

کاهش تاخیر برشی و بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌های لوله‌ای

حامد فرهنگیان^۱، حمزه شکیب^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

* SHAKIB@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۸/۸/۱۷

تاریخ دریافت: ۹۸/۱/۱۷

چکیده

ستون‌های نزدیک به هم و تیرهای عمیقی که در محیط سیستم‌های لوله‌ای (قاب محیطی) یکپارچه شده‌اند، در ساختمان‌های بلند صلبیت و پایداری مناسبی تامین می‌کنند. استفاده از سیستم لوله‌ای موجب کاهش قابل توجه در مصالح مصرفی و فاصله زیاد ستون‌ها در فضای داخلی پلان می‌شود. موارد مزبور محبوبیت استفاده از این نوع سیستم سازه‌ای را بالا برده است. اما مهمترین مسأله در این نوع سیستم سازه‌ای، بوجود آمدن تاخیر برشی، تحت اثر بارهای جانبی است. تاخیر برشی موجب توزیع غیریکنواخت تنش در ستون‌های پیرامونی سازه و به دنبال آن افزایش تغییر مکان‌های سازه، محدود نمودن استفاده از بیشینه ظرفیت سازه و ایجاد اعوجاج کف‌ها می‌شود. پژوهشگران برای کاهش آثار تاخیر برشی، روش‌های مختلفی ارائه کرده‌اند که هیچکدام قادر به حذف کامل آثار تاخیر برشی نیستند. هدف این پژوهش شامل شناخت چگونگی اثرگذاری تاخیر برشی بر سازه‌های لوله‌ای و ارائه روشی جدید برای کاهش آن با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی است. با توجه به روند بوجود آمدن و چگونگی اثرگذاری تاخیر برشی در سازه‌های لوله‌ای، روش افزودن مهاربند به طبقاتی که دارای بیشترین آثار تاخیر برشی هستند، برای کاهش آثار تاخیر برشی ارائه شده است. روش پیشنهاد شده به همراه سیستم لوله‌ای تحت اثر زلزله‌های با سطوح عملکردی مختلف تحلیل شده و از نظر اهداف عملکردی بررسی شده‌اند. در تمام تحلیل‌ها و ارزیابی‌های انجام شده در این پژوهش، عملکرد و رفتار سیستم‌های پیشنهادی، بهتر از سازه لوله‌ای بوده است. میزان کاهش تاخیر برشی در سازه پیشنهادی برای زلزله‌های مختلف سطح شدید MCE_R (Risk Targeted Maximum Considered Earthquake)، بین ۱۴ تا ۴۲ درصد و برای زلزله‌های مختلف سطح بهره‌برداری SLE (Serviceability Level Earthquake)، ۳ تا ۳۵ درصد بوده است که نشان دهنده عملکرد مطلوب سازه پیشنهادی تحت اثر زلزله‌های با سطوح عملکردی مختلف است.

واژگان کلیدی: ساختمان‌های بلند، سیستم قاب محیطی، تاخیر برشی، تحلیل و طراحی بر اساس اهداف عملکردی، دستورالعمل لس‌آنجلس (LATBSCD).

۱-مقدمه

توجهی در افزایش ساختمان‌های بلند داشت. بلندی ساختمان، حالتی نسبی است و ساختمان‌ها را نمی‌توان بر حسب ارتفاع و یا تعداد طبقه دسته بندی و تعریف نمود [۱]. اما آیین‌نامه‌ها برای جداکردن ساختمان‌های بلند از ساختمان‌های کوتاه، ناچار به ارائه

پیشرفت تکنولوژی ساخت، نقش بسیار مهمی در توسعه ساختمان‌های بلند ایفا می‌کند. به گونه‌ای که در اواخر قرن نوزدهم با اختراع آسانسور و دسترسی آسان به طبقات بالا، نقش قابل

تشکیل می‌شود که با اتصالات صلب به یکدیگر متصل هستند (مثل قاب ویراندیل) و ستون‌های میانی فقط بارهای ثقیلی را تحمل می‌کنند. هنگامیکه سیستم لوله‌ای تحت اثر بار جانبی قرار می‌گیرد، تنش در ستون‌های پیرامونی بصورت غیر یکنواخت توزیع می‌شود؛ به گونه‌ای که تنش در ستون‌های گوشه بزرگ‌تر از تنش در ستون‌های میانی می‌شود. توزیع غیریکنواخت تنش در ستون‌های پیرامونی سیستم‌های لوله‌ای، تاخیر برشی نامیده می‌شود. سیستم لوله‌ای در ساختمان‌های بلند، علاوه بر تأمین صلبیت و پایداری مناسب، موجب کاهش قابل توجه مصالح مصرفی نیز می‌شود که محبوبیت این سیستم را در میان طراحان افزایش داده است. اما تاخیر برشی بوجود آمده، موجب توزیع غیریکنواخت تنش در ستون‌های پیرامونی سازه و به دنبال آن افزایش تغییر مکان‌های جانبی سازه، محدود نمودن استفاده از بیشینه ظرفیت سازه و ایجاد اعوجاج کف‌ها می‌شود. علی و مون در سال ۲۰۰۷ در آخرین دسته‌بندی، سازه‌های لوله‌ای را به ۴ دسته، تقسیم‌بندی کردند که شامل سیستم لوله‌ای، لوله مهاربندی شده (آبر مهاربند)، گروه لوله ۳ (لوله دسته‌بندی شده) و لوله در لوله؛ است [5]. فضلورخان (پدر ساختمان‌های لوله‌ای) در سال ۱۹۶۱ برای اولین بار ساختمان‌های با سیستم لوله‌ای را مطرح [6] و اولین ساختمان بلندمرتبه با سیستم لوله‌ای را در سال ۱۹۶۳ طراحی کرد. نخستین ساختمانی که با سیستم لوله‌ای طراحی و به اجرا درآمد، ساختمان ۴۳ طبقه دویت-چست‌نات (با ارتفاع ۱۱۶ متر) در شیکاگو بود [7]. با ابداع سیستم‌های لوله‌ای، پدیده تاخیر برشی نیز در تحلیل‌ها مشاهده شد اما بررسی دقیق نشد. پدیده تاخیر برشی در مهندسی ساختمان، با توسعه پل‌های صندوقه‌ای در حدود سال‌های ۱۹۷۰ مورد توجه جدی قرار گرفت. مفات و داوولینگ (۱۹۷۵) و همچنین کازمانویچ و گراهام (۱۹۸۱)، تاخیر برشی را در مقاطع قوطی فولادی مطالعه کردند. فوج و چانگ (۱۹۸۲) رفتار غیر طبیعی، ناشی از تاخیر برشی را در تیر کنسولی با مقطع قوطی مشاهده کردند. آن‌ها متوجه شدند که در ناحیه فراتر از حدود یک چهارم انتهای طول طره (یا سه چهارم طولی که آزاد است)، تنش در بال‌های مقطع بگونه‌ای است که در گوشه‌ها، کوچک‌تر از قسمت

معیار هستند. دستورالعمل لس‌آنجلس (LATBSDC 2017)، ساختمان‌هایی که دارای ارتفاعی بیشتر از ۱۶۰ فوت (۴۸/۸ متر) از سطح زمین مجاور باشند، ساختمان بلند معرفی می‌کند [2]. همچنین مطابق آیین‌نامه CTBUH، ساختمان‌های بلندتر از ۱۴ طبقه و یا ۵۰ متر ارتفاع، به عنوان ساختمان بلند معرفی می‌شوند [3]. سیستم‌های سازه‌ای مورد استفاده در ساختمان‌های بلند، با گذشت زمان و معرفی سیستم‌های جدید، تغییر کرده است. رایج‌ترین سیستم‌های سازه‌ای در ساختمان‌های بلند از گذشته تا کنون، شامل یکی یا ترکیبی از سیستم‌های زیر است: قاب خمشی، هسته، دیوار برشی، سیستم دوگانه، شبکه قطری، آبر هسته، قاب با مهار بازویی و سیستم لوله‌ای ۲ (قاب محیطی). از نظر اقتصادی و مؤثر بودن، بیشینه تعداد طبقاتی که با سیستم‌های سازه‌ای مزبور می‌توان ساخت، در شکل (۱) نشان داده شده است. در حال حاضر بلندترین ساختمان‌های دنیا از دو سیستم لوله‌ای و قاب با مهار بازویی ساخته شده‌اند؛ که نشان دهنده کفایت این سیستم‌ها در ساختمان‌های بلند است. تحقیق حاضر با توجه به اهمیت سازه‌های لوله‌ای در ساختمان‌های بلند، به این نوع سیستم‌های سازه‌ای و ارائه راهکاری برای کاهش نقاط ضعف آن‌ها می‌پردازد.

