مروری تحلیلی و مقایسه‌ای بر روش‌های تعیین سختی طبقات

آزاده نوری فرد، دانشجوی دکتری معماری دانشگاه علم و صنعت ایران
محمدرضا تابش‌پور، استادیار دانشگاه صنعتی شریف
tabeshpour@sharif.edu
تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۱۰ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۵/۰۲/۲۵

چکیده:

بسیاری از ساختمان‌ها در زلزله‌های گذشته در اثر وقوع طبقه نرم دچار خسارت و ویرانی گردیده اند. عوامل متعددی همچون ارتفاع بلندتر یا حذف تعدادی از ستون‌ها، حذف مهاربندی‌های جانبی، دیوارهای برشی و یا میانقاب‌ها به دلایل معماری در یکی ازطبقات به ویژه در طبقه همکف علت اصلی وقوع این پدیده به شمار می‌رود. بر این اساس اکثر آیین‌نامه‌های لرزه‌ای، ضوابطی را جهت جلوگیری از ایجاد طبقه نرم ارائه نموده‌اند، اکثر این ضوابط نسبت‌هایی را بین سختی طبقات مجاور درنظر گرفته‌اند لیکن روش همسانی جهت محاسبه سختی طبقات ارائه نکرده‌اند، اکثر پژوهش‌های انجام شده در خصوص سختی نیز، بر روی روش‌های تقریبی متمرکز بوده و کمتر به روش‌های دقیق و نرم افزاری پرداخته شده‌است. در این پژوهش نخست پدیده طبقه نرم و روش‌های محاسبه سختی در ادبیات بررسی و سپس شش روش دقیق (نرم افزاری) جهت محاسبه سختی طبقات از طریق تحلیل قاب‌های بتنی دو بعدی مطالعه گردیده‌است. بر اساس نتیجه تحلیل‌ها، روش سوم که در آن بدون هیچ گونه تغییر در مدل اصلی، نیروهایی با توزیع مثلثی مشابه نیروی زلزله بر مرکز جرم کلیه طبقات اعمال شده و از طریق محاسبه تغییرمکان نسبی هر طبقه، سختی آن طبقه محاسبه می‌شود، از دقت قابل قبول و کارایی مطلوبی برای طراحی سازه برخوردار می‌باشد.

کلید واژگان: سختی طبقه، طبقه نرم، طبقه ضعیف، مدل خمشی، مدل برشی

۱- مقدمه

وقوع طبقه نرم در تعداد زیادی از زلزله‌های گذشته مشاهده شده است، این پدیده در اثر عدم پیوستگی سختی در ارتفاع رخ می دهد. تمامی آیین‌نامه‌های لرزه‌ای ضوابطی جهت کنترل طرح سازه و پیشگیری از وقوع این پدیده ارائه کرده‌اند، ضوابط اکثر آیین نامه بر مبنای سختی طبقات تنظیم گردیده است، لیکن به نحوه محاسبه سختی اشاره‌ای نشده است. Tena-Colunga در بخشی از مقاله خود تحت عنوان «مروری بر شرایط بی نظمی طبقه نرم ساختمان ها برای طراحی لرزه‌ای» به این نکته اشاره می‌کند که محاسبه سختی ذاتا بستگی به ابزار تحلیل دارد. برخی مهندسان روش های ساده مدل برش معادل را انتخاب می‌کنند تا ضوابط نامنظمی ساختمان را کنترل کنند، از طرف دیگر برخی از

مهندسان ترجیح می‌دهند که از مدل‌های سه بعدی برای محاسبه سختی استفاده کنند. نتایج حاصل از این دو رویکرد برای ارزیابی طبقه نرم بسیار متفاوت می‌باشد، به این صورت که برای ساختمانی مشابه، مدل برشی می‌تواند طبقه نرم را بر اساس ضوابط آیین نامه‌ای شناسایی کند در حالی که مدل خمشی این امر را نشان نداده و لذا با این روش، ساختمان را می توان به صورت منظم طراحی نمود [۱]. اکثر پژوهش‌های انجام شده در خصوص سختی، بر روی روش‌های تقریبی متمرکز بوده و کمتر به روش-های دقیق و نرم افزاری پرداخته شده‌است. در این مقاله نخست عوامل مؤثر بر ایجاد طبقه نرم و ضوابط آیین‌نامه‌ای مربوطه مورد بررسی قرار گرفته، سپس به بررسی روش‌های تقریبی محاسبه سختی و فلسفه حاکم بر آن پرداخته شده است. نهایتاً در راستای هدف اصلی تحقیق، روش‌های دقیق (نرم افزاری) محاسبه سختی بر اساس ادبیات و جامعه حرفه‌ای مهندسی عمران از طریق مدل‌های تحلیلی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

۲- طبقه نرم

در طراحی لرزه‌ای ساختمان‌ها لازم است سختی در راستای قائم به صورت یکنواخت توزیع گردد. در برخی از ساختمان‌ها به دلایل معماری سیستم‌های مقاوم در برابر نیروهای جانبی در یک یا چند طبقه قطع می‌شود تا فضای باز و بدون ستونی ایجاد گردد و یا در برخی از طبقات به دلایل عملکردی و یا کیفیت فضایی، ارتفاع بلندتری درنظر گرفته می شود. این مطلب اغلب برای ایجاد ورودی با دهانه‌های باز، لابی ساختمان‌ها، پارکینگ‌ها، فروشگاه‌ها و... اتفاق می‌افتد که در اصطلاح سازه‌ای به نام «طبقه نرم» خوانده می‌شود. طبقه نرم عبارت است از عدم پیوستگی سختی که در اتصالات طبقه بعدی خودنمایی می‌کند. این پدیده تنها مربوط به طبقه همکف نبوده و در صورت تغییرات ناگهانی سختی در هر یک از طبقات میانی ساختمان نیز اتفاق می‌افتد. چنانچه سختی یک طبقه (اغلب طبقه همکف) به نحو بارزی کم‌تر از طبقات فوقانی باشد، بخش قابل توجهی از کل تغییرمکان جانبی ساختمان متوجه طبقه همکف شده [۲ الی ۸] و این امر منجر به ایجاد مفصل پلاستیک در بالا و پایین ستون‌ها می‌گردد. به این ترتیب عناصر باربر قائم در طبقه همکف به شدت آسیب دیده در حالی که سایر عناصر ساختمان معمولاً سالم باقی می‌مانند [۲].

