مهندسی عمران شریف
دوره‌ی ۲-۲۸، شماره‌ی ۱، ص. ۹۵-۱۰۰، (یادداشت فنّی)

تحلیل آسیب‌پذیری و بهسازی سیستم دال و دیوار بتنی به‌روش ایستای غیرخطی

محسن تهرانی‌زاده (استاد)
شیما عزیززاده * (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

سیستم دال و دیوار بتنی درجا از سیستم‌های متداول در ایران و سایر نقاط جهان است که به‌علت عملکرد مناسبِ آن در زلزله‌های گذشته، کاربردش گستردگی بیش‌تری یافته است. در دستورالعمل‌های مربوط به ارزیابی آسیب‌پذیری، عموماً برای سازه‌های موجودِ از این دست رویکرد جداگانه‌یی منظور نشده است. به‌دلیل موجود نبودن استانداردهای ویژه‌ی این ساختمان‌ها و کمبود اطلاعات درمورد نحوه‌ی ارزیابی عملکرد لرزه‌یی با در نظر گرفتن امکان ایجاد رفتار غیرخطی در دیوار، انجام مطالعات کاربردی بهسازی روی سیستم دال و دیوار از اهمیت خاصی برخوردار است. در این نوشتار برای بررسی دقیق‌تر عملکرد سیستم، از روش استاتیکی غیرخطی به‌جای روش‌های ساده‌تر و غیرواقعی‌تری که رفتار دیوار را تنها در حالت خطی در نظر می‌گیرند، بهره گرفته شده است. بررسیِ سازه‌های دال و دیوار با پلان متقارن و طراحی اولیه براساس استاندارد ۲۸۰۰ ایران در سازه‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه با هدف بهسازی مطلوب دستورالعمل بهسازی لرزه‌یی انجام گرفته و برای اجرای تحلیل‌های غیرخطی، از نرم‌افزار Ram Perform ۳D استفاده شده است.

واژگان کلیدی: ارزیابی آسیب‌پذیری، تحلیل ایستای غیرخطی، سیستم دال و دیوار بتنی، المان رشته‌یی.

m.teh.2008@gmail.com
azizzadeh_1363@yahoo.com

مقدمه

سیستم سازه‌یی دال و دیوار که در این تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد، فقط دال‌ها و دیوارهای سازه‌یی را برای حمل تمامی بارهای ثقلی و جانبی شامل می‌شود و در آن اعضای تیر و ستون حذف شده‌اند. مطالعات آسیب‌پذیریِ معدودی که روی این سیستم انجام گرفته، اکثراً محدود به بررسی‌های خطی‌اند یا روش‌های غیرخطیِ مطالعاتی در آن‌ها کاربردی نبوده است. با این حال عملکرد مطلوب این سازه‌ها در زلزله‌های گذشته نیازمند مطالعاتی دقیق‌تر در این رابطه است تا بتوان از این طریق، و با شناخت سطح عملکردی سیستم، آن‌ها را به‌عنوان گزینه‌یی مناسب در ساخت و سازها مطرح کرد (شکل ۱).

فعالیت‌های علمی درخصوص ارزیابی آسیب‌پذیری ساختمان‌ها از سال‌های اولیه‌ی دهه‌ی هفتاد آغاز شده و تا امروز نیز ادامه دارد. ارزیابی ساختمان‌های موجود و راهکارهای بهسازی لرزه‌یی برای بهبود عملکرد آن‌ها به‌هنگام زلزله تا رسیدن به سطح عملکرد مطلوب فرایندی است که براساس آن می‌توان عملکرد مناسب تعریف‌شده برای سازه را انتظار داشت. برای این منظور انجام تحلیل‌های غیرخطی روی سیستم مورد مطالعه ضرورت می‌یابد.

تحلیل ایستای غیرخطی را می‌توان برای هر سازه و هر هدف بهسازی به کار گرفت. در این تحلیل، بار جانبی ناشی از زلزله به‌صورت ایستا و افزایشی به سازه وارد می‌شود. اعمال بار جانبی به سازه تا زمانی که تغییر مکان در نقطه‌ی کنترل (معمولاً مرکز جرم تراز بام) به یک مقدار مشخص (تغییر مکان هدف) برسد، ادامه می‌یابد. باید توجه داشت که امکان خرابی سازه قبل از رسیدن به تغییر مکان هدف نیز وجود دارد. گام‌های اصلی روشِ پوش‌آور همانند شکل ۲ بوده و دستورالعمل‌های مختلف تنها در جزئیات متفاوت است.

