

بررسی ترکیب سیستم‌های سازه‌ای در ارتفاع بر اساس ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰

مهدی فامرینی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

علی خیرالدین (نویسنده مسئول)، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان و عضو قطب علمی مهندسی زیرساخت‌های عمرانی دانشگاه تهران، kheiroddin@semnan.ac.ir

چکیده: هنگامی که از دو سیستم سازه‌ای متفاوت در ارتفاع که به سازه‌های ترکیبی در ارتفاع موسوم است، استفاده می‌شود، مطابق استاندارد ۲۸۰۰ تحلیل آن می‌تواند به دو روش انجام پذیرد. در روش اول که به روش یک‌مرحله‌ای موسوم است، در شرایطی که ضریب رفتار قسمت فوقانی کمتر از ضریب رفتار قسمت تحتانی باشد، کل سازه با پارامترهای لرزه‌ای قسمت فوقانی، بارگذاری و تحلیل می‌شود. در روش دوم که روش دو مرحله‌ای نام دارد، سازه‌ی فوقانی برای ارتفاع و پارامترهای لرزه‌ای خود تحلیل می‌شود و سازه‌ی تحتانی با اثر عکس‌العمل‌های تکیه‌گاهی هم‌پایه شده‌ی سازه فوقانی، برای ارتفاع و پارامترهای لرزه‌ای خود تحلیل می‌گردد. در این تحقیق، هدف بررسی تفاوت‌های این دو روش در نتیجه‌ی تحلیل و طراحی می‌باشد. برای این تحقیق از مدل‌سازی یک سازه ترکیبی، در نرم‌افزار ETABS و SAP2000 استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که برش پایه در روش دو مرحله‌ای نسبت به روش یک مرحله‌ای بیشتر است. برش طبقه روش دوم مرحله‌ای در سازه‌ی فوقانی کمتر از روش یک مرحله‌ای و در سازه‌ی تحتانی بیشتر از روش یک مرحله‌ای می‌باشد.

واژگان کلیدی: سازه ترکیبی، روش دو مرحله‌ای، ضریب رفتار، روش یک مرحله‌ای

۱- مقدمه

یک سازه‌ی انعطاف‌پذیر استفاده می‌شود که بر روی یک سازه‌ی صلب نسبی، یعنی سختی جانبی سازه‌ی تحتانی حداقل ۱۰ برابر سختی جانبی سازه‌ی فوقانی می‌باشد، قرار دارد. به این صورت که دو سازه به‌صورت جداگانه و با ضریب رفتار مربوط به خود تحلیل و طراحی می‌گردد؛ اما سازه‌ی صلب تحتانی که سازه‌ی انعطاف‌پذیر فوقانی را بر روی خود حمل می‌کند، باید برای عکس‌العمل‌های وارد شده از سازه‌ی فوقانی نیز طراحی گردد. این عکس‌العمل‌ها لازم است در نسبت R_u/ρ سازه‌ی فوقانی به سازه‌ی تحتانی ضرب شوند. این کار به مقیاس کردن برش پایه نیز موسوم است [۲].

در موارد متعددی، از روی ضرورت مثلاً برای ساختن چند طبقه روی یک سازه‌ی موجود، یا به‌علت مطالعات اندرکنش قاب و دیوار برشی یا مهاربندی در سیستم‌های مقاوم دوگانه و لزوم حذف آنها در طبقات فوقانی و یا مسائلی از این دست، طراح از سازه‌ی ترکیبی، یعنی از دو سیستم باربر جانبی لرزه‌ای در ارتفاع استفاده می‌کند [۱]. تحلیل این سازه از حالت معمول خارج شده و می‌تواند به‌صورت یک مرحله‌ای و یا دو مرحله‌ای صورت پذیرد. روش دو مرحله‌ای برای اولین بار در آیین‌نامه‌ی UBC88 معرفی شده است. این روش برای آسان ساختن تحلیل و طراحی

۲- تاریخچه تحقیقات

با توجه به اینکه در سال های اخیر ساخت ساختمان های بلند مرتبه رواج یافته است و به دلایل مختلفی که اشاره شد، استفاده از سازه های ترکیبی یکی از روش های ساخت این نوع سازه ها می باشد، به همین دلیل تحلیل این نوع سازه ها به تازگی مورد توجه قرار گرفته است که از جمله آن می توان به مطالعات خیرالدین و همتی [۴-۵] اشاره کرد که به بررسی ابهامات استاندارد ۲۸۰۰ و بهبود رفتار سازه های ترکیبی با استفاده از طبقه انتقالی پرداخته اند. همچنین ویست و همکاران [۶] مطالعاتی در مورد استفاده از طبقه انتقالی ارائه داده اند. مطالعه دیگری مربوط به آلن و همکاران [۲] است که درباره محاسن و معایب هر دو روش یک مرحله ای و دو مرحله ای در پیاده سازی و بارگذاری می باشد [۲].

