

## بررسی پدیده‌ی تأخیر برشی در سازه‌های بتن‌آرمه بلندمرتبه با سیستم لوله در لوله تحت اثر بار باد

کوروش مهدی‌زاده\*

مربی، گروه عمران، دانشکده مهندسی، واحد گرمسار، دانشگاه آزاد اسلامی، گرمسار، ایران

سیده وحیده هاشمی

دانشجوی دکتری، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

عباسعلی صادقی

دانشجوی دکتری، گروه عمران، دانشکده مهندسی، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

Ko\_ma751@mail.um.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۷/۲۲ تاریخ پذیرش نهایی: ۹۸/۰۸/۲۹

### چکیده:

سیستم لوله در لوله یکی از کاربردی‌ترین فرم‌های سازه‌ای در ساختمان‌های بلندمرتبه می‌باشد. از جمله مهم‌ترین معایب این سیستم، پدیده‌ی تأخیر برشی است که باعث می‌شود نیروی محوری در ستون‌های کناری بال سازه افزایش و در ستون‌های میانی بال کاهش یابد. بنابراین در این تحقیق، به بررسی شاخص تأخیر برشی در سازه‌های بتن‌آرمه‌ی بلندمرتبه با سیستم لوله در لوله با و بدون قطع ستون‌ها در ارتفاع و پلان تحت اثر بار باد پرداخته می‌شود. بنابراین دو سازه‌ی بتنی ۴۰ و ۶۰ طبقه به صورت سه‌بعدی در سه حالت با و بدون قطع ستون‌ها در نرم‌افزار ETABS 2017 مدل‌سازی شده‌اند. مدل‌های ۴۰ طبقه بدون قطع و با قطع ستون‌ها در طبقات ۱۱، ۲۱ و ۳۱ و مدل‌های ۶۰ طبقه بدون قطع و با قطع ستون‌ها در طبقات ۱۶، ۳۱ و ۴۶ در نظر گرفته شده‌اند. مدل‌ها تحت بار باد تحلیل و پدیده‌ی تأخیر برشی در آن‌ها محاسبه و مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در سازه‌ها از پایین به بالا شاخص تأخیر برشی از فاز مثبت به منفی تغییر حالت داده و در طبقات بالا نیروی محوری ستون‌های میانی بیش از ستون‌های گوشه است. به عنوان نمونه مقدار میانگین شاخص‌های تأخیر برشی در طبقه‌ی ۵ ام ساختمان ۴۰ طبقه‌ی بدون قطع ستون ۱/۲ و در طبقه‌ی ۳۵ ام آن ۰/۶۱ است. در مورد ساختمان ۶۰ طبقه‌ی بدون قطع ستون نیز مقادیر فوق در طبقات ۵ ام و ۵۵ ام به ترتیب ۰/۵۲ و ۱/۱۴ می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با دسته بندی ستون‌های ساختمان‌ها، عملکرد آن‌ها در ارتفاع بهبود یافته است.

**کلید واژگان:** سازه‌ی بتن‌آرمه‌ی بلند، سیستم لوله در لوله، تأخیر برشی، قطع ستون، ستون دسته‌بندی.

## ۱- مقدمه

از ابتدای تمدن بشری، برج‌ها و ساختمان‌های بلند مورد توجه بوده‌اند. ساخت ساختمان‌های بلندمرتبه از ابتدا با هدف دفاع شروع شده و سپس جنبه‌های نمادین و کاربردی پیدا کرده است. رشد و توسعه ساختمان‌های بلند در دهه‌ی ۸۰ قرن نوزدهم با کاربری تجاری و مسکونی شروع گردید. هنگامی که ارتفاع ساختمان افزایش می‌یابد، نیروهای باد و زلزله (نیروهای جانبی) بر سیستم سازه‌ای غالب می‌شود. در این سازه‌ها تأثیر مودهای بالاتر ساختمان برای طرح سازه‌ای قابل توجه می‌باشد. سازه‌های بلند، مهندسان سازه و زلزله را با چالش‌هایی اساسی مواجه می‌کند، به‌ویژه اگر این طرح‌ها در مناطق زلزله‌خیز یا بسترهای پرخطر مانند خاک‌های کم تراکم و سست باشد. در سازه‌های بلندمرتبه‌ای، صلبیت و پایداری ضوابط مهم‌تری را نسبت به مقاومت (مشخصه‌ی اصلی سازه‌های کوتاه مرتبه) تشکیل می‌دهند. جهت پاسخگویی به نیازهای فوق، سیستم جدیدی تحت عنوان سیستم لوله‌ای ابداع شده است. اثر دسته‌بندی کردن لوله‌ها نیز بر بهتر شدن رفتار جانبی یک سازه‌ی لوله‌ای در مطالعات گذشته تأیید شده است. در این تحقیق، اثر نحوه‌ی قطع لوله‌ها در پلان و ارتفاع و تأثیر آن بر پارامترهای رفتار جانبی سازه‌ها مانند شاخص تأخیر برشی مطالعه شده است.

موساد و همکاران [۱] در سال ۲۰۱۱، تحقیقی آزمایشگاهی و تحلیلی در خصوص عملکرد سازه‌ی ۴۸ طبقه فولادی با پلان مستطیلی انجام دادند. در این پژوهش، سازه مذکور تحت بارگذاری باد (آزمایش تونل باد) در جهت‌های مختلف قرار گرفت و وضعیت سازه و طیف‌های پاسخ سازه مورد ارزیابی قرار داده شد. در تحقیقی که در سال ۱۳۹۲ توسط بیرقی و خیرالدین [۲] انجام شد، پدیده‌ی تأخیر برشی سیستم لوله قابی در ساختمان بلند بتن‌آرمه را با سیستم لوله دسته‌بندی‌شده مقایسه گردید. در این تحقیق با مدل‌سازی دو ساختمان ۸۰ طبقه‌ی بتنی، یکی با سیستم لوله قابی و دیگری با سیستم لوله دسته‌بندی‌شده به بررسی عملکرد و مقایسه‌ی رفتار آن‌ها تحت اثر نیروی باد و ثقلی پرداخت (برای بارگذاری باد از آیین‌نامه‌ی ASCE 7-05 استفاده شد). نتایج نشان داد که مقدار شاخص تأخیر برشی برای سیستم لوله قابی در طبقه سوم نسبت به سیستم لوله دسته‌بندی‌شده در همان طبقه بیش از ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. همچنین مقدار تغییر مکان بام و حداکثر تغییر مکان جانبی نسبی طبقات در سیستم لوله قابی در مقایسه با سیستم لوله دسته‌بندی‌شده به حدود نصف کاهش می‌یابد. آنتی پین و همکاران [۳] در سال ۲۰۱۴، بارگذاری باد در ساختمان‌های بلند را شبیه‌سازی عددی کردند. آن‌ها در تحقیق خود نتایج حاصل از مطالعه‌ی تجربی و شبیه‌سازی عددی جریان هوای خارجی را در استوانه‌ای با قطر ۸ میلی‌متر که در مسیر باد قرار داده شده بود، را ارائه نمودند. آزمایش با مدل‌های مختلف آشفته‌گی انجام شد و اطلاعات به‌دست‌آمده با اندازه‌گیری‌های تجربی مقایسه شده است. پارامترهای مدل عددی که امکان به حداقل رساندن اختلاف محاسبات را داشت به دست آمد. شبیه‌سازی عددی با استفاده از روش اجزا محدود در نرم‌افزار ANSYS

انجام شد. ساختمان‌های بلند و اشیاء اطراف آن به‌اندازه‌ای انتخاب شدند که جریان هوا در مرزهای آن توسط ساختمان‌های قرار داده‌شده تحت تأثیر قرار نگیرند. محاسبات برای مش‌های مختلف با ابعاد متنوع اجزا محدود انجام پذیرفت. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در طراحی ساختمان‌های بلند، هر دو آزمایش آئرودینامیکی و تجزیه و تحلیل عددی موردنیاز است. پاتیل و همکاران [۴] در سال ۲۰۱۵، اثر بار باد را بر سازه‌های بلند مطالعه کردند. آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار ETABS 9.7.1 سازه‌ی بلندمرتبه‌ای را تحت اثر بار باد مدل کردند. بار باد باعث ایجاد تنش‌های جانبی در ستون گردید که منجر به خم شدن ستون‌ها شد. نیروی محوری، لنگر خمشی و نیروی برشی پس از اعمال بار باد مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. مروج و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۵، نیروی برشی باد را برای یک ساختمان بیمارستانی با سه ارتفاع کوتاه، متوسط و بلند براساس دو آیین‌نامه‌ی UBC 97 و IBC 2000 مطالعه کردند، نتیجه‌ی این مطالعه نشان داد با افزایش ارتفاع ساختمان، بار باد نیز افزایش می‌یابد. همچنین، نشان داده‌شده است که نیروی برشی ناشی از بار باد به‌کار رفته در ساختمان در سه ارتفاع مختلف بر اساس آیین‌نامه‌ی UBC 97 بیش‌تر از آیین‌نامه‌ی IBC 2000 است، بنابراین آیین‌نامه‌ی UBC 97 محافظه‌کارانه‌تر است. علاوه بر این، توزیع بار باد در ارتفاع ساختمان بر اساس دو آیین‌نامه متفاوت است. آیین‌نامه‌ی IBC 2000 جزئیات بیشتری را در مورد ویژگی‌های توپوگرافی منطقه در نظر گرفته و توزیع دقیق‌تری از بار باد را در ارتفاع ساختمان ارائه می‌دهد.