نمونه‌ای از این مسئله در اثر حذف دیوارهای برشی طبقه همکف در بیمارستان الیوویودر زلزله سان فرناندو قابل مشاهده است، این ساختمان بتن مسلح به میزان ۴۵cm تغییر شکل جانبی داشته است[۹] (شکل ۱). در بسیاری از مواقع علیرغم طراحی سازه منظم در ارتفاع، در اثر کاهش یا حذف میانقاب‌ها در طبقات مجاور، نامنظمی در ارتفاع رخ می‌دهد [۲، ۵، ۷، ۸، ۱۰ الی ۱۲] و در زلزله طبقه نرم تشکیل می‌شود، نمونه از این مسئله را در زلزله کوکایلی ترکیه می‌توان مشاهده کرد (شکل ۲). به طور کلی عوامل مؤثر در ایجاد طبقه نرم را در موارد ذیل می‌توان خلاصه نمود:

- ارتفاع بلند تر طبقه همکف یا یکی از طبقات
- حذف تعدادی از ستون‌ها در طبقه همکف یا یکی از طبقات
- حذف مهاربندی‌های جانبی طبقه همکف یا یکی از طبقات
- حذف دیوار برشی طبقه همکف یا یکی از طبقات
- حذف میانقاب طبقه همکف یا یکی از طبقات

شکل ۱- ایجاد طبقه نرم در بیمارستان الیوویو در زلزله ۱۹۷۱سان فرناندو در اثر حذف دیوارهای برشی طبقه همکف [۷]

شکل ۲- ایجاد طبقه نرم در اثر حذف دیوارهای آجری طبقه همکف در زلزله ۱۹۹۹ کوکایلی ترکیه[۱۱]

۳- ضوابط آیین نامه ها جهت کنترل طبقه نرم

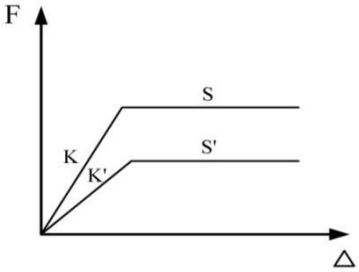
جهت جلوگیری از وقوع طبقه نرم در ساختمان، مطابق با جدول ۱۲-۳-۲ استاندارد ASCE7-10، بند ۴-۵-۱-۲ استاندارد NZS 1170.5.2004 نیوزلند، جدول ۵ استاندارد IS1893 هند و بند ۱-۷-۲-ث آیین نامه ۲۸۰۰ سختی جانبی در هیچ طبقه‌ای نباید کمتر از ۷۰٪ سختی جانبی طبقه روی خود و یا کمتر از ۸۰٪ متوسط سختی سه طبقه روی خود باشد (رابطه ۱). طبقه‌ای که سختی جانبی آن کمتر از این محدوده باشد، طبقه نرم نامیده می‌شود [۱۳ الی ۱۶].

$$k_i < 0.7k_{i+1} \quad \text{یا} \quad k_i < 0.8\left(\frac{k_{i+1}+k_{i+2}+k_{i+3}}{3}\right) \qquad (۱)$$

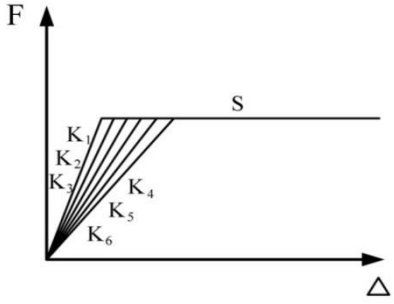
۴- مقایسه طبقه نرم و طبقه ضعیف

زمانی که بحث از طبقه نرم است، منظور شکست طبقه نرم است. طبقه نرم به علت سختی پایین یک طبقه در مقایسه با طبقات فوقانی رخ می‌دهد. وقتی شکست رخ داد دیگر سختی محل توجه نبوده بلکه مقاومت محل توجه است. لذا با توجه به این که منظور از شکست طبقه نرم همان شکست طبقه نرم است و شکست طبقه نرم هم ارز طبقه ضعیف است پس طبقه نرم با طبقه ضعیف هم ارز است. معمولاً سیستمی که سختی کمی دارد، مقاومت کمی دارد، لذا معمولاً سازه‌ای که در حوزه الاستیک، سختی کمتری دارد در حوزه پلاستیک، مقاومت کمتری هم خواهد داشت (شکل۳). از طرف دیگر زمانی مسئله تعیین روش سختی مناسب، اساسی ترین مسئله این است که سازه الاستیک باشد ولی با توجه به این که سازه در زلزله وارد ناحیه غیرخطی می‌شود، روش تعیین مقاومت مهم می‌شود که برای تعیین آن روش‌های مختلفی وجود ندارد. در واقع مکانیزم‌های شکست مختلفی وجود دارد که مکانیزم، تحت نیروی کمتر حاکم خواهد شد. به بیان دیگر با توجه به روش‌های مختلف محاسبه سختی، مقادیر متفاوتی از سختی محاسبه می‌شود لیکن با توجه به این که برای محاسبه مقاومت تنها یک روش وجود دارد، مقدار آن نیز یکتا خواهد بود (شکل ۴).

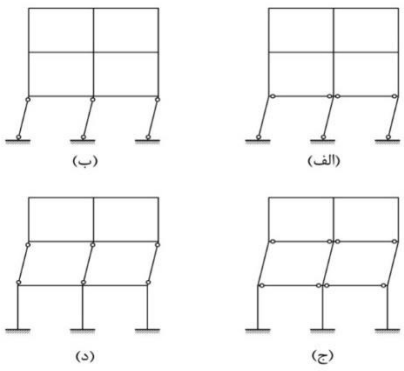
در تحلیل غیرخطی، دو مکانیزم وجود دارد. یک حالت مکانیزم ستون است که در آن مفاصل پلاستیک در بخش فوقانی و تحتانی ستون تشکیل می‌شود و یک حالت مکانیزم تیر است که در آن مفاصل پلاستیک در دو انتهای تیرهای فوقانی و تحتانی طبقه تشکیل می‌شود. یک تفاوت بین مکانیزم طبقه همکف با سایر طبقات وجود دارد، در طبقه همکف در هر دو حالت مکانیزم ستون و تیر، در بخش تحتانی، مفاصل پلاستیک در پای ستون تشکیل می‌گردد (شکل ۵).