۳- روش یک مرحله ای

طبق ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ در این روش، بسته به اینکه قسمت تحتانی داری ضریب رفتار کمتر باشد یا قسمت فوقانی، روش تحلیل به شرح زیر است:

الف) در ساختمان هایی که ضریب رفتار برای سیستم قسمت تحتانی بیشتر از مقدار آن برای سیستم قسمت فوقانی است، مقادیر R_u ، C_d و Ω_0 قسمت فوقانی باید برای محاسبات هر دو قسمت مورد استفاده قرار گیرد.

ب) در ساختمان هایی که ضریب رفتار برای سیستم قسمت تحتانی کمتر از مقدار آن برای سیستم قسمت فوقانی است، مقادیر R_u ، C_d و Ω_0 قسمت فوقانی باید برای محاسبات این قسمت مورد استفاده قرار گیرد. برای محاسبات قسمت تحتانی مقادیر R_u ، C_d و Ω_0 مربوط به همین قسمت مورد استفاده قرار می گیرد. ولی حالت نیروهای عکس العمل ناشی از تحلیل قسمت فوقانی نیز که در نسبت R_u/ρ قسمت فوقانی به R_u/ρ قسمت تحتانی ضرب شده اند، باید به مدل سازه قسمت تحتانی اضافه شود. این نسبت در هر حال نباید کمتر از ۱/۰ باشد [۷].

این بند نسبت به ویرایش قبلی تغییرات قابل توجهی داشته است. در ویرایش قبلی در هر شرایطی، از ضریب رفتار کوچک تر برای کل سازه استفاده می شد.

۴- روش دو مرحله ای

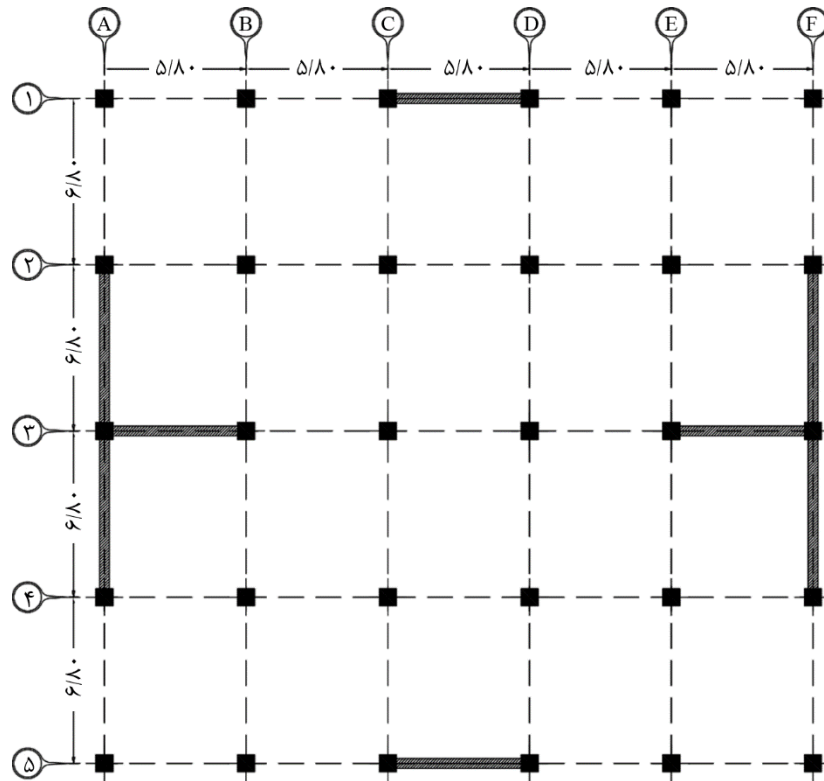
مطابق استاندارد ۲۸۰۰، الف) سازه ای انعطاف پذیر قسمت فوقانی به صورت مجزا و با پایه های گیردار در نظر گرفته شده و مطابق روال عادی تحلیل می گردد. در تعیین نیروها همه ی پارامترهای مربوط به سیستم این قسمت استفاده می شود. ب) سازه ای سخت تحتانی عیناً مانند آنچه در زیر بند الف گفته شد و با در نظر گرفتن پارامترهای مربوط به این قسمت تحلیل می گردد، با این تفاوت که نیروهای عکس العمل سازه ای فوقانی نیز به سازه ای تحتانی اثر داده می شود. این نیروها باید با ضریب نسبت R_u/ρ قسمت فوقانی به R_u/ρ قسمت تحتانی تعدیل شوند. ضریب مورد نظر نباید کوچک تر از ۱/۰ در نظر گرفته شود [۷].

