



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)

دوره ۴۸، شماره ۱، بهار ۱۳۹۵، صفحه ۸۷ تا ۱۰۰  
Vol. 48, No. 1, Spring 2016, pp. 87-100



نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی عمران و محیط زیست

AmirKabir Journal of Science & Research  
Civil and Environmental Engineering  
(ASJR-CEE)

## مطالعه تحلیلی مزایا و معایب انواع سیستم‌های رایج در سازه‌های بلند با مقایسه با سیستم لوله پیرامونی تحت بارگذاری باد براساس ASCE7-10

نوید سیاه پلو\*<sup>۱</sup>، علی خیرالدین<sup>۲</sup>، محسن گرامی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکترا، مهندسی زلزله، دانشگاه سمنان

۲- استاد، گروه مهندسی سازه، دانشگاه سمنان، عضو قطب علمی زیر ساختهای عمرانی دانشگاه تهران

۳- دانشیار، گروه مهندسی زلزله، دانشگاه سمنان

(دریافت: ۱۳۹۱/۱۰/۰۶، پذیرش: ۱۳۹۳/۰۸/۲۷)

### چکیده

سازه‌های بلند از نظر سیستم باربر به دو نوع داخلی و خارجی طبقه‌بندی می‌شوند. مهم‌ترین شکل‌های سازه‌ای خارجی عبارتند از سیستم لوله پیرامونی، لوله در لوله با هسته داخلی، لوله در لوله با کلاهک خرپایی، لوله مهاربندی شده و لوله دسته بندی شده. به منظور بررسی محاسن و معایب هر یک از این موارد، ضمن مدل‌سازی کلیه سیستم‌های مذکور به صورت سه بعدی، ارزیابی عملکرد لرزه‌ای و پارامترهای موثر بر پاسخ آنها به عنوان هدف اصلی این تحقیق تعریف شده است که از آن جمله می‌توان به درصد جذب برش، تغییر مکان مطلق طبقات، اندیس رانش، ضریب تاخیر برشی و نرخ تغییرات آن، زمان تناوب اصلی و معیار رفاه و ایمنی ساکنین در بیشینه تغییر مکان و شتاب طبقه بام اشاره نمود. نتایج تحقیق نشان داد که بکارگیری انواع شکل‌های سازه‌ای در مقایسه با سیستم لوله پیرامونی باعث بهبود در پاسخ جانبی سازه شد. اما استفاده از شکل لوله مهاربندی شده در مقایسه با سایر سیستم‌ها تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر کاهش پاسخ داشت. از طرفی نرخ تغییرات ضریب تاخیر برش در ستونهای بال کششی به مراتب یکنواخت تر شده و با افزایش طبقات در تمامی ستونهای یک طبقه به عدد ۱ نزدیک شد. همچنین بیشینه تغییر مکان و شتاب بام برای تامین معیار رفاه ساکنین براساس ضوابط ASCE7-10 تنها توسط این سیستم تامین شد.

### کلمات کلیدی:

تاخیر برشی، اندیس رانش، سازه بلند، سیستم لوله‌ای، درصد جذب برش

## ۱- مقدمه

استفاده از سازه‌های بلند همزمان با رشد و توسعه خدمات شهری و بهبود کیفیت زندگی در کشورهای در حال رشد و توسعه یافته امری ضروری است. همزمان با دسترسی مهندسی سازه و زلزله به فناوری‌های نوین ساخت‌وساز شهری در کنار توسعه نرم‌افزارهای تخصصی در زمینه تحلیل و طراحی ساختمان‌ها، زمینه را برای مطالعه و بهبود عملکرد ساختمان‌های بلند بیش از پیش هموار نموده است. از طرفی معرفی فولادهای با مقاومت بالا یا بتن سبک سازه‌ای با مقاومت بالا، امکان ساخت سازه‌های بلند در تعداد طبقات بیشتر را فراهم نموده است. لازم به ذکر است که نخستین ساختمان بلند در اواخر قرن نوزدهم (۱۸۸۵) در آمریکا و در شیکاگو ساخته شد و به ساختمان خانه بیمه<sup>۱</sup> معروف است. اتصالات پیچی اولین بار در سال ۱۸۸۹ و در ساختمان‌های هولابرید<sup>۲</sup> و روخز-تاکوما<sup>۳</sup> استفاده شد. مهاربندهای پرتال برای نخستین بار در ۱۸۹۱ و در ساختمان‌های بورنهام<sup>۴</sup>، موناندناک<sup>۵</sup> و جنیز منهن<sup>۶</sup> استفاده شد. در تقسیم بندی‌های ارائه شده برای سازه‌های بلند، دو نوع تقسیم بندی متداول و رایج است. در تقسیم بندی اول که توسط فضلور خان (پدر ساختمان‌های بلند) ارائه شد، سه شکل سازه‌ای متناسب با مصالح بکار رفته تعریف شد که انواع رایج سیستم‌های سازه‌ای فولادی آن عبارتند از قاب فولادی ساده با دیوار برشی یا مهاربند، قاب خمشی، سیستم کمر بند خرابی، سیستم لوله قابی، لوله مهاربندی شده با و بدون ستون‌های داخلی و لوله دسته شده. در خصوص اسکلت بتنی نیز شکل‌های سازه‌ای مختلفی ارائه شده که از آن جمله می‌توان به قاب خمشی تنها یا ترکیبی با دیوار برشی، سیستم لوله قابی، لوله در لوله و سیستم لوله‌ای ابرمهاربندی شده اشاره نمود. در طبقه بندی دیگری که در سال‌های اخیر ارائه شده است، انواع شکل‌های سازه‌ای در ساختمان‌های بلند به دو دسته سیستم‌های سازه داخلی و خارجی تقسیم بندی می‌شود که این تقسیم بندی توسط Mir Ali و Soon<sup>۷</sup> تعریف شده است و در شکل (۱- الف و ب) نشان داده شده است [۱۰].

در خصوص ارزیابی رفتار انواع شکل‌های سازه‌ای بلند تحقیقات گسترده‌ای صورت گرفته است که در چند محور مختلف طبقه بندی می‌شوند: در دسته اول، مباحث معماری و زیست محیطی ساختمان‌های بلند تحقیق شده‌اند [۱۱ و ۱۲]. در دسته دیگر با انتخاب یک شکل سازه‌ای مشخص، تلاش شده تا روابط ساده‌ای برای محاسبه مهم‌ترین مشخصات دینامیکی سازه اعم از شکل مد ارتعاشی، زمان تناوب یا بسامد اصلی ارتعاشی و تغییر شکل سازه محاسبه شود [۱۳، ۱۴، ۱۵ و ۱۶]. در گروه سوم مطالعات آزمایشگاهی است که معمولاً با ساخت یک مدل آزمایشگاهی مقیاس شده عملکرد لرزه‌ای سازه بلند در اثر رکوردهای واقعی ارزیابی می‌شود.

- 1 Home insurance building
- 2 Holabrid
- 3 Roche's Tacoma
- 4 Burnham
- 5 Monandnock
- 6 Jenny's Manhattan

در رده چهارم، به منظور حساسیت رفتار سازه بلند در بارگذاری باد، انجام آزمایش تونل باد یکی دیگر از اولویت‌های تحقیق است [۱۷]. از آنجا که فرایند احداث این ساختمان‌ها بسیار طولانی بوده و ممکن است در خلال ساخت مخاطرات زیست محیطی مثل باد یا زلزله روی دهد، بنابراین بحث کنترل سازه در هنگام اجرا اهمیت ویژه‌ای دارد [۱۸]. در رده ششم موضوع کنترل سازه اعم از فعال و غیر فعال مطرح می‌شود که به کمک این ابزار می‌توان از نیروهای وارد بر سازه کاست تا احتمال رسیدن سازه به حد فروریزش محدود شود [۱۹ و ۲۰]. در رده هفتم نیز محققین به دنبال ارزیابی نقاط ضعف و قوت سیستم‌های رایج ساختمانی بوده و همزمان با رشد قابل توجه در نرم‌افزارهای مدل‌سازی و رایانه‌های قوی، امکان ساخت مدل‌های سازه‌ای وجود داشته و با انجام مطالعات پارامتری تلاش می‌شود که مهم‌ترین نقاط ضعف سیستم‌های رایج برطرف شوند. به طور مثال انتخاب بهینه‌ترین مدول بادبندی در سازه‌های لوله‌ای مهاربندی شده همواره مد نظر محققین بوده است و عامل بهینه عموماً وزن مصالح مصرفی تعریف می‌شود، اگرچه نتایج تحقیقات نشان می‌دهند که عوامل مختلف دیگری نیز بر این انتخاب تاثیر گذارند [۱ تا ۹].

نتایج ارزیابی‌های پیشین نشان می‌دهد که در سیستم‌های لوله قاب بندی شده، تغییر شکل جانبی قابل توجه ناشی از بار باد یا زلزله باعث می‌شود طراح ضمن کاهش فواصل ستون‌های پیرامونی و استفاده از تیرهای اسپاندرل قوی، به مهار تغییر شکل جانبی بپردازد. از طرفی عدم توزیع غیر یکنواخت تنش محوری در ستون‌های مستقر در بال فشاری و کششی ساختمان باعث می‌شود که سهم ستون‌ها از بارهای جانبی و ثقلی با هم اختلاف قابل توجهی داشته باشد که این پدیده به تاخیر برشی معروف است. همچنین به دلیل انعطاف پذیر بودن سازه، معیار محدودیت حداکثر شتاب طبقه بام در اثر باد که به عنوان یک معیار راحتی ساکنین مطرح می‌شود، تامین نمی‌شود [۴، ۵ و ۲۱].

