



## رفتار لرزه‌ای سازه‌های بلند و روش‌های حل مشکل تأخیر برشی در این سازه‌ها

حمیدرضا کاظمی نیا کرانی<sup>1</sup>، فرامرز خوشنودیان<sup>2</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه صنعتی امیر کبیر (پلی تکنیک تهران)

2- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیر کبیر (پلی تکنیک تهران)

⋮

[kazemini.hamidreza@gmail.com](mailto:kazemini.hamidreza@gmail.com)

[khoshnud@aut.ac.ir](mailto:khoshnud@aut.ac.ir)

⋮

### خلاصه

سازه قاب محیطی یکی از پیشرفته‌ترین فرم‌های سازه‌های ساختمانی بلند می‌باشد که ضمن بازدهی نسبتاً خوب و اجرای آسان، برای هر ارتفاع بلندی نیز مناسب می‌باشد. یکی از مهمترین عیب‌های روش مهاربندی محیطی (لوله‌ای)، تأخیر برشی می‌باشد. در این مقاله این مشکل مورد بررسی قرار گرفته شده است و راهکارهایی برای رفع این مشکل ارائه شده است. در ابتدا اثر تعداد سازه‌های بلند در تأخیر برشی مورد بررسی قرار گرفته شده است. مشاهده شده است از طبقه 30 به بعد، با افزایش تعداد طبقات نسبت نیروی ستونهای گوشه و میانی ثابت است. سپس سه راهکار برای رفع مشکل بیان شده و اثر هر کدام از این راه حلها مورد بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: سازه‌های بلند، تأخیر برشی، مهاربندی محیطی (لوله‌ای)

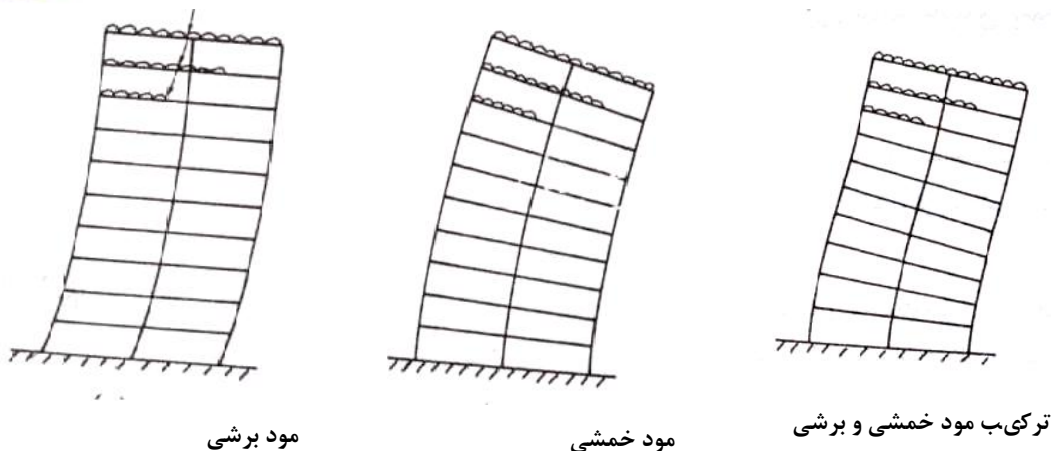
### 1. مقدمه

از ابتدای تمدن بشری، برجها و ساختمانهای بلند مورد توجه بوده‌اند، ساخت ساختمانهای بلند ابتدا با اهداف دفاعی قبیله ای شروع شده و سپس جنبه های نمادین و کاربردی پیدا کرد. رشد و توسعه سازه های بلند جدید در دهه 80 قرن نوزدهم با کاربرد تجاری و مسکونی شروع شد. ایجاد ساختمان‌های تجاری در ابتدا پاسخی به تقاضای جامعه‌ی بازرگانی بود، که نیاز داشتند تا حد امکان به یکدیگر و به مراکز شهر ها نزدیک باشند. این مسئله باعث شد که بر فضای افقی محدوده مراکز شهرها فشار زیادی اعمال گردد. سازه‌های بلند به خاطر اینکه معمولاً از نظر ظاهری شاخص هستند، مدیریتهای تجاری از آن به عنوان وسیله تبلیغی نیز استفاده می کنند. از طرف دیگر جامعه تجاری و توریستی، به دلیل کثرت مراجعه و بازدهی اقتصادی مطلوب علاقمند به ایجاد هتلهای مرتفع در مراکز شهرها می‌باشد.

