

اثر تیپ‌بندی اعضا روی رفتار لرزه‌ای قاب‌های خمشی بتن آرمه

مهدی کریمی^۱، علی خیرالدین^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، مدرس دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

kheyroddin@semnan.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۲/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۷/۱۷

چکیده- از عوامل موثر بر رفتار لرزه‌ای سازه‌ها که طراحی، به آن وابسته است، تیپ‌بندی المان‌های سازه‌ای هنگام آزمایش و طراحی است. تیپ‌بندی که بیشتر به خاطر آسانی اجرا و سادگی کار انجام می‌شود، روی رفتار لرزه‌ای سازه اثر می‌گذارد. در این پژوهش اثر تیپ‌بندی ستون‌های بتن آرمه روی رفتار غیرخطی سازه‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه بتن آرمه و پاسخ‌های سازه مانند بیشینه تغییر مکان و شاخص‌های خسارت (با تیپ‌بندی و بدون تیپ‌بندی) بررسی شده است تا نتایج مثبت و منفی این تیپ‌بندی‌ها که اکنون در طراحی و اجرای سازه مرسوم است، روشن شود. سازه‌های مورد نظر با رکورد زلزله طبس با شتاب‌های بیشینه (PGA) گوناگون ارزیابی دینامیکی غیرخطی شد و شاخص‌های خسارت برپایه‌ی المان‌ها، طبقات و نیز شاخص‌های کلی خسارت بر پایه‌ی شاخص خسارت Park-Ang-Wen، محاسبه و ارائه شده است. نتایج ارزیابی، گویای کم بودن اثر تیپ‌بندی در PGAهای کمتر از 0.5g بر خسارت کلی سازه است و از روی دیگر نشان می‌دهد که در PGAهای بزرگ‌تر، سازه‌های تیپ‌بندی شده دچار خسارت‌های بیشتری می‌شود. تیپ‌بندی المان‌های سازه‌ای باعث تمرکز انرژی و خسارت در المان‌هایی می‌شود که نسبت نیرو به ظرفیت المان (D_E/C_E) در تراز بالاتری قرار دارد؛ این پدیده باعث ایجاد طبقات نرم در سازه و بیشتر مواقع افزایش خسارت کلی سازه می‌شود.

کلیدواژگان: تیپ‌بندی، سازه بتن آرمه، ارزیابی دینامیکی غیر خطی، شاخص خسارت.

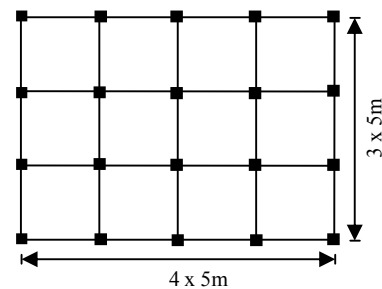
۱- مقدمه

را کاهش می‌دهد، تیپ‌بندی المان‌های سازه‌ای مانند تیرها، ستون‌ها و دیوارهای برشی است. توجه به مسائل اجرایی و سرعت ساخت، اقتصادی بودن و دیگر عوامل نباید به اندازه‌ای باشد که هدف اصلی طرح یک سازه یعنی ایمنی، کم رنگ و مسئله‌دار شود. این موضوع، انگیزه پژوهش و نوشتن این مقاله بوده و اثر این نوع تیپ‌بندی بر طراحی سازه، بررسی و ارزیابی شده است.

به هنگام طراحی یک سازه واقعی، توجه طراح به مسائل اجرایی و مواردی است که در طرح و ساخت یک پروژه وجود دارد. طراح باید همه پارامترها مانند ایمنی، اقتصادی بودن، اجرایی بودن، آسانی و سرعت اجرا را در نظر گرفته باشد. از مسائلی که باعث آسانی اجرا و سرعت ساخت شده و همچنین احتمال اشتباه در مرحله اجرای یک سازه

۲- فرض‌ها و گستره پژوهش

بررسی ساختمان‌های با ارتفاع کم (۴ طبقه)، متوسط (۸ طبقه) و نسبتاً بلند (۱۲ طبقه)، با نقشه شکل ۱ انجام شده است. سامانه مقاوم باربر کناری از نوع قاب خمشی بتن‌آرمه با شکل‌پذیری متوسط انتخاب شده و در طراحی این سازه‌ها، تیرها به صورت متداول بدون تیپ‌بندی ویژه طراحی شده و تنها تیپ‌بندی ستون‌ها در نظر بوده است.



شکل (۱) پلان سازه مورد مطالعه

هر کدام از سازه‌ها (۴، ۸ و ۱۲ طبقه)، یک‌بار بدون تیپ‌بندی و چند بار با تیپ‌بندی به شرح جدول ۱، طراحی شده است. در ارائه نتایج، نمودارها و شکل‌ها از کدبندی به کار رفته در این جدول استفاده خواهد شد. در نام‌گذاری سازه‌ها، حرف s به معنی طبقه، عدد قبل از s تعداد طبقه سازه و عدد بعد از s شماره ویژه هر سازه، هماهنگ با جدول ۱ است. برای نمونه، سازه ۵-۱۲s مربوط به سازه ۱۲ طبقه با شماره ۵ (سازه تیپ‌بندی شده تنها با یک تیپ ستون) است.

۳- فرض‌های در نظر گرفته شده در ارزیابی و طراحی سازه‌ها

بارگذاری سازه‌ها بر پایه‌ی مبحث ششم مقررات ملی ایران [۱] و استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش سوم) [۲] و طراحی سازه‌ها نیز با استفاده از مبحث نهم مقررات ملی ایران [۳] انجام شده است. مقاومت ویژه بتن بر پایه‌ی نمونه

استوانه‌ای، 250 kg/cm^2 و مقاومت تسلیم فولادها، 4000 kg/cm^2 در نظر گرفته شده است.

جدول (۱) شرح تیپ‌بندی‌های انجام‌شده و کدبندی به کار رفته در

نمودارها

تیپ‌بندی بکار رفته در طراحی	شماره سازه	کدبندی سازه	
تیپ ۱	سازه با طراحی بدون تیپ‌بندی	۱-۴	تیپ ۱
	تیپ‌بندی هر یک طبقه (۴ تیپ ستون)	۲-۴	
	تیپ‌بندی هر دو طبقه (۲ تیپ ستون)	۳-۴	
	تیپ‌بندی تنها با یک تیپ ستون	۴-۴	
تیپ ۲	سازه با طراحی بدون تیپ‌بندی	۱-۸	تیپ ۲
	تیپ‌بندی هر دو طبقه (۱۲ تیپ ستون)	۲-۸	
	تیپ‌بندی هر دو طبقه (۴ تیپ ستون)	۳-۸	
	تیپ‌بندی هر چهار طبقه (۲ تیپ ستون)	۴-۸	
تیپ ۳	تیپ‌بندی تنها با یک تیپ ستون	۵-۸	تیپ ۳
	طراحی بدون تیپ‌بندی	۱-۱۲	
	تیپ‌بندی هر دو طبقه (۶ تیپ ستون)	۲-۱۲	
	تیپ‌بندی هر چهار طبقه (۳ تیپ ستون)	۳-۱۲	
	تیپ‌بندی هر شش طبقه (۲ تیپ ستون)	۴-۱۲	
تیپ ۴	تیپ‌بندی تنها با یک تیپ ستون	۵-۱۲	تیپ ۴

کاربری سازه‌ها مسکونی، خطر لرزه‌خیزی منطقه خیلی زیاد، نوع زمین تیپ II و سامانه مقاوم باربر کناری بر پایه‌ی مبحث نهم مقررات ملی و استاندارد ۲۸۰۰، قاب خمشی بتنی متوسط (ضریب رفتار ۷) فرض شده است. ارزیابی‌های دینامیکی غیرخطی با شتاب‌نگاشت زلزله طیس و با شتاب‌های پیشینه (PGA) گوناگون انجام شده است.

