهای جانبی را به جداره‌های قابی پیرامونی توزیع می‌کنند. به علاوه، این سیستم موجب می‌گردد که فضای داخلی نسبتاً وسیع و خالی از ستون‌ها ایجاد گردد.

در سیستم لوله‌ای، با اعمال بار جانبی، ستون‌ها دچار جابه‌جایی جانبی خواهند شد، لذا تیرها نیز دچار خمش می‌شوند. این موضوع دوران اتصال تیر و ستون را در پی دارد. به دلیل دوران اتصال تیر و ستون، پدیده تأخیر برشی در سازه ایجاد می‌گردد. این پدیده در هر سیستم لوله‌ای تو خالی نظیر تیرهای جعبه‌ای در پل‌ها نیز وجود دارد. عقیده بر این است که اثر پدیده تأخیر برشی، طراحی ساختمان‌های بلند با سیستم لوله‌ای را تحت تأثیر قرار می‌دهد و همچنین کنترل آن موجب کنترل جابه‌جایی جانبی سازه خواهد شد (محمودی و همکاران، ۱۳۹۵).

در واقع پاسخ سیستم به بارهای جانبی به صورت ترکیبی از مدهای برشی و خمشی است. مد خمشی ناشی از کوتاه شدگی محوری و کشیدگی ستون‌های لوله است، در حالی که مد برشی به علت خمش ستون‌های منفرد و تیرهای محیطی است.

ایده سازه لوله‌ای با ساختار گیاه بامبو که دارای نسبت ظاهر بسیار زیاد است، قابل تشبیه است (نسبت ظاهر عبارت است از مقدار نسبت حاصل از تقسیم ارتفاع به عرض سازه). سختی موضعی گیاه مذکور در محل گره‌های آن افزایش می‌یابد که به نوعی سختی دیافراگم کف طبقات ساختمان را مجسم می‌کند (Gaur و همکاران، ۲۰۱۵). اما به دلیل ستون‌های پیرامونی نزدیک به هم، دید افراد داخل به بیرون ساختمان تا حدودی محدود می‌گردد. در ساختمان‌های بلند ایجاد فضاهای باز بدون ستون بین ستون‌های لوله پیرامونی و ناحیه هسته میانی هم از جمله مزیت‌های معماری به حساب می‌آید. در سیستم لوله‌ای، علاوه بر تأمین این هدف، با هدایت قسمت عمده‌ای از بارهای ثقلی بر روی ستون‌های پوسته پیرامونی سازه، پایداری آن را در برابر واژگونی بهبود



شکل ۱- شمای کلی چگونگی تأخیر برشی در پاسخ سازه لوله قابی تحت نیروی جانبی

این پدیده به تأخیر برشی مثبت شناخته می‌شود. اما در نواحی نزدیک رأس سازه، مقادیر تنش ستون‌های کناری بال طره کمتر از ستون‌های میانی است که این موضوع به نام تأخیر برشی منفی شناخته می‌شود. نسبت تأخیر برشی یکی از شاخص‌های کارآمد در تحلیل پاسخ تأخیر برشی به حساب می‌آید. نسبت مذکور که در یک طبقه تعریف می‌شود عبارت است از حاصل تقسیم حداکثر تنش در کنج بال لوله پیرامونی بر تنش حداکثر در وسط آن بال. این عدد بدون بعد نشان دهنده وضعیت تأخیر برشی در وجه (بال) مورد نظر است و اصطلاحاً در این خصوص، عدد کمتر از واحد (یک) نشان دهنده تأخیر برشی منفی در بال است.

۳- مدل‌های تحقیق

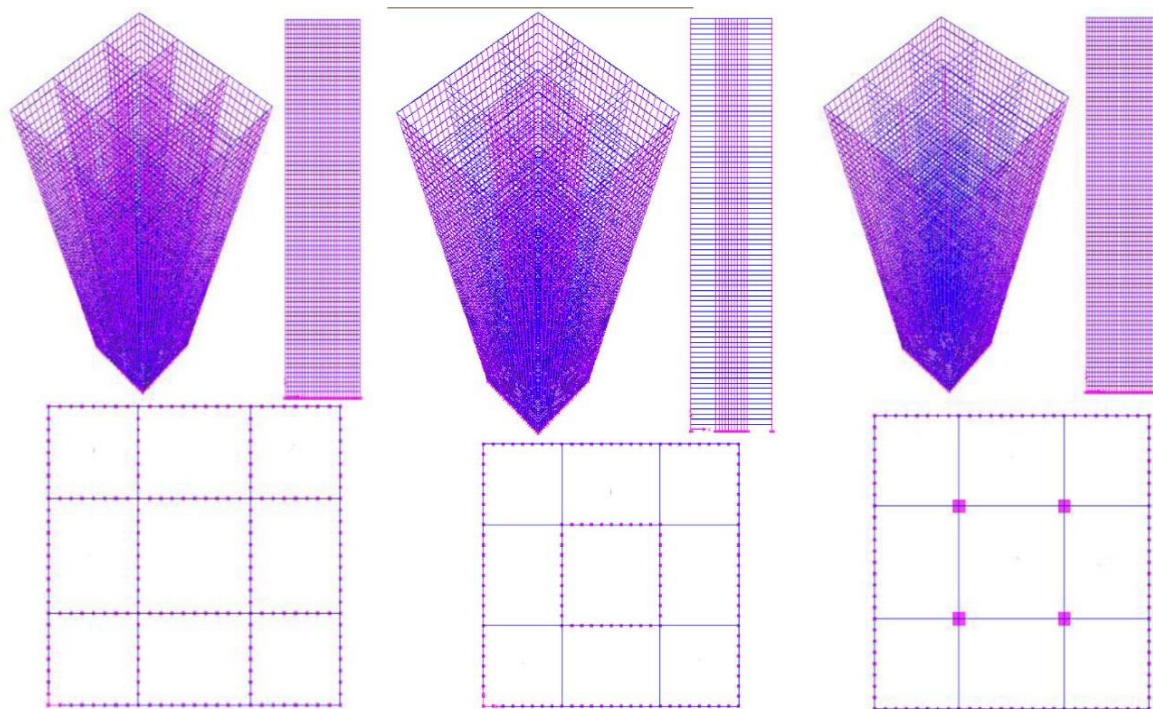
در این تحقیق ابتدا یک ساختمان ۸۰ طبقه بتن مسلح تحت نیروی ثقلی و باد با سیستم‌های سازه‌ای پیش‌تر ذکر شده، طراحی می‌شود. نمای سه بعدی و پلان‌های کلی ساختمان در شکل (۲) ملاحظه می‌گردد. یادآور می‌شود همه سیستم‌ها به نوعی دارای یک لوله پیرامونی هستند. فاصله محور به محور ستون‌های پیرامونی در همه مدل‌ها ۲/۵ متر و اتصال تیرها به ستون‌ها در لوله پیرامونی از نوع ممان گیر است. در سیستم لوله‌ای، اتصال دو سر تیرهایی که چهار ابر ستون میانی را بهم متصل می‌کند و همچنین اتصال دو سر تیرهایی که ستون‌های مذکور را را به ستون‌های پیرامونی وصل می‌کند، از نوع مفصل است؛ یعنی اکثر نیروی جانبی توسط لوله پیرامونی و نیروی ثقلی توسط ستون‌های داخلی و پیرامونی تحمل می‌شود. در سیستم لوله در لوله و سیستم لوله دسته‌بندی شده، اتصال تیرها به ستون‌ها در جداره همه لوله‌ها از نوع ممان گیر است.