تأمین سختی مناسب به خصوص سختی جانبی سازه، یکی از عوامل اساسی طراحی ساختمانهای بلند است. در حد نهائی مقاومت، تغییر شکلهای جانبی باید به طریقی محدود گردند که اثرات ثانویه ناشی از بارگذاری  $(P-\Delta)$  باعث شکست و انهدام سازه نگردد. همان طور که می‌دانیم اثر  $(P-\Delta)$  بر سازه های بلند از اهمیت زیادی برخوردار است.

رفتار کلی سازه‌های بلند، مشابه یک ستون طره‌ای با لاغری متوسط می‌باشد. ولی با در نظر گرفتن احتمال انعطاف‌پذیری برشی زیاد یا حتی تعیین کننده، رفتار این سازه‌ها با ستونهای سازه‌ای معمولی که در اصل رفتاری خمشی دارند، متفاوت خواهد بود. در نتیجه، مودهای احتمالی کمانش کلی سازه فقط مود خمشی نبوده بلکه مود برشی و یا به احتمال زیاد ترکیبی از هر دو مود می باشد. علاوه بر آن، این مودها نه فقط در کمانش جانبی، بلکه در کمانش پیچشی و یا پیچشی عرضی سازه نیز ظاهر می‌شوند.

معمولاً کل بار قائم اعمال شده بر یک سازه بلند، بخش کوچکی از باری است که تحت اثر آن کمانه می کند. لذا در چنین حالتی احتمال انهدام وجود ندارد یکی از مباحث مهم پایداری اثرات ثانویه بارهای قائم بر تغییر مکان جانبی ناشی از بارهای افقی می باشد. خروج از محوری قائم بارهای وزنی، باعث افزایش تغییر مکانهای جانبی و لنگرهای اعضا می شود که این همان اثر  $(P-\Delta)$  می باشد و ممکن است باعث انهدام کل سازه شود.



مود برشی

مود خمشی

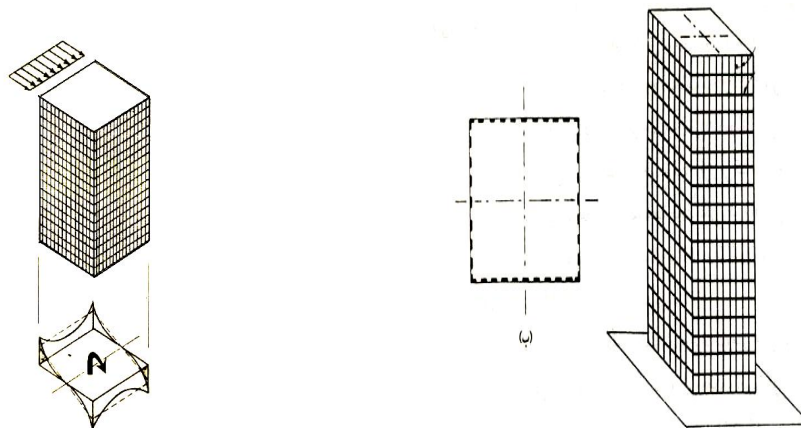
ترکیب مود خمشی و برشی

شکل 1- مود احتمالی کمانش سازه

معمولاً کل بار قائم اعمال شده بر یک سازه بلند، بخش کوچکی از باری است که تحت اثر آن کمانه می کند. لذا در چنین حالتی احتمال انهدام وجود ندارد یکی از مباحث مهم پایداری اثرات ثانویه بارهای قائم بر تغییر مکان جانبی ناشی از بارهای افقی می باشد. خروج از محوری قائم بارهای وزنی، باعث افزایش تغییر مکانهای جانبی و لنگرهای اعضا می شود که این همان اثر  $(P-\Delta)$  می باشد و ممکن است باعث انهدام کل سازه شود.