۵- مشخصات مدل های تحلیلی

در این تحقیق یک سازه ای ۱۰ طبقه که طبقه ی ۱ تا ۴ آن سیستم دوگانه با قاب بتن آرمه با شکل پذیری متوسط و دیوار برشی با شکل پذیری متوسط، با ضریب رفتار ۶، و طبقه ی ۵ تا ۱۰ آن قاب خمشی بتن آرمه با شکل پذیری متوسط، با ضریب رفتار ۵ می باشد، مورد بررسی قرار می گیرد. مدل و جانمایی دیوار برشی در شکل (۱) آمده است. سازه در منطقه ی زلزله با خطر نسبی زیاد واقع شده و زمین محل احداث نوع II می باشد.

۶- بررسی شرایط استفاده از روش دو مرحله ای

برای استفاده از روش دو مرحله ای سازه ای تحتانی باید به میزان قابل توجهی از سازه ای فوقانی سخت تر باشد. ضوابط لازم برای استفاده از این روش در بند ۳-۳-۵-۹-۲ ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ آمده است [۷]. در این بند آمده است:



شکل (۱): پلان مدل مورد بررسی در سازه تختانی.

خمشی بتن مسلح متوسط به همراه دیوار برشی بتن مسلح متوسط باشد و سیستم مقاوم طبقات ۷ تا ۱۰ آن قاب خمشی بتن مسلح متوسط باشد، مورد اول اقلان شده اما از آنجاکه زمان تناوب کل سازه بیشتر از ۱/۱ برابر زمان تناوب اصلی قسمت فوقانی است استفاده از روش دوم مرحله‌ای مجاز نیست.

۷- مقایسه دو روش

در روش یک مرحله‌ای در مدل مورد بررسی که ضریب رفتار قسمت تختانی از ضریب رفتار قسمت فوقانی بیشتر است، از حالت الف روش یک مرحله‌ای استفاده می‌شود که در آن ضریب رفتار سازه ۵ و ارتفاع آن برابر ارتفاع کل سازه، یعنی ۳۵/۲۰ متر انتخاب می‌گردد. زمان تناوب این مدل با توجه به فرمول‌بندی جدید استاندارد ۲۸۰۰ برابر ۱/۰۴ می‌باشد. زمان تناوب برای کل سازه از طریق میانگین وزنی زمان تناوب تجربی هر قسمت در ارتفاع، برای کل سازه محاسبه شده است. این روش در ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ به این استاندارد افزوده شده است. ضریب زلزله برای

الف) سختی جانبی متوسط طبقات تختانی حداقل ۱۰ برابر سختی متوسط طبقات فوقانی باشد.

ب) زمان تناوب اصلی نوسان کل سازه بیشتر از ۱/۱ برابر زمان تناوب اصلی قسمت فوقانی نباشد.

مدل تعریف شده به گونه‌ای انتخاب شده است که شرایط فوق اقلان گردد. از آنجاکه سیستم سازه‌ی تختانی از نوع سیستم دوگانه‌ی قاب خمشی متوسط بتن‌آرمه و دیوار برشی متوسط بتن‌آرمه است مورد اول که مربوط به صلب بودن سازه‌ی تختانی نسبت به سازه‌ی انعطاف‌پذیر فوقانی می‌باشد برقرار می‌گردد. این مسئله توسط ETABS بررسی شده است. مورد دوم، توسط نرم‌افزار ETABS و در زمان تناوب اصلی واقعی انجام گرفت. این بند ملزم می‌کند که اثر سازه‌ی تختانی بر روی زمان تناوب اصلی سازه کم باشد و این امر موجب می‌شود تا استفاده از روش دو مرحله‌ای به سازه‌هایی محدود شود که تعداد طبقات سازه‌ی انعطاف‌پذیر فوقانی نسبت به سازه‌ی صلب تختانی قابل توجه باشد. برای مثال در همین مدل اگر سیستم مقاوم طبقات ۱ تا ۶ دارای سیستم دوگانه‌ی قاب

روش دو مرحله‌ای جهش بزرگ در برش طبقه، در طبقه‌ای که سیستم سازه عوض می‌شود، در این مطالعه در طبقه‌ی چهارم می‌باشد. این جهش، برابر حاصل ضرب مجموع جهش‌های طبقات بالاتر در ضریب همپایه‌سازی می‌باشد. مقایسه‌ی نسبت جابه‌جایی نسبی طبقات به ارتفاع Drift در شکل (۳) آمده است. در سازه‌ی فوقانی روش یک‌مرحله‌ای دارای جابه‌جایی نسبی به ارتفاع بیشتر است و در سازه‌ی تحتانی روش دو مرحله‌ای مقدار بیشتری دارد (جدول ۲).