شکل۳- به طور معمول، سازه با سختی کمتر دارای مقاومت کمتر



شکل۴- مقدار سختی متفاوت بر حسب روش‌های محاسبه سختی و مقدار یکتای مقاومت سازه



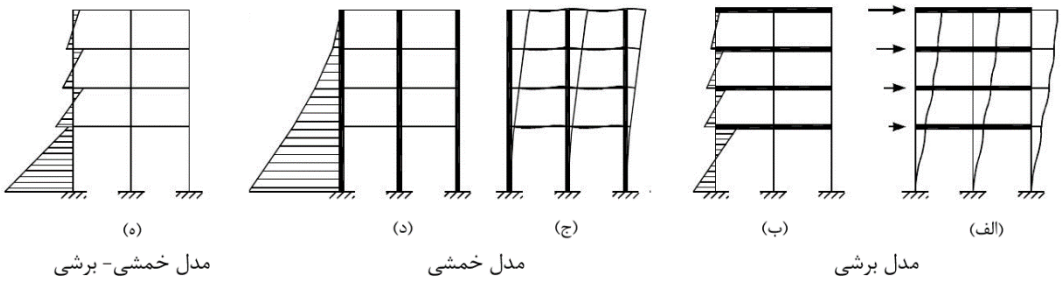
شکل۵- مکانیزم‌های مختلف: (الف) مکانیزم تیر طبقه همکف، (ب) مکانیزم ستون طبقه همکف، (ج) مکانیزم تیر طبقه اول، (د) مکانیزم ستون طبقه اول

۵- تأثیر تیپ بندی اعضای سازه‌ای بر ایجاد طبقه نرم

در اینجا لازم است به یک نکته که در پایان مراحل تحلیل و طراحی سازه‌ها به دلایل سهولت مسائل اجرایی انجام می‌گردد و تا حدودی بر شکل‌گیری طبقه نرم تأثیرگذار است، اشاره شود. اصولاً مقاطع اعضای سازه‌ای به ویژه ستون‌ها به صورت طبقه به طبقه تغییر نمی کند، اغلب در هر دو طبقه و برخی مواقع هر سه یا چهار طبقه یک مقطع برای اعضای سازه‌ای درنظر گرفته می‌شود. این امر در خصوص تیرها کمتر از ستون ها می‌باشد، چرا که مقاطع تیرها اغلب بر اساس طول دهانه بوده و بر اساس طبقات، خیلی تغییر نمی‌کند. بر این اساس درطبقات فوقانی ساختمان، سهم تیرها در سختی جانبی بیشتر می شود، چون تیر ثابت مانده و ستون‌ها ضعیف می‌شوند. اصولاً لازم است در تیپ کردن مقاطع سازه‌ای به سایر عوامل مؤثر در رفتار سازه نیز توجه شود، به عنوان مثال در ساختمانی که طبقه همکف به صورت پیلوت می‌باشد و در سایر طبقات میانقاب وجود دارد، بهتر است ستون‌های طبقه همکف را قوی‌تر طراحی کرده و از طبقه بالا تیپ بندی انجام گردد تا بر این اساس پتانسیل تشکیل طبقه نرم کاهش یابد.

۶- تأثیر مدل‌های برشی و خمشی بر کنترل طبقه نرم

بر اساس نسبت سختی تیر به ستون، دو مدل متفاوت می‌توان تعریف کرد. یک نوع مدل برشی است که در آن تیر خیلی سخت‌تر از ستون است و برعکس در مدل خمشی، سختی ستون بیشتر از تیر است. شکل تغییرمکان جانبی و توزیع ممان خمشی در ارتفاع ساختمان در این دو مدل بسیار متفاوت است. رفتار واقعی اغلب سازه‌ها بین این دو گونه بوده و در واقع تحت نیروهای جانبی نوعی رفتارخمشی- برشی از خود نشان می‌دهند (شکل ۶). در مدل برشی، نقطه عطف در میانه ارتفاع اعضاست ولی در مدل خمشی که عموماً ترکیبی از رفتار خمشی و برشی وجود دارد، نقطه عطف ستون‌ها لزوماً در میانه ارتفاع نبوده و در برخی بخش‌ها از جمله طبقه اول خارج از ستون طبقه قرار می‌گیرد[۶]. مدل های برشی به دلیل سادگی معادلات تعادل و محاسبات آسان معروف هستند. در این روش تمام جرم طبقه در درجات آزادی مربوطه قرار گرفته، چرخش گره‌ها صفر درنظر گرفته شده و تیرها در مقایسه با ستون ها صلب فرض می‌شوند. در واقع سختی طبقه از ترکیب سختی ستون‌ها ناشی شده که به شکل یک فنر الاستیک درجات آزادی را به طبقات مجاور متصل می‌کند، مدل‌های برشی اغلب برای مطالعه پاسخ سازه های قابی به نیروهای جانبی به کار می روند[۱۷]. مدل‌های خمشی شبیه به یک تیرهای طره‌ای عمودی هستند که توسط اعضای صلب محوری در هر طبقه به یکدیگر متصل شده‌اند[۶]، علیرغم این که مدل های برشی برای هر دو سیستم قاب مهاربندی شده و قاب خمشی قابل استفاده هستند لیکن به صورت معمول مدل‌های برشی برای مطالعه قاب‌های خمشی و مدل‌های خمشی برای مطالعه قاب‌های مهاربندی شده یا دیوارهای برشی مناسب هستند. اغلب سختی حاصل از مدل‌های برشی بیشتر از سختی مدل‌های خمشی است، چرا که سختی در مدل برشی با صرفنظر نمودن از کاهش سختی ناشی از چرخش انتهای تیرها و ستون‌ها در مدل خمشی معادل به دست می‌آید.



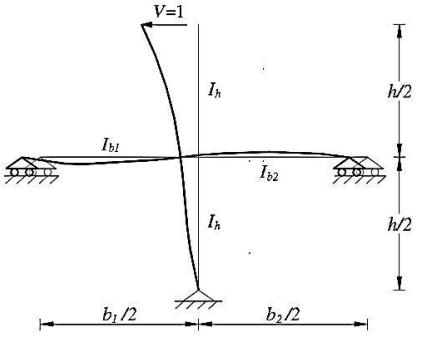
شکل ۶- نحوه تغییرشکل و توزیع ممان در مدل‌های برشی و خمشی ؛ (الف) تغییر شکل مدل برشی، (ب) توزیع ممان در مدل برشی، (ج) تغییرشکل مدل خمشی، (د) توزیع ممان در مدل خمشی (ه) توزیع ممان در مدل خمشی- برشی[۶]

۷- روش های تقریبی محاسبه سختی طبقات

در ادبیات، روش‌های متعددی جهت محاسبه سختی تقریبی طبقات به صورت دستی وجود دارد، لیکن تقریباً روش‌های محاسبه سختی به صورت دقیق و با استفاده از نرم افزارهای تحلیل سازه مورد توجه محققین نبوده است، در این بخش به بررسی مفروضات و ایده اصلی روش‌های تقریبی محاسبه سختی پرداخته شده و از ارائه جزییات و فرمول‌های پیشنهادی این روش‌ها صرفنظر شده است.