## 2. سیستم مهاربندی قابهای محیطی (لوله‌ای)

یکی از مؤثرترین سیستم مهاربندی در سازه‌های بلند، سیستم مهاربندی لوله‌ای می باشد. مقاومت جانبی سازه‌ها با قاب محیطی، به وسیله قابهای بسیار سختی که در محیط ساختمان قرار گرفته و تشکیل جداره بسته‌ای را می دهند، تأمین می شود. قابهای محیطی شامل ستونهایی به فواصل 2 تا 4 متر (مرکز به مرکز) هستند که توسط شاهرهای عمیق به یکدیگر متصل شده‌اند، گر چه قابهای محیطی تمامی بار جانبی را تحمل می کنند، بارهای قائم نیز بین ستونهای محیطی و ستونهای داخلی تقسیم می گردد. هنگامی که سازه تحت اثر بار جانبی قرار می گیرد، قابهای محیطی در جهت بارگذاری به صورت "جان" و قابهای عمود بر جهت بارگذاری به صورت "بال" عمل می کنند. در زیر شکل سیستم متداول قاب محیطی (لوله‌ای) نشان داده شده است:



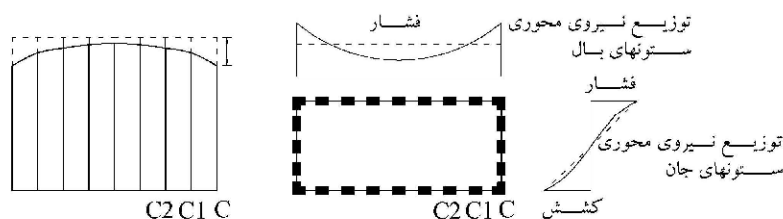
شکل 2- سیستم مهاربندی قاب محیطی (لوله‌ای)

در حقیقت قابهای محیطی، فرم تکامل یافته قابهای صلب سنتی می باشند هدف از بکارگیری این فرم سازه‌ای، جایگزینی حداکثر مواد برابر در محیط سازه، برای ماکزیم نمودن صلیبیت خمشی مقطع می باشد. این نوع سیستم مهاربندی جانبی دارای دو عیب اساسی می باشد که عبارتند از:

1) فاصله کم ستونها بخصوص در طبقات پایین: فاصله کم ستونها، عبور و مرور را به خصوص در طبقات پایین محدود می کند برای رفع این عیب می توان ستونهای طبقات پایتتر را حذف کرد و به جای آن از ستونهای مورب استفاده کرد و یا اینکه بار ستونهای حذف شده را توسط یک شایتر انتقالی به ستونهای زیرین منتقل کرد. در این نوع سیستم سازه ای مشکل جدی تری وجود دارد که در زیر شرح داده شده است.

2) لنگی یا تأخیر برشی: یکی از مهمترین عیبهای روش مهاربندی محیطی (لوله ای)، تأخیر برشی می باشد برای تشریح تأخیر برشی بهتر است ابتدا در مورد مود رفتاری این نوع سیستم ها توضیحاتی داده شود.