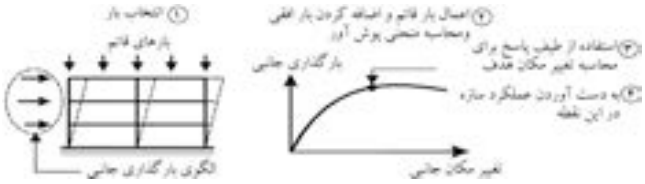
در این پژوهش با اجرای تحلیل ایستای غیرخطی روی سیستم‌های دال و دیوار بتن درجای مدل شده در تعداد طبقات مختلف، سطح عملکرد سیستم دال و دیوار بتنیِ طراحی‌شده براساس استاندارد ۲۸۰۰ ایران[1] بررسی شده، و ضریب رفتار به دست آمده از تحلیل ایستای غیرخطی ارائه شده است. تحلیل‌های غیرخطی با استفاده از نرم‌افزار قدرت‌مند Ram Perform، و با هدف بهسازی مطلوب برای دو سطح خطر لرزه‌یی انجام شده است.

معرفی ساختمان‌های مورد مطالعه و مشخصات تحلیل غیرخطی

پلانی که برای مدل‌سازی سیستم دال و دیوار بتنی درجا در سازه‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه انتخاب شده، مربوط‌به ساختمانی واقعی با کاربری اداری است که توسط

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۸۸/۶/۳۱، اصلاحیه ۱۳۸۹/۲/۲۸، پذیرش ۱۳۸۹/۷/۵.

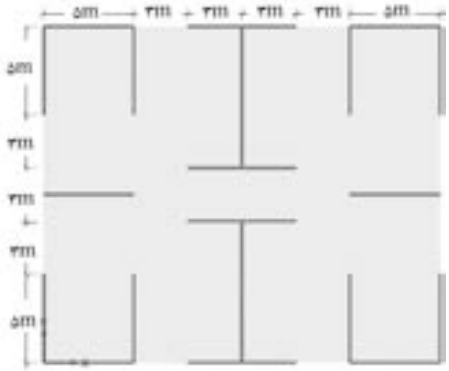
شکل ۱. نمونه‌هایی از سیستم دال و دیوار پس از زلزله‌ی Bingol (۲۰۰۳) که دچار آسیب نشده‌اند.



شکل ۲. گام‌های اصلی تحلیل پوش‌آور.

نرم‌افزار ETABS۹.۱.۶ و براساس ویرایش سوم استاندارد ۲۸۰۰ ایران تحلیل و مطابق آیین‌نامه‌ی ACI ۲۰۰۵ طراحی شده است.

برای ساده‌سازی مدل، بازشوی دیوارها حذف شده است. ارتفاع طبقات برابر ۳٫۵ متر و زیربنای هر طبقه حدود ۴۱۸ متر مربع است. سیستم مقاوم این ساختمان به‌صورت دال و دیوار دوطرفه بوده و تعداد ۲۴ دیوار سازه‌یی در پلان تعبیه شده است. ضخامت دال کف ۰٫۱۵ متر و دیافراگم کف صلب در نظرگرفته شده است. در شکل ۳ پلان عمومی طبقات نشان داده شده است.



شکل ۳. پلان سازه‌یی و جاگذاری دیوارها.

جدول ۱. مشخصات مصالح مصرفی.

المان سازه‌یی	f'_c (MPa)	E_c (GPa)	F_y (MPa)	E_s (GPa)
دیوار و دال بتنی	۲۸	۲۵	۴۰۰	۲۱۰

جدول ۲. بارگذاری موجود برحسب تن بر مترمربع.

تراز	بار مرده (بدون احتساب مقاطع بتنی دال و دیوار)	بار زنده
بام	۰٫۳	۰٫۱۵
طبقات	۰٫۳۵	۰٫۲۵

مشخصات مصالح مصرفی و بارگذاری در جداول ۱ و ۲ آورده شده است.