۷-۱- روش پیشنهادی Heidebrecht and Stafford Smith در سال ۱۹۷۳

در این روش سازه فرعی شامل دو ستون با ارتفاع نیمه در بالا و پایین طبقه مورد نظر می‌باشد که به دو تیر تکیه کرده است. نقطه عطف تیرها و ستون‌ها در میانه دهانه در نظر گرفته می‌شود. بنابر این سازه فرعی از چهارنقطه که ممان صفر دارند از سازه اصلی جدا می‌شود (شکل ۷) [۱۸].



شکل ۷- روش پیشنهادی **Heidebrecht and Stafford Smith** برای محاسبه سختی [۱۸]

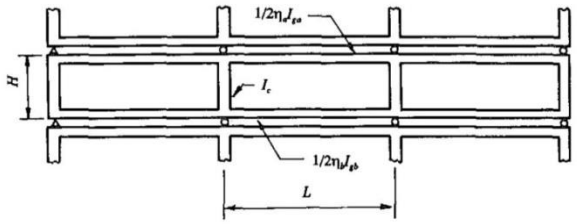
۷-۲- روش پیشنهادی Schultz در سال ۱۹۹۲

در این روش یک طبقه از قاب شامل تمام ستون‌های طبقه و قسمتی از مقطع تیرهای بالا و پایین جدا می‌شود، با توجه به این که از نیروهای ثقلی صرفنظر می‌شود، ممان خارجی در گره‌ها صفر شده و دوران‌ها حذف می‌شود همچنین فرض بر این است که نقطه عطف تیرها و ستون‌ها در وسط دهانه قرار داشته و برای طبقه اول با اتصالات گیردار در پی، تیرهای تحتانی باسختی بی نهایت درنظر گرفته می‌شود. در این روش به این نکته توجه شده که تنها نقطه عطف ستون‌های طبقات میانی در ساختمان‌های با تعداد طبقات زیاد به وسط ستون نزدیک است و در طبقات مرزی و هر جایی که اختلاف زیادی بین ارتفاع طبقات مجاور وجود دارد، این نقطه از وسط جابه جا می‌شود(شکل ۸) [۱۷]. بر این اساس در روابط پیشنهادی سه ضریب اصلاح به شرح ذیل منظور گردیده است:

۱- ضریب اصلاح برای طبقات مجاور با ارتفاع متفاوت

۲- ضریب اصلاح برای طبقات مرزی شامل طبقه اول و آخر و حتی طبقه دوم که تحت تاثیر اتصال گیردار پی است.

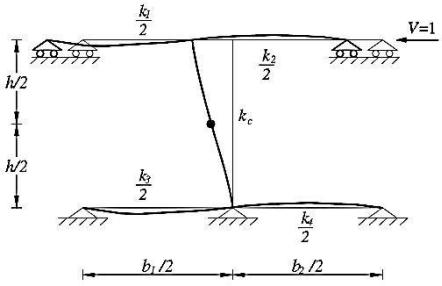
۳- ضریب اصلاح برای ساختمان‌های کوتاه که در آن‌ها تأثیر سخت کنندگی ناشی از اتصالات گیردار پی تا طبقه دوم هم گسترش می‌یابد.



شکل ۸- روش پیشنهادی**Schultz** برای محاسبه سختی [۱۷]

۷-۳- روش پیشنهادی Paulay and Priestley در سال ۱۹۹۲

در این روش، سازه فرعی به صورت یک ستون با ارتفاع کامل و چهار تیر مجاور از سازه اصلی جدا می‌شود. جداسازی از سازه اصلی در نقاط عطف انجام می‌شود که در میانه دهانه قرار گرفته‌اند (شکل ۹) [۱۹].



شکل ۹- روش پیشنهادی**Paulay and Priestley** برای محاسبه سختی [۱۹]

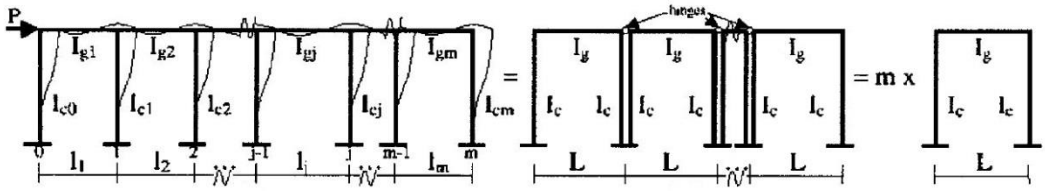
۷-۴- روش پیشنهادی حسینی و ایماق نایینی در سال ۱۹۹۹

با این روش محاسبه سختی قاب خمشی منظم و نامنظم، قاب مهاربندی شده و قاب و دیوار برشی میسر است. در این روش یک قاب اصلی به چند قاب فرعی که با مفصل به هم متصل هستند، تقسیم می شود. ایده اصلی در این روش بر اساس حقایق زیر استوار است (شکل ۱۰) [۲۰]:

– در قاب خمشی معمولی، کلیه تیرها و ستون‌ها در تمام دهانه‌ها به صورت مشابه تغییرشکل می‌دهند.

– سختی جانبی هر طبقه، تحت تأثیر تیر و ستون‌هایی است که بلافاصله در بالا و پایین طبقه قرار دارند.

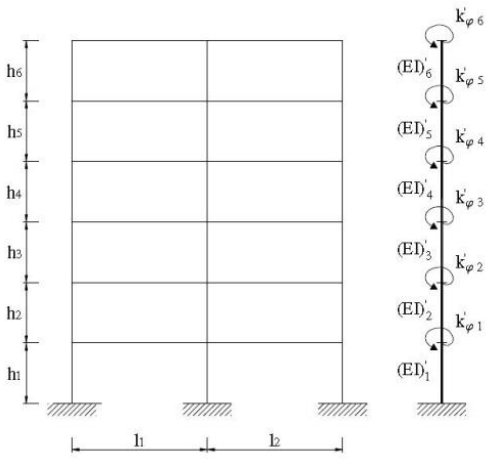
– در سختی قاب مهاربندی شده، اثر تغییرشکل محوری تیر و ستون‌ها در تغییرشکل خمشی نادیده گرفته می‌شود و لذا سختی برابر مجموع سختی دو سیستم، یکی شامل اعضای خمشی سیستم و دیگری سیستمی مشابه سیستم قبلی ولی با اتصالات مفصلی است.



