تقدیم به :

جان باختگان زلزله های ایران

سخن مؤلف

سال ۷۶ موضوع پایان‌نامه کارشناسی خود را با عنوان «خواص مکانیکی و فیزیکی پلیمرها و لاستیک‌های مورد استفاده در ایزولاسیون لرزه‌ای پایه» انتخاب کردم و بسیار علاقمند بودم در خصوص طراحی و ساخت جداسازها و میراگرها فعالیت کنم. در دانشکده مهندسی شیمی و نیز متالورژی حدود یک سال وقت صرف کردم و اطلاعات مفیدی کسب کردم. بعدها نیز در چند مرحله تصمیم به اقداماتی گرفتم ولی به دلایلی منصرف می‌شدم. بعد از ورود به مقطع دکتری نیز چندین پایان‌نامه کارشناسی ارشد در خصوص میراگرها تعریف کردم که بیشتر در راستای نیازهای بهسازی لرزه‌ای سازه‌های موجود بود. در بازه زمانی ۱۳۸۲ تا ۱۳۸۶ دوره‌های متعددی در نقاط مختلف کشور برای معرفی این سیستم‌ها برگزار کردیم که یکی از مهم‌ترین آنها در سال ۱۳۸۴ و در کرمان بود. در بخش‌های مهندسی چند وزارتخانه نیز دوره‌های آموزشی متعددی برگزار کردیم.

در آن اوایل حتی برخی از افرادی که با جنبه‌های علمی موضوع نیز تا حدودی آشنا بودند و یا مدرس دانشگاه بودند نسبت به عملکرد این سیستم‌ها اظهار شک و تردید می‌کردند! خود این امر بسیار عجیب بود. در سال‌های ۱۳۸۳ به بعد دوست عزیزم دکتر پیمان رحمت‌آبادی به‌طور جدی و با اعتماد به این سیستم‌ها تلاش زیادی کرد تا ترویج و فرهنگ‌سازی شود. متأسفانه حدود ده سال طول کشید تا بالاخره مقاومت‌های موجود در جامعه مهندسی و کارفرمایی از بین رفت و بعدها گروه‌های مختلفی وارد این حوزه شدند. حتی این گروه‌ها نیز در اوایل راه خود با اینرسی و مقاومت بالای کارفرمایان و نیز جامعه مهندسی در این حوزه مواجه بودند. امروزه در مجموع می‌توان گفت هرچند فاصله داریم با میزان متناسب استفاده از این فناوری‌ها ولی باز هم تلاش-های امیدبخشی انجام شده است و باید با جدیت بیشتری نیز دنبال شود.

از همان اوایل شروع به کار کتب دستنامه زلزله، مطالب فراوانی در این زمینه گرداوری کردم تا در قالب یکی از این کتب تدوین و چاپ کنم. به دلیل نیازهای متعددی که در حوزه‌های دیگر احساس می‌کردم، برخی کتاب‌ها کندتر پیش رفت. در طول این چند سال برخی خوانندگان محترم درخواست‌هایی برای تسریع تدوین برخی کتب برنامه قبلی داشتند. در خصوص کتاب مرتبط با مباحث میراگر و جداساز، در حال حاضر تا تکمیل کتاب مورد نظر فاصله نسبتا زیادی هست، ولی می‌شود مطالب مرتبط ولی پراکنده‌ای که در چند کتاب از دوره دستنامه تاکنون چاپ شده است را کنار هم قرار داد تا افرادی که از این به بعد دنبال چنین مطالبی می‌گردند بخشی از این نیاز را ساده‌تر رفع کنند.

کتاب حاضر که ترکیبی از مطالب برخی کتب دستنامه است، به ترتیب شامل فصول زیر است:

۱–فصل دهم کتاب مبانی مهندسی زلزله (دستنامه ۳)

۲–فصل هشتم کتاب مهندسی زلزله پیشرفته (دستنامه ۴)

۳– مقاله با عنوان مقاوم‌سازی لرزه‌ای پل‌ها با استفاده از میراگرهای الحاقیارائه شده در دوازدهمین کنفرانس سراسری دانشجویان مهندسی عمران (آبان ۸۴)

http://dastnameh.mech.sharif.ir/wp-content/uploads/2015/07/Tabeshpour_MoqavemSazi-Larzeei-Pol_84-8.pdf

۴– گزیده فایل زیر:

Evaluation of Displacement-Based Analysis and DesignMethods for Steel Frames with Passive Energy Dissipators

M.S. Williams and F. Albermani

۵– فصل نهم کتاب تحلیل لرزه‌ای سازه‌ها (داتتا)

۶– فصل پنجم کتاب مسائل مهندسی زلزله کاربردی (دستنامه ۷)

تولید و چاپ کتاب حاضر به دلیل پیگیری برخی از دوستان در خصوص تجمیع مطالب پراکنده در چند کتاب بود تا علاوه بر استفاده راحت‌تر، باعث ترویج و فرهنگ‌سازی بیشتر این فناوری‌ها در صنعت ساختمان کشور شود.