جدول (۱): مقایسه‌ی اختلاف برش طبقات در دو روش یک‌مرحله‌ای و دو مرحله‌ای.

طبقة	روش یک مرحله‌ای (کیلو نیوتن)	روش دو مرحله‌ای (کیلو نیوتن)	اختلاف (درصد)
۱۰	۱۱۴۸	۱۲۸۰	۱۱
۹	۲۳۵۴	۲۵۳۰	۷
۸	۳۴۶۴	۳۵۶۷	۳
۷	۴۴۴۱	۴۳۵۱	-۲
۶	۵۲۶۱	۴۸۶۱	-۸
۵	۵۹۳۱	۵۱۰۱	-۱۴
۴	۶۴۶۳	۶۸۴۴	۶
۳	۶۸۶۱	۸۱۵۸	۱۹
۲	۷۰۹۹	۸۸۱۶	۲۴
۱	۷۱۹۷	۸۸۱۵	۲۲

جدول (۲): مقایسه‌ی اختلاف نسبت جابه‌جایی نسبی به ارتفاع طبقه.

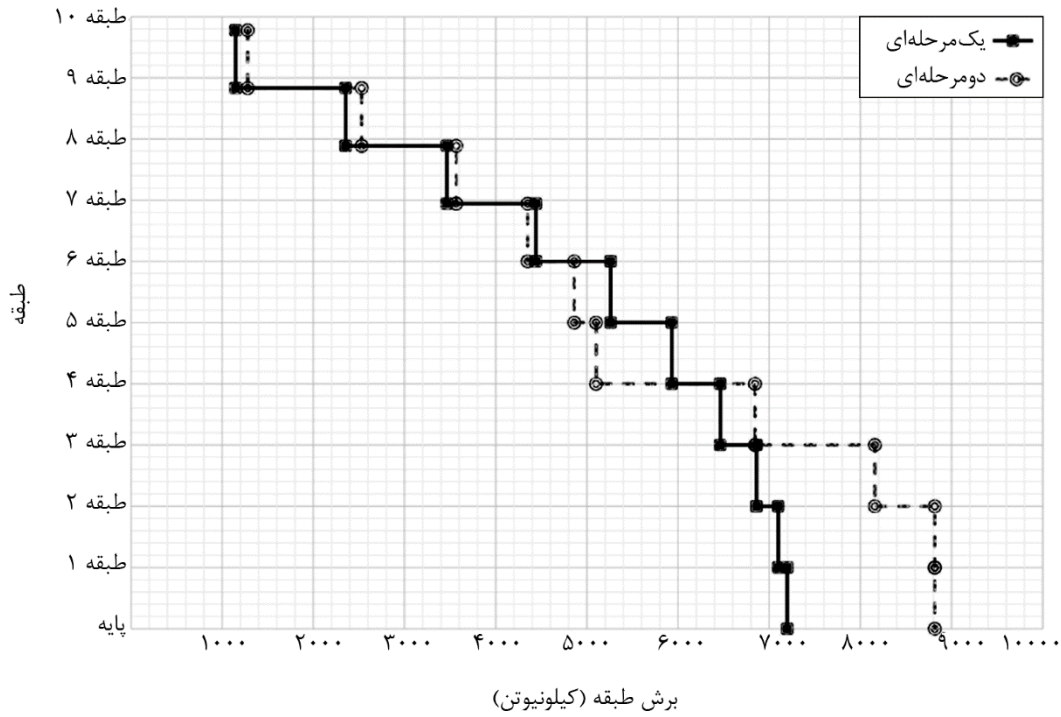
طبقة	روش یک مرحله‌ای (کیلو نیوتن)	روش دو مرحله‌ای (کیلو نیوتن)	اختلاف (درصد)
۱۰	۶	۰/۰۰۳۲۰۶	۰/۰۰۳۰۱۱
۹	۵	۰/۰۰۴۹۰۷	۰/۰۰۴۶۸۴
۸	۰	۰/۰۰۴۶۶۷	۰/۰۰۴۶۵۶
۷	-۵	۰/۰۰۴۷۴	۰/۰۰۴۹۸۳
۶	-۱۲	۰/۰۰۵۰۸۲	۰/۰۰۵۷۶۷
۵	-۳۴	۰/۰۰۲۸۶۷	۰/۰۰۴۳۷۵
۴	۱۴	۰/۰۰۱۱۹۹	۰/۰۰۱۰۵۱
۳	۱۸	۰/۰۰۱۰۳۱	۰/۰۰۰۸۷۲
۲	۲۰	۰/۰۰۰۸۵۲	۰/۰۰۰۷۰۸
۱	۲۱	۰/۰۰۰۴۹۳	۰/۰۰۰۴۰۷

این سازه در این تحلیل ۰/۰۹۳۲ و برش پایه آن برابر ۷۱۹۷ کیلو نیوتن (۷۲۰ تن) می‌باشد.