۴- روش مطالعه و پژوهش

ارزیابی‌های خطی و طراحی سازه‌ها با نرم‌افزار ETABS2000 V 9.70 [۴] انجام شده و برای ارزیابی‌های غیر خطی (استاتیکی و دینامیکی) و ارزیابی خسارت از برنامه غیر خطی IDARC V7.0 [۵] استفاده شده است. برنامه IDARC^۱، مدل ساختمان‌های بتنی مسلح را

1- Inelastic Damage Analysis of Reinforced Concrete Building

بصورت سه بعدی پذیرفته و ارزیابی های دینامیکی و استاتیکی را انجام می دهد. در بخش ارزیابی استاتیکی (ارزیابی بار افزون) برنامه، منحنی بار افزون به دست آمده را رسم کرده ویژگی های دینامیکی سازه مانند دوره، ضریب مشارکت مودی و شکل های مودی را در آغاز ارزیابی و مراحل مهم ارزیابی شامل ترک خوردن نخستین تیر و ستون، محاسبه کرده و ارزیابی خسارت را نیز در هریک از این مراحل ارائه می دهد. مقادیر تنش و انرژی هدر رفته در هر یک از المان های سازه ای، از دیگر خروجی های برنامه در هریک از مراحل یادشده است. در بخش ارزیابی دینامیکی، برنامه ترتیب رویداد ترک ها و مفصل های پلاستیک ایجاد شده، مقادیر بیشینه پاسخ، انرژی هیسترتیک هدر رفته و ویژگی های دینامیکی سازه در آغاز و سرانجام ارزیابی را ارائه داده و خسارت سازه ای را بر پایه ی تابع خسارت اصلاح شده Park-Ang-Wen محاسبه و ارائه می کند. این تابع خسارت از آن جا که بر پایه ی انرژی هیسترتیک هدر رفته محاسبه می شود، از مناسب ترین توابع خسارت در برآورد خسارت وارد شده به سازه است. این تابع به صورت ترکیب خطی نسبت تغییر مکان بیشینه به ظرفیت نهایی مقطع با تابعی از انرژی جذب شده در المان ارائه می شود.

فرمول به کار رفته برای محاسبه شاخص خسارت بر پایه ی تابع خسارت Ang-Park نخست به صورت زیر ارائه شد:

تابع خسارت Ang-Park نخست به صورت زیر ارائه شد:

$$DI_{P\&A} = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \frac{\beta}{P_y \delta_u} \int dE \quad (1-4)$$

یا

$$DI_{P\&A} = \frac{\theta_m}{\theta_u} + \frac{\beta}{M_y \theta_u} \int dE$$

درست شده این تابع (تابع خسارت درست شده

$$DI_{P\&A} = \frac{\delta_m - \delta_r}{\delta_u - \delta_r} + \frac{\beta}{P_y \delta_u} E_h \quad (2-4)$$

یا

$$DI_{P\&A} = \frac{\theta_m - \theta_r}{\theta_u - \theta_r} + \frac{\beta}{M_y \theta_u} E_h$$

که در آن:

δ_m یا θ_m بیشینه پاسخ تغییر شکل یا چرخش در طول زمان بارگذاری، δ_u یا θ_u ظرفیت نهایی مقطع در تغییر شکل یا چرخش δ_r یا θ_r تغییر شکل یا چرخش برگشت پذیر (تغییر شکل الاستیک) هنگام باربرداری، P_y یا M_y نیرو یا ممان جاری شدگی مقطع، β یک ثابت پارامتری برای مقادیر کم زوال مقاومت با مقدار پیشنهاد شده ۰/۱ است (Park et al. 1987) یا $\int dE$ مقدار انرژی هدر رفته در مقطع است.

شاخص خرابی در هر دو انتهای المان، محاسبه شده و بزرگ ترین مقدار آن، شاخص خرابی المان است. از این تابع برای محاسبه شاخص خسارت المان های سازه ای، شاخص خسارت طبقه و نیز شاخص کلی خسارت در برنامه IDARC استفاده می شود.

برای محاسبه شاخص خسارت طبقات و شاخص کلی خسارت، شاخص خسارت المان های سازه ای با ضرایب وزنی میانگین گیری شده و شاخص خسارت طبقه، به دست می آید. از میانگین گیری دوباره ی شاخص های خسارت طبقات با وارد کردن ضرایب وزنی، شاخص خسارت کلی به دست می آید.

ضرایب وزنی به کار رفته در محاسبات به صورت زیر

شتاب‌های بیشینه (PGA) $0.35g$ و $0.5g$ و $0.75g$ و $0.9g$ ارزیابی تاریخیچه زمانی غیر خطی شد که نتایج به صورت‌های گوناگون با هم مقایسه شده است. مقایسه‌های کمی ارائه‌شده در این مقاله، میان سازه تیپ‌بندی نشده و سازه تیپ‌بندی شده در حالت نامساعد آن (سازه تیپ‌بندی شده با بیشینه شاخص خسارت) محاسبه و ارائه شده است.

جدول (۲) شاخص‌های خسارت کالیبره‌شده بر پایه میزان خسارت [۶]

وضعیت ساختمان	شاخص خسارت	ظاهر ساختمان	میزان خسارت
تخریب ساختمان	$> 1/0$	فروریختگی همه یا بخشی از ساختمان	فروریختگی
غیرقابل تعمیر	$1/0 - 0/4$	خردشدگی شدید بتن و کماتش آرماتورها	شدید
قابل تعمیر	$< 0/4$	ایجاد ترک‌های بزرگ و خردشدن بتن در اعضای ضعیف	متوسط
"	"	ایجاد ترک‌های کوچک و خردشدگی جزئی در بتن ستونها	کم
"	"	ایجاد ترک‌های پراکنده در سازه	خیلی کم

مقایسه بیشینه تغییر مکان‌های نسبی طبقات به گونه‌ای کلی، گویای روند افزایشی این تغییر مکان‌ها با کاهش تعداد تیپ‌های در نظر گرفته شده در طراحی است. پخش بیشینه تغییر مکان‌های نسبی در شکل‌های ۳ تا ۵ آمده است. همان گونه که در این نمودارها دیده می‌شود، اگرچه این روند افزایشی (روند افزایشی تغییر مکان‌های نسبی با کاهش تعداد تیپ‌بندی) کاملاً منظم نیست و در همه موارد درست نیست، ولی نگاه کلی به روند این تغییرات در نمودارهای بحث شده گویای درستی این موضوع است.

بر پایه‌ی انرژی هیسترتیک هدر رفته به دست می‌آید [۶]:

$$DI_{story} = \sum (\lambda_i)_{component} (DI_i)_{component}$$

$$(\lambda_i)_{component} = \left(\frac{E_i}{\sum E_i} \right)_{component}$$

$$DI_{overall} = \sum (\lambda_i)_{story} (DI_i)_{story}$$

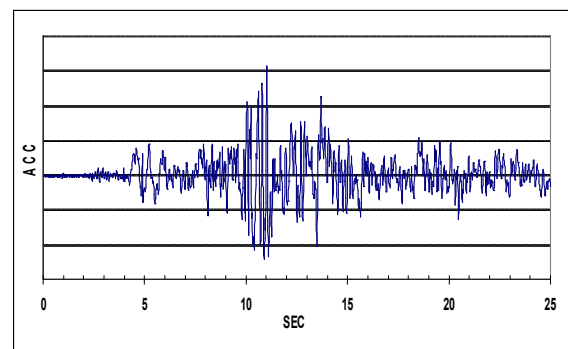
$$(\lambda_i)_{story} = \left(\frac{E_i}{\sum E_i} \right)_{story}$$
(۳-۴)

λ_i ضریب وزنی بر پایه‌ی انرژی و E_i کل انرژی هدر رفته (جذب‌شده) در المان نام یا طبقه نام (برحسب مورد) است.