شاید مزیت این کتاب این باشد که در مجموع شامل دو بخش متفاوت است. بخش اول که بیشتر جنبه عمومی و کاربردی و مثال‌های متعدد استفاده از این سیستم‌ها را نشان می‌دهد و مخصوصا برای کارفرمایان و عموم مناسب است. بخش دوم جنبه علمی و محاسباتی دارد و برای دانشجویان و مهندسان مفید و قابل استفاده است.

از آقای مهندس پیمان رجاییان که در نمونه‌خوانی و ویرایش فصل چهارم کمک کردند و نیز قبلا فصل پنجم این کتاب را در قالب کتاب تحلیل لرزه‌ای با دقت ویرایش نمودند، صمیمانه تشکر می‌کنم.

از مهندسان و صاحب‌نظران محترم صمیمانه تقاضا دارم که اینجانب را مورد منت قرار داده و نظرات و پیشنهادات خود را به اینجانب اطلاع دهند، تا مورد نظر قرار گیرد.

محمدرضا تابش‌پور

تهران، ۱۳۹۶

tabeshpour@yahoo.com

فهرست مطالب

فصل اول:
فناوری‌های کنترل ۱

۱.۱ مقدمه ۲
۲.۱ جداسازی لرزه‌ای ۲
۳.۱ میراگر ۱۰

فصل دوم:
معرفی میراگر و کاربرد آن در بهسازی لرزه‌ای ۱۵

۱.۲ مقدمه ۱۶
۲.۲ انواع میراگر ۱۷
۱.۲.۲ میراگر اصطکاکی ۱۷
۱.۱.۲.۲ میراگر اصطکاکی پال ۱۷
۲.۱.۲.۲ نیروی لغزش بادبند اصطکاکی ۱۸
۳.۱.۲.۲ میراگر اصطکاکی چرخشی ۱۹
۲.۲.۲ میراگر سیال لزج ۲۰
۳.۲.۲ میراگرهای فلزی ۲۳
۳.۲ مقایسه حلقه‌های چرخه‌ای انواع میراگر ۲۳
۴.۲ مقایسه میراگر اصطکاکی با میراگر سیال لزج ۲۴
۵.۲ معیار طراحی ۲۴
۶.۲ تحلیل دینامیکی غیرخطی ۲۴
۷.۲ موارد کاربردی ۲۵

فصل سوم:
بهسازی لرزه‌ای پل‌ها با استفاده از میراگرهای الحاقی ۴۰

۱.۳ مقدمه ۴۱
۲.۳ موارد کاربرد ۴۱
۳.۳ استفاده از میراگرهای سیال لزج در مقاوم‌سازی لرزه‌ای پل‌ها ۴۲
۱.۳.۳ پل Ok-Yeo ۴۴
۲.۳.۳ پل Chun-Su ۴۶
۳.۳.۳ پل E-Po ۴۷
۴.۳.۳ پل‌های Kang- Dong و Dong-Yun ۴۸

فصل چهارم:
مبانی تحلیل و طراحی ۵۰

۱.۴ مقدمه ۵۱
۲.۴ انتخاب انواع میراگر ۵۲
۳.۴ پارامترهای طراحی ۵۶
۱.۳.۴ طیف پاسخ ۵۶
۲.۳.۴ بررسی طیف‌های زلزله های مورد استفاده ۵۶
۴.۴ طراحی ساختمان ۵۷
۱.۴.۴ قاب خمشی ۵۷
۲.۴.۴ قاب های دارای میراگر ۵۷
۵.۴ روش‌های تحلیل و طراحی ۵۸
۱.۵.۴ مدل‌سازی سازه ۵۸
۲.۵.۴ مدل‌سازی میراگرها ۵۹
۳.۵.۴ روش‌های تحلیل پوش‌اور ۵۹
۱.۳.۵.۴ روش FEMA 356 ۶۱