یکی از نکات مهم در ساخت مدل غیر خطی آن است که المان انتخاب‌شده باید رفتار غیرخطی عضو را تا حد امکان مشابه واقعیت شبیه‌سازی کند. در بیشتر نرم‌افزارهای کاربردی مانند SAP و ETABS، المان مجزایی برای در نظرگرفتن رفتار غیرخطی دیوارهای برشی وجود نداشته و از معادل‌سازی آن با المان‌های قابی استفاده می‌شود که این روش‌ها برای سیستم دال و دیوار، عمدتاً با مشکلات بسیاری همراه است و نتایج مناسبی در بر نخواهد داشت. براین اساس، در این نوشتار برای مدل‌سازی و تحلیل غیرخطی دیوارهای برشی از المان‌های Shear Wall نرم‌افزار Perform ۳D ۴.۰.۱ استفاده شده است. این المان مقطع دیوار را به‌صورت مجموعه‌یی از فیبرها در نظر می‌گیرد و با این روش تحلیل غیرخطی دیوار را به‌صورت مستقیم ممکن می‌سازد.[۲]

مطلب بعدی مد نظر قرار دادن ارتفاعی از دیوار است که برای آن امکان رفتار غیرخطی در نظرگرفته می‌شود.[۳] برای تعیین ارتفاعی که معادلِ طول غیرخطی در نظرگرفته شده برای دیوار است، می‌توان از روابط موجود در زمینه‌ی طول مفصلی دیوار، نظیر رابطه‌ی ارائه‌شده توسط پائولی و پریستلی،[۴] استفاده کرد:

$$L_p = ۰٫۲D_w + ۰٫۰۴۴h_e \qquad (۱)$$

$$۰٫۳D_w < L_p < ۰٫۸D_w \qquad (۲)$$

که در آن L_p طول مفصلی، D_w عمق مقطع عرضی و h_e ارتفاع مؤثر دیوار است.

چنانچه طول دیوار از ارتفاع نخستین طبقه ($h_۱$) برابر $D_w > \frac{h_۱}{۶}$ باشد، در رابطه‌ی ۳ به‌جای D_w باید مقدار $h_۱/۶$ را جایگزین کرد. یعنی خواهیم داشت:

$$۰٫۴۸h_۱ < L_p = ۰٫۳۲h_۱ + ۰٫۰۴۴h_۱ < ۱٫۲۸h_۱ \qquad (۳)$$

همچنین مطابق دستورالعمل بهسازی لرزه‌یی ایران، می‌توان این طول را دست‌کم معادل نصف طول دیوار و ارتفاع طبقه در نظرگرفت. اگر تعداد دیوارها زیاد و محاسبات سنگین باشد، انتخاب مناسب این طول در بهینه‌شدن زمان و میزان تحلیل‌ها مؤثر خواهد بود. در این نوشتار اما، با توجه به محدود بودن تعداد دیوارها، برای کل ارتفاع دیوار امکان ایجاد رفتار غیرخطی در نظرگرفته شده است.

چنان که ذکر شد، هدف بهسازیِ درنظرگرفته شده برای ساختمان‌های مدل‌سازی شده، بهسازی مطلوب مطابق دستورالعمل بهسازی لرزه‌یی است.[۵] در این حالت انتظار می‌رود تحت زلزله‌ی سطح خطرِ یک ایمنی جانی ساکنین تأمین شود؛ همچنین تحت زلزله‌ی سطح خطرِ دو ساختمان فرو نریزد. بنابراین، محاسبات برای دو سطح خطر ۴۷۵ ساله و ۲۴۷۵ ساله انجام، و دو سطح عملکرد سازه‌یی مجزای سطح ایمنی جانی (LS) و آستانه‌ی فروریزی (CP) به‌منظور مشخص‌کردن مقدار آسیب،

جدول ۳. شرایط حدی مربوط به کرنش مصالح فولادی و بتنی.[۶]

