

طرح عملکردی سازه‌های جداسازی شده قاب خمشی فولادی با اهمیت متوسط در حوزه نزدیک به گسل

محسن تهرانی‌زاده (استاد)

پارمیدا برومند (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

با بهره‌گیری از فن جداسازی از پایه، نیروهای ناشی از زمین‌لرزه‌ی انتقالی به روسازه را تا حد بسیار زیادی می‌توان کاهش داد (کاهش تقاضا)؛ همچنین با کاربرد هم‌زمان روش طراحی براساس عملکرد و استفاده از ظرفیت خمیری سازه و به دنبال آن کاهش نیاز به ظرفیت کشسان^۱ مقطع، به مقاطعی به مراتب سبک‌تر و ظریف‌تر می‌توان دست یافت. در این پژوهش، با بررسی رفتار غیرخطی روسازه در دو سازه‌ی جداسازی شده‌ی فولادی ۵ و ۸ طبقه با قاب خمشی ویژه‌ی سه‌بعدی، و طراحی شده به روش مقاومت نهایی (براساس ضوابط طرح سازه‌های جداسازی شده در آیین‌نامه‌های ASCE ۷^۲ و AISC ۳۶۰-۵^۳)، در برابر زمین‌لرزه‌های حوزه‌ی نزدیک با دوره‌ی بازگشت ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال، تغییرات مورد نیاز در اعضا و مقاطع ساختمان برای کاهش سطح عملکرد سازه‌های یادشده از خدمت‌رسان در سطح خطر یک (۴۷۵ سال) و استفاده‌ی بی‌وقفه در سطح خطر دو (۲۴۷۵ سال)، به استفاده‌ی بی‌وقفه در سطح خطر یک و ایمنی جانی در سطح خطر دو، بر پایه‌ی معیارهای موجود در دستورالعمل FEMA ۳۵۶ ارائه می‌شود.

واژگان کلیدی: جداسازی از پایه، طراحی براساس عملکرد، حوزه‌ی نزدیک به گسل، روسازه‌ی غیرخطی.

۱. مقدمه

بهره‌گیری از فن جداسازی از پایه، در ابتدا برای دست‌یابی به سطح عملکرد استفاده‌ی بی‌وقفه در برابر زمین‌لرزه‌های شدید در سازه‌های با اهمیت بالا - نظیر بیمارستان‌ها، مراکز آتش‌نشانی، مراکز مخابراتی یا بناهای تاریخی - در مهندسی سازه و زلزله جای خود را باز کرد و بر پایه‌ی عملکرد موفقیت‌آمیز این عناصر به‌ویژه در زمین‌لرزه‌های شدید نورتریج (۱۹۹۴) و کب (۱۹۹۵) گسترش یافت.

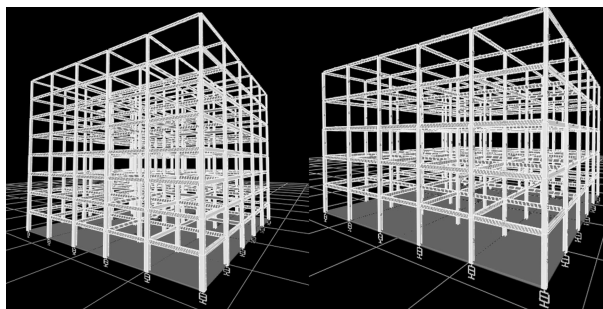
عملکرد مناسب این فناوری نوین به‌گونه‌ای است که با کاهش نیروهای انتقال یافته از بستر به پیکره‌ی روسازه، امکان بهره‌گیری از مقاطع سبک‌تر نسبت به سازه‌های پایه ثابت مشابه فراهم می‌شود و در نهایت به ساخت سازه‌ی ارزان‌تر می‌انجامد. به همین لحاظ امروزه اقبال عمومی به استفاده از این روش در طرح و ساخت سازه‌ها فزونی یافته است. از آنجا که در ساخت سازه‌های با اهمیت متوسط نظیر مراکز تجاری - اداری یا منازل مسکونی، طراح نیازی به حفظ سطح عملکرد روسازه در حدود استفاده‌ی بی‌وقفه در برابر هر سطح از خطر لرزه‌خیزی ندارد، در این پژوهش برآنیم تا با بهره‌گیری از مفاهیم و معیارهای طراحی براساس عملکرد، سطح عملکرد سازه‌های مورد بررسی را تا حد ایمنی جانی در سطح خطر دو، متناسب با تعاریف دستورالعمل FEMA ۳۵۶ کاهش دهیم.^[۱] از این رو، دو سازه‌ی ۵ و ۸ طبقه با اسکلت قاب خمشی ویژه و با استفاده از جداسازهای لاستیکی با هسته‌ی سربی

یک بار برای دست‌یابی به سطح عملکرد قابلیت استفاده‌ی بی‌وقفه (IO) با فرض درجه اهمیت بالا برای روسازه، و بار دیگر با فرض درجه اهمیت متوسط، برای سطح عملکرد ایمنی جانی (LS) در برابر زمین‌لرزه‌های شدید حوزه‌ی نزدیک (متناسب با سطح خطر دو در دستورالعمل FEMA ۳۵۶) طراحی شده و پاسخ‌های حاصل از تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی به دست آمده در این دو سطح و نیز میزان کاهش مقاطع به‌کار رفته در طرح روسازه، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. همچنین عملکرد دو سازه ۵ و ۸ طبقه با مقاطع کاهش‌یافته در برابر زمین‌لرزه‌های حوزه‌ی نزدیک اما با شدت کم‌تر و متناسب با سطح خطر یک، مورد بررسی قرار خواهد گرفت. آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مورد استفاده در این پژوهش عبارت‌اند از: AISC ۳۶۰-۵^۳ و ASCE ۷-۰۵^۲ و FEMA ۳۵۶^[۲] و نیز طراحی اولیه‌ی روسازه به روش مقاومت نهایی انجام گرفته است.