۲.۳.۵.۴ روش پوش‌اور مودال ۶۲
۳.۳.۵.۴ روش طیف ظرفیت (ATC 40, 1996) ۶۳
۴.۳.۵.۴ نکاتی پیرامون استفاده از این روش‌ها ۶۵
۴.۵.۴ روش‌های طراحی ساده برای قاب‌های دارای میراگر ۶۶
۱.۴.۵.۴ روش گام به گام بر پایه تحلیل استاتیکی خطی ۶۶
۲.۴.۵.۴ روش میرایی لزج معادل ۶۷

فصل پنجم:
کنترل لرزه‌ای سازه‌ها ۶۸

۱.۵ مقدمه ۶۹
۲.۵ جداسازی لرزه‌ای ۷۰
۱.۲.۵ تکیه‌گاه لاستیکی چند لایه (*LRB*) ۷۰
۲.۲.۵ سیستم تکیه‌گاه نیوزلند ۷۲
۳.۲.۵ جداساز اصطکاکی فنری (*R – FBI*) ۷۴
۴.۲.۵ سیستم جداساز اصطکاکی خالص ۷۵
۵.۲.۵ تکیه‌گاه لغزشی الاستیک ۷۵
۶.۲.۵ سیستم پاندولی اصطکاکی (*FPS*) ۷۷
۳.۵ جداسازی‌های تکیه‌گاهی و مشخصات آن‌ها ۷۸
۱.۳.۵ طرح هندسی ۸۲
۴.۵ تحلیل ساختمان‌های دارای جداساز ۸۴
۱.۴.۵ تحلیل ساختمان‌های دارای جداساز با پی‌های جدا شده ۸۵
۲.۴.۵ روش حل ۸۸
۳.۴.۵ تحلیل ساختمان دارای جداساز با دال پایه ۹۲
۵.۵ طراحی ساختمان‌های دارای جداساز پایه ۱۰۰
۱.۵.۵ طراحی مقدماتی (طراحی جداساز و اندازه‌بندی اولیه سازه جداسازی شده) ۱۰۱
۲.۵.۵ تحلیل پاسخ سازه دارای جداساز ۱۰۴
۳.۵.۵ تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی ۱۰۵
۶.۵ میراگر جرمی تنظیم شده ۱۱۰

۱.۶.۵ تحلیل مودی کوپله ۱۱۷
۲.۶.۵ تحلیل مستقیم ۱۱۸
۳.۶.۵ تحلیل فضای حالت ۱۱۸
۷.۵ میراگرهای ویسکوالاستیک ۱۲۲
۱.۷.۵ مدل سازی میراگرهای ویسکوالاستیک ۱۲۲
۲.۷.۵ سیستم $MDOF$ با میراگر ویسکوالاستیک ۱۲۶
۳.۷.۵ روش شبه نیروی تکراری ($P-F$) ۱۲۹
۴.۷.۵ روش انرژی کرنشی مودی ۱۳۰
۵.۷.۵ حل فضای حالت ۱۳۲
۶.۷.۵ روش تحلیل طیف پاسخ ۱۳۶
۸.۵ کنترل سازه‌ای فعال ۱۳۷
۱.۸.۵ پایداری ۱۴۰
۲.۸.۵ کنترل‌پذیری و مشاهده پذیری ۱۴۱
۳.۸.۵ شاهد حالت یا ناظر وضعیت ۱۴۳
۹.۵ الگوریتم‌های کنترل فعال ۱۴۷
۱.۹.۵ تکنیک جانمایی قطب ۱۴۷
۲.۹.۵ کنترل بهینه خطی کلاسیک ۱۵۲
۳.۹.۵ کنترل بهینه لحظه‌ای ۱۵۸
۴.۹.۵ محدودیت‌های عملی ۱۶۰
۱۰.۵ کنترل نیمه‌فعال ۱۶۲
۱.۱۰.۵ وسایل کنترل نیمه‌فعال ۱۶۲
۲.۱۰.۵ الگوریتم‌های کنترل ۱۶۴

فصل ششم:

چند مسأله از کنترل سازه‌ها ۱۷۵

۱.۱ مقدمه

کلمات نوین یا جدید واژه‌های نسبی هستند. در مقایسه با گستره‌ی تاریخچه‌ی معماری، تمام نظام مهندسی زلزله می‌تواند به‌صورت «جدید» مورد توجه قرار گیرد. رویکرد طرح ظرفیت، که مهندسان سازه را قادر می‌سازد تا سازه‌های مقاوم در برابر فروریزش را طراحی کنند فقط به سی سال قبل برمی‌گردد. در راستای اهداف این فصل، لغت جدید (نوین) در مورد پیشرفت‌هایی به‌کار می‌رود که کم‌تر از بیست سال از ظهور آن‌ها می‌گذرد.