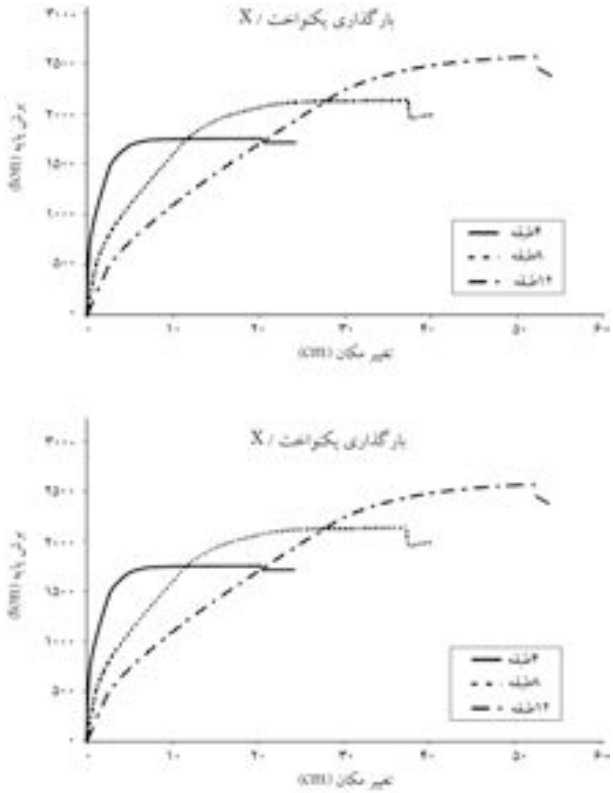
مصالح	LS	CP
فولاد	۰/۰۴	۰/۰۵
بتن	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۳۵

خسارت اقتصادی و خرابی برای ساختمان تعریف شده است. معیارهای پذیرشِ در نظرگرفته شده برای هر یک از این سطوح در جدول ۳ مشخص شده است.

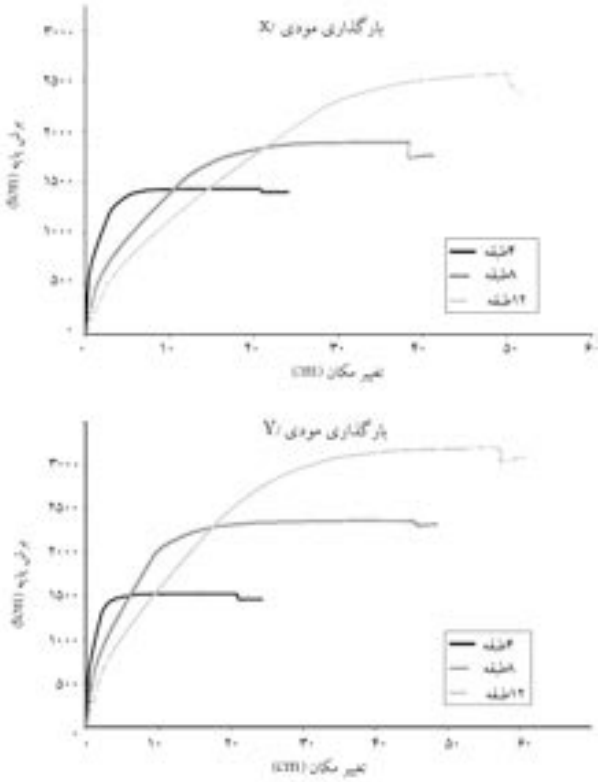
باتوجه به این که جرم مشارکت‌کننده در مود اول از ۷۵٪ کم‌تر است، توزیع نوع اول بار جانبی توزیع متناسب با نیروهای جانبی حاصل از تحلیل دینامیکی خطی طیفی در نظرگرفته می‌شود. برای توزیع نوع دوم نیز توزیع یکنواخت انتخاب می‌شود.