۲. مشخصات هندسی روسازه و روش تحلیل

روسازه‌های به‌کار رفته در هر دو مدل ۵ و ۸ طبقه، در پلان متقارن و دارای ۵ دهانه‌ی ۵ متری در هر جهت است. دال سقف‌ها صلب فرض شده و ارتفاع میان تا میان طبقات معادل ۳ متر است. همچنین از یک دال صلب برای یک‌پارچه‌سازی حرکت

تاریخ: دریافت ۱۴/۱۰/۱۳۸۷، اصلاحیه ۳/۴/۱۳۸۸، پذیرش ۲۲/۱۲/۱۳۸۸.



شکل ۱. سازه‌های ۵ طبقه (راست) و ۸ طبقه (چپ) در نرم افزار SAP۲۰۰۰.

در این جدول، T نماینده‌ی زمان تناوب جداساز، K_{eff} نماینده‌ی سختی مؤثر جداساز در جابه‌جایی طرح، K_1 نماینده‌ی سختی اولیه‌ی جداساز، D نماینده‌ی جابه‌جایی جداساز، β ضریب میرایی لزوج معادل، F_y نیروی تسلیم جداساز، و K_2/K_1 نسبت سختی پس از تسلیم به پیش از تسلیم جداساز در منحنی دوخطی نیرو-تغییر شکل است. اندیس‌های M و D به ترتیب نشان‌دهنده‌ی کمیت معرفی شده در جابه‌جایی طرح است. خاطر نشان می‌شود براساس ضوابط موجود در آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های یادشده، میزان بیشینه جابه‌جایی جداساز در زمین لرزه‌ی طرح متناسب با تغییر مکان نوسان‌گری یک درجه آزادی از رابطه‌ی ۱ و با در نظر گرفتن مقادیر شتاب طیفی متناسب با داده‌های لرزه‌خیزی ایران برای خاک نوع دو (خاک سخت و سنگ نرم)، $S_{D_1} = 0,755$ و $S_{M_1} = 0,825$ در مقیاس شتاب زمین g برآورد می‌شود.

$$D_D = \frac{g S_{D_1} T_D}{4 \pi^2 B_D}, \quad D_M = \frac{g S_{M_1} T_M}{4 \pi^2 B_M} \quad (1)$$

۴. نگاشت‌های تاریخچه زمانی

نگاشت‌های موجود در حوزه‌ی نزدیک به گسل در زمین لرزه‌های شدید، در بردارنده‌ی سطوح بالایی از انرژی است. وجود شتاب‌نگاشت‌هایی با زمان تناوب طولانی، به پدید آمدن نگاشت‌های سرعت و تغییر مکان با دامنه‌های بسیار بالا می‌انجامد و در مدت زمانی بسیار کوتاه، انرژی هنگفتی را به پیکره‌ی سازه منتقل می‌کند. در این فرایند، اسکلت سازه خود تبدیل به وسیله‌ی برای پراکنش انرژی زمین لرزه شده که با ایجاد بیش از حد چرخه‌های خمیری در اعضا و اتصالات، می‌تواند موجبات فروریزش سازه را فراهم آورد. از این رو، پژوهش‌گران و دست‌اندرکاران طرح سازه‌های مقاوم در برابر زلزله به منظور کسب اطمینان از عملکرد مناسب سازه‌های طراحی شده، ناگزیر از به‌کارگیری روش‌های غیرخطی در فواصل نزدیک به گسل هستند. از دیگر ویژگی‌های زمین لرزه‌های حوزه‌ی نزدیک، می‌توان به چشم‌گیر بودن مؤلفه‌ی شتاب قائم نسبت به نگاشت‌های ثبت شده در حوزه‌ی دور اشاره کرد که طراحان موظف به در نظرگیری مؤلفه‌ی قائم زمین لرزه، در فرایند تحلیل و طراحی هستند.

با توجه به ویژگی‌های لرزه‌خیزی ایران و وجود گسل‌های بی‌شمار در سرتاسر آن، و نیز لزوم بازنگری در شیوه‌های طراحی برای حفظ پایداری یا سطح عملکرد سازه در برابر زمین لرزه‌های حوزه‌ی نزدیک، از نگاشت‌های مربوط به چهار زمین لرزه‌ی طبس (۱۹۷۸)، نورتریج (۱۹۹۴)، کب (۱۹۹۵) و Imperial Valley (۱۹۷۹) به‌عنوان زمین لرزه‌های مورد استفاده در تحلیل تاریخچه‌ی زمانی بهره‌گیری شده است. سه زمین لرزه‌ی نورتریج (۱۹۹۴)، کب (۱۹۹۵) و Imperial Valley (۱۹۷۹) عموماً در طرح سازه‌های جداسازی شده، به‌ویژه برای ارزیابی رفتار تحت لرزه‌های شدید حوزه‌ی نزدیک، به کار گرفته می‌شود.^[۴] معیار گزینش نگاشت‌های تاریخچه‌ی زمانی، وجود دامنه‌های شدید سرعت و تغییر مکان و نیز تأثیرات ویژه‌ی جنبش‌های

جداسازها در مدل نرم‌افزاری استفاده شده است. بار مرده‌ی طبقات سرپوشیده 700 kg/m^2 و بار زنده‌ی آن 400 kg/m^2 است و برای بارگذاری بام از بار مرده 600 kg/m^2 و سر بار زنده 150 kg/m^2 استفاده شده است. مقاطع به‌کار رفته در روسازه از نوع پروفیل نوردشده‌ی IPE برای اعضای تیر، و قوطی برای اعضای ستون است.