یکی از نکات مهم درخصوص اجزای غیرسازه‌ای این است که هم باعث خسارت به سازه می‌شود و هم با ایجاد وقفه در کارکرد سازه، هزینه‌ی جانبی بزرگی را ایجاد می‌کند.

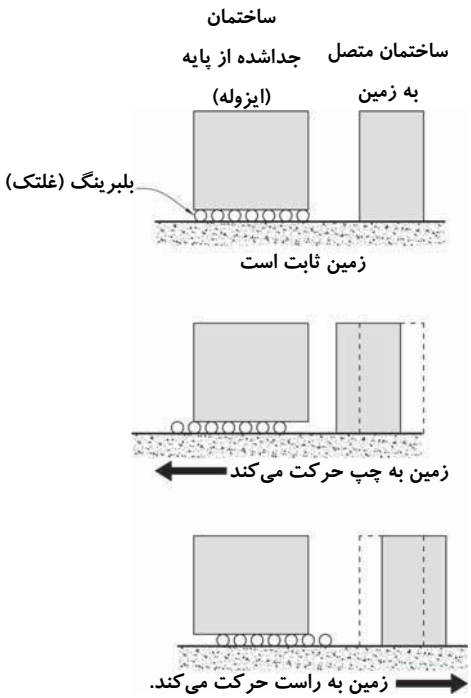
انواع فناوری‌های مقاوم لرزه‌ای در این فصل مطرح می‌شوند که شامل طیف وسیعی هستند. این فصل با جداسازی لرزه‌ای به‌عنوان رویکردی ساده اما متحول یافته به‌منظور غلبه بر زلزله، آغاز شده و سپس بر دستگاه‌های جذب انرژی تمرکز دارد که اغلب به‌نام میراگرها شناخته می‌شوند. سپس، پیشرفت‌های اخیر در جلوگیری از خرابی مورد ملاحظه قرار می‌گیرد. پس از اشاره به تقاضای روز افزون برای پیکربندی‌های سازه‌ای خلاقانه و قابل‌توجه جهت پتانسیل جذب انرژی زلزله، دو رویکرد طراحی معرفی می‌شوند. یکی از آن دو که طراحی براساس عملکرد است به معماران بیش‌تر ارتباط دارد و پیش‌بینی مناسبی از خرابی‌ها و خسارات سازه‌ای و غیرسازه‌ای را ممکن می‌کند.

۲.۱ جداسازی لرزه‌ای

مفهوم جداسازی لرزه‌ای که اغلب، جداسازی پایه نامیده می‌شود، دارای قدمتی بیش از یک صد سال است. اولین حق اختراع توسط فیزیکدان انگلیسی، در سال ۱۹۰۹ ثبت شد که پودر تالک (طلق) را به‌عنوان ابزار جداسازی دیوارهای باربر در پی‌ها پیشنهاد کرد. البته از نظر تاریخی مواردی از اجرای جداسازی پایه در کشورهای ایران و چین اجرا شده است. استفاده از جداسازی

لرزه‌ای در پروژه‌های واقعی، تا اواخر دهـه‌ی ۱۹۷۰ آغـاز نشـد. پـس از آن زمـان، تقریبـا ۲۰۰۰ ساختمان در سراسر جهان عمدتاً در ژاپن، آمریکا، اروپا و نیوزیلند مجهز به جداساز شده‌اند. ژاپـن، صعود ناگهانی و چشم‌گیری را در جداسازی لرزه‌ای پس از زلزله‌ی ۱۹۹۵ کوبـه تجربـه کـرد. در حال حاضر (سال ۲۰۰۸)، ۱۵۰۰ ساختمان در ژاپن مجهز به جداساز هستند. به‌ویژه بعـد از کوبـه، ژاپنی‌ها حاضر شدند که هزینه‌های اضافی مربوط به جداسـازی سـاختمان‌هـا را پرداخـت کننـد. تقریباً تمامی بیمارستان‌های جدید در ژاپن، دارای جداساز لرزه‌ای هستند و ایـن رونـد در ایـالات متحده و نیوزیلند در حال افزایش است.