منحنی‌های ظرفیت و محاسبه‌ی تغییر مکان هدف

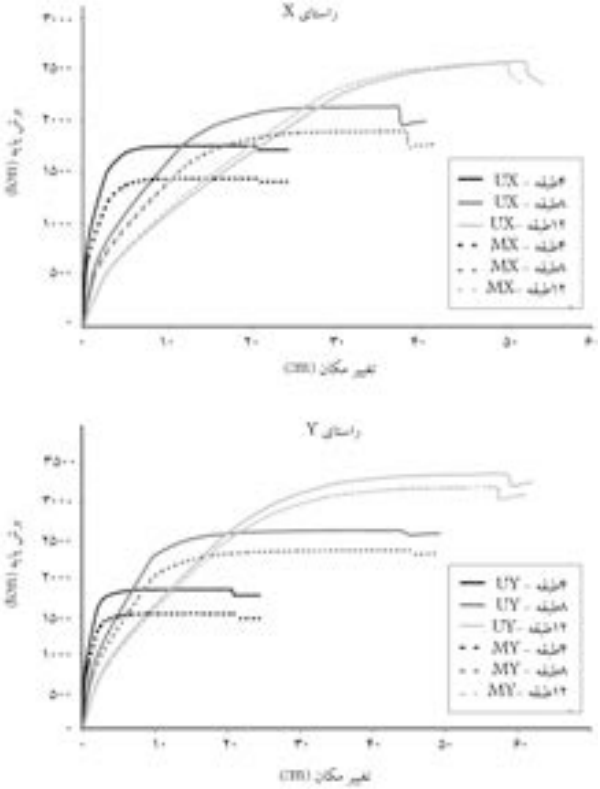
نتایج تحلیل ایستای غیرخطی به‌صورت منحنی جابه‌جایی نقطه‌ی کنترل سازه (تراز بام) به‌ازای مقادیر مختلف نیروی برشی پایه به دست می‌آید. این منحنی که به «منحنی ظرفیت سازه» معروف است، بیان‌گر قابلیت سازه در تحمل نیروهای جانبی ناشی از زلزله است. در شکل‌های ۴ تا ۶ منحنی‌های ظرفیت مطابق دستورالعمل بهسازی لرزه‌یی برای دو توزیع بار جانبی رسم شده است. با توجه به این که نتایج حاصله برای ترکیب بار ثقلی بیشینه بالاتر از ترکیب بار ثقلی کمینه به دست آمده، به ارائه‌ی نتایج مربوط به حالت اول در سطح خطر ۴۷۵ ساله اکتفا می‌شود.



شکل ۴. منحنی ظرفیت راستای X.



شکل ۵. منحنی ظرفیت راستای Y.



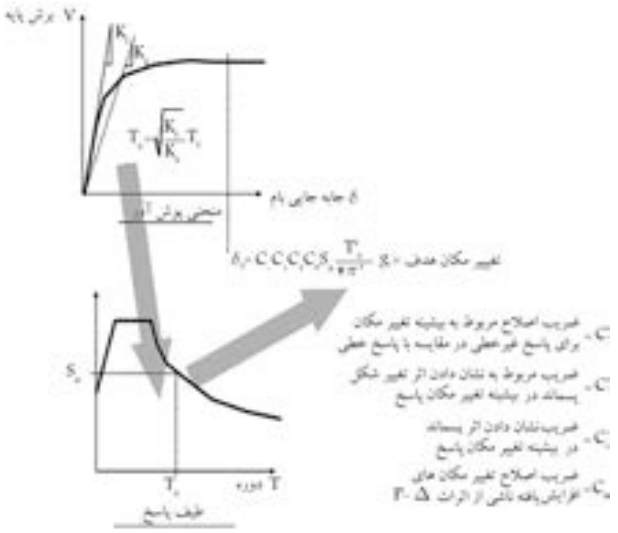
شکل ۶. مقایسه‌ی منحنی ظرفیت مربوط به دو الگوی بار جانبی.

همان‌طورکه در نمودارهای ترسیمی مشاهده می‌شود، منحنی‌های ظرفیت سازه برای دو نوع توزیع بارگذاری مشابه یکدیگر بوده و مطابق انتظار، سطح زیر منحنی ظرفیت در روش توزیع یکنواخت ــ نسبت به روش توزیع نمایی ــ مقادیر بیش‌تری دارد؛ چراکه در حالت توزیع یکنواخت، با فرض برش پایه‌ی یکسان اثرات لنگر در پای سازه کم‌تر خواهد بود. با افزایش تعداد طبقات، ظرفیت باربری جانبی (مساحت زیر منحنی ظرفیت) افزایش دارد ولی سختی اولیه (شیب اولیه‌ی منحنی ظرفیت) کاهش یافته است. همچنین نتایج مربوط به راستای Y بالاتر از راستای X به‌دست آمده که علت آن بالاتر بودن چگالی دیوارهای برشی در راستای Y و قوی‌تر بودن سازه‌ها در این راستاست.