از آنجا که عملکرد روسازه‌های مورد نظر در برابر زمین لرزه‌های حوزه‌ی نزدیک مبنای ارائه‌ی طرح نهایی است، ابتدا با استفاده از ضوابط طرح سازه‌های جداسازی شده در دو آیین‌نامه‌ی $ASCE 7-05$ و $AISC 360-05$ ، طرح اولیه‌ی روسازه با به‌کارگیری نرم‌افزار $SAP 2000 v 11.0.8$ به روش ایستای معادل به دست می‌آید. سپس این طرح براساس معیارهای پذیرش ارائه‌شده در دستورالعمل $FEMA 356$ برای طراحی سازه‌ها به روش عملکردی، تحت تحلیل ایستای بارافزون قرار گرفته و مقاطع تا برآورد سطح عملکرد مورد نیاز اصلاح می‌شود. رفتار سازه‌های اصلاح شده در فرایند تحلیل ایستای غیرخطی در برابر ۳ نگاشت حوزه‌ی نزدیک با دوره بازگشت 2475 سال (متناسب با سطح خطر دو) مورد ارزیابی پویای غیرخطی قرار گرفته و در صورت برآورده‌نشدن معیارهای پذیرش در اعضای سازه‌ی، طرح اصلاح می‌شود. با به دست آمدن طرح نهایی برای هر دو نمونه با سطح عملکرد استفاده‌ی بی‌وقفه و سطح عملکرد ایمنی جانی، عملکرد سازه با مقاطع کاهش یافته (متناظر با سطح عملکرد ایمنی جانی) تحت ۳ نگاشت حوزه‌ی نزدیک با دوره بازگشت 475 سال نیز بررسی می‌شود. در نهایت مقدار کاهش در فولاد مصرفی در دو طرح ارائه‌شده برای دو سطح عملکرد متفاوت مقایسه می‌شود. نمایی از مدل‌های ساختمان‌های ۵ و ۸ طبقه در نرم‌افزار $SAP 2000 v 11.0.8$ در شکل ۱ نشان داده شده است.

۳. مشخصات سیستم جداساز

جداسازهای مورد استفاده در این پژوهش، جداگرهای لاستیکی با هسته‌ی سربی^۲ است که یکی از پرکاربردترین نوع جداساز است و مشخصات آن برای هر دو سازه ۵ و ۸ طبقه در جدول ۱ ارائه شده است. روابط مورد استفاده در طرح جداسازها نیز ذکر شده است.^[۴]

جدول ۱. مشخصات جداسازهای مورد استفاده.

K_2/K_1	F_y	K_1	K_{eff}	D_M	D_D	β_M	β_D	T_M	T_D	سازه
(%)	(kN)	(kN/m)	(kN/m)	(cm)	(cm)	(%)	(%)	(s)	(s)	
۱۰	۴۳,۹۳	۲۶۴۴,۶۴	۴۴۹,۶۱	۳۹	۲۱	۱۷	۲۵	۲,۸	۲,۵	۵ طبقه
۱۰	۶۶,۴۳	۳۹۹۹,۲۸	۶۷۹,۹۱	۳۹	۲۱	۱۷	۲۵	۲,۸	۲,۵	۸ طبقه

جدول ۲. مشخصات نگاشت‌های تاریخی‌های زمانی.

زلزله	ایستگاه	فاصله (km)	PGA ^o (g)			PGV (cm/s)			PGD (cm)			سطح خطر
			PGA	PGA	PGA ^o	PGV	PGV	PGV	PGD	PGD	PGD	
Northridge ۱۹۹۴	Arleta Fire Station	۹٫۲	۰٫۳۴	۰٫۳۱	۰٫۵۵	۴۰٫۴۴	۲۳٫۱۳	۱۷٫۷۱	۱۵٫۰۸	۱۰٫۶۶	۸٫۶۲	۱
Northridge ۱۹۹۴	LA Dam	۲٫۶	۰٫۵۱	۰٫۳۵	۰٫۴۲	۶۳	۵۰	۱۹٫۴۶	۲۱٫۲۵	۱۵٫۰۹	۸٫۶۹	۱
Imperial Valley ۱۹۷۹	EL centro Array ۵	۱	۰٫۵۲	۰٫۳۸	۰٫۵۴	۴۶٫۸۷	۹۰٫۵۳	۳۸٫۴۳	۳۵٫۴	۶۳	۱۹٫۸	۱
Tabas ۱۹۷۸	Tabas	۳	۰٫۸۳۵	۰٫۸۵	۰٫۶۹	۹۷٫۷۶	۱۲۱٫۲۲	۴۴٫۴۱	۳۸٫۷	۹۵	۱۶٫۴	۲
Kobe ۱۹۹۵	Takatory	۰٫۳	۰٫۶۱	۰٫۶۱	۰٫۲۷	۱۲۷٫۲	۱۲۰٫۷	۱۶	۳۵٫۷	۳۳٫۷	۴٫۴۷	۲
Northridge ۱۹۹۴	Sylmar Converter station	۶٫۲	۰٫۶۱	۰٫۹	۰٫۵۹	۱۱۷٫۴	۱۰۲٫۲	۳۴٫۶	۵۴٫۳	۴۵٫۲	۲۵٫۷	۲

جدول ۳. مقادیر تغییر مکان هدف روسازه.

سطح عملکرد				سازه
LS		IO		
D' _M	D' _D	D' _M	D' _D	
(cm)		(cm)		۵ طبقه
۳۰	۱۷	۴۰	۲۰	۵ طبقه
۲۸	۱۶	۳۹	۲۰	۸ طبقه

روسازه نسبت داده شده است. نقاط تغییر مکان هدف سازه‌های مورد بررسی در جدول ۳ ارائه شده است.

$$Q_{G1} = 1/1 (D + L_{eff}), \quad Q_{G2} = 0/9D \quad (2)$$

که در آن D بار مرده و L_{eff} سربار زنده مؤثر بر سازه است.

$$D'_D = \frac{D_D}{\sqrt{1 + \left(\frac{T_e}{T_D}\right)^2}}, \quad D'_M = \frac{D_M}{\sqrt{1 + \left(\frac{T_e}{T_M}\right)^2}} \quad (3)$$

در این روابط، D'_M و D'_D نقاط هدف در سطح خطر یک و دو، و T_e زمان تناوب معادل روسازه ثابت مطابق تعاریف ارائه شده در دستورالعمل FEMA۳۵۶ است. سازه‌های به دست آمده از تحلیل ایستای غیرخطی، در مرحله‌ی بعد در برابر تحلیل پویای غیرخطی قرار گرفته و در صورت ارضا نشدن سطح عملکرد مورد نیاز از سازه، مقاطع به دست آمده در مراحل پیشین اصلاح می‌شود. شایان توجه است که نگاشت‌های معرفی شده با مقیاس طبیعی به سازه اعمال شده است. هر سه مؤلفه‌ی متعامد یک زمین‌لرزه، به صورت همزمان بر سازه اثر داده شده و اثرات

حوزه‌ی نزدیک، همچون فرایند جهت‌پذیری و فاصله از گسل لرزه‌زا بوده است. [۴] مشخصات نگاشت‌های یاد شده و سطح خطر متناظر با هر یک در جدول ۲ ارائه شده است. از آنجا که در هر سطح از خطر تعداد نگاشت‌های مورد استفاده کم‌تر از ۷ عدد است، مبنای طرح براساس بیشینه تقاضای ایجاد شده در سازه پایه‌گذاری شده است.