شکل ۱۰- روش پیشنهادی حسینی و ایماق نایینیبرای محاسبه سختی طبقات [۲۰]

۷-۵- روش پیشنهادی Ramasco در سال ۲۰۰۰

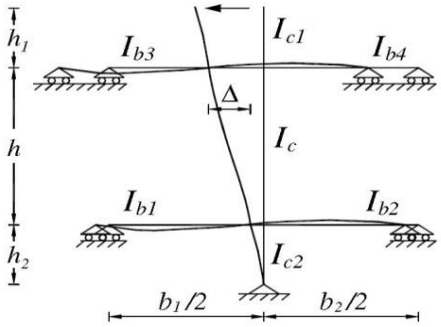
در این روش قاب مسطح به یک طره قائم به ارتفاع ساختمان تبدیل می‌شود. در ارتفاع هر طبقه ممان دوم سطح طره برابر با مجموع ممان اینرسی ستون‌های آن طبقه درنظر گرفته می‌شود و در هر طبقه فنرهای چرخشی مربوط به سختی خمشی تیرها این طره را مقید می‌کنند.در این روش نیز فرض بر این است که در ارتفاع یک دوم ستون ها ممان صفر است و در مورد ستون های همکف این نقطه در دو سوم قرار دارد (شکل۱۱) [۲۱].



شکل ۱۱- روش پیشنهادی**Ramasco** برای محاسبه سختی [۲۱]

۷-۶- روش پیشنهادی Caterino, Cosenza and Azmoodeh در سال ۲۰۱۳

در این روش یک قاب فرعی شامل ستون طبقه با ارتفاع کامل و تیرها و ستون‌های فوقانی و تحتانی در نقاطی که ممان صفر است از سازه اصلی جدا می‌شود، لذا در این نقاط تنها برش وجود دارد. لازم است نخست نقاطی از ارتفاع ستون‌های فوقانی و تحتانی که ممان صفر است محاسبه شود لیکن در مورد تیرها فرض شده که همانند تحقیقات قبلی ممان در میانه دهانه صفر است، این نقطه تأثیر زیادی بر سختی طبقه نداشته و سختی بیشتر تحت تأثیر نقطه‌ای است که ممان ستون صفر می‌شود. در مدل طبقه اول فرض می‌شود ستون کاملاً در برابر چرخش در پایه مقید است و تنها دو تیر و بخشی از ستون فوقانی به آن متصل هستند. در طبقه آخر هم از همان مدل سایر طبقات استفاده شده و تنها یک ستون کمکی در بخش فوقانی آن امتداد می‌یابد (شکل ۱۲) [۶].



شکل ۱۲- روش پیشنهادی**Caterino, Cosenza and Azmoodeh** برای محاسبه سختی [۶]

۸- روش‌های دقیق (نرم افزاری) محاسبه سختی طبقات

در این قسمت چهار روش مرسوم در جامعه حرفه‌ای مهندسان عمران و دو روش پیشنهادی برای محاسبه سختی طبقات به صورت دقیق و با استفاده از مدل‌های نرم افزاری، مورد بررسی قرار می‌گیرد (شکل ۱۳):

روش اول: در این روش بدون هیچ گونه تغییر در مدل اصلی، نیرو بر مرکز جرم طبقه آخر اعمال شده و از طریق محاسبه تغییرمکان نسبی هر طبقه، سختی آن طبقه محاسبه می‌شود.

روش دوم: در این روش بدون هیچ گونه تغییر در مدل اصلی، نیرو بر مرکز سختی هر طبقه به صورت جداگانه اعمال شده و از طریق محاسبه تغییرمکان نسبی آن طبقه، سختی طبقه محاسبه می‌شود (روش پیشنهادی).

روش سوم: در این روش بدون هیچ گونه تغییر در مدل اصلی، نیروهایی با توزیع مثلثی مشابه نیروی زلزله بر مرکز جرم کلیه طبقات اعمال شده و از طریق محاسبه تغییرمکان نسبی هر طبقه، سختی آن طبقه محاسبه می‌شود.

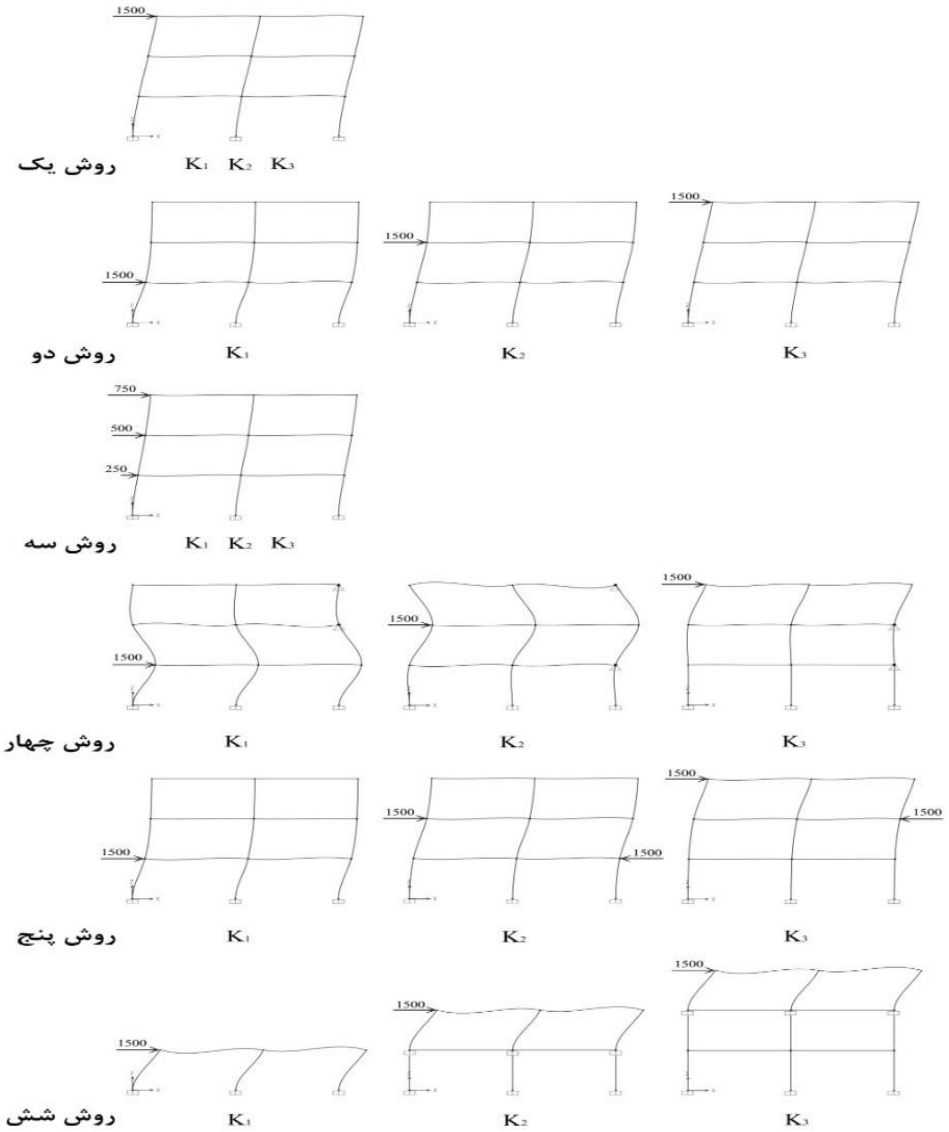
روش چهارم: این روش بر اساس روش المان محدود می‌باشد و در آن تکیه گاه‌های مفصلی برای حذف تغییرمکان افقی طبقات فوقانی و