ژو و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۷، به‌منظور بررسی شاخص تأخیر برشی مثبت و منفی در سازه‌های کامپوزیت دارای مقاطع متغیر، روش و مدل تحلیلی جدیدی ارائه نمودند که سایر پژوهشگران می‌توانند از این مدل تحلیلی برای محاسبه‌ی تأخیر برشی توأمان فازهای مثبت و منفی استفاده نمایند. نی و کاو [۷] در سال ۲۰۱۸، به پژوهش در خصوص اثرات تأخیر برشی در اعضای سازه‌ای تیر و دیوار دارای مقطع I شکل پرداخته‌اند و در این پژوهش، روش جدیدی به‌منظور محاسبه‌ی شاخص تأخیر برشی اقتباس‌شده از اعضای سازه‌ای دارای مقطع T شکل نیز ارائه‌شده است. هولت [۸] در سال ۲۰۱۹، به مطالعه‌ی اثرات تأخیر برشی در سازه‌های بتن‌آرمه دارای دیوار C شکل پرداخته است. این پژوهش با نرم‌افزار اجزا محدودی VecTor و با تعداد نمونه‌های زیادی انجام‌شده است. نتایج نشان می‌دهد که اثرات تأخیر برشی در این نوع سازه‌ها زیاد است و بستگی زیادی به جهت اعمال نیروی جانبی باد دارد.

در این تحقیق، سازه‌های بتن‌آرمه‌ی بلندمرتبه با سیستم لوله در لوله با تعداد طبقات ۴۰ و ۶۰ در نرم‌افزار ETABS 2017 براساس ضوابط آیین‌نامه‌ی طراحی و سپس تحت اثر بار باد تحلیل دینامیکی شده‌اند و در نهایت به عنوان نوآوری تأثیر دسته‌بندی ستون‌ها بر شاخص تأخیر برشی در آن‌ها ارزیابی گردیده‌است.

• این امر امکان ایجاد فاصله‌ی بیشتر بین ستون‌ها را فراهم می‌سازد.

با استفاده از دیوارهای برشی کوپل به جای قاب‌های جان داخلی، سازه‌ای با شکل و رفتاری مشابه قاب‌های محیطی دسته‌بندی شده به دست می‌آید. در چنین حالتی، توزیع تنش در قاب‌های بال، تابعی از سختی‌های جانبی قاب‌ها و دیوارهای هم‌جهت می‌باشد [۹].

### ۳- مدل‌سازی

#### ۳-۱- معرفی ساختمان‌های مورد مطالعه

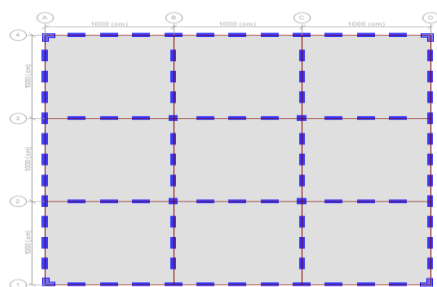
هدف از این مطالعه، بررسی رفتار ساختمان‌های بتنی بلندمرتبه با سیستم لوله در لوله دسته‌بندی شده با قطع و بدون قطع ستون‌ها در ارتفاع و پلان ساختمان‌ها تحت اثر بار باد می‌باشد. لذا دو ساختمان بلندمرتبه‌ی ۴۰ و ۶۰ طبقه در نظر گرفته شده است. ابعاد پلان این ساختمان‌ها ۳۰\*۳۰ متر مربع می‌باشد. فاصله‌ی ستون‌ها در سیستم لوله در لوله ۲/۵ متر و ارتفاع طبقات ۳/۸ متر در نظر گرفته شده است. شکل (۲) پلان ساختمان‌ها را نشان می‌دهد. مشخصات مصالح بتن مورد استفاده در مدل‌سازی در جدول (۱) و مشخصات میلگردهای اصلی و خاموت‌ها در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات مکانیکی بتن مورد نظر

مشخصات مکانیکی	مقاومت فشاری (kg/cm <sup>3</sup> )	ضریب پواسون	وزن مخصوص (kg/m <sup>3</sup> )	ضریب الاستیسیته (kg/cm <sup>2</sup> )
بتن	۳۵۰	۰/۲	۲۴۵۰	۳۰۲۰۰۰

جدول ۲- مشخصات مکانیکی فولاد مورد نظر

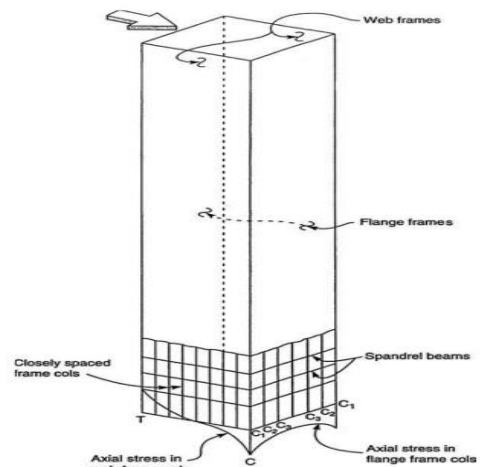
مشخصات مکانیکی	تنش تسلیم (kg/cm <sup>2</sup> )	تنش نهائی (kg/cm <sup>2</sup> )	وزن مخصوص (kg/m <sup>3</sup> )	ضریب الاستیسیته (kg/cm <sup>2</sup> )
فولاد AII	۳۰۰۰	۵۰۰۰	۷۸۵۰	۲۰۶۰۰۰
فولاد AIII	۴۰۰۰	۶۰۰۰	۷۸۵۰	۲۰۶۰۰۰



شکل ۲- پلان ساختمان‌های ۴۰ و ۶۰ طبقه در این تحقیق

### ۲- پدیده‌ی تأخیر برشی

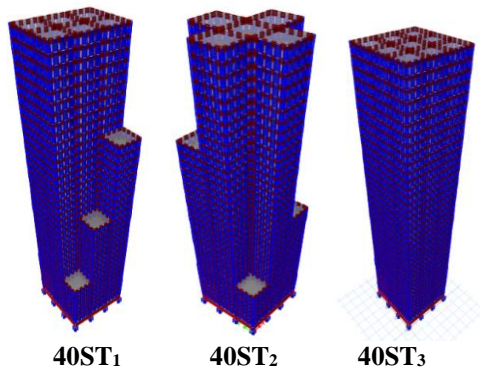
پدیده‌ی تأخیر برشی (Shear Lag) در سازه‌هایی با قاب محیطی یا سیستم لوله‌ای (Tube System) معادل در اثر تغییر مکان قائم ناهمگون ستون‌های واقع بر بال سازه به وجود می‌آید. هر ستون داخلی نسبت به ستون خارجی سمت خود، تغییر شکل و تنش کمتری خواهد داشت. زیرا لنگر اعمالی خارجی باید توسط کوپل داخلی ناشی از نیروهای کششی و فشاری دو سمت مخالف محور خنثی ساختمان تحمل گردد، تنش‌های ستون‌های گوشه‌ای بیشتر از تنش‌های ناشی از رفتار خالص لوله‌ای خواهد بود و تنش‌های ستون‌های میانی کمتر از آن می‌باشد و توزیع تنش محوری از حالت خطی (ایده آل) دور می‌شود. به‌طور کلی؛ (۱) به علت وجود تأخیر برشی، تنش خمشی در عرض مقطع یک سیستم لوله‌ای به‌طور یکنواخت توزیع نمی‌گردد. به‌طوری‌که تنش‌های ستون‌های گوشه بیش از تنش‌های ستون‌های میانی است. (۲) یکی از سیستم‌های متداول برای استفاده در ساختمان‌های بلند سیستم لوله‌ای است. اما این سیستم نیز به دلیل پدیده‌ای به نام تأخیر برشی تا اندازه زیادی کارایی خود را از دست می‌دهد و دچار کاهش سختی و زوال مقاومت می‌شود. با این وجود نسبت به سایر سیستم‌های موجود بسیار مقرون به صرفه‌تر است [۹]. مکانیسم ایجاد تأخیر برشی در سازه‌های لوله در لوله در شکل (۱) ارائه شده است.



شکل ۱- مکانیسم تأخیر برشی در سازه‌های لوله در لوله [۹]

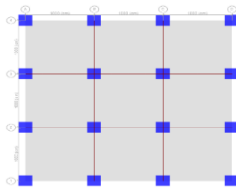
پدیده‌ی تأخیر برشی در قاب‌های محیطی، با افزودن پانل‌های ”جان“ (Web Frames) متشکل از قاب‌های میانی (Flange Frames) در سرتاسر عرض ساختمان و ایجاد یک سازه‌ی قاب محیطی دسته‌بندی شده یا گروه‌بندی شده به مقدار زیادی کاهش می‌یابد. وجود جان‌های داخلی، تأخیر برشی را به مقدار زیادی کاهش می‌دهد، در نتیجه:

- ستون‌های وجوه بال‌ها نسبت به حالت محیطی تکی تحت تنش یکنواخت‌تری قرار گرفته و سهم بیشتری در ایجاد سختی جانبی خواهد داشت.