مدل خسارت یادشده با استفاده از خرابی‌های دیده شده برای ۹ سازه بتنی مسلح کالیبره شده است (Park et al. 1987). جدول ۲، شاخص‌های خسارت کالیبره‌شده بر پایه خرابی‌های دیده شده را ارائه می‌دهد.

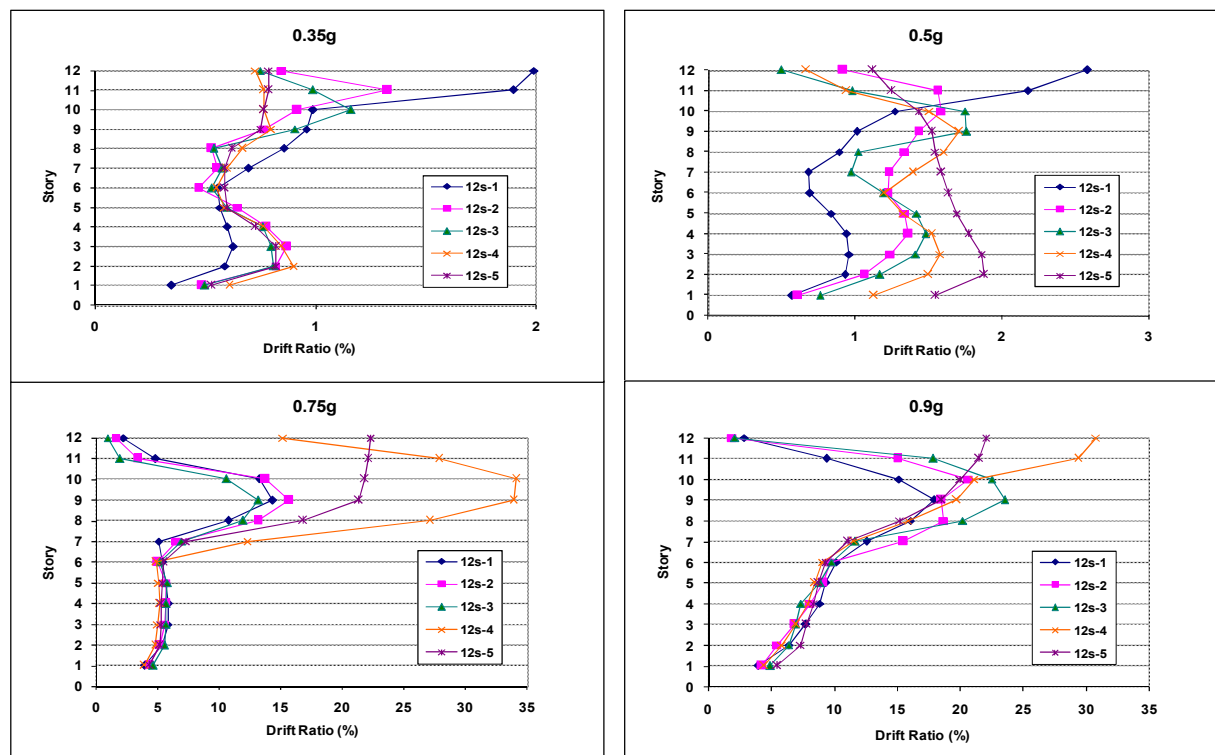
۵- ارزیابی دینامیکی (تاریخیچه زمانی) غیر خطی

ارزیابی‌های دینامیکی غیر خطی به وسیله‌ی برنامه IDARC و با شتاب‌نگاشت زلزله طیس (شکل ۲) انجام شده است.