زیبایی جداسازی لرزه‌ای، سادگی مفهومی آن است. تصور کنید که سـاختمانی بـر روی بلبرینـگ ساخته شده است. در حالی ساختمان در طی زلزله، تقریباً بدون حرکت است، ولی پی‌هـای آن در معرض انرژی امواج زلزله قرار دارند و به همراه زمین به شدت به طرفین حرکت می‌کنند. غلتیدن بلبرینگ‌ها، حرکت نسبی را در میان روسازه و زمین به‌وجود می‌آورد (شکل ۱.۱).

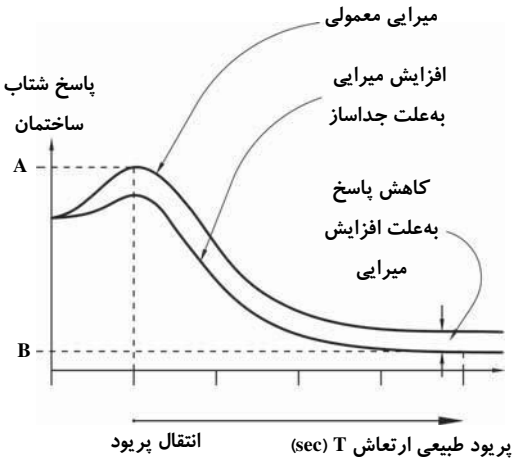


شکل ۱.۱
حرکـت نسـبی بـین زمـین و سـاختمان جداشـده از پایـه به‌وسیله‌ی غلطـک و سـاختمان معمولی (متصل به زمین).

اگرچه مفهوم ساده است، اما پیاده‌سازی آن پیچیده‌تر است. اگر فصل مشترک میان روسازه و پی تقریبا بدون اصطکاک باشد، چه اتفاقی در طول طوفان سـهمناک مـی‌افتـد؟هر سیسـتم جداسـاز لرزه‌ای باید در برابر باد مقاوم باشد. هم‌چنین باید دارای مکانیزم مرکـزی جهـت اعمـال نیـروی

مداوم به روسازه‌ی جداساز به منظور بازگشت به وضعیت اولیه‌ی آن، در طی لرزش باشد. در نهایت، میرایی الزامی است. این سیستم، پاسخ لرزه‌ای روسازه و تغییر شکل‌های نسبی افقی را کاهش می‌دهد و نیز تکیه‌گاه‌ها و جزییات دیگر نیازمند طراحی هستند.

جداسازی لرزه‌ای، پاسخ لرزه‌ای روسازه را با افزایش پریود طبیعی ارتعاش و میرایی آن کاهش می‌دهد. این دو اثر در شکل ۲.۱ نشان داده شده‌اند.



شکل ۲.۱
طیف پاسخ و کاهش شتاب به‌علت انتقال پریود بر اثر جداشدن از پایه (افزایش پریود)

در طول زلزله‌ی طرح، شتاب بیشینه آن، در نقطه‌ی A داده شده است. وجود جداساز انعطاف‌پذیر افقی، پریود طبیعی آن را از ۰٫۵ ثانیه به ۲٫۵ ثانیه افزایش داده است. در این پریود، پاسخ لرزه‌ای به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد و حتی با میرایی ایجاد شده در میان روسازه و پی‌ها دچار کاهش بیش‌تری می‌شود. نقطه‌ی B بیانگر شتاب بیشینه ساختمان دارای جداساز بوده و معمولاً ۲۰ درصد تا ۲۵ درصد نقطه‌ی A است.

توانایی جداسازی لرزه‌ای، در کاهش پاسخ لرزه‌ای یا شتاب بیشینه ساختمان‌ها با مشاهده و اندازه‌گیری‌های ارتعاش، در طی چندین زلزله تأیید شده‌اند. در طول زلزله‌ی ۱۹۹۴ نورثریج لس‌آنجلس، ساختمان بیمارستان آموزشی دانشگاه کالیفرنیای جنوبی دارای جداساز لرزه‌ای از هرگونه خسارت در امان ماند، در حالی که نه بیمارستان مجاور به نحو شدیدی خسارت دیدند و به اجبار تخلیه شدند. گزارش زیر خلاصه اندازه‌گیری‌های شتاب برای دو ساختمان در زلزله‌های مجزاست؛ ساختمان نخست، بیمارستان مذکور و بعدی، مرکز رایانه در ژاپن در زلزله‌ی ۱۹۹۵کوبه است:

شتاب بیشینه اندازه‌گیری شده‌ی میدان آزاد زمین $0.49g$ بود در حالی‌که شتاب بیشینه در اغلب سازه کم‌تر از $0.13g$ و شتاب بیشینه در سقف به علت تقویت در دو طبقه فوقانی $0.21g$ بود.