مورد عنایت مهندسان قرار می‌گیرد، ضرورت واکاوی اثر این موضوع بر روی پدیده تأخیر برشی پررنگ می‌شود. در این مقاله به بررسی رفتار ساختمان‌های بلند شامل پدیده تأخیر برشی و همچنین توزیع برش طبقه بین اجزای ساختمان بلند دارای سیستم‌های سازه‌ای متنوع پرداخته می‌شود. پاسخ سیستم لوله قابی، لوله در لوله، لوله دسته‌بندی شده، لوله مهاربندی شده، لوله با هسته بتن مسلح و لوله با هسته دارای مهار بازویی تحت اثر نیروی باد مورد مطالعه قرار گرفته و مقایسه می‌شود.

۲- پدیده تأخیر برش

به کارگیری سیستم لوله‌ای در سازه ۴۳ طبقه‌ای در شیکاگو در سال ۱۹۶۱ اولین تجربه جهانی آن به حساب می‌آید. البته در ساختمان‌های حدود ۸۰ طبقه و بیشتر، سیستم لوله قابی به تنهایی کارایی لازم را در باربری جانبی ندارند که یک علت آن نیز پدیده تأخیر برشی در سیستم است. در واقع، رفتار سیستم لوله قابی در این حالت به سمت سیستم قاب خمشی میل می‌کند به گونه‌ای که در قاب‌های صفحه جان سیستم سازه، تغییر شکل خمشی تیرها و ستون‌ها افزایش چشمگیری خواهد داشت و لذا پدیده تأخیر برشی شدت می‌گیرد. برای کنترل این تغییر شکل‌ها یا به عبارتی برای افزایش سختی ساختمان، Fazlure Khan سه راهکار را پیشنهاد نمود. اول این که با ایجاد یک لوله میانی در پلان سازه، سیستم لوله در لوله ایجاد شود. راهکار دوم این که لوله دسته‌بندی شده ایجاد گردد و سوم این که از لوله مهاربندی شده استفاده شود که به طور مؤثری کنترل پدیده تأخیر برشی و عملکرد سازه در باربری جانبی را در پی خواهد داشت.

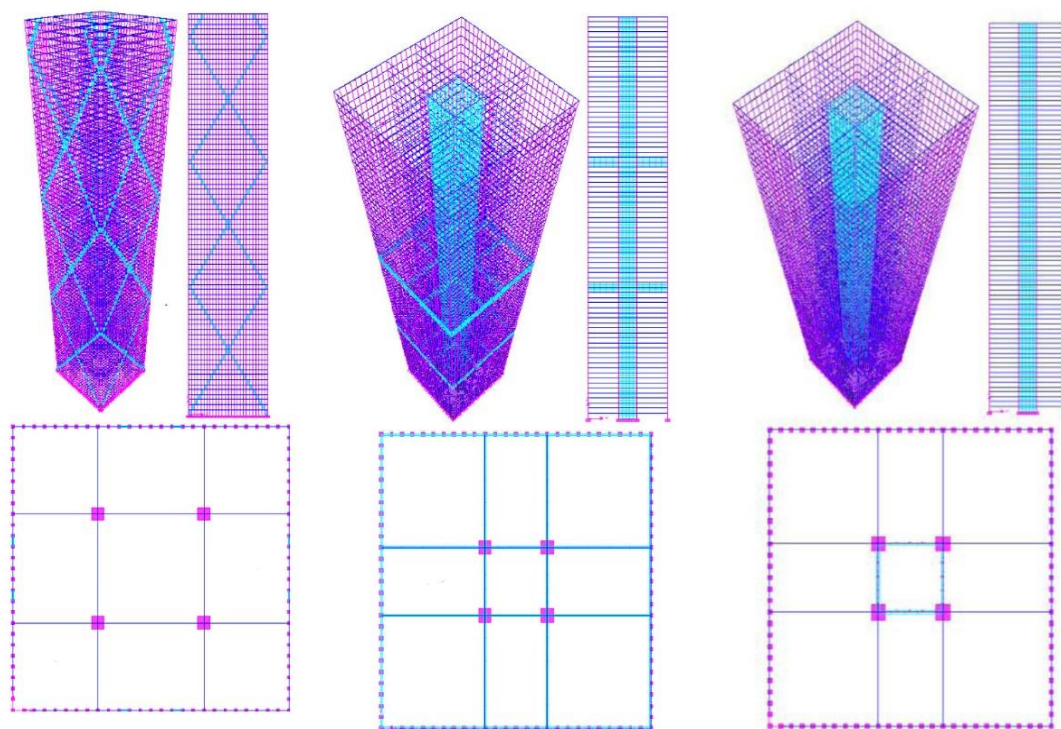
هنگامی که تحت نیروهای جانبی، سازه طره‌ای شکل در یک راستا تحت خمش قرار می‌گیرد، یک تار خنثی در وسط شکل پلان سازه تشکیل می‌گردد، ستون‌ها در یک سمت این تار خنثی تحت فشار و در سمت دیگر تحت کشش قرار می‌گیرند. این سیستم مشابه با یک لوله طره است که به زمین گیردار شده است. اما نکته مهم این که در بال طره عظیم مورد نظر، ستون‌های گوشه و نزدیک گوشه تنش یا نیروهای بسیار بزرگ‌تری از سایر ستون‌های میانی خواهند داشت. به عبارت دیگر در یک لوله ایده‌آل فرض می‌گردد تنش‌ها روی جان به صورت خطی تغییر می‌کنند اما در سیستم سازه‌ای لوله‌ای این فرض صادق نیست. همچنین در حالت ایده‌آل، کل بال بایستی دارای تنش یکنواخت و ثابت باشد، اما در سیستم سازه‌ای لوله‌ای این مورد صادق نیست. این موضوع در شکل (۱) ملاحظه می‌گردد. درون بال و در نواحی پایین سازه لوله‌ای، مقدار تنش در نواحی کنج سازه بیشتر از نواحی میانی است (شکل (۱)).