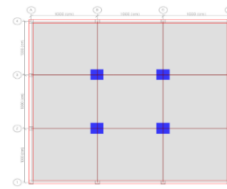


شکل ۳- ساختمان‌های ۴۰ طبقه‌ی موردنظر در این تحقیق

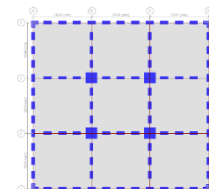
شکل‌های (۴) الی (۶) پلان‌های طبقات ساختمان‌های 40st1، 40st2 و 40st3 را نشان می‌دهند. مقاطع مورد نظر تیر و ستون همه ساختمان‌های ۴۰ طبقه مشابه و مطابق جدول (۳) ارائه شده است. لازم به ذکر است که همه‌ی ستون‌های طبقه‌ی اول و دوم مربعی به ابعاد ۲۰۰ سانتی‌متر می‌باشند. مطابق شکل (۵)، ابعاد چهار ستون میانی طبقه‌ی سوم تا طبقه‌ی دهم مربعی با طول هر ضلع ۲۰۰ سانتی‌متر، طبقه‌ی یازدهم تا بیستم طول مقطع این ستون‌ها ۱۲۵ سانتی‌متر و در ادامه هر ده طبقه ۲۵ سانتی‌متر از ابعاد آن‌ها کاسته شده است. دیوار برشی پیرامونی مدل شده در طبقه‌ی دوم نیز به ضخامت ۶۰ سانتی‌متر و معادل عرض ستون‌های طبقه‌ی سوم می‌باشد.



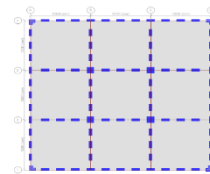
طبقه‌ی اول



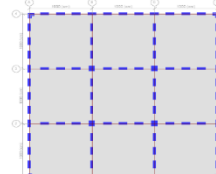
طبقه‌ی دوم



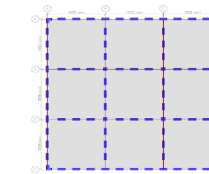
طبقات ۳ ام الی ۱۰ ام



طبقات ۱۱ ام الی ۲۰



طبقات ۲۱ ام الی ۳۰ ام



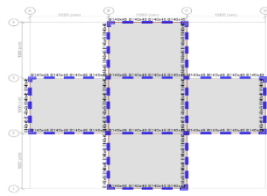
طبقات ۳۱ ام الی ۴۰ ام

شکل ۴- پلان طبقات مختلف ساختمان ۴۰ طبقه 40st1

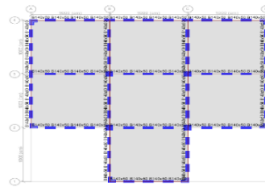
بار مرده‌ی طبقات ساختمان‌ها ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمربع و بار زنده‌ی طبقات ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع لحاظ شده است. به‌منظور طراحی المان‌های ساختمان‌های موردنظر از آیین‌نامه‌ی ACI 318-14 [۱۰] استفاده شده است. ترکیب بارهای طراحی نیز بر اساس آیین‌نامه‌ی فوق تنظیم شده است. بار جانبی موردنظر در طراحی بار باد بر اساس آیین‌نامه‌ی ASCE 7-10 [۱۱] بوده است. سرعت باد طراحی نیز ۹۰ کیلومتر بر ساعت و منطقه شهر تهران لحاظ شده است. در طراحی المان‌ها ضرایب ترک‌خوردگی بر اساس پیشنهاد استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم [۱۲] اعمال شده است. در مدل‌سازی ساختمان‌های موردنظر طبقه‌ی دوم شامل دیوار برشی پیرامونی بوده و سیستم باربر جانبی ساختمان‌های بلند مرتبه مورد مطالعه نیز قاب خمشی بتنی با شکل‌پذیری ویژه می‌باشد.

### ۱-۱-۳- ساختمان‌های ۴۰ طبقه

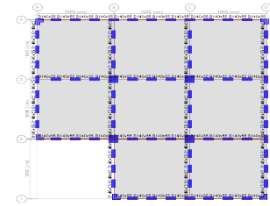
به‌منظور تحلیل و مقایسه‌ی رفتار ساختمان‌های مختلف، سازه‌ها به دو گروه تقسیم‌بندی شده‌اند و در نرم‌افزار ETABS 2017 [۱۳] مدل‌سازی شده‌اند: گروه اول ساختمان‌های ۴۰ طبقه (40st) و گروه دوم ساختمان‌های ۶۰ طبقه (60st). در هر گروه سه نوع ساختمان معرفی گردیده است. ساختمان ۴۰ طبقه بدون قطع طبقات با حروف اختصاری 40st1 و با قطع ستون نوع ۱ و ۲ نیز به‌طور اختصار با حروف اختصاری 40st2 و 40st3 نمایش داده می‌شود. مطابق شکل (۳) ساختمان‌های ۴۰ طبقه به‌صورت سه‌بعدی ارائه شده است.



طبقه‌ی ۳۱ ام

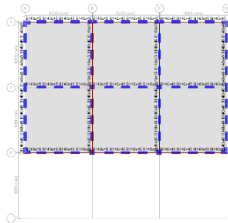


طبقه‌ی ۲۱ ام

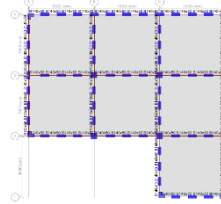


طبقه‌ی ۱۱ ام

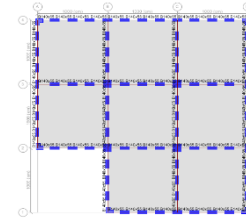
شکل ۵- محل قطع ستون‌ها در ساختمان 40st<sub>2</sub>



طبقه‌ی ۳۱ ام



طبقه‌ی ۲۱ ام

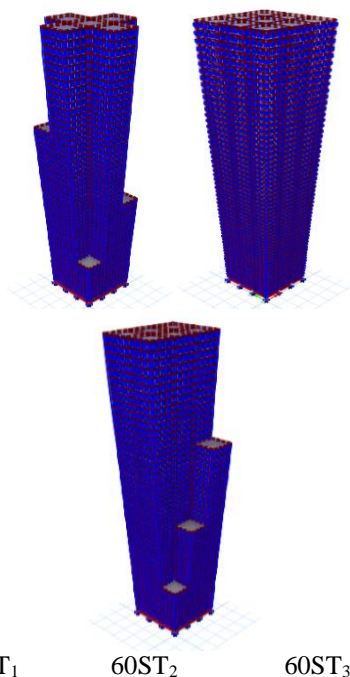


طبقه‌ی ۱۱ ام

شکل ۶- محل قطع ستون‌ها در ساختمان 40st<sub>3</sub>

جدول ۳- مقاطع طرح‌شده تیر و ستون ساختمان‌های ۴۰ طبقه

شماره طبقات	مقطع ستون axb(cm2)@nd(mm)	چگالی سطحی فولاد ستون‌ها(%)	مقطع تیر cm <sup>2</sup>
طبقات اول و دوم	140x70-56d36	۵/۸۱ %	140x70
طبقات سوم تا دهم	140x60-56d32	۵/۳۵ %	140x60
طبقات یازدهم الی بیستم	140x55-56d28	۴/۷۴ %	140x55
طبقات ۲۱ ام الی ۳۰ ام	140x50-46d26	۳/۴۸ %	140x50
طبقات ۳۱ ام الی ۴۰ ام	140x45-24d22	۱/۴۴ %	140x45



60ST<sub>1</sub>

60ST<sub>2</sub>

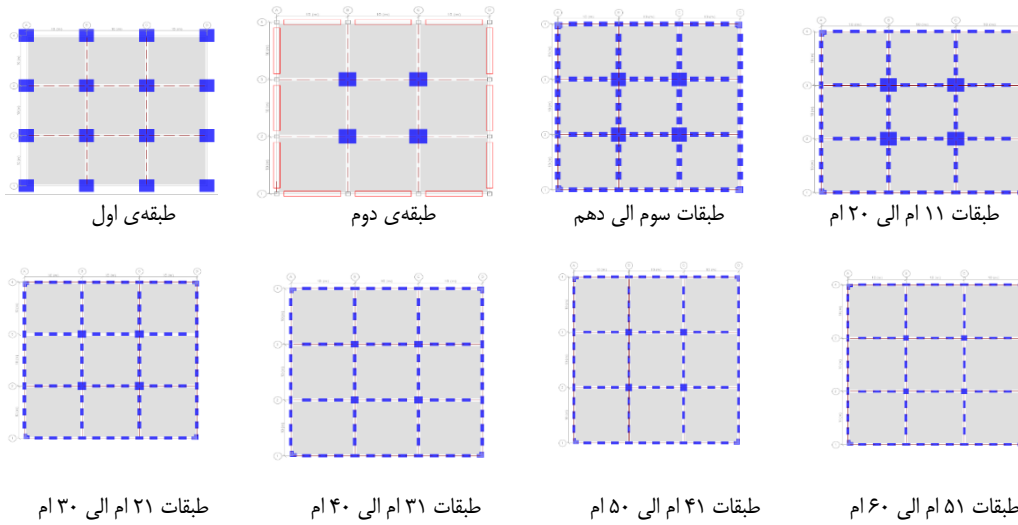
60ST<sub>3</sub>

### ۲-۱-۳- ساختمان‌های ۶۰ طبقه

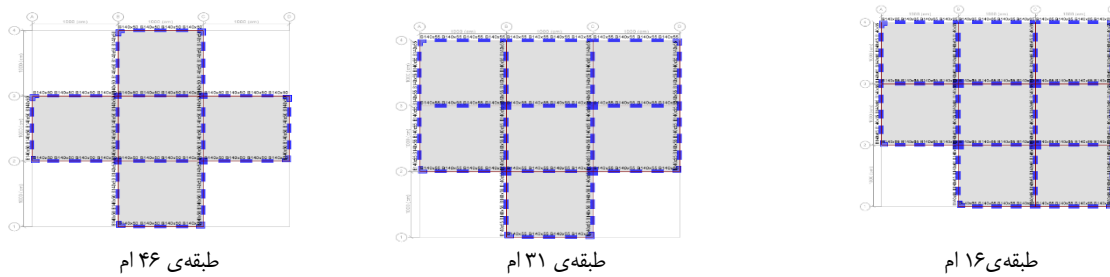
مطابق شکل (۷) ساختمان ۶۰ طبقه بدون قطع با حروف اختصاری 60st<sub>1</sub> و با قطع طبقات نوع ۲ و نوع ۳ نیز با حروف اختصاری 60st<sub>2</sub> و 60st<sub>3</sub> نمایش داده می‌شود. شکل‌های (۸) الی (۱۰) پلان‌های طبقات ساختمان‌های 60st<sub>1</sub>، 60st<sub>2</sub> و 60st<sub>3</sub> و محل قطع ستون‌ها را نشان می‌دهد.