۵. فرایند طراحی روسازه

طرح روسازه در سازه‌های جداسازی شده، عموماً تحت تأثیر ویژگی‌های جداساز قرار دارد. در طراحی اولیه‌ی روسازه به روش ایستا، باید برش پایه‌ی حاصل بیشتر باشد از: ۱. برش پایه‌ی نظیر یک ساختمان مشابه پایه ثابت، با زمان تناوب طرح جداساز (T_D)؛ ۲. برابر نیروی لازم برای فعال‌سازی کامل سیستم جداساز که برابر است با ۱/۵ برابر نیروی تسلیم در سیستم‌های نرم‌شونده همانند جداسازهای لاستیکی با هسته‌ی سربی، بیش‌تر باشد. در جداسازهای مورد استفاده در این طرح، نیروی لازم برای فعال‌سازی کامل سیستم جداساز بر فرایند طراحی حاکم بوده است.

پس از انجام تحلیل ایستای معادل و طرح روسازه به روش مقاومت نهایی، سازه‌ی به دست آمده تحت تحلیل ایستای غیرخطی بارافزون قرار می‌گیرد. براساس ضوابط موجود در دستورالعمل FEMA۳۵۶، ابتدا باید سازه تحت اثر بارگذاری‌های قائم ارائه شده در رابطه‌ی ۲ قرار بگیرد، و سپس تحت الگوی بار جانبی متناسب با حاصل ضرب جرم ساختمان در شکل مد اول آن تا تغییر مکان هدف به دست آمده از رابطه‌ی ۳، واقع در مرکز جرم سیستم جداساز قرار گیرد. سطح عملکرد روسازه در نقطه‌ی هدف مشخص شده، مبنای پذیرش یا رد آن است. در این پژوهش مفصل و معیارهای پذیرش براساس ضوابط موجود در دستورالعمل FEMA۳۵۶ به اعضای

جدول ۴. اعضای روسازه در دو سطح عملکرد در ساختمان ۵ طبقه.

سطح عملکرد				طبقه
LS		IO		
مقطع ستون	مقطع تیر	مقطع ستون	مقطع تیر	
Box ۲۸×۲۸×۲	IPE۳۳°	Box ۲۸×۲۸×۲	IPE۳۶°	۱
Box ۲۸×۲۸×۲	IPE۲۷°	Box ۲۸×۲۸×۲	IPE۳۶°	۲
Box ۲۸×۲۸×۲	IPE۲۷°	Box ۲۸×۲۸×۲	IPE۳۳°	۳
Box ۲۰×۲۰×۱٫۵	IPE۲۴°	Box ۲۰×۲۰×۱٫۵	IPE۳۰°	۴
Box ۲۰×۲۰×۱٫۵	IPE۲۰°	Box ۲۰×۲۰×۱٫۵	IPE۲۴°	۵

جدول ۵. اعضای روسازه در دو سطح عملکرد در ساختمان ۸ طبقه.

سطح عملکرد				طبقه
LS		IO		
مقطع ستون	مقطع تیر	مقطع ستون	مقطع تیر	
Box ۳۴×۳۴×۲	IPE۳۶°	Box ۳۶×۳۶×۲	IPE۵۰°	۱
Box ۳۴×۳۴×۲	IPE۳۶°	Box ۳۴×۳۴×۲	IPE۵۰°	۲
Box ۳۰×۳۰×۲	IPE۳۶°	Box ۳۰×۳۰×۲	IPE۴۵°	۳
Box ۳۰×۳۰×۲	IPE۳۳°	Box ۳۰×۳۰×۲	IPE۴۰°	۴
Box ۲۵×۲۵×۱٫۵	IPE۳۰°	Box ۲۸×۲۸×۲	IPE۴۰°	۵
Box ۲۴×۲۴×۱٫۵	IPE۳۰°	Box ۲۸×۲۸×۲	IPE۳۳°	۶
Box ۲۲×۲۲×۱٫۵	IPE۲۷°	Box ۲۲×۲۲×۱٫۵	IPE۳۰°	۷
Box ۲۰×۲۰×۱٫۵	IPE۲۲°	Box ۲۰×۲۰×۱٫۵	IPE۲۴°	۸

صلب و روسازه‌ی طراحی شده براساس معیارهای ایمنی جانی را «روسازه‌ی نرم» می‌نامیم.

با توجه به نمودارهای ارائه شده در شکل‌های ۳ و ۴، چرخش خمیری اعضای سازه‌ی به شدت تحت تأثیر دامنه‌های بلند امواج سرعت و تغییر مکان نداشت زمین لرزه بوده است، به گونه‌ی که مؤلفه‌های دارای شتاب بیشینه‌ی کم‌تر و دامنه‌های سرعت و جابه‌جایی بالاتر، موجب ایجاد خسارت و پیشروی بیشتر سازه در ناحیه‌ی خمیری شده است که از نمونه‌های آن می‌توان به تفاوت پاسخ غیرخطی روسازه به دو مؤلفه‌ی زمین لرزه‌ی نورتریج (۱۹۹۴) و Imperial Valley (۱۹۷۹) اشاره کرد. در هر دوی این زمین لرزه‌ها، پاسخ به دست آمده از روسازه در برابر مؤلفه‌ی دارای شتاب بیشینه‌ی کم‌تر، بحرانی‌تر بوده است. همچنین رفتار هر دو سازه در برابر زمین لرزه‌ی Imperial Valley (۱۹۷۹) تا حدود زیادی تحت تأثیر چرخش‌های خمیری اعضا در ناحیه‌ی ایمنی جانی است که علت آن وجود بیشینه دامنه‌ی سرعت $90/5 \text{ cm/s}$ و بیشینه دامنه‌ی تغییر مکان 63 cm در نداشت مربوط به مؤلفه‌ی جهت y زمین لرزه است. نزدیکی این اعداد به دلیل وجود تأثیرات پدیده‌هایی همچون جهت‌پذیری در نداشت برجای مانده از زلزله^[۶] به مقادیر نظیر در زمین لرزه‌های انتخابی در سطح خطر دو، باعث ایجاد شباهت رفتاری سازه در برابر این زمین لرزه، به عملکرد در