ج) سیستم لوله دسته بندی شده

ب) سیستم لوله در لوله

الف) سیستم لوله قابی



و) سیستم لوله مهاربندی شده

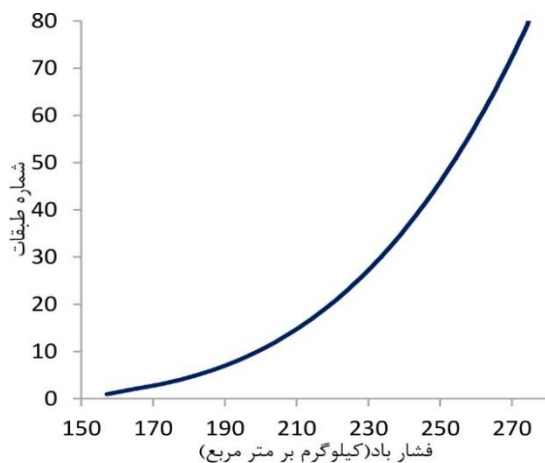
ه) سیستم لوله با هسته با مهار بازویی

د) سیستم لوله با هسته

شکل ۲- تصویر سه بعدی، نما و پلان مدل های عددی سازه های مورد تحقیق (رنگ آبی دیوار بتن مسلح را نشان می دهد)

جدول ۱- مشخصات مهم سازه‌های مورد بررسی

ردیف	مدل	ابعاد ستون‌های		ارتفاع تیرها در	
		صفحات لوله‌ها	طبقات	جداره لوله‌ها	طبقات
		(سانتی‌متر)	(سانتی‌متر)	(سانتی‌متر)	(سانتی‌متر)
۱	لوله‌ای	۱۳۰	۶۰	۱۰۰	۶۰
۲	لوله در لوله	۱۱۰	۵۰	۹۰	۵۵
۳	لوله دسته‌بندی شده	۸۵	۵۰	۸۰	۵۰
۴	لوله با هسته	۱۱۰	۵۵	۹۰	۵۵
۵	لوله با هسته با مهار بازویی	۹۰	۵۵	۸۰	۵۰
۶	لوله مهاربندی شده	۱۰۰	۵۵	۸۰	۵۰



شکل ۳- چگونگی توزیع فشار باد در ارتفاع سازه

سرعت مبنای باد برابر صد و شصت کیلومتر در ساعت (۴۴ متر بر ثانیه) فرض شده است. از نظر شرایط محیطی با فرض واقع شدن در منطقه B از منطقه‌بندی آیین‌نامه ASCE7-05 استفاده می‌شود. همچنین ضریب توپوگرافی و ضریب تندباد به ترتیب برابر ۱ و ۰/۸۵ لحاظ شده است. نیروی باد در یک راستا بر ساختمان اعمال می‌شود که در یکی از وجوه آن فشار و در وجه مقابل، نیروی کششی وجود دارد. چگونگی مقدار فشار باد مبنای طرح در ارتفاع سازه در شکل (۳) مشاهده می‌شود.

۴- بررسی تأخیر برشی در پاسخ سازه‌ها

این مقدار همان‌گونه که ذکر شد، یکی از اهداف این پژوهش، بررسی تأخیر برشی در ترازهای مختلف ارتفاع سازه و همچنین بررسی این موضوع در سیستم‌های مختلف سازه‌ای و مقایسه آنها تحت اثر نیروی باد است. برای بررسی تأخیر برشی در پاسخ سازه، صرفاً اثر

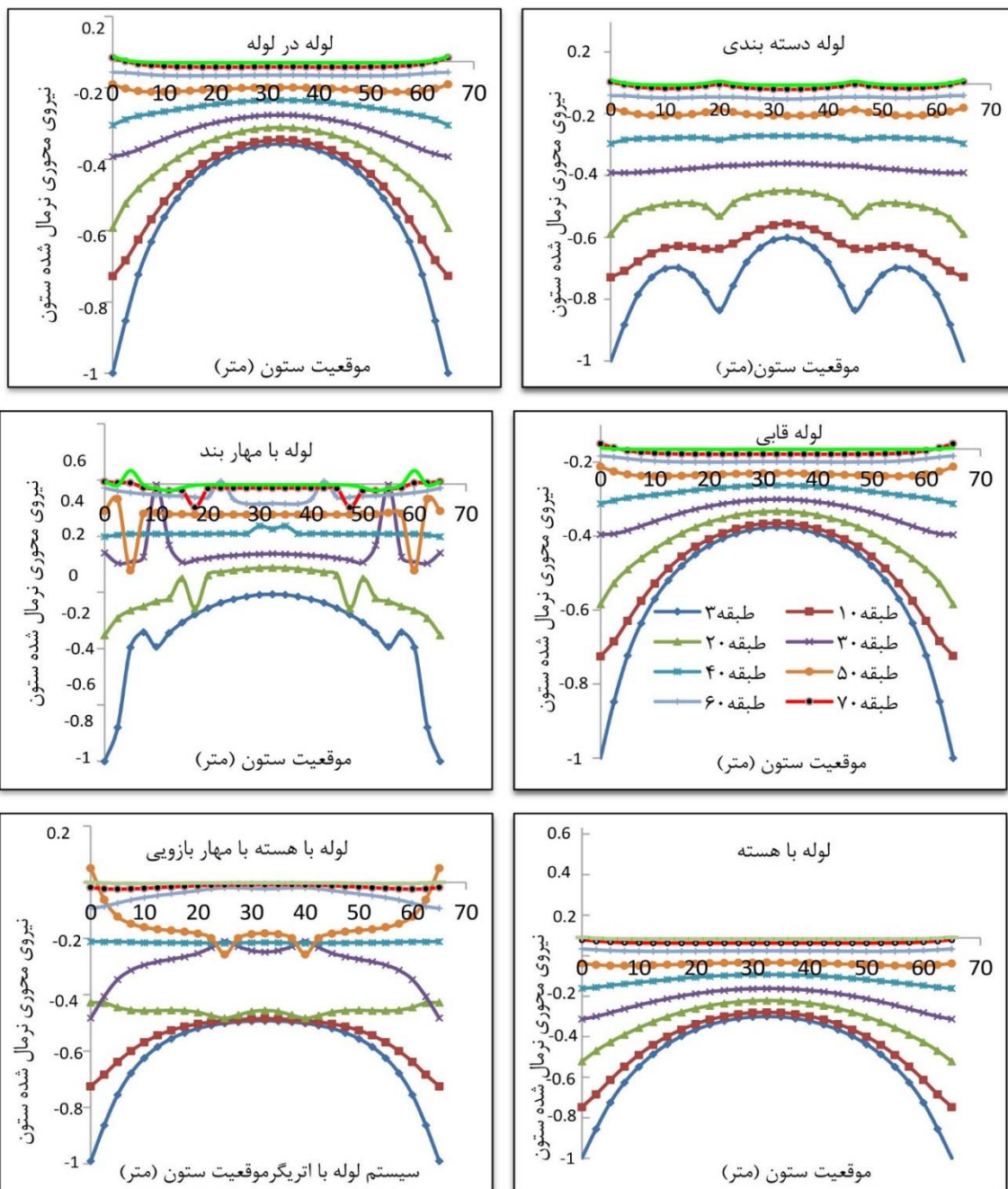
هسته در سیستم لوله با هسته بتن مسلح به فرم مربع در پلان است که در چهار گوشه به چهار ستون متصل است و ضخامت دیوار از ۱/۵ متر در پایین تا ۰/۶ متر در بالا متغییر است. در هر کدام از سیستم‌های مورد بررسی، ابعاد ستون‌های همه جداره‌های قابی در هر طبقه یکسان است. در سیستم دارای هسته (با یا بدون مهار بازویی) و همچنین سیستم لوله در لوله، اتصال دوسر تیرهایی که هسته میانی را به ستون‌های پیرامونی پیوند می‌دهد، از نوع مفصل است. دو مهار بازویی ممتد در هر جهت با عبور از هسته به ستون‌های طرفین لوله متصل می‌شود. ارتفاع هر کدام از مهارهای بازویی دو طبقه است که در طبقات ۲۶ و ۲۷ و همچنین طبقات ۵۲ و ۵۳ تعبیه شدند، به علاوه در طبقات مذکور برای ایجاد یکپارچگی و صلبیت بهتر طبقه، یک کمر بند بتن مسلح نیز در پیرامون سازه در طبقات دارای مهار بازویی وجود دارد. ارتفاع طبقات ۴ متر است. ارتفاع کل سازه ۳۲۰ متر و نسبت ظاهر (ارتفاع به عرض سازه) آن ۴/۹ است، لذا این سازه در زمره ساختمان‌های بسیار بلند به شمار می‌آید. سیستم کف طبقات از تیرچه و بار مرده و زنده کف‌ها به ترتیب ۵۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مربع لحاظ می‌شود. ضریب ترک خوردگی تحت نیروی باد اصولاً با ضرایب مورد استفاده در زلزله سطح بهره‌برداری یکسان در نظر گرفته می‌شود که در این تحقیق برای تیرها و دیوارها عدد ۰/۷ و برای ستون‌ها عدد یک لحاظ می‌شود. نیروی جانبی باد مطابق استاندارد ASCE-07-2010 بر سازه اعمال می‌گردد (ASCE/SEI 7-2010 2010). مدل‌سازی، تحلیل و طراحی در نرم‌افزار ETABS انجام می‌گیرد. رفتار مصالح به صورت خطی مدل می‌شود. برای طراحی از آیین‌نامه ACI318-2014 استفاده شده است (ACI 318-14, 2014). کل المان‌های سازه‌ای نظیر تیر، ستون و هسته از نوع بتن مسلح است و مقاومت فشاری بتن کلیه اعضا برابر ۷۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و مقاومت کششی فولاد میلگرد برابر ۴۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است. برای کف طبقات از دیافراگم صلب استفاده می‌شود، لذا تغییر شکل در گره‌های صفحه کف طبقات به یکدیگر بسته شده است. مشخصات مهم سازه‌ها در جدول (۱) نشان داده شده است. محدودیت تغییر مکان ساختمان‌های بلند در طراحی سازه تحت اثر نیروی باد در برخی آیین‌نامه‌های معتبر نظیر آیین‌نامه نیوزلند ذکر شده است.