مقاطع مورد استفاده تیر و ستون همه ساختمان‌های ۶۰ طبقه مشابه و مطابق جدول (۴) می‌باشد. لازم به ذکر است همه ستون‌های طبقه‌ی اول و دوم مربعی به ابعاد ۲۵۰ سانتی‌متر می‌باشد. مطابق شکل (۸)، ابعاد چهارستون میانی طبقه‌ی سوم تا پانزدهم مربعی با طول هر ضلع ۲۵۰ سانتی‌متر، طبقه‌ی پانزدهم تا سی ام طول مقطع این ستون‌ها ۱۵۰ سانتی‌متر و در ادامه هر ۱۵ طبقه ۲۵ سانتی‌متر از ابعاد آن‌ها کاسته شده است. دیوار برشی پیرامونی مدل شده در طبقه‌ی دوم نیز به ضخامت ۹۰ سانتی‌متر و معادل عرض ستون‌های طبقه‌ی سوم می‌باشد.

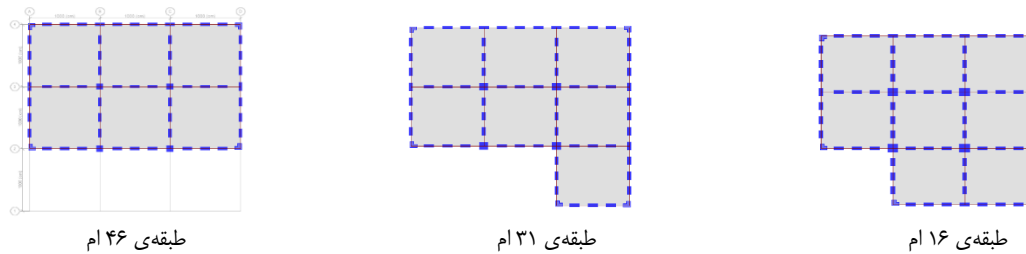
شکل ۷- ساختمان‌های ۶۰ طبقه موردنظر در این تحقیق



شکل ۸- پلان طبقات مختلف ساختمان ۶۰ طبقه 60st<sub>1</sub>



شکل ۹- محل قطع ستون‌ها در ساختمان 60st<sub>2</sub>

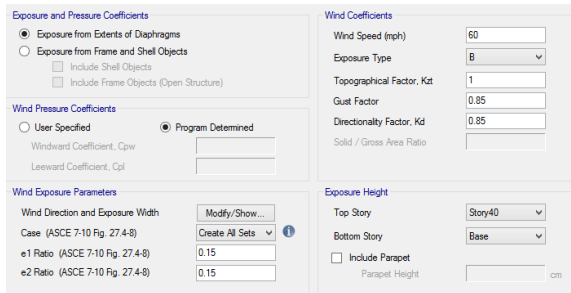


شکل ۱۰- محل قطع ستون‌ها در ساختمان 60st<sub>3</sub>

جدول ۴- مقاطع طرح شده تیر و ستون ساختمان‌های ۶۰ طبقه

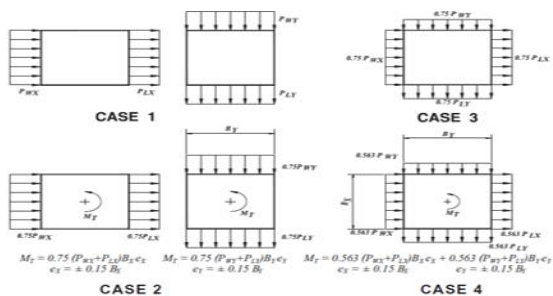
شماره طبقات	مقطع ستون axb(cm2)@nd(mm)	چگالی سطحی فولاد ستون‌ها(%)	مقطع تیر cm <sup>2</sup>
طبقات اول و دوم	140x110-56d36	۵/۴۱ %	140x110
طبقات سوم تا دهم	140x90-56d36	۴/۵۲ %	140x90
طبقات یازدهم الی بیستم	140x65-56d32	۴/۹۴ %	140x65
طبقات ۲۱ ام الی ۳۰ ام	140x60-56d28	۴/۱۰ %	140x60
طبقات ۳۱ ام الی ۴۰ ام	140x55-56d26	۳/۸۵ %	140x55
طبقات ۴۱ ام الی ۵۰ ام	140x50-46d22	۲/۴۹ %	140x50
طبقات ۵۱ ام الی ۶۰ ام	140x45-46d22	۲/۷۷ %	140x45





شکل ۱۲- تنظیم پارامترهای مربوط به اعمال بار باد بر اساس آیین‌نامه‌ی ASCE7-10 در نرم‌افزار ETABS 2017

مطابق آیین‌نامه‌ی ASCE 7-10 چهار نوع الگوی بارگذاری باید به ساختمان وارد گردد. این الگوهای بارگذاری در شکل (۱۳) ملاحظه می‌گردد.



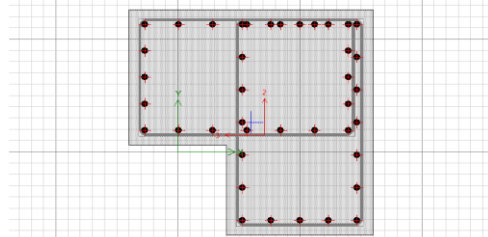
شکل ۱۳- انواع حالت‌های بارگذاری باد بر اساس آیین‌نامه‌ی ASCE 7-10

مطابق شکل (۱۳) نوع اول بارگذاری باد مربوط به بارگذاری به صورت مستقل در هر راستا می‌باشد. حالت دوم مربوط به  $0.75$  بار باد در هر راستا به صورت مستقل به اضافه‌ی ممان ناشی از خروج از مرکزیت معادل با  $0.15$  درصد بعد ساختمان می‌باشد. نوع سوم، الگویی است که  $0.75$  بارها در هر دو جهت به صورت هم‌زمان اعمال می‌گردد و نوع چهارم حالتی است که در آن بارها در هر دو راستا به طور هم‌زمان و با در نظر گرفتن خروج از مرکزیت اعمال می‌شود. با توجه به اینکه ضریب خروج از مرکزیت در هر دو راستا برابر با  $0.15$  می‌باشد کافی است در قسمت (Wind Exposure Parameters)، مقدار  $e_1$  و  $e_2$  برابر با  $0.15$  وارد شود و از قسمت case، گزینه‌ی (create all set) را انتخاب گردد تا تمامی حالات بارگذاری باد که شامل نوع یک تا چهار و با در نظر گرفتن علامت‌های مثبت و منفی برای خروج از مرکزیت می‌باشد به طور خودکار ایجاد شوند. تمام الگوهای ایجاد شده در شکل (۱۴) ملاحظه می‌گردد. ضرایب باد در قسمت (Wind Coefficients) وارد می‌شود. با توجه به اینکه مقدار سرعت مبنای باد در شهر تهران  $90$  کیلومتر بر ساعت است، مقدار آن معادل  $60$  مایل بر ساعت وارد می‌گردد. با توجه به محل قرارگیری ساختمان پارامتر (Exposure type) برابر با B, C یا D انتخاب می‌گردد. B برای مناطق شهری و فضاهای بسته، C برای مناطق روستایی و فضاهای باز و D برای دشت‌ها و سواحل دریایی می‌باشند. با توجه به اینکه ساختمان موردنظر در شهر قرار دارد، گزینه‌ی B انتخاب می‌شود. ضریب اهمیت بار باد برای کلیه‌ی ساختمان‌ها برابر با یک در نظر گرفته می‌شود. مطابق شکل (۱۲)

در مورد نحوه‌ی محاسبه‌ی ابعاد ستون‌های L شکل گوشه‌های پلان، با توجه به عرض ستون‌ها، سایر ابعاد این ستون‌ها به نحوی ایجاد شده است تا سطح مقطع ستون گوشه با سایر ستون‌های آن طبقه برابر باشد. به عنوان مثال شکل (۱۱) نمونه‌ای از ستون‌های گوشه که مربوط به طبقات ۲۰ ام الی ۳۰ ام ساختمان ۶۰ طبقه می‌باشد را نشان می‌دهد. ابعاد سایر ستون‌ها در این طبقه  $60 \times 140$  سانتی‌متر مربع می‌باشد. بنابراین می‌توان ابعاد ستون گوشه در این طبقه را به صورت رابطه‌ی (۱) محاسبه نمود.

$$(60 + a)^2 - a^2 = 140 \times 60 \quad (1)$$

در این رابطه a ابعاد گوشه‌ی حذف شده در شکل (۱۱) می‌باشد. بعد از محاسبه‌ی a می‌توان مقطع را در نرم‌افزار ETABS 2017 ایجاد نمود.