گر چه سازه مهاربندی محیطی (لوله ای) شبیه یک جداره بسته قوطی مانند (box) است، ولی رفتاری بسیار پیچیده تر از رفتار یک قوطی ساده بدون سوراخ دارد و سختی آن نیز بسیار کمتر است. هنگامی که سازه در اثر بار جانبی تحت خمش قرار می گیرد مود اولیه رفتاری آن مشابه رفتار قوطی طره قائم خواهد بود و ستونها در دو وجه مخالف محور خنثی، به صورت کششی و فشاری عمل می کنند. اضافه بر آن قابهای موازی جهت بار جانبی تحت اثر خمش در صفحه و رفتار برشی یا طره ای شبیه یک قاب صلب، قرار می گیرند. ولی این رفتار اولیه، با دخالت اثرات انعطاف پذیری تیرهای کناری که باعث تأخیر برشی و افزایش تنش در ستونهای گوشه ای و کاهش تنش در ستونهای میانی بال می گردد مسئله را پیچیده تر می سازد.



شکل 3- سیستم مهاربندی قاب محیطی (لوله ای) و نحوه ایجاد تأخیر برشی

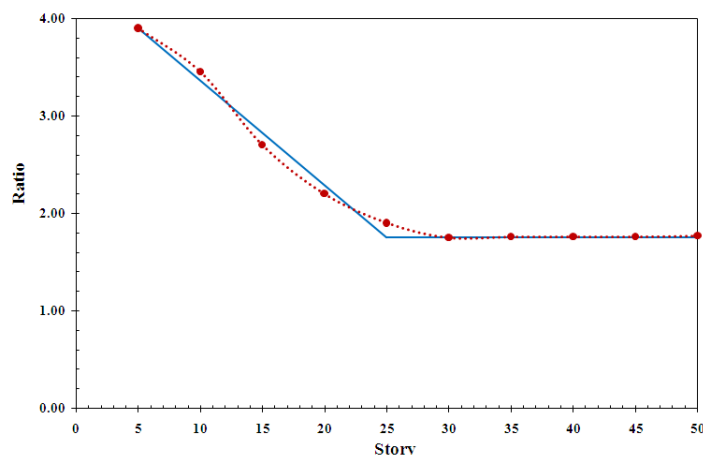
اندر کنش بین قابهای جان و بال به وسیله تغییر مکانهای قائم ستونهای گوشه ای ظاهر می شود. این تغییر مکانها مربوط به برش قائم شایترهای قابهای بال است که باعث ایجاد نیروی محوری در ستونهای بال می گردد. با توجه به شکل سمت چپ در بالا هنگامی که ستون C تغییر شکل فشاری می دهد ستون مجاور خود را که C1 می باشد از طریق تیرهای اتصالی کناری تحت فشار قرار می دهد، چون تیرهای کناری انعطاف پذیر می باشند پس خم می شوند لذا تغییر شکلهای فشاری دو ستون یکسان نبوده و ستون C1 تغییر شکل کمتری خواهد داشت که مقدار آن به سختی تیر کناری بستگی دارد. (از نظر تئوری، رفتار خالص و کامل جداره یا قوطی، نیاز به تیرهای اتصالی با سختی بی نهایت دارد) تغییر شکل ستون C1 باعث تغییر شکل فشاری ستون C2 می شود ولی مقدار آن کمتر از تغییر شکل ستون C1 خواهد بود. بنابراین هر ستون داخلی، نسبت به ستون خارجی خود، تغییر شکل کمتری خواهد داشت. چون لنگر اعمالی خارجی باید توسط کوپل داخلی ناشی از نیروهای کششی و فشاری دو سمت مخالف محور خنثی ساختمان تحمل گردد، در نتیجه تنشهای ستونهای گوشه ای بیشتر از تنشهای ناشی از رفتار خالص جداره ای خواهد بود و تنشهای ستونهای میانی کمتر از آن می باشد.

تفاوت بین توزیع تنش جداره ای خالص که از تئوری معمولی تیرها حاصل می شود، با توزیع تنش واقعی در شکل سمت راست که در بالا آورده شده، نشان داده شده است. به دلیل اینکه توزیع تنش در ستونها کم اثرتر از حالت جداره ای خالص است پس لنگر مقاوم و صلیبیت خمشی کاهش می یابد. بنابراین گر چه یک قاب محیطی مهاربندی شده یک فرم سازه ای بسیار مؤثر برای سازه های بلند است ولی اثرات تأخیر برشی در قابهای محیطی، استفاده از حداکثر ظرفیت خمشی و مقاومت سازه را محدود می کند. پس می توان تأخیر برشی را این گونه بیان کرد که: توزیع غیر یکنواخت نیروهای محوری ستونها که در یک فاصله از محور خنثی قرار گرفته اند.