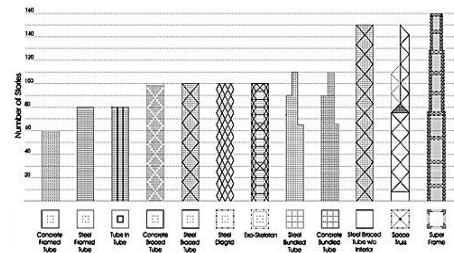
یکی از مهم‌ترین روش‌های پیشنهادی برای کاهش تاثیرات منفی مربوط به سیستم لوله-قاب، استفاده از سایر شکل‌های سازه‌ای تعریف شده در قسمت‌های قبلی است. در این پژوهش تلاش شده است تا ضمن مدل‌سازی یک سازه ۷۰ طبقه با مصالح فولادی، این سازه بر اساس آیین نامه AISC-LRFD99 با سیستم لوله پیرامونی به طور کامل طراحی شود و سپس ضمن تغییر در سیستم مقاوم جانبی، مزایا و معایب سایر شکل‌ها به طور کامل ارزیابی شود. در حقیقت این تحقیق در رده هفتم طبقه بندی گفته شده قرار دارد. بدین منظور شکل‌های سازه‌ای لوله در لوله، لوله در لوله با هسته داخلی، لوله مهاربندی شده و لوله دسته شده در کنار لوله به طور جداگانه مدل‌سازی و طراحی شده‌اند. در ارزیابی عملکرد ارتعاشی سازه از بارگذاری باد بر اساس ضوابط استاندارد ASCE7-10 استفاده شده است [۲۲]. مطابق اکثر تحقیقات موجود در این رده، پارامترهای پاسخ سازه اعم از رانش (دریفت) مطلق طبقات، اندیس رانش بین طبقه‌ای، ضریب تاخیر لنگی برشی، درصد جذب برش و تغییر در زمان تناوب اصلی سازه به طور کامل بررسی شود. در ادامه نمودار

## ۲- معرفی مدل و سناریوی بارگذاری

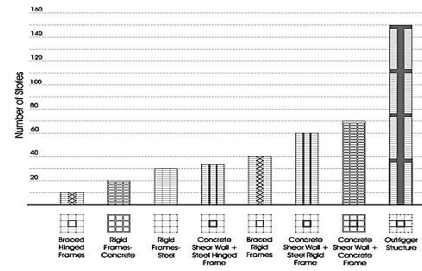
به منظور دریافت درک مناسب از رفتار انواع سیستم‌های رایج در سازه‌های بلند و مقایسه تحلیلی آنها با سیستم لوله پیرامونی، در این پژوهش یک ساختمان ۷۰ طبقه در نرم‌افزار SAP مدل‌سازی سه بعدی شده و بر اساس ضوابط آیین نامه AISC-LRFD99 طراحی شد. به‌عنوان مدل مینا، سازه مورد نظر به‌صورت "سیستم لوله‌ای" سنتی تعریف و طراحی شد به این شکل که قاب‌های پیرامونی از نوع خمشی ویژه انتخاب شده و در مقابل ستون‌های داخلی به همراه تیرهای میانی تنها برای تحمل بارهای ثقیلی ناشی از وزن طراحی شده‌اند. در ادامه مدل مینا به شکل‌های لوله در لوله، لوله با هسته داخلی، d لوله در لوله با کلاهک خریایی، لوله بادبندی شده و لوله دسته بندی شده تحلیل و طراحی شدند. در کلیه مدل‌ها، سقف سازه از نوع دال بتن آرمه با ضخامت ۱۵ سانتی‌متر و با عملکرد دو طرفه در نظر گرفته شده است. پارامترهای موثر بر بارگذاری باد، در جدول (۱) تعریف شده‌اند. برای آشنایی با جزئیات مدل سازه‌ای و بارگذاری مورد استفاده در فرایند تحقیق، جداول (۲) و (۳) ارائه شده‌اند. در خلال فرایند طراحی، فرضیات زیر در نظر گرفته شده‌اند:

- نسبت تنش برای کلیه المان‌ها در تمامی مدل‌ها بین ۰/۷ تا ۰/۹ در نظر گرفته شده است.
- تیب بندی ستون‌ها در هر ۵ طبقه با رعایت مسایل اجرایی انجام شده است.
- در مدل مینای لوله پیرامونی در تمام طبقات تیرهای میانی دو سر مفصل هم تیب هم هستند.
- کلیه تیرها از مقطع تیر ورق انتخاب شده‌اند.
- ستون‌ها از مقطع جعبه‌ای هستند.

مربوط به بخش‌های مختلف تحقیق ارائه شده است. مهم‌ترین نوآوری این پژوهش، ارزیابی جامع انواع شکل‌های سازه‌ای در ساختمان‌های فولادی بلند است که ویژگی مشترک آنها استفاده از معیار مقاومت در طراحی با رعایت نسبت تنش یکسان با یکدیگر است. از طرفی تمامی پارامترهای متاثر از ارتعاش جانبی سازه ارزیابی شده و نتایج در انتهای مقاله در کنار هم قرار گرفته تا انتخاب بهینه‌ترین سیستم سازه‌ای را میسر نماید. همچنین کنترل بیشینه تغییر مکان و شتاب برای کنترل معیار راحتی ساکنین نیز از دیگر موارد ارزیابی شده در این پژوهش است که در تحقیقات قبلی کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

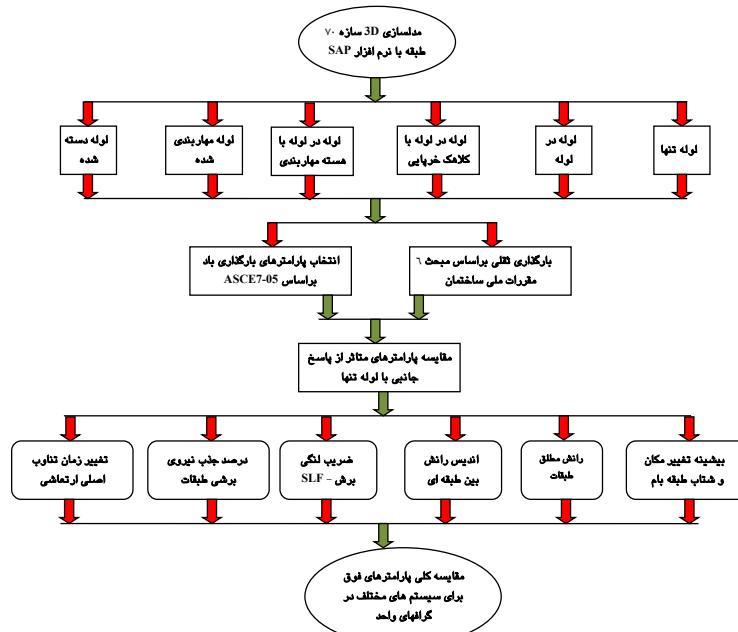


(الف)



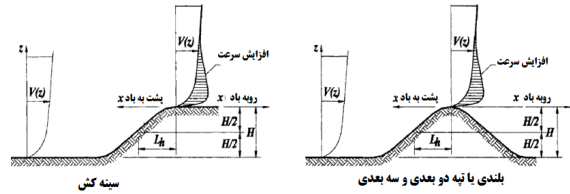
(ب)

شکل ۱: شکل‌های سازه بلند الف-سیستم سازه‌ای داخلی، ب- سیستم سازه‌ای خارجی [۱۰]



شکل ۲: فرایند پژوهش

حد فاصل لوله داخلی و خارجی از ستون استفاده شده است که پلان آن به صورت شماتیک در شکل (۴-ب) نشان داده شده است.



شکل ۳: اثر وجود سینه‌کش یا بلندی در افزایش سرعت و فشار باد به کمک ضریب توپوگرافی

### ۳- مقایسه تحلیلی سیستم لوله در لوله با لوله تنها

نیاز تغییر مکان جانبی مطلق و نرخ تغییرات آن همواره یکی از معیارهای اساسی در طرح سازه‌های فولادی محسوب می‌شود. این موضوع در ساختمان‌های بلند از منظر معیار راحتی نیز یک اصل اساسی است. اولین گزینه‌ای که برای بهبود پاسخ سازه لوله‌ای ارزیابی شد، بکارگیری سیستم لوله در لوله است. نمودار تغییر شکل جانبی مطلق طبقات مربوط به سازه ۷۰ طبقه در دو شکل سازه‌ای منقول در شکل (۵-الف) نشان داده شده است. از دیدگاه کیفی، استفاده از سیستم لوله در لوله به دلیل اینکه باعث شده تا لوله داخلی نیز در اشتراک با لوله خارجی به تحمل بارهای جانبی کمک نماید، بنابراین ضمن افزایش سختی سازه، تغییر مکان سازه لوله در لوله نسبت به لوله تنها، کمتر برآورد شده است. البته در طبقات زیرین (۱۰ طبقه اول) به جهت حاکم بودن معیار مقاومت در طرح، مقاطع برابر سازه لوله به خصوص تیرها سنگین برآورد شده و به دنبال آن تغییر شکل دو سازه تقریباً بر هم منطبق است.

در شکل (۵-ب) اندیس رانش بین طبقه‌ای در دو سیستم مذکور نشان داده شده است. از آنجایی که در طرح سازه تنها از معیار مقاومت استفاده شده است، لذا اندیس رانش بین طبقه‌ای در حالت لوله تنها جواب نداده است. با بکارگیری سیستم لوله در لوله برخلاف اینکه از دیدگاه کیفی اندیس رانش در طبقات سازه اصلاح شده اما همچنان از حد تعریف شده بر اساس معیار راحتی (۰/۰۰۲) فاصله دارد.

به منظور آشنایی با پلان سازه مورد تحلیل، شکل (۴) آورده شده است. از آنجا که پلان طبقات به صورت تیپ مدل‌سازی شده‌اند، بنابراین از اثرات پیچش ناشی از بارگذاری باد صرف‌نظر شده است و از طرفی نتایج مربوط به تحلیل هر یک از قاب‌ها و مقایسه آنها تنها برای بارگذاری باد در راستای x انجام پذیرفته است.