شکل ۱۱- نمونه‌ای از ستون‌های گوشه مربوط به طبقات ۲۰ ام الی ۳۰ ام ساختمان ۶۰ طبقه

### ۳-۲- بارگذاری باد

بارگذاری در سازه‌های بلند به دلیل طبقات زیاد، افزایش اثرات باد و اهمیت بیشتر اثرات دینامیکی، با سازه‌های کوتاه متفاوت است. مجموع نیروهای طبقات نیروهای بسیار زیادی را به سازه اعمال می‌کند. بار باد بر سازه بلند نه تنها بر سطح بزرگ‌تری نسبت به سازه کوتاه‌تر اثر می‌گذارد، بلکه در ارتفاع با شدت بیشتر و بازوی لنگر بزرگ‌تری بر سازه تاثیر می‌گذارد. بار باد در طراحی سازه‌های کوتاه عاملی تعیین کننده نیست ولی در سازه‌های بلند می‌تواند در طراحی و فرم سازه نقش بسیار مهم و اساسی داشته باشد. در حالت‌هایی خاص که سازه بسیار لاغر و انعطاف پذیر است، علاوه بر نیروهای داخلی، حرکات سازه نیز باید در تعیین اثرات بار محاسبه گردند. در مناطق زلزله خیز، ممکن است نیروهای ناشی از حرکات زمین از بارهای ناشی از باد بسیار بیشتر شوند و در نتیجه بارهای زلزله تعیین کننده فرم، طرح و هزینه سازه خواهند شد. از نظر رفتار سازه، پاسخ دینامیکی ساختمان نقش مهمی در نحوه اثر و کمیت بارهای موثر بر سازه خواهد داشت.

بار جانبی باد بر اساس آیین‌نامه‌ی ASCE 7-10 توسط نرم‌افزار ETABS 2017 محاسبه و بر ساختمان‌ها اعمال شده است. سرعت باد طراحی نیز  $90$  کیلومتر بر ساعت و منطقه شهر تهران لحاظ شده است. شکل (۱۲) نحوه تنظیم پارامترهای مربوط به اعمال بار باد بر اساس آیین‌نامه‌ی مذکور را در نرم‌افزار ETABS 2017 نشان می‌دهد.

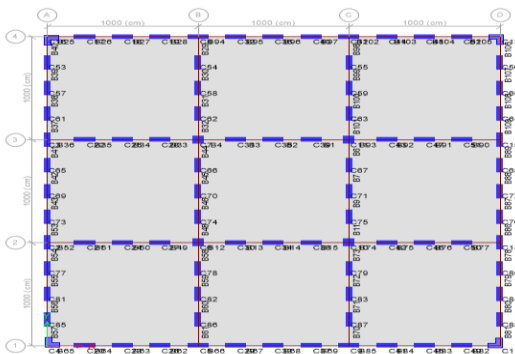
است و در بخش بعدی نتایج مرتبط با تاثیر دسته‌بندی ستون‌ها در ارتفاع و پلان بر شاخص تأخیر برشی ارائه شده است.

#### ۴- بحث و بررسی نتایج

##### ۴-۱- ساختمان‌های ۴۰ طبقه

در این بخش، رفتار ساختمان‌های ۴۰ طبقه شامل حالت‌های مختلف با و بدون قطع ستون‌ها در ارتفاع و پلان (40st<sub>3</sub> و 40st<sub>2</sub>; 40st<sub>1</sub>) بررسی می‌شود. به منظور ارزیابی مقدار نیروی محوری ستون‌ها مطابق شکل (۱۶) ستون‌های محور A بجز ستون‌های گوشه در نظر گرفته شده است. این ستون‌ها که در مقابل نیروی باد با جهت محور X قرار گرفته‌اند، روی محور A از بالا به پایین با شماره‌های ۱ الی ۱۱ شماره‌گذاری داده شده‌اند. توضیحات فوق برای ارائه نتایج ساختمان‌های ۶۰ طبقه نیز صادق است. سپس نیروی باد در راستای X اعمال و نیروی محوری ستون‌های مذکور در طبقات ۵، ۱۵، ۲۵، ۳۵ و ۴۰ م به دست آمده است. با توجه به خروجی‌های نرم‌افزار می‌توان شاخص‌های تأخیر برشی را در گروه ساختمان‌های ۴۰ طبقه و در طبقات مختلف به دست آورد و نتایج را باهم مقایسه نمود. ملاحظه می‌گردد در ساختمان 40st<sub>1</sub> و در طبقه ۵ نیروی محوری ستون‌های میانی در هر دهانه کمتر از نیروی محوری ستون‌های گوشه آن دهانه می‌باشد. با توجه به اینکه شاخص تأخیر برشی به صورت نیروی محوری ستون گوشه به میانی تعریف می‌شود دو حالت قابل تعریف است:

- (۱) شاخص تأخیر برشی بزرگ‌تر از یک، که به این حالت شاخص تأخیر برشی مثبت گفته می‌شود. در این حالت نیروی محوری فشاری ستون‌های گوشه‌ی دهانه بزرگ‌تر از نیروی محوری ستون‌های میانی است.
- (۲) شاخص تأخیر برشی کم‌تر از یک، که به این حالت شاخص تأخیر برشی منفی گفته می‌شود. در این حالت نیروی محوری فشاری ستون‌های میانی بزرگ‌تر از نیروی محوری ستون‌های گوشه می‌باشد.



شکل ۱۶- ستون‌های موردنظر محور A جهت ارزیابی نیروی محوری آن‌ها در ساختمان‌های ۴۰ و ۶۰ طبقه

ضریب شدت باد (Gust Factor) برای ساختمان‌ها برابر با ۰/۸۵ در نظر گرفته می‌شود. ضریب توپوگرافی (Topographical Factor, Kzt) که وابسته به توپوگرافی محلی سازه می‌باشد. با توجه به شرایط موقعیت سازه‌های مورد مطالعه، این فاکتور برابر یک می‌بایست در نظر گرفته شود و ضریب جهت باد (Directory Factor) را طبق جدول آیین‌نامه‌ی ASCE 7-10 برابر با ۰/۸۵ لحاظ می‌گردد.

Wind Exposure Parameters		Exposure Height				
Wind Direction and Exposure Width		Top Story		STORY6		
Case (ASCE 7-10 Fig. 27.4-8)	0.15	Bottom Story		BASE		
e1 Ratio (ASCE 7-10 Fig. 27.4-8)	0.15	Set	Angle	ASCE Case	e1 Ratio	e2 Ratio
e2 Ratio (ASCE 7-10 Fig. 27.4-8)	0.15	1	0	1	0	0
		2	90	1	0	0
		3	0	2	0.15	0
		4	0	2	-0.15	0
		5	90	2	0.15	0
		6	90	2	-0.15	0
		7	0	3	0	0
		8	90	3	0	0
		9	0	4	0.15	0.15
		10	0	4	-0.15	-0.15
		11	90	4	0.15	0.15
		12	90	4	-0.15	-0.15

شکل ۱۴- الگوهای ایجاد شده بار باد در تحلیل ساختمان‌ها در نرم‌افزار

##### ETABS 2017

در این تحقیق، برای در نظر گرفتن بار باد در برنامه‌ی Etabs 2017 با توجه به آیین‌نامه‌ی ASCE 7-10 مراحل زیر انجام می‌شود. از قسمت Define Wind، گزینه‌ی (load patterns) انتخاب و نوع بار Wind انتخاب می‌گردد و از قسمت (Auto lateral load) آیین‌نامه‌ی ASCE 7-10 مطابق شکل (۱۵) انتخاب می‌شود.

شکل ۱۵- تعریف الگوهای بار در این تحقیق

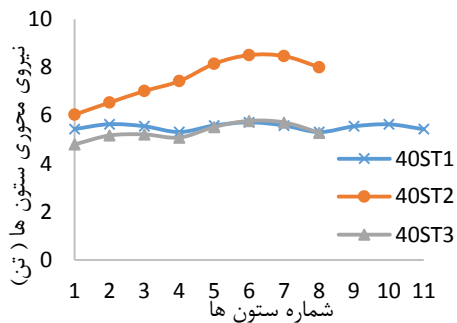
از قسمت (Modify Lateral Load) پارامترها و مقادیر بار جانبی باد مانند شکل (۱۲) تنظیم می‌گردد. ارتفاع باد خور سازه‌ها در قسمت (Exposure Height) در نظر گرفته می‌شود که آن را از Base تا طبقه‌ی بام در نظر گرفته می‌شود. در ادامه گام به گام تحلیل سازه‌های مذکور تحت اثر بار باد براساس آیین‌نامه‌ی ASCE 7-10 به شرح ذیل ارائه می‌گردد: (۱) تعیین گروه‌بندی ساختمان‌ها براساس اهمیت. (۲) تعیین سرعت پایه باد. (۳) تعیین پارامترهای باد مانند: ضریب جهت باد، تعیین شرایط محیطی، تعیین ضرایب توپوگرافی، تعیین ضریب اوج باد، ضریب فشار داخلی، تعیین ضریب مکان و در نهایت محاسبه‌ی فشار سرعت و فشار باد به شرح ذیل ارائه می‌گردد:

$$q_z = 0.00256 K_z K_{zt} K_d V^2 \quad (۲)$$

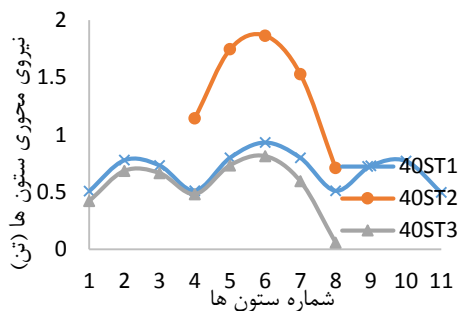
$$p = q G C_{p,wind} + q_h (G C_{p,lee}) \quad (۳)$$