Mendis و همکاران توصیه کردند که برای اطمینان از قابلیت خدمت سازه تحت نیروی باد محدودیت تغییر مکان حداکثر جانبی نسبی بین طبقه‌های برابر H/500 (ارتفاع کل سازه است) اعمال شود (Mendis و همکاران، ۲۰۰۷).

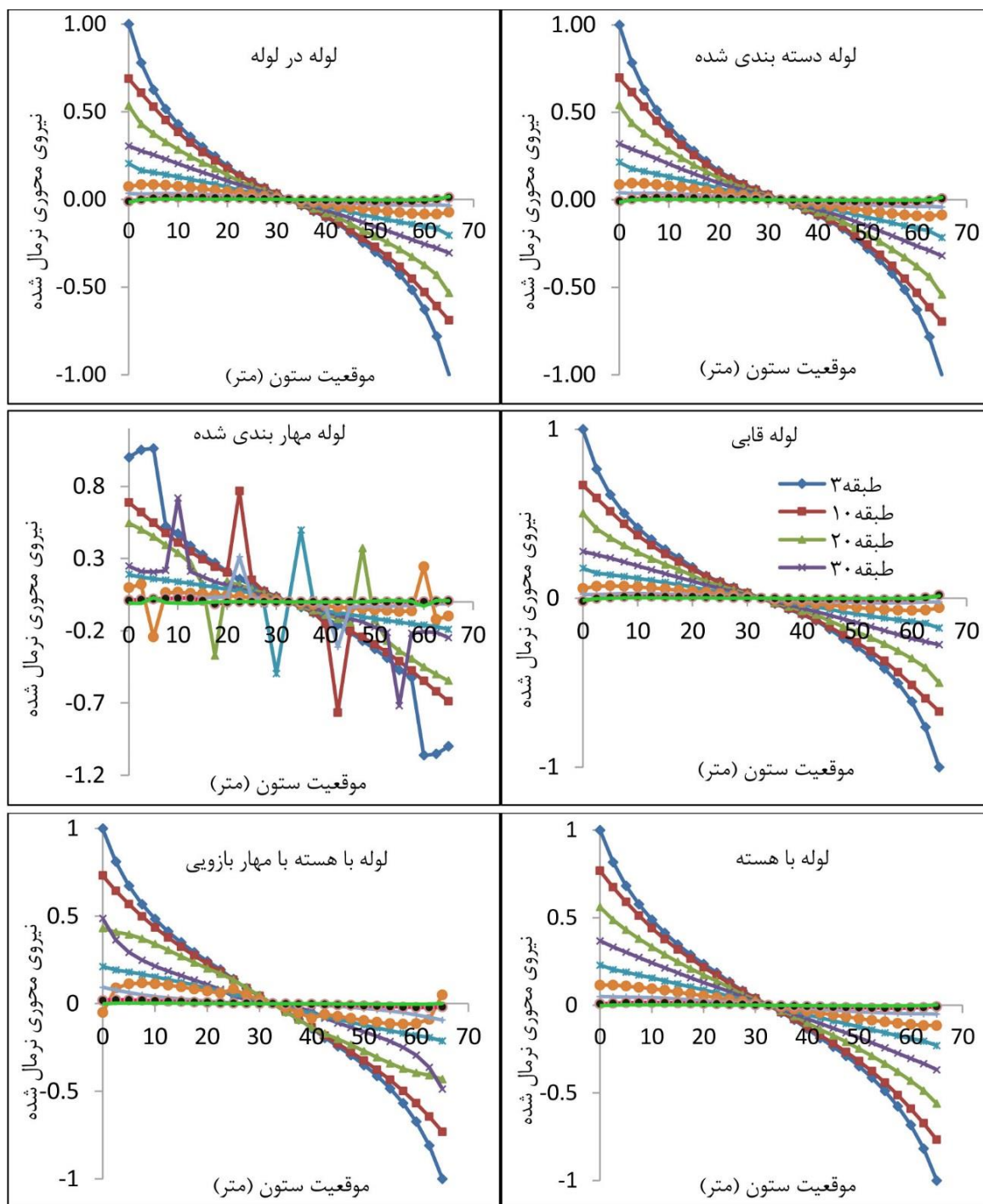
با حدود توصیه شده توسط NBCC و نتایج آماری نظرسنجی از طراحان ساختمان که از تغییر مکان جانبی نسبی حدود H/200 تا H/600 استفاده می‌کنند، هم‌خوانی دارد. در این تحقیق از معیار H/600 برای کنترل جابه‌جایی سازه در طراحی استفاده شده است.

به حد اکثر مقدار نیروی فشاری (که در کنج طبقه سوم واقع است) تقسیم شده تا مقادیر به صورت نرمال باشند. واضح است که حداکثر نیرو محوری در این سیستم سازه‌ای در طبقات پایین و در ستون‌های طرفین در بال فشاری رخ می‌دهد و بیشترین مقدار تأخیر برشی آن در طبقه سوم حدود ۴ است؛ یعنی در یک ردیف از ستون طبقه سوم واقع در جداره بال طره قائم (در حالی که ابعاد همه ستون‌ها یکسان است)، مقدار نسبت نیروی فشاری حداکثر به نیروی فشاری حداقل، عدد ۴ است.