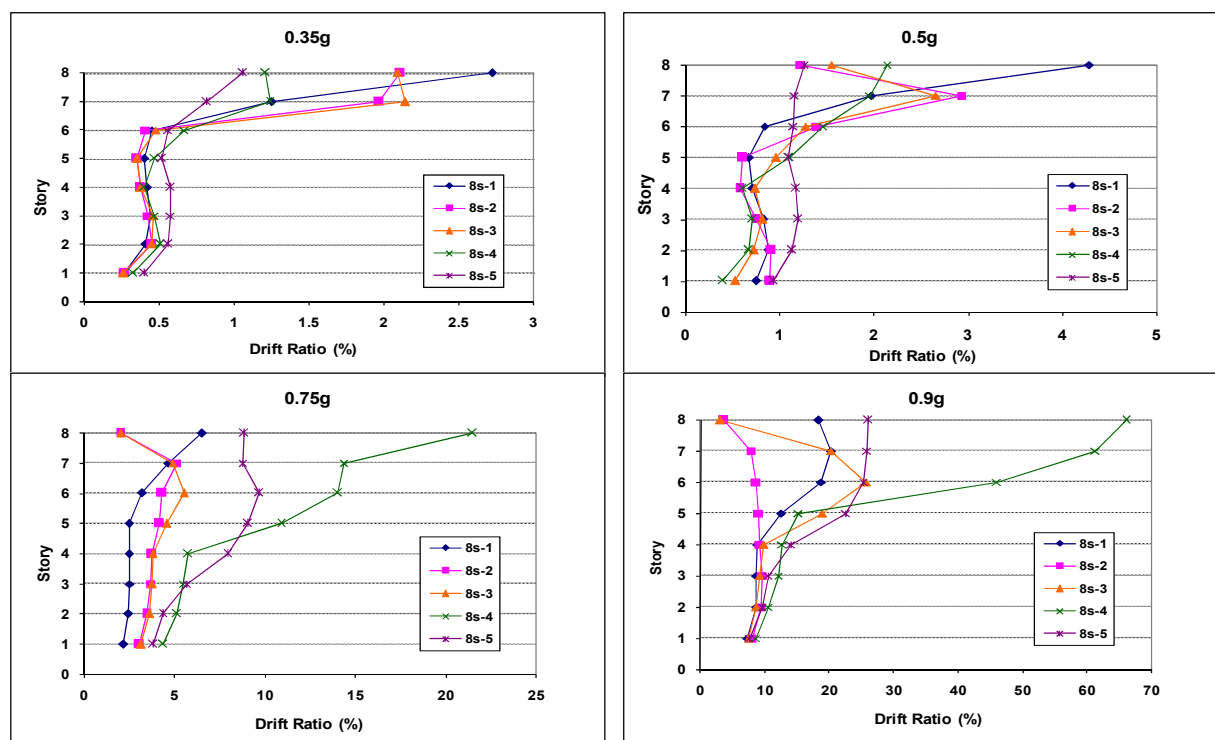


شکل (۲) شتاب‌نگاشت زلزله طیس

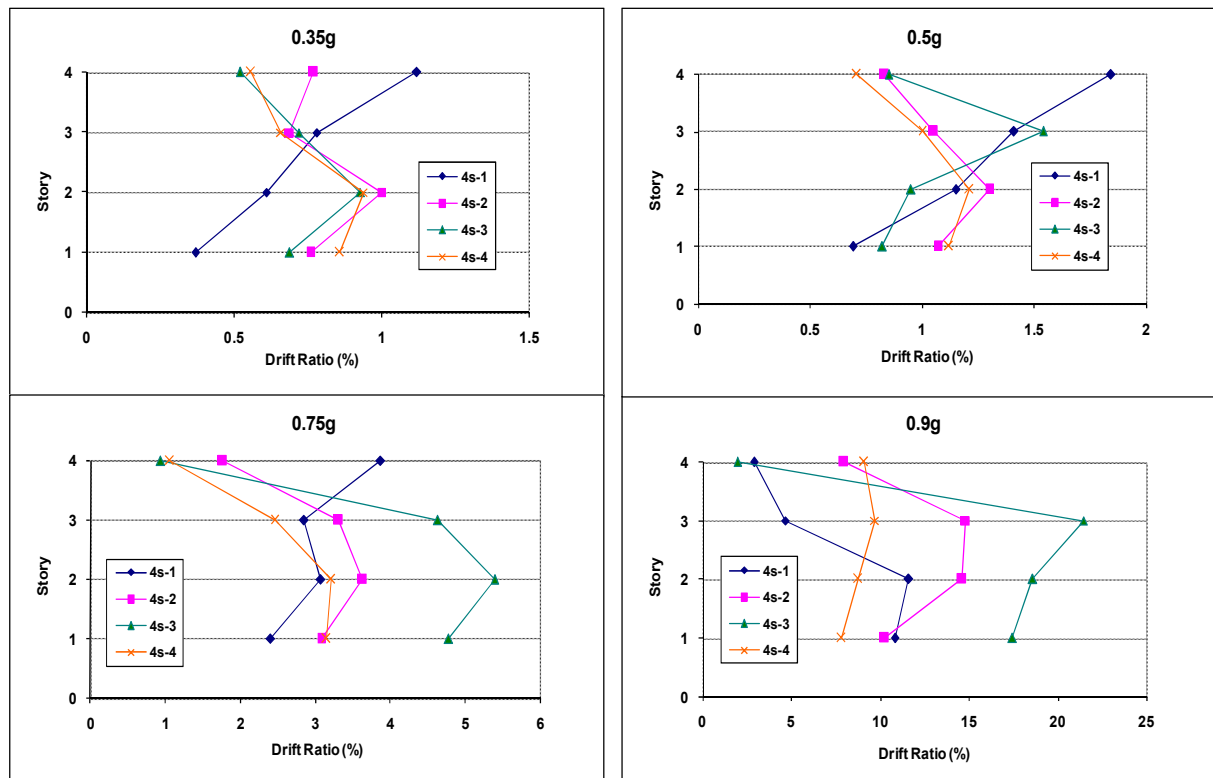
هر یک از سازه‌های جدول ۱، در رکورد زلزله طیس و با



شکل (۳) توپخش بیشینه تغییر مکان‌های نسبی طبقات در زلزله طبس بر پایه PGAهای گوناگون (سازه‌های ۱۲ طبقه)



شکل (۴) پخش بیشینه تغییر مکان‌های نسبی طبقات در زلزله طبس بر پایه PGAهای گوناگون (سازه‌های ۸ طبقه)



شکل (۵) پخش بیشینه تغییر مکان‌های نسبی طبقات در زلزله طیس بر پایه‌ی PGAهای گوناگون (سازه‌های ۴ طبقه)

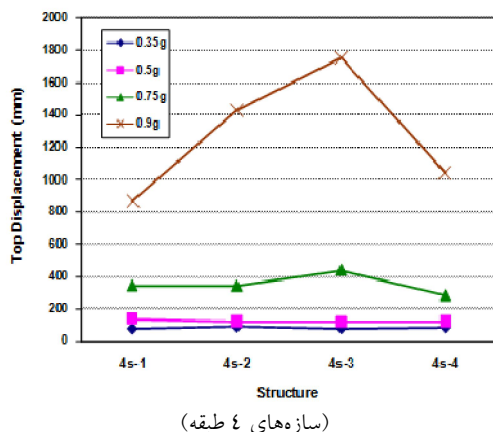
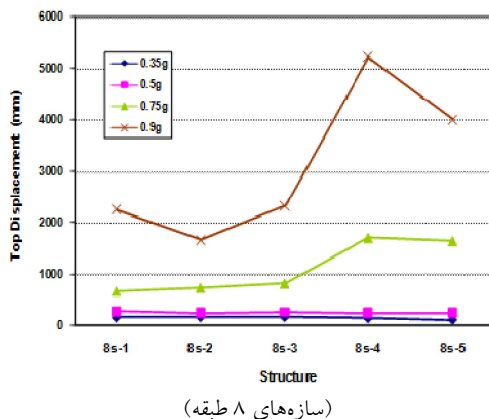
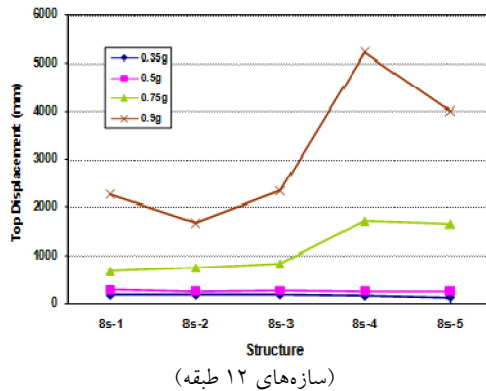
متعادل‌تر در سازه پخش شده و سازه رفتار بهتری از خود نشان می‌دهد.

مقایسه نمودارها نشان می‌دهد که میزان بیشینه تغییر مکان نسبی به طور متوسط در ۶۳ درصد موارد در سازه‌های تیپ‌بندی شده، حدود ۱۱۶ درصد بیشتر از سازه‌های تیپ‌بندی نشده است و در بقیه موارد (۳۷ درصد باقی‌مانده) سازه‌های تیپ‌بندی شده، کاهش ۲۸ درصدی را نشان می‌دهند. در مورد این موضوع و آثار دیگر آن در ادامه مباحث بیشتری گفته خواهد شد.

از پاسخ‌های بیشینه دیگر سازه در زلزله، تغییر مکان بالای سازه (بام) است که این‌جا مقایسه شده است. پاسخ بیشینه تغییر مکان بام از سازه‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه، بر پایه‌ی تیپ‌بندی‌های انجام شده (کدبندی به کار رفته در جدول ۱) با یکدیگر مقایسه شده است (شکل ۶). نمودارهای به دست

این روند برای شتاب‌های بیشینه بالا (PGAهای بزرگ‌تر از ۰/۵g) محسوس‌تر است. در توضیح می‌توان گفت که در PGAهای پایین (زلزله‌های کوچک) به خاطر کوچک‌تر بودن نیروهای زلزله و از سوی دیگر بالاتر بودن ضریب برش پایه (افزایش مقاومت تسلیم) سازه‌های تیپ‌بندی شده، نیروهای داخلی سازه، از مقاومت تسلیم المان‌های سازه‌ای، کوچک‌تر بوده و المان در ناحیه ارتجاعی باقی مانده و در پی آن، خسارت در سازه‌های تیپ‌بندی شده، کم و بیش پیرامون خسارت در سازه‌های بدون تیپ‌بندی است. در زلزله‌های شدید که المان‌های سازه‌ای کاملاً وارد ناحیه پلاستیک می‌شوند، در سازه‌های تیپ‌بندی نشده، به خاطر پخش متناسب نیرو در المان‌ها، تمرکز نیرو و انرژی جذب شده در سازه کمتر است و شاخص‌های خرابی مانند تغییر مکان‌های نسبی طبقات، به صورت

پاسخ‌های بیشینه که تنها در یک لحظه ویژه در مدت زلزله اتفاق می‌افتد، یک تابع تجمعی از خسارت است و بیان‌کننده وضعیت سازه بر پایه تغییرات لحظه به لحظه شرایط سازه در مدت ارتعاش‌های لرزه‌ای است؛ از این رو یک تابع خسارت مناسب برای برآورد خسارت وارد شده به سازه است.