برای شکل لوله در لوله، تمامی ستون‌های پیرامونی بازشوی میانی و کلیه اتصالات تیرهای موجود در پلان از نوع گیردار مدل‌سازی شدند. بدین ترتیب لوله داخلی نیز همراه با لوله خارجی در تحمل بارهای ثقلی و جانبی مشارکت یافت. به همین ترتیب برای شکل سازه‌ای لوله در لوله با هسته مهاربندی شده، از پلانی مطابق شکل (۴-الف) استفاده شد با این تفاوت که تمامی دهانه‌های ۵، ۹، E و I بوسیله مهاربند ضربدری، لوله داخلی را به شکل هسته مقاوم تبدیل نمود. برای سیستم با کلاهک خریایی، کلاهک در طبقات ۲۵، ۵۰ و ۷۰ در دو هسته داخلی و خارجی تعبیه شد. در شکل سازه لوله مهاربندی شده، تنها سیستم لوله پیرامونی بوسیله ابرمهاربندهای با مدول ۶ طبقه و به شکل ضربدری تقویت شده و لوله داخلی از نوع قاب خمشی ویژه طراحی شد. در شکل سازه‌ای لوله دسته‌بندی شده، مدل مشابه سازه لوله در لوله است با این تفاوت که در

جدول ۱: جزییات مربوط به پارامترهای انتخاب شده در بارگذاری باد مدل‌ها

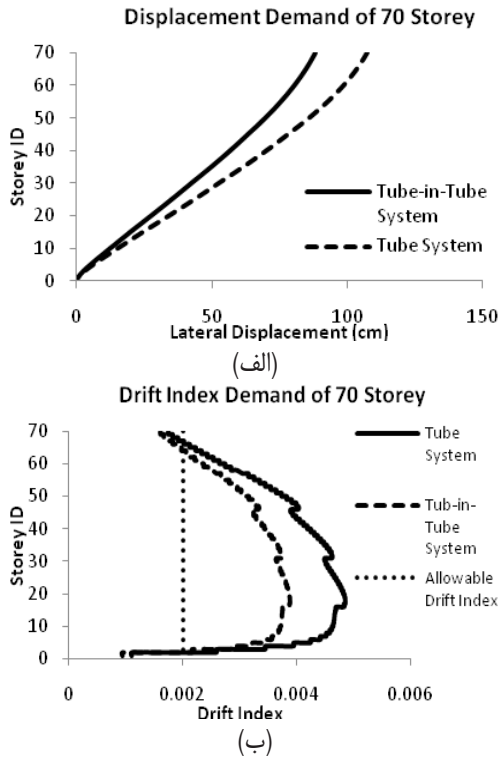
ردیف	عنوان	مقدار	ردیف	عنوان	مقدار
۱	زاویه اعمال باد	۰ و ۹۰ درجه	۷	سرعت باد (مایل بر ساعت)	۱۱۰
۲	ضریب فشار خارجی، $C_p$ - رو به باد	۰/۸	۸	طبقه‌بندی منطقه	B
۳	ضریب فشار خارجی، $C_p$ - پشت به باد	۰/۵	۹	ضریب اهمیت، I	۱
۴	حالت بارگذاری	۱	۱۰	ضریب توپوگرافی، $K_{zt}$	۱
۵	خروج از محوریت $e_1$	صفر	۱۱	ضریب تند باد، G	۰/۸۵
۶	خروج از محوریت $e_2$	صفر	۱۲	ضریب جهت باد، $K_d$	۰/۸۵

جدول ۲: جزییات مربوط به پارامترهای انتخاب شده در بارگذاری باد مدل‌ها

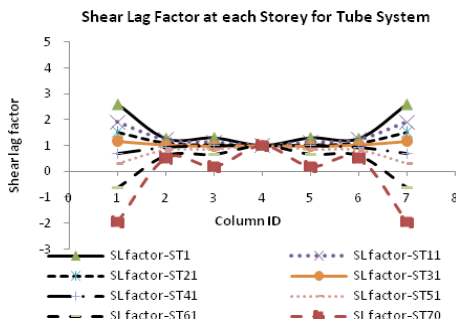
آیین نامه بارگذاری		ارتفاع هر طبقه		عرض هر دهانه		تعداد طبقه		تعداد دهانه ابعاد پلان	
بارگذاری ثقلی	مبحث ۶ مقررات ملی	۴ متر	۵ متر	۷۰	۶	۳۰*	۳۰		
بارگذاری جانبی	ASCE7-10								

جدول ۳: جزییات بارگذاری

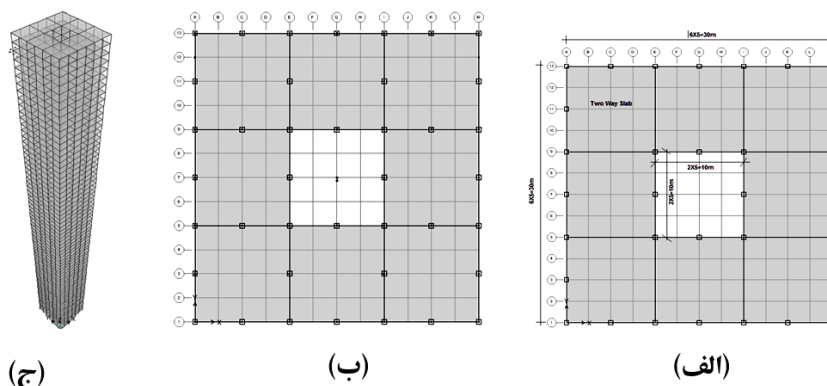
نوع بار	بار مرده ( $Kg/m^2$ )	بار زنده ( $Kg/m^2$ )	بار دیوار پیرامونی ( $Kg/m$ )
مقدار بار	۵۰۰	۲۰۰	۱۰۰۰



شکل ۵:



شکل ۶: نرخ تغییرات ضریب تاخیر برشی در ستون‌های مستقر در بال کششی سازه با سیستم لوله در لوله



شکل ۷: سازه ۷۰ طبقه (الف) پلان سیستم لوله‌ای، (ب) پلان سیستم لوله دسته شده و (ج) مدل سه بعدی

از دیگر مواردی که در این مقایسه بدان پرداخته شد نرخ تغییرات ضریب تاخیر برشی در ستون‌های بال سازه در طبقات مختلف است که این موضوع در شکل (۶) نشان داده شده است. طبق تعریف ضریب لنگی (تاخیر) برشی عبارتست از:

$$SLF = \frac{\text{نیروی محوری ستون‌ها در از ستون میانی}}{\text{نیروی محوری ستون میانی}} \quad (۱)$$

بر اساس تعریف ارائه شده در خصوص تاخیر برش و به استناد نتایج بدست آمده، استفاده از سیستم لوله در لوله منجر شد تا حداکثر ضریب تاخیر برشی در ستون C2 و C8 (ستون‌های گوشه) نسبت به حالت لوله تنها در اولین طبقه ۳۰٪ کاهش یابد. از طرفی نتایج نشان داد که در ارتفاع سازه در طبقه ۳۱ تاثیر تاخیر برشی تقریباً از بین رفته و از آنجا به بعد بحث تاخیر برش معکوس مطرح می‌شود، به نحوی که در طبقه ۷۰ برای ستون‌های گوشه در هر دو شکل سازه این ضریب برابر با مقدار ۲ بدست آمده و وابسته به نوع سیستم سازه‌ای نیست. از طرفی برای ستون‌های میانی (C3، C4، C5) در هر دو سازه ضریب تاخیر برش نزدیک به مقدار ۱ بدست آمده است، اما روند تغییرات آن در سازه لوله در لوله به دلیل مشارکت لوله داخلی به صورت غیر یکنواخت است.

برای مقایسه دقیق‌تر نرخ تغییرات ضریب تاخیر برشی نمودارهای میله‌ای (۷-الف تا ج) نیز ترسیم شده‌اند. به استناد شکل (۷-الف) کاهش قابل توجه ضریب تاخیر برشی به دلیل استفاده از سیستم لوله در لوله قابل درک است. از طرفی در شکل (۷-ب) این موضوع نمایان است که در طبقات میانی بکارگیری سیستم لوله در لوله تاثیر چندانی بر ضریب تاخیر برشی نداشته و همچنین با توجه به شکل (۸-ج) وقوع تاخیر برشی معکوس دور از انتظار نیست.

از دیگر مواردی که در این تحقیق بدان توجه شده مقایسه درصد جذب برش و مقدار مشارکت هر یک از اجزای سازه در باربری جانبی است. در حالی که تنها از لوله خالی استفاده شود، مطابق نتایج بدست آمده، بجز در چند طبقه ابتدایی سازه، تمام بار جانبی سهم قاب‌های مستقر در جان لوله است. در مقایسه با این سیستم، در سازه لوله در لوله برای تشخیص سهم لوله داخلی و خارجی شکل (۸) رسم شد.

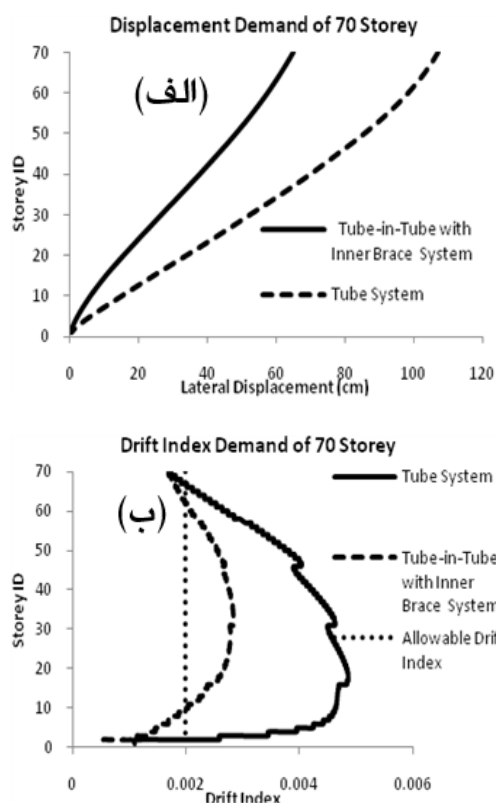


۳۰ و ۴۵ به دلیل تغییر در مقاطع طراحی است. بدیهی است که از ۸۰٪ برش جذب شده توسط لوله خارجی، سهم قابل توجه آن توسط ستون‌های مستقر در جان لوله پیرامونی تحمل می‌شود.

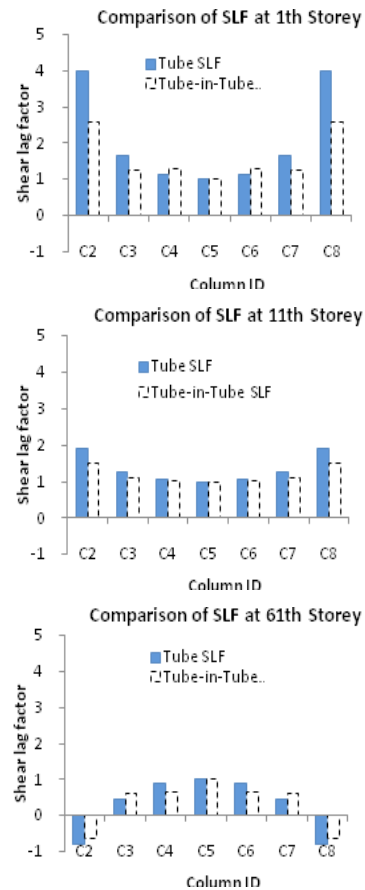
#### ۴- مقایسه تحلیلی سیستم لوله در لوله به هسته داخلی با لوله تنها

مشابه بخش قبلی به منظور برآورد تاثیر بکارگیری لوله داخلی تقویت شده با هسته داخلی، بر نیاز تغییر مکان مطلق طبقات، شکل (۹) ترسیم شده است. مطابق آنچه انتظار می‌رفت افزایش سختی سیستم لوله در لوله با هسته مهاربندی، باعث شد که در تمامی طبقات، تغییر مکان مطلق طبقه کاهش یابد که در مقایسه با حالت لوله در لوله تاثیر آن قابل توجه تر می‌باشد. از طرفی شکل تغییر شکل در حالت لوله از نوع برشی است در حالی که استفاده از مهاربند باعث شد تا در طبقات پایین تغییر شکل خمشی و در طبقات بالا برشی باشد. به عبارتی نمودار تغییر شکل در طبقات میانی دارای نقطه عطف است. در واقع در طبقات زیرین قاب بر روی مهاربند تکیه داشته و در طبقات بالایی این موضوع برعکس می‌شود.