شکل ۱. حداکثر تعداد طبقات مفید سیستم‌های سازه‌ای در ساختمان‌های بلند [4]

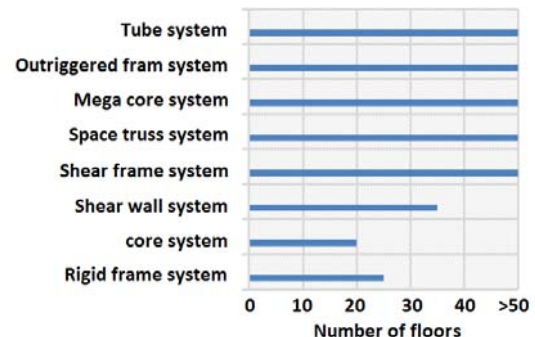


Fig. 1. Maximum number of efficient floors for tall building structural systems [4].

۲- تاخیر برشی در سیستم لوله‌ای

سیستم‌های لوله‌ای مشابه یک ستون باکس شکل توخالی که در زمین گیردار شده است رفتار می‌کنند. این نوع سیستم، تکامل یافته سیستم قاب خمشی است که قاب‌ها در چهار وجه به هم متصل شده و توانایی مقاومت در برابر تمام بارهای جانبی را دارند. سیستم لوله‌ای از شبکه‌ای از تیر و ستون‌های نزدیک به هم در محیط پلان

میانی بال است. این رفتار برعکس تاخیر برشی مثبت بود؛ بنابراین تاخیر برشی منفی نامیده شد. از آن پس تلاش‌های قابل توجهی برای شناسایی این پدیده، توسط فوج و چانگ در سال ۱۹۸۲، چانگ و ژن در سال ۱۹۸۷ و همچنین شوشکویچ در سال ۱۹۹۱ انجام گرفت. چانگ و ژن (۱۹۸۷) با استفاده از روش اجزاء محدود، روابطی را برای محاسبه توزیع تنش و تاخیر برشی در تیرهای طره‌ای با مقاطع باکس با عمق ثابت، تعیین کردند [8].

تاخیر برشی منفی در ساختمان‌های با سیستم لوله‌ای نیز، در سال‌های ۱۹۸۲ توسط چانگ و ۱۹۹۱ توسط کانار و پوانگار مشاهده شد؛ اما مورد بررسی و تشریح واقع نشد. کانار و پوانگار (۱۹۹۱) روش ساده‌ای را برای تحلیل و طراحی مقاطع اولیه در سازه‌های لوله‌ای ارائه کردند [9]. کریستک و بائور (۱۹۹۳) روشی را برای تحلیل دستی و تعیین توزیع تنش در ستون‌ها و اتصالات تیرها در سازه‌های بلند ارائه کردند [10]. سینگ و ناگپال (۱۹۹۴) به مطالعه تاخیر برشی در سازه‌های لوله‌ای پرداختند. کوان (۱۹۹۶)، هان و همکاران (۲۰۰۰) و سئو و همکاران (۲۰۰۰) به مطالعه تاخیر برشی در هسته‌های دیوار برشی پرداختند. سینگ و ناگپال (۱۹۹۴) نشان دادند که تغییرات نسبت ابعاد پلان ساختمان، تاثیر قابل ملاحظه‌ای در آثار تاخیر برشی در سازه‌های لوله‌ای ندارد. سینگ و ناگپال ملاحظه کردند که تاخیر برشی مثبت در طبقات پایین و تاخیر برشی منفی در طبقات بالایی سازه‌های لوله‌ای بوجود می‌آید و تاخیر برشی بوجود آمده در طبقات پایین، بزرگ‌تر و بحرانی‌تر از طبقات بالایی است. همچنین اثبات کردند که با افزایش تاخیر برشی در طبقات پایین، تاخیر برشی در طبقات بالا نیز افزایش می‌یابد و با کاهش تاخیر برشی در طبقات پایین، تاخیر برشی در طبقات بالا نیز کاهش می‌یابد. سینگ و ناگپال با افزایش سختی تیرهای پیرامونی، کاهش تاخیر برشی را در سازه‌های لوله‌ای ملاحظه کردند [11].

کازمی‌نیا و خشنودیان (۲۰۱۰) با کاهش فاصله بین ستون‌های پیرامونی در سازه لوله‌ای ۲۰ طبقه، نشان دادند که با کاهش فاصله ستون‌ها از ۴ متر به ۱ متر، نسبت تنش محوری ستون گوشه به ستون میانی، ۰/۴۶ برابر می‌شود [12]. نادرپور و خیرالدین (۲۰۱۱) با افزایش ابعاد ستون‌های پیرامونی نیز نتیجه گرفتند که افزایش ابعاد

ستون‌های پیرامونی تاثیر ناچیزی در کاهش تاخیر برشی در سازه‌های لوله‌ای دارد. همچنین با افزایش سختی تیرهای پیرامونی، ملاحظه کردند که این روش در کاهش تاخیر برشی نسبت به روش قبلی مناسب‌تر بوده و تاثیر بیشتری در کاهش تاخیر برشی دارد [13]. افسون و رهگذر (۲۰۱۳) با افزودن دیوار برشی‌های متقارن به ۴ دهانه از دهانه‌های میانی در پیرامون سازه لوله‌ای، ملاحظه کردند که میزان کاهش تاخیر برشی نسبت به سازه لوله‌ای کمتر از ۵ درصد بوده است [14]. بنابراین روش مزبور نیز نمی‌تواند روش مناسبی برای کاهش تاخیر برشی در سازه‌های لوله‌ای باشد. بیرقی و خیرالدین (۲۰۱۳) با مقایسه سازه لوله‌ای و سازه گروه لوله در یک ساختمان ۸۰ طبقه، به این نتیجه رسیدند که در سازه گروه لوله، تاخیر برشی تا حدود ۵۰ درصد نسبت به سازه لوله‌ای کاهش پیدا کرده است [15].

با توجه به کاهش کارایی سازه‌های لوله‌ای بر اثر تاخیر برشی، سازه‌های لوله‌ای توسعه و سیستم‌های مختلفی (شامل گروه لوله و لوله با آبر مهاربند) ارائه شدند. اگرچه روش‌های ارائه شده تا حدی آثار تاخیر برشی را کاهش و میزان کارایی سازه را افزایش می‌دهند؛ اما موجب افزایش قابل ملاحظه هزینه‌های ساخت می‌شوند. این پژوهش پس از شناخت دقیق تاخیر برشی و چگونگی اثرگذاری آن بر سازه‌های لوله‌ای، به دنبال روشی برای کاهش تاخیر برشی با توجه به شکل اثرگذاری تاخیر برشی است. روش ارائه شده علاوه بر کاهش تاخیر برشی، منجر به کاهش هزینه‌های ساخت و تسریع در اجرای سازه‌های لوله‌ای می‌شود.

۳- مبانی تحلیل و طراحی عملکردی بر اساس دستورالعمل لس‌آنجلس (LATBSDC)

با توجه به اینکه در این پژوهش، تحلیل و طراحی سازه‌های لوله‌ای بر اساس دستورالعمل لس‌آنجلس [2] انجام شده، بنابراین مبانی تحلیل و طراحی مربوط به دستورالعمل مزبور در این بخش بطور خلاصه ارائه می‌شود. هدف دستورالعمل لس‌آنجلس، تحلیل و طراحی بر اساس اهداف عملکردی ساختمان‌های بلند، برای کسب اطمینان از عملکرد و همچنین پیش‌بینی عملکرد سازه در هنگام زلزله است. بنابراین تحلیل و طراحی ساختمان در سه مرحله انجام

می‌شود:

الف) رفتار غیر ارتجاعی اعضا به درستی تعریف شود. در تمام اعضای طراحی شده، ظرفیت بیشتر از نیاز باشد. این بند در واقع رویکرد طراحی براساس ظرفیت^۱ است.