شکل (۶) پاسخ حداکثر تغییر مکان بام در زلزله طبس

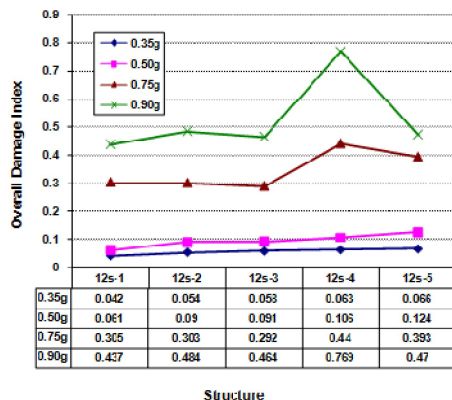
آمده از پاسخ بیشینه تغییر مکان بام، در هر یک از قسمت‌های شکل ۶، با PGAهای گوناگون آمده است. همان گونه که در این شکل‌ها دیده می‌شود و در قسمت ارائه نتایج تغییر مکان‌های نسبی نیز به آن اشاره شد، در PGAهای پایین (کمتر از ۰/۵g) اثر تیپ‌بندی بر پاسخ و رفتار لرزه‌ای سازه، کمتر است و با افزایش بیشینه شتاب زمین (PGA)، این اثر چشم‌گیرتر می‌شود؛ به گونه‌ای که با کاهش تعداد تیپ‌بندی در نظر گرفته شده در طراحی سازه (محور افقی نمودار در راستای مثبت)، پاسخ بیشینه معمولاً افزایش می‌یابد. بررسی نمودارهای پاسخ بیشینه تغییر مکان بام نشان می‌دهد که تغییر مکان سازه تیپ‌بندی شده نسبت به سازه تیپ‌بندی نشده در سازه‌های ۴ طبقه، ۳۰ درصد، در سازه‌های ۸ طبقه، ۶۷ درصد و در سازه‌های ۱۲ طبقه، ۴۸ درصد افزایش یافته است.

مورد استثنائی که در این نمودارها و دیگر نمودارهای ارائه شده در این مقاله، رفتاری معکوس از خود نشان می‌دهد، مربوط به سازه‌ای است که تنها با یک تیپ ستون طراحی شده است. همان گونه که در این نمودارها (شکل‌های ۶ و ۷) دیده می‌شود، سازه‌ای که تنها با یک تیپ ستون طراحی شده است، اگرچه نسبت به سازه تیپ‌بندی نشده، بیشینه پاسخ بزرگ‌تری دارد، اما روند افزایشی نمودارها را در بیشتر موارد تغییر داده است. درباره‌ی علت این رفتار در ادامه در بخش مربوط به ایجاد طبقه نرم هنگام طراحی یک سازه به روش تیپ‌بندی المان‌های سازه‌ای توضیح داده شده است.

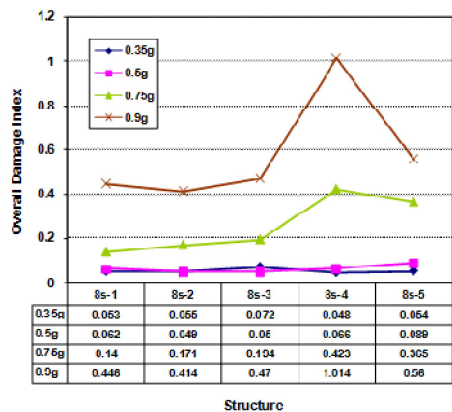
در این بخش، شاخص‌های خسارت معرفی شده در بخش ۴ این مقاله (شاخص خسارت اصلاح شده Park-Ang-Wen) روی سازه‌های تیپ‌بندی شده و تیپ‌بندی نشده در زلزله طبس مقایسه می‌شود.

همان گونه که در بخش یادشده مطرح شد، شاخص خسارت بالا بر پایه‌ی انرژی هیستریک هدر رفته و تغییر شکل، به دست می‌آید، بنابراین برخلاف بیشتر شاخص‌های دیگر و

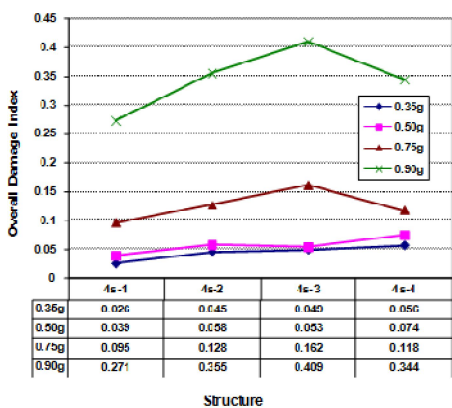
شده به سازه جلوگیری شود.



(سازه‌های ۱۲ طبقه)



(سازه‌های ۸ طبقه)



(سازه‌های ۴ طبقه)

شکل (۷) مقایسه شاخص‌های کلی خسارت در زلزله طیس (شاخص خسارت Park-Ang-Wen)

از پیامدها و عوارض تمرکز انرژی و در پی آن تمرکز

شاخص‌های کلی خسارت که بر پایه‌ی این تابع خسارت و معادلات (۳-۴) به دست آمده، برای سازه‌های بررسی شده، در شکل ۷ مقایسه شد.

رفتار متضاد گفته شده در پاسخ بیشینه تغییر مکان بام برای سازه‌های تیپ‌بندی شده با یک ستون، در این نمودارها نیز دیده می‌شود. بررسی شاخص‌های کلی خسارت، نشان‌دهنده افزایش خسارت سازه‌های تیپ‌بندی شده نسبت به سازه تیپ‌بندی نشده با میزان ۶۱ درصد در سازه‌های ۴ طبقه، ۸۲ درصد در سازه‌های ۸ طبقه و ۶۱ درصد در سازه‌های ۱۲ طبقه است.

۶- تشکیل طبقات نرم

هنگام طراحی یک سازه، دو هدف بیشتر در ذهن طراح است؛ ایمنی سازه و اقتصادی بودن طرح.

برای اقتصادی و یا بهینه کردن یک طرح سازه‌ای، باید نیروی موجود در المان‌های سازه‌ای، تنها کمی کوچک‌تر از مقاومت و ظرفیت المان باشد. برای برآوردن این هدف، سعی می‌شود در طرح یک سازه، نسبت نیرو به مقاومت المان (D_E/C_E) بین ۰/۹ تا ۱ نگه داشته شود $(0.9 < D_E/C_E < 1)$. به بیان دیگر، اضافه مقاومت درون المان، نزدیک به صفر باشد.