تحتانی طبقه مورد نظر پیش بینی شده و نیرو بر مرکز سختی آن طبقه اعمال می‌گردد، از طریق محاسبه تغییرمکان، مجموع سختی دو طبقه مجاور محاسبه می‌شود. با توجه به این که سختی حاصل در طبقه آخر تنها مربوط به یک طبقه می باشد به ترتیب با کسر سختی طبقات از بالا سختی هر طبقه محاسبه می‌شود.

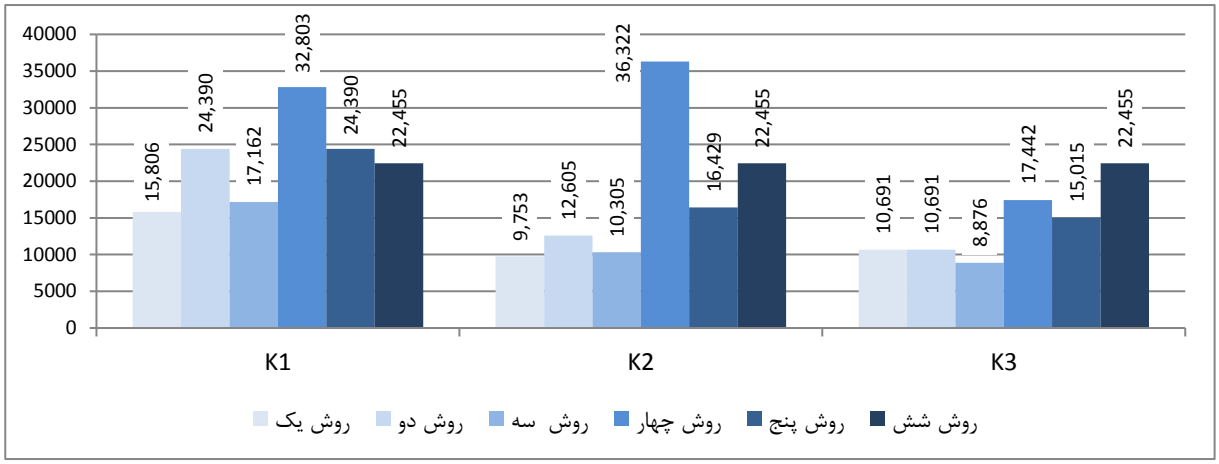
روش پنجم: در این روش نیرو به مرکز سختی طبقه موردنظر اعمال شده و نیرویی با مقدار مساوی و در جهت مخالف در مرکز سختی طبقه تحتانی آن وارد می‌گردد، با محاسبه تغییرمکان نسبی آن طبقه، سختی طبقه محاسبه می‌شود (روش پیشنهادی).

روش ششم: در این روش کلیه طبقات فوقانی طبقه مورد نظر از مدل حذف شده و پایین ستون‌های تحتانی آن طبقه مقید می‌شود. با اعمال نیرو به مرکز سختی طبقه، سختی آن طبقه محاسبه می‌شود.

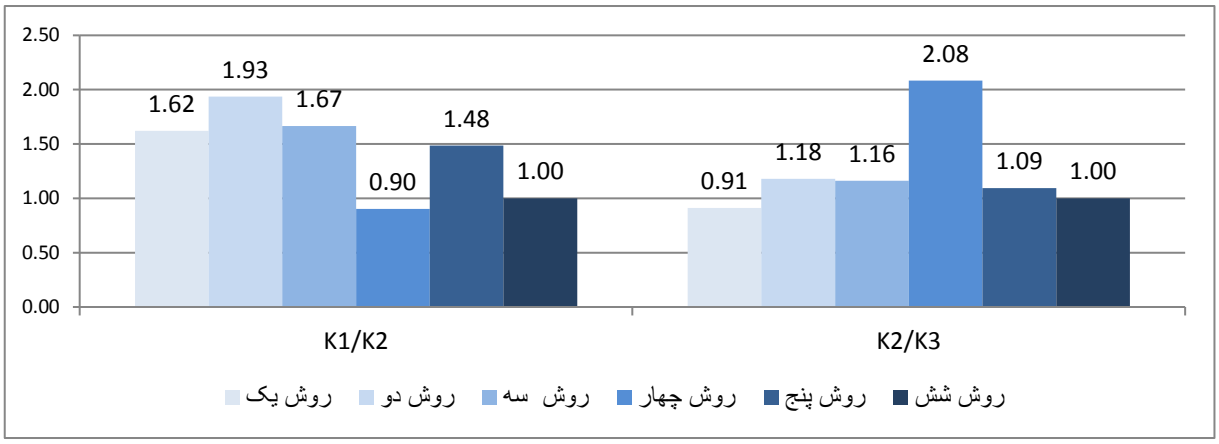
به منظور بررسی کمی و مقایسه روش‌های فوق، یک قاب‌های بتنی دو دهانه سه طبقه که مقاطع اعضای کلیه طبقات آن یکسان می‌باشد مورد مطالعه قرار گرفته و با استفاده از خروجی‌های نرم افزار تحلیل سازه، سختی طبقات و نسبت سختی بین طبقات با استفاده از روش‌های فوق محاسبه گردیده است (شکل ۱۴و ۱۵).