نیروی جانبی لحاظ می‌شود و اثر بار ثقلی در نیروی محور ستون‌ها به حساب نمی‌آید. چگونگی توزیع نسبت تأخیر برشی محور بال لوله پیرامونی در طبقات مختلف از ارتفاع سازه لوله‌ای در شکل (۴) ملاحظه می‌شود. برای بررسی تأخیر برشی، طبقات ۳، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۷۸ انتخاب شد. به دلیل گیردار بودن پای سازه به زمین، طبقه اول برای این منظور انتخاب نشد و به جای آن طبقه سوم انتخاب شد. همچنین طبقه ۸۰ نیز انتخاب نشد و به جای آن طبقه ۷۸ انتخاب شد. برای سادگی، همه نیروهای ستون‌های بال هر سازه در کلیه ترازها



شکل ۴- چگونگی توزیع تأخیر برشی محور بال (لوله پیرامونی) در طبقات مختلف از ارتفاع سازه (مقدار حداکثر نیرو به عدد واحد نرمال شده)



شکل ۵- نیرو محوری (مقدار حداکثر نیرو به عدد واحد نرمال شده) در صفحه جان لوله پیرامونی در طبقات مختلف برای سیستم‌های سازه‌ای

لوله دسته‌بندی شده، لوله با هسته بتن مسلح و لوله مهاربندی شده نیز در شکل (۴) مشاهده می‌شود. در این موارد نیز حداکثر نسبت تأخیر برشی در طبقات پایین حاصل می‌شود. به علاوه، در طبقات بالاتر از حدود طبقه ۵۰، نسبت تأخیر برشی کمتر از واحد (یک) است یعنی تأخیر برشی منفی است. در سیستم لوله مهاربندی شده، پرش‌هایی در موقعیت مهار مشاهده می‌شود که علت آن اثر سیستم مهاربندی روی

در طبقات بالاتر، مقدار نسبت تأخیر برشی کاهش می‌یابد و در طبقه ۵۰، تقریباً برابر واحد (یک) می‌شود و در طبقات بالاتر کم‌تر از واحد است. حتی در طبقات نزدیک بام شاهد اندکی نیروی کششی در ستون‌های طرفین وجه فشاری هستیم، البته مقدار نیروی کششی این ستون‌ها (واقع در بال فشاری طره) بسیار ناچیز است. وضعیت تأخیر برشی در طبقات مختلف از سازه لوله در لوله، سازه

۵- توزیع برش طبقه بین اجزای سازه

نیروی برشی در هر طبقه توسط اجزای لوله خارجی و همچنین سایر اجزای سازه‌ای تحمل می‌شود. این موضوع که سهم هر کدام از اجزا از نیروی برشی طبقه ناشی از نیروی خارجی باد چقدر است، یکی از مسائل مورد بررسی است. شکل (۷) نشان می‌دهد که در سیستم لوله‌ای در طبقات بیشتر از ۱۰، مقدار برش حمل شده توسط ابر ستون-ها منفی است و در سه طبقه آخر به شدت افزون می‌شود. این موضوع بدین معنی است که لوله پیرامونی بایستی نیروی برشی بیشتر از برش خارجی وارد بر طبقه را تحمل کند. مثلاً در طبقه چهارم برش لوله ۱/۲۵ برابر برش خارجی وارد بر طبقه است که مقدار ۲۵ درصد برش اضافی (برش منفی) از طرف ابر ستون‌ها به لوله پیرامونی تحمیل می‌شود. برای سازه لوله در لوله این موضوع از طبقه ۶۰ به بالا رخ می‌دهد اما در لوله دسته‌بندی شده برش منفی بین لوله خارجی و سایر جداره‌های داخلی رد و بدل نمی‌شود. همچنین در سیستم مذکور تا حدود طبقه ۶۰، مقدار برش تحمل شده توسط لوله خارجی و سایر جداره‌های داخلی تقریباً یکسان است. در شکل مذکور، خط مبنا نشان دهنده ۱۰۰ درصد نیروها در طبقات است تا قیاس بهتری از تفاوت مقادیر نسبی برای خواننده به دست دهد. همچنین منظور از دسته داخلی در شکل (۷) برای سیستم لوله دسته‌بندی شده عبارتست از کلیه صفحات باربر داخلی.

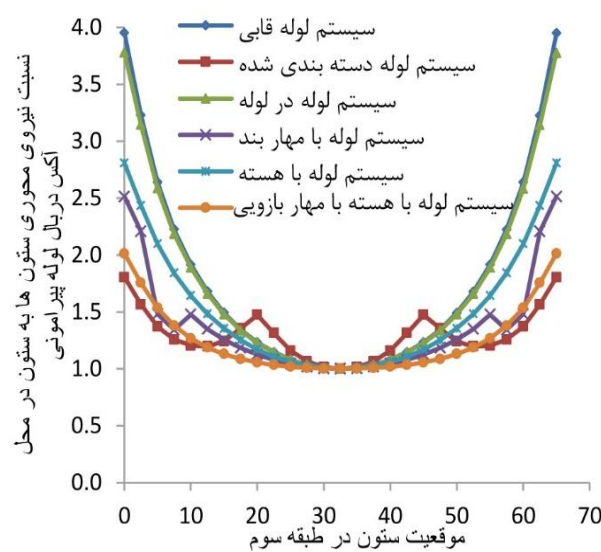
شکل کلی نمودارها در سیستم لوله با هسته مشابه سیستم لوله در لوله است، اما برش منفی تحمیل شده به لوله پیرامونی شدت زیادتری دارد. این سیستم دارای دو عنصر لوله پیرامونی و هسته میانی بتن مسلح برای باربری جانبی است. سهم هر کدام از این دو مورد از برش کل به صورت در صد در هر طبقه در شکل قابل رؤیت است. ملاحظه می‌کنیم در طبقات پاییناً ۶۰ درصد برش را هسته و ۴۰ درصد برش را سیستم لوله قابی پیرامونی تحمل می‌کند. در طبقات بالاتر سهم هسته کاهش می‌یابد، مثلاً در طبقه چهارم، حدود ۲۰ درصد از برش توسط هسته و ۸۰ درصد آن توسط لوله-قاب پیرامونی تحمل می‌شود. اما سهم هسته در حدود طبقه شصت و پنج به مقدار صفر خواهد بود و در طبقات بالاتر از آن منفی خواهد شد. یعنی یک نیروی اضافی به سیستم تحمیل می‌کند که بایستی توسط لوله پیرامونی تحمل شود. به عبارت دیگر در این طبقات نه تنها هسته به باربری سیستم کمک نمی‌کند، بلکه معکوس عمل می‌کند. این عملکرد نامطلوب به شدت در طبقات نزدیک بام افزایش می‌یابد به طوری که حدود ۹ برابر نیروی باد، نیروی اضافی به سیستم تحمیل می‌شود. لذا قطع هسته در طبقات بالا قابل توجیه است. مشابه این موضوع، برای سیستم لوله با هسته با مهار بازویی نیز تا حدی قابل بیان است. ملاحظه می‌کنیم در این سیستم در طبقه نزدیک همکف، سهم هسته و سهم لوله پیرامونی تقریباً یکسان (هر کدام ۵۰ درصد) است. در طبقات بالاتر سهم هسته کاهش می‌یابد به گونه‌ای که در تراز طبقه ۶۰، مقدار آن صفر می‌شود و در طبقات بالاتر عملکرد هسته منفی و

نیروی محوری ستون‌های مجاور آن است.