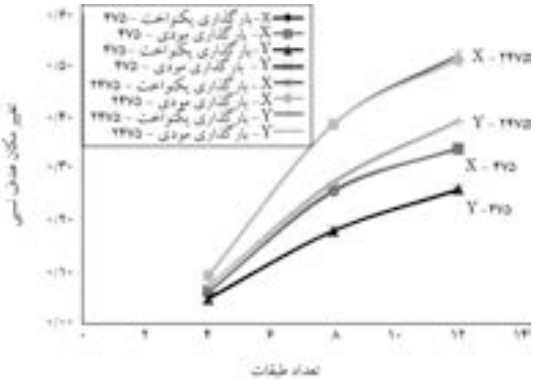
برای محاسبه‌ی تغییرمکان هدف از روش ضرایب دستورالعمل FEMA۳۵۶ استفاده شده است. طرح شماتیک روندِ به‌دست آوردنِ تغییر مکان هدف با روش تخمین ضرایب در شکل ۷ نشان داده شده است.

تغییرمکان‌های هدف نسبی محاسبه‌شده به‌روش ضرایب برای دو سطح خطر لرزه‌یی در جدول ۴ خلاصه شده است. نمودار شکل ۸ نیز تغییرات آن را برای تعداد طبقات مختلف نمایش می‌دهد.

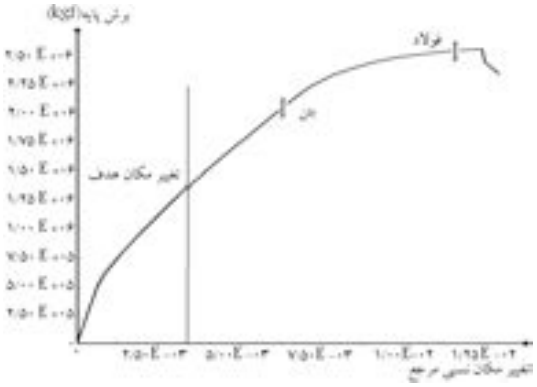
روند افزایش تغییر مکان هدف با بالارفتن تعداد طبقات و نیز افزایش آن برای سطح خطر لزره‌یی دو نسبت به سطح خطر لرزه‌یی یک به‌خوبی در این نمودار مشخص شده است. دو الگوی توزیع بار جانبی نیز به‌درستی با هم مطابقت دارند.



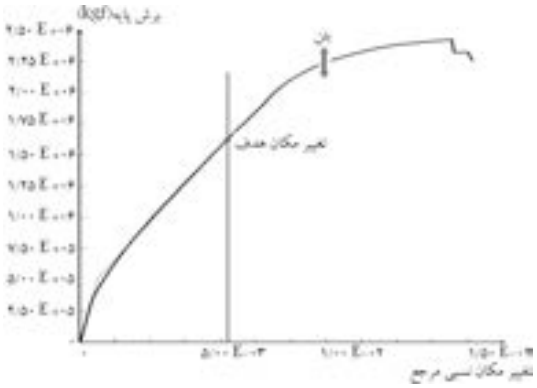
شکل ۷. یافتن تغییر مکان هدف برای یک طیف پاسخ داده شده به روش ضرایب.



شکل ۸. مشاهده‌ی تغییرات در تغییر مکان هدف نسبی.



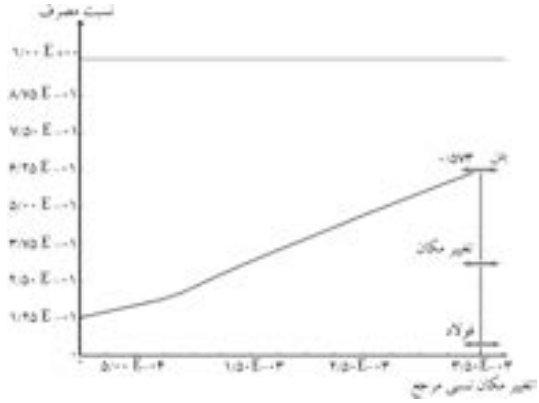
شکل ۹. وضعیت حدود سطح LS نسبت به تغییر مکان هدف روی منحنی ظرفیت در سطح خطر یک.