شکل ۱۳– شش روش برای محاسبه سختی طبقات



شکل ۱۴– نمودار مربوط به سختی طبقات بر حسب کیلوگرم نیرو بر سانتیمتر با استفاده از شش روش محاسبه سختی



شکل۱۵– نمودار مربوط به نسبت سختی طبقات مجاور با استفاده از شش روش محاسبه سختی

۹- بحث

روش یک:

– در این روش با توجه به این که تغییری در سازه اصلی ایجاد نمی‌گردد، لذا کلیه آثار تکیه گاهی، چرخش تیر و ستون‌ها و سایر عوامل تاثیرگذار بر سختی طبقات لحاظ می‌گردد.

– با توجه به این که محاسبه سختی در مدل‌های خمشی نسبت به توزیع بار حساس است، به دلیل اختلاف توزیع نیروهای این روش با نیروهای زلزله، سختی حاصله نیز تفاوت خواهد داشت (شکل ۱۳).

– در مدل‌های سه بعدی به دلیل اختلاف بین مرکز جرم طبقه آخر با مرکز سختی سایر طبقات، جابه جایی در امتداد محورهای اصلی در اثر پیچش با مقدار واقعی اختلاف دارد.

– با یک مدل، سختی کلیه طبقات قابل محاسبه می‌باشد.

روش دو:

– در این روش با توجه به این که تغییری در سازه اصلی ایجاد نمی‌گردد، لذا کلیه آثار تکیه گاهی، چرخش تیر و ستون‌ها و سایر عوامل تاثیرگذار بر سختی طبقات لحاظ می‌گردد.

– با توجه به این که محاسبه سختی در مدل‌های خمشی نسبت به توزیع بار حساس است، به دلیل اختلاف توزیع نیروهای این روش با نیروهای زلزله، سختی حاصله نیز تفاوت خواهد داشت (شکل ۱۳).

– با توجه به این که در این روش نیرو به مرکز سختی هر طبقه وارد می-شود، آثار پیچشی که موجب تغییر در مقدار تغییر مکان در امتداد محورهای اصلی ساختمان می‌گردد، حذف می‌شود.

روش سه:

– نتایج سختی این روش تقریباً مشابه روش یک است به استثنای طبقه آخر که کمتر است.

– در این روش با توجه به این که تغییری در سازه اصلی ایجاد نمی‌گردد، لذا کلیه آثار تکیه گاهی، چرخش تیر و ستون‌ها و سایر عوامل تاثیرگذار بر سختی طبقات لحاظ می‌گردد.

– با توجه به این که محاسبه سختی در مدل‌های خمشی نسبت به توزیع بار حساس است، به دلیل استفاده ازالگوی توزیع بار نیروی‌های زلزله در این روش،سختی طبقات بیشترین تطبیق را با نیروهای زلزله دارد(شکل ۱۳).

– با یک مدل، سختی کلیه طبقات قابل محاسبه می‌باشد.

روش چهار:

– به استثنای طبقات آخر، در این روش سختی طبقات به میزان قابل ملاحظه‌ای بیشتر از سایر روش‌هاست.

– در روش کلاسیک المان محدود، به منظور محاسبه سختی در هر درجه آزادی، تمام درجات آزادی دیگر مقید می‌شود. زمانی که سختی طبقه در سازه ساختمان محاسبه می‌شود نه تنها درجات آزادی انتقالی تمام گره ها آزاد می‌شود بلکه درجات آزادی چرخشی آن‌ها نیز آزاد می‌شود. بنابر این زمانی که این رویکرد کلاسیک در تعیین سختی طبقات به کار می‌رود، یک تقریب وجود دارد. به نظر می‌رسد مدل المان محدود برای زمانی که طبقه نرم مورد بررسی قرار می‌گیرد، قابل قبول نبوده و برای محاسبه فرکانس طبیعی و اشکال مودی مناسب است.

– زمانی که یک مدل المان محدود کامل به یک مدل برشی ساده تغییر می‌یابد، یک نوع خلاصه سازی رخ می‌دهد و تمام درجات آزادی چرخشی از ماتریس سختی حذف می‌شود. هرچند انتظار نمی‌رود که در طبقه اول یک ساختمان با اعضای سازه‌ای یکسان، طبقه نرم رخ دهد اما استفاده از این روش در مدل‌ها پتانسیل شکل‌گیری طبقه نرم در طبقه اول را افزایش داده است.

– سختی طبقه وابسته به الگوی توزیع بار جانبی است، لکن این امر در مدل المان محدود لحاظ نمی‌شود (شکل ۱۳).

روش پنج:

– در این روش با توجه به این که تغییری در سازه اصلی ایجاد نمی‌گردد، لذا کلیه آثار تکیه گاهی، چرخش تیر و ستون‌ها و سایر عوامل تأثیرگذار بر سختی طبقات لحاظ می‌گردد.

– با توجه به این که محاسبه سختی در مدل‌های خمشی نسبت به توزیع بار حساس است، به دلیل اختلاف توزیع نیروهای این روش با نیروهای زلزله، سختی حاصله نیز تفاوت خواهد داشت (شکل ۱۳).

با توجه به این که در این روش نیرو به مرکز سختی هر طبقه وارد می شود، آثار پیچشی که موجب تغییر در مقدار تغییر مکان در امتداد محورهای اصلی ساختمان می‌گردد، حذف می‌شود.

– اصولاً هرچه نسبت سختی طبقه به سختی طبقه بعد کمتر باشد، تشخیص طبقه نرم و تقویت سازه با اطمینان بالاتری انجام می‌گردد، از میان روش‌های مورد بررسی نسبت سختی طبقه اول به دوم با استفاده از این روش بعد از روش چهار که اساساً برای تشخیص طبقه نرم مناسب نمی‌باشد، کمترین مقدار را دارد (شکل ۱۵).

روش شش:

– در این روش سختی کلیه طبقات یکسان محاسبه می‌شود.

– با توجه به تعریف تکیه گاه گیردار در پای ستون‌ها، سختی طبقه آخر با این روش بیشتر از سایر روش‌ها می‌باشد.

– در این روش با حذف طبقات فوقانی و تعریف تکیه گاه در پای ستون های طبقه، عملاً سختی واقعی سیستم دستخوش تغییرات اساسی می-گردد.

– با توجه به حذف طبقات فوقانی، سختی ستون‌های فوقانی در سختی طبقات لحاظ نشده و با توجه به ایجاد تکیه گاه گیردار در پای ستون‌ها سختی مضاعفی در طبقه ایجاد می‌گردد لذا برخلاف انتظار که در سازه سه طبقه با مقاطع یکسان، سختی به ترتیب با افزایش طبقات می‌بایست کاهش یابد، با این روش سختی کلیه طبقات یکسان محاسبه می‌شود.

با توجه به این که محاسبه سختی در مدل‌های خمشی نسبت به توزیع بار حساس است، به دلیل اختلاف توزیع نیروهای این روش با نیروهای زلزله، سختی حاصله نیز تفاوت خواهد داشت (شکل ۱۳).