شکل (۴) نمودار نیرو محوری در ردیف بال طره قائم برای سیستم لوله‌ای با هسته با مهار بازویی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در طبقه سوم بیشترین تغییر نیروی فشاری ستون‌های طبقه وجود دارد به گونه‌ای که نسبت تأخیر برشی آن حدود عدد ۲ است. نمودار ظاهری نمودارها به علت وجود مهار بازویی دارای پرش‌هایی است. مثلاً در طبقه ۵۰ تحت اثر مهار بازویی دو ستون کنج بال فشاری، تحت کشش قرار گرفته‌اند و پرش‌هایی در ناحیه میانی در اثر عملکرد مهار بازویی ملاحظه می‌گردد. وضعیت توزیع نیروی محوری روی محور جان طره قائم برای سیستم‌های مورد بررسی در شکل (۵) آورده شده است.

در این مورد نیز حد اکثر اعداد در هر شکل به عدد واحد نرمال شده است. نحوه توزیع نیروی محوری مذکور عمدتاً به صورت غیر خطی است. در سازه لوله‌ای با هسته با مهار بازویی در اثر وجود مهار بازویی، منحنی نمودارها در برخی از طبقات (مثلاً طبقه ۵۰) دارای روند مغایر با روند کلی سیستم لوله‌ای است. همچنین، وجود مهارهای قطری در جداره خارجی جداره جان لوله مهاربندی شده موجب ایجاد پرش‌هایی در نمودار توزیع نیرو شده است. به گونه‌ای که در ناحیه کششی به صورت موضعی فشار ایجاد می‌کند و بالعکس. همچنین شکل (۶) به مقایسه نسبت تأخیر برشی برای سیستم‌های سازه‌ای مختلف در طبقه سوم می‌پردازد.

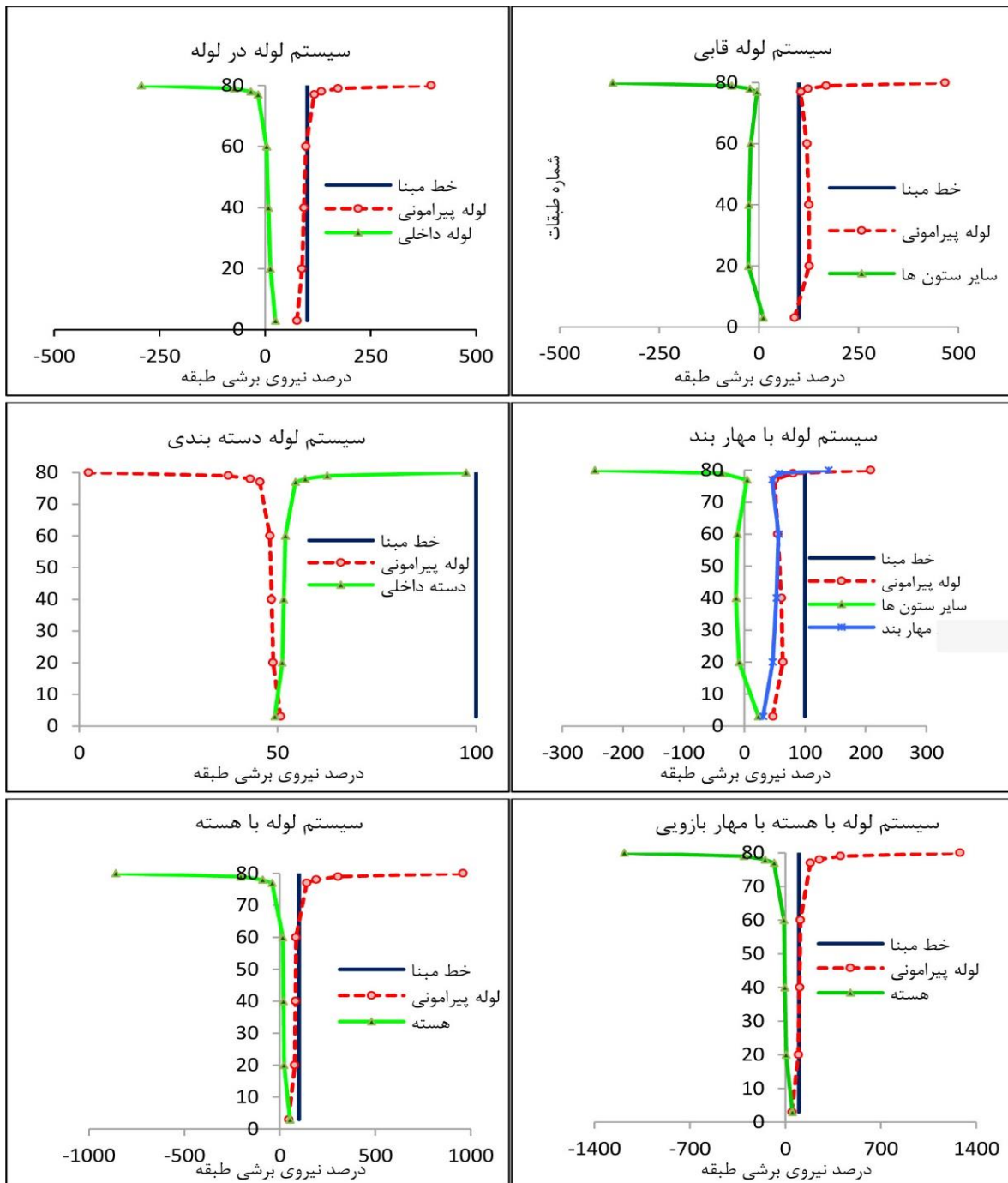
مشاهده می‌شود که کمترین تأخیر برشی مربوط به سیستم لوله دسته‌بندی شده و لوله با هسته با مهار بازویی است که به ترتیب حدود ۱/۸ و ۲ است. و بیشترین آن متعلق به سیستم لوله قابی و سیستم لوله در لوله با اعداد تأخیر برشی حدود ۴ و ۳/۸ است.



شکل ۶- مقایسه نسبت تأخیر برشی در طبقه سوم انواع سازه‌ها

ستون میانی از طبقات حدود ۲۰ تا ۷۰ برش اضافی نه چندان زیاد (کمتر از حدود ۹٪ برش خارجی طبقه) بر سیستم لوله مهاربندی شده پیرامونی تحمیل می کنند. این موضوع در دو طبقه آخر شدت می گیرد.