با تحلیل مدل بیمارستان بدون جداساز، آشر و همکارانش نتیجه‌گیری کردند که شتاب‌ها در تمامی سازه‌ی دارای پایه‌ی گیردار بین $0/37g$ تا $1/03g$ در نوسان است و خسارت به محتویات داخل ساختمان و بروز مشکل در تأسیسات، تقریبا قطعی است.

مرکز رایانه‌ی ذخایر پستی غرب ژاپن(The West Japan Postal Savings capputer center) حرکات زمینی را با شتاب ساخت‌گاه بیشینه ۰/۴ در زلزله‌ی ۱۷ ژانویه‌ی ۱۹۹۵ کوبه تجربه کرد. مرکز رایانه دچار هیچ‌گونه خسارتی نشد و حداکثر شتاب ثبت شده در ساختمان $0/12g$ بود. در یک ساختمان نزدیک و با پایه‌ی گیردار و دارای تقریباً همان ارتفاع که مجهز به حس‌گر بود حداکثر شتاب ثبت شده در سقف را $1/18g$ نشان داد.

جداسازی لرزه‌ای بیمارستان هفت طبقه دانشگاه، شتاب بیشینه زمین را تا میزان تقریبی ۵۰ درصد شتاب زمین کاهش داد. اما همان‌گونه که رابینسون اشاره دارد، جداسازی لرزه‌ای مؤثرتر از آن است:

این بیمارستان ۷ طبقه شتاب زمین $0/49g$ را تجربه کرد درحالی‌که شتاب پشت بام با کاهش ۱/۸ برابری، تنها $0/27g$ بود. بیمارستان الیو ویو، در فاصله‌ی نزدیک‌تر به رومرکز زلزله، شتاب طبقه‌ی بالای ۲/۳۱ را تجربه کرد که در مقایسه با شتاب پایه‌ی آن به اندازه‌ی $0/82g$، بزرگ‌نمایی به اندازه ۲/۸ بوده است. مقایسه میان بیمارستان دارای جداساز لرزه‌ای با تکیه‌گاه‌های سربی لاستیکی در بیمارستان آموزشی دانشگاه و ساختمان فاقد جداساز در بیمارستان الیو ویو مزیتی را با ضریب $2/8\times1/8\simeq5$ نشان می‌دهد که به نفع بیمارستان دارای جداساز تمام می‌باشد.

عملکرد ساختمان مرکز رایانه‌ی واقع در ژاپن، حتی کاهش بیش‌تری را در شتاب بیشینه نشان می‌دهد. نه فقط روسازه‌ی یک ساختمان با جداساز لرزه‌ای، دستخوش شتاب بیشینه کم‌تری نسبت به پی آن می‌شود بلکه برخلاف ساختمان با پایه‌ی گیردار، شتاب‌ها را تا ارتفاع آن به‌طور چشم‌گیری بهبود می‌بخشد.

کاهش تأثیرگذار مشابه در شتاب‌های روسازه‌ی ساختمان در طی دو زلزله‌ی دیگر در ژاپن اندازه‌گیری شدند. نه تنها ساکنین و محتویات ساختمان با جداساز لرزه‌ای، شتاب‌های با شدت کم‌تری را تجربه کردند بلکه هر حرکتی به‌صورت حرکات رفت و برگشتی با پریود ارتعاش بین ۲ تا ۳ ثانیه احساس شد. این حرکت بسیار آرام در مقایسه با حرکات پرتابی و ناگهانی شدید در ساختمان‌های متداول است. در ساختمان‌های با جداساز، تقریباً تمامی حرکت نسبی میان پی‌ها و سقف در محل جداساز رخ می‌دهد. جای تعجب نیست که جداسازی لرزه‌ای، گزینه‌ی جذابی برای ساختمان‌هایی است که بلافاصله پس از خسارت ناشی از زلزله، مورد استفاده قرار گیرند یا ساختمان‌هایی پرهزینه بوده و یا دارای محتویات گران‌قیمت و غیرقابل جایگزین هستند.