بدلیل مسطح باقی نماندن سطوح مقطع سازه، پس از ایجاد تأخیر برشی دالهای کف تحت اثر خمش قرار خواهند گرفت. در نتیجه جداکننده های داخلی و اجزای درجه دوم سازه ای تغییر شکل خواهند داد و این تغییر شکلهای در ارتفاع ساختمان با یکدیگر جمع شده و کمیت قابل ملاحظه ای را تشکیل خواهند داد.

### 3. اثر تعداد طبقات در تأخیر برشی سازه

در ادامه، اثر تعداد طبقات در تأخیر برشی سازه مورد بررسی قرار می گیرد. بدین منظور 10 اسکلت سازه با تعداد طبقات 5، 10، 15، 20، 25، 30، 35، 40، 45، 50 در نرم افزار ETABS مدل و تحلیل شده اند. در زیر نمودار مربوط به نسبت نیروی محوری ستون گوشه به ستون میانی در مقابل تعداد طبقات رسم شده است.



شکل 4- اثر تعداد طبقات بر تأخیر برشی سازه

با توجه به شکل 4 مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد طبقات نسبت نیروی محوری ستون گوشه به ستون کناری کم می‌شود. همچنین از طبقه 30 به بعد مقدار نسبت نیروها ثابت مانده و مقدار آن  $1/75$  می‌باشد.

#### 4. اصلاح روش طرهای در سازه‌های بلند

با توجه به توضیحاتی که ارائه شد مشخص می‌شود که روش طرهای برای محاسبه تقریبی نیروی محوری ستونها در اثر بار جانبی استفاده می‌شد زیر سوال رود (البته اگر فرض بلند بودن سازه را در نظر نگیریم!) زیرا در روش طرهای ای ما سازه را به صورت یک تیر کنسول در نظر می‌گیریم و ستونها را به عنوان تارهای آن فرض می‌کردیم. با توجه به رابطه محاسبه تنش خمشی، نیروی محوری موجود در هر ستون را بدست می‌آوردیم. ستونهایی که در فاصله یکسان از تار خنثی قرار داشتند دارای نیروی محوری یکسانی بودند، ولی با توجه به آنچه که در مورد تأخیر برشی گفته شد دریافتیم که، ستونهایی که در یک ردیف قرار دارند نیروی محوری در آنها یکسان نمی‌باشد و حتی ممکن است نیروی ستونهای گوشه حدود  $3/5$  تا  $4$  برابر نیروی ستونهای میانی شود. البته این نسبت برای سازه‌های کمتر از 5 طبقه می‌باشد خوشبختانه با افزایش تعداد طبقات نسبت نیروی محوری ستونهای گوشه به ستونهای کناری کم می‌شود. پس می‌توان نتیجه گرفت که روش طرهای زمانی معتبر است که سازه ما بلندی خیلی بلند باشد، در غیر این صورت خطای جوابهای بدست آمده بسیار زیاد است. اما در این مقاله به منظور اصلاح روش طرهای برای سازه‌های بلند رابطه‌ای پیشنهاد شده است.

$$R = -0.107S + 4.437 \quad (1)$$

البته رابطه بالا مربوط به سازه‌هایی می‌باشد که تعداد طبقات آنها کمتر از 25 طبقه باشد و برای سازه‌های که تعداد طبقات بیشتر از 25 طبقه باشد رابطه بالا به مقدار ثابت  $1/75$  تغییر می‌کند. در ضمن در رابطه بالا  $R$  نشان دهنده نسبت نیروی محوری ستونهای گوشه و میانی است و  $S$  نشان دهنده تعداد طبقات سازه می‌باشد. با توجه به رابطه بالا می‌توان با داشتن تعداد طبقات، نسبت نیروهای ستونهای گوشه و میانی را بدست آورد.