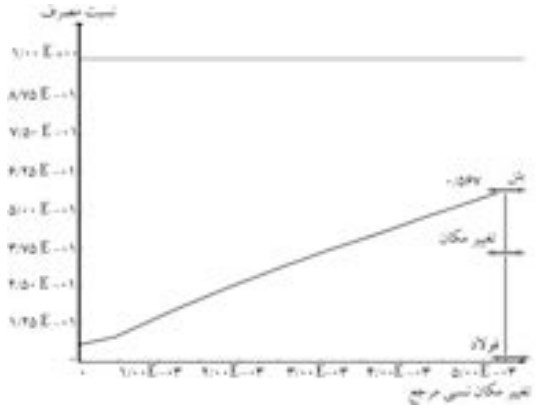
شکل ۱۰. وضعیت حدود سطح CP نسبت به تغییر مکان هدف روی منحنی ظرفیت در سطح خطر دو.

جدول ۴. خلاصه نتایج مربوط به تغییر مکان هدف سازه‌های دال و دیوار.

تعداد طبقات	سطح خطر لرزه‌یی یک				سطح خطر لرزه‌یی دو			
	X		Y		X		Y	
	بارگذاری یکنواخت	بارگذاری مودی	بارگذاری یکنواخت	بارگذاری مودی	بارگذاری یکنواخت	بارگذاری مودی	بارگذاری یکنواخت	بارگذاری مودی
۴	۰٫۰۶	۰٫۰۶	۰٫۰۵	۰٫۰۵	۰٫۰۹	۰٫۰۹	۰٫۰۷	۰٫۰۷
۸	۰٫۲۶	۰٫۲۶	۰٫۱۸	۰٫۱۸	۰٫۳۹	۰٫۳۹	۰٫۲۸	۰٫۲۷
۱۲	۰٫۳۴	۰٫۳۴	۰٫۲۶	۰٫۲۶	۰٫۵۱	۰٫۵۲	۰٫۳۹	۰٫۳۹



شکل ۱۱. نمودار نسبت مصرف برحسب تغییر مکان نسبی در عملکرد LS برای سطح خطر یک.



شکل ۱۲. نمودار نسبت مصرف برحسب تغییر مکان نسبی در عملکرد CP برای سطح خطر دو.

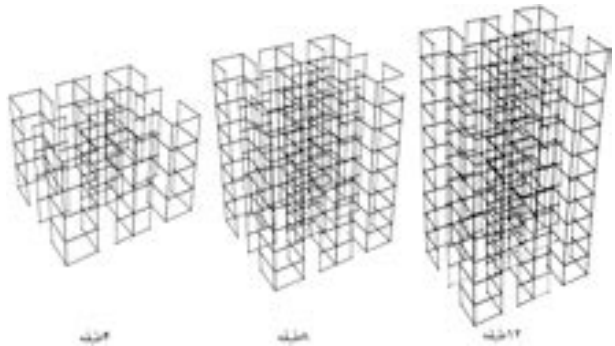
عملکرد سازه در نقطه‌ی تغییر مکان هدف مورد مطالعه قرار گرفته که نتایج آن در ادامه ارائه می‌شود.

نتایج تحلیل آسیب‌پذیری

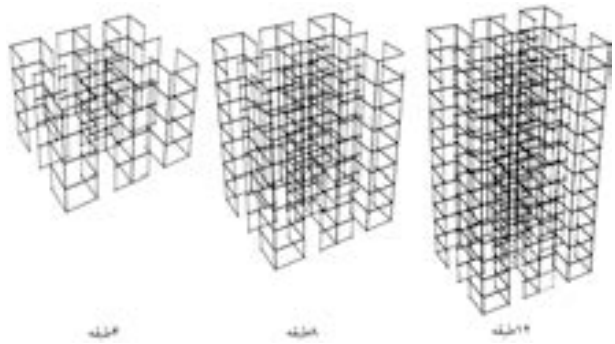
کنترل سطح عملکرد LS برای سطح خطرِ یک، و CP برای سطح خطرِ دو در هریک از حالات ایستای غیرخطی انجام شده است. چنان‌که در شکل‌های ۹ و ۱۰ برای ساختمان ۱۲ طبقه نشان داده شده، در تمامی موارد حالات حدی بعد از تغییر مکان هدف واقع شده و نسبت ظرفیت آن‌ها در تغییر مکان هدف کم‌تر از یک است.