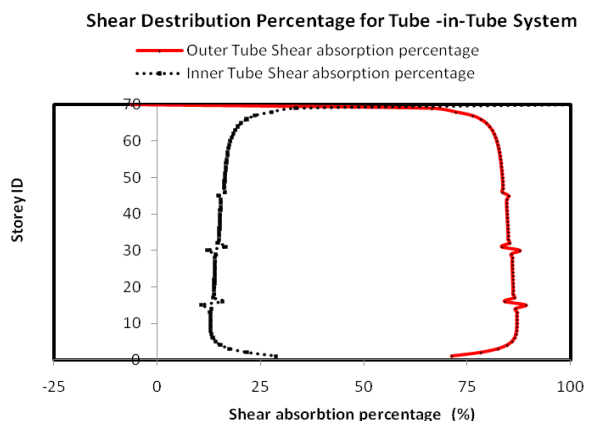
یکی دیگر از شاخص‌های ارزیابی شده، اندیس رانش بین طبقه‌ای است که نسبت به لوله تنها کاهش قابل توجهی داشته است. البته همچنان اندیس رانش از حد مجاز تعریف شده برای معیار ایمنی و رفاه فاصله دارد.



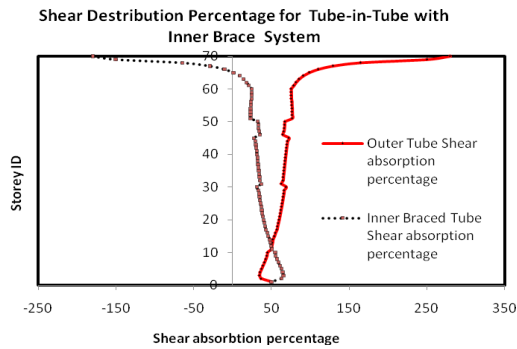
شکل ۹: مقایسه الف) تغییر مکان مطلق طبقات ب) اندیس رانش بین طبقه‌ای در دو سازه لوله تنها و لوله در لوله با هسته داخلی



شکل ۷: نرخ تغییرات ضریب تاخیر برشی در ستون‌های مستقر در بال کششی سازه در طبقات ۱۱، ۱ و ۶۱ سیستم لوله در لوله با مراجعه به این شکل مشخص می‌شود که از دیدگاه کیفی سهم لوله خارجی در مقایسه با لوله داخلی بیشتر است. همچنین در قسمت عمده‌ای از ارتفاع سازه نرخ تغییرات درصد جذب برش برای هر دو لوله داخلی و خارجی یکسان است، اگر چه با افزایش ارتفاع اندکی از سهم لوله خارجی کاسته و بر لوله داخلی افزوده می‌شود. از طرفی در ۱۰ طبقه ابتدایی سازه سهم لوله خارجی با افزایش شماره طبقه افزایش یافت. از نظر کمی متوسط درصد جذب برش لوله خارجی و داخلی به ترتیب ۸۰٪ و ۲۰٪ برآورد شد. همچنین در ۱۰ طبقه بالایی مشارکت لوله داخلی نسبت به لوله خارجی افزایش یافته است. وجود شکستگی‌هایی در نمودار (۸) در طبقات ۱۵

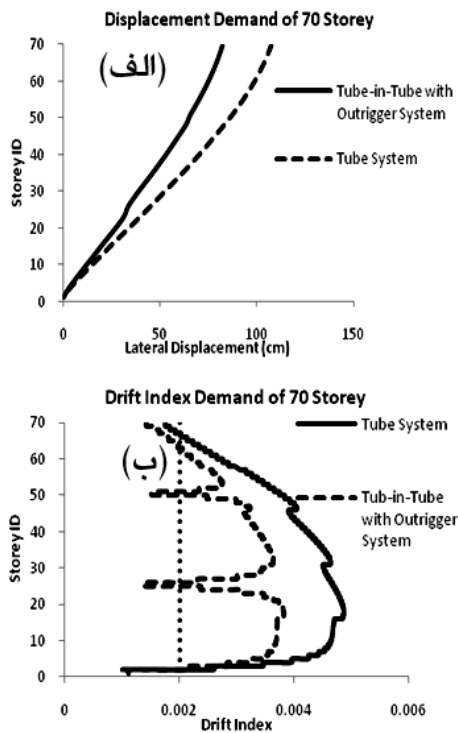


شکل ۸: درصد جذب برش لوله خارجی و لوله داخلی از کل نیروی برش طبقه



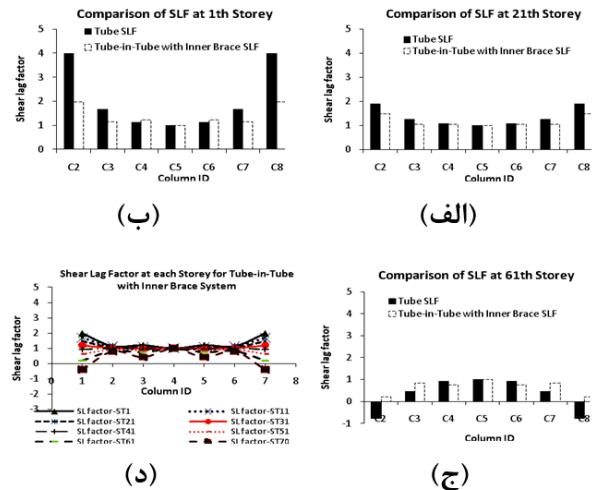
شکل ۱۱: درصد جذب برش لوله خارجی و لوله داخلی همراه با هسته داخلی از کل نیروی برش طبقه

یک گزینه در بهبود عملکرد جانبی سازه بلند محسوب شود. تا بحال تحقیقات بسیار گسترده‌ای در زمینه تعیین جانمایی دقیق و بهینه کلاهای خرپایی انجام شده است که مطالعات با دو فرض صلبیت و انعطاف‌پذیری کلاهای خرپایی پایه‌ریزی شده‌اند. نتایج کلی محاسبات نشان می‌دهند که استفاده از دو کلاهای خرپایی در ۳۰٪ و ۷۰٪ ارتفاع کل سازه می‌تواند به بهبود پاسخ جانبی سازه بلند کمک زیادی کند. به همین دلیل در این پژوهش نیز در تراز ۳۰٪ و ۷۰٪ و ۱۰۰٪ ارتفاع کل نسبت به تراز پایه در لوله پیرامونی و لوله داخلی از کلاهای خرپایی با مهاربند ضربدری استفاده شده است. سپس کلیه پارامترهای مورد نظر با خروجی‌های مربوط به لوله تنها مقایسه شده است. همان‌گونه که در شکل (۱۲-الف) نشان داده شده است، استفاده از کلاهای خرپایی باعث کاهش نیاز تغییر مکان جانبی مطلق طبقات شده است. از طرفی از شدت دامنه حالت تغییر شکل برشی



شکل ۱۲: مقایسه الف) تغییر مکان مطلق طبقات ب) اندیس رانش بین طبقه‌ای در دو سازه لوله تنها و لوله در لوله با کلاهای خرپایی

ضریب تاخیر برشی در ستون‌های مستقر در بال کششی در طبقات مختلف از دیگر پارامترهایی است که در شکل (۱۰) نشان داده شده است. با مراجعه به این شکل، ملاحظه می‌شود که در ستون‌های کناری این ضریب کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته و در طبقات میانی سازه به ۱ نزدیک شده است. هم‌چنین پدیده تاخیر برشی معکوس نیز تقلیل یافته است. نکته دیگر اینکه در طبقه ۶۱، برای ستون‌های کناری بکارگیری این سیستم باعث شده که ضریب تاخیر برشی معکوس کاهش یافته و علامت آن نیز تغییر یابد.



شکل ۱۰: نرخ تغییرات ضریب تاخیر برشی در ستون‌های مستقر در بال کششی سازه در طبقات ۱، ۲۱ و ۶۱ (شکل‌های الف تا ج) و نرخ تغییرات ضریب تاخیر برشی در طبقات مختلف بال کششی (شکل د) سیستم لوله در لوله با هسته داخلی

یکی دیگر از پارامترهای مهم سیستم، ارزیابی درصد جذب برش است. به استناد شکل (۱۱) در طبقات پایین سازه (تا طبقه ۱۲) سهم هسته داخلی در جذب برش بیشتر از لوله خارجی است. از دیدگاه کمی در بیشترین حالت ۷۵٪ برش توسط هسته و لوله داخلی و ۲۵٪ توسط لوله خارجی تحمل شده است. اما با حرکت در طبقات بالایی سازه این اثر معکوس شده است و هم‌زمان با افزایش شماره طبقه، سهم عمده جذب برش بر عهده لوله خارجی است و نرخ جذب برش در ارتفاع به صورت افزایشی است. در ۵ طبقه بالایی سازه وجود هسته داخلی باعث شده تا برش اضافی بر سازه وارد شود و همین موضوع یک نیروی برشی اضافی را بر لوله خارجی تحمیل کرده است. بنابراین می‌توان در طبقات ۶۵ تا ۷۰ مهاربندهای داخلی را حذف نمود. بنابراین در یک جمع‌بندی کلی، سرمایه‌گذاری روی لوله خارجی اهمیت بیشتری دارد.