با توجه به رابطه‌های (۲) و (۳) که بر گرفته از آیین‌نامه‌ی ASCE 7-10 می‌باشد، تحلیل سازه‌های مذکور تحت اثر بارگذاری باد انجام شده





شکل ۱۹- نیروی محوری ستون‌های موردنظر در ساختمان‌های ۴۰ طبقه در طبقه ۲۵ ام

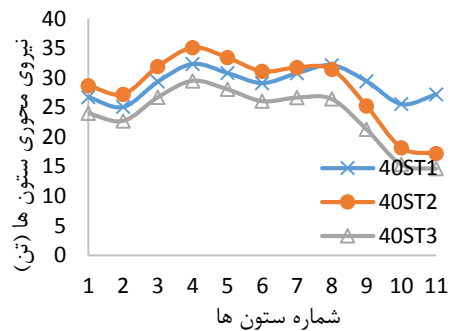


شکل ۲۰- نیروی محوری ستون‌های موردنظر در ساختمان‌های ۴۰ طبقه در طبقه ۳۵ ام

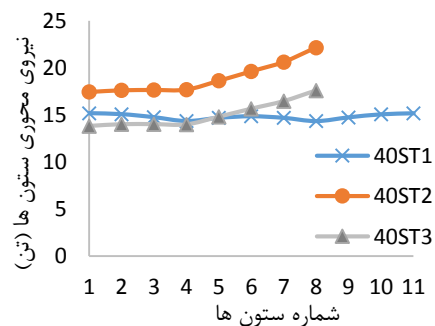
مطابق جدول (۵) شاخص تأخیر برشی دهانه‌های مختلف و میانگین‌های مربوطه در ساختمان‌های ۴۰ طبقه و در طبقات ۵ ام، ۱۵ ام، ۲۵ ام و ۳۵ ام را نشان می‌دهد. مطابق این جدول شاخص تأخیر برشی در طبقه ۵ ام مثبت و نیروی محوری ستون‌های گوشه دهانه‌ها بیش از نیروی محوری ستون‌های میانی هر دهانه است. به‌طور متوسط شاخص تأخیر برشی ساختمان‌های 40st2 و 40st3 برابر و در حدود ۱۶/۷ درصد بیش از شاخص تأخیر برشی ساختمان 40st1 می‌باشد. مقادیر شاخص تأخیر برشی در طبقه ۱۵ ام کوچک‌تر از یک و به عبارتی منفی است و نیروی محوری ستون‌های میانی بیش از گوشه می‌باشد. همچنین مقادیر شاخص تأخیر برشی ساختمان‌های تیپ ۲ و ۳، در طبقه ۲۵ ام کمتر می‌باشد که عدم توزیع متوازن نیروهای محوری فشاری را در ستون‌های هر دهانه نشان می‌دهد. در مورد ساختمان 40st2 شاخص تأخیر برشی ۸/۷ درصد و در مورد ساختمان 40st3، ۳/۲ درصد کمتر از ساختمان مرجع 40st1 می‌باشد.

شکل‌های (۱۷) تا (۲۰) نیروی محوری ستون‌های موردنظر در ساختمان ۴۰ طبقه را در طبقه ۵ ام، ۱۵ ام، ۲۵ ام و ۳۵ ام نشان می‌دهند. مطابق شکل (۱۷) توزیع نیروی محوری در ستون‌های ساختمان 40st1 متقارن و متوازن می‌باشد. با توجه به قطع ستون‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ ام از طبقه ۱۰ ام به بالا در ساختمان‌های 40st2 و 40st3، نیروی محوری این ستون‌ها در طبقه ۵ ام کمتر شده است. در سایر ستون‌ها نیروی محوری ساختمان 40st2 بیشتر و 40st3 کمتر است. با توجه به قطع ستون‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ ام در ساختمان‌های 40st2 و 40st3، نمودار این ساختمان‌ها در شکل (۱۸) ترسیم نشده است. مطابق این شکل نیروی محوری ستون‌ها در ساختمان 40st2 بیش از دو ساختمان دیگر است. با توجه به قطع ستون‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ ام از طبقه ۱۰ ام به بالا در ساختمان‌های 40st2 و 40st3، مقادیر نیروی محوری ستون‌های ۵ ام الی ۸ ام افزایش می‌یابد.

مطابق شکل (۱۹) در طبقه ۲۵ ام نیروی محوری ستون‌های ساختمان 40st2 بیشتر است. شاخص تأخیر برشی در این طبقه منفی است و نیروی محوری ستون‌های گوشه کمتر از میانی در هر دهانه است. در شکل (۲۰) نیز ملاحظه می‌گردد که نیروی محوری فشاری ساختمان 40st2 بیش از سایر ساختمان‌ها و 40st3 کمترین است.

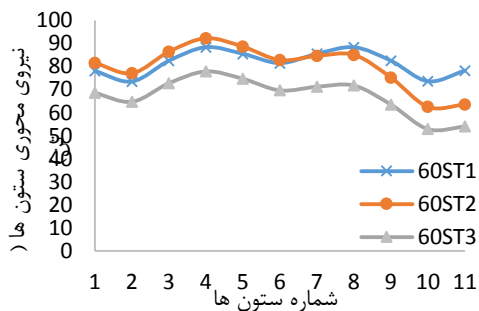


شکل ۱۷- نیروی محوری ستون‌های موردنظر در ساختمان‌های ۴۰ طبقه در طبقه ۵ ام

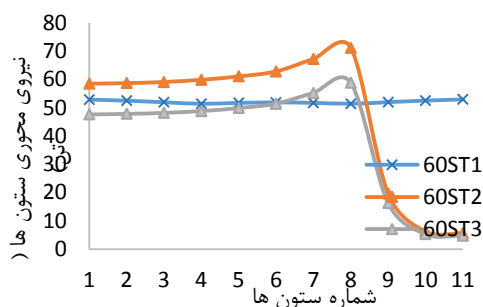


شکل ۱۸- نیروی محوری ستون‌های موردنظر در ساختمان‌های ۴۰ طبقه در طبقه ۱۵ ام

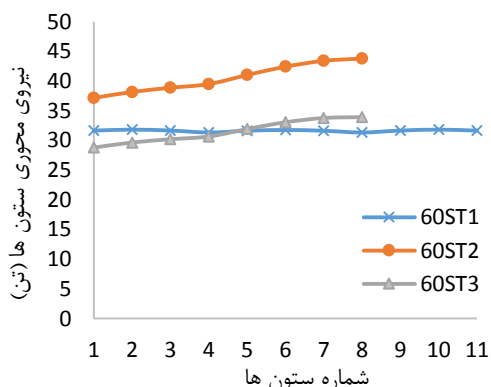
همان طور که شکل (۲۵) نشان می‌دهد، رفتار ساختمان  $60st_3$  مطابق بیشتری با ساختمان  $60st_1$  دارد و توزیع نیروهای محوری در ستون‌های این طبقه در ساختمان  $60st_2$  نامتناسب می‌باشد. علت کاهش نیروی محوری ستون‌های ۱ الی ۴ ساختمان  $60st_2$ ، قطع ستون‌های بالایی آن‌ها در طبقات بالاتر می‌باشد. با توجه به شکل (۲۶)، ملاحظه می‌گردد که نیروی محوری ستون‌های ساختمان  $60st_2$  بیش از ستون‌های متناظر سایر ساختمان‌هاست. با توجه به اینکه نیروی محوری ستون‌های گوشه کمتر از میانی می‌باشد، شاخص تأخیر برشی همه ساختمان‌ها منفی است.



شکل ۲۱- نیروی محوری ستون‌های موردنظر در ساختمان‌های ۶۰ طبقه در طبقه ۵ ام



شکل ۲۲- نیروی محوری ستون‌های موردنظر در ساختمان‌های ۶۰ طبقه در طبقه ۱۵ ام



شکل ۲۳- نیروی محوری ستون‌های موردنظر در ساختمان‌های ۶۰ طبقه در طبقه ۲۵ ام

مطابق جدول (۵) شاخص تأخیر برشی ستون‌ها در طبقه ۳۵ ام منفی است و نیروی محوری ستون‌های میانی بیشتر است. این مسئله در ساختمان‌های با قطع ستون‌ها در ارتفاع محسوس‌تر است. مقادیر شاخص تأخیر برشی در ساختمان‌های  $40st_2$  و  $40st_3$  به ترتیب ۳۷ و ۴۴ درصد کمتر از ساختمان  $40st_1$  می‌باشد.