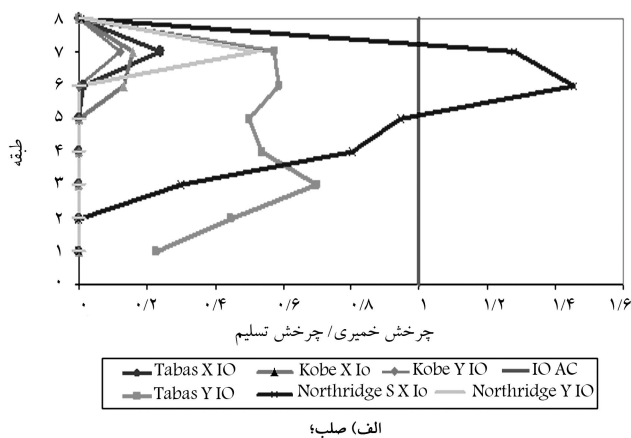
$p - \delta$ و $P - \Delta$ در فرایند تحلیل در نظر گرفته شده است. جداول ۴ و ۵ مقاطع نهایی به دست آمده در هر سطح عملکرد را برای دو سازه ۵ و ۸ طبقه نشان می‌دهد. همچنین منحنی ظرفیت هر دو سازه، در دو سطح عملکرد متعارف و کاهش یافته به جهت مقایسه‌ی میزان شکل‌پذیری و ظرفیت باربری آن، در شکل ۲ نشان داده شده است. مطابق انتظار، افت سطح عملکرد ساختمان موجب کاهش شدید ظرفیت باربری می‌شود و در مقابل، شکل‌پذیری آن افزایش خواهد یافت.

۶. ارزیابی پاسخ‌های دینامیکی سازه در سطوح خطر

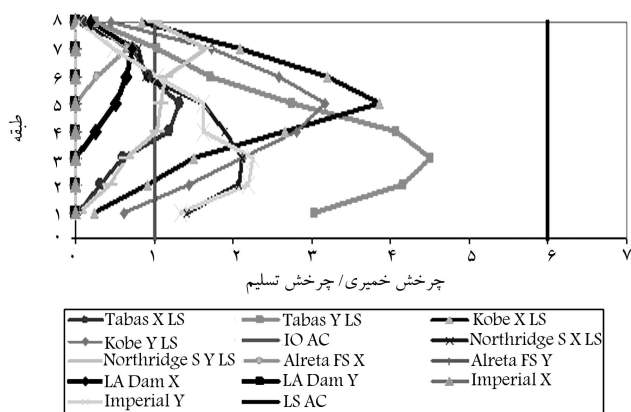
یک و دو

۱.۶. بیشینه چرخش خمیری اعضا

بررسی مفاصل ایجاد شده در هر دو گروه سازه‌های طراحی شده در حالت استفاده‌ی بی‌وقفه و ایمنی جانی، تفاوت رفتار سازه در دو امتداد x و y را که به ترتیب در برابر مؤلفه‌های افقی زمین لرزه قرار گرفته است، نمایان می‌سازد. از این پس به‌طور قراردادی، روسازه‌ی طراحی شده برای سطح عملکرد بی‌وقفه، روسازه‌ی



الف) صلب؛



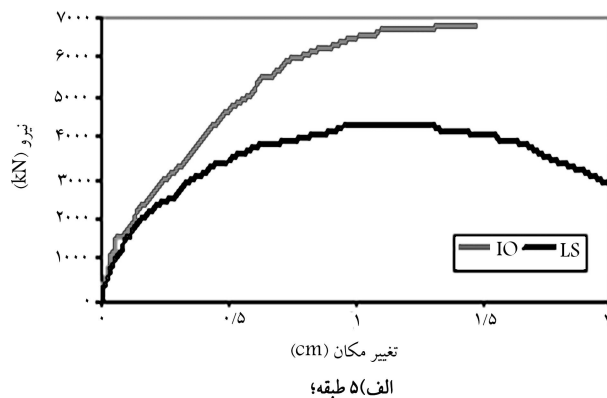
ب) نرم در برابر جنبش های نزدیک به گسل.

شکل ۴. بیشینه چرخش خمیری تیرها در سازه‌ی ۸ طبقه.

سطح خطر دو شده است. رفتار سازه در زلزله‌ی Imperial Valley (۱۹۷۹)، به خوبی نشان می‌دهد که مقدار شتاب بیشینه‌ی نگاشت نمی‌تواند معیار مناسبی برای طراحی سازه‌های مقاوم، به ویژه در حوزه‌ی نزدیک به گسل باشد. زیرا رفتار سازه در این مناطق به شدت تحت تأثیر موج‌های پراورزی سرعت و جابه‌جایی است. بنابراین با پذیرش عملکرد مشابه سازه در برابر زمین‌لرزه‌ی Imperial Valley (۱۹۷۹) با زمین‌لرزه‌های سطح خطر دو و با در نظر گرفتن معیارهای پذیرش مشخص شده در نمودارهای چرخش اعضا، پاسخ سازه در هر دو حالت صلب و نرم قابل پذیرش است. از دیدگاه کلی، رفتار سازه در برابر زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک سطح خطر یک، در حدود استفاده‌ی بی‌وقفه بوده مگر در مواردی که شدت دامنه‌های سرعت و تغییر مکان نگاشت، نزدیک به مقادیر نظیر در زمین‌لرزه‌های حوزه‌ی نزدیک سطح خطر دو باشد که در این موارد نیز، سطح عملکرد سازه در حد ایمنی جانی خواهد بود. یادآور می‌شود اندک چرخش خمیری ایجاد شده بیش از مرز پذیرش استفاده‌ی بی‌وقفه در روسازه‌ی صلب قابل چشم‌پوشی است.