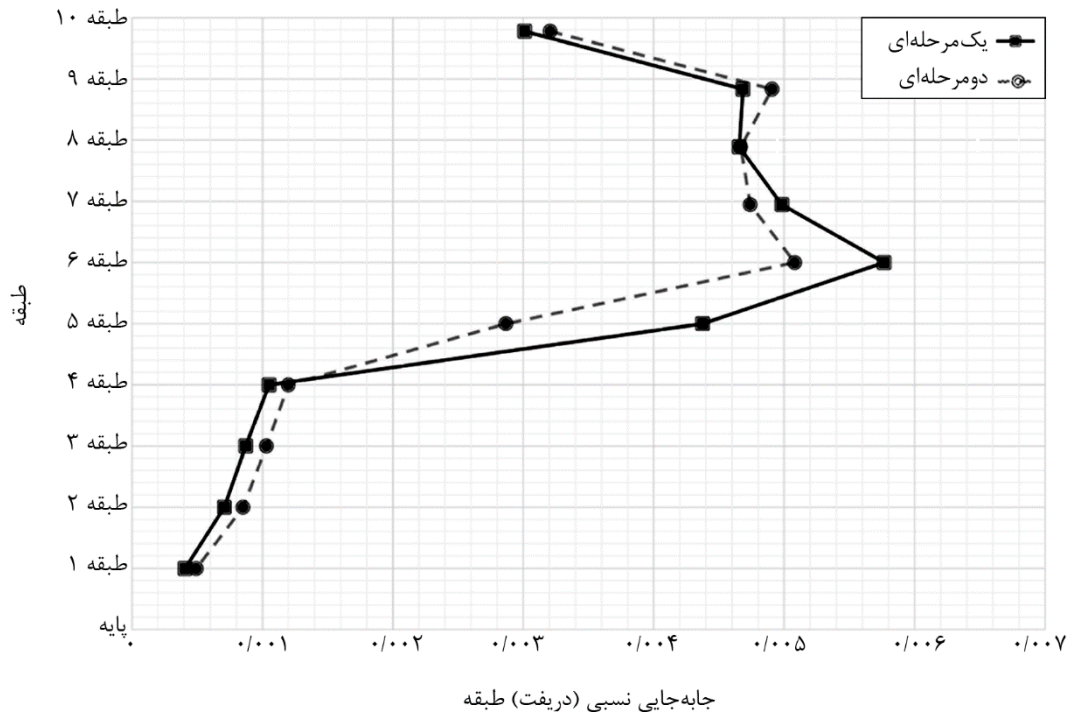
برای روش دو مرحله‌ای دو مدل کامپیوتری به کار گرفته می‌شود. ابتدا سازه‌ی فوقانی به تنهایی برای ضریب رفتار خود، یعنی ۵ و ارتفاع ۲۰/۸۰ متر آنالیز و طراحی می‌گردد. سازه‌ی فوقانی دارای زمان تناوب تجربی ۰/۷۶۷۷ ثانیه و ضریب زلزله ۰/۱۲۰۰ می‌باشد. بعد از تحلیل و طراحی سازه‌ی فوقانی عکس‌العمل‌های تکیه‌گاهی این مدل باید مقیاس شده و به مدل کامپیوتری دوم که سازه‌ی تحتانی را شامل می‌شود انتقال یابد. این انتقال نیرو یکی از مسائلی است که پیاده‌سازی این روش را دشوار کرده است. برای این کار از کد نویسی در نرم‌افزار متلب استفاده می‌شود. این کد اطلاعات تحلیل را از فایل سازه‌ی فوقانی دریافت کرده و به فایل سازه‌ی تحتانی با اثر دادن ضریب همپایه‌سازی انتقال می‌دهد. یکی از مشکلات پیاده‌سازی این روش این است که نیروهای وارد شده باید بی‌گمان از نوع استاتیکی و از میان حالات بار (Load Cases) باشد و پیاده‌سازی و انتقال بارهای حاصل از تحلیل‌های طیفی و تاریخچه زمانی توسط نرم‌افزارهای معمول تحلیل و طراحی، نظیر SAP2000 و ETABS ممکن نیست [۸]. نکته‌ی مهم و قابل توجه در طی این انتقال این است که بارهای وارد شده از سازه‌ی فوقانی نباید در جرم سازه‌ی تحتانی (Mass Source) وارد شوند [۲]. سازه‌ی تحتانی با ضریب رفتار ۶ و ارتفاع ۱۴/۴۰ متر دارای ضریب زلزله زمان تناوب تجربی ۰/۳۶۹۶ ثانیه و ضریب زلزله ۰/۱۴۵۸ می‌باشد. نهایتاً در روش دو مرحله‌ای برش پایه ۸۸۱۵ کیلو نیوتن (۸۸۲ تن) می‌باشد.