### ۵- مقایسه تحلیلی سیستم لوله در لوله با کلاهای خرپایی با لوله تنها

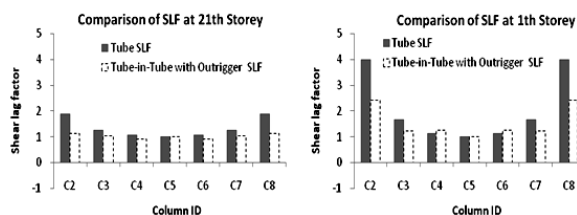
استفاده از کلاهای خرپایی در کنار سیستم لوله در لوله می‌تواند به‌عنوان

از نظر درصد جذب نیروی برشی توسط لوله‌های خارجی و داخلی، نتایج محاسبات در شکل (۱۴) نشان داده شده است. با استناد این شکل از دیدگاه کیفی، همواره درصد جذب برش لوله خارجی نسبت به لوله داخلی بیشتر است مگر در مواردی که کلاهاک خرابایی تعبیه شده است. به طور مثال در تراز طبقات ۲۵، ۵۰ و ۷۰ این رویه معکوس شده است. از منظر کمی نیز لوله داخلی در تمامی طبقات به طور متوسط ۲۰٪ نیروی برش طبقه را جذب می‌کند. در مقابل سهم لوله خارجی از نیروی برش طبقه به طور میانگین، ۸۰٪ برآورد شد. وجود پرش در نمودار جذب برش، به دلیل تعبیه کلاهاک خرابایی است.

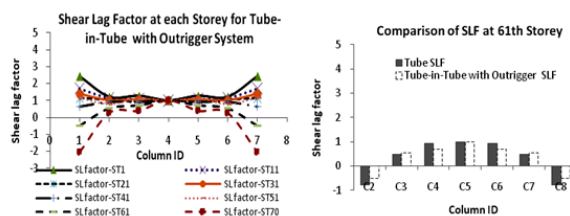
### ۶- مقایسه تحلیل سیستم لوله مهاربندی شده (ابر-مهاربند ها) با لوله تنها

یکی دیگر از سیستم‌های سازه‌ای در ساختمان‌های بلند بکارگیری ابرمهاربند در پیرامون ساختمان است که بنوعی صورت ارتقاء یافته لوله تنهاست. در این حالت مهاربند در بین چندین طبقه سازه اجرا شده که به تعداد طبقات مهاربندی شده، اصطلاحاً مدول مهاربندی گویند. به‌طور مثال در این پژوهش مدول مهاربندی برابر ۶ انتخاب شده است. پژوهش‌های پیشین نگارندگان این مقاله موید این موضوع است که شکل مهاربندی (آرایش آن اعم از ضربدری، شورون و شورون معکوس و EBF) و مدول آن (تعداد طبقات مهاربندی شده) بر رفتار بهینه آن تاثیرگذار است که البته این موضوع به تعداد طبقات سازه نیز وابسته است. مانند بخش‌های قبلی تاثیر استفاده از ابرمهاربند همگرا بر نیاز تغییر مکان مطلق در شکل (۱۵) نشان داده شده و با سیستم لوله تنها مقایسه شده است. به‌جهت سختی قابل توجه ابرمهاربند و تاثیر قابل توجه آن بر سختی لوله پیرامونی، از دیدگاه کیفی، نیاز تغییر مکان طبقات در تمامی ارتفاع سازه کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته است. از طرفی شکل تغییر شکل جانبی از حالت برشی به حالت تغییر شکل خمشی تغییر یافت. تاثیر این سیستم در تمامی طبقات سازه مشهود است در حالی که برای سیستم لوله در لوله (به استناد شکل (۵-الف)) تاثیر لوله داخلی در کنار لوله خارجی در طبقات پایینی سازه (۲۰ طبقه اول) چندان مشهود نیست. اندیس رانش بین طبقه‌ای نیز در تمامی طبقات کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته است به‌قسمی که از منظر کیفی معیار اندیس رانش مجاز متناظر با سطح عملکرد ایمنی و رفاه ساکنین مندرج در ASCE7-10 برآورده شد. از طرفی نرخ تغییرات اندیس رانش از طبقه ۲۰ به بعد در تمامی طبقات تقریباً یکسان و یکنواخت محاسبه شده است. بکارگیری ابرمهاربند به دلیل اینکه باعث می‌شود تمامی ستون‌های مستقر در بال و جان فشاری و کششی درگیر شوند، باعث شد تا ضریب تاخیر برش در تمامی طبقات نسبت به لوله تنها کاهش یابد (شکل ۱۶-الف). از طرفی با توجه به شکل (۱۶-ب) این ضریب برای

قاب لوله در لوله کاسته و حالت تغییر شکل را به سمت حالت خمشی سوق داده است. از مقدار اندیس رانش بین طبقه‌ای نیز در تمامی طبقات سازه، کاسته شد. اما بیشترین تاثیر مربوط به طبقاتی است که در آنها کلاهاک خرابایی اجرا شده است که در این پژوهش در طبقات، ۲۵، ۵۰ و ۷۰ در نظر گرفته شده است. در این حالت اندیس رانش از حد مجاز آیین نامه کمتر برآورد شده است.



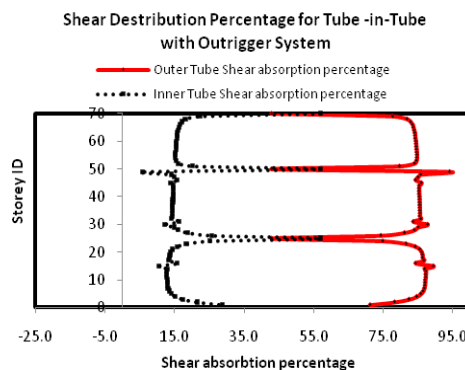
(ب) (الف)



(د) (ج)

شکل ۱۳: نرخ تغییرات ضریب تاخیر برشی در ستون‌های مستقر در بال کششی سازه در طبقات ۱، ۲۱ و ۶۱ (الف تا ج) و تغییرات ضریب تاخیر برشی در طبقات مختلف بال کششی (د) سیستم لوله در لوله با کلاهاک خرابایی

ضریب تاخیر برشی در ستون‌های مستقر در بال کششی در طبقات مختلف از دیگر پارامترهایی است که در شکل (۱۳) نشان داده شده است. با مراجعه به این شکل، ملاحظه می‌شود که در ستون‌های کناری این ضریب کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته و در طبقات میانی سازه به ۱ نزدیک شده است. هم‌چنین پدیده تاخیر برشی معکوس نیز تقلیل یافته است. نکته دیگر اینکه در طبقه ۶۱، برای ستون‌های کناری بکارگیری این سیستم باعث شده که ضریب تاخیر برشی معکوس کاهش یابد.



شکل ۱۴: درصد جذب برش لوله داخلی و خارجی از کل نیروی برش طبقه

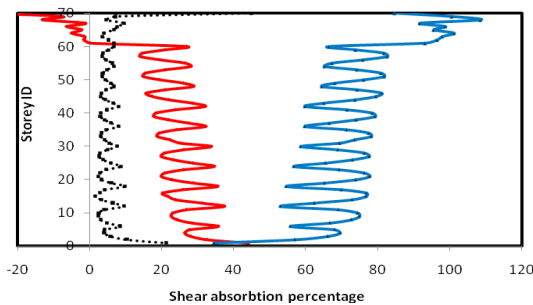


تغییر علامت داده است (شکل ۱۰-ج).

از منظر درصد جذب برش، میزان مشارکت لوله داخلی، لوله خارجی و ابرمهاربند در شکل (۱۷) نشان داده شده است. به استناد این شکل از دیدگاه کیفی بیشترین درصد جذب برش مربوط به ابرمهاربند است. لوله خارجی و داخلی در جایگاه دوم قرار گرفته‌اند. از طرفی با حرکت در طبقات از پایین به بالا درصد مشارکت ابرمهاربند در جذب برش افزایش می‌یابد در حالی که برای لوله داخلی در تمامی طبقات یکسان و تقریباً ۱۰٪ محاسبه شده است. وجود پرش در نمودار جذب برش از دیگر نکات قابل ذکر در این تحقیق است. با استفاده از  $d$  نتایج بدست آمده در شکل (۱۷)، در نقاطی که مدول بادبندی تغییر می‌یابد (به‌طور مثال حد فاصل تراز طبقه ۶ سازه) از مشارکت مهاربند در جذب برش کاسته شده و به همان میزان بر سهم لوله پیرامونی افزوده می‌شود. به همین دلیل به نظر می‌رسد که تقویت ستون‌ها در تراز تغییر مدول بادبندی ضروری است. همچنین بهترین مشارکت

Shear Distribution Percentage for Braced Tube System

Outer Tube Inner Tube Mega Brace

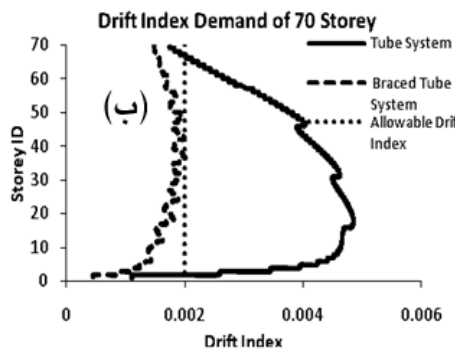
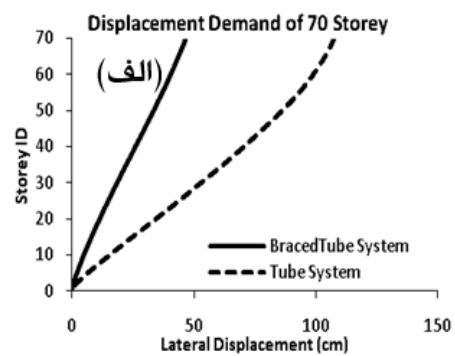


شکل ۱۷: درصد جذب برش لوله مهاربندی شده (ابرمهاربند) از کل نیروی برش طبقه

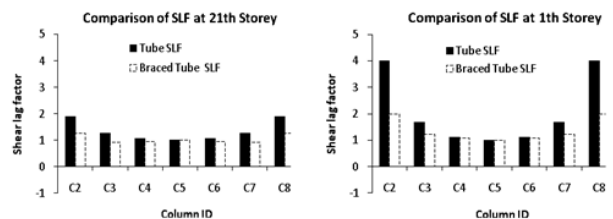
ابرمهاربند در جذب برش مربوط به محلی است که دو عضو قطری یک مدول مهاربندی هم‌دیگر را قطع کنند. در این حالت دهانه مورد نظر شبیه یک دهانه مهاربند  $X$  عمل نموده که بیشترین جذب برش را داراست. به‌عنوان یک جمع‌بندی خاطر نشان می‌شود که بکارگیری این سیستم ضمن کاهش قابل توجه در مقادیر نیاز تغییر مکان و اندیس رانش، باعث بهبود ضریب تأخیر برش شده و از طرفی سهم عمده‌ای از برش توسط ابرمهاربند جذب می‌شود.