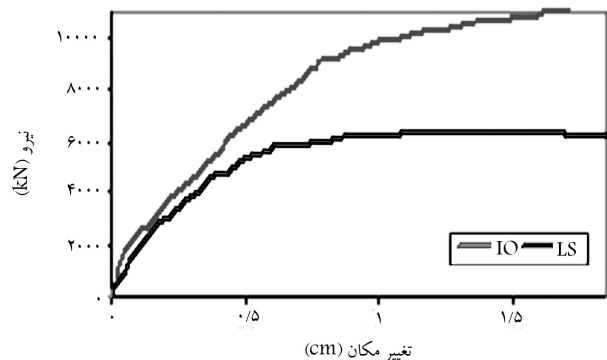
۲.۶. برش پایه

نتایج مربوط به مقایسه بیشینه برش پایه در تحلیل دینامیکی غیرخطی، برای روسازه صلب و نرم و برای هر دو ساختمان ۵ و ۸ طبقه، در جداول ۶ و ۷ خلاصه شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رود، با نرم‌تر شدن روسازه و ورود به ناحیه‌ی غیرخطی، از میزان برش پایه منتقل شده به آن کاسته می‌شود.



تغییر مکان (cm)

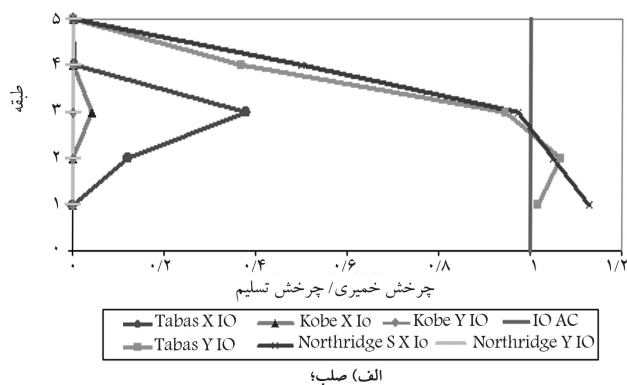
الف) ۵ طبقه؛



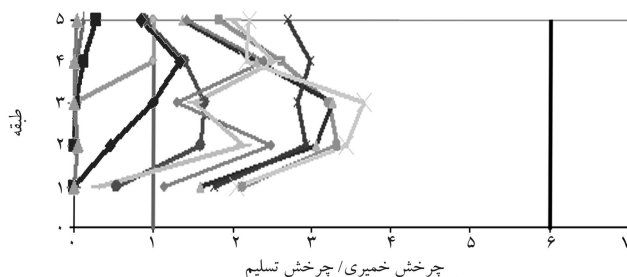
تغییر مکان (cm)

ب) ۸ طبقه در دو حالت سطح عملکرد متعارف و کاهش یافته در تحلیل بارافزون.

شکل ۲. مقایسه‌ی منحنی ظرفیت سازه.



الف) صلب؛



چرخش خمیری / چرخش تسلیم

ب) نرم در برابر جنبش های نزدیک به گسل.

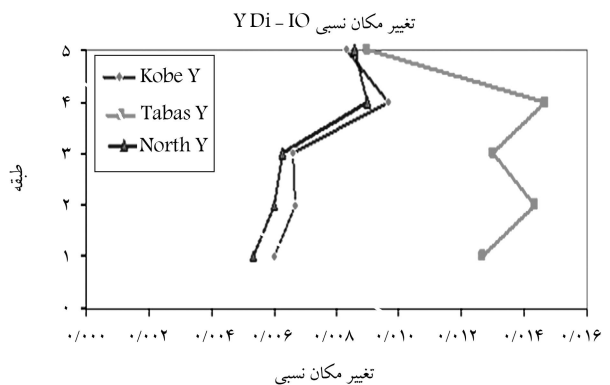
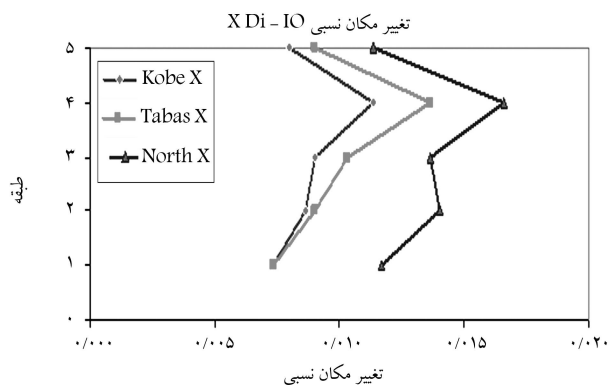
شکل ۳. بیشینه چرخش خمیری تیرها در سازه‌ی ۵ طبقه.

جدول ۶. برش پایه (کیلو نیوتن) در ساختمان ۵ طبقه در دو حالت روسازه‌ی صلب و انعطاف پذیر.

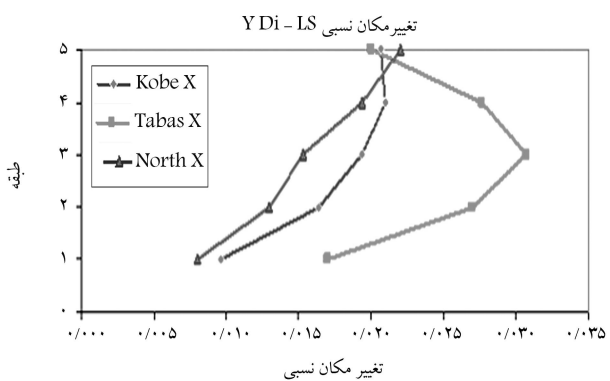
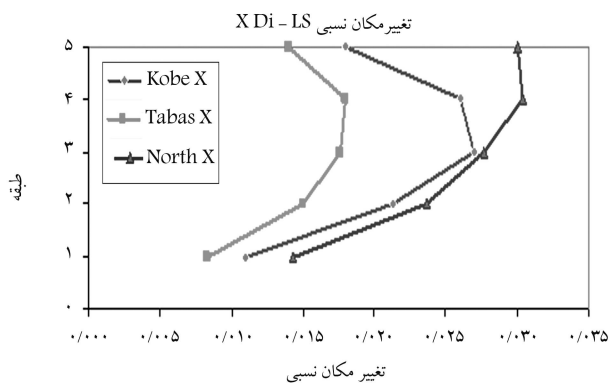
برش پایه (kN)				زلزله
سطح عملکرد				
LS		IO		
Y	X	Y	X	
۳۲۵۰	۴۹۹۰	۳۳۴۶	۶۶۸۸	Northridge ۱۹۹۴
۳۵۹۷	۳۷۲۰	۳۷۸۴	۴۳۵۷	Kobe ۱۹۹۵
۴۸۲۳	۳۴۰۱	۷۰۵۷	۴۶۰۲	tabas ۱۹۷۹

جدول ۷. برش پایه (کیلو نیوتن) در ساختمان ۸ طبقه در دو حالت روسازه‌ی صلب و انعطاف پذیر.