۱۰- نتیجه گیری

بر اساس نتایج تحلیل‌های صورت گرفته، زمانی که هدف بررسی ضوابط طبقه نرم و مطالعه رفتار سازه تحت نیروهای زلزله است، روش سه از لحاظ کلیه معیارها به عنوان مناسب ترین روش محاسبه سختی طبقات با استفاده از نرم افزارهای تحلیل سازه پیشنهاد می‌گردد. در این روش تغییری در سازه اصلی ایجاد نمی‌گردد و در نتیجه کلیه آثار تکیه گاهی، چرخش تیر و ستون‌ها و سایر عوامل تأثیرگذار بر سختی طبقات لحاظ می‌گردد، الگوی توزیع بار در این روش مطابق با الگوی توزیع بار نیروی‌های زلزله است که این امر با توجه به حساسیت مدل‌های خمشی به الگوی بار از اهمیت بالایی برخوردار است، در این روش با استفاده از یک مدل امکان محاسبه سختی کلیه طبقات وجود دارد لذا از سادگی بیشتری در کار تحلیل و طراحی سازه برخوردار است.

۱۱- منابع

[1]. Tena-Colunga, A., "Review of the soft first story irregularity condition of buildings for seismic design", Open Civil Engineering Journal, No 4, 2010, pp1-15.
[2]. Asteris, P. G, "Lateral Stiffness of Brick Masonry Infilled Plane Frames", Journal of Structural Engineering, No 129,2003, pp1071-1079.
[3]. Arslan, M.H.; Korkmaz, H.H., "What is to be learned from damage and failure of reinforced concrete structures during recent earthquakes in Turkey?", Engineering Failure Analysis, No 14, 2007, pp1–22.
[4]. Harmankaya, ZeynepYesim; Soyluk, Asena, "Architectural Design of IrregularBuildings in Turkey", in International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS, Vol. 12, No1, 2012, pp42-48.
[5]. Mulgund, G.V.; Kulkarni, A.B., "Seismic Assesment of RC Frame Buildings with Brick masonry Infills", International journal of advanced engineering sciences and technologies, Vol. 2, Issue 2: 2011, pp140-147.
[6]. Caterino, N.; Cosenza, E.;Azmoodeh, B. M.,"Approximate methods to evaluate storey stiffness and interstory drift of RC buildings in seismic area", Structural Engineering & Mechanics, No 46, 2013, pp245-267.
[7]. Arnold, Christopher,"*Seismic Issues in Architectural Design*", FEMA 454: Designing for Earthquakes, A manual for Architects,2006.
[8]. Tabeshpour, Mohammad Reza, (et al), "*Seismic Behavior and Retrofit of Infilled Frames», Earthquake-Resistant Structures - Design, Assessment and Rehabilitation*", Prof. Abbas Moustafa (Ed.), Available from: http://www.intechopen.com/books/earthquake-resistantstructures-design-assessment-and-rehabilitation/seismic-design-and-retrofit-of-infilled-frames,2012.
[9]. Green, Norman.B, "*Earthquake Resistant Building Design and Construction"*, Newyork, Elsevier Science Publishing Co.Inc,1986.
[10]. Özmen, Cengiz; Ünay, Ali ìhsan, "Commonly encountered seismic design faults due to the architectural design of residential buildings in Turkey", Building and Environment, No 42, 2007, pp1406-1416.
[11]. Yatağan, Serkan, "Damages and Failures Observed in Infill Walls of Reinforced Concrete Frame after 1999 Kocaeli Earthquake", ITU A|Z, Vol 8, No 1, 2011, pp219-228.
[12]. Zhao, Bin, (et al), "Field Investigation on the Performance of Building Structures During the 12 May 2008 Wenchuan Earthquake in China", Engineering Structures, No 31, 2009, pp 1707-1723.
[۱۳]. استاندارد ۲۸۰۰، "آیین نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله"، ویرایش ۴، تهران، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن،۱۳۹۳.
[14]. ASCE 7-10, "*Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*", American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, United States,2010.
[15]. NZS 1170.5:2004, "*Structural Design Actions, Part 5: Earthquake actions- New Zealand*", Published by Standards New Zealand, New Zealand, 2004.
[16]. IS 1893 (Indian Standard), "*Criteria for Earthquake Resistant Design of Structures, Part 1: General Provisions and Buildings"*, Fifth Revision, Bureau of Indian Standard, New Delhi, 2002.
[17]. Schultz, A. E., "Approximating lateral stiffness of stories in elastic frames", Journal of Structural Engineering, 118(1), 1992, pp243-263.
[18]. Heidebrecht, A.C.; Stafford Smith, B., "Approximate analysis of tall wall-frame structures", Journal of the Structural Division, Vol. 99, No 2, 1973, pp199–221.
[19]. Paulay, T.; Priestley, M.J.N., "*Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings*", John Wiley & Sons Inc., New York,1992.
[20]. Hosseini, M.; Imagh-e-Naiini, M. R., "A quick method for estimating the lateral stiffness of building systems", The Structural Design of Tall Buildings, Vol.8, No 3, 1999, 247-260.
[21]. Ramasco, R., "*Lecture notes of the course on buildings in seismic areas*", University of Naples Federico II,2000.

Analytical and Comparative Review of Methods for Determining the Storey Stiffness

Azadeh Noorifard
Ph.D. Candidate in Architecture, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran,
Mohammad Reza Tabeshpour
Assistant Professor, Sharif University of Technology, Tehran, Iran,
tabeshpour@sharif.edu

Abstract:

Soft story has caused the failure of many buildings in previous earthquakes. Several factors such as greater height of columns, removing some columns, lateral bracings, shear walls or infill walls due to architectural design in a story especially ground floor are the main reason of this phenomenon. Most of the seismic codes have criteria for vertical irregularity. This is usually based on the ratio of stiffness between adjacent storeys, but there is no recommendation for calculating the storey stiffness. On the other hand a great number of previous studies on stiffness have focused on approximate methods and exact methods have been almost neglected. In this study, soft storey, weak storey and approximate methods in literature are reviewed and then six exact methods for calculating the storey stiffness by using structural analysis software are investigated. This study is done on 2D reinforced concrete frames. Based on analysis results, method 3 with no modification in the model of structure and the triangular distribution of lateral forces similar to seismic forces has acceptable accuracy and desirable efficiency for designing and controlling structures.

Keywords: Storey Stiffness, Soft Storey, Weak Story, Flexural Model, Shear Model