ب) اعضای سازه‌ای و غیرسازه‌ای پس از زلزله سطح بهره‌برداری^۲ (SLE)، قابل بهره‌برداری باشند.

پ) ساختمان تحت اثر زلزله شدید (MCE^۳)، در سطح فروریزش با احتمال کم (احتمال ۱۰٪ یا کمتر) قرار بگیرد.

زلزله بهره‌برداری، زلزله‌ای است که احتمال فراگذشت آن در ۳۰ سال ۵۰ درصد باشد. دوره بازگشت این زلزله ۴۳ سال است. هدف از این ارزیابی، آن است که اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای، قابلیت بهره‌برداری خود را در حین و بعد از زلزله حفظ کنند و چنانچه تعمیراتی لازم باشد، انتظار می‌رود که این تعمیرات کم باشند و بهره‌برداری ساختمان را مختل نکنند. تحت زلزله بهره‌برداری، رفتار اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای باید در ناحیه ارتجاعی باقی بماند. زلزله‌های نادر نیز باید از زلزله با بیشترین خطر (MCE_R) که در ASCE 7-16 موجود است، استخراج شود. این ارزیابی باید با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی بر روی مدل سه بُعدی سازه انجام شود. ساختمان تحت اثر زلزله MCE_R، در آستانه فروریزش با احتمال کم قرار می‌گیرد. ارزیابی نیازها شامل اعضای سازه‌ای مقاوم در برابر بار جانبی و همچنین سایر اعضای سازه‌ای مثل ستون‌های میانی در پلان سازه لوله‌ای که فقط باربر ثقیلی هستند، می‌شود [2].

۴- معرفی سازه و سایت مورد مطالعه

در این پژوهش از سازه ۳۰ طبقه فولادی با ابعاد پلان ۲۴ در ۲۴ متر استفاده شده است. ارتفاع هر طبقه ۳/۶ متر و پلان بصورت منظم با ۳ دهانه ۸ متری داخلی و ۱۲ دهانه ۲ متری پیرامونی در هر دو راستا برای سازه در نظر گرفته شده است. علت انتخاب ابعاد مزبور این است که (طبق تعریف کلاسیک اگر نسبت ارتفاع به قطر دایره محیطی سازه بزرگتر از π باشد، سازه بلند نامیده می‌شود و طبق دستورالعمل لس‌آنجلس LATBSDC-2017 [2] سازه‌های بلندتر از ۴۸/۸ متر) سازه در دسته سازه‌های بلند قرار بگیرد. در شکل (۲)

پلان و نمای سه بُعدی سازه نشان داده شده است. فولاد استفاده شده، از نوع ST52 است و مشخصات آن در جدول (۱) نشان داده شده است. بارگذاری ثقیلی سازه برای کاربری اداری در جدول (۲) نشان داده شده است. سایت در نظر گرفته شده، شهر تهران با خاک نوع B بوده که با توجه به شباهت لرزه‌خیزی شهر تهران به شهر هیلو در ایالت هاوایی و شباهت طیف طرح این دو شهر، از پارامترهای لرزه‌ای شهر هیلو در ایالت هاوایی برای تعیین طیف طرح طبق آیین-نامه 7-16 ASCE استفاده شده است.

شکل ۲. پلان سازه و نمای سه بُعدی سازه ۳۰ طبقه

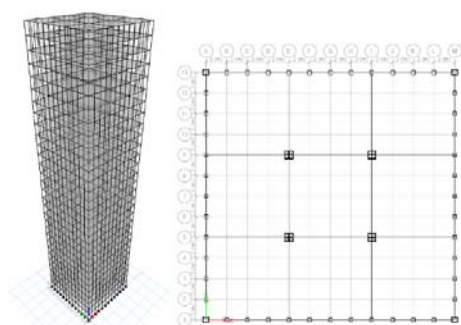


Fig. 2. Plan and 3D view of 30 story structure.

جدول ۱. مشخصات مصالح فولادی

Steel properties	Value
Weight per volume ($\frac{kg}{m^3}$)	7850
Modulus of elasticity ($\frac{kg}{cm^2}$)	2100000
Poisson's ratio	0.3
Yield stress F_y ($\frac{kg}{cm^2}$)	3600
Ultimate stress F_u ($\frac{kg}{cm^2}$)	5200

Table 1. Steel properties

جدول ۲. خلاصه بارگذاری ثقیلی

Type of load	Load
Dead load of floors ($\frac{kg}{m^2}$)	500
Equal load of internal partitions ($\frac{kg}{m^2}$)	100
External partitions ($\frac{kg}{m^2}$)	500
Live load of floors ($\frac{kg}{m^2}$)	250

Table 2. Gravity loads.

۴-۱- مدلسازی

در این پژوهش ابتدا تحلیل و طراحی بر اساس ظرفیت، در نرم افزار ETABS [16] انجام شده و مقاطع سازه تعیین شده‌اند. سپس برای انجام تحلیل‌های با اهداف عملکردی، سازه به صورت ۳ بعدی در نرم‌افزار Open SEES [17] مدلسازی شده است. شایان ذکر است که در طراحی اولیه، تمام ضوابط آیین‌نامه‌ای برای اعضا و تمام ضوابط لرزه‌ای مانند ضابطه ستون قوی-تیر ضعیف و کنترل جابه‌جایی‌های نسبی لحاظ شده است. شکل مودهای اول و دوم به صورت انتقالی و شکل مود سوم به صورت پیچشی است.

در نرم‌افزار Open SEES [17] تمام اعضا از مقطع فایبر (الیافی) ساخته شده است. در روش فایبر، مقطع به ناحیه‌های مختلفی تقسیم می‌شود. به هر ناحیه، رابطه تنش-کرنش مخصوص اختصاص داده می‌شود. رابطه نیرو-تغییر مکان مقطع نیز با انتگرال‌گیری از رابطه تنش-کرنش تمام ناحیه‌های مقطع بدست می‌آید. با استفاده از روش مزبور می‌توان شکل‌گیری رفتار حالت خمیری در برخی از نواحی مقطع را مشابه آنچه که در رفتار واقعی اعضا بوجود می‌آید، بر اساس دوران کلی مقطع، مدلسازی کرد. مقاطع تعریف شده به این روش، در تعریف المان تیر-ستون غیرخطی مبتنی بر جابه‌جایی استفاده شده است. اثر $P-\Delta$ نیز در مدلسازی، در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است که تمام نکات مربوط به مدلسازی و تحلیل سازه‌های بلند مطابق دستورالعمل لس‌آنجلس (LATBSDC)، رعایت شده است.

در این پژوهش برای مدلسازی تیرها و ستون‌ها از مصالح Steel01 و سه المان با پنج نقطه انتگرال‌گیری در طول هر المان استفاده شده است. مصالح Steel01 یک رفتار دوخطی متقارن را معرفی می‌کند که کاربرد اصلی آن در معرفی فولاد است. شیب قسمت پلاستیک برابر ۳٪ قسمت ارتجاعی در نظر گرفته شده است. پس از معرفی مقاطع و پیش از معرفی المان‌های تیر-ستون، دستورات انتقال هندسی تعیین و معرفی شده‌اند. دستور انتقال هندسی، سه وظیفه بر عهده دارد که شامل اعمال اثر $P-\Delta$ ، اضافه کردن نواحی صلب به ابتدا و انتهای المان‌ها و معرفی محورهای محلی است. المان‌های تیر-ستون با استفاده از المان Disp Beam Column تعریف شده‌اند که المان تیر-ستون غیرخطی بر اساس روابط جابه‌جایی است. بار ثقلی مرده و زنده به صورت بار گسترده

روی تیرها قرار گرفته است. جرم سازه برابر با بار مرده به علاوه ۲۰٪ از بار زنده در نظر گرفته شده است.