جدول ۵- بررسی شاخص تأخیر برشی دهانه‌های مختلف سازه‌های ۴۰ طبقه

میانگین	دهانه‌ی سوم	دهانه‌ی دوم	دهانه‌ی اول	مدل	شاخص تأخیر برشی
۱/۲۰	۱/۲۲	۱/۱۱	۱/۲۸	$40ST_1$	شاخص تأخیر برشی دهانه‌های مختلف ساختمان‌های ۴۰ طبقه در طبقه ۵ ام
۱/۴۰	۱/۸۲	۱/۱۲	۱/۲۸	$40ST_2$	
۱/۴۰	۱/۸۰	۱/۱۳	۱/۲۹	$40ST_3$	
-۰/۹۵	-۰/۹۵	-۰/۹۶	-۰/۹۵	$40ST_1$	شاخص تأخیر برشی دهانه‌های مختلف ساختمان‌های ۴۰ طبقه در طبقه ۱۵ ام
-۰/۹۲	---	-۰/۸۶	-۰/۹۹	$40ST_2$	
-۰/۹۲	---	-۰/۸۴	-۰/۹۸	$40ST_3$	
-۰/۹۲	-۰/۹۳	-۰/۹۲	-۰/۹۰	$40ST_1$	شاخص تأخیر برشی دهانه‌های مختلف ساختمان‌های ۴۰ طبقه در طبقه ۲۵ ام
-۰/۸۴	---	-۰/۸۷	-۰/۸۱	$40ST_2$	
-۰/۸۹	---	-۰/۸۷	-۰/۹۱	$40ST_3$	
-۰/۶۱	-۰/۶۳	-۰/۵۴	-۰/۶۵	$40ST_1$	شاخص تأخیر برشی دهانه‌های مختلف ساختمان‌های ۴۰ طبقه در طبقه ۲۵ ام
-۰/۳۸	---	-۰/۳۸	---	$40ST_2$	
-۰/۳۴	---	-۰/۰۷۴	-۰/۶۱	$40ST_3$	

## ۲-۴- ساختمان‌های ۶۰ طبقه

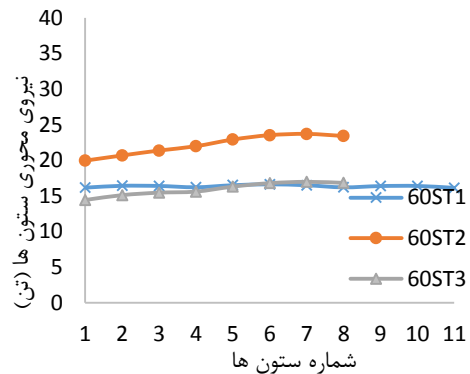
در این بخش، رفتار ساختمان‌های ۶۰ طبقه شامل سازه‌های ( $60st_1$ ,  $60st_2$  و  $60st_3$ ) تحت اثر باد بررسی می‌شود.

به‌منظور بررسی نیروی محوری ستون‌های واقع در محور A، شکل‌های (۲۱) تا (۲۶) ارائه می‌گردد. نتایج حاصل برای محاسبه شاخص‌های تأخیر برشی و مقایسه‌ی رفتار ساختمان‌های ۶۰ طبقه استفاده خواهد شد. شکل (۲۱) نیروی محوری ستون‌های طبقه ۵ ام را نشان می‌دهد. با توجه به قطع ستون‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ طبقات این به بالای ساختمان‌های  $60st_2$  و  $60st_3$  مقدار نیروی محوری این ستون‌ها در این طبقه نسبت به ساختمان  $60st_1$  کمتر می‌باشد. در بقیه ستون‌ها نیروی محوری ستون‌های ساختمان  $60st_2$  بیشتر و  $60st_3$  کمتر است. با توجه به شکل (۲۱) مشخص است که نیروی محوری ستون‌های گوشه بیش از ستون‌های میانه هر دهانه می‌باشد. در این حالت شاخص تأخیر برشی مثبت می‌باشد. مطابق شکل (۲۲)، به دلیل قطع ستون‌های بالاتر از طبقه ۱۵ ام نیروهای محوری ستون‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ ام به‌طور محسوسی کاهش یافته است. در طبقه ۲۵ ام اختلاف محسوسی میان نیروی محوری ستون‌های میانی و گوشه مشاهده نمی‌شود. البته در ساختمان  $60st_1$  نیروی محوری ستون‌های میانی همچنان به میزان اندکی بیش از نیروی محوری ستون‌های گوشه است. مطابق شکل فوق بیشترین نیروی محوری ستون‌ها مربوط به ساختمان  $60st_2$  می‌باشد. مطابق شکل (۲۴)، نتایج به‌دست‌آمده مشابه شکل (۲۳) می‌باشد. مطابق این شکل نیروی محوری ستون‌های این طبقه در ساختمان  $60st_3$  به نتایج ساختمان  $60st_1$  نسبت به طبقه ۲۵ ام نزدیک‌تر است.

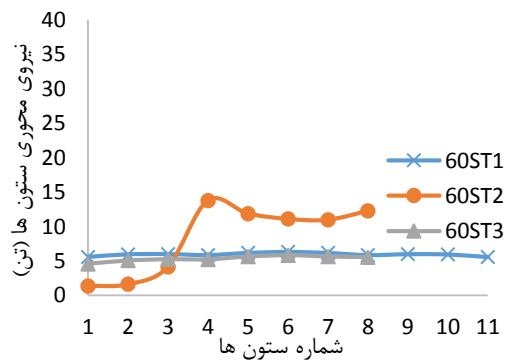
تأخیر برشی در این دهانه در حدود ۴/۹ می‌باشد که افزایش قابل توجهی نسبت به دهانه مربوط به ستون‌های شماره‌ی ۱، ۲ و ۳ نشان می‌دهد. برای سایر دهانه‌ها اختلاف محسوسی میان نیروی محوری میانی و گوشه دهانه‌ها ملاحظه نمی‌شود و شاخص تأخیر برشی در حدود یک می‌باشد. در طبقه‌ی ۳۵ ام ملاحظه می‌گردد شاخص تأخیر برشی ساختمان‌های با قطع ستون کوچک‌تر است. شاخص تأخیر برشی در طبقه‌ی ۴۵ ام ساختمان‌های 60st<sub>1</sub> و 60st<sub>3</sub> منفی و شاخص تأخیر برشی ساختمان 60st<sub>2</sub> مثبت و بزرگ می‌باشد. در طبقه‌ی ۵۵ ام نیز کمترین شاخص تأخیر برشی مربوط به ساختمان 60st<sub>2</sub> است.

جدول ۶- شاخص تأخیر برشی دهانه‌های مختلف سازه‌های ۶۰ طبقه

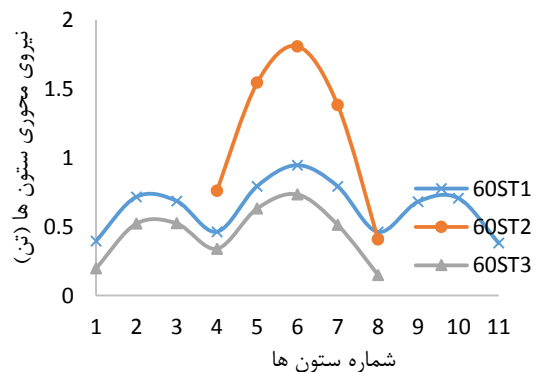
شاخص تأخیر برشی	مدل	دهانه‌ی			میانگین
		اول	دوم	سوم	
شاخص تأخیر برشی دهانه‌های مختلف ساختمان‌های ۶۰ طبقه در طبقه ۵ ام	60ST <sub>1</sub>	۱/۲۰	۱/۰۶	۱/۱۷	۱/۱۴
	60ST <sub>2</sub>	۱/۱۹	۱/۱۱	۱/۳۶	۱/۲۲
	60ST <sub>3</sub>	۱/۲۰	۱/۱۱	۱/۳۵	۱/۲۲
شاخص تأخیر برشی دهانه‌های مختلف ساختمان‌های ۶۰ طبقه در طبقه ۱۵ ام	60ST <sub>1</sub>	۰/۹۷	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۸
	60ST <sub>2</sub>	۰/۹۷	۱/۱۴	۱۲/۵	۴/۸۷
	60ST <sub>3</sub>	۰/۹۷	۱/۱۳	۱۲/۶	۴/۹
شاخص تأخیر برشی دهانه‌های مختلف ساختمان‌های ۶۰ طبقه در طبقه ۲۵ ام	60ST <sub>1</sub>	۰/۹۷	۰/۹۵	۰/۹۸	۰/۹۷
	60ST <sub>2</sub>	۰/۹۵	۰/۹۱	---	۰/۹۳
	60ST <sub>3</sub>	۰/۹۴	۰/۹۰	---	۰/۹۲
شاخص تأخیر برشی دهانه‌های مختلف ساختمان‌های ۶۰ طبقه در طبقه ۳۵ ام	60ST <sub>1</sub>	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۷
	60ST <sub>2</sub>	۰/۹۳	۰/۹۲	---	۰/۹۲۵
	60ST <sub>3</sub>	۰/۹۳	۰/۹۲	---	۰/۹۲۵
شاخص تأخیر برشی دهانه‌های مختلف ساختمان‌های ۶۰ طبقه در طبقه ۴۵ ام	60ST <sub>1</sub>	۰/۹۷	۰/۹۰	۰/۹۳	۰/۹۴
	60ST <sub>2</sub>	۸,۷	۱/۲۶	---	۴/۹۸
	60ST <sub>3</sub>	۰/۹۷	۰/۹۰	---	۰/۹۴
شاخص تأخیر برشی دهانه‌های مختلف ساختمان‌های ۶۰ طبقه در طبقه ۵۵ ام	60ST <sub>1</sub>	۰/۵۴	۰/۴۸	۰/۵۴	۰/۵۲
	60ST <sub>2</sub>	---	۰/۲۲	---	۰/۲۲
	60ST <sub>3</sub>	۰/۳۶	۰/۲۰	---	۰/۲۸



شکل ۲۴- نیروی محوری ستون‌های موردنظر در ساختمان‌های ۶۰ طبقه در طبقه‌ی ۳۵ ام



شکل ۲۵- نیروی محوری ستون‌های موردنظر در ساختمان‌های ۶۰ طبقه در طبقه‌ی ۴۵ ام



شکل ۲۶- نیروی محوری ستون‌های موردنظر در ساختمان‌های ۶۰ طبقه در طبقه‌ی ۵۵ ام

در جدول (۶) مقادیر شاخص تأخیر برشی هر دهانه و میانگین‌های مربوط به هر دهانه ارائه شده است. در طبقه‌ی ۵ ام مقادیر شاخص تأخیر برشی بزرگ‌تر از یک می‌باشد. مقادیر این نسبت در ساختمان‌های با قطع ستون‌ها در ارتفاع در حدود ۷ درصد بیش از ساختمان 60st<sub>1</sub> است. با توجه به جدول (۶)، شاخص تأخیر برشی در این دهانه مثبت و ستون‌های میانی نیروی محوری بسیار کمتری دارند. مقادیر شاخص