۸- بررسی نتایج

الف) در روش دو مرحله‌ای برش پایه ۲۲ درصد بیشتر از روش یک‌مرحله‌ای می‌باشد. اختلاف بین برش طبقات بین روش یک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای در جدول (۱) آمده است. نمودار برش را می‌توان از خروجی‌های ETABS ترسیم کرد. این نمودار در شکل (۲) آمده است. نکته‌ی قابل توجه در



شکل (۲): مقایسه‌ی برش طبقات در ارتفاع ساختمان در دو روش یک‌مرحله‌ای و دو مرحله‌ای.



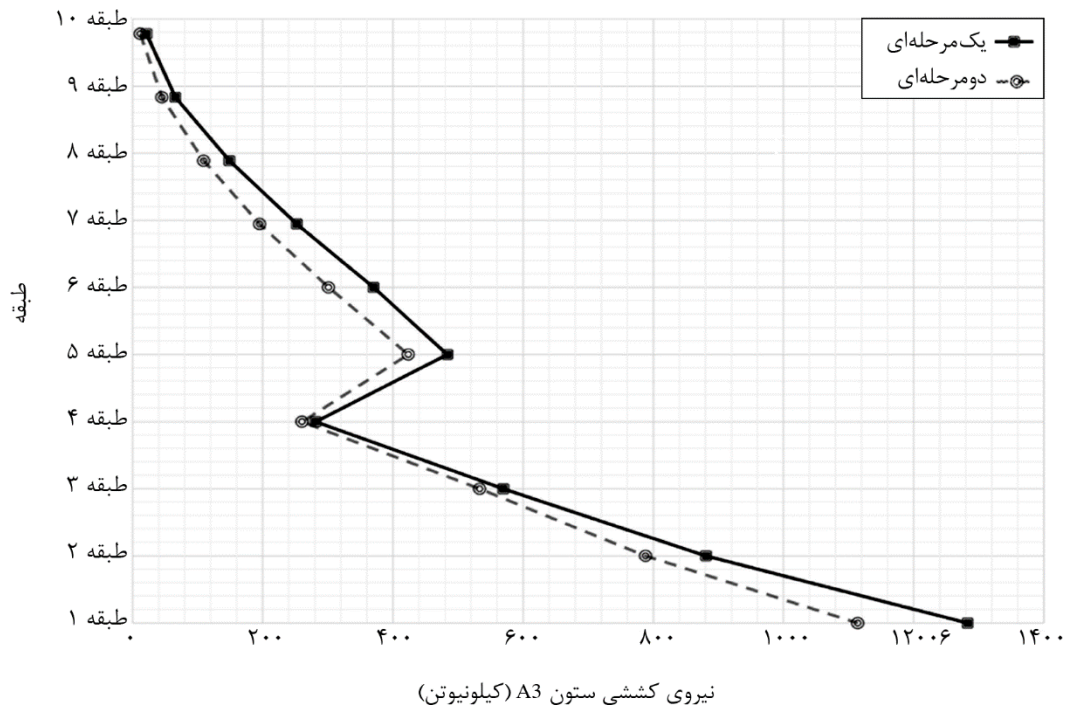
شکل (۳): مقایسه‌ی نسبت جابه‌جایی نسبی به ارتفاع طبقه در طبقات در دو روش یک‌مرحله‌ای و دو مرحله‌ای.

مرحله‌ای بیشتر از روش یک‌مرحله‌ای می‌باشد. (ب) در طراحی: سازه بر اساس مبحث نهم مقررات ملی ساختمان و CSA A23.3-04 طراحی گردید [۹-۱۰].