میرایی معیار مناسبی از توانایی سازه برای اتلاف انرژی و کاهش پاسخ ناشی از تحریک‌های دینامیکی مانند باد و زلزله است. میرایی ذاتی سازه، تابع عوامل مختلفی است. علاوه بر مصالح سازه، تعداد طبقات سازه نیز نقش مهمی در میرایی ذاتی سازه دارد [18]. آیین‌نامه ATC-72-2010 و پژوهش‌های انجام شده اخیر (کروز و میراندا ۲۰۱۶)، میرایی ساختمان‌های بلند، کمتر از ساختمان‌های کوتاه است و با افزایش ارتفاع سازه، میرایی مودهای اصلی سازه کاهش می‌یابد [19 و 20]. آیین‌نامه‌های موجود برای تحلیل‌های دینامیکی خطی، درصد میرایی را ارائه کرده‌اند. اما برای تحلیل‌های غیرخطی، به دلیل وجود میرایی‌های هیسترتیک باید درصد میرایی را با دقت بیشتری تعیین کرد. در تحلیل‌های غیرخطی، میرایی ذاتی سازه شامل ترکیبی از میرایی ویسکوز و هیسترتیک است. در این پژوهش برای مدلسازی میرایی ذاتی در تحلیل سازه‌ها، از روش میرایی رایلی استفاده می‌شود. برای این منظور، ابتدا باید فرکانس‌های متناظر با ارتعاشات مودی سازه محاسبه شود تا بتوان ضرایب میرایی سازه را بر اساس میرایی رایلی محاسبه کرد. میرایی سیستم با یک ترکیب خطی از ماتریس جرم و ماتریس سختی، مطابق رابطه (۱) بدست می‌آید.

$$C = \alpha M + \beta_1 K_{\text{initial}} + \beta_2 K_{\text{tangent}} + \beta_3 K_{\text{last-committed}} \quad (1)$$

که در آن α و β_i ضرایب ثابتی هستند. چارنی (۲۰۰۸) در مرجع [21] توصیه کرده که در حل مسائل غیرخطی، هنگام استفاده از میرایی رایلی، به بخش متناسب با سختی توجه ویژه‌ای شود. با توجه به امکان استفاده از ترم‌های میرایی متناسب با سختی‌های اولیه و تانژانتی، توصیه شده که از سختی تانژانتی استفاده شود. چنانچه ضرایب ثابت میرایی، با توجه به سختی اولیه استفاده شوند، بهتر است از فرکانس‌های کم استفاده شود. در این صورت میرایی محدودی برای مودهای پایین سازه پس از تسلیم سازه در نظر گرفته می‌شود. ضرایب ثابت میرایی به صورت زیر پیشنهاد شده‌اند:

$$\beta_1 = 0, \beta_2 = \frac{2(\xi_j \omega_{jN} - \xi_i \omega_{iN})}{(\omega_{jN}^2 - \omega_{iN}^2)}, \beta_3 = 0 \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{2\omega_{iN} \omega_{jN} (\xi_i \omega_{jN} - \xi_j \omega_{iN})}{(\omega_{jN}^2 - \omega_{iN}^2)} \quad (3)$$

۵- بررسی تاخیر برشی در سازه لوله‌ای تحت اثر بار جانبی یکنواخت

در این بخش بار جانبی یکنواخت ۲۳/۳ تن-نیرو به تمام طبقات اعمال شده و تنش محوری ستون‌های قاب بال و جان در طبقات ۱، ۷، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۳۰ به ترتیب در شکل (۴) نشان داده شده است. ستون‌هایی که در راستای بار جانبی قرار دارند، قاب جان و ستون‌هایی که عمود بر راستای بار جانبی هستند، قاب بال نامیده می‌شوند. با توجه به تقارن تنش‌ها در قاب بال و قاب جان و برای کاهش تعداد نمودارها و مشاهده همزمان توزیع تنش‌های قاب بال و قاب جان، توزیع تنش ستون‌های نصف قاب بال و نصف قاب جان در یک نمودار واحد، مشابه شکل (۴) ترسیم شده است. در شکل (۴)، محور قائم نشان دهنده توزیع تنش محوری در ستون‌ها و محور افقی نشان دهنده فاصله بین ستون‌ها است؛ که سمت چپ نمودار نشان دهنده توزیع تنش در نصف ستون‌های قاب بال و سمت راست، نشان دهنده توزیع تنش در نصف ستون‌های قاب جان است. ستون گوشه در مبدأ مختصات قرار گرفته است که ستون‌های سمت راست آن در قاب جان و ستون‌های سمت چپ آن در قاب بال هستند. همانطور که ملاحظه می‌شود، بیشینه تنش محوری در ستون گوشه بوجود آمده است. عدم یکنواختی تنش محوری ستون‌های قاب بال و قاب جان در نمودارهای شکل (۴)، نشان دهنده پدیده تاخیر برشی در سازه‌های لوله‌ای است. با توجه به نمودارهای مزبور، بیشینه تاخیر برشی در طبقات پایینی سازه بوجود می‌آید و در طبقات بالایی آثار تاخیر برشی کاهش پیدا می‌کند؛ تا جایی که در طبقات آخر، تاخیر برشی منفی بوجود می‌آید. همانطور که در شکل (۴) ملاحظه می‌شود، در طبقه ۲۴ تا ۳۰ تاخیر برشی منفی بوجود آمده است. تاخیر برشی منفی، عکس تاخیر برشی مثبت عمل می‌کند و موجب می‌شود تنش محوری در ستون‌های میانی از ستون‌های گوشه بیشتر شود.

۶- ارائه روشی جدید برای کاهش تاخیر برشی در سازه‌های لوله‌ای

بزرگ کردن مقاطع تیر و ستون و یا افزودن هسته یا چند لوله به سیستم لوله، فقط به دلیل کاهش آثار تاخیر برشی در سازه‌های بلند،

بر اساس دستور العمل لس‌آنجلس، پس از طرح سازه بر اساس ظرفیت، بایستی ارزیابی عملکردی نیز برای سازه انجام شود و در صورت نیاز، مقاطع تغییر داده شوند. برای انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی بر اساس دستورالعمل لس‌آنجلس از ۷ زوج رکورد (رکوردهای شماره ۱ تا ۷) و جدول (۳) برای سطح SLE و از ۱۱ زوج رکورد جدول (۳) برای سطح MCE_R استفاده شده است. رکوردهای انتخابی بر اساس سرعت موج برشی خاک، فاصله از گسل و بزرگای زلزله انتخاب شده‌اند. مشخصات ۱۱ شتاب‌نگاشت انتخابی در جدول (۳) آورده شده است. طیف‌های پاسخ برای سطوح مختلف در منطقه مورد نظر تعیین و در شکل (۳) نشان داده شده است. رکوردها قبل از انجام تحلیل برای سطوح مختلف مقیاس شده‌اند. پس از انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی در نرم‌افزار Open SEES، نتایج نشان می‌دهند که سازه برای تمام زلزله‌ها در سطوح MCE_R و SLE عملکرد قابل قبولی از خود نشان داده و معیارهای آیین‌نامه کنترل شده است.

جدول ۳ شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده در تحلیل‌های تاریخچه زمانی

Magnitude	PGA (g)	Event	No.
7.13	0.33	Hector Mine (1999)	1
7.37	0.51	Manjil, Iran (1990)	2
6.61	0.18	Tottori, Japan (2000)	3
6.61	0.23	Tottori, Japan (2000)	4
6.3	0.06	Chi-Chi, Taiwan-06 (1999)	5
7.62	0.51	Chi-Chi, Taiwan (1999)	6
6.19	0.12	Morgan Hill (1984)	7
6.9	0.23	Iwate, Japan (2008)	8
6.9	0.29	Iwate, Japan (2008)	9
6.9	0.09	Iwate, Japan (2008)	10
6.69	0.16	Northridge-01 (1994)	11

Table 3. Acceleration used in time-history dynamic analysis

شکل ۳. طیف پاسخ طرح و طیف پاسخ سطوح MCE_R و SLE

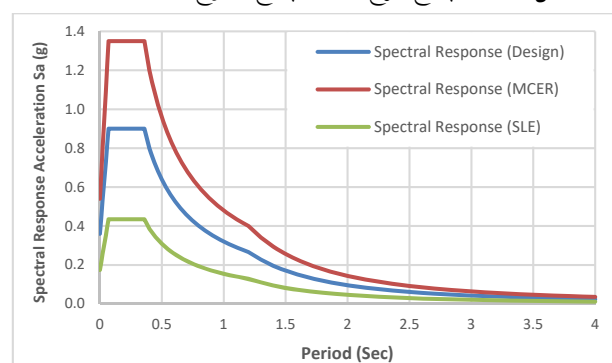


Fig. 3. Design, SLE and MCE_R spectrum.