#### ۷- مقایسه لوله دسته شده با لوله تنها

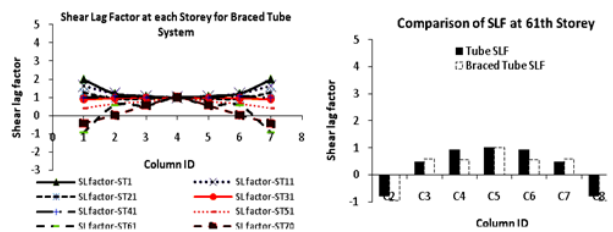
آخرین سیستم سازه‌ای که در این پژوهش بدان پرداخته شده است، لوله دسته شده است. در این سازه لوله پیرامونی خارجی و لوله داخلی توسط تیرهای با اتصال صلب و ستون‌های میانی به یکدیگر دوخته می‌شوند. بدین ترتیب جان سازه در برابر نیروهای جانبی تقویت شده است و تمام ستون‌های سازه با یکدیگر در باربری مشارکت دارند. مشابه قسمت‌های قبلی، اولین پارامتری که تأثیر لوله دسته شده را نشان می‌دهد، تغییر مکان مطلق طبقات است که این موضوع در شکل (۱۸) نشان داده شده است. بر این اساس استفاده از لوله دسته



شکل ۱۵: مقایسه الف) تغییر مکان مطلق طبقات ب) اندیس رانش بین طبقه‌ای در دو سازه لوله تنها و لوله مهاربندی شده (ابرمهاربندی)



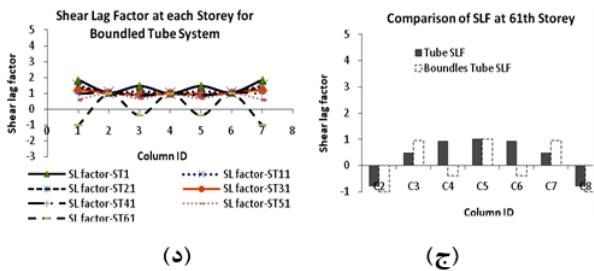
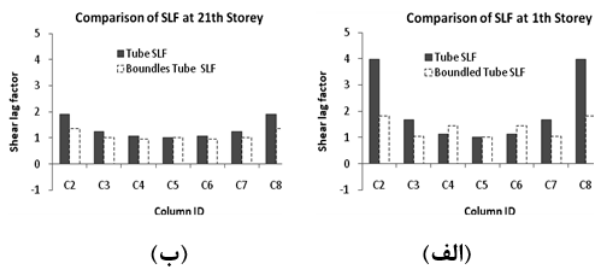
شکل ۱۶: مقایسه ضریب تأخیر برشی در ستون‌های بال کششی سازه در طبقات ۲۱ و ۱ (الف تا ج) و نرخ تغییرات ضریب تأخیر برشی در طبقات مختلف بال کششی (د) سیستم لوله مهاربندی شده (ابر-مهاربند)



شکل ۱۶: نرخ تغییرات ضریب تأخیر برشی در ستون‌های بال کششی سازه در طبقات ۲۱ و ۱ (الف تا ج) و نرخ تغییرات ضریب تأخیر برشی در طبقات مختلف بال کششی (د) سیستم لوله مهاربندی شده (ابر-مهاربند)

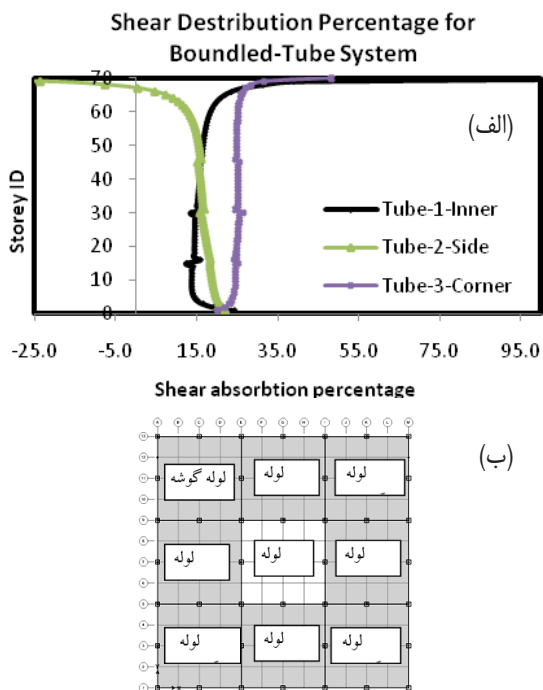
شکل ۱۶: نرخ تغییرات ضریب تأخیر برشی در ستون‌های بال کششی سازه در طبقات ۲۱ و ۱ (الف تا ج) و نرخ تغییرات ضریب تأخیر برشی در طبقات مختلف بال کششی (د) سیستم لوله مهاربندی شده (ابر-مهاربند)

طبقه ۲۱ سازه در تمامی ستون‌ها نزدیک به ۱ برآورد شده است. در این حالت طبقه انتقالی تأخیر برش به حالت معکوس، طبقه ۳۱ سازه برآورد شده است. با توجه به شکل (۱۶) بکارگیری ابرمهاربند منجر شد، در ستون‌های کناری C۲ و C۸ در طبقه ۶۱ ضریب تأخیر برشی منفی بدست آید، در حالی که برای سیستم با هسته داخلی این ضریب

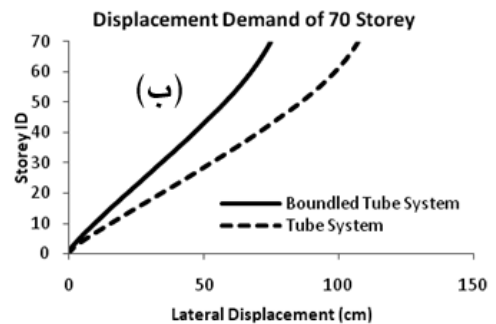
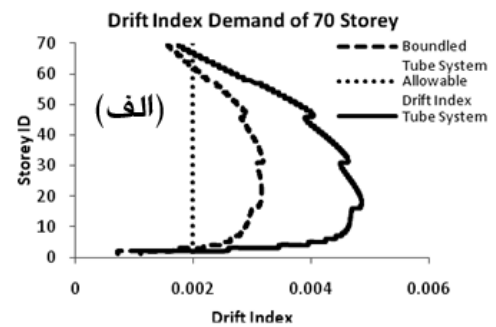


شکل ۱۹: تغییرات ضریب تاخیر برشی در ستون‌های بال کششی سازه در طبقات ۲۱، ۱ و ۶۱ (الف تا ج) و تغییرات ضریب تاخیر برشی در طبقات مختلف بال کششی (د) سیستم لوله در لوله دسته بندی شده

گوشه است زیرا تعدادی از ستون‌های مستقر در لوله گوشه به‌عنوان جان سازه در برابر برش خارجی مشارکت دارند. از طرفی در ۷۰٪ ارتفاع سازه سهم برش جذب شده توسط لوله کناری بیشتر از لوله داخلی است. درحالی‌که در ۳۰٪ ارتفاع کل سازه در قسمت بالایی، لوله داخلی، برش بیشتری را نسبت به لوله کناری جذب می‌کند. در طبقات انتهایی اثر لوله کناری منفی شده و باعث تحمیل برش



شکل ۲۰: الف) درصد جذب برش سیستم لوله دسته بندی شده از کل نیروی برش طبقه، ب) جانمایی لوله های میانی، کناری و گوشه.

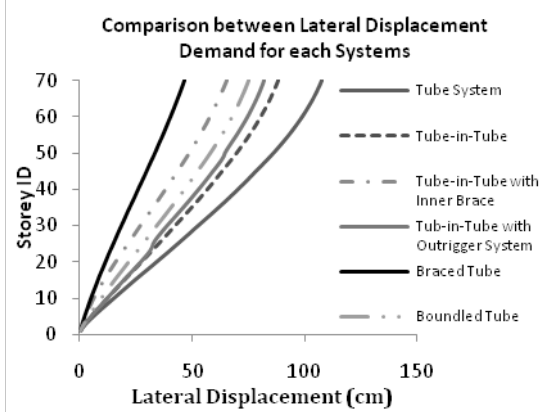


شکل ۱۸: مقایسه الف) تغییر مکان مطلق طبقات ب) اندیس رانش بین طبقه‌ای در دو سازه لوله تنها و لوله در لوله دسته شده

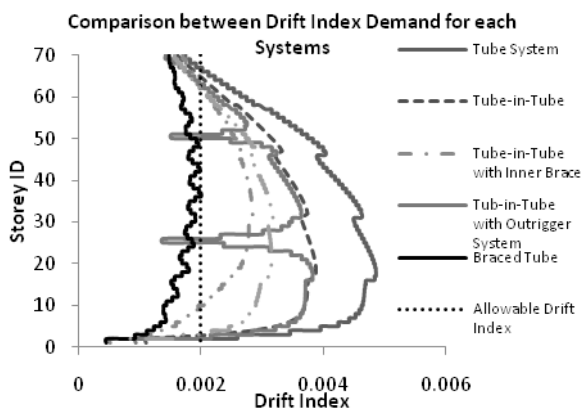
شده باعث کاهش تقاضای تغییر مکان در تمامی طبقات می‌شود، اما حالت تغییر شکل سازه همچنان برشی است (رفتار قاب خمشی). همچنین از طبقات میانی، اختلاف بین نتایج لوله دسته شده با لوله تنها افزایش می‌یابد. از نظر اندیس رانش بین طبقه‌ای نیز بکارگیری لوله دسته شده باعث بهبود رفتار سازه شده و در تمامی طبقات سازه نسبت به لوله تنها کاهش یافته است، اما با حد مجاز اختلاف دارد.

پارامتر ضریب تاخیر برش (لنگی برشی) از دیگر مواردی است که نتایج آن در شکل‌های (۱۶- الف تا ج) نشان داده شده است. نتایج بدست آمده به استناد شکل (۱۹) مویید این موضوع است که بکارگیری لوله دسته شده در تمامی طبقات سازه (تقریباً ۷۵٪ ارتفاع کل سازه) سبب بهبود ضریب تاخیر برش شده، به‌قسمی که این ضریب برای ستون‌های گوشه به عدد ۱ نزدیک شده است. از طرفی در طبقه ۶۱ و در محل قرارگیری ستون‌های رابط لوله داخلی و خارجی این مقدار ۱ بدست آمده است. حداکثر کاهش بدست آمده در این قسمت مربوط به ستون‌های C2 و C8 مستقر در طبقه اول است (شکل ۱۹- الف). همچنین بکارگیری لوله دسته شده باعث شد تا ضریب تاخیر برشی در ستون‌های طبقه ۶۱ (ستون‌های C4 و C6) تغییر علامت دهد. به‌عبارتی نیروی محوری این ستون‌ها بر خلاف اینکه در بال کششی قاب پیرامونی قرار دارند، به نیروی فشاری تغییر علامت داده است.