نامطلوب است. در این سیستم، از طبقه حدود ۲۰ تا ۶۰ عملاً هسته در باربری برش طبقه چندان نقشی ندارد. به نظر می رسد که قطع یا تضعیف لوله داخلی در حدود ترازهای $0/8H$ منطقی باشد. در سیستم لوله مهاربندی شده، عمده برش طبقه توسط ستون ها در لوله پیرامونی و مهاربندهای پیرامونی سازه تحمل می شود. چهار ابر



شکل ۷- توزیع نیروی برشی طبقه بین لوله پیرامونی و سایر اجزای باربر جانبی به درصد (محور قائم شماره طبقه است)

۶- نتیجه گیری

در این مقاله رفتار ساختمان بلند دارای سیستم‌های سازه‌ای متنوع تحت اثر نیروی جانبی باد مورد بررسی قرار گرفت. موضوع تأخیر برشی و همچنین توزیع نیرو برشی طبقه بین اجزای سازه‌ای در طبقات مختلف در سیستم سازه لوله‌ای، سازه لوله در لوله، سازه لوله دسته-بندی شده، سازه لوله با هسته بتن مسلح، سازه لوله با هسته با مهار بازویی و سازه لوله مهاربندی شده مورد تحقیق قرار گرفت. مشاهده شد که کمترین نسبت تأخیر برشی مربوط به سیستم لوله دسته‌بندی شده و سیستم لوله با هسته با مهار بازویی است که به ترتیب حدود $1/8$ و 2 است و بیشترین آن متعلق به سیستم لوله قابی و لوله در لوله با نسبت تأخیر برشی حدود 4 و $3/8$ است. در همه سیستم‌ها و در برخی طبقات، از طرف اجزای سازه‌ای داخلی نیروی برش اضافی بر سازه لوله پیرامونی تحمیل می‌شود. این موضوع به نوعی اندرکنش لوله پیرامونی را با اجزا یا لوله داخلی نشان می‌دهد به گونه‌ای که در نزدیک بام سازه این برش اضافی چندین برابر بیشتر از برش خارجی وارد بر طبقه است. مثلاً در سیستم لوله با هسته، سهم هسته از نیروی برش طبقه در ارتفاع بالاتر از حدود هشتاد درصد ارتفاع، منفی خواهد شد. لذا در این طبقات نه تنها هسته به باربری سیستم کمک نمی‌کند، بلکه معکوس عمل می‌کند. این عملکرد نا مطلوب به شدت در طبقات بالاتر افزایش می‌یابد به طوری که در نزدیک بام نیروی اضافی وارد شده به لوله پیرامونی حدود 9 برابر نیروی برشی باد است. به نظر می‌رسد که قطع یا تضعیف لوله داخلی در حدود ترازهای $0/8H$ منطقی باشد.

۷- مراجع

- محمودی صاحبی م، کوزانی ه، تیموری ط، هاشمی س، "ارزیابی پایداری قاب‌های خمشی فولادی در برابر خرابی‌های پیشرونده"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۱۳۹۵، ۴۶ (۱)، ۸۲، ۶۷-۵۹.
- ACI 318-14, Building code requirements for structural concrete and commentary. ACI Committee 318, Farmington Hills, 2014.
- Ali MM, Moon KS, "Structural developments in tall buildings: current trends and future prospects", *Archit Sci Rev*, 2007, 50 (3), 205-223.
- AS/NZ1170.2 Australian/New Zealand Standard, Structural design actions, Part2: wind actions, Standards Australia & Standards New Zealand, 2002.
- ASCE/SEI 7-2010, Minimum design loads for buildings and other structures, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2010.
- Beiraghi H, Kheyroddin A, Kafi MA, "Forward directivity near-fault and far-fault ground motion effects on the behavior of reinforced concrete wall tall buildings with one and more plastic hinges", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2016, 25 (11), 519-539.

- ETABS, Version 15.1.0, Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, USA, 2015.
- Gaur H, Goliya RK, "Mitigating shear lag in tall buildings", *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 2015, 7, 269-279.
- Mark S, "Tall building design inspired by nature", In: 36th conference on our world in concrete and structures, Singapore, 2011.
- Mendis P, Ngo T, Haritos N, Hira A, Samali B, Cheong J, "Wind Loading on Tall Buildings", *Electronic Journal of Structural Engineering*, 2007, 41-53.
- Siavash K, "Optimal conceptual design of high-rise office buildings", University of Waterloo, Ontario, 2001.
- Smith B, Coull A, "Tall building Structures: Analysis and Design (1 ed.)", New York, John Wiley & Sons Inc, 1991.
- Taranath, BS, "Reinforced Concrete Design of Tall Buildings", CRC Press, 2010.

EXTENDED ABSTRACTS

Comparison of Shear Lag Effect in High-rise Buildings

Hamid Beiraghi ^{a*}, Ali Kheyroddin ^b

^a Department of Civil Engineering, Mahdishahr Branch, Islamic Azad University, Mahdishahr, Iran

^b Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

Received: 18 December 2018; **Accepted:** 15 July 2019

Keywords:

Near and far fault earthquake, Reinforced concrete wall, Buckling restrained braces.

1. Introduction

In 1969, Fazlur Khan first attempted to group structural systems for high-rise buildings. At that time, the bending frame was most used in the design of relatively high-rise buildings. The pipe system is one of the systems that Fazlur Khan himself invented. Another category was also published by Ali and Moon in 2007, in which structural systems were classified for different heights (Fazlur Khan, 1969). Designers have always been looking for innovative solutions to control the movement and safety of life in high-rise structures under the side forces. One of these is the pipe system, the more advanced type of which was used as a pipe system classified in the USS Tower building at a height of 108 floors. The pipe system, referred to in this paper as a pipe system, has been somewhat evolved in conventional framing frame structures and can have a steel, reinforced, or mixed structure (Siavash, 2001).

In view of the lack of research on the phenomenon of shear delay, identification and research on the subject of slip delay phenomenon are one of the most conducive fields for research, and this is one of the most important challenges in designing tubular structures. There are not many references in this regard. Due to the fact that in a very high structural system, in some cases the use of a hybrid engine system is engineered by the engineers, the need to examine the effect of this on the phenomenon of shear delay is highlighted. In this paper, the behavior of high-rise buildings including the shear delay phenomenon as well as the distribution of cutting between the components of high-rise building and various structural systems are discussed. The response of the cavity tube system, tubing in the tube, the grouped tube, the braced tube, the tube with the RC core and the tubing with the core of the armpit under the influence of wind force have been studied and compared.

2. Methodology

2.1. Design of models

In this study, a 80-story reinforced concrete building with gravity and wind structure was first described with the above-mentioned structural systems. The three-dimensional view and the general plans of the building are seen in Fig. 1. Recall that all systems have a peripheral tube in some way. The axial distance to the axis of the periphery in all models is 2.5 m and the connecting of the beams to the columns in the perimeter tube of the type is a stubby. In a pipe system, the connection of two head arches connecting the four superconducting midpoints and the joint of the two beams connecting the columns to the peripheral columns is of the joint type, that is, most of the lateral force by the peripheral pipe and gravity is tolerated by internal and peripheral columns. In the pipe system in the pipe and the pipe system, the connection of the beams to the columns in the wall of all tubes is a type of stamp. The core is in the pipeline system with a core of square-planar form, which is connected to four columns in four corners.

* Corresponding Author

E-mail addresses: h.beiraghi@msh-iau.ac.ir (Hamid Beiraghi), kheyroddin@semnan.ac.ir (Ali. Kheyroddin).