هزینه‌های بسیار بالایی را به پروژه تحمیل خواهد کرد. روش‌های دیگر نیز به همین صورت موجب افزایش هزینه‌های ساخت خواهند شد. از طرفی مهندسین همواره به دنبال یافتن روش‌هایی با بهترین عملکرد و کمترین هزینه (حل مسئله به صورت بهینه) هستند. در این پژوهش پس از تعیین علت بوجود آمدن برش، نحوه کاهش آن با کمترین هزینه اقتصادی پیشنهاد شده است. علت بوجود آمدن تاخیر برشی و عدم یکنواختی توزیع تنش در ستون‌های پیرامونی سیستم‌های لوله‌ای، عدم توانایی انتقال برش سیستم لوله‌ای است. بنابراین به نظر می‌رسد برای کاهش آثار تاخیر برشی در سازه‌های لوله‌ای بایستی انتقال برش را ممکن کرد تا توزیع تنش در ستون‌های قاب، متعادل‌تر شود و آثار تاخیر برشی کاهش پیدا کند. بنابراین می‌توان مهاربندها را با روش‌های مختلف به سازه لوله‌ای، اضافه نمود. همان‌گونه که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، نسبت تنش گوشه به میانی در طبقه اول حدود ۱۰ است. در حالیکه در طبقه هفتم، این نسبت ۳/۳ برابر شده است. بنابراین این نسبت به اندازه ۶۷ درصد در طبقه هفتم کاهش یافته است. از طرفی توزیع تنش ستون‌های پیرامونی در طبقه هفتم به اندازه ۸۲ درصد نسبت به طبقه اول، یکنواخت‌تر و متعادل‌تر شده است. بنابراین در این پژوهش برای توسعه روش‌های کاهش تاخیر برشی، مهاربندهایی تا طبقه ششم به سازه لوله‌ای افزوده می‌شود. با توجه به علت‌های زیر، مهاربندها فقط به ۰/۲ ارتفاع سازه لوله‌ای (طبقه ششم) افزوده می‌شوند:

الف) در مطالعه سینگ و ناگپال [11]، با بررسی تاخیر برشی و نتایجی که ارائه کردند، در ۰/۲ تا ۰/۳ ارتفاع سازه، تاخیر برشی به مقدار زیادی کاهش می‌یابد. در سازه‌های بررسی شده این پژوهش نیز تا حدود ۰/۲ ارتفاع سازه، تاخیر برشی به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. میزان غیریکنواختی توزیع تنش محوری در ستون‌های پیرامونی، در طبقه هفتم (بالتر از ۰/۲ ارتفاع سازه) تا ۸۲ درصد نسبت به طبقه اول کاهش یافته است. همچنین نسبت تنش ستون گوشه به ستون میانی در طبقه هفتم به میزان ۶۷ درصد نسبت به طبقه اول کاهش یافته است. ب) یکی از مهمترین پارامترهای طراحی سازه‌های بلند، در نظر گرفتن جنبه‌های اقتصادی است. بنابراین باید مهاربندها تا

ارتفاعی از سازه ادامه داشته باشد که هم بیشترین عملکرد و هم کمترین هزینه را برای سازه داشته باشد. همان‌گونه که ذکر شد، در ۰/۲ ارتفاع سازه، تاخیر برشی به میزان قابل توجهی کاهش یافته است. بنابراین افزودن مهاربندها تا ۰/۲ ارتفاع سازه ادامه خواهد داشت.

یکی از روش‌های افزودن مهاربند که در این پژوهش انتخاب شده، افزودن مهاربندهای ضربدری در هر دو دهانه (2-bay X braced) به ۰/۲ ارتفاع سازه لوله‌ای است. منحنی توزیع تنش در سازه لوله‌ای و سازه لوله‌ای با مهاربند ضربدری در هر دو دهانه در شکل (۵) نشان داده شده است. در این شکل ملاحظه می‌شود که توزیع تنش در روش پیشنهادی، نسبت به سازه لوله‌ای متعادل‌تر شده است. میزان کاهش تاخیر برشی در این روش ۲۸/۵ درصد است. به عبارت دیگر توزیع تنش در ستون‌های پیرامونی به اندازه ۲۸/۵ درصد یکنواخت‌تر شده است. این روش علاوه بر اینکه تنش در ستون‌های گوشه را به مقدار زیادی کاهش می‌دهد (تا ۱۹ درصد کاهش)، تنش در ستون‌های میانی قاب بال و جان را نیز افزایش می‌دهد و در واقع در یکنواخت کردن و کاهش آثار تاخیر برشی بسیار مناسب عمل می‌کند. به عنوان نمونه در مقایسه با روش افزودن دیوار برشی‌های متقارن به ۴ دهانه از سازه بلند که هزینه بسیار زیادی را به پروژه تحمیل کرده و در مقابل کمتر از ۵ درصد تاخیر برشی را کاهش داده است [14]، روش افزودن مهاربند به ۰/۲ ارتفاع سازه، هزینه کمتری را به پروژه تحمیل کرده و مقدار زیادی از تاخیر برشی را کاهش داده است. بنابراین بصورت کلی می‌توان گفت روش پیشنهاد شده از نظر کاهش تاخیر برشی، عملکرد بسیار مناسبی دارد. در این بخش برای بررسی عملکرد افزودن مهاربند به ۰/۲ ارتفاع سازه لوله‌ای، تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی در سطوح MCE_R و SLE روی مدل ۳ بُعدی در نرم‌افزار Open SEES انجام می‌شود. با توجه به اینکه خسارت‌های سازه‌ای برای یک سازه در حال تسلیم شدن، ارتباط مستقیمی با تغییر مکان‌های طبقات سازه دارد، بنابراین کاهش تغییر مکان‌ها بسیار حائز اهمیت است. تحلیل‌ها نشان می‌دهد بیشترین جابه‌جایی نسبی سازه‌های لوله‌ای تحت اثر برخی از زلزله‌ها در طبقات پایین و در برخی دیگر در

شکل ۵. توزیع تنش در ستون‌های قاب بال و جان در سازه لوله‌ای و سازه لوله‌ای با مهاربند ضربدری در هر دو دهانه تحت بار متمرکز در بالاترین تراز سازه

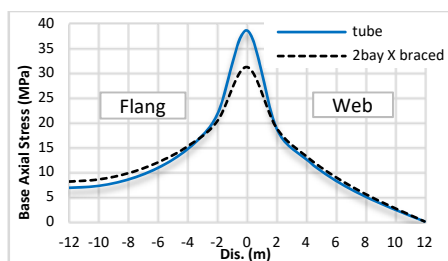


Fig. 5. Columns axial stress distribution of flange and web frames of the tubular system and tube with 2-bay X braces due to point load at the top.

۶-۱- بررسی معیار تغییر مکان جانبی بام نسبت به زمان

پس از انجام تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی در سطح MCE_R بر روی مدل ۳ بُعدی در نرم‌افزار Open SEES، نمودارهای حاصل از تغییر مکان‌های مرکز جرم بام نسبت به زمان در شکل (۶) ترسیم شده است. هدف از این بخش، تأثیر افزودن مهاربندها در 0.2 ارتفاع سازه لوله‌ای در جابه‌جایی‌های طبقه بام است. با توجه به اینکه در ساختمان‌های بلند، جابه‌جایی‌های طبقات فوقانی بسیار مهم می‌شوند، بنابراین در این بخش جابه‌جایی‌های طبقات فوقانی تحت اثر زلزله‌های مختلف بررسی می‌شوند. همان‌گونه که در نمودارهای شکل (۶) دیده می‌شود، افزودن مهاربندها به سازه لوله‌ای در تمام زلزله‌های اعمال شده، موجب کاهش تغییر مکان‌های بام در طول زمان و کاهش اکسترمم‌های نمودار شده است. همچنین افزودن مهاربندها به یک پنجم ارتفاع سازه لوله‌ای توانسته در زلزله‌هایی که جابه‌جایی‌های ماندگار در سازه لوله‌ای بوجود آمده، جابه‌جایی‌های ماندگار را کاهش دهد. بنابراین سیستم پیشنهادی در کاهش جابه‌جایی‌های بام نیز عملکرد مناسبی دارد.