هنگامی که یک سازه بدون در نظر گرفتن تیپ‌بندی المان‌های آن طراحی می‌شود، محقق کردن این موضوع از دیدگاه نظری ممکن است. در این حالت، نسبت نیرو به مقاومت درون المان، نزدیک به یک است که یعنی هنگام زلزله، باد و یا نیروهای دیگر وارد به سازه، همه‌ی المان‌های سازه تقریباً هم‌زمان شکست خورده و یا وارد ناحیه پلاستیک می‌شوند. این موضوع باعث می‌شود که هنگام وارد شدن نیروهای بالا به ویژه نیروی زلزله، که سازه برای آن به صورت شکل‌پذیر طراحی می‌شود، خسارت وارد شده و انرژی تلف‌شده، یکنواخت جذب سازه شود و از تمرکز انرژی جذب‌شده و خسارت وارد

در طراحی سازه با در نظر گرفتن تیب‌بندی (شکل ۸-ب) هنگامی که برای نمونه، المان‌های ۱ و ۲ در شکل ۸-الف با یکدیگر تیب می‌شوند، المان ۲ باید از دیدگاه اندازه و دیگر ویژگی‌های هندسی، مانند المان ۱ شود و در نتیجه ظرفیت المان ۲، افزون بر نیاز آن (نیروی داخلی المان) خواهد شد که این ظرفیت افزون، باعث کاهش D_E/C_E المان ۲ می‌شود؛ این موضوع در شکل ۸-ب نشان داده شده است.

با توجه به توضیحات، هنگام زلزله المان‌های ۱ و ۳ در شکل ۸-ب به صورت فیوز کار کرده و با جذب انرژی بیشتر و خراب شدن خود، از رسیدن خسارت‌های بیشتر به المان‌های ۲ و ۴ جلوگیری میکنند. این پدیده باعث ایجاد طبقات نرم در محل المان‌های ۱ و ۳ می‌شود.

پدیده ایجاد طبقات نرم را برای نمونه می‌توان در سازه ۸ طبقه شکل ۹ بررسی کرد؛ در این شکل، سازه با طراحی بدون تیب‌بندی و سازه‌های طراحی شده با در نظر گرفتن تیب‌بندی با هم مقایسه شده است. یکی از ستون‌های سازه به صورت نمادین، تفاوت بین سازه‌های طراحی شده با تیب‌بندی و بدون تیب‌بندی را نشان می‌دهد.

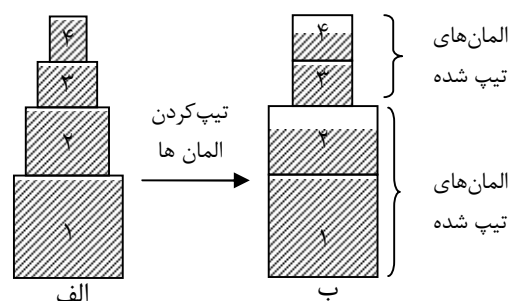
طبقات مستعد ایجاد طبقه نرم، در این شکل به صورت هاشورخورده دیده می‌شود.

انرژی هیسترتیک از بین رفته و خسارت وارد شده به طبقات هاشورخورده در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ با هم مقایسه شده است. این مقایسه گویای جذب انرژی و خسارت کمتر در طبقات هاشورخورده در سازه‌های بدون تیب‌بندی و یا سازه‌های کمتر تیب‌بندی شده (تعداد تیب بیشتر) نسبت به سازه‌های بیشتر تیب‌بندی شده (تعداد تیب کمتر) است و نظریه مطرح شده در این بخش را تأیید می‌کند.

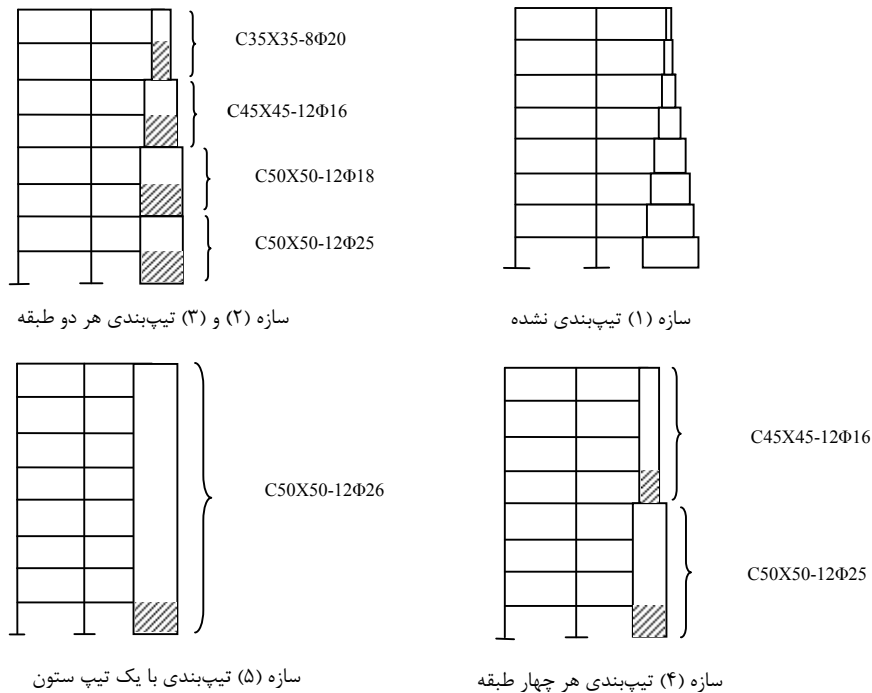
خسارت در یک نقطه از سازه، شکست سازه از نقطه ضعف است که خرابی زنجیره‌ای سازه را در پی خواهد داشت. تمرکز خسارت باعث می‌شود که المان خسارت دیده از تحمل نیروی داخلی خود خارج شود و نیروی موجود در المان، به دیگر اعضای سازه که برای این نیروی اضافی طراحی نشده است انتقال یابد که در نتیجه به گسترش خرابی و یا خرابی کلی سازه می‌انجامد.

اگر از دیدگاه بالا، یک سازه که با در نظر گرفتن تیب‌بندی المان‌های آن طراحی شده است بررسی شود، دیده می‌شود که در طراحی این سازه، با هنگامی که دو یا چند المان سازه‌ای به صورت تیب طراحی می‌شوند (در یک تیب قرار می‌گیرند)، نیروهای موجود در این المان‌ها (نیروهای داخلی المان) در حالت کلی با یکدیگر برابر نخواهد بود. با تیب کردن این المان‌ها، المان‌های ضعیف‌تر که نیروی داخلی کوچک‌تری دارند، باید تا حد قوی‌ترین المان‌ها، قوی شوند تا این دسته از المان‌ها در یک تیب قرار گیرند.

شکل ۸-الف سازه‌ای را نشان می‌دهد که بدون تیب‌بندی، طراحی شده است. زمینه سفید نشان دهنده ظرفیت یا مقاومت المان (Capacity) و قسمت هاشورخورده نشان دهنده نیروی داخلی المان (Demand) است. در حالت طراحی سازه بدون تیب‌بندی (شکل ۸-الف) نسبت D_E/C_E همه‌ی المان‌ها، پیرامون ۱ است، و بنابراین قسمت هاشورخورده تقریباً برابر زمینه سفید است.

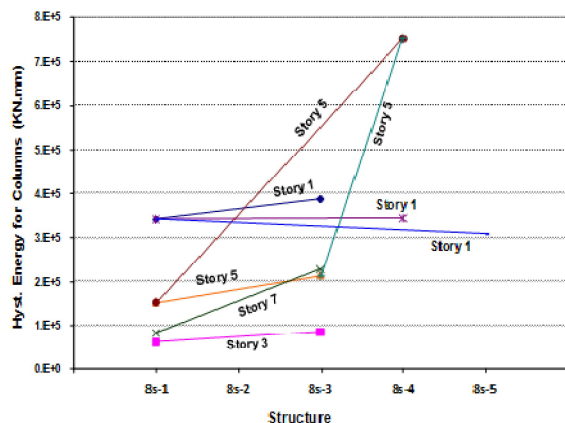


شکل (۸) طرح‌های سازه‌های تیب‌بندی شده و تیب‌بندی نشده



شکل (۹) مقایسه کلی سازه‌های تیپ‌بندی شده و تیپ‌بندی نشده در سازه ۸ طبقه

به وسیله طبقه نخست از زمین جدا می‌شود (شکل ۱۲). اگرچه خسارت وارد شده به طبقه نخست در این حالت بسیار زیاد می‌شود، خسارت کلی سازه که از میانگین‌گیری وزنی خسارات وارد شده به طبقات (معادلات ۳-۴) به دست می‌آید، کاهش می‌یابد.