## ۵- نتیجه گیری

## مراجع

- [1] Moussad A. A, Zosso A, and Resta R. (2011). Tall buildings under multidirectional winds: response prediction and reduction. Wind tunnels and experimental fluid dynamics research journal, pp 301-324.
- [2] Biraghi, H. and Kheyroddin, A. (2013). Comparison of the shear lag of the tube system in a high-rise concrete building with bundled tube system, the 5th National Concrete Conference of Iran, Tehran.
- [3] Antipin A.A., Alekhin V.N., Gorodilov S.N., Khramtsov S.V and Noskov A.S. (2014). Numerical Simulation of Wind Loads on High-Rise Buildings, 19th Australasian Fluid Mechanics Conference, Melbourne, Australia.
- [4] Shraddha J. Patil, R. S. Talikoti, (2015). Effect of Wind Load on High Rise Structure, International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR), 3(7).
- [5] Moravej, H. Hatami, M. Naghshbandi, R. Mousavi Siamakani, (2015). Y. Wind load analysis of buildings in hill-shape zone, Int. Journal of Applied Sciences and Engineering Research, 4(1).
- [6] Zhu L, Nie J, Ji W. (2017). Positive and negative shear lag behaviors of composite twin-girder decks with varying cross-section, Journal of Science China Technological Sciences, 60(1), pp 116-132. <https://doi.org/10.1007/s11431-016-0314-x>.
- [7] Ni X, Cao S. (2018). Shear lag analysis of I-shaped structural members, Journal of The Structural Design of Tall and Special Buildings, 27(10). <https://doi.org/10.1002/tal.1471>.
- [8] D.Hoult R. (2019), Shear Lag Effects in Reinforced Concrete C-Shaped Walls, Journal of Structural Engineering, 145 (3). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002272](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002272).
- [9] Siahpolo, N. Kheyroddin, A. and Gerami, M. (2015), An Analytical Study of the Advantages and Disadvantages of Types of Common Systems in Tall Structures Compared to Peripheral Tubes under Wind Load Based on ASCE7-05, Amir Kabir Scientific Journal, 48(1), pp 87-100. <https://doi.org/10.22060/CEEJ.2016.644>
- [10] Building Code Requirements for Structural Concrete, ACI 318-14 (2014). American Concrete Institute, ACI Committee 318, USA. 503p.
- [11] American Society of Civil Engineers (ASCE) (2010) Minimum design loads for buildings and other structures. ASCE7-10.
- [12] BHRC. (2014). Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings. Tehran: Building and Housing Research Centre, Standard No. 2800. (In Persian).
- [13] Habibullah, A. (2017). ETABS-Three Dimensional Analysis of Building Systems. Manual. Computers and Structures Inc., Berkeley, California. <https://www.csiamerica.com/>

تحلیل و بررسی ساختمان‌های بتن‌آرمه‌ی بلندمرتبه‌ی ۴۰ و ۶۰ طبقه تحت اثر بار جانبی باد در سه حالت با و بدون قطع ستون انجام شده است تا بتوان به درستی نقش دسته‌بندی ستون‌ها را در شاخص تأخیر برشی مطالعه نمود. مهم‌ترین نتایج این تحقیق به شرح ذیل ارائه گردیده‌است:

۱- با توجه به قطع ستون‌ها در طبقات ۵ ام، ۱۵ ام، ۲۵ ام و ۳۵ ام در ساختمان‌های ۴۰ طبقه، در طبقه‌ی ۵ ام شاخص تأخیر برشی مثبت (یا بزرگ‌تر از یک) بوده و به اصطلاح نیروی محوری ستون‌های گوشه بیش از نیروی محوری ستون‌های میانی هر دهانه است. در طبقه‌ی ۱۵ ام و ۲۵ ام شاخص تأخیر برشی منفی و البته نزدیک به یک بوده است. در طبقه‌ی ۳۵ ام شاخص تأخیر برشی منفی و میانگین دهانه‌ها برای ساختمان‌های نوع ۱، ۲ و ۳ به ترتیب ۰/۶۱، ۰/۳۸ و ۰/۳۴ است. ملاحظه گردیده‌است شاخص تأخیر برشی میانگین ساختمان ۴۰ طبقه نوع ۳ کمترین بوده و نشان‌دهنده عدم توزیع متوازن نیروی محوری در ستون‌های این ساختمان در طبقه‌ی ۳۵ ام است.

۲- با بررسی نتایج نیروی محوری ستون‌های ساختمان‌های ۴۰ طبقه ملاحظه گردید در طبقات پایینی ساختمان مقدار نیروی محوری ستون‌های گوشه بیش از میانی است و هر چه در ارتفاع ساختمان بالاتر رویم شاخص تأخیر برشی از فاز مثبت به فاز منفی تغییر حالت داده و در طبقات بالایی نیروی محوری ستون‌های میانی بیش از ستون‌های گوشه است. در میانه ارتفاع ساختمان توزیع تقریباً متوازی از نیروی محوری ستون‌های گوشه و میانی ملاحظه می‌شود و شاخص تأخیر برشی در حدود یک است.

۳- در طبقاتی که ستون‌های طبقات بالایی آن‌ها قطع شده‌اند، نیروی محوری ستون‌ها به‌طور محسوسی کاهش یافته است. همین امر موجب عدم توزیع مورد انتظار نیروی محوری در آن ستون‌ها شده است.

۴- با توجه به قطع ستون‌ها در طبقات ۵ ام، ۱۵ ام، ۲۵ ام، ۳۵ ام، ۴۵ ام و ۵۵ ام در ساختمان‌های ۶۰ طبقه، ملاحظه گردید که در طبقات پایین شاخص تأخیر برشی مثبت و در طبقات بالا شاخص تأخیر برشی منفی است. نتایج حاصل مشابه نتایج ساختمان‌های ۴۰ طبقه و توضیحات مربوطه است.

۵- با مقایسه‌ی رفتار ساختمان‌های موردنظر مشاهده گردید که ساختمان‌های نوع ۲ و ۳ هر گروه در حالت شاخص تأخیر برشی مثبت، مقادیری بزرگ‌تر و در حالت شاخص تأخیر برشی منفی مقادیر کوچک‌تری نسبت به نوع ۱ هر گروه نشان داده‌اند. این موضوع بیان‌گر عدم توزیع متناسب نیروی محوری بین ستون‌های هر دهانه در این ساختمان‌هاست. قطع ستون‌ها در طبقات مختلف گاهی باعث ایجاد شاخص‌های تأخیر برشی بسیار بزرگ و گاهی اوقات غیرقابل انتظار شده است که حتماً در اجرای این‌گونه ساختمان‌ها باید مدنظر قرار گرفته شود. به‌عنوان مثال شاخص تأخیر برشی در طبقه‌ی ۴۵ ام ساختمان ۶۰ طبقه ساختمان اصلی 60st<sub>1</sub> منفی و معادل ۰/۹۸ است. در همین طبقه، شاخص تأخیر برشی ساختمان‌های نوع 60st<sub>2</sub> و 60st<sub>3</sub> به ترتیب ۴/۹۸ و ۰/۹۴ است. ملاحظه گردیده‌است که در سازه 60st<sub>2</sub> برخلاف سایر نتایج شاخص تأخیر برشی مثبت و مقداری بزرگ نشان داده شده است.

# Investigation of Shear Lag Phenomenon in High-Rise Reinforced Concrete Structures with Tube-in-Tube System under the Effect of Wind Load

Kourosh Mehdizadeh

Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, Garmsar Branch, Islamic Azad University, Garmsar, Iran

Seyede Vahideh Hashemi

Department of civil Engineering, Engineering Faculty, Sistan and Baluchestan University, Zahedan, Iran

Abbasali Sadeghi

Department of Civil Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran

## Abstract

The tube-in-tube system is one of the most practical structural forms in high-rise buildings. One of the most important disadvantages of this system is the shear lag phenomenon, which increases the axial force in the side columns and decreases the axial force of the middle columns of the flange of structure. Therefore, in this study, the shear lag is investigated in high-rise reinforced concrete structures with tube-in-tube system with and without columns cut according to the height and plan under the effect of wind load. Thus, two high-rise concrete buildings, 40 and 60-story are modeled in ETABS 2017 software three dimensionally in three states. 40-story and 60-story prototypes are considered with and without columns cut in stories 11, 21 and 31, and then in stories 16, 31, and 46, respectively. Models were analyzed by wind force in order to calculate and compare the shear lag phenomenon. The results show that shear lag index has been changed from positive to negative phase at the height of building from the bottom to top and the axial force of the middle columns is higher than the corner columns in top stories. For example, the shear lag indices average is 1.2 and 0.61 in the 5<sup>th</sup> and 35<sup>th</sup> floors of 40-story building without column cut, respectively. Then the above values are 0.52 and 1.14 in the 5<sup>th</sup> and 55<sup>th</sup> floors, respectively for 60-story building without column cut. Also, the results indicate that the performance of structures has been improved at height by bundling of the columns in structures.

**Keywords:** High-Rise Reinforced Concrete Structure, Tube-in-Tube System, Shear Lag, Column Cut, Bundled Columns.