۶-۲- بررسی تاخیر برشی سازه‌های لوله‌ای تحت اثر زلزله‌های با سطوح مختلف عملکردی

در این بخش سازه‌های لوله‌ای شامل سازه لوله‌ای 30 طبقه و سازه لوله‌ای مهاربندی شده در 0.2 ارتفاع، تحت اثر زلزله‌های سطوح SLE و MCE_R تحلیل شده و تاخیر برشی بوجود آمده در آن‌ها بررسی می‌شود. سازه‌های مزبور تحت اثر زلزله‌های سطوح SLE و MCE_R قرار گرفته و شش مورد از منحنی‌های

کاهش تاخیر برشی و بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌های لوله‌ای طبقات بالا بوجود آمده است. در زلزله‌هایی که بیشترین جابه‌جایی نسبی در طبقات پایین اتفاق افتاده، با افزودن مهاربند به 0.2 ارتفاع سازه، جابه‌جایی‌های نسبی تا حد قابل ملاحظه‌ای کاهش پیدا کرده اما در زلزله‌هایی که بیشترین جابه‌جایی نسبی در طبقات بالایی سازه اتفاق افتاده است، افزودن مهاربندها در جابه‌جایی‌های نسبی طبقات بالا تأثیر قابل ملاحظه‌ای ایجاد نکرده است.

شکل ۴. توزیع تنش در ستون‌های قاب‌های بال و جان در سازه لوله‌ای تحت اثر بار جانبی یکنواخت

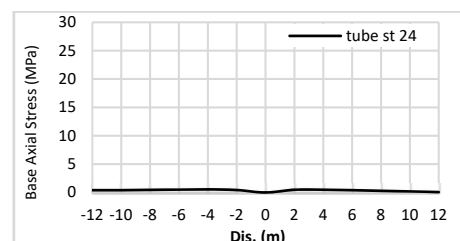
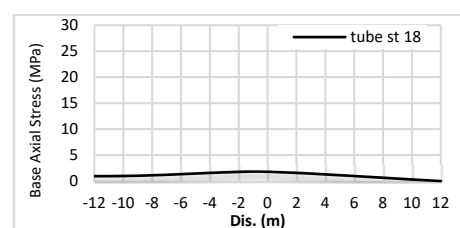
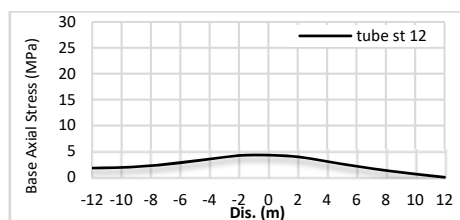
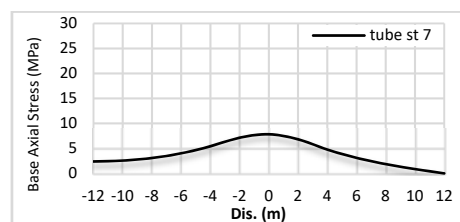
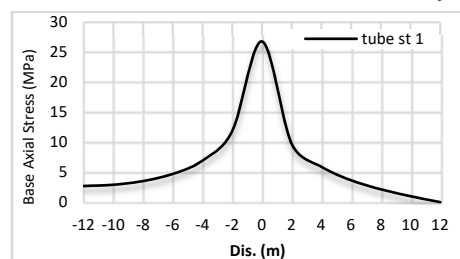


Fig. 4. Columns axial stress distribution of flange and web frames of the tubular system due to uniform load.

شکل ۶. تغییر مکان مرکز جرم بام نسبت به زمان در سازه لوله‌ای و سازه لوله‌ای با مهاربند در یک پنجم ارتفاع، تحت اثر زلزله‌های سطح MCE_R .

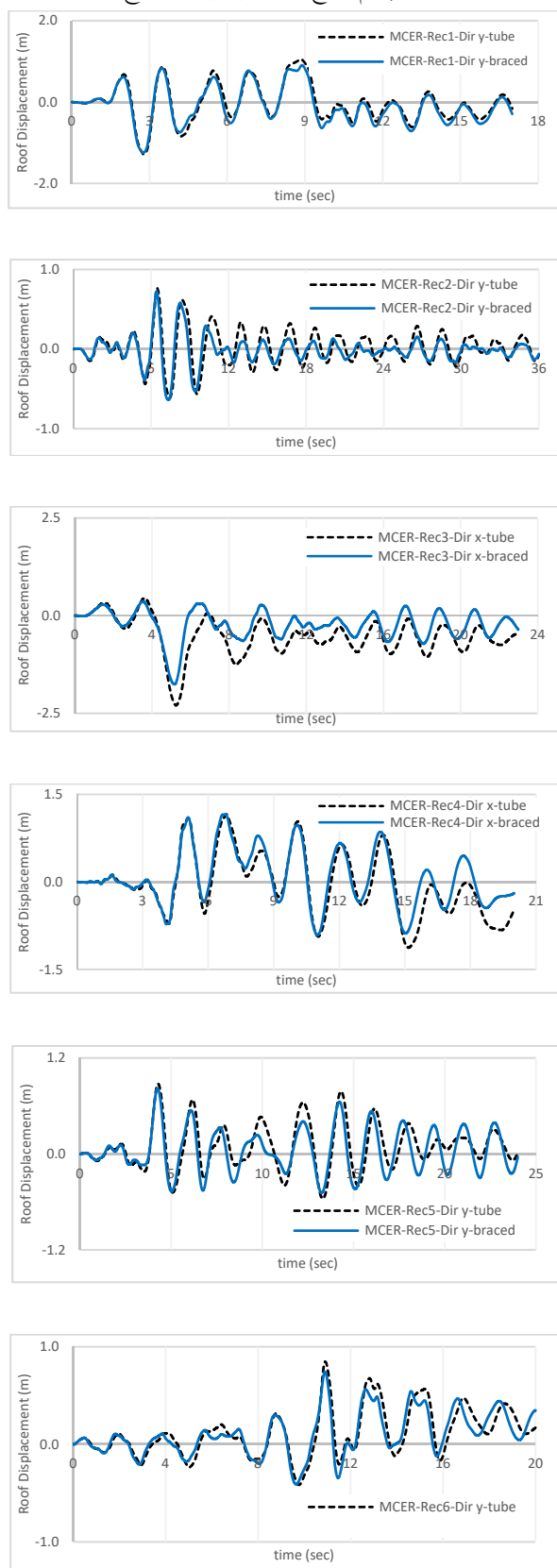


Fig. 6. Time history displacement of mass center of tubular system and 2-bay X-braced tube system due to MCE_R earthquakes.

تاخیر برشی مطابق شکل (۷) ترسیم شده است. این منحنی‌ها توزیع تنش محوری ستون‌های پیرامونی سازه، شامل قاب بال و قاب جان را در لحظه‌ای از زلزله که ستون‌های گوشه بیشترین تنش را تحمل می‌کنند، نشان می‌دهند. در این نمودارها، محور قائم نشان دهنده تنش محوری در ستون‌ها نسبت به ستون میانی در سازه است و محور افقی نیز نشان دهنده فاصله بین ستون‌ها است که ستون گوشه به عنوان مبدأ مختصات قرار گرفته و فاصله سایر ستون‌ها نسبت ستون گوشه درج شده است.