برش پایه (kN)				زلزله
سطح عملکرد				
LS		IO		
Y	X	Y	X	
۵۰۹۲	۷۵۶۲	۵۲۱۶	۱۰۶۳۲	Northridge ۱۹۹۴
۵۳۷۱	۵۷۶۰	۶۰۰۷	۶۳۶۵	Kobe ۱۹۹۵
۸۹۱۸	۵۷۴۸	۱۱۸۱۵	۶۶۷۹	tabas ۱۹۷۹



شکل ۵. بیشینه نسبت تغییر مکان درون طبقه‌ی در سازه‌ی ۵ طبقه‌ی صلب، در راستای x و y.



شکل ۶. بیشینه نسبت تغییر مکان درون طبقه‌ی در سازه‌ی ۵ طبقه‌ی نرم، در راستای x و y.

۳.۶. بیشینه‌ی تغییر مکان نسبی طبقات

در شکل‌های ۵ تا ۸، بیشینه نسبت تغییر مکان نسبی طبقات در طول زمین لرزه، به ترتیب برای حالات سطح عملکرد استفاده‌ی بی‌وقفه و ایمنی جانی نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود، در حالت ایمنی جانی و پیشروی چشم‌گیر سازه در ناحیه‌ی خمیری، تغییر مکان نسبی طبقات نسبت به حالت استفاده‌ی بی‌وقفه به شدت افزایش یافته است. با این حال، با توجه به محدوده‌ی چرخش خمیری اعضا، تغییر مکان‌های نسبی به دست آمده برای سازه‌ی با کاربری متعارف، کاملاً قابل پذیرش است. همچنین، اختلاف رفتار سازه در دو راستای x و y به دلیل اختلاف در میزان انرژی نگاشت در دو جهت، بر روی این تصاویر به روشنی نمایان است.

۷. مقایسه‌ی وزن روسازه در دو حالت سطح عملکرد

استفاده‌ی بی‌وقفه و ایمنی جانی

مقدار وزن اسکلت روسازه برای هر دو ساختمان و در هر سطح عملکرد، در جدول ۸ ارائه شده است. چنان که از نتایج برمی‌آید، با افزایش تعداد طبقات سازه، درصد کاهش فولاد مصرفی از سطح عملکرد استفاده‌ی بی‌وقفه به ایمنی جانی افزایش یافته است. ارقام به دست آمده نشان می‌دهند بهره‌گیری هم‌زمان از فن جلدسازی از پایه در راستای کاهش نیاز لرزه‌ی بر روی سازه، و استفاده از مفاهیم طراحی براساس عملکرد و ظرفیت خمیری اعضای روسازه، به طرح سازه‌های اقتصادی برای تأمین ایمنی جانی ساکنین آن می‌انجامد.

جدول ۸. کاهش میزان فولاد مصرفی در دو طرح عملکرد استفاده‌ی بی‌وقفه و ایمنی جانی.

کاهش	وزن روسازه (تن)		سازه
	سطح عملکرد		
(%)	LS	IO	
۱۳	۱۲۴٫۱	۱۴۲٫۶	۵ طبقه
۲۰	۲۳۴٫۶	۲۹۱٫۹	۸ طبقه

۸. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، دو سازه‌ی ۵ و ۸ طبقه‌ی جداسازی شده برای عملکرد در دو سطح استفاده‌ی بی‌وقفه (سازه‌ی با اهمیت بالا) و ایمنی جانی (سازه‌ی با اهمیت متوسط) در برابر زمین‌لرزه‌های شدید حوزه‌ی نزدیک، متناسب با سطح خطر دو طراحی شد، که نتایج حاصل از تحلیل در ادامه خلاصه می‌شود. همچنین یادآور می‌شود که نتایج به دست آمده در این پژوهش محدود به سازه‌های جداسازی شده‌ی کوتاه‌مرتبه و میان‌مرتبه بوده و ارائه‌ی نظرات کلی‌تر در گرو انجام پژوهش‌های تکمیلی است.

۱. رفتار سازه در هر دو سطح عملکرد، به شدت وابسته به میزان انرژی زلزله‌ی ورودی است، به گونه‌ی که با اندک اختلاف در میزان بیشینه دامنه‌ی موج سرعت و تغییر مکان نگاشت‌های حوزه‌ی نزدیک، میزان پیشرفت سازه در ناحیه‌ی خمیری، دستخوش تغییراتی چشمگیر می‌شود.

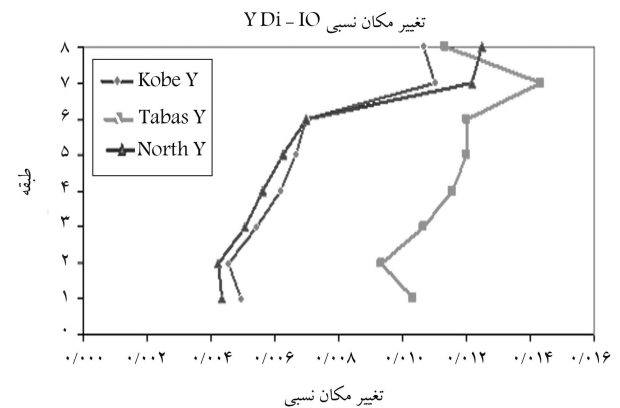
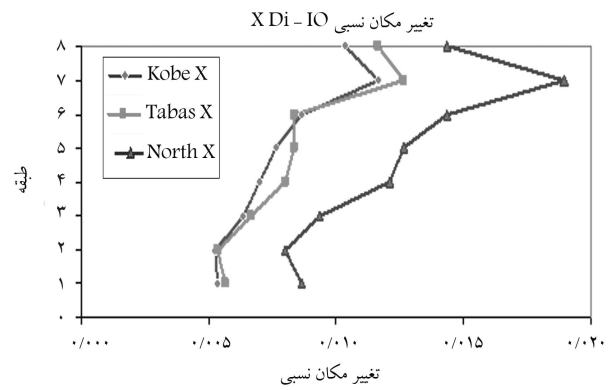
۲. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که شتاب بیشینه‌ی نگاشت زمین‌لرزه، نمی‌تواند معیار مناسبی برای تخمین میزان انرژی ورودی به پیکره‌ی سازه باشد و برای گزینش زلزله‌های طراحی در حوزه‌ی نزدیک به گسل، استفاده از مقادیر سرعت و تغییر مکان جایگزین مناسب‌تری است.