درنهایت در شکل (۲۰) درصد جذب برش نشان داده شده است. در این نمودار سه دسته منحنی مربوط به درصد جذب برش لوله داخلی، لوله کناری و لوله گوشه به‌تصویر کشیده شده است. با توجه به این شکل مشخص است که بیش‌ترین درصد جذب برش مربوط به لوله

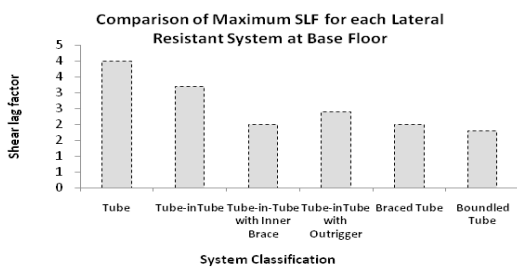


(الف)

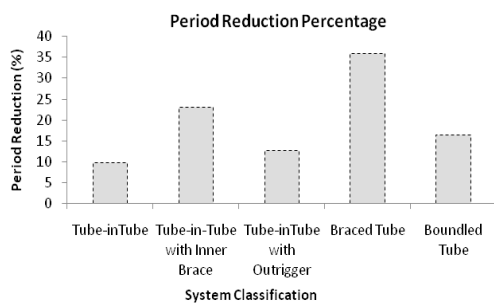


(ب)

شکل ۲۱: مقایسه الف) تغییر مکان مطلق طبقات ب) اندیس رانش بین طبقه‌ای در سیستم‌های سازه‌ای مختلف



شکل ۲۲: مقایسه حداکثر ضریب تاخیر برش در سیستم‌های سازه مختلف



شکل ۲۳: مقایسه درصد کاهش زمان تناوب در سیستم‌های سازه‌ای مختلف

منفی سازه می‌شود. مزاد این برش توسط لوله داخلی و گوشه تحمل می‌شود. به استناد این توضیحات می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که لوله کناری را می‌توان در تراز معادل ۷۰٪ ارتفاع کل سازه از تراز پایه قطع نمود. از دیدگاه کمی، درصد جذب برش برای لوله گوشه در تمامی طبقات یکسان و ۲۵٪ برآورد شده است. هم‌چنین مشارکت لوله داخلی با حرکت از پایین به بالا در طبقات سازه افزایش یافته است و این موضوع برای لوله کناری برعکس است.

#### ۸- مقایسه کلی بین سیستم‌های مختلف

از آنجا که تعداد قابل توجهی گراف برای انواع شکل‌های سازه‌ای ترسیم شده و نتایج حاصل از آنها به صورت کیفی و کمی تشریح شده است، در این بخش تلاش شده تا برای جمع‌بندی کلی، نتایج پارامترهای قبلی گراف‌ها با هم نشان داده شوند. تغییر مکان مطلق طبقات، اندیس رانش بین طبقه‌ای و ضریب تاخیر برشی مواردی هستند که در این قسمت مقایسه خواهند شد (شکل ۲۱-الف و ب) و شکل (۲۲)). از طرفی نرخ تغییرات زمان تناوب اصلی سازه‌های مختلف در مقایسه با سیستم لوله تنها در شکل (۲۳) نشان داده شده‌اند.

با مراجعه به شکل (۲۱-الف) ملاحظه می‌شود که کارآمدترین سیستم در کاهش تغییر مکان مطلق طبقات سیستم ابرمهاربند مدولار است. از طرفی بکارگیری سایر سیستم‌های سازه‌ای در تلفیق با لوله نیز باعث بهبود این پارامتر شده است. پس از ابرمهاربند، شکل لوله در لوله با هسته داخلی بیش‌ترین تاثیر را در کاهش پاسخ جانبی طبقات داشته است. استفاده از این شکل سازه‌ای علاوه بر این تاثیر، باعث شده است تا حالت تغییر شکل سازه از برشی به ترکیب برشی و خمشی تغییر یافته و در ارتفاع میانی نقطه عطف شکل گیرد.

از نظر اندیس رانش طبقه نیز بکارگیری ابرمهاربند بیش‌ترین تاثیر را داشته به شکلی که حد مجاز معیار راحتی و آسایش را تامین کرده است. در این مورد، سیستم لوله در لوله با هسته داخلی در جایگاه دوم قرار دارد. از نظر ضریب تاخیر برش نیز به استناد شکل (۲۲) استفاده از لوله در لوله با هسته داخلی و لوله مهاربندی شده باعث کاهش قابل توجه در ضریب تاخیر برش شده است. درصد کاهش این ضریب برای این سه سیستم و در محدوده این مطالعه به طور متوسط ۵۰٪ محاسبه شده است.

همواره تغییر در سیستم سازه‌ای به منزله تغییر در سختی جانبی آن است که به دنبال آن ویژگی‌های دینامیکی ارتعاشی سازه تغییر می‌یابد. یکی از این پارامترها، زمان تناوب طبیعی ارتعاش است که تغییر در آن بر نیاز نیروی جانبی وارد بر سازه در اثر زلزله تاثیرگذار است. به همین دلیل نرخ تغییرات زمان تناوب حالت اول ارتعاشی برای سازه‌های مختلف نسبت به سیستم مبنا (لوله پیرامونی) در شکل (۲۳) به تصویر کشیده شده است. به استناد این شکل، بیش‌ترین درصد کاهش در زمان تناوب مربوط به سیستم ابرمهاربند پیرامونی است. این موضوع به دلیل افزایش قابل توجه در سختی جانبی سازه تقویت شده با مهاربند قابل توجیه است. در نقطه مقابل، کم‌ترین درصد افزایش کاهش زمان تناوب مربوط به سیستم لوله

شده و نتایج در جدول (۴) ارائه شده‌اند. به‌منظور کنترل محدوده مجاز تعریف شده در آیین نامه ASCE7-10، دو ستون با عنوان وضعیت در این جدول وجود دارد که اگر نیاز حداکثر محاسبه شده، کمتر از مقدار مجاز آن باشد، از عبارت "مطلوب"، استفاده شده است. نتایج این جدول انطباق بسیار خوبی با نتایج بخش‌های قبلی دارد. به‌طور نمونه، از بین کلیه سیستم‌های مورد ارزیابی، تنها "لوله مهاربندی شده" دارای بیشینه اندیس رانش بین طبقه‌ای و شتاب کمتر از مقادیر مجاز آیین نامه است که البته این موضوع پیش‌تر نیز در محدوده مدل‌های این تحقیق اثبات شده بود.

#### ۱۰- نتیجه‌گیری

امروزه ارزیابی عملکرد انواع سیستم‌های مقاوم جانبی در سازه‌های بلند به دلیل دسترسی به نرم‌افزارهای قدرتمند تحلیل میسر شده است. از طرفی تحلیل عددی مزایا و معایب آنها برای اتخاذ تصمیم مناسب به‌منظور انتخاب بهترین گزینه از دیگر موضوعات مورد پژوهش است. به همین دلیل در این تحقیق تلاش شد تا با مدل‌سازی انواع شکل سازه‌های رایج در ساختمان‌های بلند فولادی، تاثیر هر یک بر بهبود پاسخ جانبی سازه لوله تنها (مدل مینا) تخمین زده شود. مهم‌ترین نوآوری این پژوهش، ارزیابی جامع انواع شکل‌های سازه‌ای در ساختمان‌های فولادی بلند است که ویژگی مشترک آنها استفاده از معیار مقاومت در طراحی با رعایت نسبت تنش یکسان با یکدیگر است. از طرفی تمامی پارامترهای متاثر از ارتعاش جانبی سازه ارزیابی شده و نتایج در انتهای مقاله در کنار هم قرار گرفته تا انتخاب بهینه‌ترین سیستم سازه را میسر نماید. همچنین کنترل بیشینه تغییر مکان و شتاب برای کنترل معیار راحتی ساکنین نیز از دیگر موارد ارزیابی شده در این پژوهش است که در تحقیقات قبلی کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

نتایج تحقیق نشان داد که تقویت سیستم لوله تنها با هر یک از شکل‌های گفته شده باعث شد رانش مطلق طبقات کاهش یابد اما بیش‌ترین تاثیر مربوط به سیستم لوله مهاربندی شده است. از طرفی بکارگیری لوله

در لوله است. مهم‌ترین تاثیر در کاهش زمان تناوب، افزایش شتاب طیفی است که در تحلیل دینامیکی طیفی باید مد نظر قرار گیرد مشروط بر آنکه زمان تناوب سازه در ناحیه نزولی طیف طرح قرار گرفته باشد.

#### ۹- کنترل بیشینه اندیس رانش و شتاب مدل‌ها

برای دسترسی به مصالح انعطاف‌پذیر و شکل‌پذیر، ساختمان‌های بلند

$$X_{\max} = \frac{f_1(z=h)\rho BHC_{fx} \bar{V}_z^2}{2m_1(2\pi m_1)^2} KG \leq 0.002H \quad (2)$$

$$\ddot{X}_{\max} = 31.11g_R \times \frac{0.85f_1(z=h)\rho BHC_{fx} \bar{V}_z^2}{m_1} \times I_z KR \quad (3)$$

ساخته می‌شدند، در برابر بارهای جانبی دینامیکی مانند باد حساس‌تر و آسیب پذیرتر هستند. همچنین باد برخلاف زلزله یکی از پدیده‌های رایج و با دوره بازگشت کم است. در نتیجه کنترل معیار آسایش و ایمنی در این دسته از ساختمان‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. آیین نامه ASCE7-10 در فصل ۶ با عنوان بارگذاری باد، به‌منظور محاسبه بیشینه تغییر شکل و شتاب طبقه بام دو رابطه ۵ و ۶ را ارائه کرده است [۲۱]:

بر اساس ضوابط این آیین نامه، بیشینه شتاب باید به ۲۰ milli-g محدود شود. از طرفی در بسیاری مراجع پیشنهاد شده است که بیشینه تغییر مکان طبقه بام به ۰/۰۰۲ ارتفاع کل سازه محدود شود. کلیه پارامترهای روابط (۵) و (۶) در بخش ۶-۳ آیین نامه ASCE7-10 تعریف شده‌اند. تنها نکته قابل ذکر اینکه در روابط فوق،  $m_1$  جرم متناظر با مد اول،  $m_1$  بسامد حالت اول،  $\phi_1$  مولفه حالت اول ارتعاش است که معمولاً برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود.  $H$  و  $B$  به ترتیب بعد سازه عمود بر راستای باد و ارتفاع سازه است.