در جدول‌های (۴ و ۵) نسبت تنش در ستون‌های گوشه به ستون‌های میانی و همچنین میزان کاهش تاخیر برشی تحت اثر ۱۱ زلزله سطح MCE_R و ۷ زلزله سطح SLE در سیستم پیشنهادی نسبت به سیستم لوله‌ای نشان شده است. در تمام زلزله‌های مزبور با افزودن مهاربندها به 0.2 ارتفاع سازه، تنش در ستون‌های گوشه به مقدار قابل توجهی کاهش پیدا کرده است. علاوه بر کاهش تنش در ستون‌های گوشه، تنش در سایر ستون‌های سازه (شامل ستون‌های قاب بال و قاب جان) نیز افزایش پیدا کرده است. برای کاهش آثار تاخیر برشی در سازه، باید تنش در ستون‌های گوشه کاهش و در سایر ستون‌ها افزایش پیدا کند تا منجر به یکنواخت‌تر شدن توزیع تنش‌ها در ستون‌های پیرامونی سازه شود. این موضوع به وقوع پیوسته است که نشان دهنده عملکرد مطلوب روش پیشنهادی برای کاهش تاخیر برشی در سازه‌های لوله‌ای است.

در ۱۱ زلزله سطح MCE_R تحت اثر زلزله‌های مختلف، میزان کاهش تاخیر برشی در سازه پیشنهادی نسبت به سازه لوله‌ای متفاوت است. میزان کاهش تاخیر برشی در سازه پیشنهادی برای زلزله‌های سطح MCE_R ، بین ۱۴ تا ۴۲ درصد و برای زلزله‌های سطح SLE، ۳ تا ۳۵ درصد بوده است که نشان دهنده عملکرد مطلوب سازه پیشنهادی تحت اثر زلزله است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش شدت زلزله، عملکرد سازه پیشنهادی برای کاهش تاخیر برشی، بهتر خواهد شد و سیستم قادر است تاخیر برشی را به میزان بیشتری کاهش دهد. بطور کلی در تمام تحلیل‌ها، سازه پیشنهادی نسبت به سازه لوله‌ای کاهش تاخیر برشی داشته است که نشان دهنده عملکرد مطلوب سازه در کاهش تاخیر برشی است.

جدول ۴. ارزیابی عملکرد سیستم پیشنهادی در کاهش تاخیر برشی تحت اثر

۱۱ زلزله سطح MCE_R

No.	Corner to mid column stress ratio of tube system	Corner to mid column stress ratio of braced tube system	Reduce of shear lag in braced tube versus tube system (percent)
1	16.0	9.0	23.4
2	14.0	8.1	33.7
3	38.0	27.4	14.2
4	20.5	15.8	16.9
5	16.2	8.4	30.2
6	31.9	9.2	33.3
7	11.2	8.2	24.7
8	12.7	10.5	17.8
9	24.9	11.0	41.6
10	13.8	8.6	17.5
11	16.1	10.0	26.9

Table 4. Evaluation of shear lag reduction of the proposed system due to 11 MCE_R level earthquakes.

جدول ۵. ارزیابی عملکرد سیستم پیشنهادی در کاهش تاخیر برشی تحت اثر

۷ زلزله سطح SLE

No.	Corner to mid column stress ratio of tube system	Corner to mid column stress ratio of braced tube system	Reduce of shear lag in braced tube versus tube system (percent)
1	8.7	5.3	25.6
2	11.7	7.8	29.7
3	11.8	8.0	30.7
4	10.7	7.4	11.6
5	10.9	7.6	34.5
6	13.0	10.3	28.3
7	9.8	9.6	2.6

Table 5. Evaluation of shear lag reduction of the proposed system due to 7 SLE level earthquakes.

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با توجه به چگونگی اثرگذاری تاخیر برشی در سازه‌های لوله‌ای، روشی برای کاهش تاخیر برشی ارائه شده است. در سازه‌های لوله‌ای، تاخیر برشی در طبقات پایین، بیشترین و در طبقات بالا کمترین آثار را دارد. همچنین به دلیل عدم توانایی انتقال برش قاب محیطی، تنش محوری بوجود آمده در ستون‌های گوشه بیشتر از ستون‌های میانی قاب است. بنابراین می‌توان با ایجاد سازوکار برای انتقال برش، توزیع تنش در ستون‌های قاب را یکنواخت‌تر کرد و در واقع تاخیر برشی را کاهش داد. برای اثبات فرضیه مطرح شده، سازه در 0.2 ارتفاع در طبقات پایین، مهاربندی شده و تحت اثر زلزله‌های با سطوح عملکردی مختلف قرار گرفته

شکل ۷. توزیع تنش در ستون‌های قاب بال و جان در سازه لوله‌ای و سازه

لوله‌ای با مهاربند ضربدری تا 0.2 ارتفاع سازه، تحت اثر زلزله‌های سطح

MCE_R

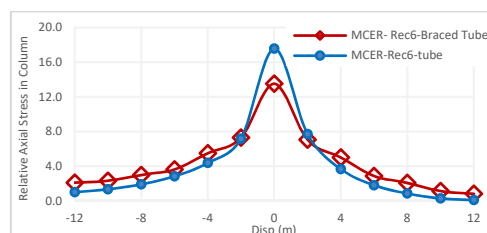
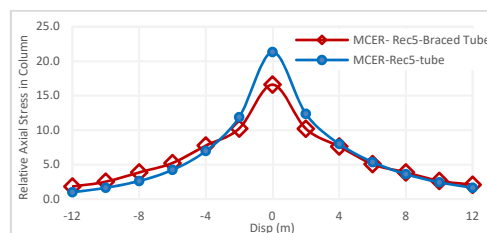
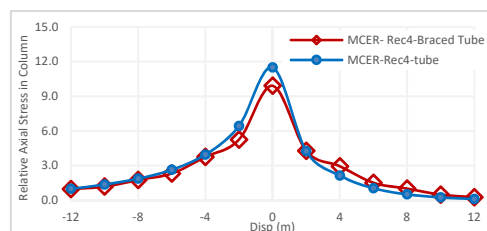
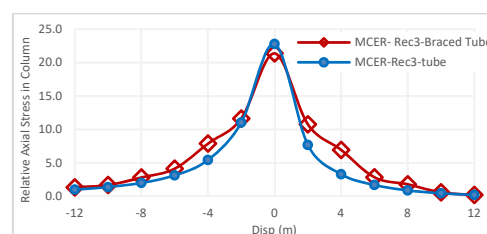
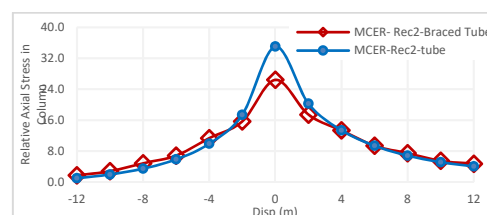
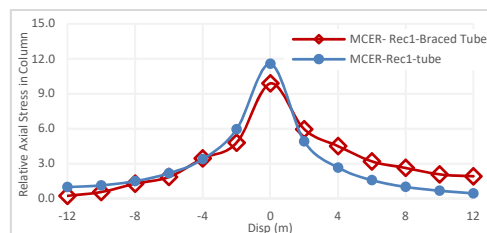


Fig. 7. Columns axial stress distribution of flange and web frames of tubular system and 2-bay X-braced tube system due to MCE_R earthquakes.