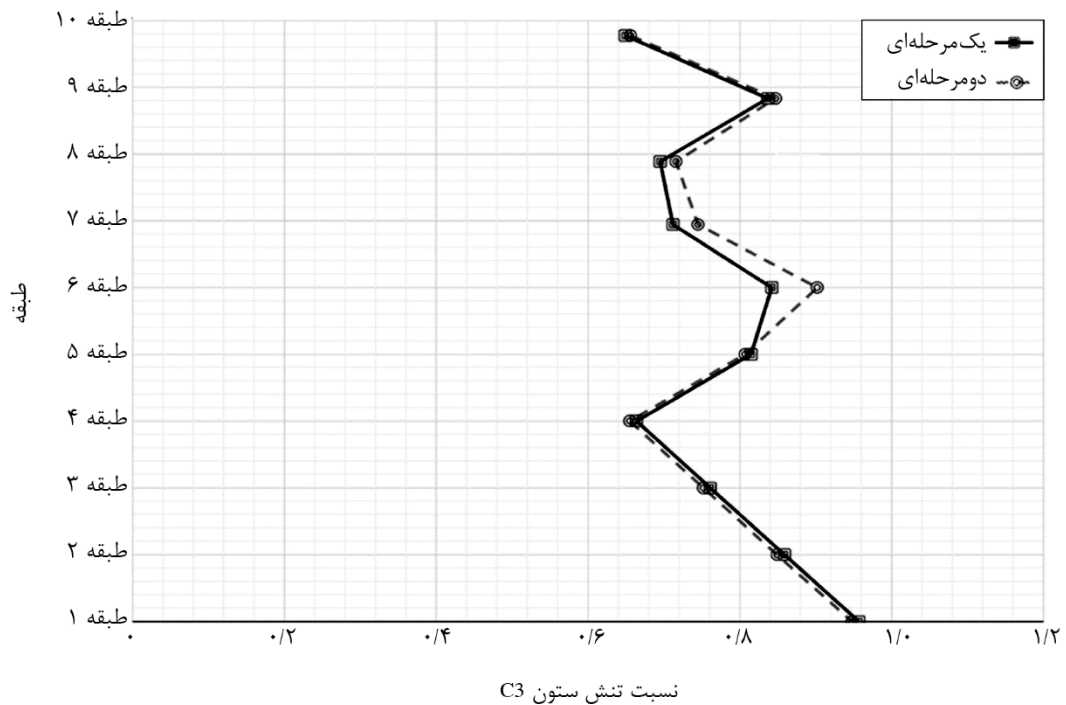
مقایسه‌ی نیروی محوری ستون A3 در زلزله جهت X در شکل (۴) آورده شده است. همان‌طور که از شکل مشخص است نیروی کششی به‌طور کلی در روش دو

برای توزیع نیروی جانبی زلزله از توزیع پیشنهادی استاندارد ۲۸۰۰ برای تحلیلی استاتیکی خطی، یعنی مثلث واران استفاده شده است. نمودار جابه‌جایی، نیروی برش پایه در شکل (۶) نشان داده شده است.

نتیجه‌ی مقایسه‌ی طراحی ستون C3 در شکل (۵) آمده است. (ج) نتایج تحلیل غیرخطی: سازه در نرم‌افزار SAP2000 مورد تحلیل استاتیکی غیرخطی قرار گرفت. در این تحلیل



شکل (۴): مقایسه‌ی نیروی کششی ستون A3 در دو روش یک‌مرحله‌ای و دو مرحله‌ای.



شکل (۵): مقایسه‌ی نسبت تنش‌های ستون C3 در دو روش یک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای.

نوع سازه‌ها است. در این روش هرچند میزان برش پایه از روش یک‌مرحله‌ای بیشتر است، اما مقدار برش طبقه به سازه‌ی فوقانی از روش یک مرحله‌ای کمتر بوده و با توجه به محدودیت‌های اعمال شده برای استفاده از روش دو مرحله‌ای، یعنی محدودیت زمان تناوب و سختی، غالباً سازه‌ی فوقانی که بخش اعظم کل سازه را داراست، جابه‌جایی و نتایج طراحی در روش دو مرحله‌ای کمتر از نتایج حاصل از روش یک‌مرحله‌ای می‌باشد؛ اما مدل‌سازی این روش دشوار است چراکه باید تمامی حالات بار در تکیه‌گاه‌های سازه‌ی فوقانی مقیاس شده و به سازه‌ی تحتانی انتقال یابند. همچنین در نرم‌افزارهای معمول فقط بارهای استاتیکی قابل انتقال هستند. از مشکلات این روش وجود جهش قابل توجه در طبقه‌ای است که سازه تغییر سیستم می‌دهد. از طرفی، روش یک‌مرحله‌ای با وجود اینکه سازه را در کل کمی دست بالا مدل‌سازی می‌کند، دارای مدل‌سازی سریع و آسان می‌باشد و از این جهت نسبت به روش دو مرحله‌ای دارای برتری است.