بر اساس نتایج بدست آمده از بخش‌های قبلی سازه، دو عامل بیشینه اندیس رانش بین طبقه‌ای و شتاب طبقه بام برای انواع مدل‌ها محاسبه

جدول ۴: بیشینه اندیس رانش بین طبقه‌ای و شتاب طبقه بام و مقایسه آن با مقادیر مجاز ASCE7-10

نوع سیستم	بسامد حالت اول (Hz)	نیاز رانش بین طبقه‌ای	رانش بین طبقه‌ای مجاز	وضعیت	نیاز شتاب (milli g)	شتاب مجاز (milli g)	وضعیت
لوله تنها	۰/۰۷۵	۰/۰۰۴۳	۰/۰۰۲	نامطلوب	۲۵/۳	۲۰/۰	نامطلوب
لوله در لوله	۰/۰۸۲	۰/۰۰۳۴	۰/۰۰۲	نامطلوب	۲۳/۶	۲۰/۰	نامطلوب
لوله در لوله با هسته داخلی	۰/۰۹۷	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۲	نامطلوب	۲۱/۱	۲۰/۰	نامطلوب
لوله در لوله با کلاهک خریابی	۰/۰۸۵	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۲	نامطلوب	۲۳/۱	۲۰/۰	نامطلوب
لوله مهاربندی شده	۰/۱۱۶	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۲	مطلوب	۱۸/۴	۲۰/۰	مطلوب
لوله بسته شده	۰/۰۰۹	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۲	نامطلوب	۲۱/۹	۲۰/۰	نامطلوب



مهاربندی شده باعث شد تا شکل تغییر شکل از حالت برشی (مخصوص قاب‌های خمشی) به حالت تغییر

شکل خمشی - برشی (مخصوص قاب مهاربندی شده به همراه یک نقطه عطف) تغییر یابد. همچنین در تمامی مدل‌ها اندیس رانش بین طبقه‌ای کاهش یافت اما بهترین گزینه لوله مهاربندی شده برآورد شد به شکلی که با استفاده از این سیستم اندیس رانش طبقه‌ای در تمام طبقات کمتر از معیار مجاز آیین نامه (در این تحقیق  $0/02$  بر اساس معیار راحتی و آسایش ASCE7-10) بدست آمد. از طرفی به کمک این سیستم، نرخ تغییرات اندیس رانش طبقه‌ای یکنواخت گزارش شد.

ضریب تاخیر برشی (لنگی برشی) نیز با تقویت لوله تنها در تمامی موارد کاهش یافت. بیش‌ترین تاثیر مربوط به سیستم لوله دسته شده و کم‌ترین تاثیر سیستم لوله در لوله است. از طرفی در تمامی مدل‌ها پدیده تاخیر برشی معکوس مشاهده شد. منظور از این پدیده افزایش سهم ستون‌های میانی از نیروی محوری نسبت به ستون‌های کناری است. همچنین در تمامی مدل‌ها در میانه ارتفاع سازه (نزدیک طبقه ۳۱)، ضریب تاخیر برشی برای تمامی ستون‌های مستقر در بال کششی یکسان و نزدیک به ۱ برآورد شد و این طبقه به‌عنوان نقطه آغاز تاخیر برشی معکوس تعریف شد. از نظر درصد جذب برش، نتایج نشان داد که در سیستم لوله در لوله سهم عمده برش به لوله خارجی می‌رسد. در حالی - که اگر هسته داخلی از طریق استفاده از مهاربند ضربداری به سیستم لوله در لوله اضافه شود، در طبقات پایین سازه هسته داخلی (تا طبقه ۱۰) و در طبقات بالایی لوله خارجی سهم بیشتری از برش طبقه‌ای را به خود می‌گیرد. در لوله مهاربندی شده نیز بیش‌ترین درصد جذب برش به مهاربندها اختصاص یافت و در جایگاه دوم هسته خارجی قرار گرفت. نکته قابل ذکر اینکه در طبقاتی که محل تقاطع ابرمهاربندهای ضربداری (حد فاصل محل تقاطع مهاربندی ۶ طبقه) بیش‌ترین نیروی برشی توسط مهاربند جذب شد. در شکل سازه‌ای لوله دسته شده، بیش‌ترین درصد جذب برش مربوط به لوله‌های گوشه بوده و تا ارتفاع میانی سازه، لوله‌های کناری در جایگاه دوم قرار دارند. در طبقات بالایی، سهم جذب برش لوله میانی از لوله‌های کناری پیشی گرفت. در تمامی شکل‌های سازه‌ای در مقایسه با لوله تنها، زمان تناوب ارتعاشی کاهش یافت که بیش‌ترین درصد کاهش برای لوله مهاربندی شده برآورد شد در مقابل کم‌ترین تغییر در زمان تناوب به سیستم لوله در لوله تعلق یافت. تغییر در زمان تناوب اصلی، در فرایند تحلیل دینامیکی طیفی و محاسبه شتاب طیفی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است بخصوص زمانی که زمان تناوب سازه در ناحیه نزولی طیف طراحی قرار گرفته باشد. این موضوع سبب افزایش نیروی جانبی زلزله می‌شود.

در نهایت بیشینه رانش و شتاب طبقه بام بر اساس روابط ASCE7-10 برای کلیه سازه‌ها محاسبه شد. نتایج نشان داد که تنها سازه با سیستم لوله مهاربندی شده "معیار رفاه و راحتی ساکنین را برآورده نموده است.

تحقیقات نگارندگان این پژوهش موید این موضوع است که کنترل بیشینه رانش و شتاب طبقه بام در تحقیقات پیشین نبوده است.

## ۱۱- تقدیر و تشکر

بدینوسیله نگارندگان مقاله از سرکار خانم مهندس یوسفی حاجیوند که زحمت مطالعه مقاله و اصلاح اشکالات نگارشی و ویرایشی را تقبل نموده و با ارایه نقطه نظرات خویش باعث بهبود کیفیت کار شدند، تقدیر و تشکر می‌نمایند.

## ۱۲- مراجع

- [۱] ظهیری هاشمی، ر.، "بررسی رفتار لرزه ای سازه های بلند لوله ای بادبندی شده"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشگاه سمنان، ۱۳۸۶.
- [۲] مشهدی علی، ن.، "بررسی رفتار ساختمان های بلند با سیستم شبکه قطری"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشگاه سمنان، ۱۳۸۹.
- [۳] جمشیدی، ح.، "بررسی لرزه ای سیستم لوله ای دسته بندی شده در ساختمان های بلند"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشگاه سمنان، ۱۳۸۸.
- [۴] کاظمی نیا کرانی ح. ر.، خشنودیان، ف.، "رفتار لرزه ای سازه های بلند و رفع مشکل تاخیر برشی در این سازه ها"، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۹.
- [۵] خیرالدین، ع.، جمشیدی، ح.، "بررسی سیستمهای مقاوم سازه ای در ساختمانهای بلند"، کنفرانس ملی مقاوم سازی، یزد، ۱۳۸۷.
- [۶] عرب زاده، ا.، اسماعیلی، م. م.، "رفتار سازه لوله ای مهاربندی شده در سازه های بلند تحت اثر نیروی زلزله"، ششمین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۲.
- [۷] ابوالفضل عرب زاده، ا.، اسماعیلی، م. م.، "بررسی رفتار سازه لوله ای مهاربندی شده در ساختمان های بلند تحت اثر نیروی زلزله"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۰.
- [۸] صفری فروشان، ع.، "بررسی رفتار بهینه سیستم braced Tube در ساختمان های بلند فولادی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سمنان، ۱۳۹۰.
- [۹] خیرالدین، ع.، آرامش، س.، "سیستمهای مقاوم سازه ای در ساختمان های بلند"، انتشارات دانشگاه سمنان، چاپ اول، ۱۳۹۱.
- [10] Mir Ali, M., Moon, K.S., "Structural developments in tall buildings: current trends and future prospects", Architectural Science Review Volume 50.3, 205-223.
- [11] Moon, K.S., "Material- saving design strategies for tall building structures", school of Architecture, university of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana-Champaign, IL61820, USA.
- [12] Moon, K.S., "Dynamic interrelationship between technology and architecture in tall buildings", Thesis (PhD) Massachusetts Institute of Technology, 2005.
- [13] Moon, K.S., "Stiffness- based design methodology for steel braced tube structures: A sustainable approach", 2010.



- [18] Liu, X. Zhao, H. H. Sun, Y. M. Zheng N. X., and J. M. DING., "Structural performance assessment and control of super tall buildings during construction", The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Procedia Engineering, 14, 2503–2510, 2011.
- [19] X. L. Lu, H. J. Jiang," Research and practice of response control for tall buildings in Mainland China" , Procedia Engineering, 14, 73–8, 2011.
- [20] Spence S.M.J., Gioffre. M., "Efficient algorithms for the reliability optimization of tall buildings", J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 99, 691–699, 2011.
- [21] Kheyroddin,A. and Zahiri-Hashemi,R. "Investigation of the shear lag behavior in braced tubular structures", CSCE2008, Annual Conference, June10-13, 2008.
- [22] ASCE7-10, "Minimum design loads for buildings and other structures", American Society of Civil Engineer, 2010
- [14] Rahgozar R., Ahmadi A.R., Sharifi Y.," A simple mathematical model for approximate analysis of tall buildings", Applied Mathematical Modelling, 34, 2437–2451, 2010.
- [15] Kamgar R., Saadatpour M.M.," A simple mathematical model for free vibration analysis of combined system consisting of framed tube, shear core, belt truss and outrigger system with geometrical discontinuities", Applied Mathematical Modelling, 2011.
- [16] Malekinejad M., Rahgozar M.R., "A simple analytic method for computing the natural frequencies and mode shapes of tall buildings", Applied Mathematical Modelling, 36 , 3419–3432, 2012.
- [17] Wang W, Chen Y., Dong B., and T. Leon R., "Experimental behavior of transfer story connections for high-rise SRC structures under seismic loading", Earthquake Engng Struct. Dyn. 40:961–975, 2011.