- [4] Mehmet, H.G., Huseyin, E.I., 2014. Tall Buildings: Structural Systems And Aerodynamic Form, Routledge: Taylor & Francis Group.
- [5] Mir M. Ali., Kyoung Sun Moon., 2007. "Structural developments in tall buildings: current trends and future prospects", Architectural Science Review, Volume 50(3):205-223.
- [6] Khan, F. R., 1986. "Tubular structures for tall buildings", Handbook of concrete engineering, Mark Fintel ed., CBS Publishers and Distributors, New Delhi, India, 399-410.
- [7] Esmacili, M., 2001. *Ivestigation behavior of tubular structures with braces in high-rise buildings due to earthquake*, M.Sc. Thesis, Department of Structural Engineering Faculty of Civil & Environmental Engineering Tarbiat Modares University (T.M.U.). (In Persian)
- [8] Chang, S. T., Zheng, F. Z., 1987. Negative Shear lag in Cantilever Box Girder with Constant Depth. Journal of Structural Engineering, vol. 113, no. 1, pp. 20-35.
- [9] Connor, J. J., Pouangare, C. C., 1991. Simple Model for Design of Framed - Tube Structures. Journal of Structural Engineering, vol. 117, no. 12, pp. 3623-3644.
- [10] Kristek, V., Bauer, K., 1993. Stress Distribution in Front Columns of High-Rise Buildings. Journal of Structural Engineering, vol. 119, no. 5, pp. 1464-1483.
- [11] Singh, Y., Nagpal, A. K., 1994. "Negative shear lag in framed-Tube Buildings", Journal of Structural Engineering, vol. 120, No. 11, November, 1994.
- [12] Kazeminia Korani, H., Khoshnoodian, F., 2010. "Sismic behavior of tall stuctures and reduce shear lag in this structures" 5th national congress on civil engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran. (In Persian)
- [13] Naderpour, H., Kheirodin, A., 2011. "Investigat shear lag phenomenon in concrete high rise buildings with tube system", Journal of Modeling in Engineering, vol. 9, No. 15., 2011. (In Persian)
- [14] Afsoon, F., 2013. *Shear lag effects on tube system with shear walls in tall building*, M.Sc. Thesis, Department of Structural Engineering Faculty of Civil Engineering Shahid Bahonar University. (In Persian)
- [15] Bayraghi, H., Kheirodin, A., 2013. "Sismic behavior of high rise buildings and methods for reduce shear lag in this structures" 5th Iran Concrete national conference, Tehran Iran. (In Persian)
- [16] Computers and Structures, Inc., 2017. ETABS-2016, version 16.1.0, integrated structural analysis and design software. Berkeley, CA.
- [17] Open SEES; Open System for Earthquake Engineering Simulation., 2016. Pacific Earthquake Engineering Research Center., version 2.5.0., s.l.: Available online: <http://opensees.berkeley.edu>.
- [18] Ahmadi, E., 2016. *Siesmic Analyse of Tall Building with Center Core and Outrigger*, M.Sc. Thesis, Department of Structural Engineering Faculty of Civil

است. تحلیل‌ها نشان می‌دهد که فرضیه مزبور صحیح بوده و روش پیشنهاد شده به خوبی می‌تواند آثار تاخیر برشی را کاهش دهد. افزودن مهاربندها به سازه لوله‌ای در هر یازده زلزله اعمال شده، موجب کاهش تغییر مکان‌های بام و همچنین کاهش اکسترمم‌های نمودار شده است. در زلزله‌هایی که موجب تغییر شکل‌های ماندگار در سازه شده‌اند نیز، افزودن مهاربندها به $0/2$ ارتفاع سازه لوله‌ای موجب کاهش جابه‌جایی‌های ماندگار شده است. پس از تحلیل سازه‌های لوله‌ای و لوله‌ای مهاربندی شده در $0/2$ ارتفاع سازه تحت اثر زلزله‌های سطوح MCE_R و SLE میزان کاهش تاخیر برشی ارزیابی شده است. میزان کاهش تاخیر برشی در سازه پیشنهادی برای زلزله‌های سطح MCE_R ، بین 14 تا 42 درصد و برای زلزله‌های سطح SLE ، 3 تا 35 درصد بوده که نشان دهنده عملکرد مطلوب سازه پیشنهادی تحت اثر زلزله است. نتایج نشان می‌دهد در تمام تحلیل‌ها، سازه پیشنهادی نسبت به سازه لوله‌ای کاهش تاخیر برشی داشته است. همچنین با مقایسه تاخیر برشی در دو سطح مزبور می‌توان نتیجه گرفت که با بزرگ شدن زلزله، میزان کاهش تاخیر برشی در سیستم پیشنهادی، کاهش بیشتری دارد. در تمام تحلیل‌ها و ارزیابی‌های انجام شده در این پژوهش، عملکرد و رفتار سیستم پیشنهادی بهتر از سازه لوله‌ای بوده و تاخیر برشی نیز تا حد قابل توجهی کاهش پیدا کرده است. سیستم پیشنهادی علاوه بر کاهش تاخیر برشی در سازه‌های لوله‌ای، موجب کاهش هزینه‌های ساخت (نسبت به روش‌هایی مثل افزودن هسته یا لوله به سازه لوله‌ای) و عدم نیاز به مهاربند در کل ارتفاع سازه لوله‌ای شده است. بطور کلی برای سازه‌های لوله‌ای مختلف ابتدا باید بررسی شود که تاخیر برشی تا چه ارتفاعی بیشترین اثرگذاری را دارد و تا همان ارتفاع مهاربندها اضافه شوند.

References

۸- منابع

- [1] Smith, B. S., Coull, A., 1991. "Tall building structures: analysis and design", University of Texas Press.
- [2] LATBSDC (2017), An alternative procedure for seismic analysis and design of tall buildings located in the Los Angeles region, Los Angeles Tall Buildings Structural Design Council, Los Angeles, USA.
- [3] CTBUH, Council on Tall Buildings and Urban Habitat, Illinois Institute of Technology, S.R. Crown Hall, 3360 South State Street, Chicago, Illinois, USA, www.ctbuh.org.

- of Structural Engineering, vol. 2017, 143(1): 04016144.
- [21] F.A. Charney., 2008. Unintended Consequences of Modeling Damping in Structures. Journal of Structural Engineering, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:4(581).
- & Environmental Engineering Tarbiat Modares University (T.M.U.). (In Persian)
- [19] PEER/ATC 72-1 (2010), Modeling and acceptance criteria for seismic design and analysis of tall buildings, Pacific Earthquake Engineering Research Center, California, USA.
- [20] Cruz, C., Miranda, E., 2016. Evaluation of damping ratios for the seismic analysis of tall buildings. Journal

Reduction of shear lag and improvement of performance in tubular structures

Hamed Farhangian¹, Hamzeh Shakib^{2*}

1- M.Sc. student, Faculty of Civil and Environmental Engineering, University of Tarbiat Modares, Iran

2- Professor, Faculty of Civil and Environmental Engineering, University of Tarbiat Modares, Iran

* SHAKIB@modares.ac.ir

Abstract

The tubular structures are having the capability of resisting wind and earthquake loads with the exterior tube system. Tube systems consist of closely spaced exterior columns and deep beams around the plan that provides sufficient rigidity and stability for tall/high-rise buildings. Another advantage of the tubular system is the significant reduction of the building materials and increasing the architectural space in the internal plan. The mentioned cases have increased the popularity of this kind of structural system. But the most important problem in the tube system is the shear lag. Shear lag is the non-uniform distribution of axial stress on the face columns when the tube system is subjected to lateral loads. Shear lag can occur in any box-shaped structural system that is loaded laterally. Shear lag increases structural displacement, limiting the use of maximum structural capacity and causing warping of the floors. The purpose of this research is to study the effects of shear lag on the tube system and find how to reduce shear lag. In order to do this, a tubular structure is analyzed and designed based on the Capacity Design Approach and Performance Base Design based on LATBSDC, ASCE 7-16, and AISC 360-10. To evaluate the seismic performance of the tubular structures, the Nonlinear Dynamic Procedure (NDP) for two ground motion intensity levels based on LATBSDC is used. Nonlinear dynamic response analyses for two earthquake ground motion intensities done and acceptability criteria demonstrated. In the next step shear lag in the designed structures is investigated. Also, the relationship between shear lag and the stiffness of the peripheral beams is studied. The result shows that increasing peripheral beam stiffness is not a good way to reduce the effects of shear lag because of economic issues. Also, other proposed methods, such as the addition of core or internal tubes, are not a suitable solution to reduce the effects of shear lag, given the high cost they impose on the project. Due to the development process and the effect of shear lag on tubular structures, adding two-bay X-braces to one-fifth of the height of the structure in lower floors have been proposed to reduce the effects of shear lag. In order to calculate the shear lag, the column's axial stress distribution in the tubular structure is considered as the basis and compared with the column's axial stress distribution in the two-bay X-braced tube system. The proposed tube system and tube system have been analyzed by different levels of earthquakes and compared for performance purposes. In all the analysis and evaluations carried out in this study, the performance and behavior of the proposed systems were better than the tubular structure. With the addition of two-bay X-braces to one-fifth of the height of the tube structure in lower floors, the stress in the corner columns has been significantly reduced. Also the proposed system has been able to significantly reduce the shear lag. Therefore, in order to reduce shear lag and achieve proper behavior in tube systems, it is recommended to use the proposed systems in this study.

Keywords: Tall buildings, Framed-tube buildings, Shear lag, Analysis and design based on performance objectives, LATBSDC guideline.