شکل (۱۰) مقایسه میزان انرژی هیسترتیک جذب‌شده در طبقات هاشورخورده شکل ۹ (سازه ۸ طبقه)

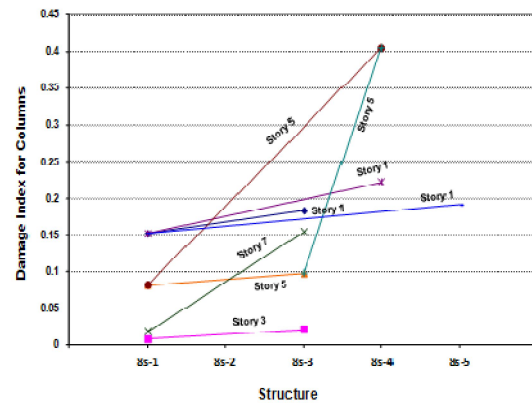
همان‌گونه که در بخش ۵ نیز اشاره شد، نمودارهای ارائه شده (شکل‌های ۶ و ۷) در مورد سازه‌هایی که تنها با یک تیپ ستون طراحی شده است، رفتاری معکوس از خود نشان می‌دهند. با توجه به توضیحات این بخش، در طراحی سازه‌های تنها با یک تیپ ستون، ستون‌های طبقه نخست که بیشترین برش طبقه را در زلزله تحمل می‌کند، قوی‌ترین ستون‌های سازه است و هنگام طراحی با یک تیپ ستون، بیشترین مقدار D_E/C_E (نزدیک به ۱) را دارد. این نسبت از طبقه پایین به سمت طبقات بالا کاهش می‌یابد. این موضوع باعث می‌شود طبقه نخست به طبقه نرم تبدیل شود و در نتیجه، انرژی جذب‌شده و خسارت در این طبقه متمرکز شود و از رسیدن خسارت بیشتر به دیگر طبقات جلوگیری شود (طبقه نخست به صورت فیوز عمل می‌کند). این حالت شبیه سامانه‌های جداشده (Baseisolation) است که در آن، سازه از طبقه ۲ به بالا

نیرو، بار کناری خطی فرض شده و در روش بازرسی تغییر مکان، الگوی تغییر مکان‌های وارد شده، بر پایه‌ی تغییر مکان کناری طبقات سازه در ارزیابی استاتیکی خطی با نیروهای آیین‌نامه‌ای زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) فرض شده است.

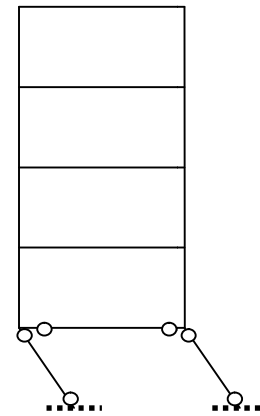
در شکل ۱۳، نمودارهای شکست سازه به دست آمده از ارزیابی بار افزون بر پایه دو روش بالا با هم مقایسه شده است. همان‌گونه که در این نمودارها نیز دیده می‌شود، سختی سازه‌های تیپ‌بندی شده بیشتر از سازه‌های تیپ‌بندی نشده است، که باعث می‌شود در زلزله‌های کوچک که سازه از مرحله الاستیک خارج نمی‌شود، تغییر شکل سازه کمتر باشد و به عناصر غیرسازه‌ای همچون تیغه‌ها و نازک‌کاری‌های آن‌ها آسیب کمتری برسد؛ اما در این نمودارها دیده می‌شود که نقطه شکست یا تسلیم سازه در سازه‌های تیپ‌بندی نشده یا کمتر تیپ‌بندی شده، کمی دیرتر از سازه‌های تیپ‌بندی شده یا بیشتر تیپ‌بندی شده، اتفاق می‌افتد؛ این موضوع به خاطر تشکیل طبقات نرم در سازه‌های تیپ‌بندی شده اتفاق می‌افتد؛ زیرا با افزایش تدریجی بار و رسیدن سازه به بیشینه مقاومت این طبقات (طبقات نرم)، سازه دچار شکست شده و با این که طبقات دیگر هنوز به بیشینه ظرفیت خود نرسیده است، شکست موضعی سازه از جای این طبقات باعث ایست ارزیابی به وسیله برنامه می‌شود.

۸- نتایج

هنگام طراحی یک سازه با در نظر گرفتن تیپ‌بندی اعضای سازه، نسبت نیرو به مقاومت (D_E/C_E) در برخی المان‌ها که در یک تیپ قرار دارند، کاهش می‌یابد. در میان این المان‌ها، المان‌هایی که نیروی داخلی کمتری را تحمل می‌کنند بیشترین کاهش را دارند؛ این موضوع، دلیل اصلی اتفاقاتی است که در تغییر رفتار یک سازه با طراحی تیپ‌بندی شده به وجود می‌آید.



شکل (۱۱) مقایسه میزان شاخص‌های خسارت در طبقات هاشورخورده شکل ۹ (سازه ۸ طبقه)

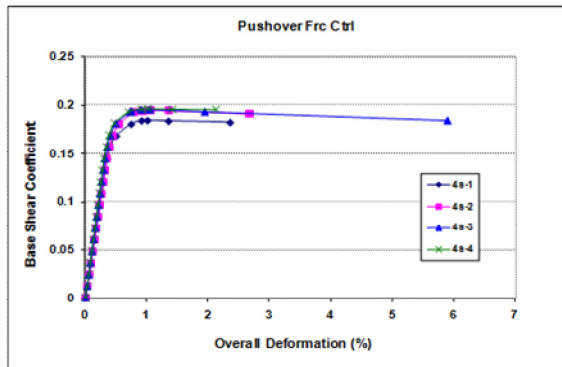


شکل (۱۲) ایجاد طبقه نرم در طبقه اول و تشابه آن با سامانه‌های جدانشده (Base isolation)

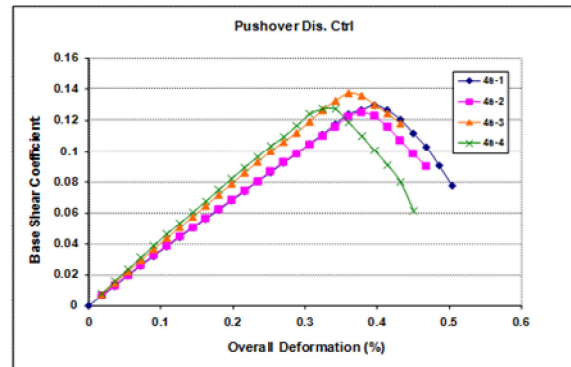
۷- ارزیابی بار افزون

ارزیابی بار افزون، رفتار یک سازه را هنگام ورود به مرحله غیر خطی و تشکیل سازوکار روشن می‌سازد. سختی کناری سازه، مراحل تشکیل مفاصل پلاستیک، بیشینه ضریب برش پایه و تغییر مکان نظیر آن، از نتایج ارزیابی بار افزون است. مقایسه منحنی‌های بار افزون سازه‌های تیپ‌بندی شده و تیپ‌بندی نشده، تفاوت رفتار این سازه‌ها را با یکدیگر نشان می‌دهد. ارزیابی‌های بار افزون با دو روش بازرسی تغییر مکان^۱ و بازرسی نیرو^۲ انجام شده است؛ در روش بازرسی