#### 5. روشهای حل تأخیر برشی در سازه‌های بلند

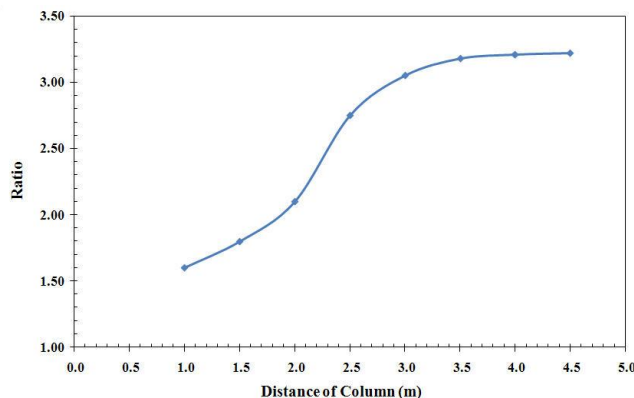
در این مقاله سه روش برای حل مشکل تأخیر برشی ارائه شده است و اثر هر کدام از آنها مورد بررسی قرار گرفته است. این روشها عبارتند از:

۱) کم کردن فاصله ستونها

۲) دسته بندی کردن ستونها

۳) افزایش سختی تیر رابط

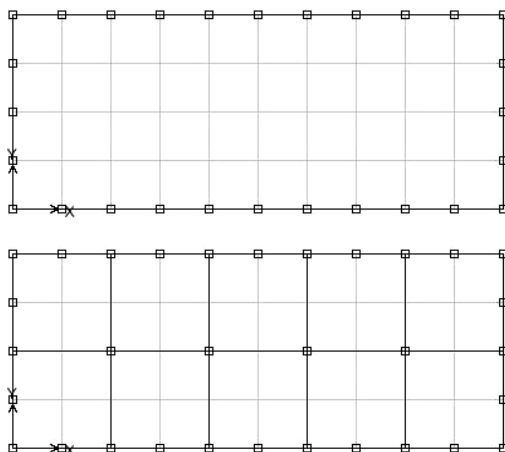
یکی از روشها برای حل مشکل تأخیر برشی کم کردن فاصله ستونها است. برای بررسی اثر فاصله ستونها در تأخیر برشی از یک مدل 20 طبقه (11 ستون در راستای X و 5 ستون در راستای Y و ارتفاع هر طبقه 3 متر) استفاده شده است که فاصله ستونها از 1 تا 4 متر تغییر می‌کند. در شکل زیر محور افقی معرف فاصله بین ستونها و محور قائم معرف نسبت نیروی ستونهای گوشه به ستونهای میانی می‌باشد. بنابراین:



شکل 5- اثر فاصله ستونها بر تأخیر برشی سازه

با توجه به نمودار بالا مشاهده می‌شود که با کاهش فاصله بین ستونها نسبت نیروی محوری ستونهای گوشه به ستونهای میانی کمتر می‌شود یعنی مقدار آنها به هم نزدیک شده و تأخیر برشی کاهش می‌یابد.

راه حل دیگری برای کاهش تأخیر برشی پیشنهاد می‌شود دسته بندی کردن ستونها می‌باشد. تأخیر برشی قابهای محیطی با افزودن پانلهای "جان" متشکل از قابهای میانی در سراسر عرض ساختمان و ایجاد یک سازه قاب محیطی دسته شده یا گروه بندی شده به مقدار زیادی کاهش می‌یابد. برای بررسی اثر دسته بندی ستونها، از یک سازه 50 طبقه استفاده شده است. دو حالت آنالیز برای این سازه صورت گرفته، حالت اول سازه بدون ستونهای میانی و حالت دوم چهار ستون میانی به آن افزوده شده است. طریقه دسته بندی ستونها در زیر نشان داده شده است:



شکل 6- دسته بندی ستونها برای کاهش تأخیر برشی

طبق نتایج بدست آمده، مشاهده می‌شود که با دسته بندی کردن ستونها، نسبت نیروی ستونهای گوشه به ستونهای میانی از 2/1 به مقدار 1/42 کاهش می‌یابد.