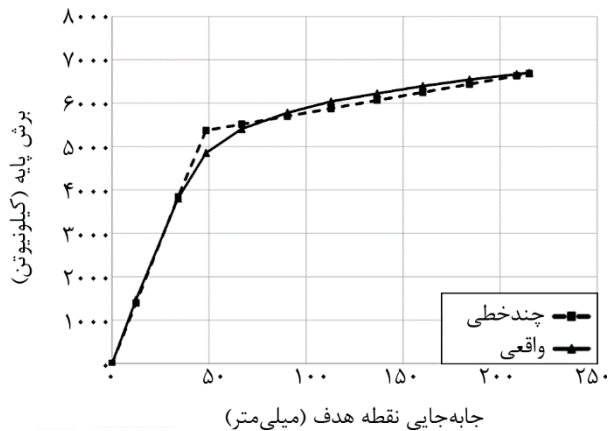
تشکیل مفاصل پلاستیک در پای ستون‌ها، به‌ویژه ستون‌هایی که به‌طور مستقیم در تغییر سیستم مشارکت دارند، در این مطالعه ستون‌های روی دیوار برشی در طبقه پنجم، اهمیت استفاده از طبقه‌ی انتقالی را نشان می‌دهد.

مراجع

1. Taranath, B.S. (1988) *Structural Analysis and Design of Tall Buildings*.
2. Allen, M., Chung, N.-Ch., Tran, A., and Zepeda, D. (2013) *Two Stage Analysis: Implementation Challenges*. Structures Congress 2013, 2192-2202.

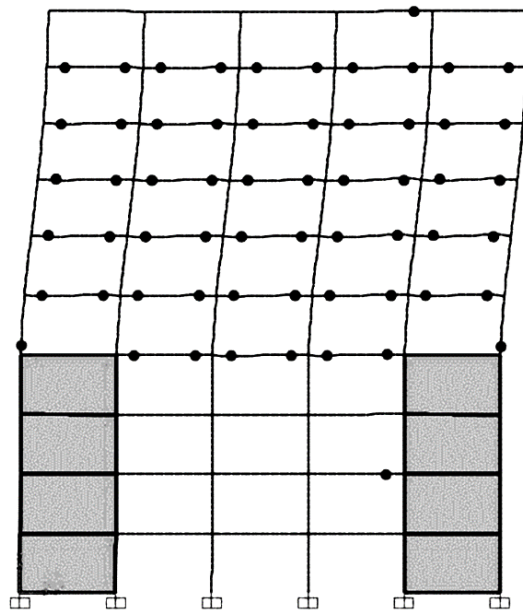
۳. خیرالدین، علی و مسعود انوری، علی (۱۳۹۲) بارگذاری سازه‌ها. (ویرایش سوم)، سمنان: دانشگاه سمنان.

۴. خیرالدین، علی و همتی، علی (۱۳۸۴) نقد و بررسی ضوابط آیین‌نامه ایران در مورد سازه‌های ترکیبی در



شکل (۶): نمودار رفتار نیرو تغییر مکان سازه.

ضریب رفتار این سازه در این تحلیل ۸/۸ به دست آمده است. نکته‌ی قابل توجه تشکیل مفاصل پلاستیک در پای ستون‌هایی از طبقه پنجم که روی دیوار برشی قرار دارند، در شکل (۷) محل تشکیل مفاصل پلاستیک در قاب ۳ آمده است.



شکل (۷): محل تشکیل مفاصل پلاستیک.

۹- نتیجه‌گیری

ساخت سازه‌ی ترکیبی در ارتفاع از روی ضرورت انجام می‌گیرد و وجود دو نوع سازه در بالا و پایین رفتار سازه را خاص می‌کند. روش دو مرحله‌ای که بر روی ساختمان‌های خاصی قابل اعمال است، روشی برای آسان‌سازی تحلیل این

ارتفاع. پژوهشنامه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، شماره دوم و سوم، ۳۳-۲۳.

۵. خیرالدین، علی و همتی، علی (۱۳۹۰) بررسی تأثیر طبقه انتقالی بر رفتار ساختمان‌های ترکیبی در ارتفاع. مجله مدل‌سازی در مهندسی، ۲۶، ۶۵-۵۷.

6. Viest, I.M., Colaco, J.P., Furlong, R.W., Griffs, L.G., Leon, R.T., and Wyllie, L.A. (1997) *Composite Construction Design for Buildings*. McGraw-Hill, N.Y.

۷. مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی. آیین‌نامه طرح ساختمان‌ها در برابر زلزله - استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم، ۱۳۹۳). تهران: مؤلف.

8. Computers and Structures (2005) *ETABS, Integrated Building Software User's Guide*. Berkeley: Computers and Structures Inc.

۹. دفتر مقررات ملی ساختمان. طرح و اجرای ساختمان‌های بتن‌آرمه - مبحث نهم. (ویرایش چهارم، ۱۳۹۲). تهران: نشر توسعه ایران

10. Canadian Standards Association (2004) *Design of Concrete Structures - A23.3-04*. Ontario: Canadian Standards Association

11. American Concrete Institute (2005) *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318M-05)*.