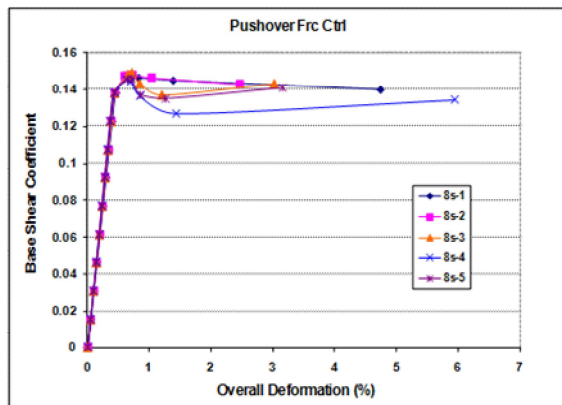
1- Displacement Control
2- Force Control



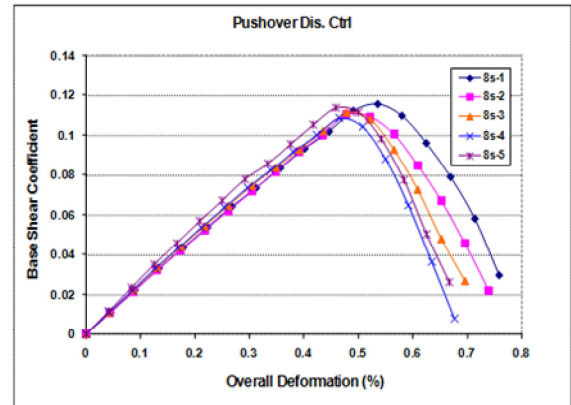
(ب)



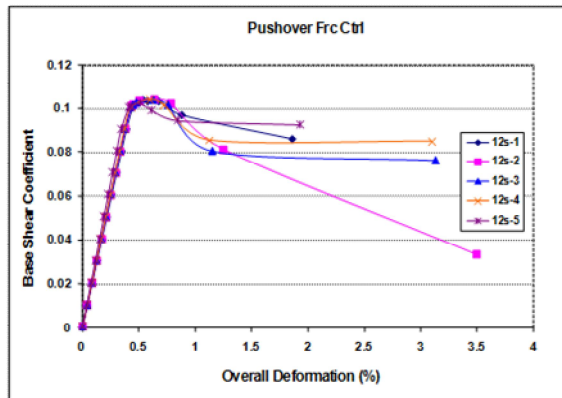
(الف)



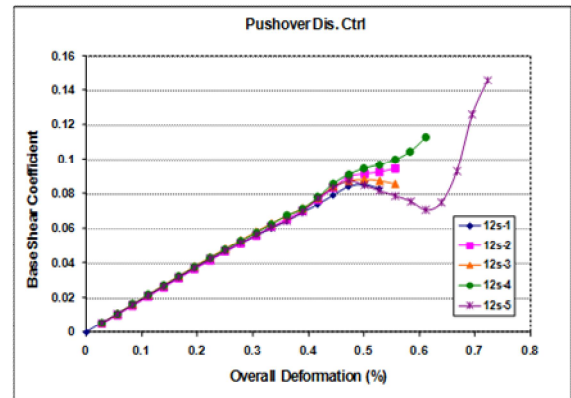
(ت)



(پ)



(ج)



(ث)

شکل (۱۳) منحنی‌های به دست آمده از ارزیابی بار افزون (الف و ب : سازه‌های ۴ طبقه)

تیپ‌بندی اعضا اثر مثبت کم و یا نامحسوسی بر رفتار لرزه‌ای سازه بگذارد.

در زمین‌لرزه‌های شدید (PGAهای بیشتر از ۰/۵g)

تیپ‌بندی اعضا در قاب‌های با شکل‌پذیری متوسط باعث

کاهش نسبت D/C به معنی افزایش مقاومت و سختی در سازه است؛ این افزایش مقاومت و سختی هر چند بخش نامتناسب و ناهمگون در سازه دارد باعث می‌شود که در زلزله‌های کوچک (PGAهای کمتر از ۰/۵g)، گاهی

[4] ETABS 9; Integrated Building Design Software; Computers and Structures; Inc., Berkeley; California; November 2005.

[5] IDARC 2D Version 7.0 USER'S GUIDE; Jun. 2010.

[6] Valles, R. E.; Reinhorn; A. M.; Kunnath; S. K.; Li; C.; Madan; A. ; IDARC 2D Version 4.0; A Program for the Inelastic Damage Analysis of Buildings; State University of New York at Buffalo; 1996.

[۷] ناطقی الهی، فریبرز؛ معتمدی، مهرداد؛ ارزیابی کمی آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌های بتن مسلح با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی؛ پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله؛ ۱۳۷۷.

[۸] ناطقی الهی، فریبرز، ارزیابی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود به روش ATC (مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ زلزله ایران)؛ پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله؛ ۱۳۷۸.

[۹] خیرالدین، علی؛ کریمی، مهدی؛ "بررسی تأثیر تیپ‌بندی اعضا بر روی رفتار لرزه‌ای سازه‌های بتن‌آرمه"؛ هفتمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران؛ دانشگاه تربیت مدرس؛ اردیبهشت ۱۳۸۵.

تمرکز خسارت و انرژی در طبقاتی می‌شود که میان طبقات تیپ‌بندی شده در پایین‌ترین این طبقات واقع شده است. این موضوع باعث تشکیل طبقات نرم و ضعیف (Soft Story & Weak Story) شده و در بیشتر مواقع باعث افزایش شاخص خسارت کلی سازه می‌شود. بنابراین طراحی سازه با تیپ‌بندی را می‌توان از عوامل ایجاد طبقه نرم دانست. توجه به این نکته اهمیت دارد که نتایج ارائه شده در این مقاله، برای سازه‌های با شکل‌پذیری بالا که در طراحی آن‌ها، نسبت مقاومت تیر به ستون، بازرسی می‌شود، معتبر نیست که تأکیدی بر اهمیت اثر تیپ‌بندی در سازه‌های با شکل‌پذیری متوسط و معمولی است.

نتایج ارزیابی‌ها، اصلی را در طراحی: در یک طرح خوب سازه‌ای، بیشتر اعضای سازه باید هم‌زمان به حد مقاومت بیشینه (حد تسلیم یا شکست) خود برسند. یادآور شده و بر آن پافشاری می‌کند. برای برآورده شدن این اصل، باید نسبت تقاضا به ظرفیت (D_E/C_E) اعضای سازه تا اندازه‌ای ممکن به هم نزدیک باشد.

۹- مراجع

[۱] دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان؛ مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران، بارهای وارد بر ساختمان؛ نشر توسعه ایران؛ ۱۳۸۵

[۲] کمیته دائمی بازنگری آئین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله؛ آئین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰؛ نشریه شماره ض- ۲۵۳؛ مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن؛ ویرایش ۳؛ ۱۳۸۴.

[۳] دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان؛ مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ایران، طرح و اجرای ساختمان‌های بتن آرمه؛ نشر توسعه ایران؛ ۱۳۸۸.