راه حل سوم برای حل مشکل تأخیر برشی، افزایش دادن سختی تیر میانی ستونها می‌باشد. با افزایش سختی تیر رابط بین ستونهای محیطی، نسبت نیروی محوری ستونهای گوشه به ستونهای کناری کاهش می‌یابد، ولی این کاهش در هر سازه با هر تعداد طبقات یکسان نمی‌باشد، هر چه سازه بلندتر باشد میزان کاهش نسبت، بیشتر می‌باشد. مثلاً برای دو سازه 50 و 20 طبقه با افزایش یکسان سختی تیرهای رابط این نسبت به صورت زیر تغییر می‌کند:

نوع سازه	قبل از افزایش سختی	بعد از افزایش سختی	درصد کاهش (%)
20 طبقه	2.103	2.058	2.140
50 طبقه	1.764	1.551	12.075



## 6. نتیجه گیری

از آنجا که سازه قاب محیطی یکی از پیشرفته ترین فرمهای سازه ای ساختمانهای بلند می باشد، در این مقاله سعی به بررسی رفتار این سیستم و بررسی مشکلات آن پرداخته شده است. نتایج نشان می دهد که با افزایش تعداد طبقات، مشکل تأخیر برشی سازه کاهش می یابد و از طبقه 30 به بعد مقدار نسبت نیروی محوری ستون گوشه و میانی، ثابت و برابر 1/75 می باشد. در ادامه رابطه ای پیشنهاد شده است که می توان با داشتن تعداد طبقات نسبت نیروی محوری ستون گوشه و میانی را محاسبه کرد. همچنین سه راهکار برای رفع مشکل تأخیر برشی پیشنهاد شده و اثر هر کدام مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با کاهش فاصله ستونها، نسبت نیروی محوری ستون گوشه و میانی کاهش می یابد. همچنین با دسته بندی کردن ستونها می توان این نسبت را کاهش داد. راهکار آخر اینکه سختی تیر میانی ستونها را افزایش داد. با افزایش سختی تیر، نسبت نیروی محوری ستون گوشه و میانی کاهش می یابد. ناگفته نماند که برای هر سازه ای کاهش نسبت نیروها یکسان نمی باشد و هر چه سازه بلندتر باشد میزان کاهش نسبت نیروها، بیشتر می باشد.

## 7. مراجع

1. دکتر فرهاد بهنام فر، امیر هومان مهاجری "بررسی تغییرات برش پایه و تغییر مکان جانی حداکثر ساختمانهای بلند با سیستم لوله ای و مهار بازویی" پایان نامه کارشناسی ارشد دانشکده عمران دانشگاه یزد-1379.
  2. ولف گانگ شولر، (دکتر حجت الله عادل)، "سازه های ساختمانهای بلند".
  3. استفورد اسمیت، بریان، کول آکس، (حسن حاجی کاظمی)، "7تالیز و طراحی سازه های بلند" انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد.
  4. رامین روح نواز، "محل بهینه سیستم مهار بازویی در سازه های بلند"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم و فنون مازندران.
  5. غلامرضا قدرتی، "محل بهینه سیستم مهار بازویی در ساختمانهای بلند تحت اثر بارهای لرزه ای"، دانشگاه علم و صنعت ایران.
6. A.rutenberg and D.Tal , "Lateral load response of belted Tall Building Structure "
7. Bryan Stafford smith and Alex . "Tall Building Structure Analysis and Design "
8. Taranath B.S, "Strauctural Analysis and Design of Tall Buildings "