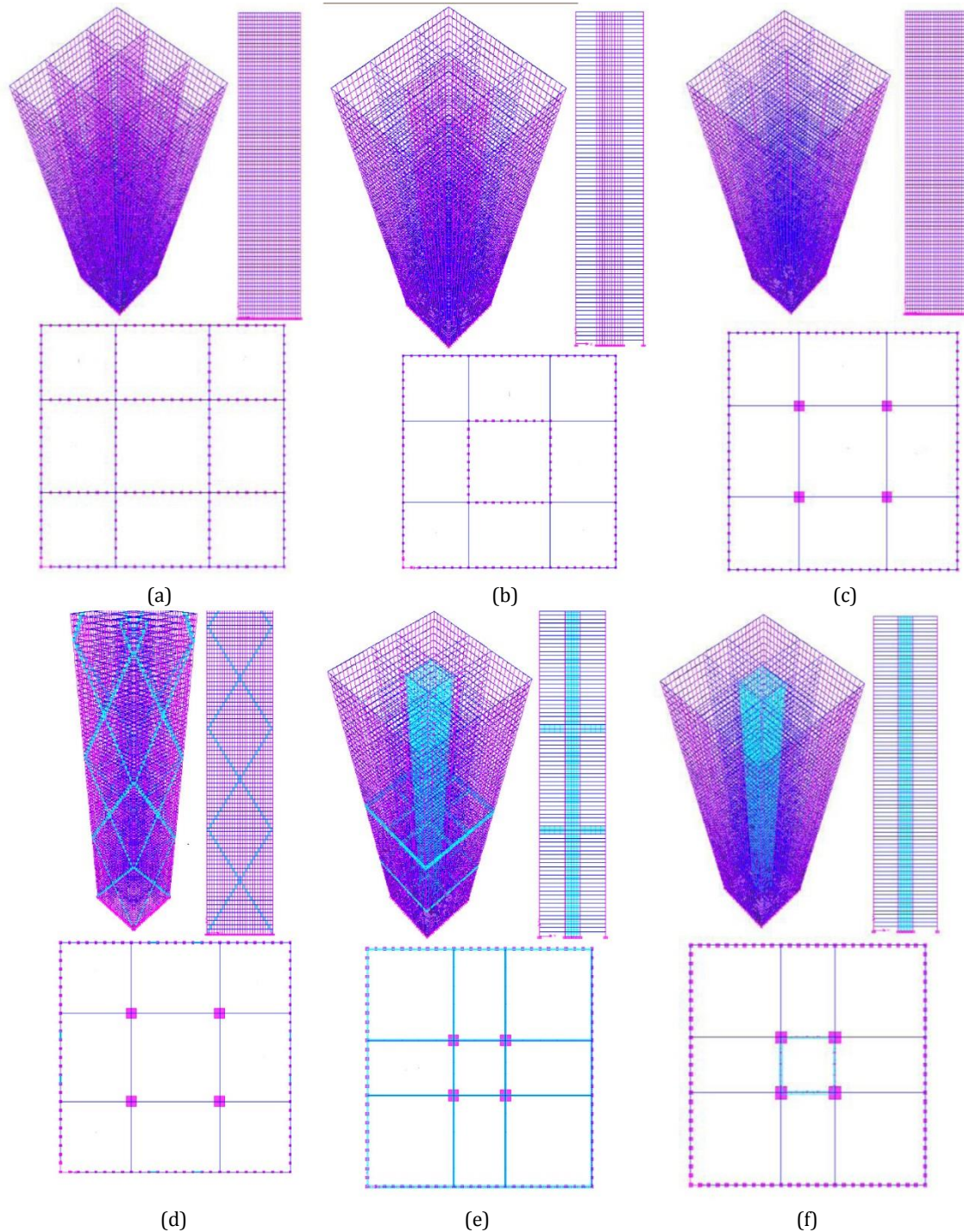


Fig. 1. Plan and 3-D view and elevation of examined structures: (a) bundled Tube, (b) tube in tube, (c) frame tube, (d) braced tube, (e) outrigger tube, (f) tube and core

3. Results and discussion

3.1. Analysis results

As mentioned above, one of the objectives of this research is to investigate the shear delay at different levels of the structure's height and also to study this issue in different structural systems and compare them with the effect of wind force. In order to investigate the shear delay in the structure response, only the effect of lateral force is taken into account and the effect of gravity on the axial force of the columns is not taken into account. Fig. 2 compares the shear delay ratio for various structural structures on the third floor. It can be seen that the least shear delay is related to the pipe system and the tube with the core with brachial control, which is about 1.8 and 2, respectively. And most of it belongs to the pipe-pipe system and pipe system in the tube with shear delay numbers of about 4 and 3.8.

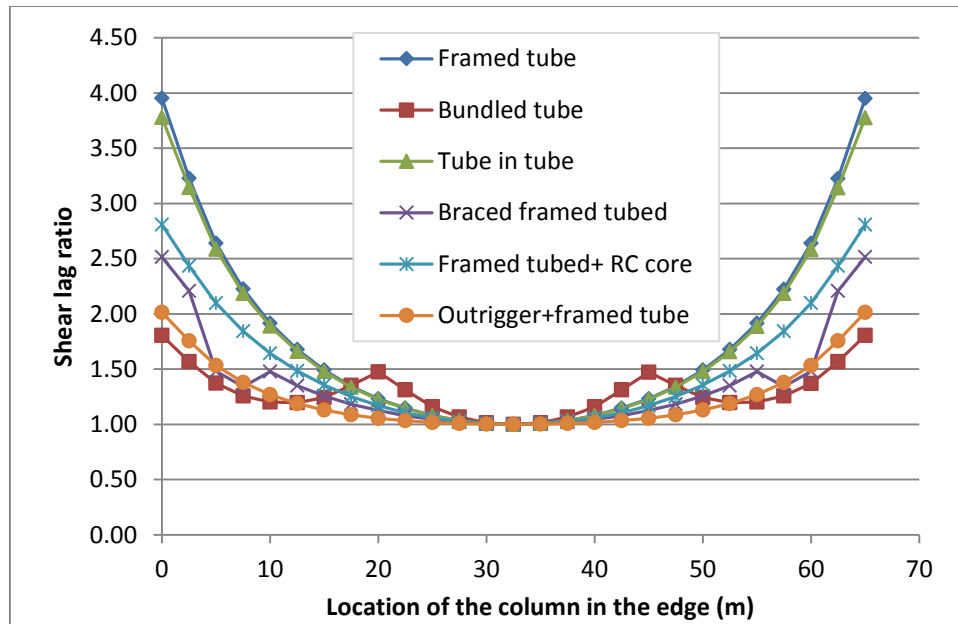


Fig. 2. Distribution of the shear lag of the examined systems

4. Conclusions

In this paper, the issue of shear lag at the height of the structures as well as the distribution of the shear force of the story between the structural components in each of the different stories of the high-rise reinforced concrete building with various structural systems under the influence of the lateral wind force are examined. The structure of the framed tube, the tube in tube, the structure of the tube with the RC core, and the structure of the braced tube is investigated. The numerical models show that the lowest shear lag ratio is related to the bundled tube and most of it belong to the framed tube system with the shear lag about 4.

5. References

- Ali MM, Moon KS, "Structural developments in tall buildings: current trends and future prospects", *Archit Sci Rev*, 2007, 50 (3), 205-223.
- ASCE/SEI 7-2010, Minimum design loads for buildings and other structures, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2010.
- Siavash K, "Optimal conceptual design of high-rise office buildings", University of Waterloo, Ontario, 2001.