نمودار نسبت مصرف[1] برحسب تغییر مکان نسبی بام سازه ۱۲ طبقه نیز در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ ترسیم شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، این نسبت با اختلاف نسبتاً زیاد، کم‌تر از ۱ است. لذا این سیستم جواب‌گوی این سطوح است. منظور از «نسبت مصرف» در این نوشتار، بنا به هر مورد، نسبت نیرو یا تنش یا تغییرمکان موجود به نیرو یا تنش یا تغییرمکان قابل تحمل مقطع در هر سطح عملکردی است که برمبنای ۱ مقیاس شده است تا قابلیت مقایسه و نمایش آن‌ها روی یک نمودار فراهم شده و وضعیت مربوط به هریک از حدود کنترلی نسبت به وضعیت سایر حدود مشخص شود.

وضعیت نسبت مصرف المان‌های دیوار برشی در این سطوح برای حالات بحرانی‌تر در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ دیده می‌شود.



شکل ۱۳. نسبت مصرف المان‌های دیوار در سطح خطر یک برای عملکرد LS.



شکل ۱۴. نسبت مصرف المان‌های دیوار در سطح خطر دو برای عملکرد CP.

همان‌طورکه مشاهده می‌شود دیوارهایی که وارد حالت غیرخطی شده‌اند، محدود به پای دیوارهای طبقات اولیه است. بنابراین هدفِ بهسازی بهینه به‌سادگی در این سیستم تأمین می‌شود.

نتیجه‌گیری

منحنی‌های ظرفیت حاصل از دو توزیع بار جانبی تطابق مناسبی دارند، چراکه عملاً در این سازه‌ها مودهای اولیه غالب بوده و اثرات ترکیب آن با مودهای بالاتر چندان تأثیرگذار نیست. ظرفیت و سختی اولیه در روش توزیع یکنواخت نسبت به روش توزیع نمایی مقادیر بیشتری دارد؛ چراکه با پایین‌تر آمدن موقعیت برآیند نیروهای جانبی در حالت توزیع یکنواخت، با فرض برش پایه‌ی یکسان اثرات لنگر در پای سازه کم‌تر خواهد بود.

از مزیت‌های دیوارهای برشی بلند، اعمال یکنواختی تغییر شکل و پیوستگی در فرم سازه است که باعث رویداد تخریب و جابه‌جایی نسبی یکنواخت می‌شود.

متوسط ضریب رفتار مربوط به طراحی در حالت تنش مجاز حاصل شده از روش ایستای غیرخطی برای این سیستم ۶/۸۳ به دست آمده که از مقدار منظور شده در استاندارد ۲۸۰۰ ــ یعنی مقدار ۶ ــ بالاتر است.

در نهایت نتایج تحلیل آسیب‌پذیری در این نوشتار نشان می‌دهد که سیستم‌های دال و دیواری که براساس استاندارد ۲۸۰۰ ایران طراحی شده‌اند، برای سطح خطر لرزه‌ییِ یک ــ سطح عملکرد ایمنی جانی ــ و در سطح خطر لرزه‌ییِ دو ــ سطح عملکرد آستانه‌ی فروریزی ــ به‌خوبی جواب‌گو بوده و هدف بهسازی مطلوب را برآورده می‌سازد. این سیستم باتوجه به عملکرد مطلوب و سایر مزایایی که دارد، می‌تواند گزینه‌ی مناسبی برای ساخت سازه‌های مقاوم در برابر زلزله باشد.

پانوشت

1. usage ratio

منابع

1. Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, Standard No. 2800-05, 3rd Edition, Building and Housing Research Center (2005).
2. Structural Engineering Software, Ram International, Ram Perform User Guide 3D-Ver 4.0.1 (2006).
3. Structural Engineering Software, Ram International, Ram Perform 3D-Ver 4.0.1 Components and Element (2006).
4. Paulay, T. and Priestley, N., *Seismic Design Of Reinforced Concrete & Masonry Buildings,* Wiley, pp. 142-145 (1992).
5. Instruction for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, Office of Deputy for Technical Affairs, Technical Criteria Codification & Earthquake Risk Reduction Affairs Bureau, No. 360, (2007).
6. ATC, Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings (ATC-40, Vol. 1 & Vol. 2 (Appendices)), Applied Technology Council, Redwood City, California (1996).