۳. با کاهش سطح عملکرد مورد انتظار از روسازه، از حالت استفاده‌ی بی‌وقفه به ایمنی جانی، و امکان پیشروی تغییر شکل اعضای سازه‌ی بی‌ناحیه‌ی خمیری، برش پایه‌ی ساختمان کاهش می‌یابد. بنابراین با وجود نرمی در روسازه، کارکرد جداسازها در کاهش برش پایه همچنان موفقیت‌آمیز بوده است.

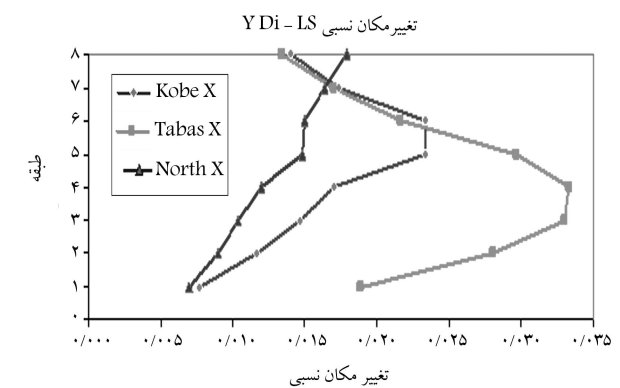
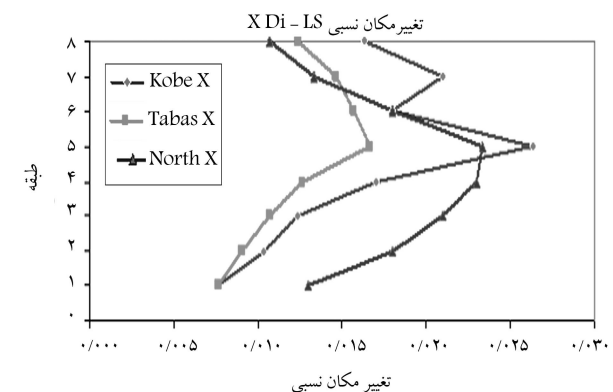
۴. تغییر مکان‌های بین طبقه‌ی در سازه‌ی با سطح عملکرد ایمنی جانی، نسبت به حالت استفاده‌ی بی‌وقفه افزایش یافته است، که طبق تعاریف موجود برای سطح عملکرد ایمنی جانی، امری پذیرفته شده است.

۵. بررسی رفتار روسازه‌ی نرم‌تر در برابر زمین‌لرزه‌های حوزه‌ی نزدیک، در محدوده‌ی سطح خطر یک، نشان‌گر عملکرد سازه در حدود استفاده‌ی بی‌وقفه است. در این حالت، در صورتی که در نگاشت‌های سرعت و تغییر مکان زمین‌لرزه دامنه‌های شدید وجود داشته باشد، رفتار روسازه در محدوده‌ی ایمنی جانی قرار خواهد گرفت که نمونه‌ی آن در زمین‌لرزه‌ی Imperial Valley (۱۹۷۹) با مقادیر $PGA=0.38g$ و $PGV=90.5\text{ cm/s}$ و $PGD=63\text{ cm}$ دیده شد.

۶. ارقام به دست آمده از میزان کاهش فولاد مصرفی در روسازه در دو حالت استفاده‌ی بی‌وقفه و ایمنی جانی، با افزایش ارتفاع ساختمان روندی صعودی داشته است، به گونه‌ی که در ساختمان ۵ طبقه شاهد ۱۳٪ کاهش و در ساختمان ۸ طبقه شاهد ۲۰٪ کاهش هستیم. این مقادیر با توجه به کارکرد مناسب جداسازها با وجود تسلیم اعضا و رفتار در فاز خمیری، استفاده‌ی هم‌زمان از فن جداسازی از پایه و روش‌های طراحی براساس عملکرد را در ارائه‌ی یک طرح اقتصادی و حافظ ایمنی جانی کاربران آن، خردمندانه و توجیه‌پذیر می‌کند.



شکل ۷. بیشینه نسبت تغییر مکان درون طبقه‌ی در سازه‌ی ۸ طبقه‌ی صلب، در راستای x و y.



شکل ۸. بیشینه نسبت تغییر مکان درون طبقه‌ی در سازه‌ی ۸ طبقه‌ی نرم، در راستای x و y.

1. elastic capacity
2. lead rubber bearing

پانوشت

3. ASCE/SEI 7-05, *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, American Society of Civil Engineering, 1801 Alexander Bell Drive, Reston, Virginia 20191 (2006).
4. Naeim, F. and Kelly, J.M., *Design of Seismic Isolated Structure, from Theory to Practice*, Wiley, Chichester, U.K. (1999).

منابع

1. Federal Emergency Management Agency, *Commentary on the National Earthquake Hazard Reduction Program Guidelines for Seismic Rehabilitation of Buildings*, FEMA 356, Washington, DC (2000).
2. ANSI/AISC 360-05, *Specification for Structural Steel Buildings*, American Institute of Steel Construction, inc., Chicago, Illinois 60601-1802 (2005).
5. Bozorgnia, Y. and Bertero, V.V. "Earthquake engineering from engineering seismology to performance-based engineering", CRC PRESS LLC, 2000 N.W. Corporate Blvd., Boca Raton, Florida 33431 (2004).
6. Tehranizadeh, M. and Meshkatodini, A., *Seismic Behavior Assessment of Tall Buildings Under Near-Fault Ground Motions*, PhD Thesis, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran (2005).